



## HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée et soutenue publiquement par

**Stéphane Jacquemoud**

le vendredi 29 novembre 2002

### **Composition du jury :**

<i>Président</i>	M. Claude KLAPISZ, Professeur, Université Paris 7
<i>Rapporteurs</i>	M. Ranga MYNENI, Professeur, Boston University M. Bernard SAUGIER, Professeur, Université Paris Sud
<i>Examineurs</i>	M. Frédéric BARET, Directeur de Recherches, INRA Avignon M. Philippe LOGNONNÉ, Professeur, Université Paris 7 M. Ismaël MOYA, Directeur de Recherches, CNRS Orsay

## SOMMAIRE

Curriculum Vitae	3
Prix et publications	6
Introduction	10
CHAPITRE I. Les propriétés optiques des feuilles : connaissance, modélisation, applications	12
I.1. Développement d'un modèle de propriétés optiques des feuilles : PROSPECT	12
I.2. Développement d'un appareil de mesure de la composition biochimique des feuilles : RAMIS	14
I.3. Propriétés optiques directionnelles des feuilles	17
I.4. Structure tridimensionnelle des feuilles et modèles de lancer de rayons	20
CHAPITRE II. Les propriétés optiques des couverts végétaux : modélisation, application	24
II.1. Estimation des variables des couverts végétaux	25
II.2. Etude de sensibilité de PROSAIL	28
II.3. Comparaison de quatre modèles de réflectance des couverts végétaux	30
II.4. Détermination de configurations optimales	32
Conclusion-Pespectives	34
Publications jointes	35

## CURRICULUM VITAE

### Stéphane JACQUEMOUD

31 avenue Ledru Rollin  
75012 Paris  
tél : 01 43 07 42 97

né le 12 septembre 1965 à Moutiers (Savoie, France)  
37 ans

Laboratoire Environnement et Développement  
Université Paris 7 – Case 7071 – 2 place Jussieu  
75251 Paris Cedex 5  
tél : 01 44 27 60 47 ; fax : 01 44 27 81 46  
e-mail : jacquemo@ccr.jussieu.fr

Maître de conférences en physique, section 37 du CNU  
Université Paris 7 – Denis Diderot  
Recruté en septembre 1995  
1<sup>ère</sup> classe en septembre 2000

### Formation

1989 – 1992	Thèse de doctorat de physique "Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux : développement d'un modèle de réflectance spectrale", obtenue avec les félicitations du jury, spécialité Méthodes Physiques en Télédétection, université Paris 7. Cofinancement CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) / INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). Directeur de thèse : Frédéric Baret, INRA Avignon
1988 – 1989	DEA Méthodes Physiques en Télédétection, université Paris 7
1985 – 1988	Ingénieur agronome de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier et DEA Sciences Agronomiques, option Sciences du Sol, université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier
1983 – 1985	Biologie Mathématiques Supérieures et Spéciales, lycée du Parc, Lyon
1981 – 1983	Baccalauréat, Série C, mention AB

### Expérience professionnelle

09/95 –	Maître de conférences en physique, affecté à l'IUP Génie de l'Environnement et au Laboratoire Environnement et Développement, université Paris 7 (responsable : Jean-Pierre Frangi)
09/94 – 08/95	Chercheur post-doctoral, Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis, USA (responsable : Susan Ustin)
11/93 – 08/94	Chercheur contractuel, Laboratoire Associé de Météorologie Physique (CNRS / université Blaise Pascal), Clermont Ferrand, France (responsable : Bernard Pinty)
10/92 – 10/93	Visiteur scientifique, Joint Research Centre, Institute for Remote Sensing Applications, Advanced Techniques Unit, Ispra, Italie (responsable : Alois Sieber)

### Activités d'enseignement

2002 –	DEA Chimie de la pollution atmosphérique	cours : <i>fonctionnement du système atmosphérique</i>
2001 –	CAPES Sciences de la Vie et de la Terre	cours : <i>introduction à la télédétection</i>
1999 –	DEA de Biomathématique	cours : <i>méthodes numériques et programmation</i>
1995 –	IUP Génie de l'Environnement	cours/TD : <i>rayonnement, transfert radiatif, télédétection</i> (IUP1) cours/TD : <i>initiation à l'informatique scientifique</i> (IUP1) cours/TD : <i>informatique appliquée à la physique</i> (IUP2) cours/TD : <i>modélisation informatique</i> (IUP3) TP : <i>physique expérimentale</i> (IUP1)
1995 – 1998	IUP Génie de l'Environnement	cours/TD : <i>mathématiques appliquées</i> (IUP1) TP : <i>projets industriels</i> (IUP2 & IUP3)

## Responsabilités administratives

2002 – 2001	membre de la CSE 35 <sup>e</sup> -60 <sup>e</sup> sections, collège B, université de Marne-la-Vallée (nommé)
2001 –	membre du Conseil Pédagogique de l'UFR des Sciences Physiques de la Terre, directeur d'études à l'IUP, université Paris 7 (nommé)
2001 – 2002	membre du groupe sectoriel "biologie – écologie", chantier PROSPEA de réforme des enseignements agricoles, DGER, Ministère de l'Agriculture
1999 – 2003	membre du CNU 37 <sup>e</sup> section, collège B (nommé)
1998 –	responsable des pôles "méthodologies et outils" et "langues et communication" à l'IUP Génie de l'Environnement, université Paris 7
1998 – 2002	membre de la CSE 34 <sup>e</sup> -37 <sup>e</sup> sections, collège B, université Paris 7 (élu)
1996 – 2000	président du Conseil des Etudes de l'UF Environnement, université Paris 7 (élu)

## Contrats de recherche

2002 – 2006	prime d'encadrement doctoral et de recherche / MENRT
2002 – 2004	Agence Spatiale Européenne "Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model". Collaboration : LURE-Orsay, universités de Valencia, Valladolid, York, Dutch National Aerospace Laboratory. Budget global : <b>150,000 €</b>
2002 – 2006	GDR 1536 FLUOVEG "Utilisation de la fluorescence pour l'estimation de la productivité végétale". Collaboration : CNRS, INRA, Universités Paris 11, Toulouse 3, Franche-Comté, CEA, CNES. Budget global : <b>122,000 €</b>
1998 – 2002	GDR 1536 FLUOVEG "Utilisation de la fluorescence pour l'estimation de la productivité végétale". Collaboration : CNRS, INRA, Universités Paris 11, Toulouse 3, Franche-Comté, CEA, CNES. Budget global : <b>83,800 €</b>
2001 – 2002	Bureau de la valorisation et des relations industrielles de l'université Paris 7. "Développement d'un radiomètre portable permettant de mesurer <i>in situ</i> la concentration en chlorophylle, la teneur en eau et la teneur en matière sèche des feuilles". Collaboration : LPICM-Palaiseau et LURE-Orsay. Montant : <b>30,500 €</b>
2000 – 2001	Programme National de Télédétection Spatiale. "Mesure et modélisation des propriétés bidirectionnelles des feuilles". Collaboration : LURE-Orsay et INRA-Lusignan. Montant : <b>7,600 €</b>
1999 – 2000	Programme National de Télédétection Spatiale. "Inversion de quatre modèles de transfert radiatif pour caractériser la végétation par télédétection. Application aux données aéroportées POLDER dans le cadre de l'expérience ALPILLES-ReSeDA". Collaboration : CETP-Vélizy et CESBIO-Toulouse. Montant : <b>3,400 €</b>
1998 – 2002	prime d'encadrement doctoral et de recherche / MENRT
1998 – 1999	Programme National de Télédétection Spatiale. "Estimation des propriétés biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles. Application aux données POLDER". Collaboration : University of California-Davis-USA. Montant : <b>5,800 €</b>
1997 – 1998	contrat Matra Marconi Space. "Estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles et de l'indice foliaire (LAI) des couverts végétaux par inversion d'un modèle de transfert radiatif". Montant : <b>37,500 €</b>
1996	expérience utilisant l'instrument EGO (European Goniometric Facility) du Joint Research Centre, Ispra, Italie. "Investigation of new inversion techniques to extract information on vegetation canopies". Collaboration : JRC-Ispra-Italie, DLR-Berlin-Allemagne
1993-1994	contrat Joint Research Centre. "Modelling of biophysical parameters of vegetation from high spectral resolution data". Contract N° 5501-93-10 ED ISP F. Montant : <b>46,000 €</b>

## Encadrement ou co-encadrement d'étudiants en DEA ou en thèse

2001 –	co-directeur, thèse de doctorat Méthodes Physiques en Télédétection de G. Martinoty (IGN). <i>Identification de matériaux à partir d'images aériennes en multi-recouvrements, par calcul de modèle radiométrique et identification de BRDF/BTF</i>
2001 –	co-encadrant, thèse de doctorat Modélisation et Instrumentation en Physique de G. Pavan. <i>Développement d'un radiomètre portatif permettant de mesurer in situ la concentration en chlorophylle, la teneur en eau, et la teneur en matière sèche des feuilles : le projet RAMIS</i>
2001	encadrant, stage de DEA Modélisation et Instrumentation en Physique de G. Pavan. <i>Etude de sensibilité des propriétés optiques d'une feuille basée sur les plans d'expériences et le modèle PROSPECT</i>
1998 – 2001	encadrant, thèse de doctorat Méthodes Physiques en Télédétection de C. Bacour. <i>Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales</i>
1996	encadrant, stage de DEA Méthodes Physiques en Télédétection de C. Bacour. <i>Etude comparative de quatre modèles physiques de réflectance des couverts végétaux dans le domaine optique – Application à l'estimation de paramètres biophysiques</i>
1996	co-encadrant, stage de DEA Sciences de l'Information Géographique de V. Puybonnieux-Textier. <i>Cartographie de la pollution atmosphérique, interpolation spatiale</i>

## Participation à des jurys de thèse

11/10/2002	jury de thèse de Didier Combes (université Blaise Pascal). <i>Simulation du Rayonnement Morphogénétiquement Actif (MAR) au sein d'un peuplement végétal à l'échelle de l'organe : effets de la simplification des caractéristiques de l'architecture des plantes et des propriétés optiques des feuilles</i>
3/12/2001	jury de thèse de Cédric Bacour (université Paris 7). <i>Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyse de sensibilité</i>
4/02/1999	jury de thèse de Daniella Despan (université de Marne-la-Vallée). <i>Modèles théoriques et mesures de la diffusion du rayonnement électromagnétique dans le domaine optique et radar par les sols avec des surfaces lisses et rugueuses aléatoires</i>
5/11/1996	jury de thèse de Thierry Fourty (université Paul Sabatier). <i>Estimation du contenu biochimique d'un couvert végétal à partir de données haute résolution spectrale acquises au niveau satellitaire</i>

## Activités annexes

Mise en place et gestion de quatre sites Internet :

**GREAT** : Groupement pour la Recherche, l'Enseignement et les Applications de la Télédétection

<http://www.great.jussieu.fr/>

**LED** : Laboratoire Environnement et Développement

<http://www.diderot7.jussieu.fr/Led/>

**IUP** : IUP Génie de l'Environnement

<http://www.diderot7.jussieu.fr/iup/>

**OPTICLEAF** : base de données sur les propriétés optiques des feuilles

<http://www.multimania.com/opticleaf/>

## Prix et publications

1994	prix Jean et Louis Roussel de la Société Française de Photobiologie
1988 – 2002	- 25 articles dans des revues à comité de lecture (21 de rang A + 4 de rang B) - 7 chapitres d'ouvrages - 26 actes de conférences - 1 brevet - nombreux séminaires (Allemagne, Autriche, Danemark, Etats Unis, Finlande, France, Italie, etc.)

### Revues à comité de lecture

1. Bacour C., **Jacquemoud S.**, Leroy M., Hauteceur O., Weiss M., Prévot L., Bruguier L., Chauki H. (2002), Reliability of the estimation of vegetation characteristics by inversion of three canopy reflectance models on airborne POLDER data, *Agronomie: Agriculture and Environment*, 22:555-565.
2. Bacour C., **Jacquemoud S.**, Tourbier Y., Dechambre M., Frangi J.P. (2002), Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models, *Remote Sens. Environ.*, 79(1):72-83.
3. Ceccato P., Flasse S, Tarantola S., **Jacquemoud S.**, Grégoire J.M. (2001), Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sens. Environ.*, 77(1):22-33.
4. Pinty B., Gobron N., Widlowski J.L., Gerstl S.A.W., Verstraete M.M., Antunes M., Bacour C., Gascon F., Gastellu J.P., Goel N., **Jacquemoud S.**, North P., Qin W., Thompson R. (2001), The RADIATION transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise, *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, 106(11):11,937-11,957.
5. Ustin S.L., **Jacquemoud S.**, Govaerts Y. (2001), Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis, *Plant Cell Environ.*, 24:1095-1103.
6. **Jacquemoud S.**, Bacour C., Poilvé H., Frangi J.-P. (2000), Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode, *Remote Sens. Environ.*, 74:471-481.
7. Ustin S.L., Roberts D.A., Pinzón J.E., **Jacquemoud S.**, Gardner M., Scheer G., Castañeda C.M., and Palacios-Orueta A. (1998), Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods, *Remote Sens. Environ.*, 65(3):280-291.
8. Andrieu B., Baret F., **Jacquemoud S.**, Malthus T., Steven M.D. (1997), Evaluation of an improved version of the SAIL model to simulate bidirectional reflectance of sugar beet canopies, *Remote Sens. Environ.*, 60(3):247-267.
9. Andreoli G., Verdebout J., Hosgood B., Schmuck G., A. Pedrini, **Jacquemoud S.** (1996), Indagine sulla Biochimica delle foglie per applicazioni mediante telerilevamento, *Riv. di Ing. Agr.*, 3:172-178.
10. Cierniewski J., Baret F., Verbrugge M., Hanocq J.F., **Jacquemoud S.** (1996), Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance incorporating specular effects, *Int. J. Remote Sens.*, 17(18):3691-3704.
11. Fourty Th., Baret F., **Jacquemoud S.**, Schmuck G., Verdebout J. (1996), Optical properties of dry plant leaves with explicite description of their biochemical composition: direct and inverse problems, *Remote Sens. Environ.*, 56(2):104-117.
12. Frangi J.-P., **Jacquemoud S.**, Puybonnieux-Texier V., Lazar H. (1996), Suivi spatio-temporel de la concentration en NOx en Île de France. *C.R. Acad. Sci.*, t.323, série II a, 373-379.
13. Govaerts Y.M., **Jacquemoud S.**, Verstraete M.M., Ustin S.L. (1996), Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf, *Appl. Opt.*, 35(33):6585-6598.
14. Grossman Y.L., Ustin S.L., **Jacquemoud S.**, Sanderson E., Schmuck G., Verdebout J. (1996), Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf biochemistry information from leaf reflectance data, *Remote Sens. Environ.*, 56(3):182-193.
15. **Jacquemoud S.**, Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1996), Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model, *Remote Sens. Environ.*, 56(3):194-202.
16. **Jacquemoud S.**, Baret F., Andrieu B., Danson F.M., Jaggard K. (1995a), Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL model on sugar beet canopy reflectance data – Application to TM data, *Remote Sens. Environ.*, 52:163-172.
17. **Jacquemoud S.**, Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1995b), Investigation of leaf biochemistry by statistics, *Remote Sens. Environ.*, 54(3):180-188.
18. Baret F., Vanderbilt V.C., Steven M.D., **Jacquemoud S.** (1994), Use of spectral analogy to evaluate canopy reflectance sensitivity to leaf optical properties, *Remote Sens. Environ.*, 48:253-260.
19. Baret F., **Jacquemoud S.**, Hanocq J.F. (1993a), About the soil line concept in remote sensing, *Adv. Space Res.* 13(5):281-284.
20. Baret F., **Jacquemoud S.**, Hanocq J.F. (1993b), The soil line concept in remote sensing, *Remote Sens. Reviews*, 7:65-82.
21. **Jacquemoud S.** (1993), Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: Theoretical study, *Remote Sens. Environ.*, 44: 281-292.
22. **Jacquemoud S.**, Baret F., Hanocq J.F. (1993), Modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols. Application au concept de droite des sols, *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XXVIII(1):31-43.



23. Baret F., **Jacquemoud S.**, Guyot G., Leprieux C. (1992), Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands, *Remote Sens. Environ.*, 41:133-142.
24. **Jacquemoud S.**, Baret F., Hanocq J.F. (1992), Modeling spectral and bidirectional soil reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 41:123-132.
25. **Jacquemoud S.**, Baret F. (1990), PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra, *Remote Sens. Environ.*, 34:75-91.

## Chapitres d'ouvrages

1. Ustin S.L., **Jacquemoud S.**, Zarco-Tejada P., Asner G.P. (2002), Remotely Sensing of Environment Processes: State of the Science and New Directions, in *Manual of Remote Sensing: Natural Ecosystems and Environment* (A.N. Rencz, Ed), Third Edition, Volume 5, à paraître.
2. **Jacquemoud S.** (2002), Leaf optical properties, in *Reflection properties of vegetation and soil – with a BRDF data base* (M. von Schönemark, B. Geiger, and H.P. Röser, Eds), Wissenschaft & Technik Verlag (Berlin), à paraître.
3. Ustin S.L., Smith M.O., **Jacquemoud S.**, Verstraete M.M., Govaerts Y. (1998), Geobotany: Vegetation Mapping for Earth Sciences, in *Manual of Remote Sensing: Remote Sensing for the Earth Sciences* (A.N. Rencz, Ed), Third Edition, Volume 3, pages 189-248.
4. Baret F., **Jacquemoud S.** (1994), Modeling Canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics, in *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations* (J. Hill & J. Miegier, Eds), ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg, pages 145-167.
5. Verdebout J., **Jacquemoud S.**, Schmuck G. (1994), Optical properties of leaves: modelling and experimental studies, in *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations* (J. Hill & J. Miegier, Eds), ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg, pages 169-191.
6. **Jacquemoud S.**, Baret F. (1992), Estimating vegetation biophysical parameters by inversion of a reflectance model on high spectral resolution data, in *Crop structure and light microclimate: characterization and applications* (C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, and H. Sinoquet, Eds), Editions de l'INRA (Versailles), pages 339-350.
7. Guyot G., Baret F., **Jacquemoud S.** (1989), Imaging spectroscopy for vegetation studies, in *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications* (F. Toselli & J. Bodechtel, Eds), Kluwer Academic Publishers (Dordrecht), pages 145-165.

## Colloques avec actes

1. Bacour C., Baret F., **Jacquemoud S.** (2002), Information content of HyMap hyperspectral imagery, in *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Valencia (Spain), 16-20 September 2002, en préparation.
2. Bacour C., **Jacquemoud S.** (2001), Coupling spectral and bidirectional information to estimate canopy biophysical parameters by model inversion, in *Proc. Int. Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming* (IWSAPF), Freising-Weihenstephan (Germany), 16-18 January 2001, pages 74-77.
3. Bacour C., **Jacquemoud S.**, Vogt P., Hosgood B., Andreoli G., Frangi J.-P. (2001), Optimal sampling configurations for the estimation of canopy properties from BRDF data acquired with the EGO/JRC, in *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 481-486.
4. Combes D., Moya I., Andlauer J., **Jacquemoud S.**, Sinoquet H., Varlet-Grancher C. (2001), Un nouveau dispositif de mesure des propriétés optiques spectrales et bidirectionnelles de surfaces végétales, in *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 283-284.
5. **Jacquemoud S.**, Ustin S.L. (2001), Leaf optical properties: A state of the art, in *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 223-232.
6. **Jacquemoud S.**, Bacour C., Poilvé H., Frangi J.-P. (1999), Inversion de modèles de transfert radiatif pour estimer les caractéristiques d'un couvert végétal à partir de données de télédétection dans le domaine optique, in *Proc. Coll. Int. La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux*, 10-12 mai 1999, Ottawa (Canada), A. Bannari (Ed), pages 113-125.
7. **Jacquemoud S.**, Frangi J.-P., Govaerts Y., Ustin S.L. (1997), Three-dimensional representation of leaf anatomy - Application to the study of photon transport, in *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 7-11 April 1997, Courchevel (France), G. Guyot & T. Phulpin (eds), A.A. Balkema (Rotterdam), pages 295-302.
8. Ustin S.L., Scheer G.J., Castaneda C.M., **Jacquemoud S.**, Roberts D.A. (1996), Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods, in *Summaries of the 6<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 4-8 March 1996, pages 235-238.
9. Frangi J.P., **Jacquemoud S.**, Minh T., Lazar H. (1996), Prédiction spatiale et suivi temporel de la pollution atmosphérique - Cas d'étude : région parisienne, pollution par le NO<sub>2</sub>, in *Actes des Journées du Programme*

- Environnement, Vie et Sociétés "Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement"*, Paris (France), 15-17 January 1996, CNRS, pages 289-293.
10. Govaerts Y., **Jacquemoud S.**, Verstraete M.M., Ustin S.L. (1995), Modeling plant leaf bidirectional reflectance and transmittance with a three-dimensional light ray tracing approach, in *Proc. 15<sup>th</sup> Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'95)*, Florence (Italy), 10-14 July 1995, pages 1460-1462.
  11. **Jacquemoud S.**, Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1995), PROSPECT redux, in *Summaries of the 5<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 23-27 January 1995, JPL Publication 95-1, pages 99-103.
  12. Pinzon J.E., Ustin S.L., Hart Q.J., **Jacquemoud S.**, Smith M.O. (1995), Using foreground/background analysis to determine leaf and canopy chemistry, in *Summaries of the 5<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 23-27 January 1995, JPL Publication 95-1, pages 129-132.
  13. Verdebout J., **Jacquemoud S.**, Andreoli G., Hosgood B., Pedrini A., Schmuck G. (1995), A simple modelling approach to vegetation biochemistry spectroscopy in remote sensing, in *Proc. MAC-Europe'91 Final Results Workshop*, Lenggries (Germany), 4-6 October 1994, European Space Agency, WPP-88, pages 149-159.
  14. Verdebout J., **Jacquemoud S.**, Andreoli G., Hosgood B., Pedrini A., Schmuck G. (1994), Analysis of imaging spectrometer data to evaluate the biochemical content of vegetation, based on the results of a laboratory experiment, in *Multispectral and Microwave Sensing of Forestry, Hydrology, and Natural Resources*, Rome (Italy), 26-30 September 1994, EUROPTO Series, SPIE, Vol. 2314, pages 63-76.
  15. **Jacquemoud S.**, Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B., Hornig S.E. (1994), Investigation of leaf biochemistry by statistics, in *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'94)*, Pasadena (CA), 8-12 August 1994, pages 1239-1241.
  16. Verdebout J., **Jacquemoud S.**, Andreoli G., Hosgood B., Schmuck G. (1994), Investigations on the biochemical components NIR absorption features in AVIRIS and laboratory reflectance spectra of vegetation, in *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'94)*, Pasadena (CA), 8-12 August 1994, pages 993-995.
  17. Baret F., **Jacquemoud S.**, Andrieu B., Danson M., Jaggard K. (1994), Model inversion to retrieve canopy characteristics from high spectral resolution data, in *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère (France), 17-21 January 1994, Editions du CNES, pages 181-192.
  18. **Jacquemoud S.**, Flasse S., Verdebout J., Schmuck G. (1994), Comparison of several optimization methods to extract canopy biophysical parameters, in *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère (France), 17-21 January 1994, Editions du CNES, pages 291-298.
  19. Verdebout J., **Jacquemoud S.**, Andreoli G., Hosgood B. (1993), Investigation of the 1.7  $\mu\text{m}$  residual feature in the vegetation reflectance spectrum, in *Proc. 4<sup>th</sup> annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Washington D.C. (USA), 25-29 October 1993, pages 189-192.
  20. Schmuck G., Verdebout J., Ustin S., Sieber A., **Jacquemoud S.** (1993), Vegetation and biochemical indices retrieved from a multitemporal AVIRIS data set, in *Proc. 25<sup>th</sup> Int. Symp Remote Sensing and Global Environmental Change*, Graz (Austria), 4-8 April 1993, pages 273-281.
  21. Baret F., Leprieur C., **Jacquemoud S.**, Carrère V., Gu X.F., Steven M.D., Vanderbilt V.C., Hanocq J.F., Ustin S., Rondeaux G., Daughtry C.S.T., Biehl L.L., Pettigrew R.E., Modro D.H., Horoyan H., Sarto T., Despontin C., Razafindraibe H. (1992), The 1991 AVIRIS/POLDER experiment in Camargue, France, in *Proc. 3<sup>rd</sup> Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 1-5 June 1992, JPL Publication 92-14, pages 75-77.
  22. Baret F., Vanderbilt V.C., Rondeaux G., Pettigrew R.E., Hanocq J.F., Biehl L.L., Sarrouy C., Daughtry C.S.T., Steven M.D., Sarto T., Modro D.H., Guyot G., **Jacquemoud S.**, Horoyan H., Despontin C., Razafindraibe H. (1992), Directional and temporal variability of the APAR/VI relationships. The case of a sunflower canopy, in *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'92)*, Houston (TX), 26-29 May 1992, pages 1468-1470.
  23. Baret F., **Jacquemoud S.**, Guyot G., Leprieur C. (1991), De la nature des glissements spectraux: Modélisation et comparaison à l'information contenue dans les bandes larges, in *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991, ESA SP-319, pages 121-129.
  24. **Jacquemoud S.**, Baret F., Hanocq J.F. (1991), Validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol, in *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991, ESA SP-319, pages 427-430.
  25. Baret F., **Jacquemoud S.**, Leprieur C., Guyot G. (1990), Are the spectral shifts an operational concept? Critical analysis of theoretical and experimental results, in *Proc. 2<sup>nd</sup> Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 4-5 June 1990, JPL publication 90-54, pages 58-71.
  26. **Jacquemoud S.**, Baret F., Guyot G. (1989), Modelization of leaf optical properties for interpreting high spectral resolution reflectance measurements, in *Proc. 9<sup>th</sup> EARSeL Symp.*, Espoo (Finland), 27 June - 1 July 1989, pages 472-483.



## Rapports

1. Hosgood B., **Jacquemoud S.**, Andreoli G., Verdebout J., Pedrini G., Schmuck G. (1995), Leaf Optical Properties EXperiment 93 (LOPEX93), European Commission, Joint Research Centre, Institute for Remote Sensing Applications, Report EUR 16095 EN.

## Brevets

1. Frangi J.-P., **Jacquemoud S.**, De Rosny G., Equer B., Roca i Cabarrocas P., Vanderhagen R. (2002), Dispositif et procédé de radiométrie pour déterminer *in situ* le contenu biochimique de feuilles, et appareil portatif intégrant ce dispositif, Demande de brevet français n°01 09334.

## Travaux encadrés ou co-encadrés

1. Bacour C. (2001), *Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales*, thèse de doctorat "Méthodes Physiques en Télédétection", université Paris 7, 228 pages.
2. Pavan G. (2001), *Etude de sensibilité des propriétés optiques d'une feuille basée sur les plans d'expériences et le modèle PROSPECT*, DEA Modélisation et Instrumentation en Physique, université Paris 7.
3. Bacour C. (1997), *Etude comparative de quatre modèles physiques de réflectance des couverts végétaux dans le domaine optique - Application à l'estimation de paramètres biophysiques*, DEA Méthodes Physiques en Télédétection, université Paris 7.
4. Puybonnieux-Textier V. (1996), *Cartographie de la pollution atmosphérique, interpolation spatiale*, DEA Sciences de l'Information Géographique, université de Marne-la-Vallée.

## **Fonctionnement des écosystèmes terrestres - Modélisation et apports de la télédétection dans l'extraction des propriétés biogéophysiques caractérisant les surfaces naturelles**

La présence d'une atmosphère et d'océans a permis l'apparition de la vie sur Terre. Au cours des temps géologiques, atmosphère, océans et terres émergées ont façonné un environnement global auquel la vie a contribué et s'est adaptée. La végétation qui couvre une grande partie des terres émergées occupe une place importante. Or l'homme est en passe de modifier l'équilibre de cet environnement par des cultures intensives, par un pillage des ressources végétales et minérales, si bien que leur gestion, en vue de la production agricole et forestière, de l'aménagement de l'espace rural ou du maintien des équilibres naturels, est devenue un enjeu considérable. Dans certains cas, comme la diminution des ressources énergétiques et minérales, les dégradations liées à l'activité humaine sont patentes ; ces changements peuvent être plus difficiles à percevoir lorsqu'il s'agit de l'altération de la composition chimique de l'atmosphère.

En particulier, notre capacité à gérer un écosystème<sup>1</sup> agricole ou naturel repose sur notre capacité à le cartographier, à comprendre et modéliser son fonctionnement aux échelles régionales ou globales. Les mécanismes d'échanges entre l'atmosphère et la biosphère dépendent de l'état de l'atmosphère et du climat, ainsi que de processus biologiques complexes en interaction, tels que la photosynthèse, l'évapotranspiration, la décomposition de la matière organique ou encore la minéralisation des sols. Les modèles de fonctionnement des couverts végétaux et plus généralement des écosystèmes permettent de quantifier ces processus. Cependant, leur validation à grande échelle se heurte souvent à des limitations expérimentales : s'il est possible de mesurer des flux de matière et d'énergie à l'échelle d'une plante ou de quelques m<sup>2</sup>, la tâche devient plus difficile à l'échelle du champ voire impossible à celle d'une région. Qu'il s'agisse de dresser l'inventaire des cultures, d'évaluer la biomasse, de déterminer des bilans hydriques, ou encore d'évaluer l'impact d'une pollution sur un milieu naturel ou modifié, les thématiciens ont besoin d'outils à la mesure de leurs problèmes.

La télédétection qui permet d'étudier les propriétés radiométriques des objets à distance fournit des informations spatiales et temporelles qui peuvent aider à extrapoler des flux de gaz, d'éléments minéraux ou d'eau, et donc à accroître notre compréhension de la dynamique des écosystèmes. Les caractéristiques des surfaces naturelles (océans, sols, végétation,...) ou de la couche atmosphérique qui entoure la Terre sont déterminées à partir du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis dans différents domaines de longueurs d'onde. De nombreux satellites fournissent déjà des données dans les courtes longueurs d'onde (de 0,3 à 3 µm), l'infrarouge thermique (de 4 à 15 µm) et les hyperfréquences (radar ou passives de 1 mm à 50 cm). Ces données sont acquises avec des résolutions spatiales variant de quelques mètres à quelques kilomètres, et des répétitivités temporelles variant d'une demi heure à un mois. Se pose alors le problème de l'interprétation des données car les quantités mesurées par les capteurs spatiaux ne sont pas toujours reliées de façon simple et directe aux paramètres caractéristiques des objets mesurés.

Les recherches que j'ai entreprises successivement à l'INRA de Montfavet (1989-1992), au JRC d'Ispra (1992-1993), au LaMP de Clermont Ferrand (1993-1994), à l'Université de Californie (1994-1995), et que je poursuis depuis 1995 à l'université Paris 7 m'ont permis d'acquérir de solides connaissances en physique de l'environnement. Ce n'est pas une branche de la physique, comme la mécanique ou la physique des solides, mais l'étude des interactions entre les organismes vivants et leur environnement (échanges d'énergie et de masse). Mes activités de recherche sont centrées depuis une dizaine d'années sur la télédétection des couverts végétaux dans le domaine optique. Elles recouvrent aussi bien la compréhension de la physique des signaux radiométriques (spectroradiométrie, problèmes de calibration, corrections atmosphériques) que le développement d'outils mathématiques d'analyse des données (modèles de transfert radiatifs, analyse multispectrale, inversion de modèles analytiques).

Pourquoi utiliser des modèles ? Un modèle est, par définition, une représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique permettant d'en simuler son fonctionnement. En télédétection, on cherche à comprendre comment la lumière interagit avec le milieu et à traduire cette connaissance en équations. Cette démarche permet de relier le signal radiométrique aux caractéristiques biologiques et/ou

---

<sup>1</sup> unité écologique de base formée par le milieu (biotope) et les organismes animaux, végétaux et bactériens (biocénose) qui y vivent.

physiques de la cible observée. Dans le sens direct, on dispose d'un outil puissant pour simuler les conséquences d'une théorie (cf. le déterminisme de l'effet de *hot spot*), prédire des comportements qualitatifs (cf. la forme de la BRDF de la végétation en fonction du degré d'hétérogénéité de la scène) mais aussi donner des réponses quantitatives (cf. la variation des propriétés optiques des feuilles lorsque la concentration en chlorophylle augmente ou diminue). Cet outil peut aussi servir à construire des indices de végétation spécifiques à la variable d'intérêt, donc plus performants. Dans le sens inverse, on peut estimer simultanément les variables d'intérêt pour des configurations de mesure très variées. La modélisation permet enfin de développer des techniques de correction des images adaptées à la résolution spatiale et spectrale des capteurs, et donc d'étudier les changements d'échelle.

Théorie pure, modélisation et expérimentation sont indissociables en télédétection. Ainsi on attend de la théorie du transfert radiatif qu'elle explique la réflectance de la végétation, d'un modèle de réflectance qu'il prédise de nouveaux résultats, et d'une expérience qu'elle vérifie la validité de la théorie existante et qu'elle collecte des données pour éventuellement modifier le modèle. La confrontation du modèle avec des résultats expérimentaux est nécessaire pour le valider. Cette question de la validation, cruciale en télédétection où l'on voit trop souvent de "jolies" images contenant une information erronée, est présente tout au long de ce document qui, en conséquence, contient peu de "jolies" images de la Terre vue du ciel !

Ce document est organisé en deux parties distinctes mais complémentaires. La première partie traite des propriétés optiques des feuilles. Outre que leur connaissance est évidemment essentielle pour comprendre la réflectance de la végétation, leur étude dépasse le cadre de la télédétection avec de très nombreuses applications en physiologie végétale, bionique, ou imagerie de synthèse. La seconde partie décrit comment quantifier, à partir d'une image satellite par exemple, les propriétés biologiques et physiques de la végétation. Je m'attarderai sur les méthodologies et les outils, les applications opérationnelles n'en étant qu'à leurs balbutiements.

# CHAPITRE I

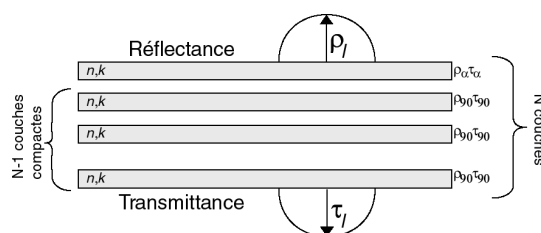
## LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES FEUILLES : CONNAISSANCE, MODÉLISATION, APPLICATIONS

Les propriétés optiques des feuilles et la réflectance du sol sont les deux variables d'entrée des modèles de réflectance des couverts végétaux qui en déterminent la variation spectrale. Leur connaissance est donc essentielle pour mieux comprendre et interpréter le trajet de la lumière dans la végétation. Les premiers travaux expérimentaux visant à mesurer la réflectance (fraction de lumière réfléchie), la transmittance (fraction de lumière transmise) et l'absorptance (fraction de lumière absorbée) des feuilles datent du début du 20<sup>e</sup> siècle. Dès lors, environ un millier d'espèces ont été étudiées, donnant lieu à autant de publications. Les approches sont cependant demeurées longtemps très descriptives : les premiers modèles physiques de propriétés optiques des feuilles datent en effet seulement des années 1960-1970. Le développement des systèmes spectro-imageurs dans les années quatre-vingt a relancé les travaux de modélisation et PROSPECT fut l'un des premiers modèles à simuler avec une bonne précision la réflectance et la transmittance hémisphériques de feuilles très variées (monocotylédones, dicotylédones ou feuilles sénescentes) sur tout le domaine solaire (de 400 à 2500 nm). La distribution angulaire de ces grandeurs optiques, les profils d'absorption dans la feuille restent beaucoup moins connus.

### I.1. Développement d'un modèle de propriétés optiques des feuilles : PROSPECT

La première version du modèle PROSPECT, aujourd'hui largement adopté par la communauté scientifique, a été développée à l'INRA d'Avignon par Frédéric Baret et moi-même dans le cadre de ma thèse de troisième cycle (1989-1992). Il s'agit d'un modèle de type transfert radiatif qui repose sur une description relativement simple de la structure interne et de la composition biochimique de la feuille (Figure 1). A l'origine, seules la chlorophylle et l'eau furent prises en compte, donc PROSPECT fonctionnait avec trois paramètres d'entrée :

- un paramètre de structure  $N$ , nombre de couches compactes indiquant le nombre moyen d'interfaces air / parois cellulaires dans le mésophylle
- une concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  exprimée en  $\mu\text{g cm}^{-2}$
- une épaisseur équivalente en eau  $C_w$  exprimée en  $\text{cm}$  ou  $\text{g cm}^{-2}$



**Figure 1.** Nomenclature du modèle PROSPECT de propriétés optiques des feuilles (Bacour, 2001).

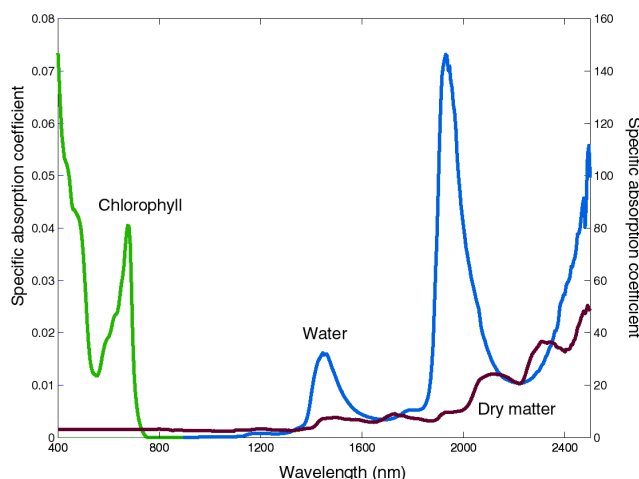
La prise en compte d'autres composés biochimiques, en particulier la cellulose + lignine (carbone) et les protéines (azote) potentiellement accessibles par télédétection grâce à la présence de bandes d'absorption spécifiques dans le moyen infrarouge, animait les scientifiques depuis quelques années. En effet, à la chute des feuilles, ces composés se retrouvent dans la matière organique des sols. Or les écologues ont montré que le rapport carbone/azote était un bon indicateur de la minéralisation de l'azote par les micro-organismes du sol, donc de la respiration des sols. Il est par exemple plus élevé chez les pinophytes (feuilles simples, épaisses, non ramifiées en forme d'aiguille) que chez les angiospermes (monocotylédones ou dicotylédones aux feuilles laminaires). La respiration des sols étant considérée comme le deuxième facteur le plus important du flux de  $\text{CO}_2$  entre les couverts végétaux et l'atmosphère, sa connaissance à différentes échelles spatiales serait particulièrement intéressante pour décrire le fonctionnement des écosystèmes terrestres.

Au cours de l'été 1993, dans le cadre d'une expérience organisée par le Joint Research Centre d'Ispra, nous avons construit la base de données LOPEX associant les propriétés optiques de feuilles fraîches et sèches (réflectance et transmittance spectrales), leurs caractéristiques biophysiques (épaisseur, teneur en eau, surface spécifique) et biochimiques (concentration en chlorophylles *a* et *b*, carotènes, protéines, cellulose, lignine, etc.). Ces données ont permis d'ajouter les concentrations en cellulose + lignine et en protéines aux trois paramètres d'entrée de PROSPECT précités. L'inversion du modèle par des méthodes itératives, c'est-à-dire l'estimation du contenu biochimique des feuilles à partir de spectres de réflectance et/ou de transmittance, a cependant fait apparaître les limites de la démarche : il n'est pas possible de déterminer la concentration en protéines sur des feuilles vertes car leur effets sont masqués par ceux de l'eau. Ceci a été depuis lors confirmé par d'autres travaux.

Dans la dernière version de PROSPECT, la teneur en matière sèche  $C_m$  exprimée en  $\text{g cm}^{-2}$  regroupe donc tous les constituants biochimiques des parois cellulaires. Cette simplification apparente présente en fait un triple intérêt : la teneur en matière sèche est en effet l'inverse de la surface spécifique des feuilles (*specific leaf area* ou SLA exprimé en  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ), variable importante en écophysiologie car associée à la croissance des plantes, donc à l'interception de la lumière et à la photosynthèse. Par exemple, 1 kg de carbone permet de produire environ 20  $\text{m}^2$  de feuilles de blé (*Triticum aestivum*, taux d'allocation du carbone dans les feuilles de 65%, SLA = 30  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) mais seulement 2  $\text{m}^2$  de feuilles d'arroche (*Atriplex sp.*, taux d'allocation du carbone dans les feuilles de 30%, SLA = 7  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ). L'autre avantage de  $C_m$  est qu'il peut s'estimer par inversion du modèle. Enfin il est très facile de mesurer  $C_m$  expérimentalement. En résumé, les quatre paramètres d'entrée de PROSPECT sont désormais :

- le paramètre de structure N
- la concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  exprimée en  $\mu\text{g cm}^{-2}$
- l'épaisseur équivalente en eau  $C_w$  exprimée en cm
- la teneur en matière sèche  $C_m$  exprimée en  $\text{g cm}^{-2}$

La Figure 2 montre la variation spectrale des coefficients spécifiques d'absorption des trois constituants biochimiques de la feuille.



**Figure 2.** Variation spectrale des coefficients spécifiques d'absorption **a)** de la chlorophylle a+b ( $\text{cm}^2 \mu\text{g}^{-1}$ ) sur l'échelle de gauche **b)** de l'eau ( $\text{cm}^{-1}$ ) et de la matière sèche ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) sur l'échelle de droite.

On constate que le spectre d'action de la chlorophylle s'étend sur tout le domaine visible entre 400 et 750 nm, avec un minimum vers 550 nm – c'est ce minimum d'absorption qui explique la couleur verte des feuilles – et un maximum vers 680 nm. Celui de l'eau est entièrement disjoint et commence après 950 nm. On reconnaît les trois pics principaux d'absorption à 1450 nm, 1950 nm et 2450 nm liés à l'étirement des liaisons O–H de la molécule d'eau (*stretching*). Enfin le spectre d'action de la matière sèche est constant dans le visible / proche infrarouge, permettant d'expliquer le plateau observé chez les feuilles albinos, et varie surtout au delà de 1200 nm. Nous avons validé PROSPECT en l'inversant sur 63 spectres de réflectance et de transmittance extraits de la base de données LOPEX : nous avons d'abord constaté une très bonne adéquation entre les spectres mesurés et ceux reconstruits à partir des paramètres estimés (écarts quadratiques moyens



*rmse* généralement inférieurs à 0.014). La comparaison entre valeurs mesurées et valeurs estimées du contenu biochimique des feuilles a montré que l'on pouvait estimer l'épaisseur équivalente en eau avec une très bonne précision ( $R^2 = 0.95$ ,  $rmse = 0.0018$  cm), et, avec plus d'incertitude, la concentration en chlorophylle a+b ( $R^2 = 0.67$ ,  $rmse = 9.1 \mu\text{g cm}^{-2}$ ) et la teneur en matière sèche ( $R^2 = 0.65$ ,  $rmse = 0.0022$  g  $\text{cm}^{-2}$ ).

Quelles sont les évolutions possibles de PROSPECT ? Il y en a plusieurs, mais à chaque fois que l'on souhaite ajouter un paramètre descriptif de la feuille, il faut se demander auparavant si ce paramètre peut être estimé par inversion à partir de données radiométriques. Tout d'abord le modèle suppose que les N couches élémentaires sont homogènes, ce qui n'est pas le cas des dicotylédones qui possèdent un parenchyme palissadique et un mésophylle spongieux bien distincts. Toutes les études expérimentales ont d'ailleurs montré des différences de propriétés optiques entre les faces supérieure et inférieure des feuilles. Comment prendre en compte la distribution spatiale des éléments absorbants et diffusants ? Ensuite le modèle ne tient pas compte de la grande diversité des surfaces foliaires : présence de cire, de trichomes, etc. A titre d'exemple, le peuplier blanc (*Populus alba*) dont la face inférieure est couverte de poils absorbants feutrés prend une couleur blanchâtre absente sur la face supérieure. La réflectance et la transmittance simulées par PROSPECT sont des valeurs moyennes intégrées sur un hémisphère qui ne représentent que partiellement la manière dont la surface des feuilles diffuse la lumière. Comment tenir compte de cette anisotropie ? L'introduction de nouveaux composés biochimiques pourrait permettre de perfectionner le modèle. Or nous avons vu que l'estimation de la lignine, de la cellulose, des protéines, etc. prises séparément conduisait à une impasse car leurs effets sont masqués par ceux de l'eau. Les pigments bruns qui apparaissent lors de la sénescence de la feuille ont été récemment introduits par Frédéric Baret. Il devrait être aussi possible, à court terme, d'isoler la chlorophylle *a*, la chlorophylle *b* et les caroténoïdes car ces pigments photosynthétiques ont des pics d'absorption à des longueurs d'onde distinctes. Enfin, les feuilles réémettent dans le rouge proche et le rouge lointain une partie de la lumière absorbée, c'est ce qu'on appelle la fluorescence chlorophyllienne. Nous envisageons d'introduire ce processus, associé à la photosynthèse, dans PROSPECT dans le cadre d'un appel d'offre de l'Agence Spatiale Européenne.

<b>Laboratoires</b>	INRA Avignon, JRC Ispra, University of California Davis, LED Paris
<b>Acteurs</b>	F. Baret (INRA Avignon), H. Poilvé (Astrium Toulouse), G. Schmuck (JRC Ispra), S.L. Ustin (University of California Davis), J. Verdebout (JRC Ispra)
<b>Etudiants</b>	T. Fourty (thèse de doctorat, INRA), C. Bacour (stage de DEA, LED) G. Pavan (stage de DEA, LED)
<b>Financements</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1993 – 1994 : Joint Research Centre. <b>Modelling of biophysical parameters of vegetation from high spectral resolution data</b></li> <li>• 1997 – 1998 : Matra Marconi Space. <b>Estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles et de l'indice foliaire (LAI) des couverts végétaux par inversion d'un modèle de transfert radiatif</b></li> <li>• 2002 – 2004 : Agence Spatiale Européenne. <b>Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model</b>. Collaboration : LURE-Orsay, université Paris 7, Universitat de Valencia, Universidad de Valladolid, York University, Dutch National Aerospace Laboratory</li> </ul>
<b>Publications</b>	Jacquemoud et Baret (1990), Jacquemoud et al. (1995b), Jacquemoud et al. (1996), Grossman et al. (1996), Fourty et al. (1996), Jacquemoud et al. (2000), Ceccato et al. (2001)

## **I.2. Développement d'un appareil de mesure de la composition biochimique des feuilles : RAMIS**

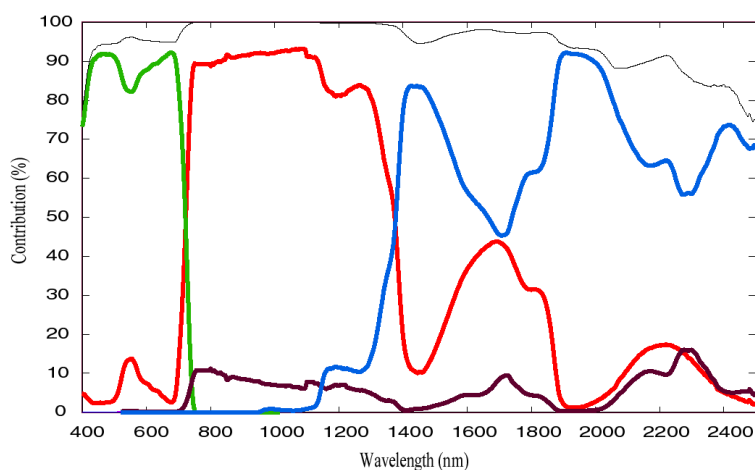
Dans des domaines d'application aussi variés que l'agriculture de précision, l'écologie à l'échelle globale ou la télédétection des ressources végétales, la connaissance de la composition biochimique des feuilles est essentielle. Si une simple balance de précision et une étuve permettent de déterminer la teneur en eau ou en matière sèche, l'extraction et le dosage de la chlorophylle, de la lignine ou de la cellulose font appel à des techniques de chimie analytique beaucoup plus complexes et coûteuses. D'autre part, ces opérations, toujours destructrices, sont difficiles à mettre en œuvre lorsque le site d'expérimentation est éloigné du laboratoire d'analyses. En effet, une fois la feuille sectionnée, l'eau a tendance à s'évaporer rapidement et les chlorophylles et certaines protéines à se dégrader irrémédiablement. Tout ces facteurs limitent l'échantillonnage, et donc la représentativité des mesures.

Deux capteurs, le "Minolta SPAD 502 Meter" ([www.specmeters.com](http://www.specmeters.com)) et le "CCM-200 Chlorophyll Content Meter" ([www.optisciences.com](http://www.optisciences.com)), se partagent actuellement le marché de la mesure *in situ* de la concentration en chlorophylle des feuilles par des méthodes non destructrices. Le principe repose sur la mesure de la fraction de lumière transmise par la feuille à deux longueurs d'onde, une dans le rouge et une dans le proche infrarouge. La calibration de ces instruments repose généralement sur des relations empiriques entre la concentration en chlorophylle et le signal mesuré. Ces relations varient d'une espèce à l'autre car les feuilles présentent des structures anatomiques très différentes qui modifient leurs propriétés optiques sur tout le domaine visible / proche infrarouge. Un manque d'information sur l'espèce étudiée peut donc conduire à des erreurs importantes d'estimation de la concentration en chlorophylle. Enfin les autres constituants biochimiques ne sont pas pris en compte. Devant un tel constat nous avons initié un projet consistant à développer un instrument de terrain, RAMIS (Radiomètre portatif de Mesure In Situ), capable de mesurer instantanément et simultanément la concentration en chlorophylles *a* et *b*, ainsi que les teneurs en eau et en matière sèche de feuilles.

Une des originalités de ce projet est qu'il fédère deux activités complémentaires, l'instrumentation et la modélisation. En effet, le fonctionnement d'un tel instrument requiert que soient résolus des problèmes typiquement techniques (mesure de la fraction de lumière transmise par une feuille verte à différentes longueurs d'onde) et d'autres d'ordre algorithmique (modélisation de cette fraction de lumière transmise en fonction de la composition biochimique de la feuille).

### Aspect modélisation

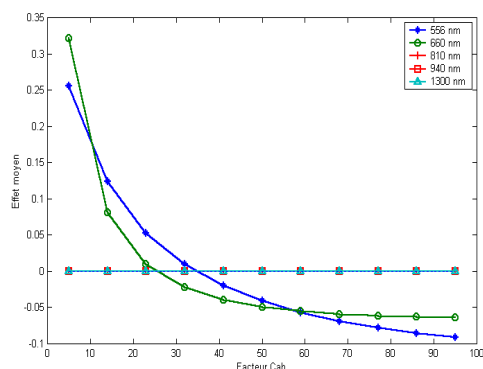
Comme nous l'avons vu au paragraphe §I.1, les relations empiriques entre propriétés optiques des feuilles et teneur en un constituant biochimique particulier ne sont pas satisfaisantes du fait de l'influence sur le signal mesuré – réfléchi ou transmis à toutes les longueurs d'onde – de la structure anatomique des feuilles et de l'interaction entre les différents composés biochimiques. D'où l'idée d'utiliser le modèle PROSPECT, qui en tient compte implicitement, pour la mesure *in situ* des trois variables précitées (le paramètre de structure des feuilles *N* n'ayant pas de réalité physique mesurable). PROSPECT nous a aussi servi à sélectionner les bandes spectrales du détecteur (nombre, position et largeur). En effet, ce choix est guidé tant par des impératifs techniques que par la sensibilité des propriétés optiques des feuilles aux variations des variables biochimiques. La Figure 3 présente la contribution relative de chaque paramètre d'entrée du modèle sur la transmittance, obtenue par une analyse de sensibilité du modèle *via* les plans d'expériences numériques, approche qui sera développée au chapitre II.



**Figure 3.** Contribution de la concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  (vert), de la teneur en eau  $C_w$  (bleu), en matière sèche  $C_m$  (marron) et du paramètre de structure  $N$  (rouge) à la transmittance des feuilles simulée par PROSPECT. La courbe noire est la somme des contributions (Pavan, 2001).

La décision reste malgré tout difficile, la notion de configuration optimale de mesure étant difficile à cerner. Prenons le nombre de bandes spectrales : dans une perspective d'inversion de PROSPECT, il en faut au moins quatre, c'est-à-dire autant que le nombre de paramètres d'entrée du modèle. Mais il y a fort à parier qu'une cinquième ou sixième bande spectrale permettrait de mieux dimensionner le problème et donc d'améliorer les estimations. La position en longueur d'onde et la largeur des bandes spectrales soulèvent

d'autres questions : en toute logique il suffit de tirer partie des résultats de la Figure 3 et de se placer là où les contributions sont les plus fortes. Ce n'est pas forcément le cas comme le montre l'exemple de la concentration en chlorophylle : on constate un maximum de contribution dans le bleu et le rouge et un minimum dans le vert. La sélection des deux premières longueurs d'onde semble *a priori* le meilleur choix. La réalité est plus complexe : calculons et traçons l'effet moyen de ce paramètre en fonction des valeurs qu'il prend sur sa gamme de variation. La Figure 4 montre que la transmittance des feuilles est très sensible à de faibles valeurs de  $C_{ab}$  dans le rouge mais qu'elle sature pour de fortes valeurs de  $C_{ab}$ . Dans le vert au contraire, la sensibilité est moindre aux faibles concentrations mais elle ne présente pas d'effet de saturation pour de fortes concentrations. Par conséquent, une simple mesure dans le rouge comme le font les instruments du commerce ne permet pas de déterminer  $C_{ab}$  avec une bonne précision lorsque les feuilles sont "bien vertes". Le même raisonnement pourrait s'appliquer à la teneur en eau et, dans une moindre mesure, aux autres paramètres du modèle dont les effets moyens sont non-linéaires.



**Figure 4.** Effets moyens de la concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  à différentes longueurs d'onde (Pavan, 2001).

L'étape suivante est l'inversion de PROSPECT. Après avoir identifié les zones les plus sensibles à chacun des paramètres, nous avons sélectionné quatre diodes judicieusement réparties dans le visible / moyen infrarouge (elles ne sont pas décrites dans ce document pour des raisons de confidentialité). Connaissant leur fonction de filtre, il est possible de simuler la transmittance des feuilles pour chacune d'elles. De façon générale, le problème inverse peut être résolu par des voies très différentes : processus itératifs, réseaux de neurones, tables de correspondances, etc. Une des contraintes du cahiers des charges de RAMIS étant la détermination quasi instantanée des caractéristiques de la feuilles, les méthodes coûteuses en temps et en puissance de calcul doivent être écartées. Nous avons identifié deux approches : la modélisation en surface de réponse de PROSPECT à l'aide de la méthode des plans d'expériences et l'inversion neuronale. La première qui entrainerait une "simple" inversion de matrice est en cours d'étude par Gabriel Pavan dans le cadre de sa thèse ; la seconde a déjà fourni des résultats intéressants, en particulier le fait qu'une cinquième diode dans le proche infrarouge améliore notablement la détermination de la teneur en matière sèche comme le montre le Tableau 1.

	4 diodes		5 diodes	
	$R^2$	<i>rmse</i>	$R^2$	<i>rmse</i>
N	0.969	0.143	0.999	0.016
$C_{ab}$	0.992	3.548	0.999	0.0899
$C_w$	0.994	0.002	0.997	0.001
$C_m$	0.706	0.003	0.998	0.0002

**Tableau 1.** Inversion neuronale de PROSPECT pour 4 et 5 longueurs d'onde et 1000 passes d'apprentissage.  $R^2$  est le coefficient de corrélation entre les les valeurs "vraies" des paramètres et les valeurs estimées par inversion. *rmse* est l'écart quadratique moyen (*root mean square error*).

### Aspect instrumental

La mesure de transmission de la lumière par la feuille repose sur un appareillage simple en forme de pince qui mesure le rayonnement transmis grâce à des photodétecteurs adaptés. Les conditions de robustesse,

fiabilité et précision du cahier des charges impliquent une configuration optique à faisceau unique, facile à calibrer et ne nécessitant pas d'ajustement géométrique précis. Afin que les mesures de concentration soient représentatives de la feuille, les diodes émettrices doivent éclairer une surface comprise entre 0.5 cm<sup>2</sup> et 1cm<sup>2</sup> correspondant à environ dix fois la plus petite surface délimitée par les nervures. Les dispositifs techniques de RAMIS ne seront pas détaillés ici pour des raisons de confidentialité.

## Applications

Avant de démarrer ce projet nous avons identifié deux principaux utilisateurs potentiels : le monde agricole et la communauté scientifique. En effet, la nouvelle loi d'orientation agricole du 9 juillet 1999 recommande d'accorder plus d'importance aux problèmes environnementaux dans les exploitations. Cette évolution résulte d'une prise de conscience par les consommateurs d'abord, puis par les pouvoirs publics (sous la pression des premiers...), que l'augmentation des rendements, et donc des profits, n'est plus un objectif prioritaire. L'enjeu est désormais de produire "mieux", "plus propre", dans le respect de l'environnement. Ceci se traduit par exemple par une réduction de l'application d'engrais ou de produits phytosanitaires sur les cultures, dont les effets sont négatifs autant sur le milieu naturel que sur la qualité des récoltes. Pour cela, il est nécessaire de diagnostiquer le plus tôt possible tout changement dans la croissance des plantes, lié à un besoin en azote ou à une maladie parasitaire. Dans la mouvance de l'agriculture de précision, un nombre grandissant de cultivateurs, d'horticulteurs, ou de maraîchers, utilise désormais des techniques de pointe pour gérer leur exploitation. Un capteur tel que RAMIS permettrait de mesurer à faible coût, donc de spatialiser, le contenu biochimique des feuilles afin de mieux gérer les applications d'engrais ou de pesticides au niveau d'une parcelle cultivée.

La communauté scientifique (spécialistes de télédétection, écologistes, écophysiolgistes, entre autres) a aussi souvent besoin de mesures rapides et non destructrices de la composition biochimique des feuilles. En télédétection par exemple, les agences spatiales comme le CNES, l'ESA, la NASA, etc., financent des projets de satellites à vocation scientifique ou opérationnelle dont les produits sont toujours plus élaborés. Depuis peu, on est capable de cartographier la concentration en chlorophylle ou la teneur en eau d'une culture ou d'une forêt depuis l'espace, dans quelques mois ce sera le tour de la teneur en matière sèche. Ces cartes thématiques trouvent d'ores et déjà des débouchés en agriculture de précision comme nous venons de le voir, mais aussi en écologie avec l'étude du cycle du carbone et de son influence sur les changements climatiques. La validation de ces spatio-cartes, leur comparaison lorsqu'elles proviennent de capteurs et d'algorithmes variés, nécessitent des campagnes de mesures au sol afin de produire une "vérité terrain". On citera juste le projet VALERI (*Validation of Land European Remote Sensing Instruments*) piloté par l'INRA d'Avignon et auquel RAMIS pourrait être très utile.

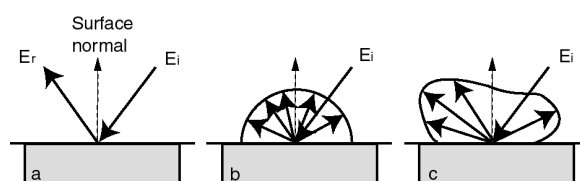
<b>Laboratoires</b>	LED Paris
<b>Acteurs</b>	J.-P. Frangi (LED Paris), I. Moya (LURE Orsay), P. Roca i Cabarrocas (LPICM Palaiseau), G. de Rosny (LED Paris), R. Vanderhagen (LPICM Palaiseau)
<b>Etudiants</b>	G. Pavan (stage de DEA, thèse de doctorat, LED)
<b>Financements</b>	2001 – 2003 : Bureau de la Valorisation et des Relations Industrielles de l'université Paris 7. Développement d'un appareil portable permettant la mesure <i>in situ</i> de la concentration en chlorophylle, de la teneur en eau et de celle en matière sèche des feuilles. Collaboration : LPICM-CNRS, université Paris 7

### I.3. Propriétés optiques directionnelles des feuilles

La plupart des études sur les propriétés optiques des feuilles se sont focalisées sur les variations spectrales de la réflectance et de la transmittance hémisphériques en relation avec leur contenu biochimique (chlorophylle, eau, matière sèche, etc.) ou leur structure anatomique. La réflexion de surface est en revanche très mal connue, conséquence du peu d'intérêt porté par la communauté scientifique aux propriétés bidirectionnelles des feuilles. En effet, l'hypothèse selon laquelle les propriétés optiques des feuilles sont isotropes a longtemps contenté les spécialistes du transfert radiatif. Elle est cependant simplificatrice. On sait aujourd'hui que la réflexion spéculaire des feuilles est susceptible de modifier la distribution de la lumière dans le couvert et par conséquent l'interprétation des données de télédétection acquises par la dernière génération de capteurs multi-angulaires spatiaux (ADEOS-POLDER, TERRA-MISR). En écophysiologie, ce

climat lumineux joue un rôle important dans la croissance des plantes. Prenons le cas du phytochrome, photorécepteur sensible à la lumière rouge et rouge lointain : cette dernière gamme de longueurs d'onde favorise l'élongation des tiges alors que la lumière rouge, au contraire, favorise la croissance des feuilles. Une plante qui se trouve dominée par d'autres reçoit donc proportionnellement plus de lumière rouge lointain diffusée par les feuilles qui l'entourent et moins de lumière rouge absorbée par ces mêmes feuilles. Cela accélère son élongation et lui donne la possibilité d'accéder aux rayons du soleil. Nous pourrions ainsi multiplier les exemples.

Le déterminisme des propriétés optiques directionnelles est encore aujourd'hui très mal connu, même si la texture de l'épiderme des feuilles semble prépondérante. La cuticule, fine couche de cire amorphe qui recouvre la surface de certaines feuilles les protégeant ainsi contre les rigueurs climatiques, les insectes ou la déshydratation, agit comme un miroir qui renvoie la lumière dans la direction spéculaire (Figure 5a). Au contraire, les poils absorbants ont tendance à disperser la lumière dans toutes les directions (Figure 5b). Cette dualité entre une surface spéculaire idéale et une surface parfaitement diffusante est caractéristique de la réflectance directionnelle des feuilles (Figure 5c).



**Figure 5.** Différents modes de réflexion : **a)** spéculaire, **b)** diffuse, **c)** mixte.

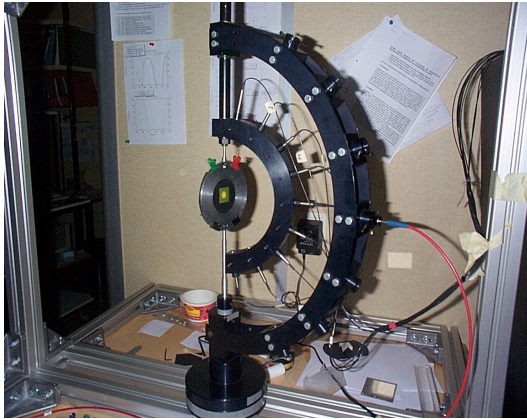
Une des raisons de notre ignorance sur la distribution angulaire de la lumière réfléchi par les feuilles provient de la rareté des mesures expérimentales, elle-même liée à l'absence de goniophotomètres commerciaux adaptés à la mesure de la BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*) et/ou de la BTDF (*bidirectional transmittance distribution function*) foliaire. Un goniophotomètre est constitué d'une source lumineuse éclairant l'échantillon et d'un capteur optique : en variant les positions relatives de la source, de la feuille et du capteur, on peut échantillonner le champ de radiances dans différentes directions. Le facteur de réflectance (ou de transmittance) est le rapport entre la radiance de la feuille et celle d'une surface de référence supposée isotrope, dans la même configuration d'éclairement et de visée. Nous ne décrivons pas ici tous les instruments qui ont été construits à cet effet. Les dispositifs les plus simples mesurent la réflectance polarisée dans la direction spéculaire sous un éclairage d'environ  $55^\circ$  par rapport à la normale de la feuille. Cet angle particulier appelé angle de Brewster permet de séparer réflexion de surface (polarisée) et de volume (non polarisée) car la lumière réfléchi par la surface est entièrement polarisée. La BRDF (beaucoup plus rarement la BTDF) de la feuille est obtenue avec des dispositifs expérimentaux plus élaborés où les positions relatives entre la source lumineuse et le capteur varient.

Dans le cadre de sa thèse de doctorat et avec le soutien du groupe de recherche FLUOVEG (Utilisation de la fluorescence pour l'estimation de la productivité végétale), Didier Combes a conçu et construit un goniophotomètre de laboratoire, basé au LURE d'Orsay, permettant d'acquérir des spectres de réflectance et/ou de transmittance de feuilles simultanément dans plusieurs directions émergentes. Il est constitué :

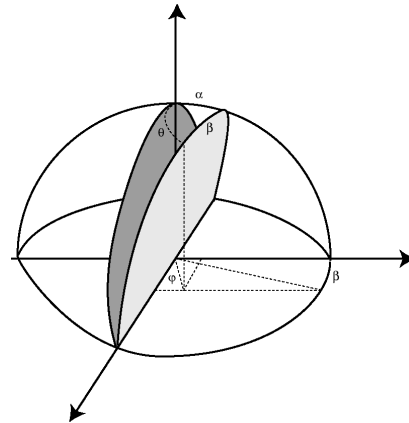
- **d'une partie opto-mécanique** comprenant une source lumineuse acheminée par fibre optique, un faisceau de sept fibres détectrices et un porte-échantillon (Figure 6). La source lumineuse éclaire la feuille dans une direction donnée, mais elle peut être déplacée sur un demi-cercle mobile autour de l'axe vertical afin de permettre un éclairage selon différentes directions. Les fibres de détection sont disposées sur un demi-cercle vertical fixe : les angles zénithaux varient tous les  $20^\circ$ , de  $10^\circ$  à  $170^\circ$ . La feuille est maintenue par un porte-échantillon mobile autour de l'axe vertical : les angles azimutaux varient tous les  $10^\circ$ , de  $0^\circ$  à  $350^\circ$ .
- **d'une partie optique** connectée à la partie opto-mécanique par l'intermédiaire des fibres de détection. La lumière recueillie par le faisceau de fibres est véhiculée à l'entrée d'un spectromètre par l'intermédiaire d'un coupleur à miroirs pour être dispersée selon les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge (de 400 à 1000 nm avec une résolution de 1 nm). La lumière est ensuite détectée par une caméra CCD (*Charge Coupled Device*) qui permet de mesurer l'intensité du signal reçu.



Un calcul simple permet de passer des coordonnées du goniophotomètre (angle de rotation  $\alpha$  et position de la fibre optique  $\beta$ ) à l'angle zénithal  $\theta$  et azimutal  $\varphi$  de visée (Figure 7). Au total, pour une position donnée de la source, une centaine de positions de mesure sont échantillonnées en réflectance, et autant en transmittance (Figure 8).



**Figure 6.** Partie opto-mécanique du goniophotomètre.

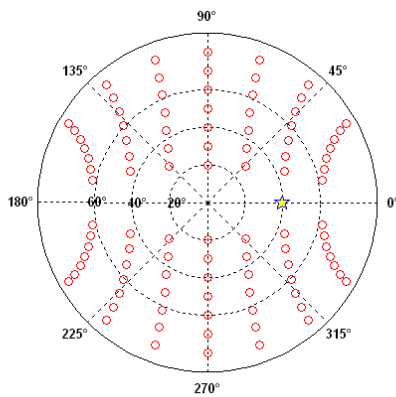


**Figure 7.** Représentation schématique de la géométrie du goniophotomètre.

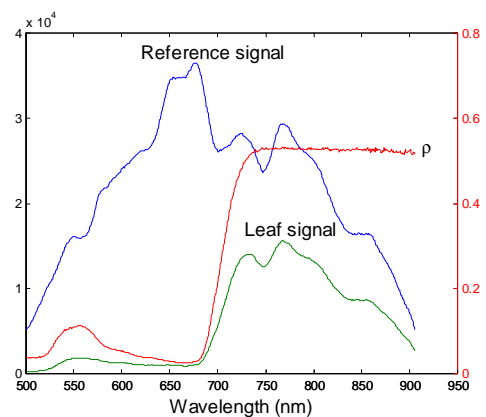
Le facteur de réflectance (ou de transmittance) bidirectionnel est calculé pour chaque longueur d'onde et pour chaque direction de visée en divisant le signal mesuré sur la feuille par le signal mesuré sur une référence de spectralon supposée isotrope, dans les mêmes configurations d'éclairage ( $\theta_i, \varphi_i = 0^\circ$ ) et de visée ( $\theta_v, \varphi_v$ ) :

$$\rho_\lambda(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) = \frac{S_\lambda(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)}{S_\lambda^{\text{réf}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)}$$

Cette grandeur physique est beaucoup moins sensible aux imperfections expérimentales et aux erreurs de calibration que la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF). La Figure 9 montre la qualité des mesures avec un rapport signal sur bruit très faible.



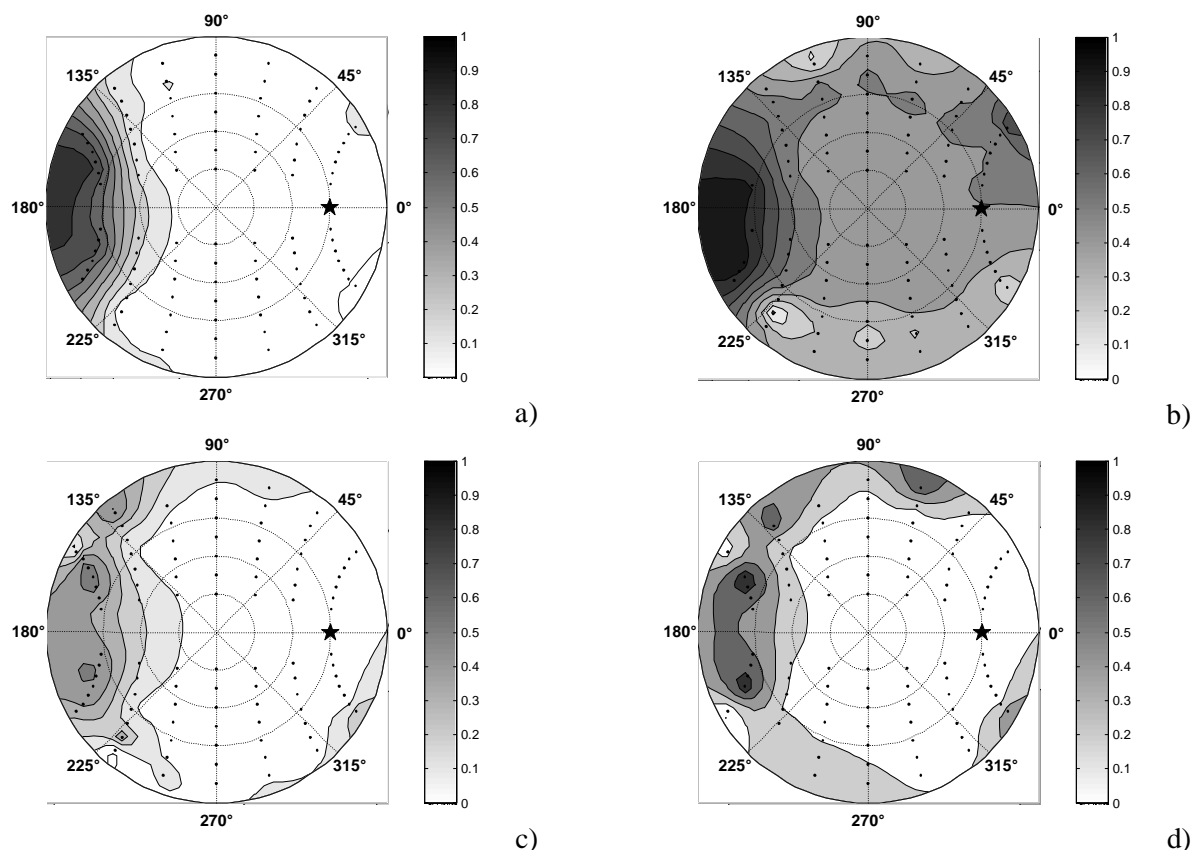
**Figure 8.** Diagramme polaire représentant les directions de visée en réflectance. L'étoile indique la position de la source d'éclairage.



**Figure 9.** Signaux mesurés par une fibre optique détectrice sur la référence, sur une feuille de sorgho (*Sorgho halepense*), et réflectance  $\rho$ . La configuration de mesure est :  $\theta_i = 40^\circ$ ,  $\varphi_i = 0^\circ$ ,  $\alpha_v = 20^\circ$ , et  $\beta_v = 60^\circ$ .

Une première expérience recueillant plusieurs milliers de spectres a été réalisée durant l'été 2000 sur des feuilles de sorgho (*Sorghum bicolor* M. Moench), de noyer (*Juglans regia* L.) et de laurier cerise (*Prunus laurocerasus*). Bien qu'elle soit en cours de dépouillement, voici quelques résultats préliminaires : la réflectance se comporte globalement comme un bon diffuseur sauf dans la direction spéculaire où un pic est observé (Figure 10). C'est en réalité à un angle plus élevé que le facteur de réflectance est maximum, comme

cela a été observé sur des surfaces rugueuses constituées de micro-facettes disposées au hasard. La réflectance spéculaire est plus marquée dans le rouge (Figure 10a) que dans le proche infrarouge (Figure 10b) chez le sorgho. La face inférieure des feuilles de noyer a un comportement spéculaire plus marqué que la face supérieure (Figures 10c et 10d). Enfin on remarquera que le noyer diffuse la lumière de façon plus isotrope que le sorgho.



**Figure 10.** Représentation en coordonnées polaires du facteur de réflectance de feuilles illuminées à  $60^\circ$  : **a)** face supérieure de feuille de sorgho à 672 nm ; **b)** face supérieure de feuille de sorgho 800 nm ; **c)** face supérieure de feuille de noyer à 672 nm ; **d)** face inférieure de feuille de noyer à 672 nm.

L'expérience de l'été 2000 a mis en évidence des défauts mineurs de conception du photogoniomètre dont la correction devrait permettre de réduire substantiellement les erreurs de mesures. Le volet modélisation a commencé par une synthèse bibliographique des rares modèles de BRDF (ou BTDF) des feuilles existants. La nouvelle campagne de mesures prévue en 2003 devra permettre de valider le dispositif expérimental, de mieux comprendre le déterminisme des propriétés optiques directionnelles des feuilles, éventuellement de les modéliser, et de construire une base de données rassemblant des BRDF/BTDF de plusieurs espèces. Les applications potentielles sont nombreuses en architecture, médecine, ou encore dans l'industrie cinématographique !

<b>Laboratoires</b>	LED Paris
<b>Acteurs</b>	I. Moya (LURE Orsay), H. Sinoquet (INRA Clermont Ferrand), C. Varlet-Grancher (INRA Lusignan)
<b>Etudiants</b>	D. Combes (thèse de doctorat, INRA)
<b>Financements</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1998 – 2002 – 2006 : GDR 1536 FLUOVEG. <a href="#">Utilisation de la fluorescence pour l'estimation de la productivité végétale</a>. Collaboration : CNRS, INRA, université Paris 7, université Paris 11, université Paul Sabatier, université de Franche-Comté, CEA, CNES</li> <li>• 2001 – 2002 : Programme National de Télédétection Spatiale. <a href="#">Mesure et modélisation des propriétés bidirectionnelles des feuilles</a>. Collaboration : INRA, LURE-CNRS, université Paris 7</li> </ul>

#### **I.4 Structure tridimensionnelle des feuilles et modèles de lancer de rayons**

Dans la plupart des modèles de propriétés optiques ou de photosynthèse développés depuis la fin des années 1960, la feuille est généralement perçue comme un objet bidimensionnel. Il s'agit là d'une hypothèse bien réductrice de la complexité de cet organe tel qu'on peut l'observer au microscope. Des études récentes sur la propagation de la lumière ou le transfert des gaz dans une feuille, en deux ou trois dimensions, ont en effet démontré le rôle primordial de la forme des cellules et de leur arrangement tissulaire. Par exemple, les cellules épidermiques de certaines espèces de plantes tropicales agissent comme des lentilles en concentrant la lumière incidente du Soleil sur les chloroplastes du parenchyme palissadique. Le mésophylle spongieux quant à lui favorise le cheminement latéral du CO<sub>2</sub> à partir des stomates mais aussi la diffusion de la lumière. Nous pourrions multiplier les exemples illustrant l'influence de la structure anatomique des feuilles sur la photosynthèse, et partant, sur la croissance et le développement des plantes.

Plus généralement, la science découvre, ou redécouvre, depuis quelques années que notre monde ne se réduit pas à un simple assemblage de particules microscopiques qui interagissent les unes sur les autres, mais se compose d'une multitude d'objets en interaction, possédant chacun une forme singulière et obéissant à des lois propres. Ce sont ces lois que je souhaiterais mettre en évidence et formaliser au niveau d'un des organes végétaux les plus importants sur Terre, la feuille, car ce milieu établit l'interface des échanges entre la végétation et l'atmosphère. Une étude bibliographique poussée a montré que, si la synthèse, la formule et la fonction de nombreuses molécules présentes dans les cellules végétales étaient connues, la représentation macroscopique des cellules et des tissus foliaires restait largement descriptive et inexploitée, notamment les relations avec les processus physiologiques dont ils sont le siège. Pourtant la sélection naturelle a produit une grande variété de structures anatomiques : quelle est leur fonction ?

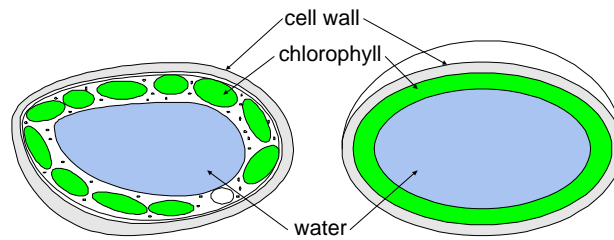
L'exploration de la morphologie des feuilles en relation avec leur environnement est un programme de recherche original et ambitieux, à la croisée de plusieurs disciplines de pointe. Nous souhaitons l'aborder à l'aide des instruments de mesure et des outils de modélisation les plus récents, c'est-à-dire les plus puissants.

#### **Caractérisation et modélisation de la structure 3D des feuilles**

Une première tâche consistera à visualiser la structure anatomique des feuilles en trois dimensions. La forme laminaire des limbes – l'épaisseur maximum d'une feuille ne dépasse pas quelques centaines de microns – ainsi que leur hétérogénéité limitent l'utilisation de techniques non destructrices. Le développement de la microscopie confocale a cependant ouvert de nouvelles perspectives pour l'observation des premières couches cellulaires. Nous envisageons aussi des méthodes plus classiques d'imagerie scientifique comme la numérisation de coupes en série de feuilles. Il faudra ensuite décrire les différents types de cellules présents dans chaque tissu foliaire, les modéliser par des volumes de base (ellipsoïdes, cylindres, polyèdres, etc.) et dégager les lois d'assemblage dans l'espace. En dépit de leur simplicité apparente, les outils mathématiques d'analyse de forme sont relativement complexes car les formes infiniment changeantes et variées semblent déjouer toute tentative de modélisation quelque peu précise. On notera que la question des relations entre forme et fonction des objets dans la nature suscite aujourd'hui un regain d'intérêt qui dépasse le cadre de cette étude.

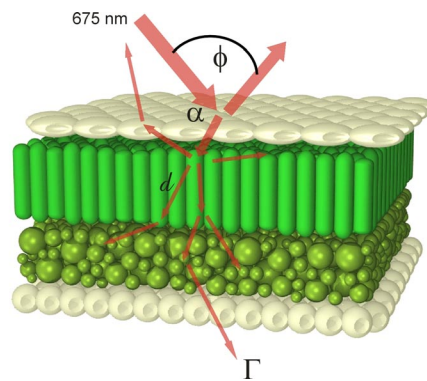
La première feuille en trois dimensions que nous avons conçue, construite et étudiée est celle d'une dicotylédone "typique". Comme je l'ai signalé, les travaux de recherche sur ce sujet sont rares, voire inexistant. Au début du 20<sup>e</sup> siècle lord Kelvin a découvert que des solides à quatorze facettes (le fameux tétrakaidécaèdre comportant 8 facettes hexagonales et 6 facettes carrées) ou à dix facettes (dodécaèdre rhombique) représentaient la forme caractéristique vers laquelle tendent les cellules végétales en dépit des nombreuses divisions qui entraînent souvent des inégalités de taille. Ces modèles polygonaux qui assurent une bonne partition de l'espace sont bien adaptés aux tissus méristématiques compacts, mais fort peu aux tissus foliaires différenciés et anisotropes. En assimilant les polyèdres à des sphéroïdes – hypothèse raisonnable pour un nombre important de facettes – nous avons représenté les cellules végétales par des surfaces quadriques (sphères, ellipsoïdes, cylindres, cônes, etc.). Dans une approche CSG (*Constructive Solid Geometry*), ces quadriques peuvent être modélés et assemblés grâce à un ensemble d'opérations simples comme des unions, des différences, des intersections, etc. La Figure 11 présente une cellule foliaire type assimilée à un volume constitué de deux ou trois couches concentriques : une paroi cellulaire (cellulose, hémicellulose, lignine, protéines, etc.), un cytoplasme (matrice aqueuse colloïdale contenant des organites

comme les chloroplastes, le noyau, etc.), et une vacuole (eau contenant en solution des sels et diverses substances).



**Figure 11.** Représentation schématique d'une cellule végétale montrant la complexité des différentes membranes.

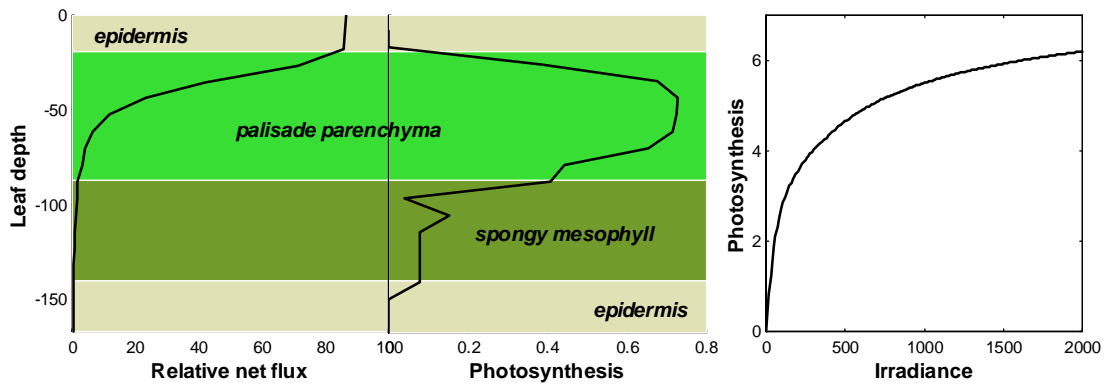
Seules la paroi cellulaire et la vacuole sont présentes dans les cellules de l'épiderme qui généralement ne contiennent pas de chlorophylle. Chaque cellule est donc caractérisée par sa taille, sa forme, et par l'épaisseur des deux ou trois couches constituantes. A ces couches sont associées des propriétés optiques : indice de réfraction et coefficient spécifique d'absorption. L'assemblage des cellules en tissus – épidermes supérieur et inférieur, parenchyme palissadique, et parenchyme lacuneux – puis des tissus en feuille est basé sur des données de la littérature. La Figure 12 illustre la feuille de dicotylédone virtuelle ayant servi aux premières simulations.



**Figure 12.** Maquette en perspective d'une feuille de dicotylédone virtuelle éclairée en lumière rouge (675 nm) et représentation schématique du trajet de la lumière. La taille de la cible est  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 170 \mu\text{m}$ .

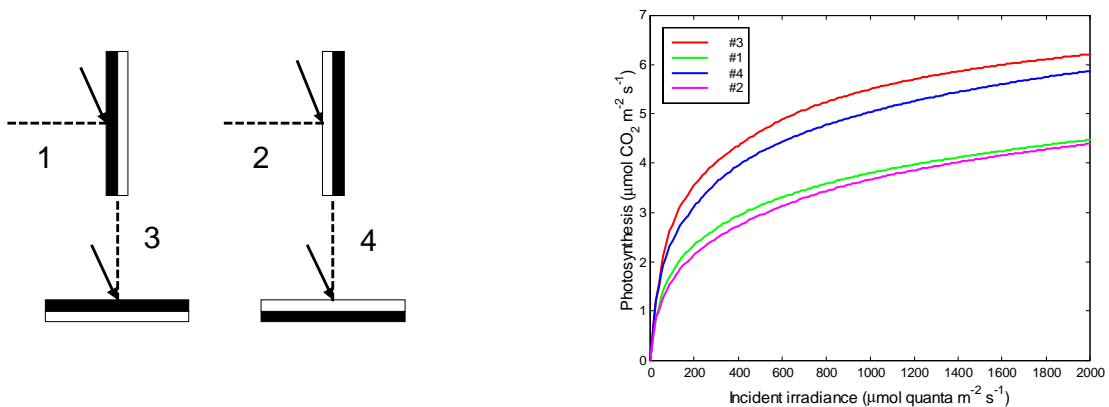
### Application au transport des photons et à l'étude des échanges gazeux

Dans un deuxième temps, nous avons abordé les interactions entre structure anatomique, composition biochimique (matière sèche, chlorophylle, eau) et milieu environnant *via* le transport des photons, un des facteurs déterminants de l'activité photosynthétique des feuilles. Les propriétés optiques de notre feuille virtuelle (réflexion de surface, réflectance et transmittance diffuses, profil d'absorption de la lumière) ont été calculées grâce au modèle de lancer de rayons RAYTRAN développé au Joint Research Centre d'Ispra (Italie) par Yves Govaerts dans le cadre de sa thèse de doctorat, et basé sur des techniques de Monte Carlo. Les premières simulations furent globalement très encourageantes. Malgré que la validation de RAYTRAN (au sens strict du terme) soit difficile – le modèle ne s'inverse pas – nous avons comparé ses sorties à des mesures expérimentales. Ainsi les profils d'absorption de la lumière dans la feuille (Figure 13a), les profils de taux net de photosynthèse (Figure 13b), ou la réponse de la photosynthèse à une augmentation de l'éclairement (Figure 13c) calculés en couplant RAYTRAN à un modèle simplifié de photosynthèse sont en parfaite adéquation avec les résultats glanés de-ci de-là dans la littérature. En particulier les profils d'absorption et de photosynthèse obtenus par les chercheurs de l'Université du Wyoming à l'aide de fibres optiques de diamètre dix fois plus petit que celui d'un cheveux ! Cette approche ouvre de nouvelles perspectives en physiologie végétale pour étudier les relations entre la structure anatomique des feuilles et leur fonction.



**Figure 13.** Propriétés optiques d'une feuille dorsiventrale de dicotylédone éclairée par de la lumière rouge (675 nm) sous un angle d'incidence de 25° : **a)** Profil d'absorption (à gauche), **b)** Profil de photosynthèse (au milieu), **c)** réponse de la photosynthèse à l'éclairement (à droite). Nota bene : les Figures 12 et 13 ont fait l'objet de la couverture du numéro d'octobre 2001 de la revue *Plant, Cell & Environment*.

Grâce à des études de sensibilité (feuille d'ombre ou de lumière, position sur la plante et orientation, etc.), l'étape suivante devrait nous permettre de mieux comprendre l'adaptation de la structure des feuilles à leur fonction et donc d'améliorer les modèles de photosynthèse à cette échelle d'observation. Elle a été amorcée récemment en étudiant la réponse de la photosynthèse en fonction de l'orientation de la feuille : la feuille virtuelle de la Figure 12 a été placée dans quatre positions (Figure 14a) dont #3 est la plus probable dans la nature. Les simulations montrent que les positions #3 et #4 correspondant à une feuille horizontale sont les plus favorables en terme d'interception de la lumière et d'activité photosynthétique (Figure 14b).



**Figure 14.** Etude de l'activité photosynthétique d'une feuille dorsiventrale. **a)** Orientation de la feuille et lumière incidente (le rectangle noir représente le parenchyme palissadique, le blanc le parenchyme lacuneux). **b)** Réponse de la photosynthèse à une augmentation de l'éclairement.

Ce travail mérite d'être approfondi. Il est envisagé d'utiliser la même maquette de feuille pour étudier la diffusion gazeuse ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) dans les mésophylles en remplaçant les principes de l'optique par ceux de la diffusion dans un milieu poreux. Un groupe de travail "virtuel" a été constitué, rassemblant des chercheurs du CEA (Bernard Genty), de l'INRIA (Jean-Daniel Boissonnat) et du LURE (Ismaël Moya), mais les demandes de bourses de thèse et de financement sont pour l'instant restées vaines...

<b>Laboratoires</b>	JRC Ispra, University of California Davis, LED Paris
<b>Acteurs</b>	Y. Govaerts (EUMETSAT Darmstadt), S.L. Ustin (University of California Davis)
<b>Etudiants</b>	Y. Govaerts (thèse de doctorat, JRC)
<b>Publications</b>	Govaerts et al. (1996), Ustin et al. (2001)



## CHAPITRE II

### LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES COUVERTS VÉGÉTAUX : MODÉLISATION, APPLICATION

Les satellites et avions équipés de capteurs optiques de télédétection mesurent la radiance (luminance énergétique) des cibles survolées dans une ou plusieurs bandes de longueurs d'onde et dans une ou plusieurs directions de visée. La radiance varie au cours de la journée en fonction de la hauteur du Soleil et de l'état de l'atmosphère : on la transforme en réflectance, grandeur uniquement caractéristique de la cible, en effectuant au préalable des corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques plus ou moins complexes. On supposera par la suite que les données ont été calibrées, vérifiées, et débarassées de leurs erreurs systématiques. L'interprétation des images de réflectance en terme de propriétés géophysiques des cibles observées a donné lieu à de nombreux travaux de recherche ces quarante dernières années. Il est clair que les propriétés optiques des feuilles ne suffisent pas à elles seules à expliquer la réflectance des couverts végétaux car ces derniers ne se résument pas à une grande feuille (*big leaf model*).

La complexité des phénomènes mis en jeu (absorption, réfraction, diffusion, etc.) a longtemps favorisé le développement et l'utilisation intensive de méthodes empiriques ou semi-empiriques pour relier des indices de végétation simples à des caractéristiques biophysiques des couverts végétaux telles que l'indice foliaire (LAI) ou la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbée (fPAR ou  $\epsilon_i$ ). Ces indices de végétation sont des combinaisons de réflectances ou de radiances mesurées dans plusieurs bandes spectrales larges, plus rarement dans plusieurs directions de visée. L'absence de bases physiques de la plupart limite, *a priori*, leur utilisation sur des cibles différentes de celles ayant servi à leur élaboration. On dit qu'ils sont peu robustes. D'autres méthodes d'extraction de l'information à partir de données de télédétection comme l'analyse spectrale (modèles de mélange, régression linéaire multiple pas à pas, etc.) ou de forme (modèles de BRDF) ont été testées avec plus ou moins de succès au cours de ces dernières années. Parallèlement, l'utilisation de modèles analytiques de transfert radiatif en "sens inverse" s'est développée pour extraire les propriétés physiques ou biologiques de milieux aussi variés que l'atmosphère, un sol nu, ou un couvert végétal. L'inversion de ces modèles diffère selon leur niveau de complexité : méthodes itératives pour les modèles 1D ou géométriques simples, tables de correspondances (LUT = *look up tables*) et réseaux de neurones pour les modèles 3D et les modèles de lancer de rayons qui requièrent des moyens et des temps de calculs beaucoup plus importants.

Contrairement aux feuilles, ces trente dernières années ont vu la naissance de nombreux modèles de réflectance des couverts végétaux. Mon ambition ne fut pas de développer un "n plus unième" code mais d'utiliser les modèles 1D existants pour améliorer l'interprétation des images de réflectance. En raison de sa simplicité et de bons résultats obtenus sur cultures homogènes, le modèle SAIL (*Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves*) proposé par Wouter Verhoef au milieu des années quatre-vingt et modifié par Andres Kuusk au début des années quatre-vingt-dix pour prendre en compte l'effet d'opposition (*hot spot*) a connu un succès non démenti à ce jour. La plupart des résultats présentés dans ce chapitre ont été obtenus en couplant PROSPECT à SAIL. Pour une configuration de mesure donnée – longueur d'onde  $\lambda$ , directions d'éclairement  $\theta_s$  et de visée  $\theta_v$  – le modèle résultant que nous avons nommé PROSAIL admet comme variables d'entrée :

- un indice foliaire LAI (*Leaf Area Index*), surface cumulée sur toute la hauteur du couvert des faces supérieures des feuilles par unité de surface du sol ;
- une distribution d'angles foliaires LAD (*Leaf Angle Distribution*) qui, dans le cas d'une distribution ellipsoïdale, se ramène à l'angle moyen d'inclinaison des feuilles  $\theta_l$  ;
- un paramètre de *hot spot*  $s_l$ , rapport entre la taille moyenne des feuilles et la hauteur du couvert ;
- la réflectance  $\rho_s$  du sol sous-jacent dans la configuration de mesure choisie ;

en plus des paramètres d'entrée de PROSPECT ( $N$ ,  $C_{ab}$ ,  $C_w$ ,  $C_m$ ) détaillés au chapitre précédent.

## II.1. Estimation des variables des couverts végétaux

### Méthodes semi-empiriques

Le spectro-imageur aéroporté AVIRIS (*Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer*) construit au milieu des années quatre-vingt par la NASA a ouvert un nouveau champ d'étude en télédétection, celui de la haute résolution spectrale. La luminance énergétique des objets de la surface terrestre n'est plus mesurée dans quelques bandes spectrales larges mais dans plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, de bandes spectrales étroites (quelques nanomètres de large) et contigües, permettant l'identification des propriétés de ces objets par leurs caractéristiques spectrales fines. L'émergence de ce concept a suscité l'enthousiasme dans les domaines de la géologie, de l'écologie ou de l'océanographie ; de nouvelles méthodes d'interprétation des données de télédétection – analyse spectroscopique, dérivées, modèles de mélange, etc. – ont été empruntées à la chimie analytique. Parmi ces méthodes, la position en longueur d'onde  $\lambda_i$  du point d'inflexion du *red edge*, brusque augmentation de la réflectance de la végétation entre le rouge et le proche infrarouge lorsque la chlorophylle cesse d'absorber la lumière, a donné lieu à de nombreux travaux. Comme d'autres indices de végétation,  $\lambda_i$  est sensible aux caractéristiques biophysiques de la végétation mais, contrairement aux autres, il est peu affecté par les conditions atmosphériques et le sol sous-jacent ce qui le rend particulièrement intéressant.

En dérivant deux fois analytiquement le modèle PROSAIL et en annulant la dérivée seconde, nous avons calculé le point d'inflexion du *red edge* pour différents jeux de paramètres du modèle choisis au hasard. Nous avons ainsi établi une relation statistique entre  $\lambda_i$  et la réflectance à trois longueurs d'onde encadrant le *red edge* :

$$\lambda_i = 703.1 - 183.5 \times \rho_1 - 202.0 \times \rho_2 + 141.8 \times \rho_3 + 44.2 \times \rho_1^2 + 34.1 \times \rho_2^2 - 162.6 \times \rho_3^2 \\ - 303.6 \times \rho_1 \rho_2 + 769.7 \times \rho_1 \rho_3 + 180.4 \times \rho_2 \rho_3 - 379.0 \times \rho_1 \rho_2 \rho_3$$

où  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  et  $\rho_3$  sont les réflectances du couvert à 672, 710 et 780 nm. Cette relation a été testée sur des images AVIRIS acquises les 5 et 22 juillet 1991 sur une zone agricole et forestière des environs de Stuttgart (Allemagne), dans le cadre de la campagne NASA MAC EUROPE. Malgré des résultats encourageants – par exemple les cultures montrent de fortes variations temporelles absentes sur la forêt, comme on pouvait s'y attendre – elle n'a malheureusement jamais été réellement validée par des mesures au sol. En raison de restrictions budgétaires, mais aussi de l'impuissance de la communauté scientifique à prouver les avantages de la haute résolution spectrale, l'abandon du programme HIRIS (*High Resolution Imaging Spectrometer*), instrument destiné à être embarqué sur la plate-forme spatiale EOS (*Earth Observing System*), a donné un coup de frein à l'étude du point d'inflexion du *red edge*. La télédétection n'échappe pas, comme bien d'autres domaines scientifiques, aux effets de mode... Les nouveaux spectro-imageurs aéroportés comme DAIS (*Digital Airborne Imaging Spectrometer*), HYMAP (*Hyperspectral Mapping*), ROSIS (*Reflective Optics System Imaging Spectrometer*), spatiaux comme HYPERION sur EO-1, SPECTRA (*Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis*) ont permis de "redécouvrir"  $\lambda_i$  comme moyen de produire des cartes de végétation interprétables en terme de concentration en chlorophylle, indice foliaire, fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé, etc.

### Inversion de modèles

Pour qui dispose d'un modèle de réflectance de la végétation, l'estimation des variables d'intérêt passe naturellement par son inversion. Les premières inversions pratiquées dans les années quatre-vingt se sont concentrées sur les caractéristiques physiques des couverts végétaux comme le LAI ou l'angle moyen d'inclinaison des feuilles estimés à partir de données multi-angulaires. Les propriétés optiques des feuilles étaient elles aussi estimées, mais considérées comme une information accessoire en l'absence de modèle les reliant au contenu biochimique des feuilles par exemple. Le modèle PROSAIL nous a permis d'opérer ce lien et d'effectuer les premières inversions à la fois sur des données multi-spectrales et multi-directionnelles.

Inverser un modèle de réflectance consiste à déterminer le jeu de paramètres optimum supposé caractériser le mieux la cible observée en minimisant l'écart entre les valeurs de réflectance simulées par le modèle et celles mesurées expérimentalement. Une inversion réussie est la rencontre de trois conditions : un

bon modèle, des mesures calibrées et une méthode d'inversion appropriée. Le choix du modèle sera discuté par la suite et les mesures supposées calibrées. Attardons-nous un instant sur le dernier point. Trois approches s'affrontent aujourd'hui en télédétection : les méthodes itératives, les tables de correspondances et les réseaux de neurones. Rares sont les études visant à comparer leurs performances en terme de temps de calcul, leur facilité de mise en œuvre, leur aptitude à retrouver le jeu de paramètres optimum dans l'espace des paramètres, etc. (cf. les travaux de recherche effectués à l'INRA d'Avignon). Malgré des temps de calcul excessifs limitant leur utilisation opérationnelle, les méthodes itératives (simplex, Marquardt, quasi-Newton par exemple), aux performances identiques aux deux autres approches, ont l'avantage d'être très flexibles et de s'adapter à des configurations de mesure variées. C'est pourquoi je les ai retenues pour inverser et valider PROSAIL. Le Tableau 2 résume l'évolution de mes travaux.

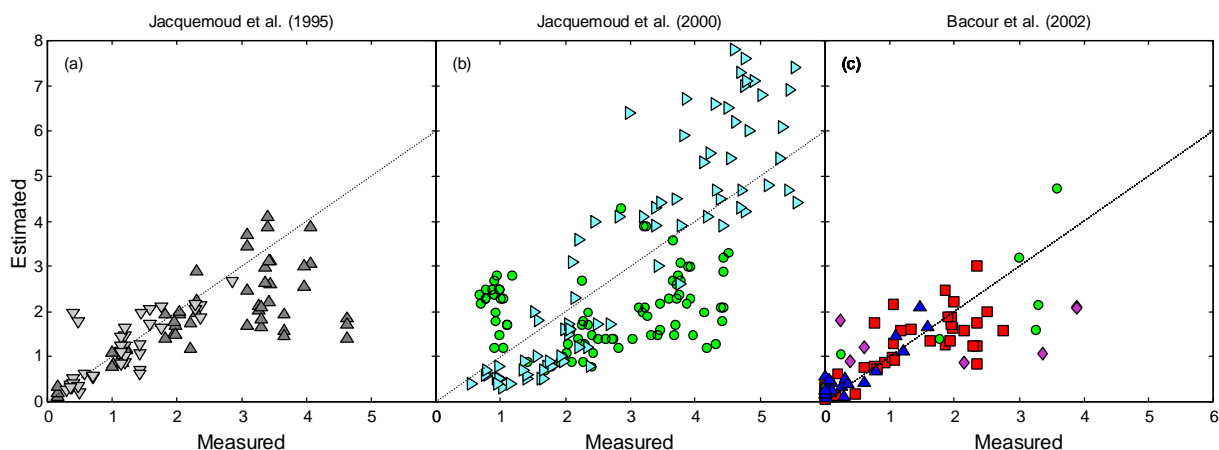
Publication	Couvert végétal	Capteur-Vecteur	Longueurs d'onde	Directions de visée	Paramètres estimés
Jacquemoud (1993), Jacquemoud et al. (1995a)	<i>betterave</i>	AVIRIS virtuel-sol	224 bandes spectrales étroites entre 400 et 2454 nm	0°	N, C <sub>ab</sub> , C <sub>w</sub> , LAI, $\theta_1$
		TM virtuel-sol	500, 592, 678, 800, 1701, et 2194 nm		C <sub>ab</sub> , C <sub>w</sub> , LAI
		HRV virtuel-sol	564, 648, et 834 nm		C <sub>ab</sub> , LAI
Jacquemoud et al. (1994)	<i>betterave, blé, oignon, pois, pomme de terre</i>	CAESAR-avion	550, 670, et 870 nm	0°, 52°	N, C <sub>ab</sub> , LAI, $\theta_1$ , $s_1$
Ustin et al. (1998)	<i>espèces de garrigue</i>	AVIRIS-avion	224 bandes spectrales étroites entre 400 et 2454 nm	0°	C <sub>w</sub>
Jacquemoud et al. (2000)	<i>maïs, soja</i>	MIVIS-avion	461, 513, 559, 600, 640, 673, 698, 723, 751, 781, et 814 nm	0°	N, C <sub>ab</sub> , C <sub>m</sub> , LAI, $\theta_1$
Bacour et al. (2002)	<i>blé, luzerne, maïs, tournesol</i>	POLDER-avion	550, 670, et 865 nm	30 à 40 directions	C <sub>ab</sub> , LAI, $\theta_1$ , $s_1$ , $\alpha_{sol}$

**Tableau 2.** Récapitulatif de mes principaux travaux sur l'inversion de modèle pour estimer les caractéristiques biophysiques de la végétation. AVIRIS = *Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer* ; TM = *Thematic Mapper* ; HRV = *High Resolution Visible* ; CAESAR = *CCD Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing* ; MIVIS = *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* ; POLDER = *POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance*.

Ces études sont riches d'enseignement que je vais tenter de résumer. Le couplage de PROSPECT avec SAIL (ou tout autre modèle de réflectance de la végétation) nous a permis d'accéder au contenu biochimique des feuilles. Le principal avantage de l'inversion de modèles sur les relations semi-empiriques est qu'en tenant compte de la configuration de mesure et de l'architecture du feuillage, l'information recherchée est *de facto* extraite avec une plus grande précision. En outre, ce couplage est nécessaire lorsqu'on travaille sur des données multispectrales acquises au nadir afin que le nombre de paramètres du modèle soit toujours inférieur ou égal au nombre de mesures expérimentales : c'est la condition *sine qua non* pour avoir un système sur-déterminé. Nous avons été les premiers à estimer la concentration en chlorophylle C<sub>ab</sub> ou l'épaisseur équivalente en eau C<sub>w</sub> par inversions. Alors que les bases ont été jetées il y a déjà une dizaine d'années, les premières cartes de C<sub>ab</sub> et C<sub>w</sub> n'ont été produites que récemment, et celles de teneur en matière sèche C<sub>m</sub> sont encore en gestation ! Les recherches dans ce domaine devraient se développer en toute logique pour des applications en agriculture de précision (cf. bilans azotés des cultures) ou en écologie (cf. bilans de carbone des forêts). Alors qu'au niveau de la feuille le paramètre de structure N permet grossièrement de distinguer les monocotylédones (N < 1.5) des dicotylédones (N > 1.5), cette séparation s'est en revanche avérée inopérante au niveau du couvert, excluant la possibilité de cartographier les espèces végétales sur la base de la structure anatomique des feuilles. La raison en est simple : lorsque la réflectance d'un objet translucide – en l'occurrence la feuille – augmente, sa transmittance diminue mécaniquement, et *vice-versa* ; la somme de ces deux grandeurs varie donc peu, ce qui se traduit au niveau du couvert végétal par une faible variation de la réflectance.

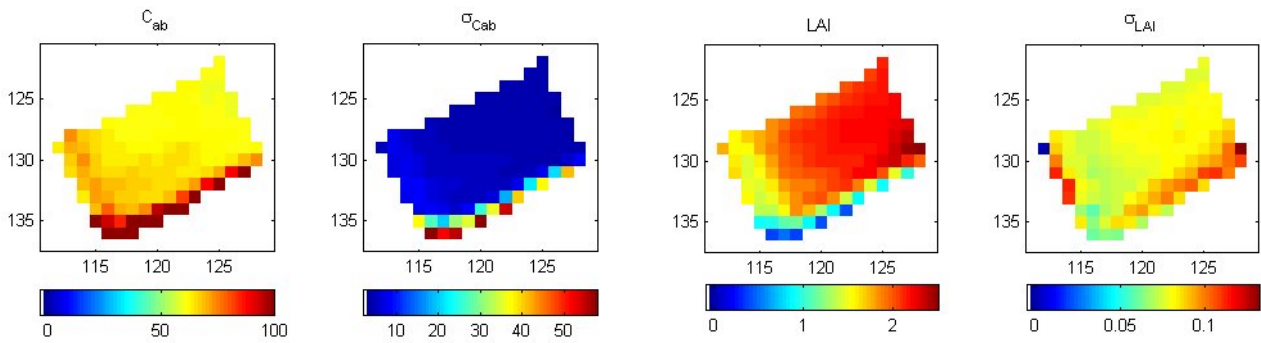
La quantification de l'indice foliaire et la cartographie des espèces végétales sont les produits phare de la télédétection des couverts végétaux à cause de l'importance de la quantité de biomasse et du type de plante pour les échanges de masse et d'énergie dans la couche limite sol-plante-atmosphère. Le nombre réduit de

bandes spectrales et de directions de visée des capteurs a longtemps privilégié l'utilisation d'indices de végétation, combinaisons des réflectances rouge et proche infrarouge reliées statistiquement au LAI. Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est l'un des plus anciens, des plus simples et des plus utilisés à ce jour, malgré un manque de robustesse qui lui est reproché... Les premières inversions du modèle SAIL ont été réalisées par Narendra Goel dans les années quatre-vingt sur des données multi-angulaires. En admettant qu'une combinaison de deux bandes spectrales suffise à estimer le LAI, on pouvait raisonnablement penser que l'inversion d'un modèle de réflectance sur un nombre suffisant de données multi-spectrales conduirait à des résultats équivalents sinon meilleurs ! Nous avons confirmé cette hypothèse comme le montrent les résultats d'inversions pratiquées sur des spectres de réflectance (Figure 15). Sans entrer dans les détails : le paramètre de structure des feuilles  $N$  est généralement fixé à sa valeur moyenne car, comme nous l'avons vu précédemment, il agit peu sur la réflectance des couverts végétaux ; l'angle moyen d'inclinaison des feuilles  $\theta_1$  qui semble avoir un effet sur la réflectance du même ordre de grandeur que le LAI – ceci sera confirmé au paragraphe §II.2 grâce à l'étude de sensibilité de PROSAIL – peut être laissé libre lors des inversions mais sa connaissance *a priori* améliore les résultats. L'inversion du modèle sur des données multi-angulaires devrait permettre de mieux séparer ces deux variables décrivant l'architecture du couvert. Les résultats obtenus avec des données CAESAR et POLDER n'ont cependant pas permis de le montrer avec certitude. Plus généralement, la question cruciale du contenu en information des données multi-spectrales et multi-directionnelle n'a encore pas trouvé de réponse satisfaisante.



**Figure 15.** Comparaison entre les valeurs mesurées de LAI et estimées par inversion du modèle PROSAIL **a)** sur des cultures de betterave à sucre (*Beta vulgaris*) surmontant un sol naturel  $\Delta$  et un sol noir  $\nabla$  ; **b)** sur des cultures de maïs (*Zea mays*)  $\circ$  et de soja (*Glycine max*)  $\triangleleft$  ; **c)** sur des cultures de blé (*Triticum aestivum*)  $\square$ , de luzerne (*Medicago sativa*)  $\diamond$ , de maïs (*Zea mays*)  $\circ$  et de tournesol (*Helianthus annuus*)  $\Delta$ .

Le calcul de l'incertitude associée aux estimations est une démarche récente en télédétection qui entre désormais dans le cahier des charges des grandes agences spatiales. La campagne de mesures Alpilles-ReSeDA organisée en 1997 sur des parcelles agricoles nous a permis de cartographier la concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  et l'indice foliaire LAI par inversion de PROSAIL sur des données de l'instrument POLDER aéroporté, mais aussi les erreurs associées  $\sigma_{C_{ab}}$  et  $\sigma_{LAI}$  ce qui est nouveau (Figure 16). Les valeurs de  $\sigma$  sont situées sur la diagonale de la matrice de covariance *a posteriori*  $V_{\Theta}$  des variables estimées. La plupart des inversions ont conduit à des estimations fiables pour lesquelles l'erreur relative est inférieure à 15%. Il est aussi possible de déterminer la corrélation entre variables estimées à partir des éléments de  $V_{\Theta}$  situés en dehors de la diagonale. Cette donnée fournit de précieux renseignements sur les ambiguïtés existant entre deux variables, LAI et  $\theta_1$  par exemple, et susceptibles de fausser les résultats de l'inversion. Ces ambiguïtés sont d'avantage liées au modèle et aux données qu'à la méthode d'inversion elle-même comme on peut le lire parfois : certaines méthodes y seront plus ou moins sensibles mais aucune ne peut s'en affranchir totalement. Afin de mieux comprendre les mécanismes de l'inversion et de rendre cette méthode d'extraction de l'information plus efficace, nous avons décidé de quantifier l'effet de chaque variable sur la réflectance de la végétation, mais aussi les interactions entre ces variables.

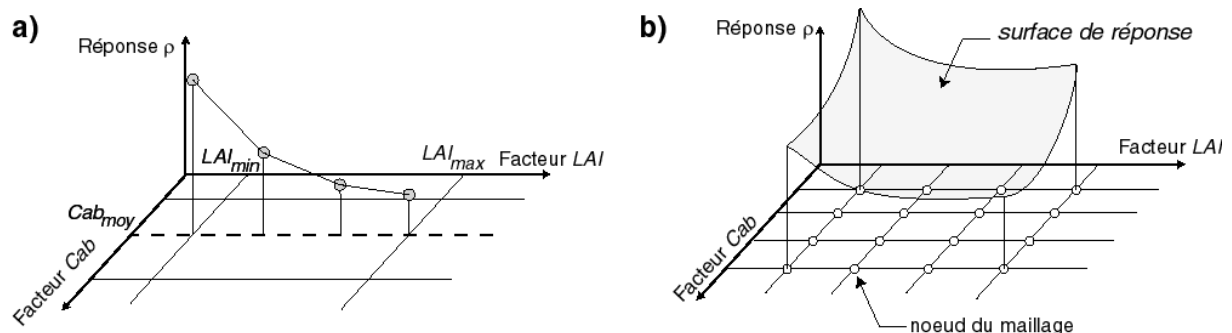


**Figure 16.** Cartographie des variables estimées pour une parcelle agricole de blé (*Triticum aestivum*) et des erreurs associées à partir d'images POLDER acquises le 10 avril 1997 : concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  (deux graphes de gauche) et indice foliaire LAI (deux graphes de droite).

<b>Laboratoires</b>	INRA Avignon, JRC Ispra, University of California Davis, LED Paris
<b>Acteurs</b>	B. Andrieu (INRA Grignon), F. Baret (INRA Avignon), H. Poilvé (Astrium Toulouse), M.D. Steven (University of Nottingham), J. Verdebout (JRC Ispra),
<b>Etudiants</b>	C. Bacour (stage de DEA & thèse de doctorat, LED), S. Flasse (thèse de doctorat, JRC)
<b>Financements</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1997 – 1998 : Matra Marconi Space. Estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles et de l'indice foliaire (LAI) des couverts végétaux par inversion d'un modèle de transfert radiatif</li> <li>• 1998 – 1999 : Programme National de Télédétection Spatiale. Estimation des propriétés biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles. Application aux données POLDER</li> <li>• 1999 – 2000 : Programme National de Télédétection Spatiale. Inversion de quatre modèles de transfert radiatif pour caractériser la végétation par télédétection. Application aux données aéroportées POLDER dans le cadre de l'expérience ALPILLES-ReSeDA</li> </ul>
<b>Publications</b>	Baret et al. (1992), Jacquemoud (1993), Jacquemoud et al. (1994), Jacquemoud et al. (1995a), Andrieu et al. (1997), Ustin et al. (1998), Jacquemoud et al. (2000), Bacour et al. (2002)

## II.2. Etude de sensibilité de PROSAIL

Comme nous venons de le voir, il est important de bien comprendre le comportement d'un modèle vis à vis des variations et des interactions de ses paramètres d'entrée. De bien le quantifier aussi. Pour cela on doit effectuer une analyse de sensibilité. Sous ce vocable coexistent plusieurs méthodes que détaille le livre de Saltelli (Saltelli A., Chan K., Scott E.M. (2000), *Sensitivity Analysis*, John Wiley & Sons, 475 pages.) La plupart des analyses de sensibilité en télédétection se contentent de faire varier séquentiellement les paramètres d'entrée à partir d'un jeu initial. Cette méthode n'est pas satisfaisante car elle dépend du jeu initial, ne couvre pas l'espace des paramètres, et ne tient pas compte de la complexité des phénomènes mis en jeu, en particulier l'interaction entre les différents paramètres (Figure 17a). L'alternative consistant à faire varier simultanément tous les paramètres conduit très rapidement à un nombre important de simulations,  $k^n$  pour un modèle à  $n$  paramètres prenant chacun  $k$  valeurs, et est en pratique difficilement applicable (Figure 17b).



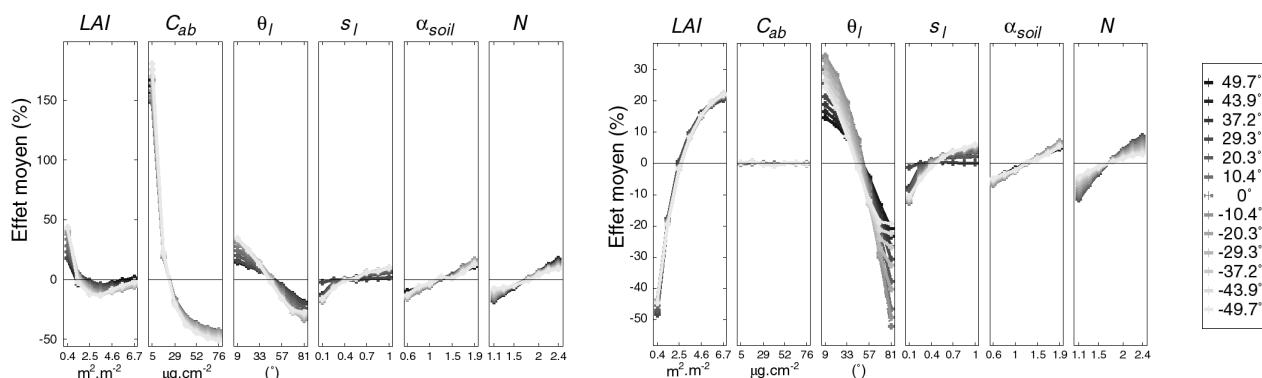
**Figure 17.** Analyse de sensibilité d'un modèle de réflectance de la végétation : **a)** méthode "traditionnelle" ; **b)** simulation à chaque nœud du maillage (Bacour, 2001).



Comment procéder ? Nous avons opté pour la méthode des plans d'expériences numériques, introduite en télédétection par Monique Dechambre du CETP pour étudier le problème pratique de réception des téléphones portables en forêt : qu'est-ce qui dans un couvert forestier – taille/densité/orientation des feuilles, longueur/diamètre des troncs et des branches, espacement/densité des arbres – atténue les micro-ondes et dans quelle proportion ? L'étude de sensibilité d'un modèle de diffusion des ondes électromagnétiques avec la végétation s'est naturellement imposée. Basés sur la réalisation d'essais, les plans d'expériences ont une longue histoire qui a commencé au début du 20<sup>e</sup> siècle en agronomie. Il s'agissait alors de quantifier les effets croisés de l'apport d'amendements et/ou d'engrais à différentes doses sur les cultures. Depuis quelques années, ils sont couramment utilisés dans l'industrie manufacturière et commencent à être appliqués en modélisation afin d'extraire une information quantitative à partir d'un nombre limité de simulations. Ce travail qui fut au cœur de la thèse de doctorat de Cédric Bacour a été réalisé avec l'aide d'Yves Tourbier, ingénieur à la Direction de la Recherche de chez Renault et spécialiste des plans d'expériences. Nous ne détaillerons pas ici cette méthode au contenu fortement statistique. Disons simplement qu'elle permet de quantifier l'effet moyen de chaque paramètre sur la réflectance, ainsi que les interactions entre paramètres, tout en couvrant la totalité de l'espace des paramètres avec un nombre limité de simulations !

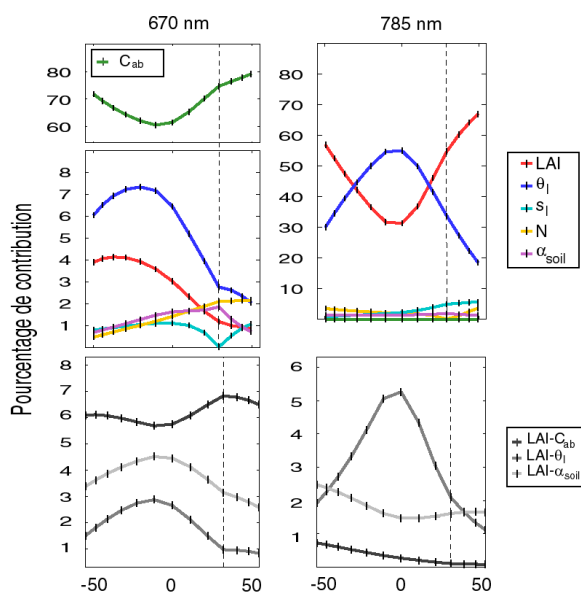
Nous l'avons appliquée au niveau de la feuille avec PROSPECT (Figures 3 et 4) et au niveau du couvert végétal avec PROSAIL dans la configuration de l'instrument POLDER spatial, *i.e.* quatre bandes spectrales (443, 670, 765 et 865 nm), treize angles de visée du plan principal d'observation ( $\pm 49.7^\circ$ ,  $\pm 43.9^\circ$ ,  $\pm 37.2^\circ$ ,  $\pm 29.3^\circ$ ,  $\pm 20.3^\circ$ ,  $\pm 10.4^\circ$  et  $0^\circ$ , les angles positifs indiquant la direction du soleil) et un angle zénithal solaire de  $30^\circ$ . POLDER n'étant pas sensible au rayonnement moyen infrarouge, seuls les six paramètres d'entrée suivants ont été étudiés : indice de structure des feuilles  $N$ , concentration en chlorophylle  $C_{ab}$ , indice foliaire LAI, angle moyen d'inclinaison des feuilles  $\theta_l$ , paramètre de *hot spot*  $s_l$  et paramètre de réflectance du sol  $\alpha_{soil}$ . Le plan d'expériences *Hyper Greco Latin Géométrique* noté  $L_{343}^{757}$  a permis d'établir une liste de 343 simulations (ou combinaisons différentes des paramètres), chaque paramètre étant affecté de l'une des 7 valeurs choisies équidistantes sur sa gamme de variation. En multipliant le nombre de simulations de PROSAIL par le nombre de bandes spectrales et d'angles de visée de POLDER, on obtient un total de  $343 \times 4 \times 13 = 17836$  réflectances calculées qui vont servir à l'étude de sensibilité.

Une partie des résultats est présentée dans la Figure 18 où nous retrouvons, fort heureusement, des comportements connus mais que nous sommes désormais capables de quantifier, et ceci est nouveau. Dans le visible à 670 nm, la concentration en chlorophylle  $C_{ab}$  est le paramètre le plus influent avec un effet exponentiel (loi de Beer) saturant pour les fortes valeurs. L'amplitude des effets des autres paramètres est beaucoup plus faible. On remarquera l'inversion de tendance de l'indice foliaire LAI lorsque la couverture végétale devient abondante, comme l'ont signalé des études antérieures. Dans le proche infrarouge à 865 nm, la chlorophylle n'absorbe plus et les phénomènes de diffusion deviennent prépondérants. Les contrastes avec la réflectance du sol sous-jacent sont aussi plus importants. On constate une augmentation de la réflectance lorsque le LAI augmente et une diminution du même ordre de grandeur lorsque l'angle moyen d'inclinaison des feuilles  $\theta_l$  passe de  $10^\circ$  (feuilles majoritairement horizontales, couvert planophile) à  $80^\circ$  (feuilles majoritairement verticales, couvert érectophile). Le comportement de PROSAIL est, là encore, conforme à ce que nous avons pressenti lors des inversions.



**Figure 18.** Effet moyen de  $N$ ,  $C_{ab}$ , LAI,  $\theta_l$ ,  $s_l$ , et  $\alpha_{soil}$  sur la réflectance calculée par PROSAIL à 670 nm (graphe de gauche) et 865 nm (graphe de droite) pour 13 angles de visée dans le plan principal (Bacour, 2001).

La méthode des plans d'expériences numériques permet aussi de hiérarchiser l'influence de chaque paramètre en calculant sa contribution relative à la réflectance, ainsi que les interactions entre certains paramètres. Nous avons représenté sur la Figure 19 le pourcentage de contribution en fonction des treize directions de visée. Dans le visible à 670 nm, l'influence de la concentration en chlorophylle sur la réflectance se ressent particulièrement dans la direction rétrosolaire où les ombres portées par les feuilles sont réduites au minimum (elles disparaissent entièrement dans le *hot spot*). La contribution des autres paramètres est inférieure à 8%, parfois même à celle de certaines interactions ! Dans le proche infrarouge à 865 nm, la réflectance est au contraire très sensible à l'indice foliaire et à l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. On remarque une dépendance angulaire très marquée : la contribution du LAI est maximum aux angles de visée extrêmes, celle de  $\theta_1$  pour des mesures verticales. Enfin l'interaction LAI- $\theta_1$  semble maximum dans cette même direction, ce qui explique les difficultés rencontrées en inversion pour séparer ces deux variables à partir d'un seul spectre de réflectance mesuré au nadir. Encore une fois, ces résultats confortent notre connaissance intuitive de la réflectance d'un couvert végétal.



**Figure 19.** Contributions relatives de N,  $C_{ab}$ , LAI,  $\theta_1$ ,  $s_1$ , et  $\alpha_{soil}$  et des interactions LAI-  $C_{ab}$ , LAI- $\theta_1$ , et LAI- $\alpha_{soil}$  à la réflectance simulée par PROSAIL dans les treize directions de visée de POLDER spatial. a) 670 nm b) 865 nm. La ligne en pointillés représente la direction du soleil (30°) (d'après Bacour, 2001).

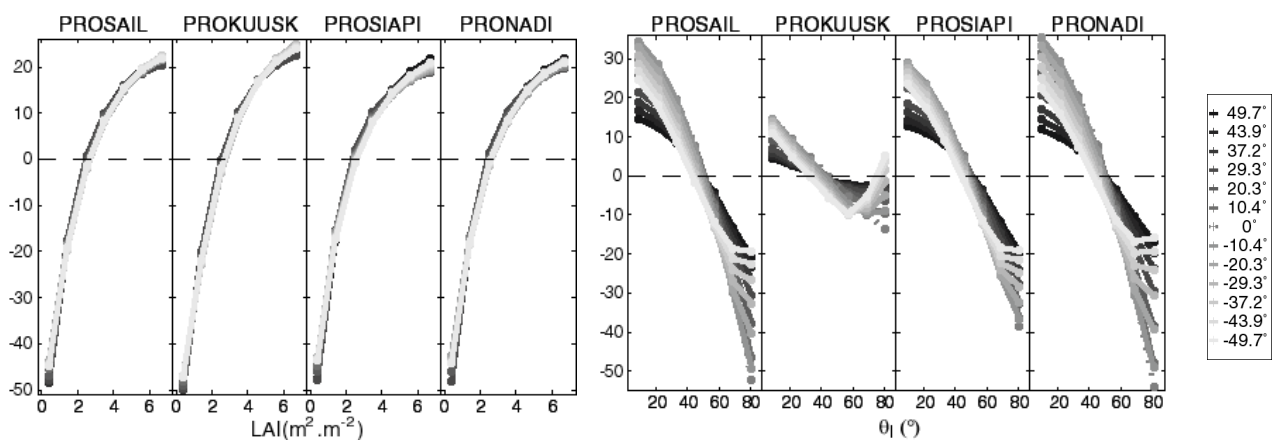
<b>Laboratoires</b>	LED Paris
<b>Acteurs</b>	M. Dechambre (CETP Vélizy), J.-P. Frangi (LED Paris) Y. Tourbier (Renault Guyancourt)
<b>Etudiants</b>	C. Bacour (thèse de doctorat, LED)
<b>Publications</b>	Bacour et al. (2002)

### II.3. Comparaison de quatre modèles de réflectance des couverts végétaux

Alors que les indices de végétation ont donné lieu à de nombreuses comparaisons, on a vu apparaître au cours des années quatre-vingt-dix de nombreux modèles de réflectance des couverts végétaux, toujours présentés comme étant meilleurs que les précédents, mais rarement, pour ainsi dire jamais, confrontés les uns aux autres. C'est à la suite de deux réunions de travail organisées en 1995 et 1997 par la NASA dans le cadre du *Terrestrial Ecology Program* que fut préconisée l'utilisation opérationnelle des modèles existants aux dépens du développement de nouveaux codes devenu moins urgent. Malheureusement, ces préconisations restent en général dans le domaine des bonnes intentions... Un contrat avec Matra Marconi Space nous a donné l'occasion d'aborder ce problème pratique en posant la question : quel est le meilleur modèle pour déterminer les caractéristiques de la végétation à partir de données de réflectance ? Pour y répondre nous avons comparé quatre modèles 1D de transfert radiatif aussi bien dans le sens direct avec les plans d'expériences numériques décrits au paragraphe précédent, qu'en inversion sur des données MIVIS acquises en 1996 et POLDER acquises en 1997. Outre SAIL, nous avons choisi les trois modèles suivants :

- le modèle IAPI développé en 1994 par Jean Iaquina et Bernard Pinty du LaMP de Clermont-Ferrand ;
- le modèle KUUSK de chaîne de Markov développé en 1995 par Andres Kuusk de l'Observatoire de Tartu, Estonie ;
- le modèle semi-discret NADI développé en 1997 par Nadine Gobron, Bernard Pinty, Michel Verstraete et Yves Govaerts du Joint Research Centre d'Ispra, Italie.

Tous ces modèles découlent plus ou moins directement de l'équation de transfert radiatif appliquée à un milieu absorbant et diffusant homogène. Pour que l'intercomparaison soit pertinente, il était très important que les paramètres d'entrée fussent identiques, ce qui a nécessité la modification des codes sources. Parfois cependant, cela ne fut pas possible : l'exemple de la fonction de distribution des angles foliaires, ellipsoïdale chez SAIL, IAPI et NADI, elliptique chez KUUSK, est manifeste. Comme pour PROSAIL, les modèles ont été couplés avec PROSPECT et renommés PROSIAPI, PROKUUSK et PRONADI respectivement. Nous avons donc, dans un premier temps, procédé à une étude de sensibilité complète afin de les comparer en terme *i)* de réflectance simulée pour une grande variété de couverts artificiels, l'espace des paramètres étant entièrement couvert ; *ii)* d'effet des paramètres sur la réflectance ; *iii)* d'interaction entre ces paramètres. Seule une petite partie des résultats est présentée ici, comme les effets moyens de LAI et  $\theta_1$  sur la réflectance (Figure 20).



**Figure 20.** Effet moyen de LAI (graphe de gauche) et  $\theta_1$  (graphe de droite) obtenus pour les quatre modèles à 865 nm pour 13 angles de visée dans le plan principal (Bacour, 2002).

La comparaison des modèles a globalement montré des comportements très proches, comme le montre la Figure 20a pour l'effet du LAI. Cependant, une certaine divergence apparaît avec PROKUUSK quant à l'effet de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles  $\theta_1$  en raison d'une modélisation différente de la fonction de distribution des angles foliaires d'une part et d'approximations des fonctions de phase induites par cette distribution d'autre part (Figure 20b). Ces divergences entraînent-elles des écarts importants lorsqu'on utilise ces modèles dans le sens inverse ? Le modèle PRONADI présentant des temps de calcul prohibitifs, nous n'avons pas pu l'intercomparer avec les trois autres. Les résultats d'inversions rassemblés dans le Tableau 3 montrent de faibles écarts d'estimation du LAI. Qui plus est, PROKUUSK apparaît globalement comme le meilleur modèle en inversion – il est aussi le plus rapide des quatre – malgré une distribution des angles foliaires pour le moins discutable...

Publication	Capteur-vecteur	Couvert végétal	PROSAIL	PROKUUSK	PROSIAPI
Jacquemoud et al. (2000)	MIVIS-avion	<i>maïs</i>	1.40	1.28	1.62
		<i>soja</i>	1.35	1.21	1.66
Bacour et al. (2002)	POLDER-avion	<i>blé</i>	0.48	0.50	0.53
		<i>luzerne</i>	1.53	1.33	1.75
		<i>maïs</i>	0.88	1.14	0.99
		<i>tournesol</i>	0.27	0.27	0.26
<b>moyenne =</b>			<b>0.99</b>	<b>0.96</b>	<b>1.14</b>

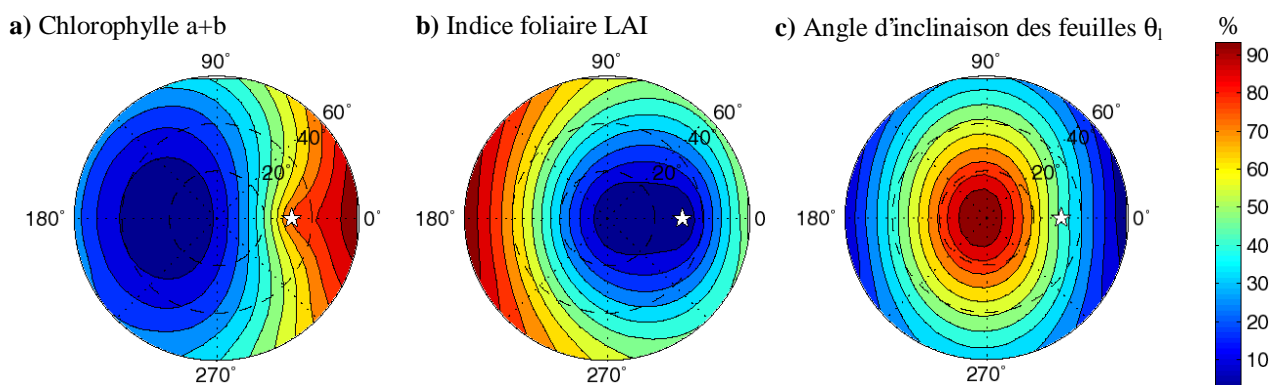
**Tableau 3.** Ecart quadratique moyen ( $rmse = root\ mean\ square\ error$ ) entre le LAI estimé par inversion de trois modèles et le LAI mesuré *in situ* (LAI-2000 pour la campagne MIVIS-avion et planimètre pour la campagne POLDER-avion). On notera que  $\theta_1$  est maintenu libre au cours de toutes les inversions. Les meilleurs résultats sont coloriés en jaune.

L'intercomparaison de modèles de réflectance des couverts végétaux a récemment donné lieu à un exercice plus ambitieux, RAMI (*RADIation transfer Model Intercomparison*), initié par Bernard Pinty du Joint Research Centre d'Ispra dans le cadre de la série de colloques IWMMM (*International Workshop on Multiangular Measurements and Models*). La réflectance bidirectionnelle, l'albédo et la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé ont été calculés par huit modèles (1D : 1/2 DISCRETE = PRONADI, PROKUUSK, PROSAIL ; 3D : DART, FLIGHT, RAYTRAN, RGM, SPRINT) sur deux couverts, un homogène et un hétérogène (modèles 3D uniquement). La première phase de RAMI en 2000 a classé PROKUUSK et PROSAIL loin derrière PRONADI en terme de précision. Ces résultats ont été confirmés en 2002 par la seconde phase de RAMI. Les études de sensibilités précitées avaient déjà décelé la divergence de PROKUUSK ; en revanche, nous avons montré une plus grande similitude entre PROSAIL et PRONADI sur un nombre plus important de couverts végétaux (343 au lieu de 2). L'utilisation des plans d'expériences numériques afin de couvrir l'espace des paramètres pourraient permettre d'affiner ces comparaisons lors de la prochaine phase de RAMI. La comparaison de tous ces modèles dans le sens inverse, par exemple grâce aux tables de correspondances pour inclure les modèles 3D, pourrait aussi réserver des surprises...

<b>Laboratoires</b>	LED Paris
<b>Acteurs</b>	J.-P. Frangi (LED Paris), Y. Tourbier (Renault Guyancourt)
<b>Etudiants</b>	C. Bacour (thèse de doctorat, LED)
<b>Financements</b>	1999 – 2000 : Programme National de Télédétection Spatiale. Inversion de quatre modèles de transfert radiatif pour caractériser la végétation par télédétection. Application aux données aéroportées POLDER dans le cadre de l'expérience ALPILLES-ReSeDA
<b>Publications</b>	Jacquemoud et al. (2000), Pinty et al. (2001), Bacour et al. (2002)

#### II.4 Détermination de configurations optimales

Combien faut-il de bandes spectrales et à quelles longueurs d'onde pour "bien" estimer la biochimie des couverts végétaux ? Combien faut-il de directions de visée et à quels angles pour bien estimer l'architecture des couverts végétaux ? Ces deux questions, simples en apparence, mais cruciales lorsqu'on veut construire un nouveau capteur échantillonnant mieux l'espace spectral et angulaire n'ont cependant reçu que des réponses incomplètes. Nous avons essayé de les aborder par le biais de la modélisation et de l'expérimentation. Les plans d'expériences numériques, d'abord limités aux quatre bandes spectrales et aux treize angles de visées de l'instrument POLDER spatial, ont été étendus à 89 bandes spectrales étroites entre 368 nm et 1114 nm et à 211 directions de visée (ces valeurs correspondent aux mesures expérimentales effectuées en 1996 au Joint Research Centre d'Ispra). La figure 21 résume la sensibilité directionnelle du modèle PROSAIL aux trois variables d'entrée contribuant le plus à la réflectance dans le visible / proche infrarouge.



**Figure 21.** Sensibilité directionnelle du modèle PROSAIL à  $C_{ab}$ , LAI et  $\theta_l$  dans le visible / proche infrarouge pour un angle zénithal solaire égal à  $40^\circ$  (Bacour, 2001).

Il apparaît que la réflectance du couvert végétal est la plus sensible à la concentration en chlorophylle dans la direction rétrosolaire (Figure 21a), à l'indice foliaire dans la direction avant (Figure 21b), et à l'orientation des feuilles au nadir (Figure 21c). Encore une fois, ces résultats confortent la connaissance plus

ou moins intuitive qu'on avait du transport des photons dans la végétation à savoir que *i*) c'est dans la direction arrière (*hot spot*) que les ombres portées par le feuillage sont minimales et donc l'information sur la biochimie foliaire contenue dans le signal radiométrique maximale – inversement elle est minimale dans la direction avant (*dark spot*) ; *ii*) c'est dans la direction spéculaire, et même au delà, que la lumière traversant le feuillage est la plus diffusée et donc l'information sur la quantité de feuilles maximale ; *iii*) enfin, un changement d'orientation des feuilles aura le plus d'effet en visée verticale, là où la proportion de sol vue par le capteur varie très vite. En conséquence, un système permettant une mesure de la réflectance sous au moins trois angles de visées devrait permettre d'améliorer la précision d'estimation des trois paramètres  $C_{ab}$ , LAI et  $\theta_l$ . Il est vraisemblable que ce résultat s'appliquera aux autres constituants biochimiques de la végétation (eau, matière sèche, etc.). L'étude de la sensibilité spectrale entamée dans le visible / proche infrarouge se poursuit.

Les expérimentations *in situ* étant toujours très complexes à mettre en oeuvre, une campagne de mesures a été organisée en juin 1996 sur le goniomètre EGO (*European Goniometric Facility*) du Centre Commun de Recherche d'Ispira. Ce goniomètre, entièrement automatisé et piloté par ordinateur, permet de mesurer la réflectance bidirectionnelle d'une cible de petite taille avec une précision angulaire de 0.1 degré. C'est ce que nous avons fait sur des couverts artificiels et naturels bien caractérisés. Les BRDF ainsi acquises nous ont permis, grâce à la méthode du recuit simulé (approche de type Monte Carlo améliorée), de déterminer expérimentalement des longueurs d'onde et directions de visée privilégiées qui renforcent les résultats théoriques de la Figure 21. Ce travail n'est pas terminé

<b>Laboratoires</b>	LED Paris
<b>Etudiants</b>	C. Bacour (thèse de doctorat, LED), P. Vogt (thèse de doctorat, DLR)
<b>Financements</b>	1996 – 1997 : Joint Research Centre. <a href="#">Investigation of new inversion techniques to extract information on vegetation canopies</a> . Collaboration : JRC-Ispira-Italie, DLR-Berlin-Allemagne, université Paris 7

## CONCLUSION-PERSPECTIVES

Il est banal de dire que les chemins de la recherche sont sinueux. Les travaux effectués au cours des dix dernières années et résumés dans ce document ont progressé au gré des collaborations, des opportunités de financement, de l'octroi de bourses de thèses, mais aussi des nouvelles découvertes scientifiques qui chaque jour enrichissent notre connaissance. Malgré une ligne directrice claire et une volonté sans faille, il faut faire avec. Force est de constater que parmi ces facteurs, le plus limitant est le temps disponible : alors que les stages postdoctoraux sont des périodes de grande liberté, donc de créativité, les contraintes du métier d'enseignant-chercheur, mais aussi les pesanteurs du système universitaire français, freinent la réalisation de nombreux projets.

Quelles sont les perspectives des thèmes de recherche évoqués plus haut ? Au niveau de la feuille, la priorité sera donnée au cours des prochains mois au projet RAMIS qui, après bien des vicissitudes, a enfin pu démarrer grâce à la conjonction de facteurs financiers et scientifiques. Un premier prototype du capteur devrait être prêt au printemps 2003, après quoi commencera la phase de validation au champ. En 2001, ce projet a été soumis au concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes de l'ANVAR (*Agence Nationale de Valorisation de la Recherche*) mais n'a pas été retenu en raison de son immaturité. Nous participerons de nouveau à ce concours en 2003 avec un dossier plus complet. La caractérisation et la modélisation de la structure 3D des feuilles est un sujet qui me tient particulièrement à cœur car cette approche quantitative de l'anatomie foliaire en relation avec les paramètres de l'environnement est innovante, pluridisciplinaire, et les retombées potentielles passionnantes dans des domaines scientifiques variés. Enfin, plus de dix ans après qu'il a été développé, le modèle PROSPECT reste la référence en télédétection dans le domaine solaire bien que maintes améliorations soient possibles (introduction de nouveaux pigments, de la fluorescence de la chlorophylle, de l'hétérogénéité tissulaire, des propriétés de surface, etc.). Ces différents axes de recherche sont en réalité étroitement liés : la progression dans une direction nourrit presque systématiquement les autres activités.

Des outils perfectionnés d'interprétation de la réflectance des couverts végétaux, basés sur des modèles compliqués de transfert radiatif, ont été développés et mis à disposition des thématiciens au cours des dix dernières années. Pourtant la très grande majorité d'entre eux utilise encore des indices de végétation basés sur des relations simples entre les réflectances rouge et proche infrarouge. D'où vient ce décalage ? Il semble que la transmission des connaissances s'effectue mal, ceci pour plusieurs raisons : tout d'abord rares sont les modèles diffusés ouvertement. Ensuite, leur maniement et surtout la maîtrise du processus d'inversion, quelle que soit la méthode (itérations, tables de correspondances ou réseaux de neurones), sont souvent complexes. Enfin nous n'avons peut-être pas su convaincre les utilisateurs du bénéfice qu'ils pourraient en tirer. Par exemple, si nous savons potentiellement dresser des cartes de chlorophylle ou de teneur en eau depuis bientôt une décennie à partir d'images AVIRIS, ce n'a été réalisé que récemment ! Et par d'autres chercheurs... Les plans d'expériences numériques utilisés à l'origine pour étudier la sensibilité des modèles à leurs paramètres d'entrée n'ont pas livré tous leurs secrets ! De nombreux développements sont envisagés : modélisation en surface de réponse de PROSPECT ou PROSAIL, amélioration de la construction des tables de correspondances utilisées en inversion, détermination des configurations optimales, etc.

## PUBLICATIONS JOINTES

Une sélection des huit publications les plus récentes et les plus significatives de ce dossier est présentée :

### CHAPITRE I. les propriétés optiques des feuilles : connaissance, modélisation, applications

- **Jacquemoud S.**, Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1996), Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model, *Remote Sens. Environ.*, 56(3):194-202.
- Ceccato P., Flasse S, Tarantola S., **Jacquemoud S.**, Grégoire J.M. (2001), Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sens. Environ.*, 77(1):22-33.
- Govaerts Y.M., **Jacquemoud S.**, Verstraete M.M., Ustin S.L. (1996), Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf, *Appl. Opt.*, 35(33):6585-6598.
- Ustin S.L., **Jacquemoud S.**, Govaerts Y. (2001), Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis, *Plant Cell Environ.*, 24:1095-1103.

### CHAPITRE II. Les propriétés optiques des couverts végétaux : modélisation, application

- Ustin S.L., Roberts D.A., Pinzón J.E., **Jacquemoud S.**, Gardner M., Scheer G., Castañeda C.M., and Palacios-Orueta A. (1998), Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods, *Remote Sens. Environ.*, 65(3):280-291.
- **Jacquemoud S.**, Bacour C., Poilvé H., Frangi J.-P. (2000), Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode, *Remote Sens. Environ.*, 74:471-481.
- Bacour C., **Jacquemoud S.**, Tourbier Y., Dechambre M., Frangi J.P. (2002), Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models, *Remote Sens. Environ.*, 79(1):72-83.
- Bacour C., **Jacquemoud S.**, Leroy M., Hauteceur O., Weiss M., Prévot L., Bruguier L., Chauki H. (2002), Reliability of the estimation of vegetation characteristics by inversion of three canopy reflectance models on airborne POLDER data, *Agronomie: Agriculture and Environment*, sous presse.