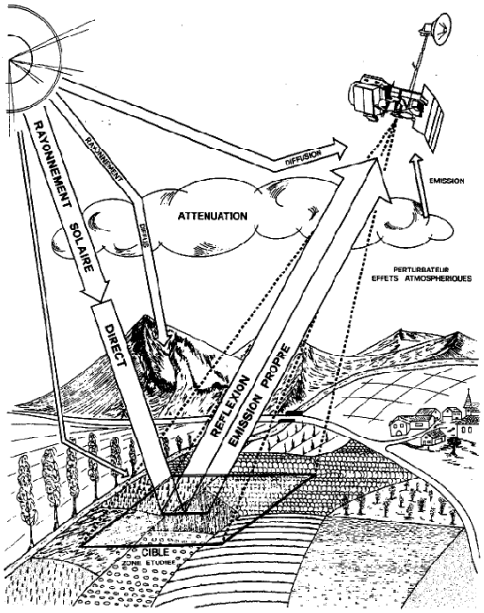
L’apport de la télédétection pour la caractérisation des surfaces végétales et la modélisation de leur fonctionnement

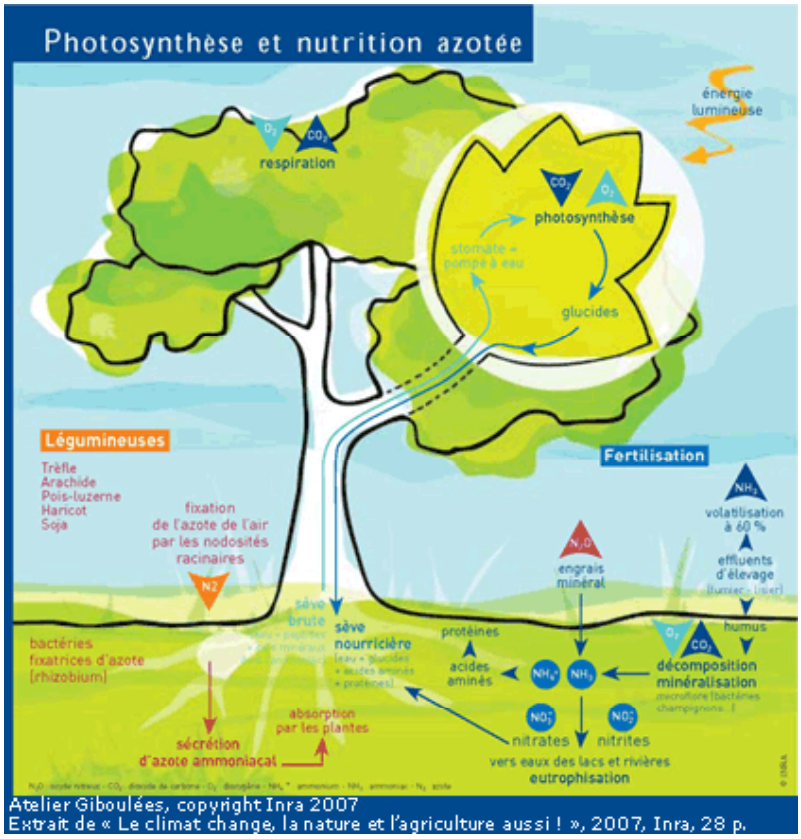
Rémi Lecerf – INRA EMMAH

Stage "Eléments de télédétection depuis l'espace" Rennes, 22 - 26 novembre 2010

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

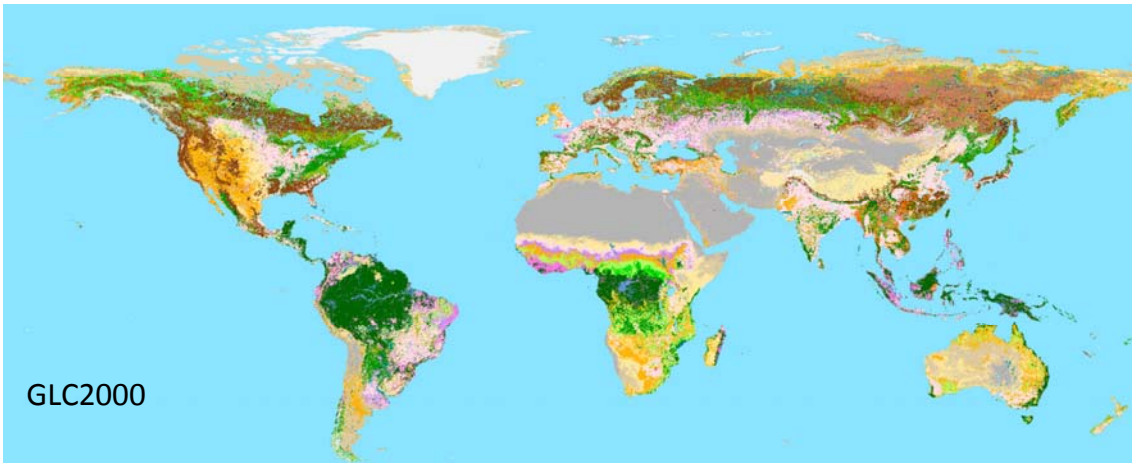


Le rayonnement électromagnétique au centre du fonctionnement des plantes



La végétation à la surface du globe

Cartographie des types d'occupation du sol à l'échelle globale



GLC Global Class (according to LCCS terminology)
Tree Cover, broadleaved, evergreen *LCCS >15% tree cover, tree height >3m* (Examples of sub-classes at regional level* : *closed > 40% tree cove; open 15-40% tree cover)*
Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed
Tree Cover, broadleaved, deciduous, open *(open 15-40% tree cover)*
Tree Cover, needle-leaved, evergreen
Tree Cover, needle-leaved, deciduous
Tree Cover, mixed leaf type
Tree Cover, regularly flooded, fresh water (& brackish)
Tree Cover, regularly flooded, saline water, (daily variation of water level)
Mosaic: Tree cover / Other natural vegetation
Tree Cover, burnt
Shrub Cover, closed-open, evergreen (Examples of sub-classes at reg. level *: (i) sparse tree layer)

Shrub Cover, closed-open, deciduous (Examples of sub-classes at reg. level *: (i) sparse tree layer)
Herbaceous Cover, closed-open (Examples of sub-classes at regional level *: (i) natural, (ii) pasture, (iii) sparse trees or shrubs)
Sparse Herbaceous or sparse Shrub Cover
Regularly flooded Shrub and/or Herbaceous Cover
Cultivated and managed areas (Examples of sub-classes at reg. level *: (i) terrestrial; (ii) aquatic (=flooded during cultivation), and under terrestrial: (iii) tree crop & shrubs (perennial), (iv) herbaceous crops (annual), non-irrigated, (v) herbaceous crops (annual), irrigated)
Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other natural vegetation
Mosaic: Cropland / Shrub or Grass Cover
Bare Areas
Water Bodies (natural & artificial)
Snow and Ice (natural & artificial)
Artificial surfaces and associated areas

Télédétection et végétation : la modélisation

La végétation n'est pas homogène à la surface du globe : différences de structures, de composition biochimique

Quelles interactions entre le rayonnement électromagnétique et la végétation ?

Interactions avec les feuilles

Interactions avec les couverts

Comment modéliser le fonctionnement des couverts végétaux par télédétection ?

Quelle démarche ?

Quel type de modèle ?

Quelles variables est-il possible de mesurer à l'aide d'images de télédétection ?

Comment valider l'information acquise par télédétection ?

Plan

1. Rappels
   - Les mesures de télédétection
   - Interactions entre rayonnement électromagnétique et matière
   - La photosynthèse
   - Les modèles de transfert radiatif : Principes de la modélisation

2. Interactions entre le rayonnement électromagnétique et les surfaces végétales
   - Propriétés optiques des feuilles
   - Propriétés des couverts
   - Propriétés optiques des sols

3. Les modèles de transfert radiatif
   - Un modèle de transfert radiatif des feuilles : le modèle PROSPECT
   - Les différents types de modèles de couvert
   - Un modèle de transfert radiatif des couverts : le modèle SAIL
   - La combinaison de différents modèles

Plan

4. L'inversion des modèles de transfert radiatif
   - Les réseaux de neurones
   - L'optimisation
   - Les LUT
   - Incertitudes
   - Apport d'information à priori

5. Comparaison avec des indices de végétation
   - Conception d'indices
   - Relation avec des variables biophysiques

6. La validation terrain
   - Photographies hémisphériques
   - L'instrumentation

7. Exemples d'application
   - Agriculture de précision
   - Phénologie et suivi
   - Extraction de variables sur les sols avec un capteur hyperspectral
   - Modèle de culture et assimilation

Rappels : Réflectance/Luminance

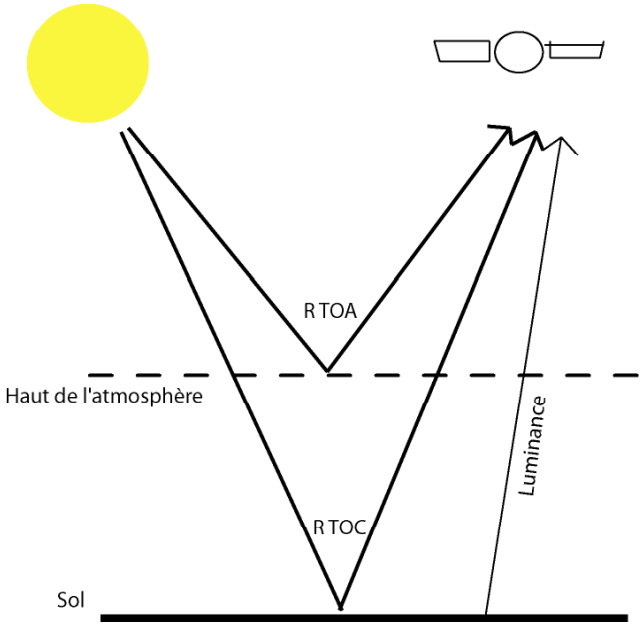
Le signal (ou REM) est modifié au contact d'objets (de molécules). Dans le cas de l'observation de la terre, le REM est modifié par :

- l'atmosphère
- les surfaces terrestres

Luminance : Rayonnement émis par une surface dans une direction donnée ($W.m^2.str^{-1}.\mu m^{-1}$)

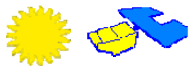
Réflectance en haut de l'atmosphère (TOA) = Luminance enregistré par le capteur / Rayonnement incident en haut de l'atmosphère

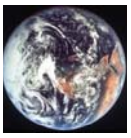
Réflectance au sol (TOC) = Luminance au sol / Rayonnement incident

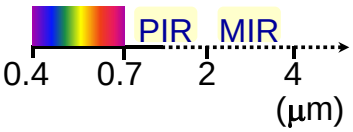


Données satellitales

$$\rho(\Omega_v,\Omega_s,x,y,t,\lambda)$$







Géométrie

Latitude
Résolution

Date
d'acquisition

Bandes

Information directionnelle

Information spatiale

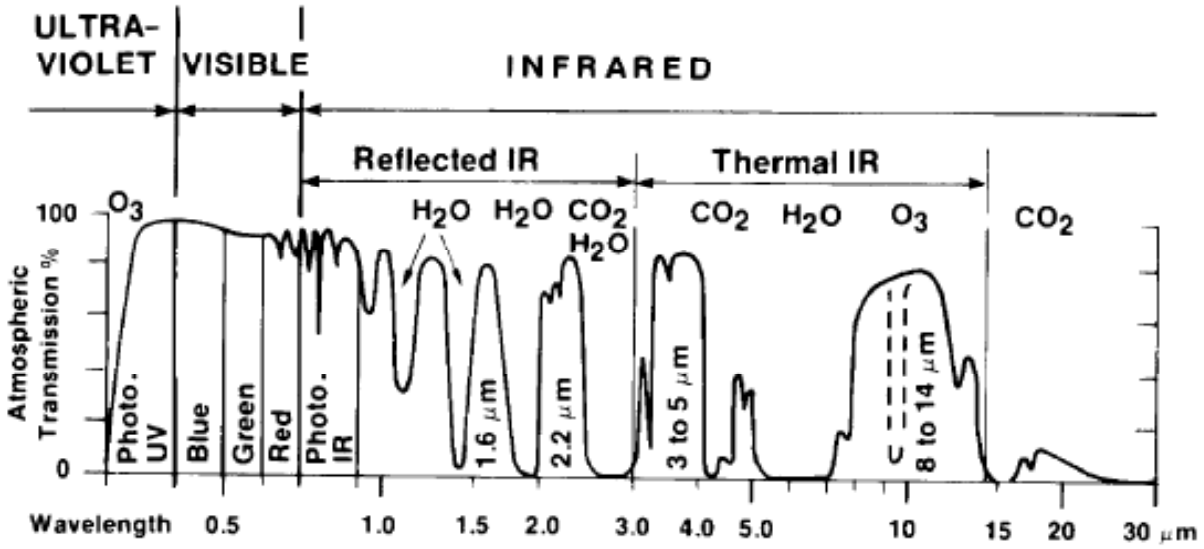
Information temporelle

Information spectrale

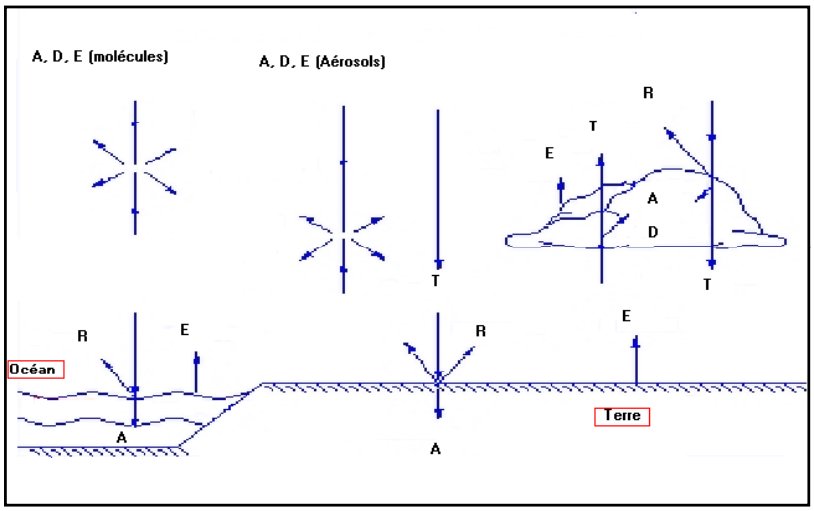
Rappels : L'atmosphère

Les fenêtres atmosphériques

Absorption et réflexion du REM par l'atmosphère dans certaines longueurs d'ondes



Rappels : Absorption/Réflexion/Transmission



D=Diffusion

A=Absorption

E=Emission

T=Transmission

R=Réflexion

Absorption (Absorptance **α**) : modifie l'énergie interne de l'objet. L'énergie absorbée est transformée en chaleur produisant à son tour une émission de REM

Réflexion (Réflectance **ρ**) : rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie reçu

Transmission (Transmittance τ) : rapport entre l'énergie transmise et l'énergie reçue

Diffusion : Dispersion aléatoire du rayonnement électromagnétique par les particules composants l'atmosphère

$$\tau(\lambda,T)+\rho(\lambda,T)+\alpha(\lambda,T)=1$$

Indice de réfraction

Absorption et diffusion sont décrits
par l'indice de réfraction complexe du milieu (*N*)

$N =$

Indice de réfraction complexe

Diffusion

n

Partie réelle

$$0.02 < \frac{dn}{d\lambda} < 0.1\mu m^{-1}$$

Dépendance spectrale faible

$+$

Absorption

iK

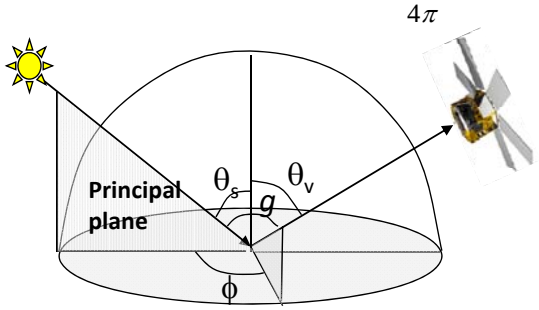
Partie imaginaire

Dépendance spectrale forte

Diffusion

- Elle dépend de
  - la partie réelle de l'indice de réfraction
  - la taille des particules
- Elle est définie par la fonction de phase $\Phi(g)$
  - = probabilité de diffusion dans une direction donnée par l'angle de phase (g) entre direction d'incidence et de visée

$$\int_{4\pi} \Phi(g)dg = 1$$



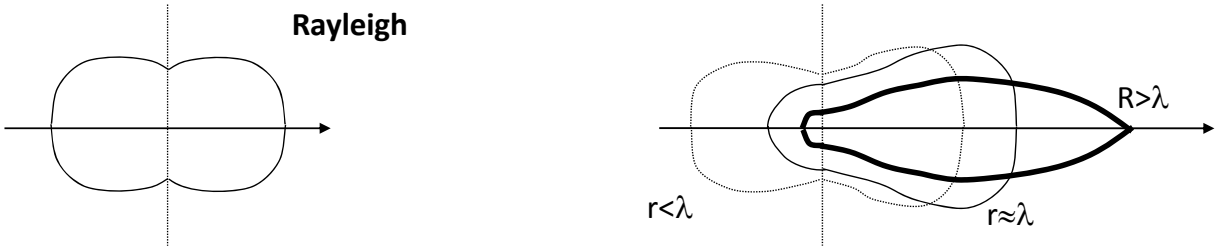
g=phase angle = acos($\cos(\theta_s).\cos(\theta_v) + \sin(\theta_s).\sin(\theta v).\cos(\phi)$)

Processus de diffusion

Type of scattering		Relative diameter	Spectral dependance	Phase function	Elements
Volume scattering	Rayleigh	$\frac{\pi.D}{\lambda} < \frac{0,6}{n}$	$\tau(\lambda)=\tau(\lambda_o)(\lambda/\lambda_o)^{-4}$	symetrical	Molecules (Water, atmosphere, …)
	Mie	$5 < \frac{\pi.D}{\lambda} < \frac{0,6}{n}$	$\tau(\lambda)=\tau(\lambda_o)(\lambda/\lambda_o)^{-1}$	forward	Aerosols
Surface reflection/refraction		$\frac{\pi.D}{\lambda} > 5$	$\rho(\lambda)\approx\rho(\lambda_o)$	$\theta_s=\theta_v$ / $n_1.\sin\theta_s=n_2.\sin\theta_r$	Leaf or background facets

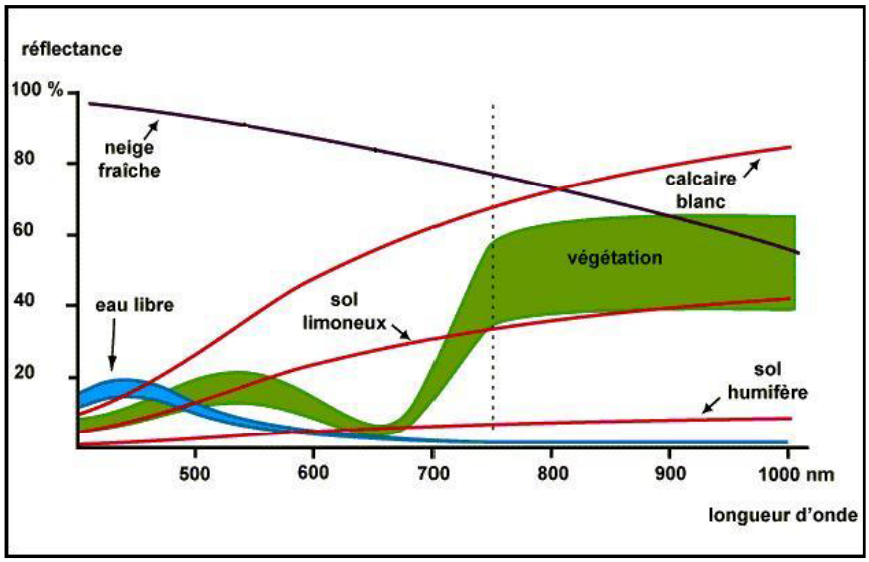
Diffusion de Mie : Lorsque la taille des molécules est supérieure à la longueur d'onde. L'onde électromagnétique est diffusée dans un sens préférentiel

Diffusion de Rayleigh : Lorsque la taille des molécules est inférieure à la longueur d'onde. L'onde électromagnétique est diffusée dans toute les directions.



Rappels : Le REM et les surfaces terrestres

Exemple de spectre de sol et de végétation



La photosynthèse

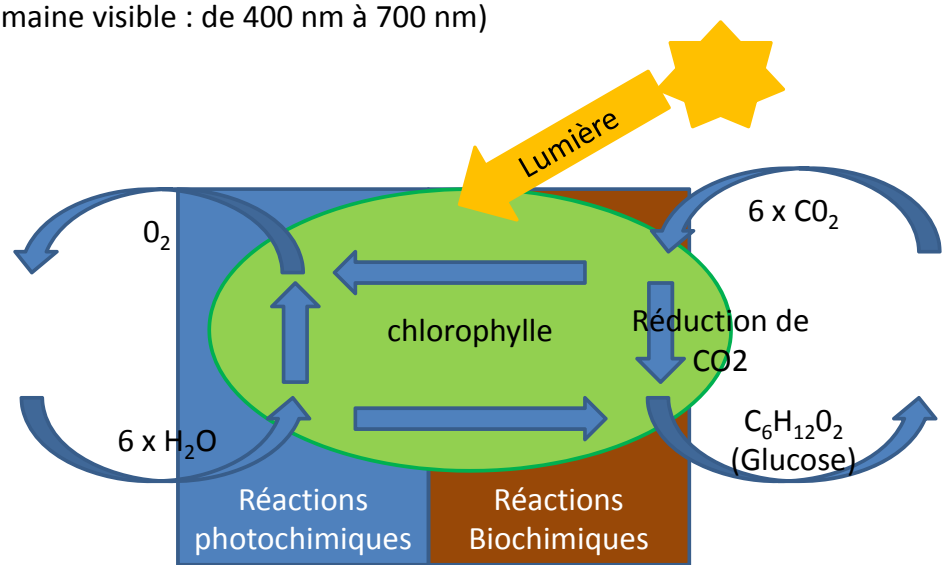
Littéralement : synthèse réalisée à l'aide de l'énergie lumineuse

Les principaux chloroplastes contenues dans les cellules d'une feuille :

→ Chlorophylle (vert) : Chlorophylle a et b

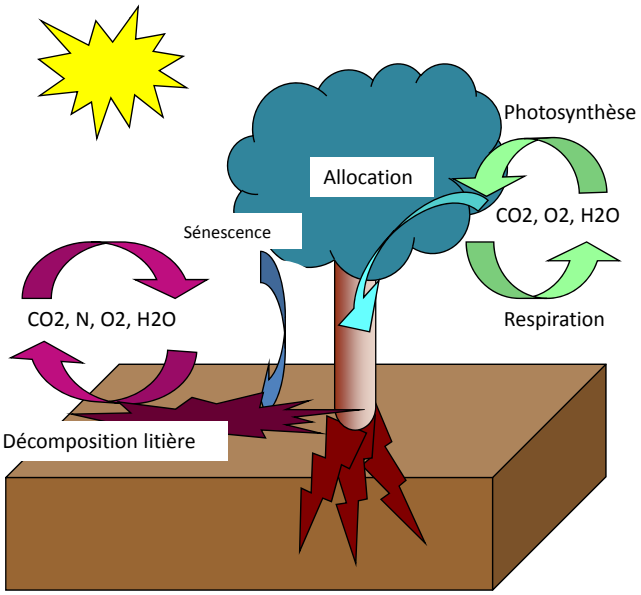
→ Caroténoïdes (jaune-rouge) : β-carotènes et xanthophylles

Les chloroplastes absorbent certaines radiations dites actives pour la photosynthèse (la lumière, domaine visible : de 400 nm à 700 nm)



Processus principaux pour la biosphère

- Production primaire,
- Transferts de chaleur et d'eau

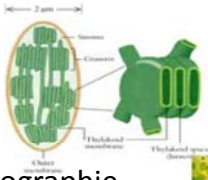


Types de processus	*Variable*
Type de végétation	Type de couvert
Phénologie	LAI(t) LAI (fleurs) Sénescence Structure
Interception du rayonnement	fAPAR LAI (vert) Structure
Photosynthèse	Chlorophylle Matière sèche Xanthophylle
Respiration (canopy)	LAI Composition
Décomposition	Humidité du sol Matière Organique Composition
Transfert hydrique	fCover LAI Type de Sol Humidité du sol Texture Residus

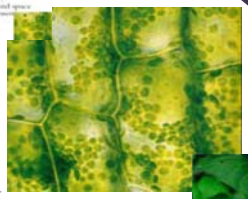
Les variables du couvert d'intérêt et observables

Biophysical variable			Process models
Data preprocessing	**Reflectance**	**Acronym**	**Spectral calibration**
	Rayleigh (O_2)		**Atmospheric correction**
	aerosol		
	Water column		
	Cloud fraction		**Preprocessing steps**
Canopy variables	**Albedo**		**Energy balance**
	fCover	**fCover**	**Many**
	fAPAR	**fAPAR**	**Photosynthesis**
	LAI	**LAI**	**Many (all)**
	Senescent fraction		Phenology
Leaf variables	**Chlorophyll content**	**C_{ab}**	**Photosynthesis, nitrogen cycle**
	Other pigments		Photosynthesis, phenology
	Carotenoids	C_{ar}	Photosynthesis
	Brown pigments	C_{brown}	Phenology, stresses
	Water content	**C_w**	**(Assimilation)**
	Dry matter content	C_{dm}	Photosynthesis, nitrogen cycle
Background variables	Residues fraction		Erosion
	Soil moisture		**Water balance, assimilation**
	Organic matter		Canopy functioning
	Soil type		
	Texture		
	Snow cover		Snow studies
	Snow type		

La démarche générale de la modélisation des surfaces végétales



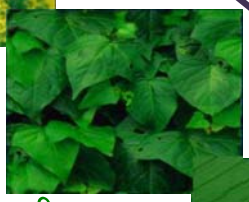
Cartographie
De la composition
Biochimique,
des caractéristiques
architecturales…



Compréhension des phénomènes physiques
Du rayonnement électromagnétique par la matière
(Absorption, Diffusion)

Sens Direct

Modélisation des propriétés optiques
des éléments (cellule, feuille, sol)



Modélisation des
propriétés optiques
Des couverts végétaux,
atmosphère, océans

Sens Inverse

Inversion des modèles

Mesure du signal
(différentes échelles)

Plan

1. Rappels
   - ➢ Les mesures de télédétection
   - ➢ Interactions entre rayonnement électromagnétique et matière
   - ➢ La photosynthèse
   - ➢ Les modèles de transfert radiatif : Principes de la modélisation

2. Interactions entre le rayonnement électromagnétique et les surfaces végétales
   - ➢ Propriétés optiques des feuilles
   - ➢ Propriétés des couverts
   - ➢ Propriétés optiques des sols

3. Les modèles de transfert radiatif
   - ➢ Un modèle de transfert radiatif des feuilles : le modèle PROSPECT
   - ➢ Les différents types de modèles de couvert
   - ➢ Un modèle de transfert radiatif des couverts : le modèle SAIL
   - ➢ La combinaison de différents modèles

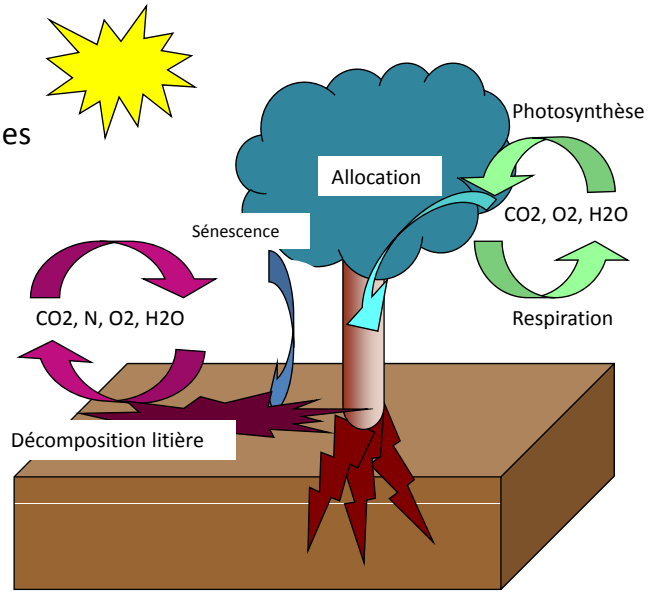
Interactions entre le rayonnement électromagnétique et les surfaces végétales

Les surfaces végétales se décomposent en trois éléments

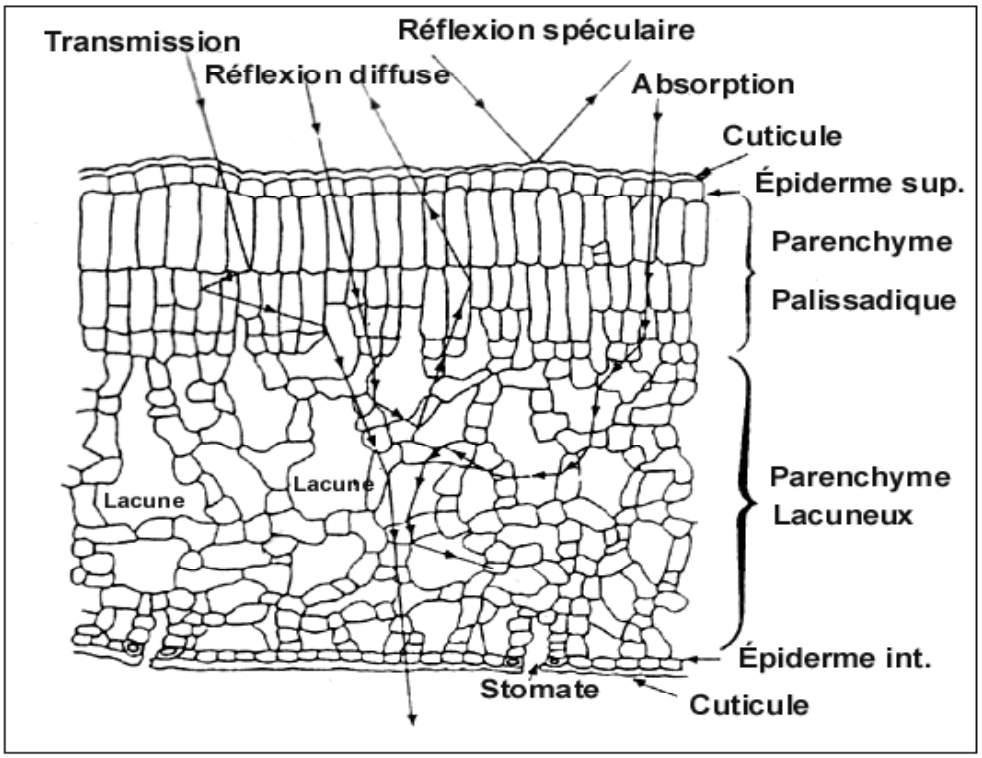
- Les feuilles
- L'architecture des couverts végétaux
- Les sols

Au niveau de la feuille, les principales variables en interaction avec le rayonnement électromagnétique :

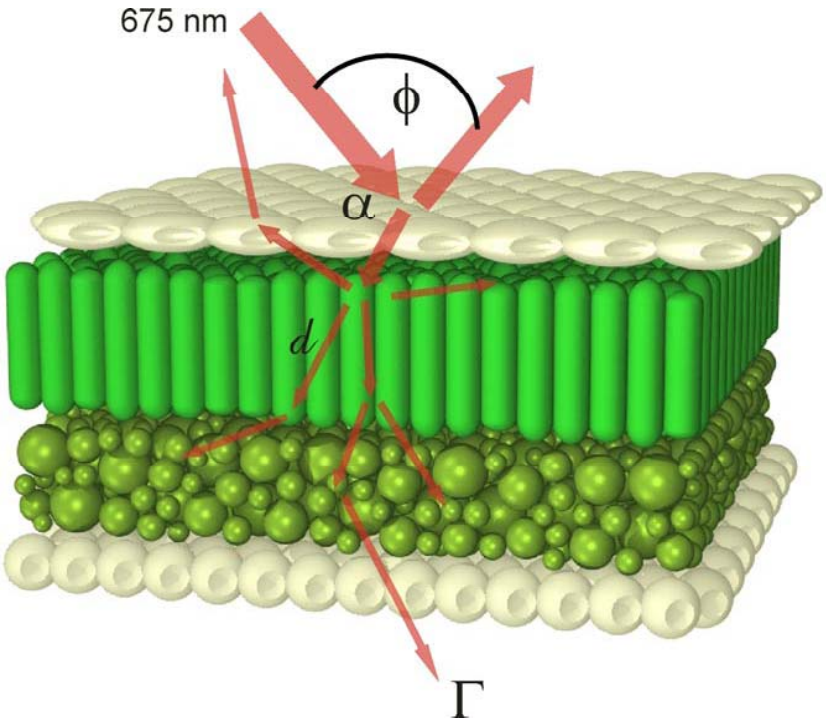
- les pigments (chloroplastes)
- la teneur en eau
- la matière sèche
- la structure
- l'angle d'observation



Structure de la feuille



Structure de la feuille



Epiderme supérieur

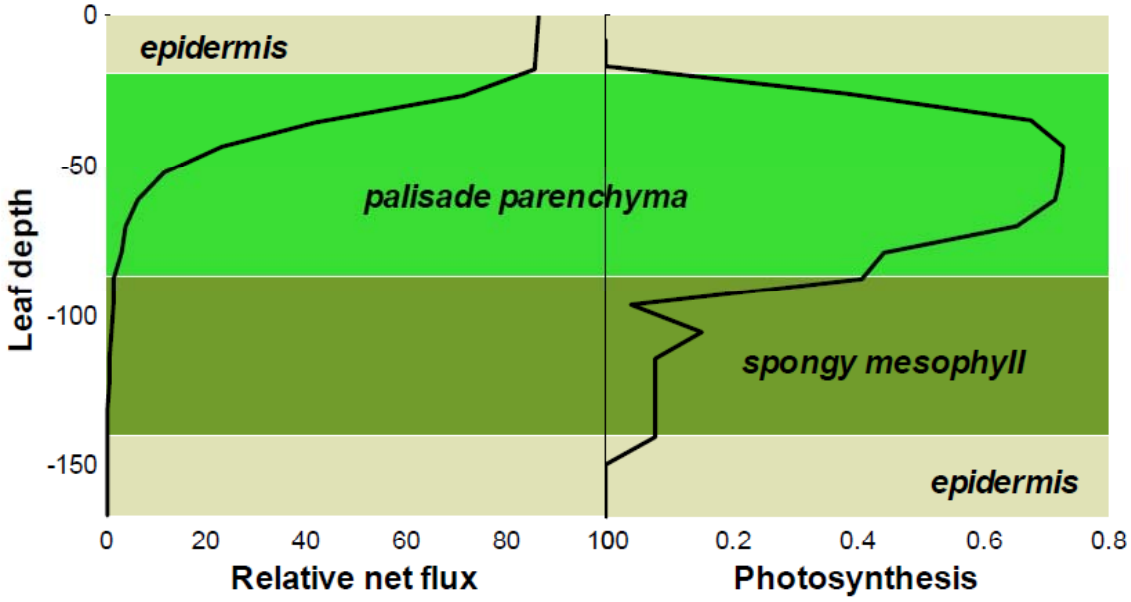
Parenchyme palissadique

Parenchyme lacunaire

Epiderme inférieur (stomates)

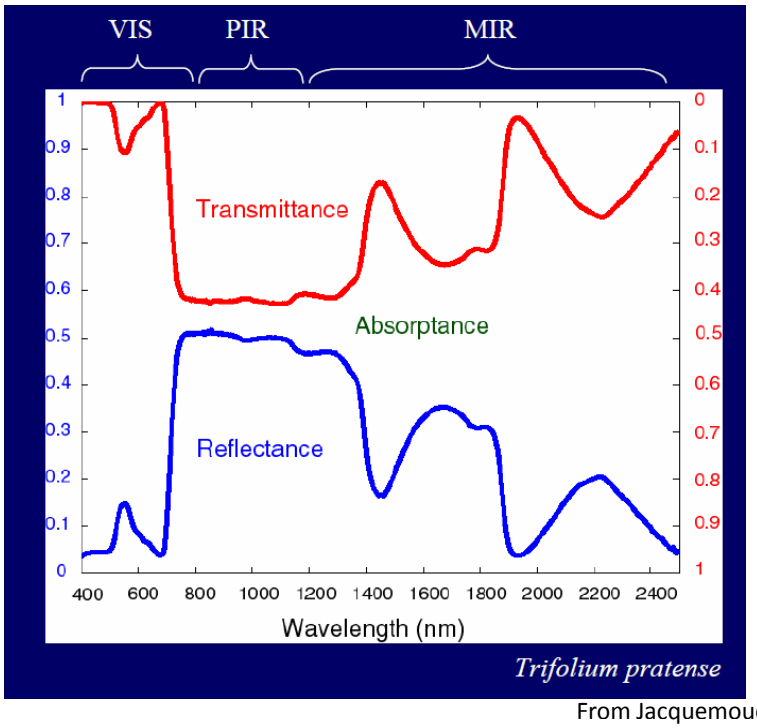
Source : Jacquemoud, 2002

Structure de la feuille



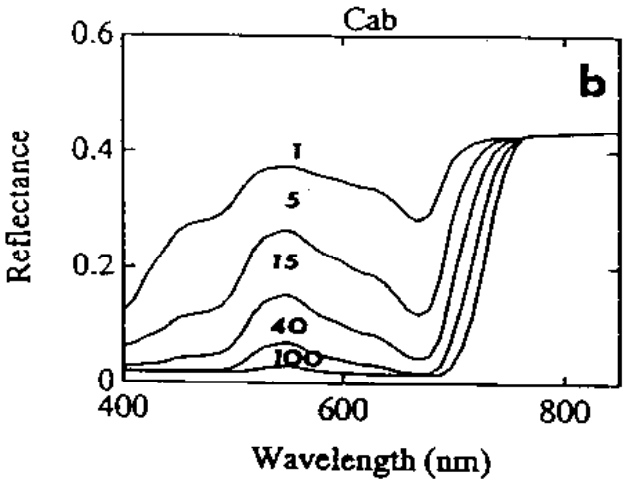
Source : Jacquemoud, 2002

Propriétés optiques typiques d'une feuille verte



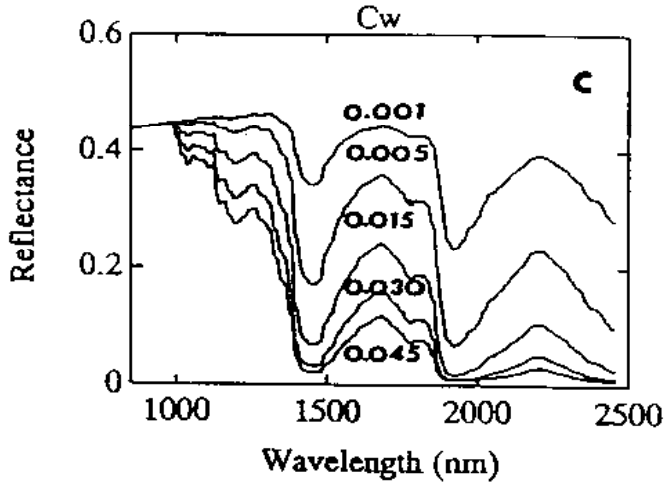
From Jacquemoud

Teneur en chlorophylle



Source : Jacquemoud, 1992

Teneur en eau

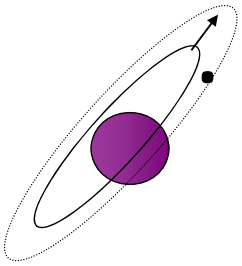


Source : Jacquemoud, 1992

Elementary absorption processes

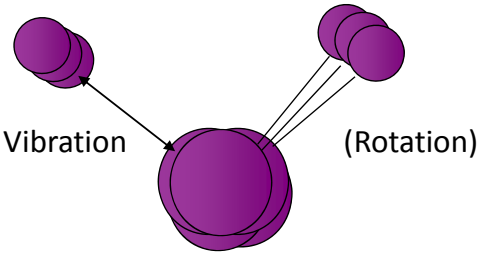
Atomic Absorption

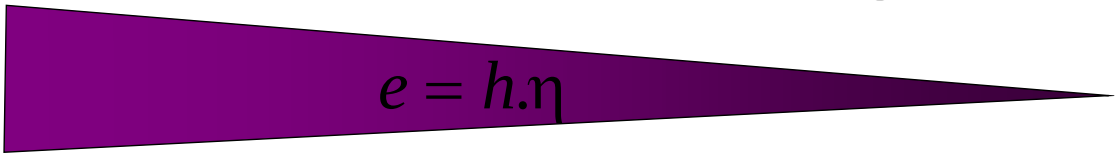
electronic transitions



Molecular Absorption

Vibration & rotation





High energy

Vis-NIR domain

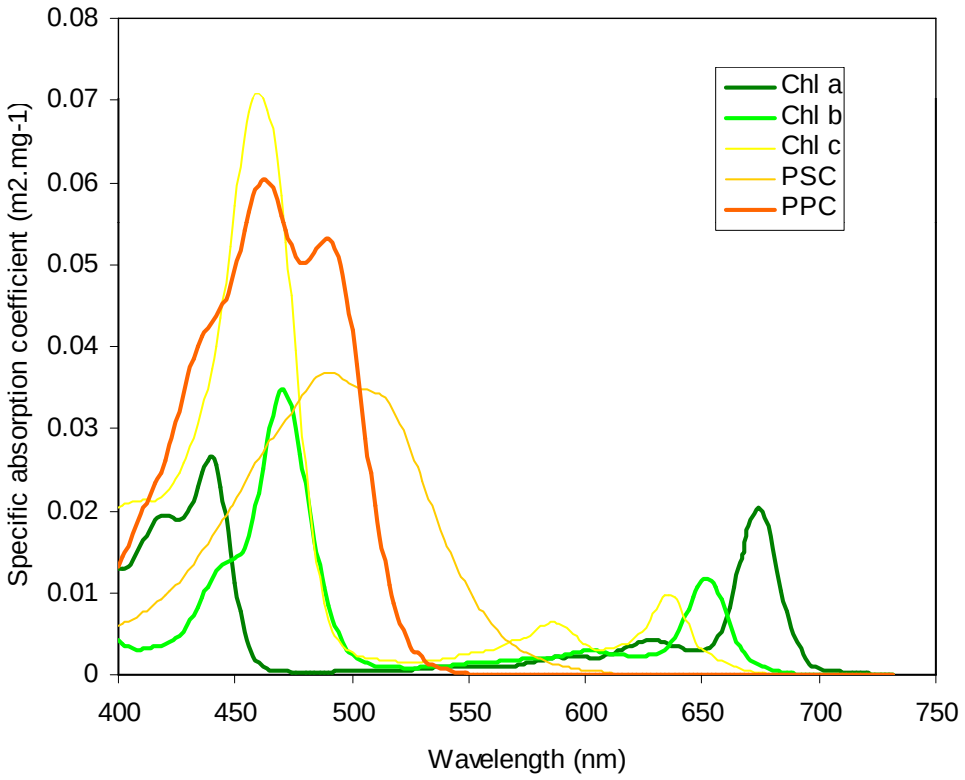
Low energy

SWIR-TIR domain

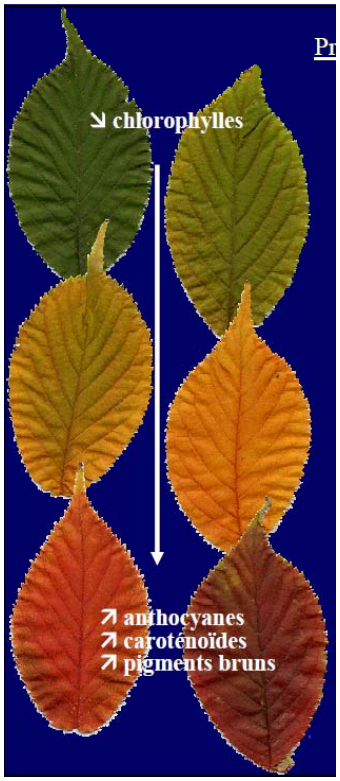
Absorption par les pigments

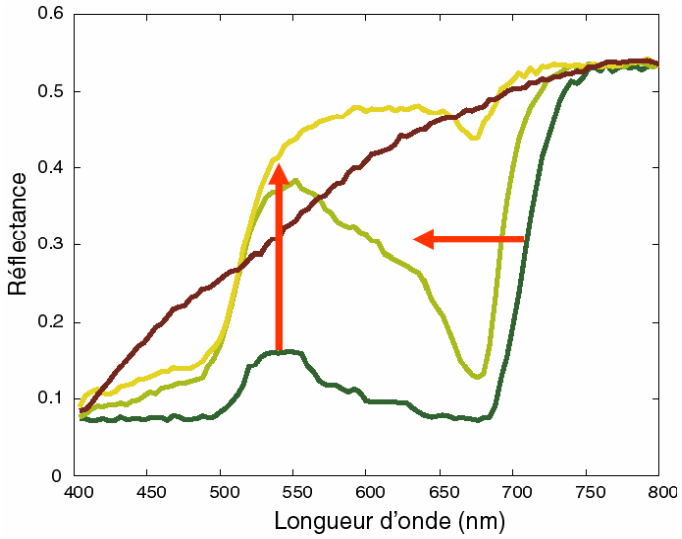
Chlorophyll a
Chlorophyll b
Carotenoids
Xanthophylls

Transitions électroniques



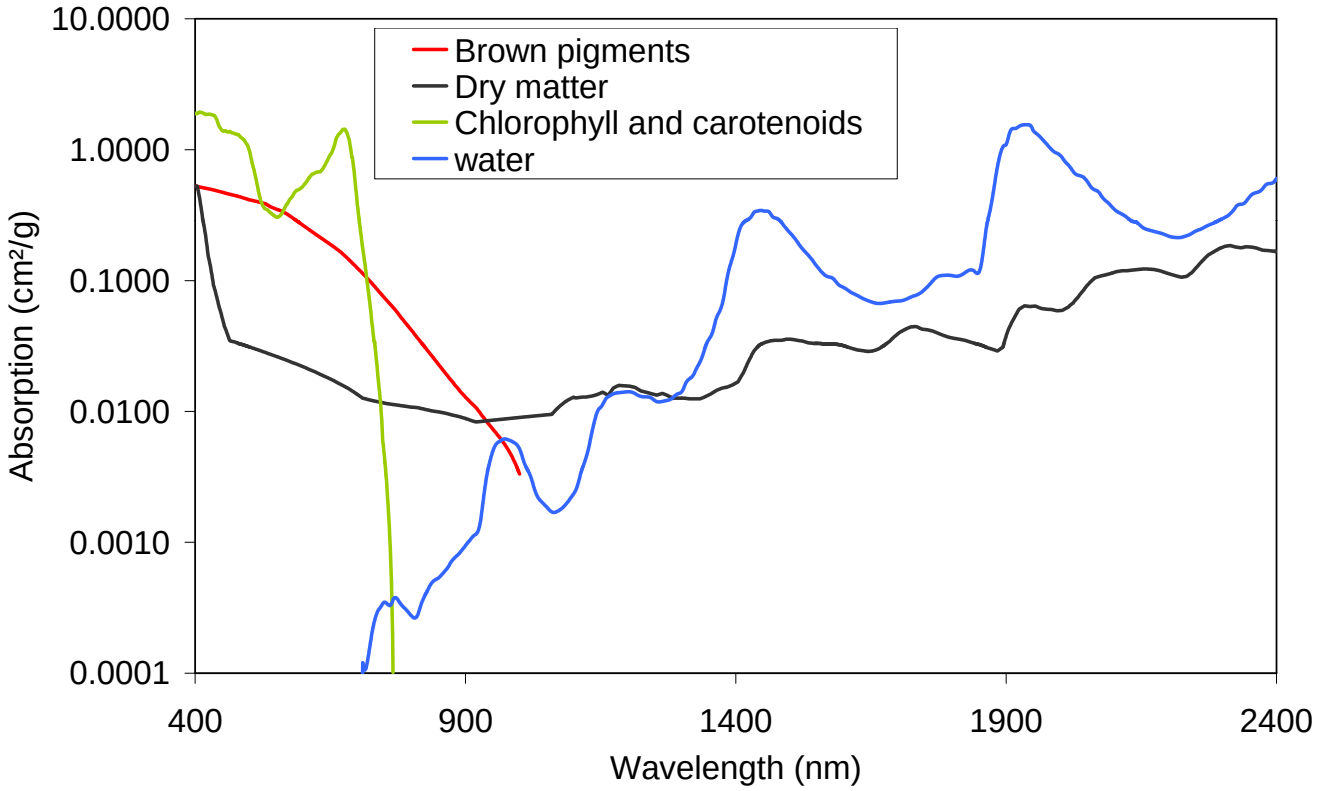
Effet d'une variation de teneur en pigments



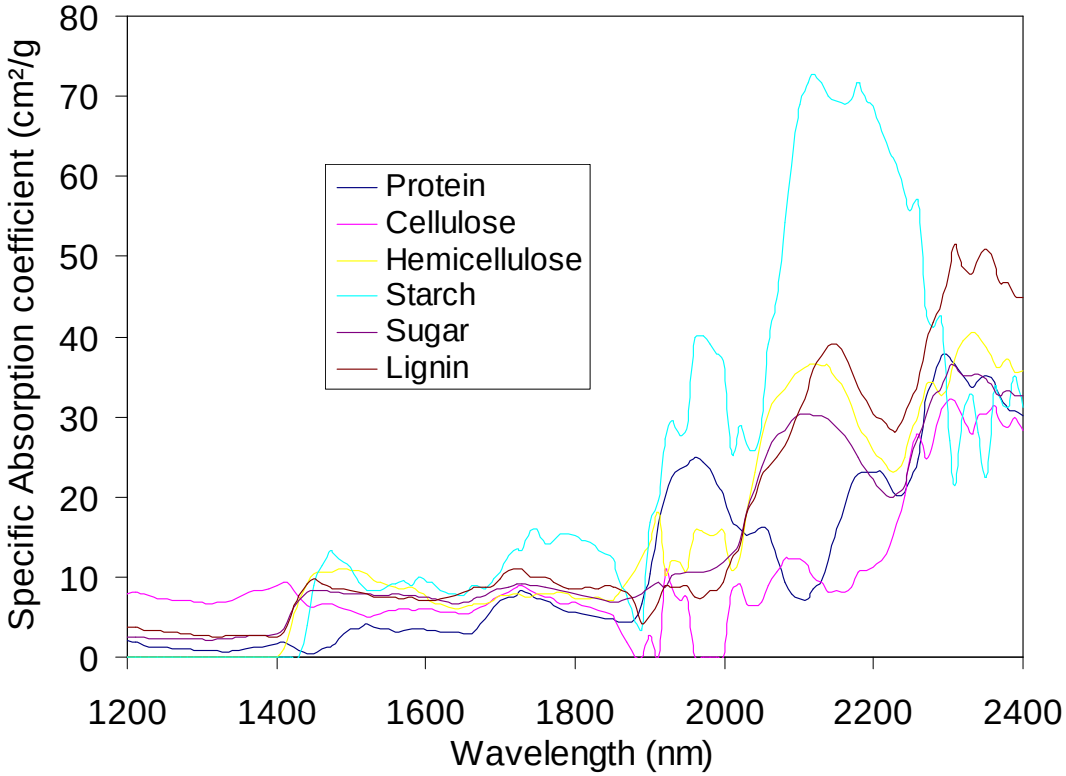


Source : Jacquemoud

Absorption par les matériaux foliaires



Composition biochimique détaillée



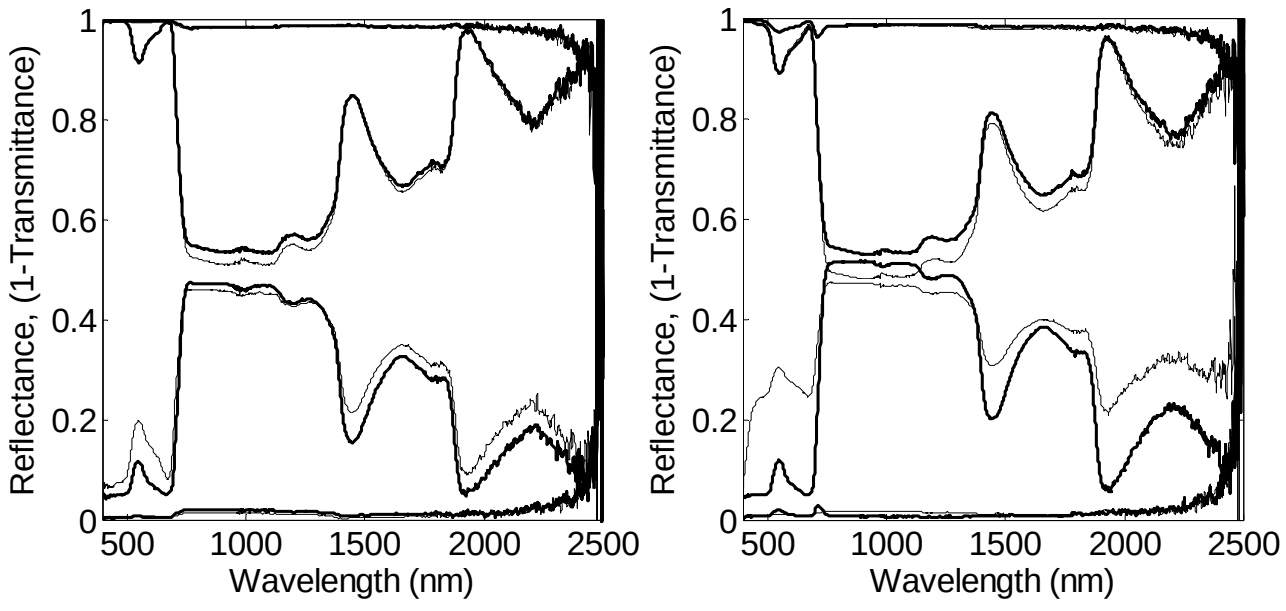
Composition biochimique détaillée

#	*type de feuille*	C_a	C_b	C_{x+c}	C_w	N
1	maïs vert	14.12	5.95	5.27	0.0170	1.0627
2	maïs albinos	0.10	0.12	0.052	0.0157	1.0000
3	maïs vert	18.63	4.06	3.14	0.0165	1.1829
4	maïs étiolé	1.38	0.37	1.44	0.0159	1.0289
5	tournesol vert	23.18	8.23	6.36	0.0247	1.7692
6	maïs vert	29.95	8.13	5.89	0.0154	1.2318
7	maïs sec	31.67	7.04	5.55	0.0062	1.0596
8	maïs sec	23.84	3.41	3.52	0.0000	1.2790
9	blé vert	34.04	10.38	5.77	0.0144	1.2572
10	soja vert	23.12	11.12	5.55	0.0137	1.8320
11	érable albinos	0.72	0.25	0.30	0.0087	1.1054
12	tournesol albinos	0.12	0.069	0.24	0.0207	1.5059
13	érable vert	19.12	6.78	8.08	0.0087	1.2677
14	maïs sec	0.20	0.34	0.59	0.0003	1.9136
15	chêne sec	4.38	3.02	1.09	0.0006	5.0835
16	chêne sec	0.25	0.32	0.67	0.0007	3.7075
17	chêne vert	60.21	16.32	14.72	0.0091	1.5234
18	chêne vert	21.55	6.21	5.97	0.0120	1.1235
19	tomate verte	13.88	9.17	2.48	0.0173	1.6755
20	blé vert	30.38	13.11	10.41	0.0111	1.4935
21	blé vert*	”	”	”	”	1.3639
22	soja sec	1.64	2.03	0.32	0.0005	2.7881
23	tournesol sec	1.38	0.87	0.52	0.0019	3.1048
24	soja vert	3.47	2.89	2.67	0.0131	1.8426
25	blé sec	0.39	0.30	0.69	0.0002	4.0127
26	maïs jaune	0.96	0.66	4.18	0.0065	1.1091
27	maïs vert	6.44	1.43	2.42	0.0084	1.0871
28	soja jaune	1.88	0.71	3.51	0.0136	1.4262
29	plante suc. verte	43.83	15.61	9.81	0.0467	2.0032
30	plante suc. verte*	”	”	”	”	1.8108
31	blé sec	0.61	0.34	0.44	0.0005	3.0144
32	tomate violette	2.68	1.23	1.75	0.0172	1.8191

Source : Jacquemoud , 1992

Influence de la structure des feuilles

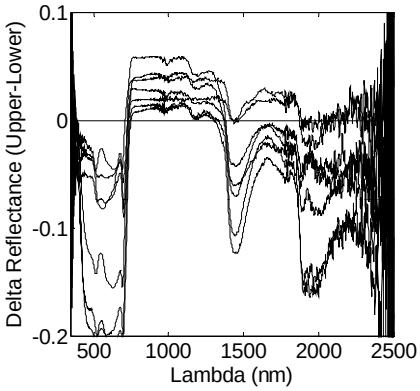
Différences possibles entre faces

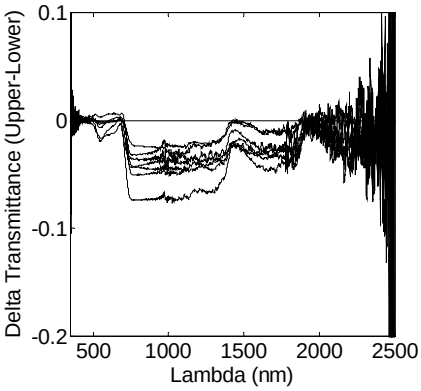


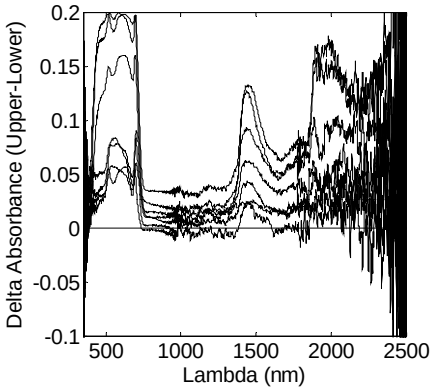
Tilleul

Lierre

Différences entre les surfaces d'une même feuille

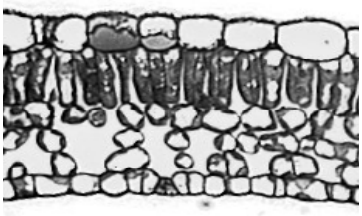






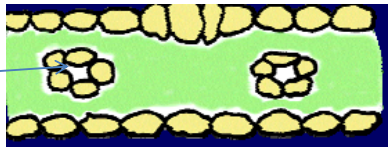
Différences liées à

- La surface (rugosité, pilosité)
- La distribution de la chlorophylle
- La structure

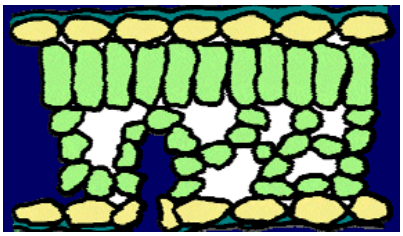


Variation de la structure anatomique

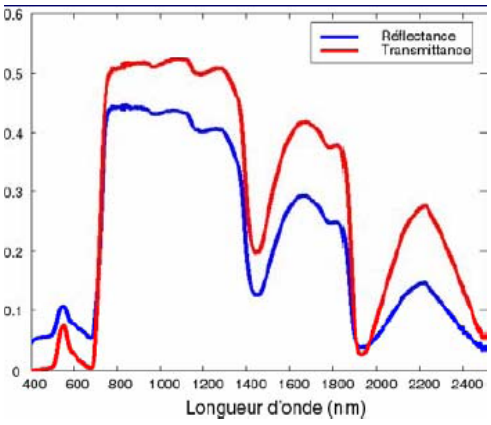
Nervure

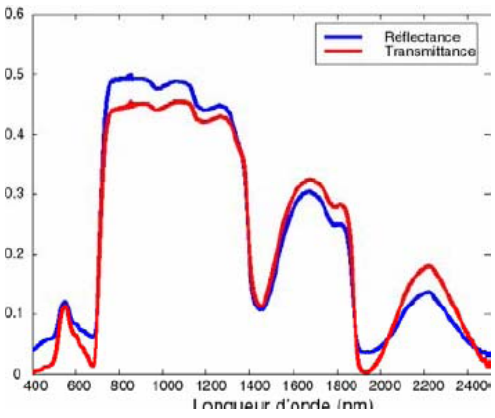


Mais



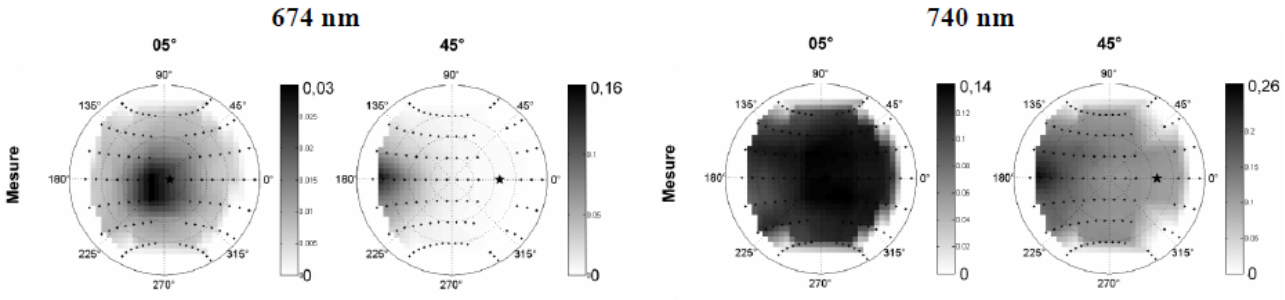
Tournesol





Propriétés directionnelles d'une feuille

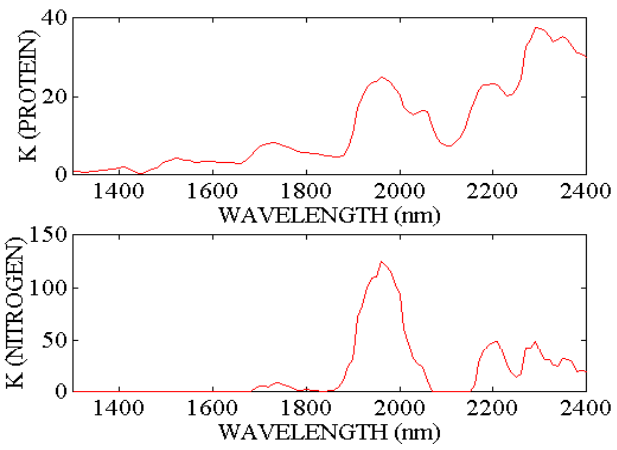
D'après Bousquet (2007)



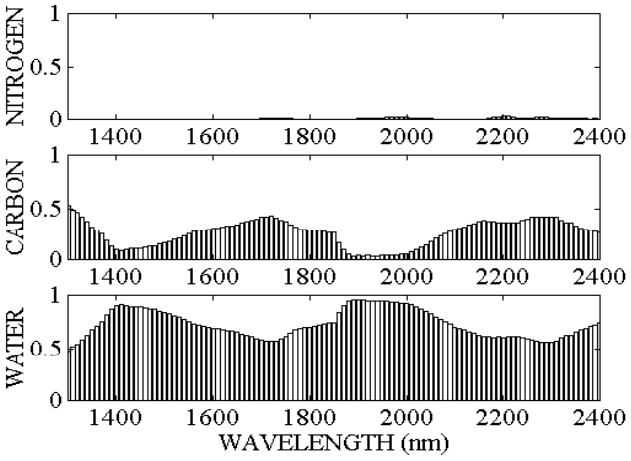
Incidence à 5° et 45°

Contribution à l'absorption

Coefficients spécifiques d'absorption



Contribution à l'absorption



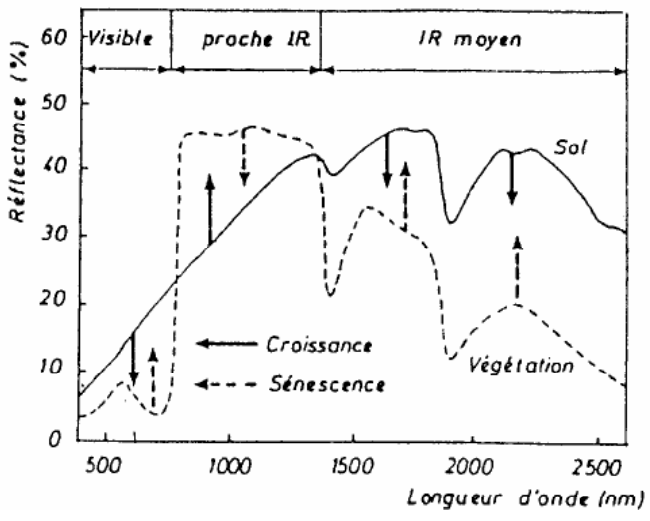
Très faible contribution dans les feuilles fraîches (masquage par l'absorption de l'eau)

Réflectance des couverts végétaux

La réflectance dépend :

- Des propriétés optiques des éléments qui le composent (sol, feuilles, troncs, tiges, fleurs, …..)
- De la quantité de chacun des éléments présents dans le couverts
- De la façon dont ces éléments sont assemblées les uns par rapport aux autres pour former le couvert (architecture)

Réflectance typique d'un couvert végétal



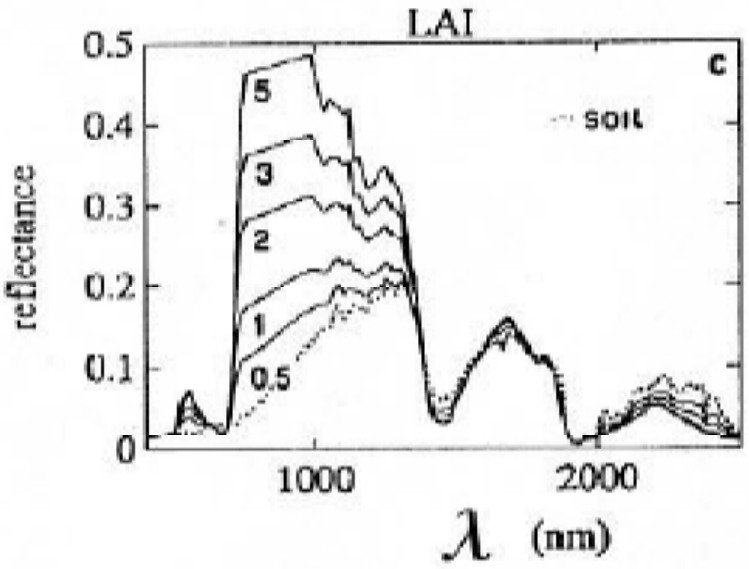
Développement du couvert :

- Augmentation dans le PIR (effet de la végétation augmente)
- Diminution dans le R (effet du sol diminue)

Sénescence du couvert :

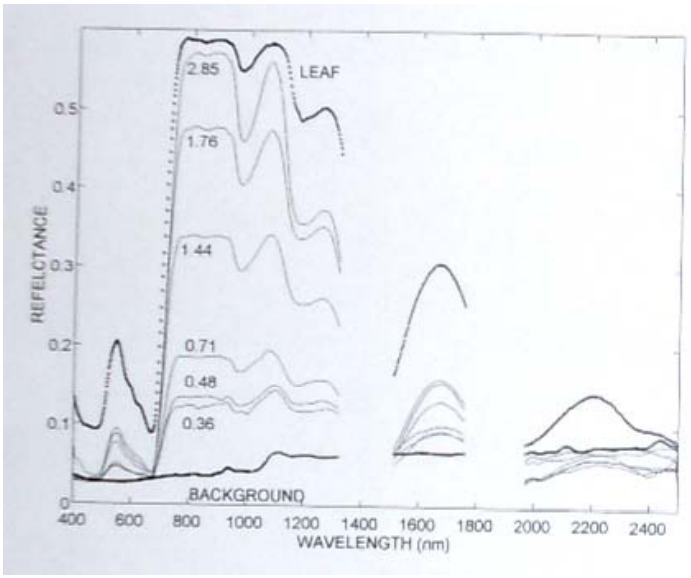
- Diminution de la végétation
- Modification de ses propriétés optiques

Effet de la quantité d'éléments



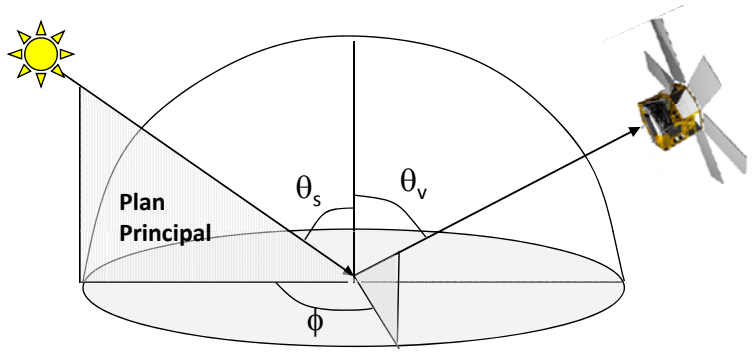
Source : Jacquemoud, 1993

Effet de la quantité d'éléments



- Spectres de réflectance d'un couvert de betterave pour différents indices foliaires ou LAI
- LAI = surface de feuilles par m² de sol horizontal

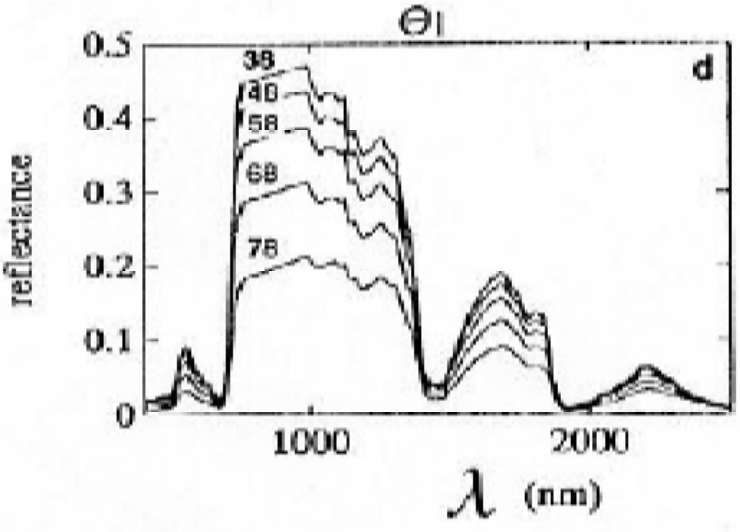
Géométrie de mesure



BRDF: Bi-directional Reflectance Disribution Function

visée / incidence	Directionnel	Hémisphérique
Directionnel	Bi-directionnel	Hemispherique-directionnel
Hémisphérique	Diectionnel-hémisphérique	Bi-hémisphérique

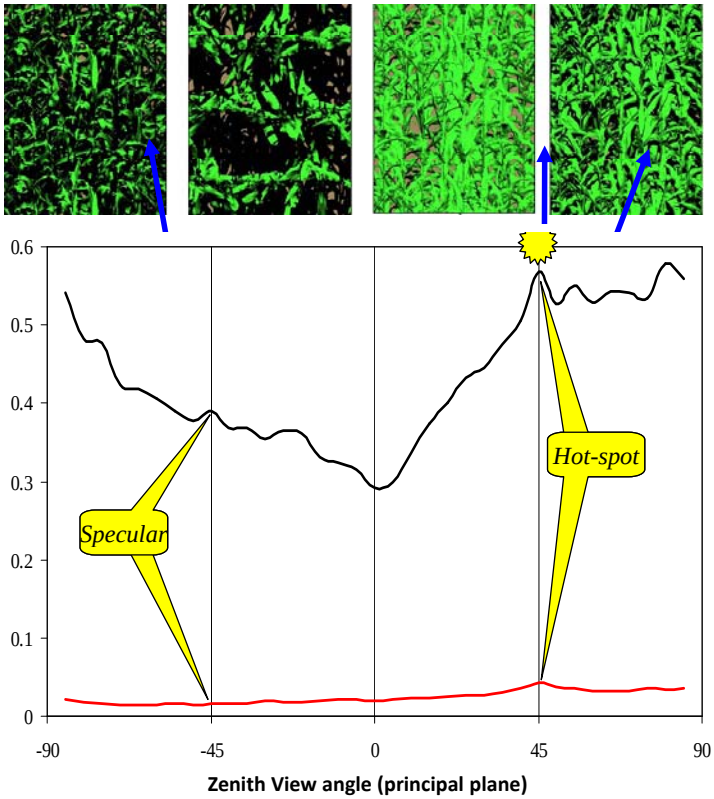
Effet de l'angle d'observation



Source : Jacquemoud, 1993

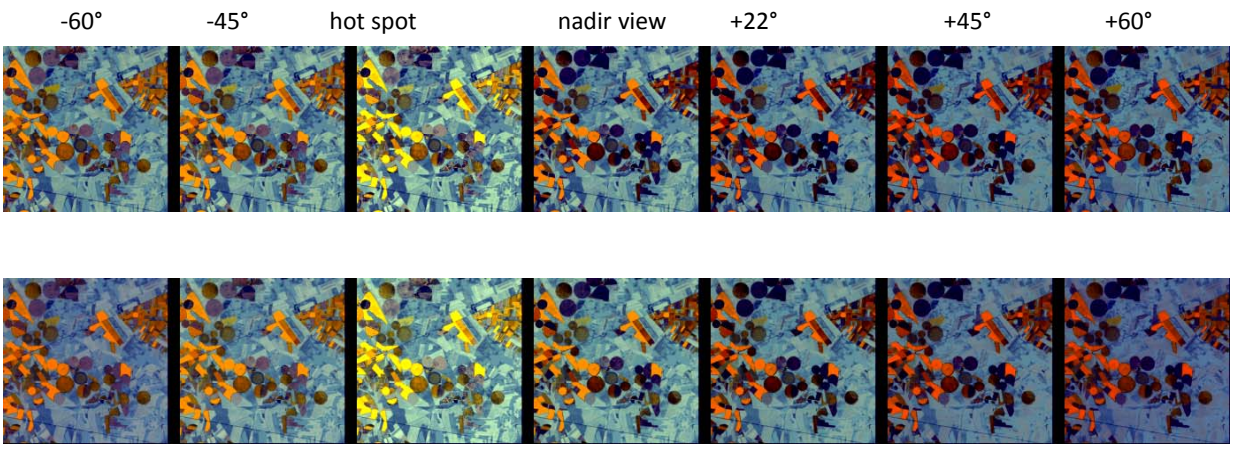
Effet de l'angle d'observation

- Ombrage
- Contraste entre sol/feuilles
- Diffusion multiple



Géométrie de mesure

Exemple de mesures directionnelles

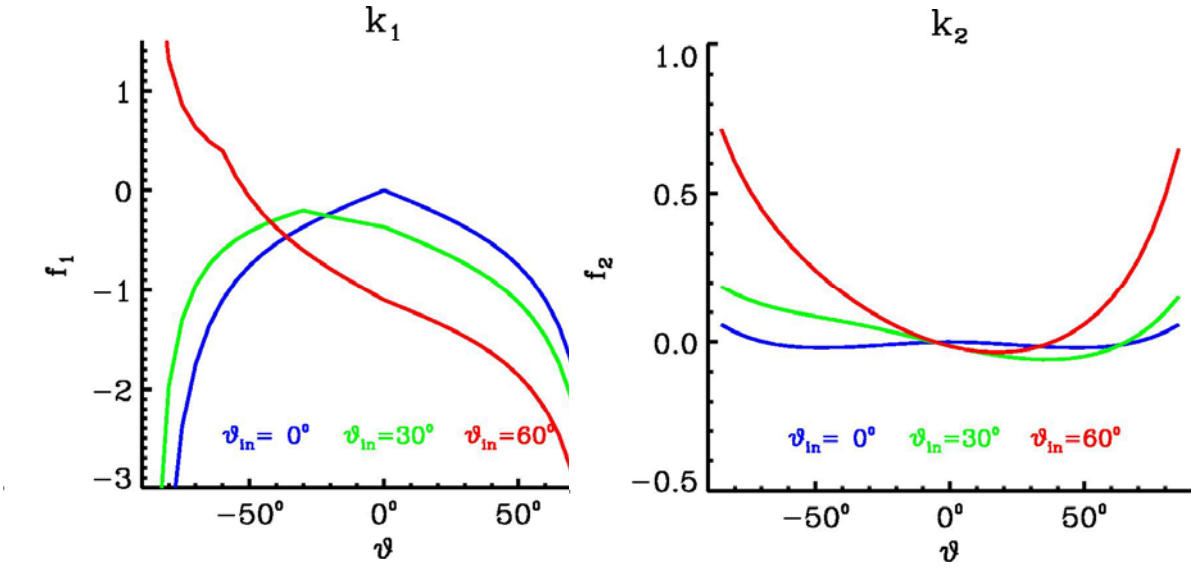


TOA radiance at sensor atmospheric visibility = 40 km

660 nm, 730 nm, 840 nm

Modèle simple de BRDF

$$R(\vartheta_{out},\vartheta_{in},\varphi)=k_0+k_1\, f_1(\vartheta_{out},\vartheta_{in},\varphi)+k_2\, f_2(\vartheta_{out},\vartheta_{in},\varphi)$$

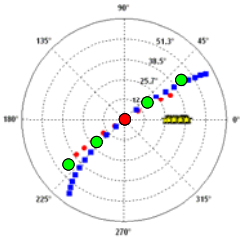


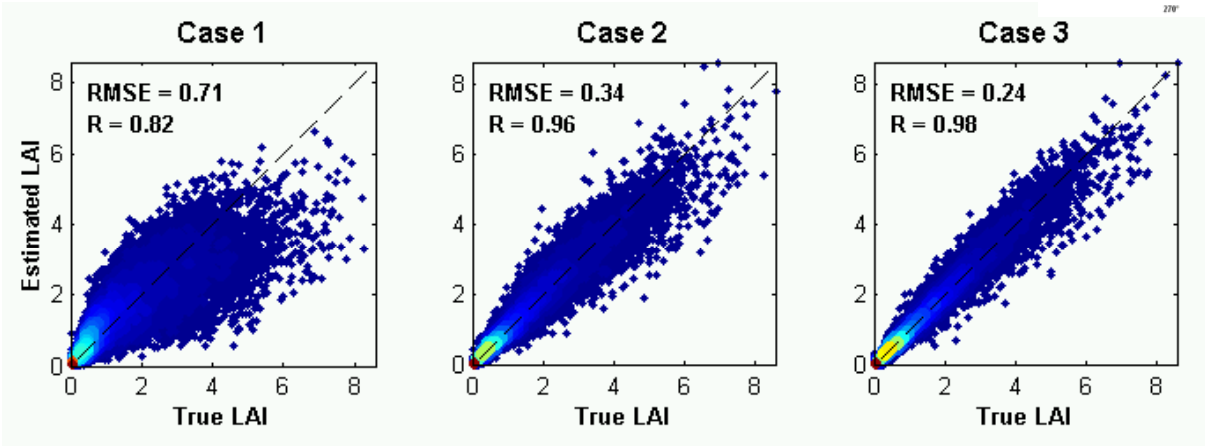
Très efficaces pour corriger des effets directionnels et calculer l'albédo

Généralement 3 coefficients (par bande) sont suffisants

Importance potentielle de la BRDF pour l'estimation de la structure du couvert

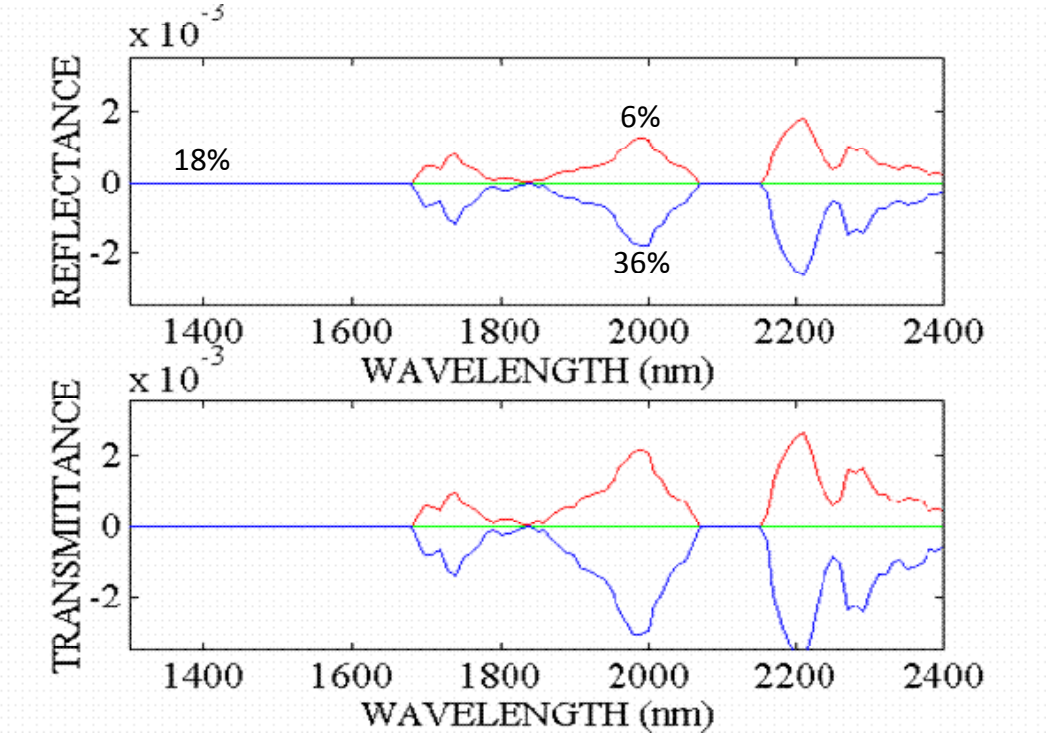
Case	wavebands		viewing geometry	# inputs
1	450, 645, 835, 1665 nm	θ_s	θ_v = 0° | ϕ_v = 0°	5
2	450, 645, 835, 1665 nm	θ_s | ϕ_v	θ_v = [0°; 20°; 50°]	13
3	450, 645, 835, 1665 nm	θ_s | ϕ_v	θ_v = [-50°; -20°; 0°; 20°; 50°]	21





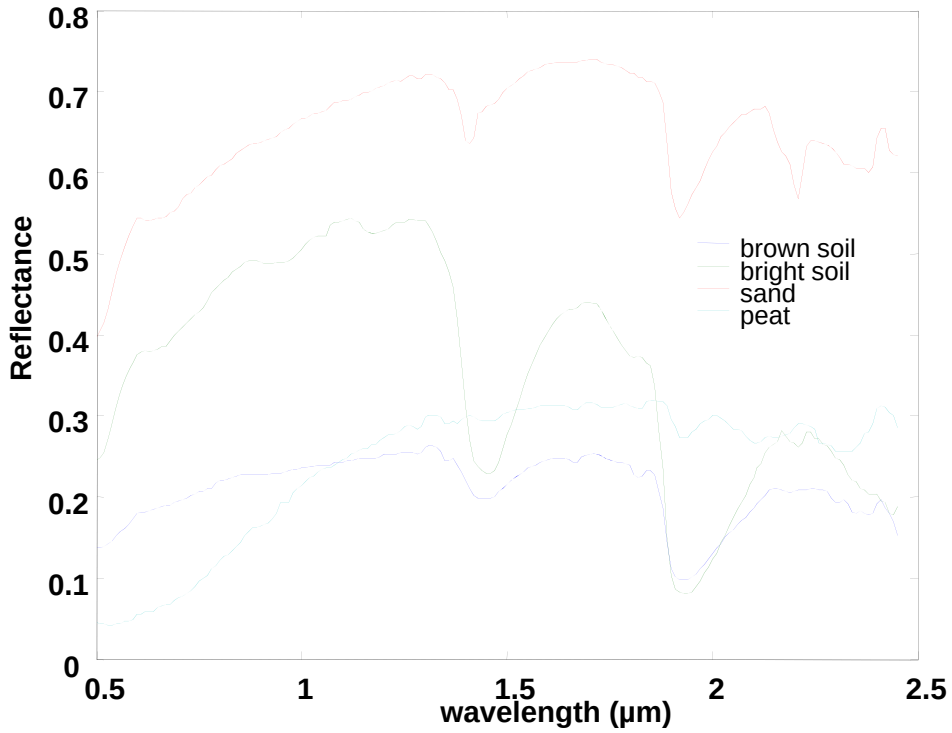
Problème potentiel : nécessite une bonne description (modèle) de la structure du couvert
Pour exploiter la BRDF: demande en général de l'information supplémentaire

Sensibilité au contenu en protéines

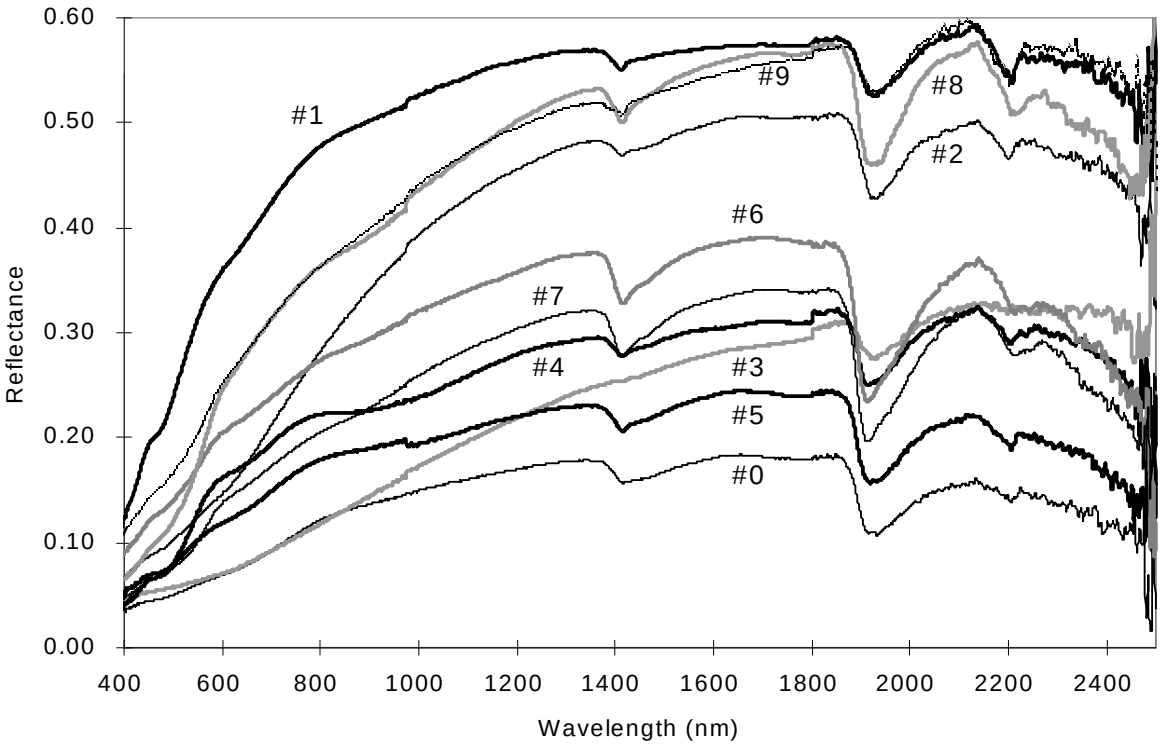


Peu d'espoir d'estimer le contenu en protéines au niveau du couvert …

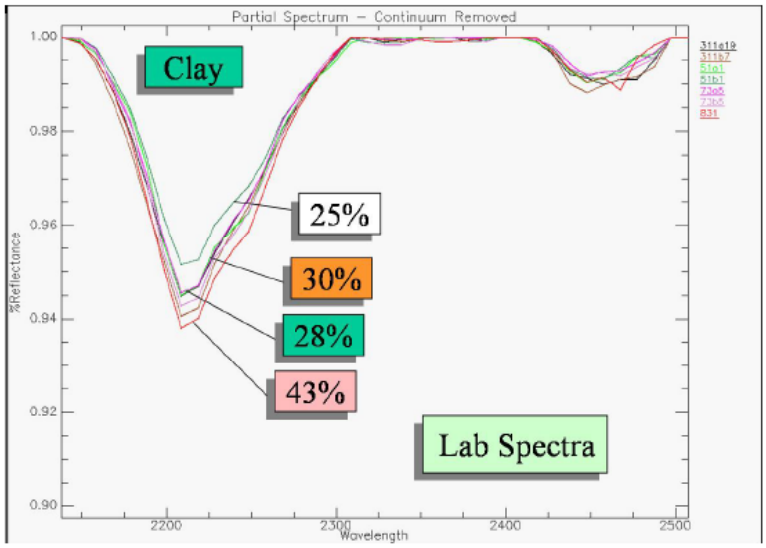
Réflectance typique de sol



Facteurs de variation: type de sol



Type de sol

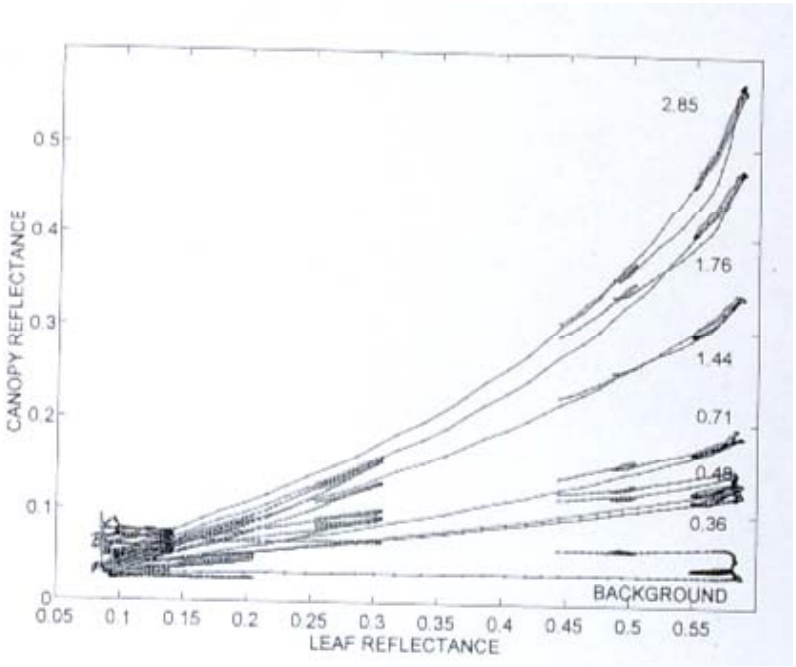


Whiting et al, 2003

Profondeur du pic d'absorption à 2200nm relié au contenu en argile

Effet des propriétés optiques des éléments

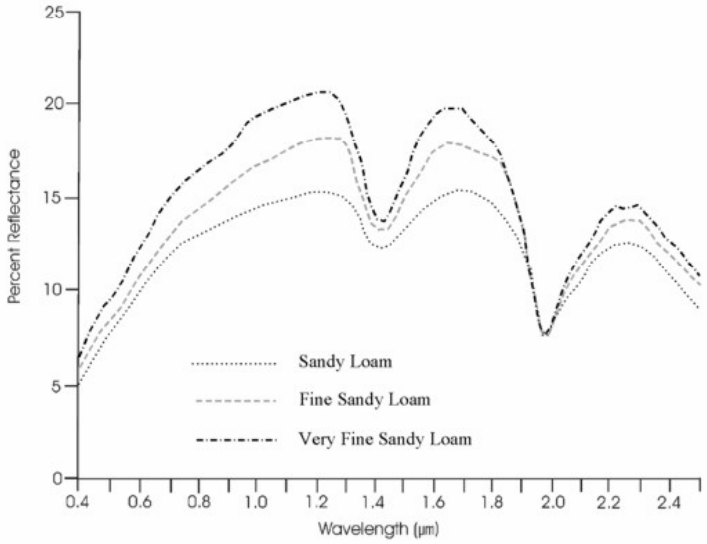
Pour un sol sombre, la réflectance du couvert végétal dépend des propriétés optiques des feuilles



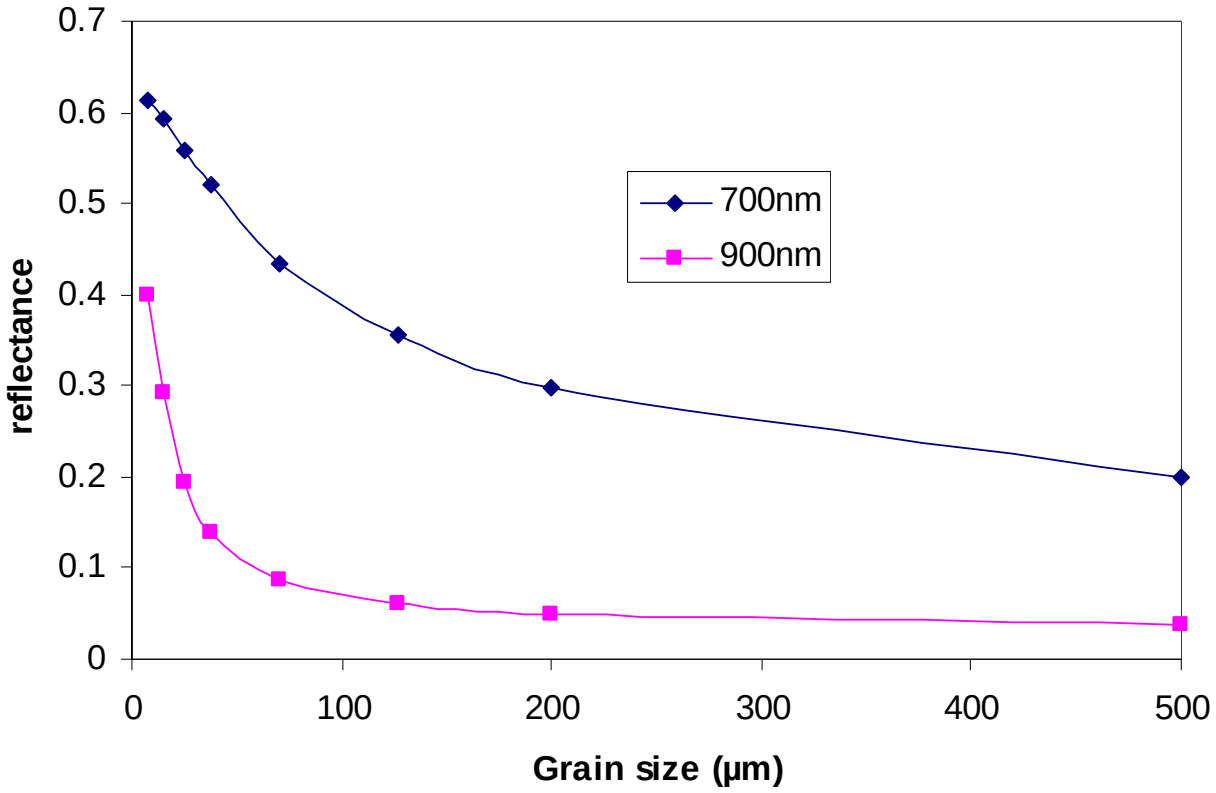
Principaux absorbants

Absorption peak (nm)	***Organic matters***	***References***
400 ; 440 ; 450	Fe	Palacios & Ustin, 1998; Gaffey et al., 1993
400 :500	*Humic acids*	Stoner & Baumgardner (1981); Mathews (1973)
550	Fe	Hunt 1971
620 :700	*Humic acids*	Stoner & Baumgardner (1981); Mathews (1973)
700 ; 870 ; 900	Fe	Hunt, Salisbury, 1971; Karmanov, 1970; Stone 1979
970	H_20	Irons et al., 1989
1000	Fe^{++}	Hunt & Salisbury, 1970
1200	H_20	Stoner & Baumgardner, 1981; Irons et al., 1989
1201	*Lipid*	Ben Dor et al., 1997
1203	*Lipid, cellulose*	Ben Dor et al., 1997
1250	gypsum (OH)	Prost et al, 1983; Bowers & Smith, 1972; Lindberg & Snyder 1972
1358; 1367	*Cellulose, lignin, starch*	Ben Dor et al., 1997
1400 ; 1450	H_20	Irons et al., 1989
1465	*Cellulose, lignin, starc, -pectin*	Ben Dor et al., 1997
1582	*Cellulose, starc, -pectine*	Ben Dor et al., 1997
1600	*Cellulose*	Murray & Williams, 1988 ; Daughtry, 2001
1726	*cellulose, lignin, starch, lipid, humic acids*	Ben Dor et al., 1997
1750	gypsum (OH)	Prost et al, 1983; Bowers & Smith, 1972; Lindberg & Snyder, 1972
1761	*cellulose, lignin, starch, lipid, humic acids*	Ben Dor, et al., 1997
1769	*cellulose, lignine, starch*	Ben Dor et al., 1997
1770; 1900	H_20	Stoner & Baumgardner, 1981; Irons et al., 1989
1932	*cellulose, lignin, glycan, starch, pectin, lipid, humic acids*	Ben Dor, Inbar, Chen, 1997
1950	H_20	Escadafal, Girard, Courault, 1988
2068 ; 2111	*cellulose, glycan, pectin*	Ben Dor, et al., 1997 ; Murray & Williams, 1988 ; Daughtry, 2001
2142 ; 2169	*starch, lignin, lipid, polyphenol*	Ben Dor, et al., 1997
2193	*protein*	Ben Dor, et al., 1997
2200	Al-OH	Stoner & Baumgardner, 1981; Palacios & Ustin, 1998
2300	Mg-OH	Pieters & Eglerts, 1993; Roush et al., 1993
2309	*Humic acid, lipid, starch*	Ben Dor, et al., 1997
2331	*cellulose, lignine, glycan*	Ben Dor, et al., 1997
2337	*pectine, protein*	Ben Dor, et al., 1997

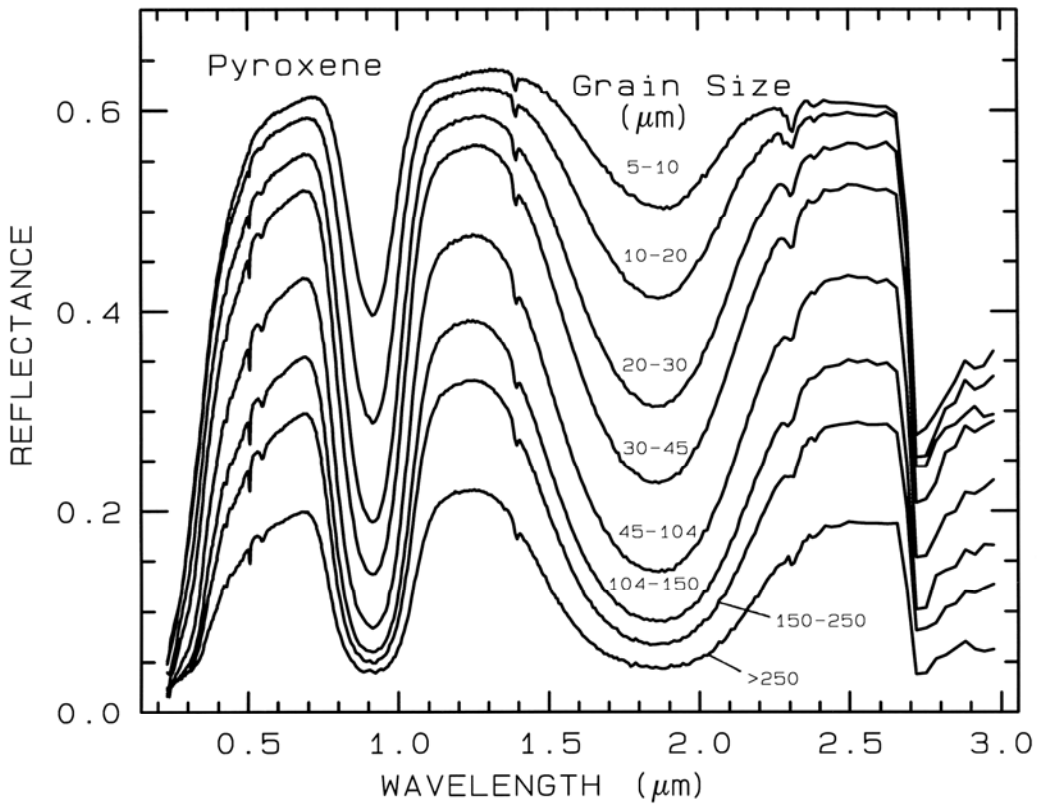
Granulométrie



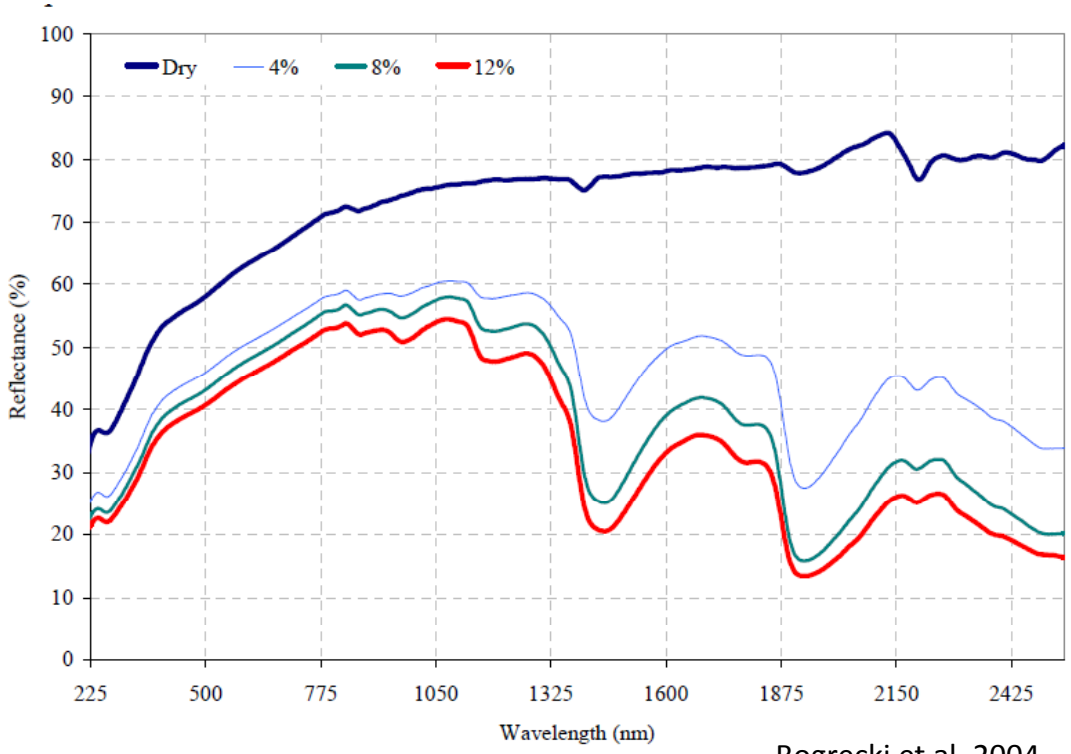
Effet de la taille des grains



Facteurs de variation: granulométrie

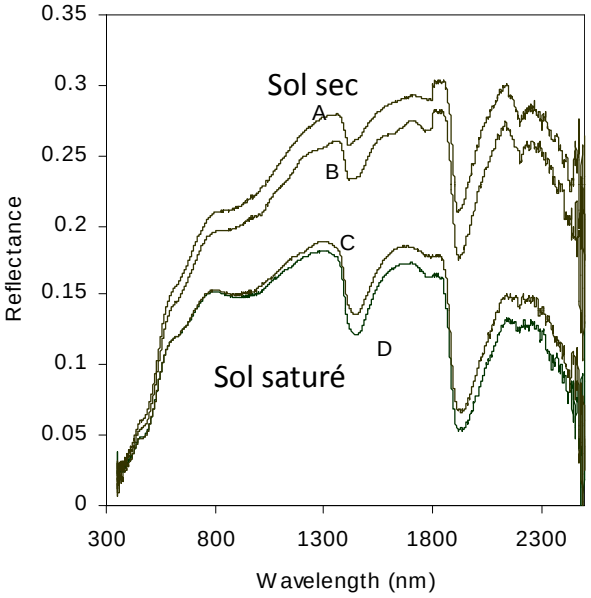


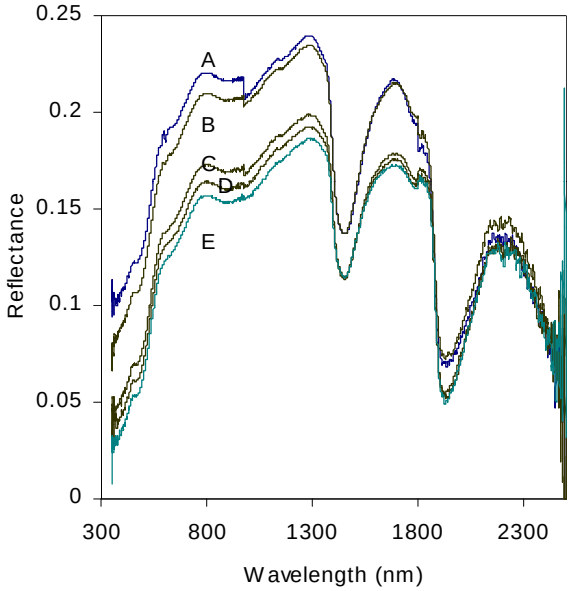
Humidité



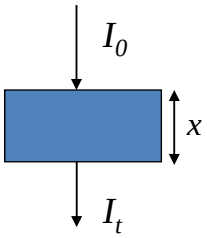
Bogrecki et al, 2004

Facteurs de variation : humidité

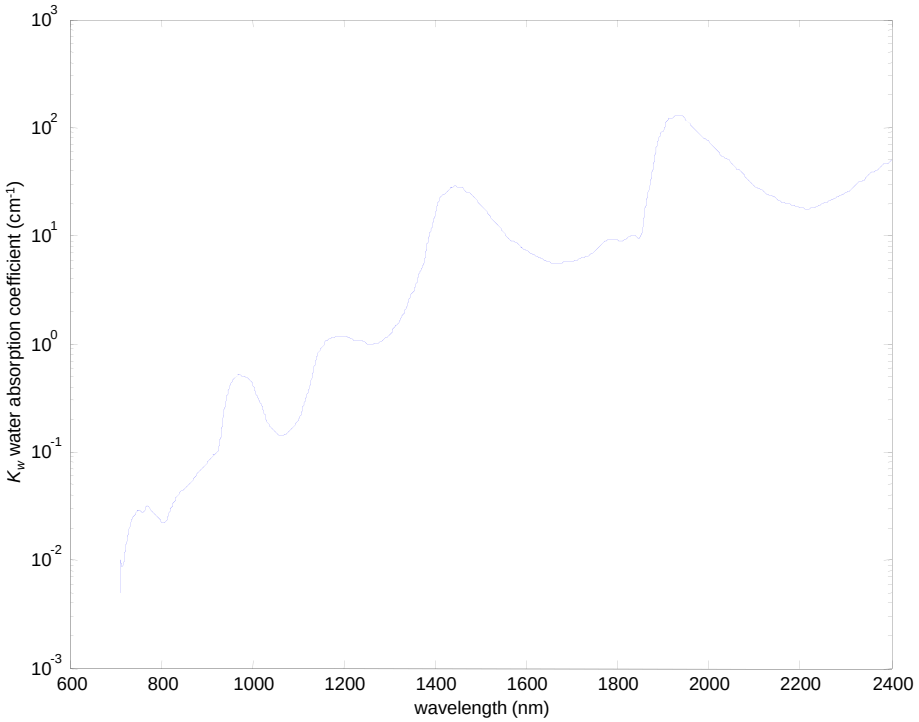




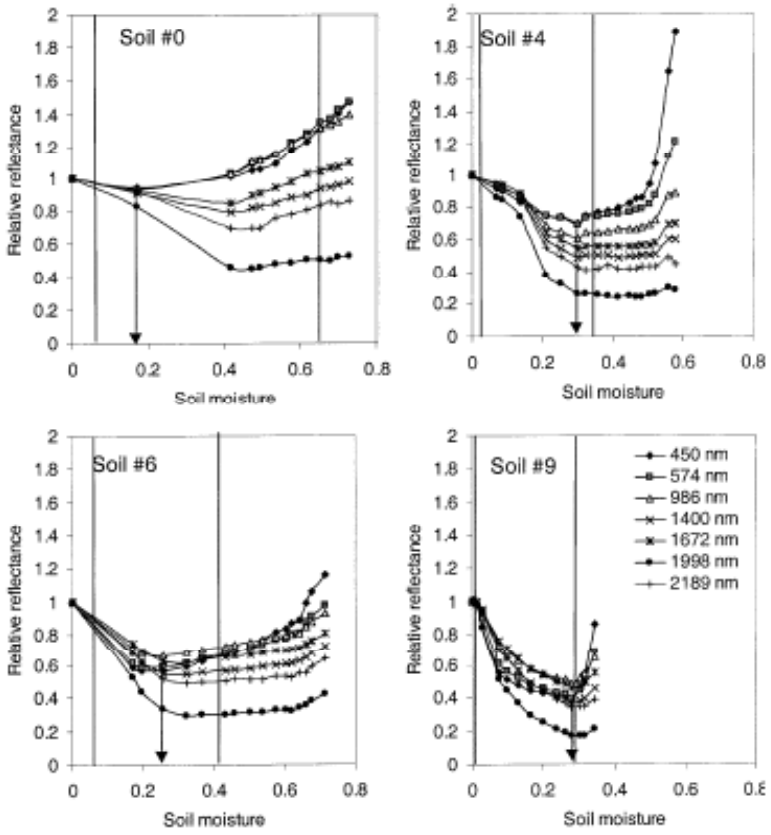
Coefficient d'absorption de l'eau



$$t = \frac{I_t}{I_0} = e^{-k_w.x}$$



Facteurs de variation: humidité



Réflectance relative =R/R_{sec}

Existence d'un point critique pour les plus fortes humidités

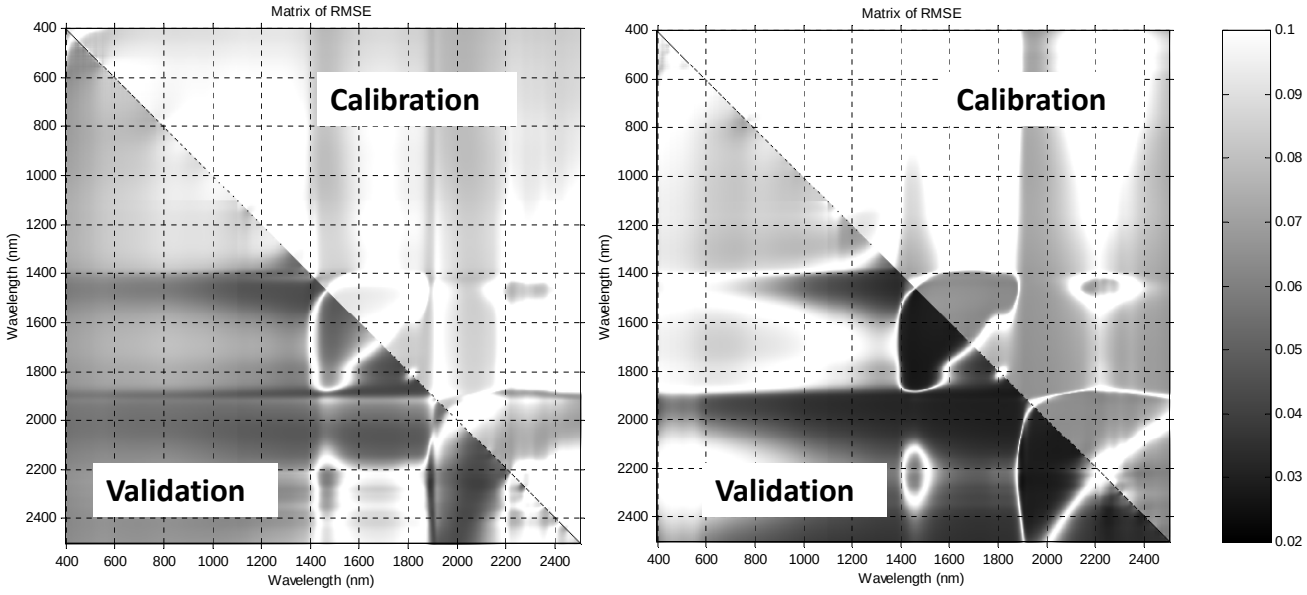
Faibles niveaux d'humidité:
Absorption et diffusion

Forts niveaux d'humidité:
Surtout effet de la diffusion

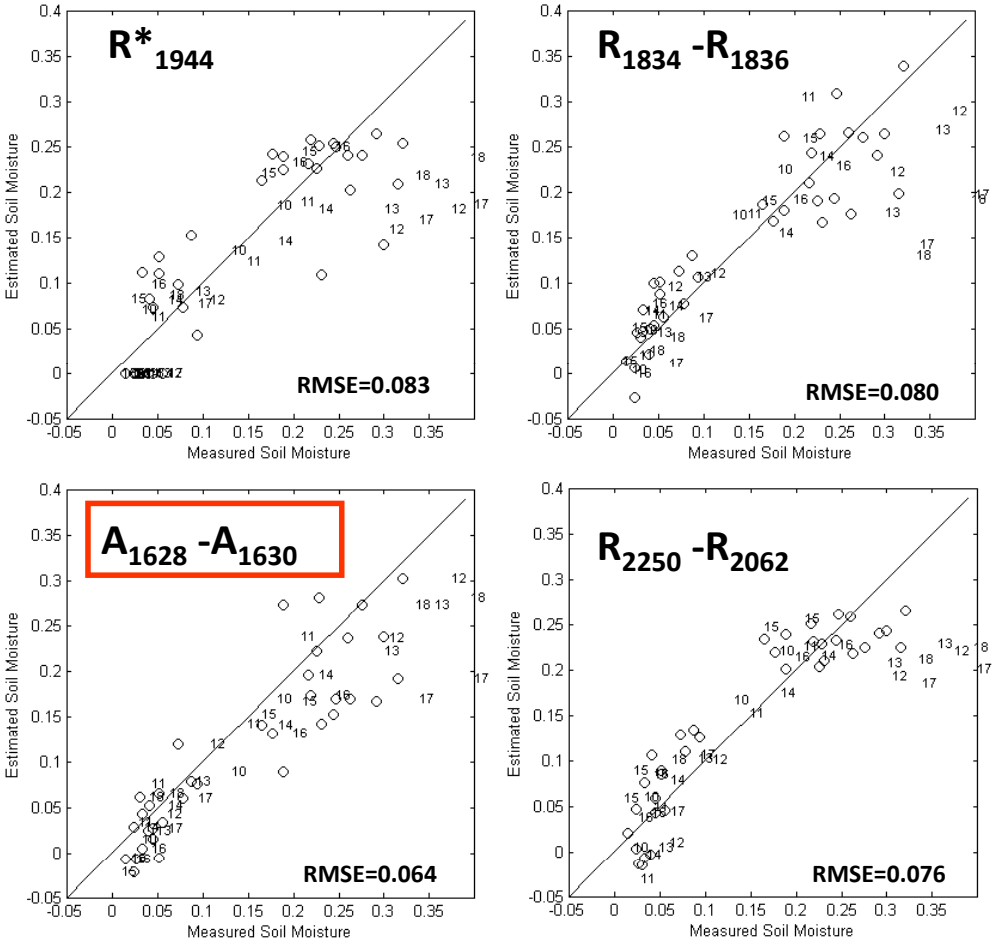
Performances de l'estimation de l'humidité de surface

Reflectance

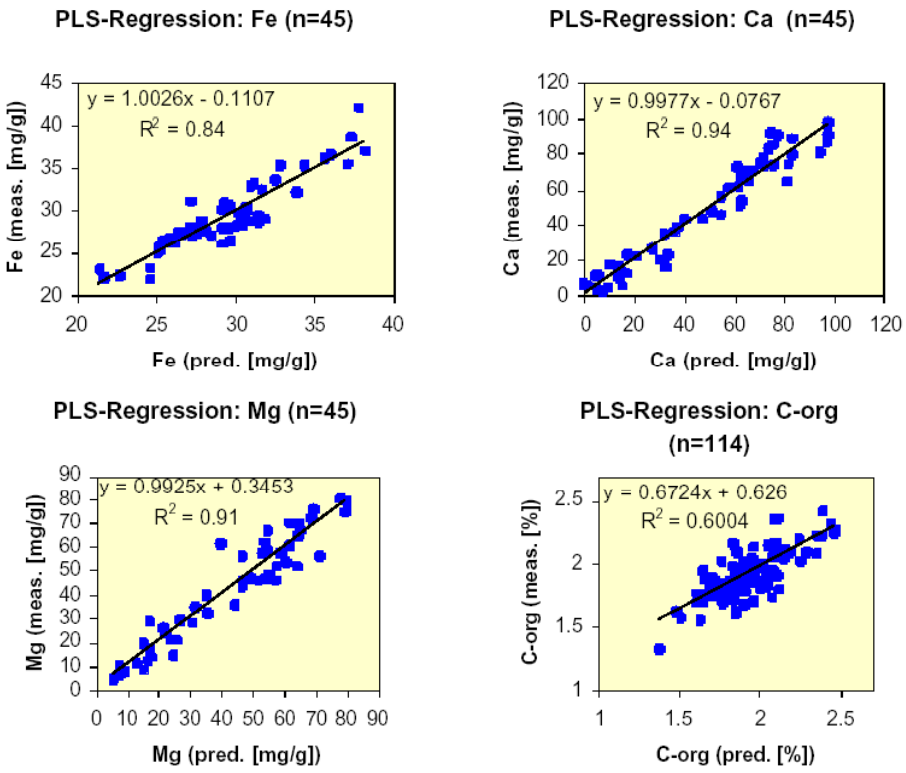
Absorbance



Interest of derivatives or at least using bands relatively close together

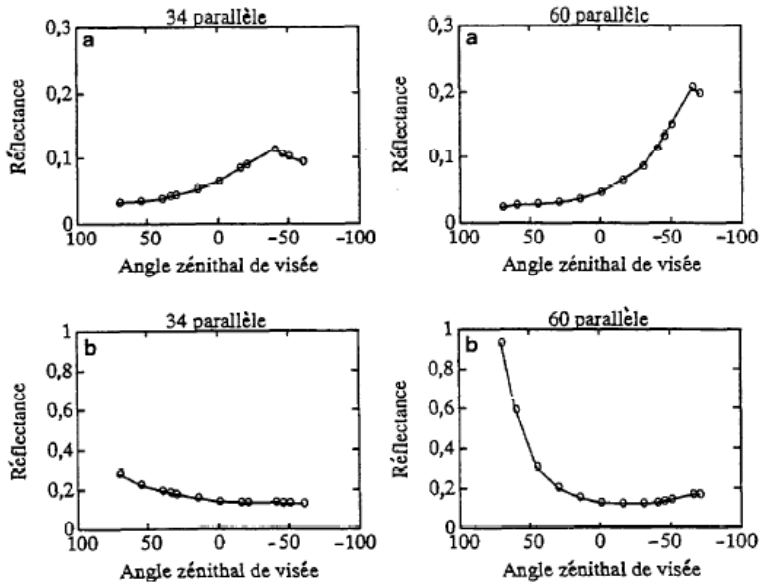


Estimation d'autres constituants



From Udelhoven et al., 2000 at laboratory level

Effet de l'angle d'observation sur les sols



a: sol argileux très rugueux

b: même sol argileux très lisse

D'après Jacquemoud et al

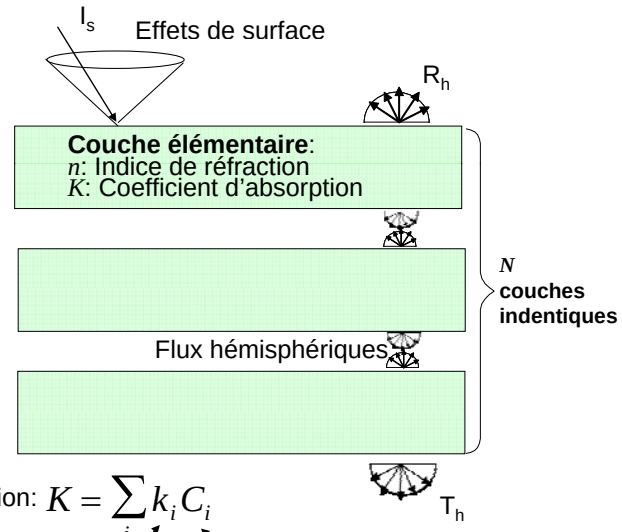
Plan

1. Rappels
   - Les mesures de télédétection
   - Interactions entre rayonnement électromagnétique et matière
   - La photosynthèse
   - Les modèles de transfert radiatif : Principes de la modélisation

2. Interactions entre le rayonnement électromagnétique et les surfaces végétales
   - Propriétés optiques des feuilles
   - Propriétés des couverts
   - Propriétés optiques des sols

3. Les modèles de transfert radiatif
   - Un modèle de transfert radiatif des feuilles : le modèle PROSPECT
   - Les différents types de modèles de couvert
   - Un modèle de transfert radiatif des couverts : le modèle SAIL
   - La combinaison de différents modèles

Description du modèle PROSPECT

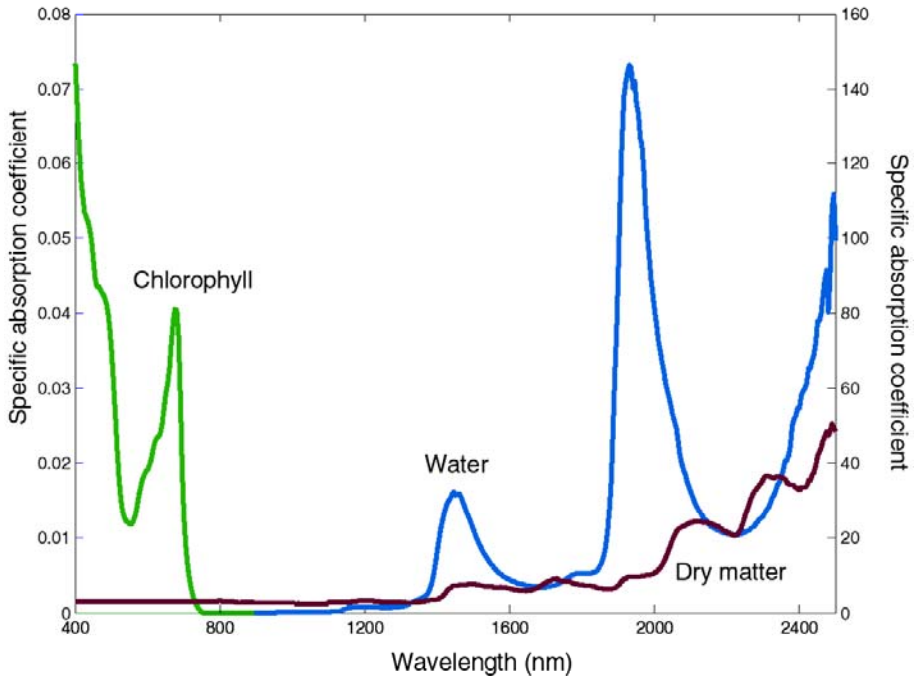


Coefficient d'absorption: $K = \sum_i k_i C_i$

Coefficient d'absorption spécifique

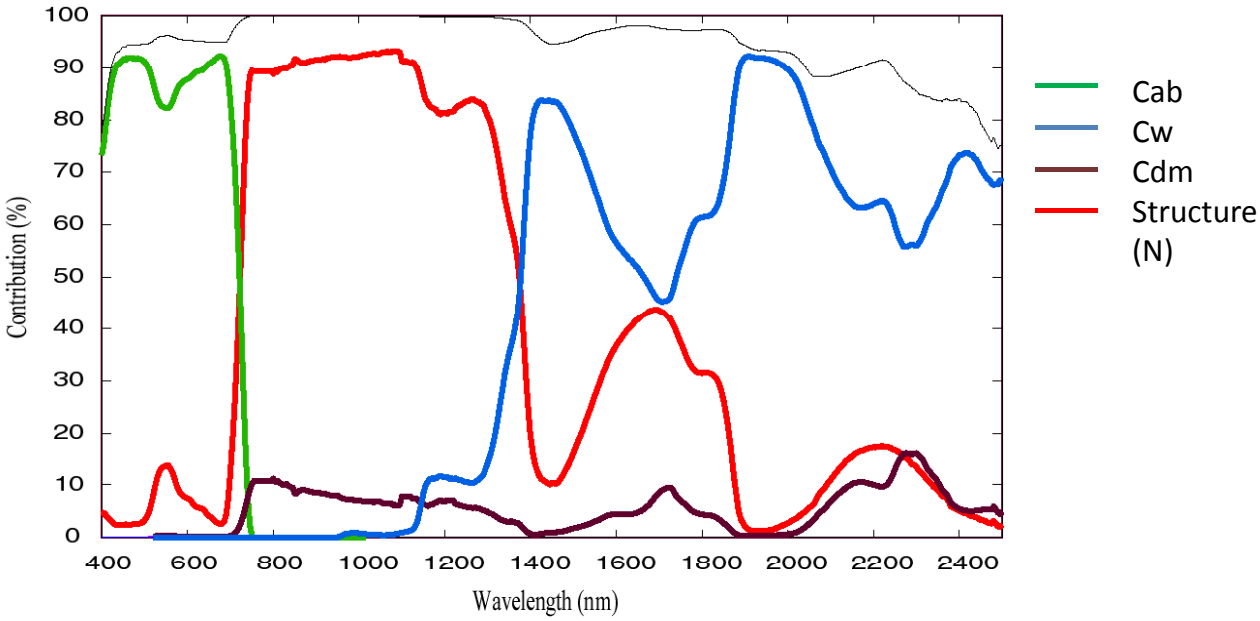
Contenu en Matériaux absorbants

Coefficients d'absorption spécifiques des feuilles



Source : Jacquemoud, 2002

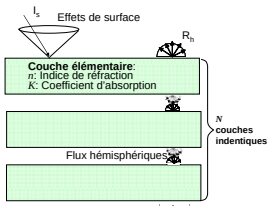
Contribution à la transmittance des feuilles



Source : Jacquemoud, 2002
D'après Pavan, 2001

Fonctionnement du modèle PROSPECT

Cab
Cw
Cdm
Car
Structure (N)



Réflectance
Absorption
Transmittance

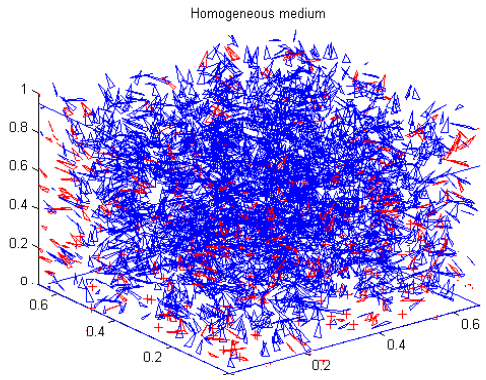
Modélisation du transfert radiatif d'un couvert végétal

Simplifiée

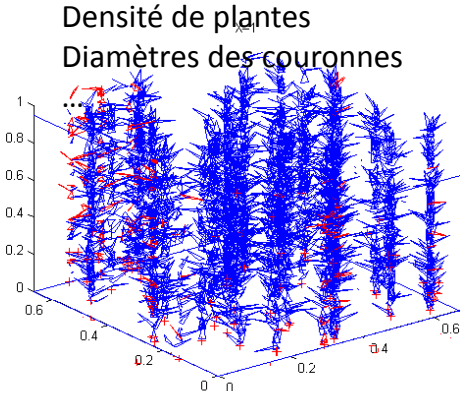
Surface foliaire
Inclinaison foliaire
Taille relative des feuilles

Réaliste

Surface foliaire
Inclinaison foliaire
Taille relative des feuilles
Forme des feuilles
Densité de plantes
Diamètres des couronnes



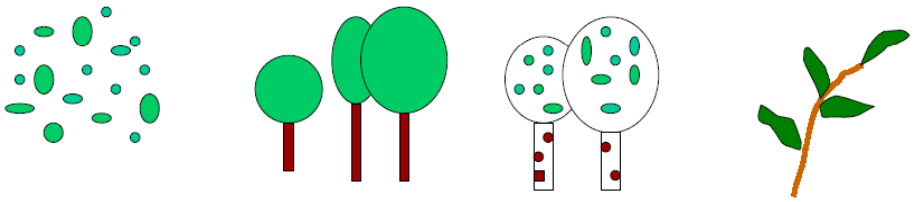
a) Milieu turbide homogène



b) Milieu hétérogène utilisé en modélisation 3D

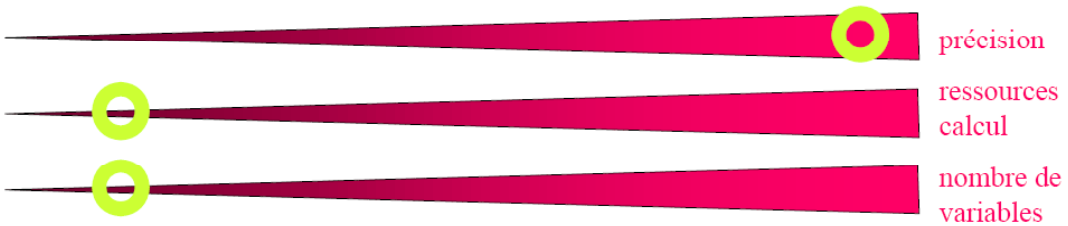
Source : Pinty et al. 2001

Les différents types de modèles de transfert radiatif

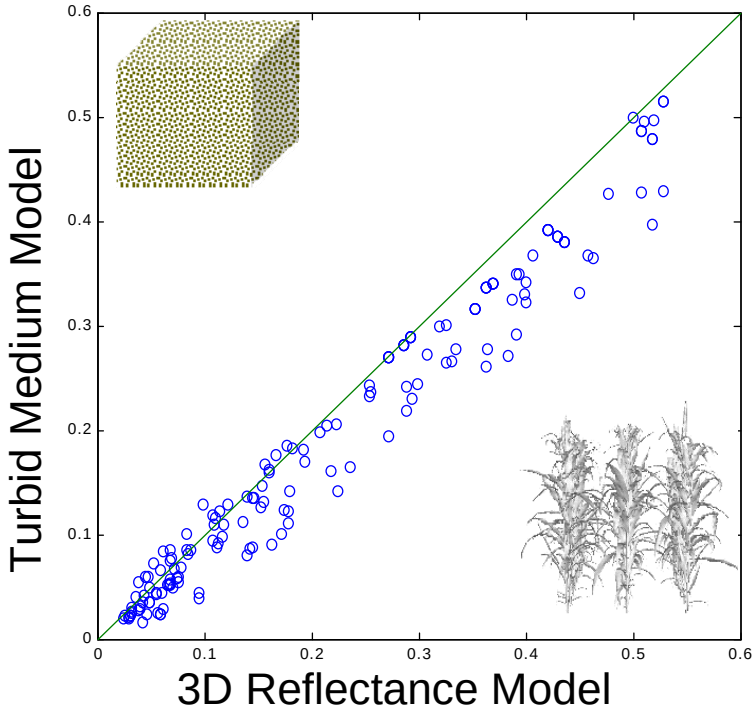


milieu turbide / géométriques — hybrides — détaillés

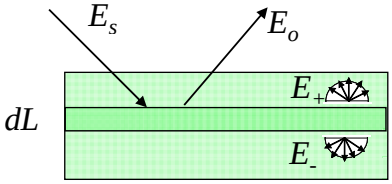
SAIL — *lancer de rayons*



Comparaison de performances



Modèle turbide à 4 flux

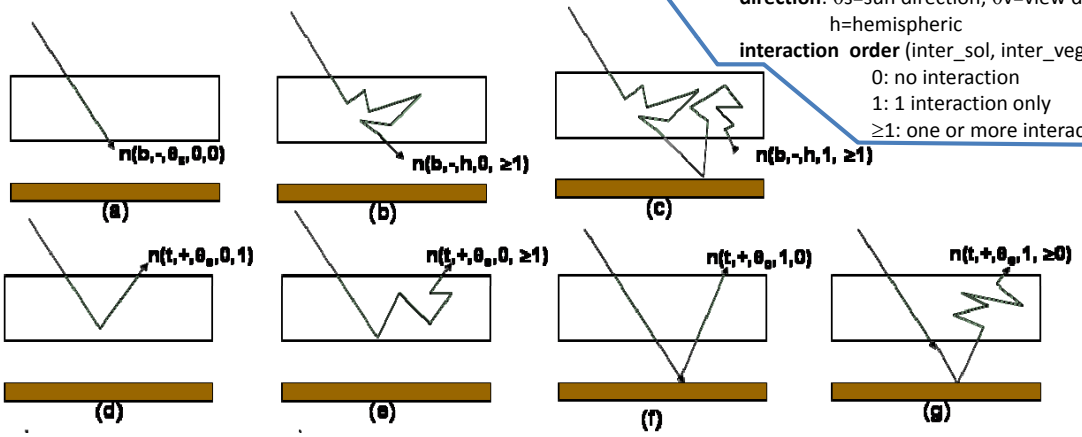


- E_s = flux direct descendant (s=soleil)
- E_o = flux direct montant (o=observation)
- E_- = flux diffus descendant
- E_+ = flux diffus montant

Modèle turbide à 4 flux

- On regarde les différentes combinaisons
  - Réflexion/transmission
  - Flux descendant/montant
  - Flux direct ou diffus

n(level,way,direction,inter_sol,inter_veget)
=number of photons (radiance)
level: b=bottom; t=top
way: - = downward; + = upward
direction: θs=sun direction; θv=view direction; h=hemispheric
interaction order (inter_sol, inter_veget):
0: no interaction
1: 1 interaction only
≥1: one or more interactions



4 flux approximation

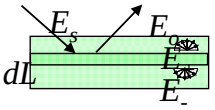
$$R_c=\rho_{so}+\tau_{ss}\tau_{oo}.R_s+((\tau_{ss}.R_s+\tau_{sd}.R_s).\tau_{do}+(\tau_{sd}+\tau_{ss}.R_s.\rho_{dd}).R_s.\tau_{oo})/(1-R_s.*\rho_{dd})$$

Black soil term

Soil interaction term

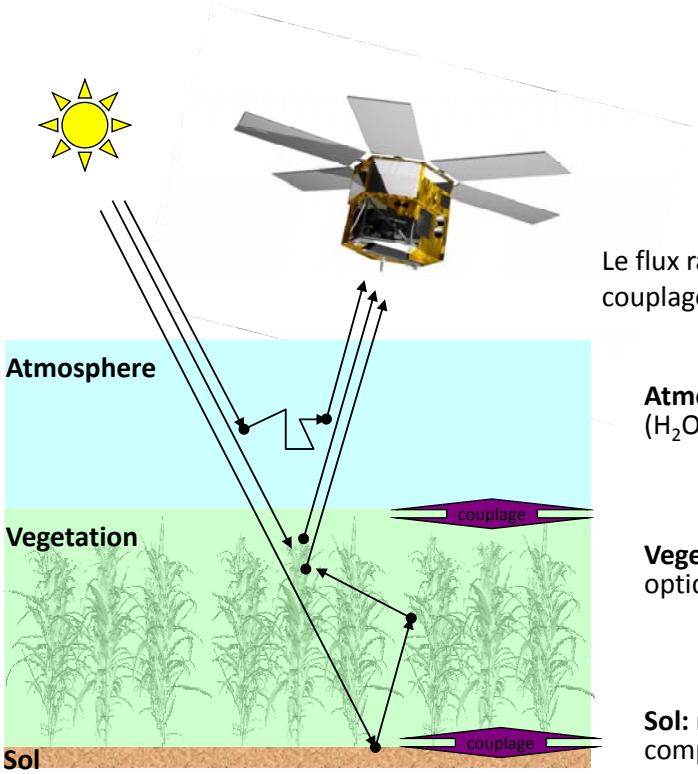
Le fonctionnement du modèle SAIL

LAI
Angles d'observations
Angles solaires
Angle d'inclinaison des feuilles
Hot Spot
Réflectance des feuilles
Réflectance des sols



Réflectance, absorptance, transmittance du couvert

Le couplage des modèles



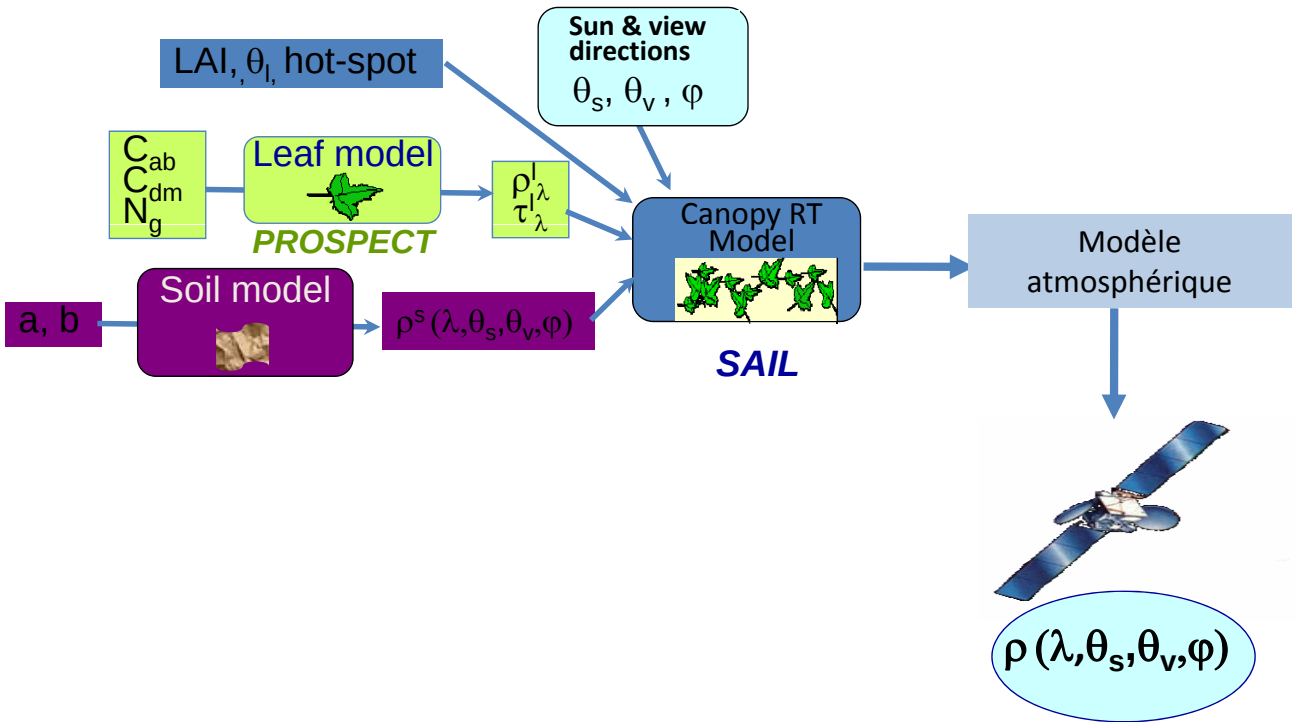
Le flux radiatif enregistré par les capteurs dépend du couplage entre

Atmosphere: Pression, Aérosol, absorption gazeuse (H_2O, O_2, CO_2, O_3)

Vegetation: Structure, composition, propriétés optiques

Sol: rugosité, texture, structure, humidité et composition.

Un modèle de milieu turbide: SAIL



Plan

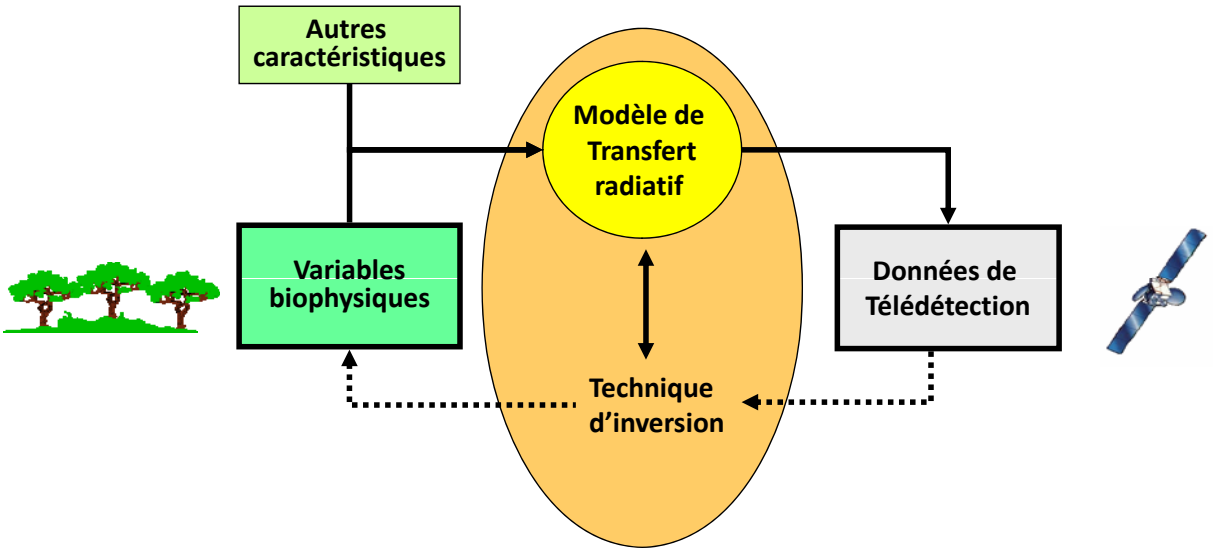
4. L'inversion des modèles de transfert radiatif
   - ➢Les réseaux de neurones
   - ➢L'optimisation
   - ➢Les LUT
   - ➢Incertitudes
   - ➢Apport d'information à priori

5. Comparaison avec des indices de végétation
   - ➢Conception d'indices
   - ➢Relation avec des variables biophysiques

6. La validation terrain
   - ➢Photographies hémisphériques
   - ➢L'instrumentation

7. Exemples d'application
   - ➢Agriculture de précision
   - ➢Phénologie et suivi
   - ➢Extraction de variables sur les sols avec un capteur hyperspectral
   - ➢Modèle de culture et assimilation

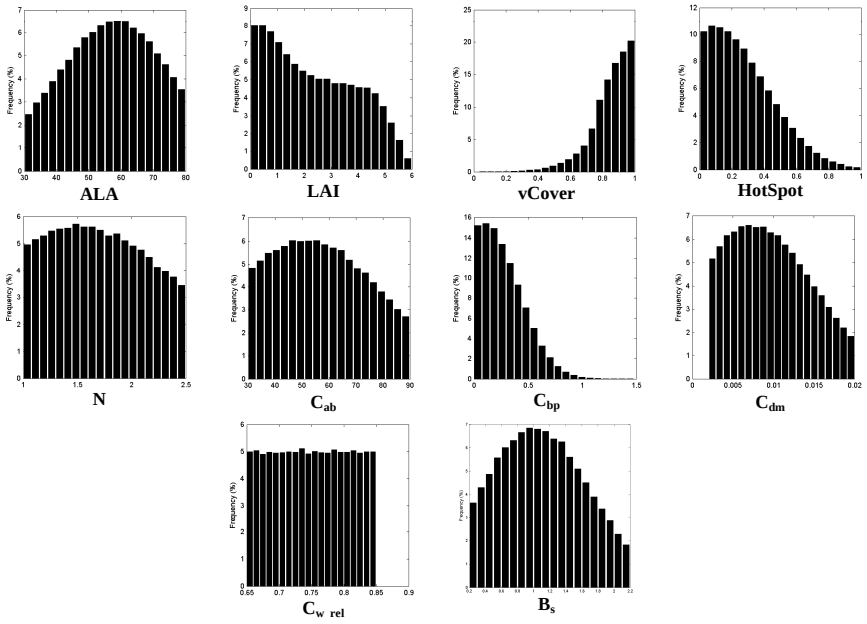
Le problème inverse



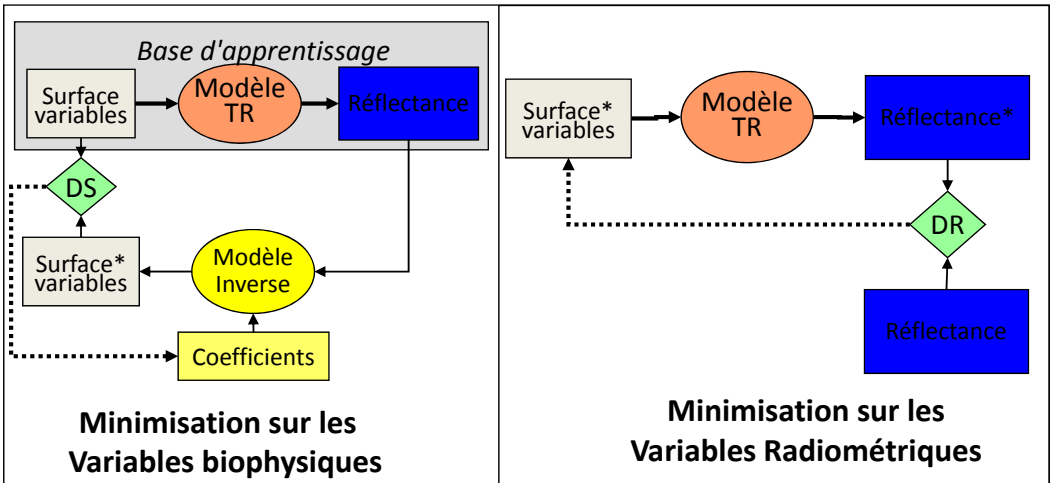
La base d'apprentissage

Pour chaque variable d'entrée du modèle, les variables de sorties sont calculés et associés aux variables d'entrée

→La base d'apprentissage est constituée de couples variables d'entrée (variables biophysiques), variables de sorties (réflectance)

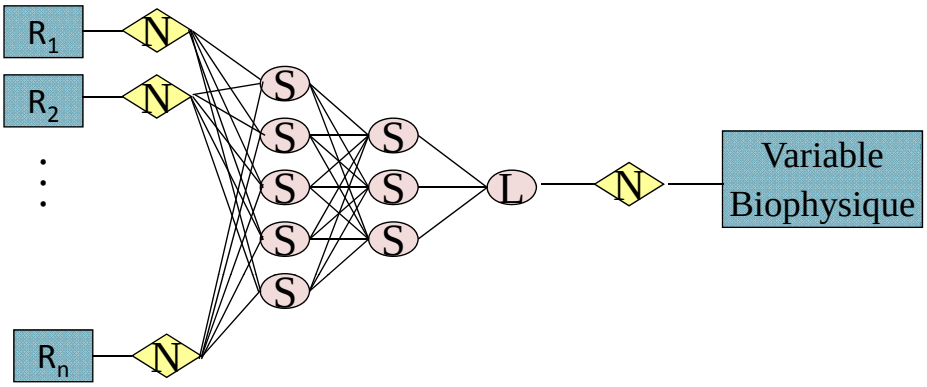


Les techniques d'inversion de modèle



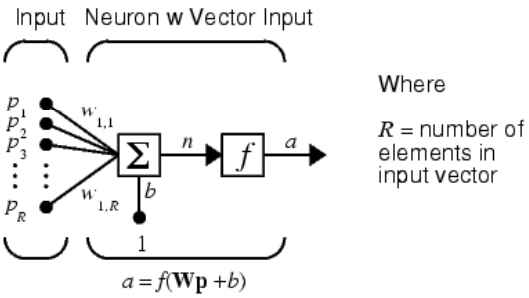
	Minimisation sur les Variables biophysiques	**Minimisation sur les Variables Radiométriques**
Étalonnage sur Expérimentation	Régression multiple Réseaux de neurones Indice de végétation	Table de correspondance
Etalonnage sur simulation	Régression multiple Réseaux de neurones Indices spectraux	Optimisation Table de correspondance

Les NNET: réseaux de neurones



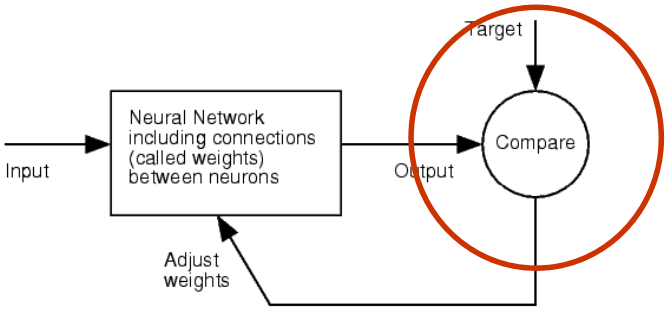
- un NNET est un assemblage de fonctions élémentaires (neurones) caractérisé par
  - Un poids associé à chaque entrée
  - Un biais
  - Une fonction de transfert

qui permet d'estimer une sortie
à partir de n'importe quelle entrée



Fonctionnement du réseau de neurones

Minimisation dans l'espace des sorties!!



H: Hessien
J: Jacobien
G: Gradient
e = erreur du réseau

$$\rightarrow \mathbf{H} = \mathbf{J}^T\mathbf{J}$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T\mathbf{e}$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \mu\mathbf{I}]^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{e}$$

- **L'apprentissage (calage des poids et biais) se fait sur une base de données (simulées ou vraies). Une fois le réseau calé, l'estimation à partir d'une entrée donnée est instantanée.**
- **Réseaux de neurones à rétro-propagation du gradient**
- **Algorithme de minimisation de Levernberg-Marquart (μ=0 ⇔ quasi Newton étendu) + techniques de régularisation**

Calage d'un réseau de neurones

- Détermination de l'architecture
  - Nb de couches
  - Nb de neurones par couche
  - Type de neurones (fonction de transfert)

- Apprentissage = calage des poids et biais
  - Initialisation des poids et des biais
  - Algorithme d'optimisation (gauss/newton,….)
  - Critère d'arrêt (convergence, hyperspécialisation)

Les NNET: réseaux de neurones

- Avantages
  - Une fois l'apprentissage effectué, très rapide d'exécution

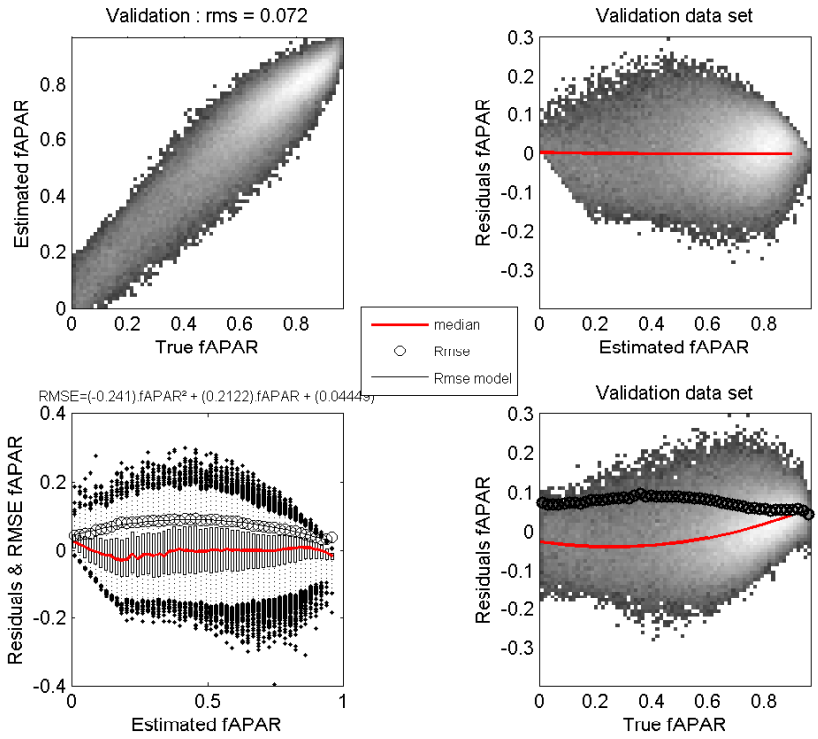
- Inconvénients
  - Nombre d'entrées fixes
  - Ne fournit que la variable d'intérêt

- Questions associées
  - Constitution de la base de données (réalisme!!!)
    - Distribution des entrées du modèle
    - Qualité du modèle à représenter ce que l'on observe
    - Architecture du réseau
  - Le bruit associé aux données (et/ou précision du modèle)

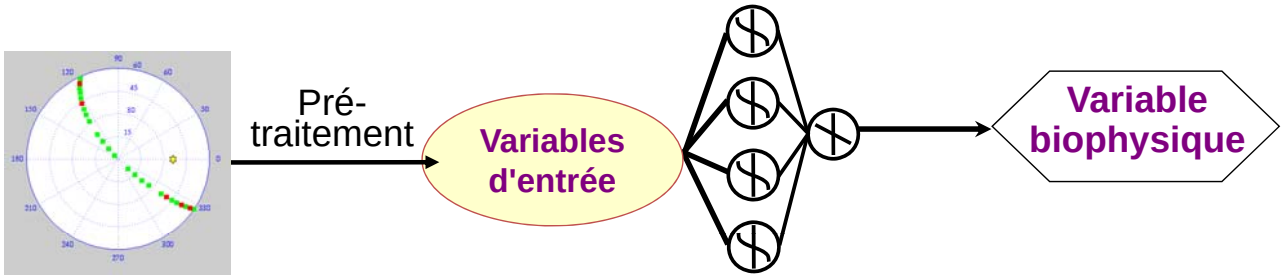
Les NNET: réseaux de neurones

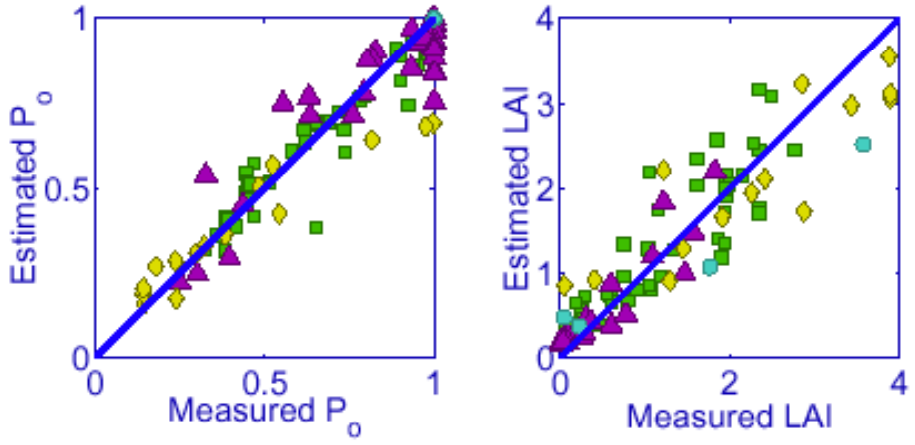
- Améliorer le réalisme de la base d'apprentissage
  - Reflectance mismatch
    - Recherche de similitudes entre réflectance mesurées dans la réalité et réflectances simulées (éliminitaion des cas trop disparates)
  - Vérification que certaines relations attendues sont vérifiés
    - Ex: loi de Beer : $fAPAR=1-exp^{-KLAI}$

Les NNETs: exemple de résultat



Quelques exemples d'estimation…



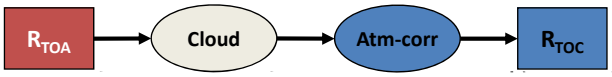


Le projet CYCLOPES

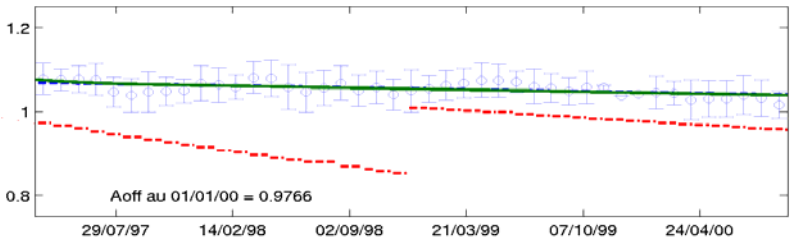
- Biophysical variables:
  - Albedo
  - fAPAR
  - fCover
  - LAI
- Resolution: 1km - 8km
- Temporal sampling: 10 days
- Coverage: Global
- Duration: 1997-2003
- Sensors:
  - AVHRR
  - **VEGETATION**
  - POLDER
  - MERIS
  - (MSG)

Chaîne de développement du produit (1)

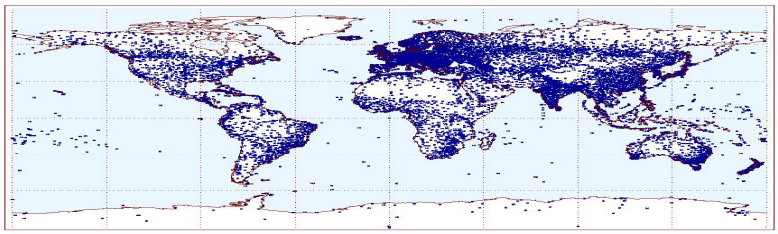
Pré-traitement



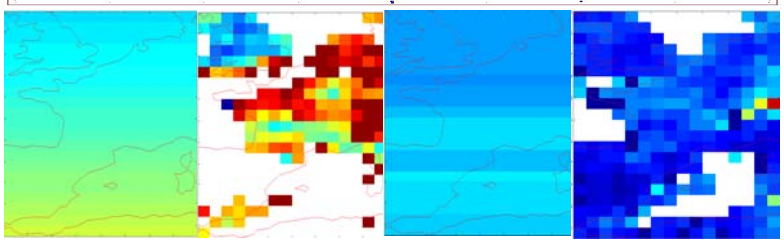
Calibration radiométrique



Détection de nuage

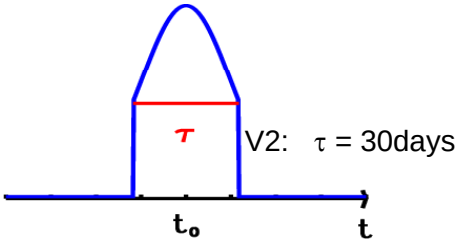


Correction atmosphérique: climatologie
(Monthly MODIS min average values)



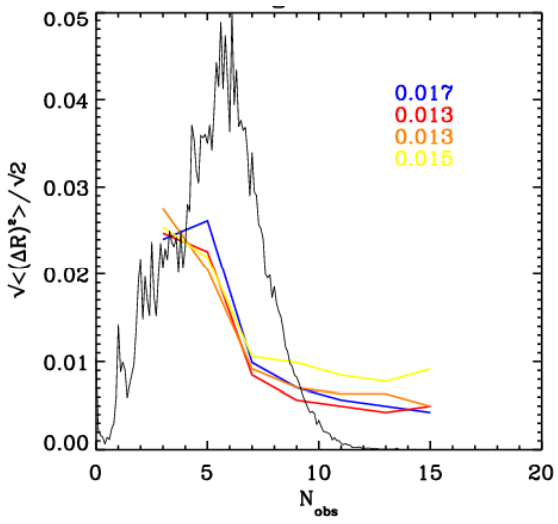
Chaîne de développement du produit (2)

Normalisation de la BRDF: inversion d'un modèle semi-linéaire



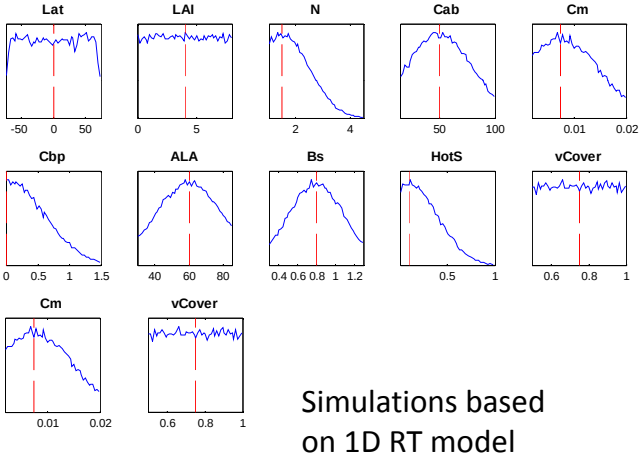
A priori constraints

	k_1	$\sigma[k_1]$	k_2	$\sigma[k_2]$
Blue	0.00	0.07	0.08	0.29
Red	0.02	0.05	0.17	0.30
NIR	0.04	0.07	0.67	0.34
SWIR	0.05	0.06	0.41	0.28

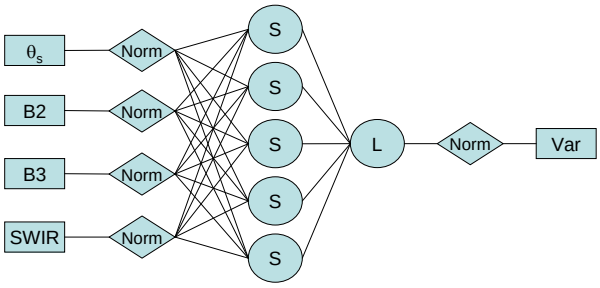


Bonnes performances, même avec peu d'observations

Chaîne de développement du produit (3)



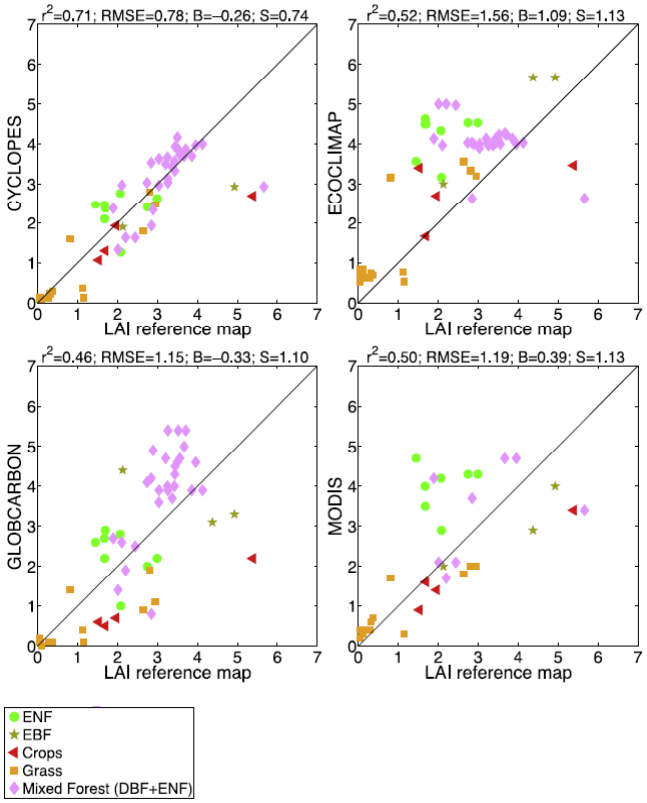
Simulations based on 1D RT model



CYCLOPES: Résultats

Inversion de modèle 1D par NNT

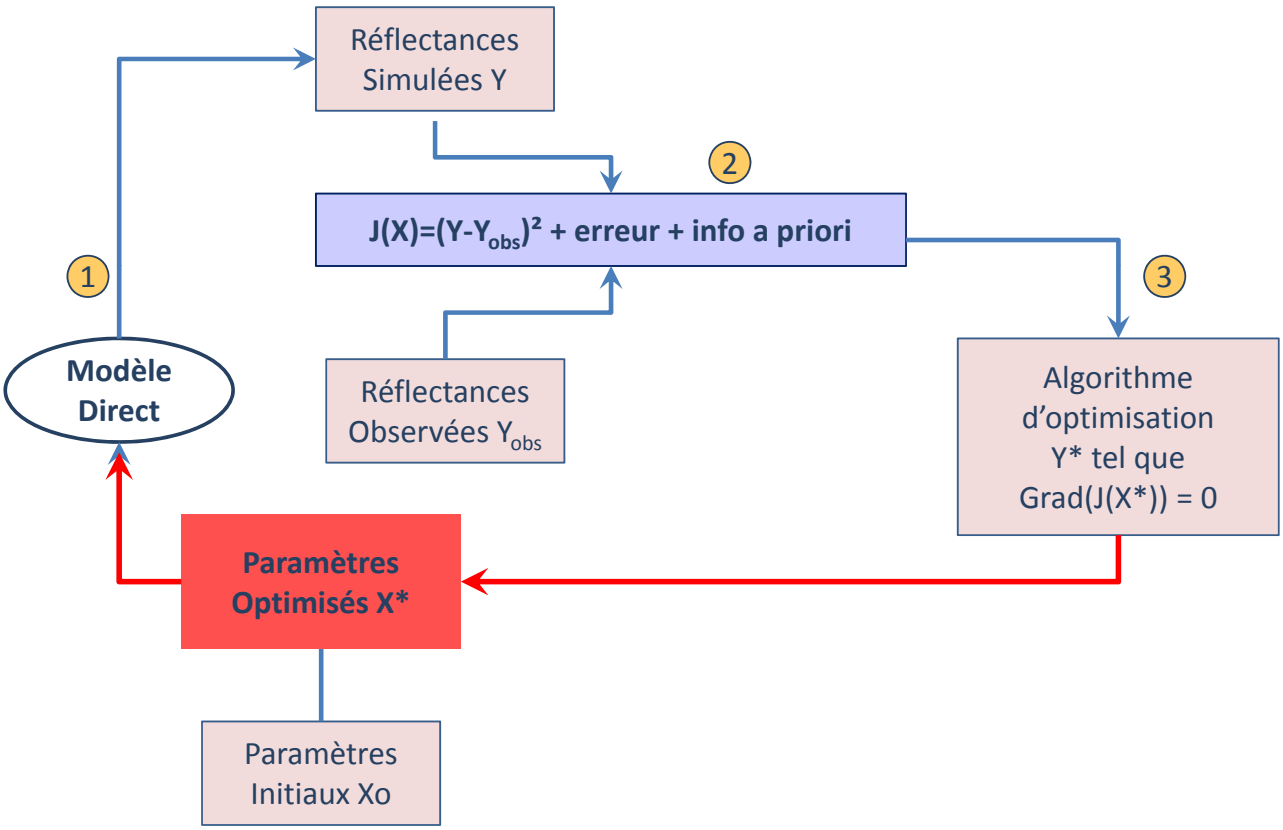
Modèle Empirique



Climatologie sur modèle empirique

Inversion de modèle 3D par LUT

Les méthodes d'optimisation



Les méthodes d'optimisation

Maximum de vraisemblance ≈ fonction coût utilisée

Fonction coût $J(V) = (R-R^*)^t.\mathbf{W}^{-1}.(R-R^*)$ **Mesures**

W: Matrice de covariance des incertitudes (modèle et mesures)

Cost function	references
$J=\sum_{n=1}^{N}\frac{R_n-\hat{R}_n}{R_n}$	(Gao and Lesht, 1997)
$J=\sum_{n=1}^{N}\left\lvert\frac{R_n-\hat{R}_n}{R_n}\right\rvert$	(Qiu et al., 1998)
$J=\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{R_n-\hat{R}_n}{R_n+\hat{R}_n}\right)^2$	(Gobron et al., 1997)
$J=\sum_{n=1}^{N}\left(R_n-\hat{R}_n\right)^2$	(Braswell et al., 1996; Combal et al., 2002; Goel and Thompson, 1984; Jacquemoud et al., 2000; Pinty et al., 1990; Privette et al., 1996)
$J=\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{R_n-\hat{R}_n}{R_n}\right)^2$	(Bicheron and Leroy, 1999; Kuusk, 1991b; Nilson and Kuusk, 1989; Weiss et al., 2000)
$J=\sum_{n=1}^{N}\omega_n\left(\frac{R_n-\hat{R}_n}{R_n}\right)^2$; $\omega_n=\frac{\cos(\theta_v\cdot\sin(\phi))+1}{2}$	(Bacour et al., 2002a)

Les méthodes d'optimisation

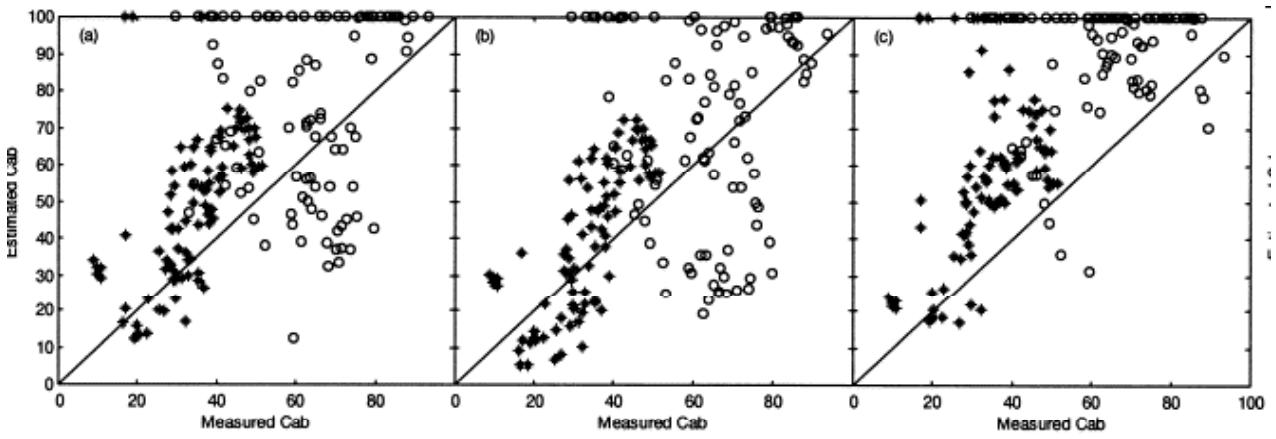
- Avantages
  - Fournit l'ensemble des variables du modèle (indication d'ambigüités)
- Inconvénients
  - Temps d'exécution
  - Dépendant de la solution initiale (minimum locaux)
- Questions associées
  - Quel critère de convergence, quelle fonction de coût?
  - Le bruit associé aux données (et/ou précision du modèle)

Les méthodes d'optimisation

- Améliorer les performances de l'algorithme
  - réaliser l'inversion pour différentes valeurs de paramètres initiaux => si convergence vers solution différentes alors présence de minima locaux (augmente le temps de calcul)
  - introduire de l'information a priori pour « régulariser » l'algorithme (contraintes)
- Prise en compte des variations spatiales et/ou temporelles des variables
  - Atmosphère invariante sur 10km²
  - Sol invariant sur une zone large (qqs km²)
  - LAI invariant sur une parcelle (qqs ha)

Méthode d'Optimisation

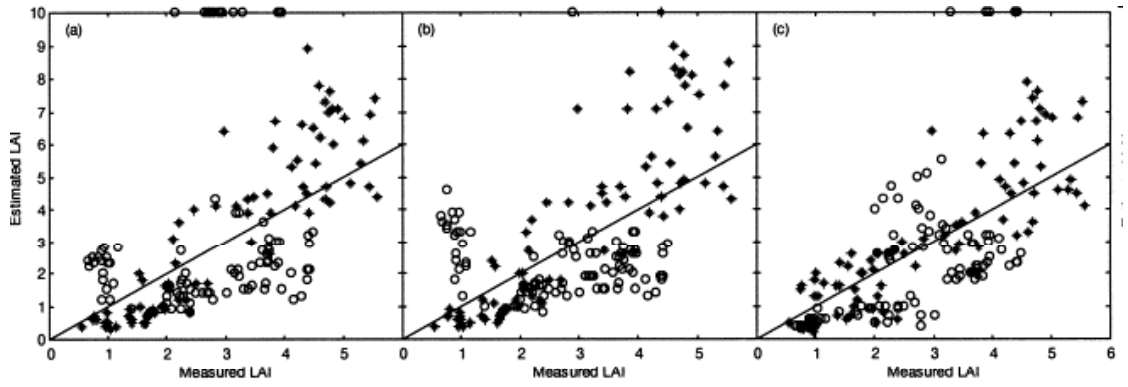
- Estimation de la chlorophylle par inversion de 3 modèles: 10 bandes VIS-PIR



SAIL Pinty Kuusk

Méthode d'Optimisation

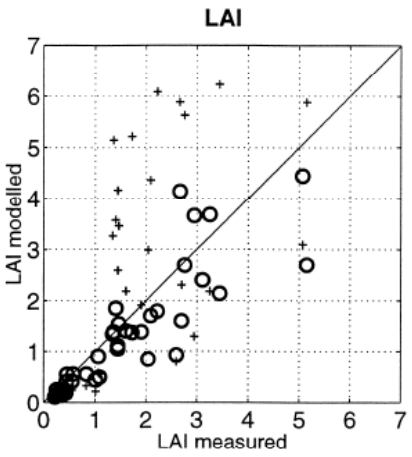
- Estimation du LAI par inversion de 3 modèles: 10 bandes VIS-PIR

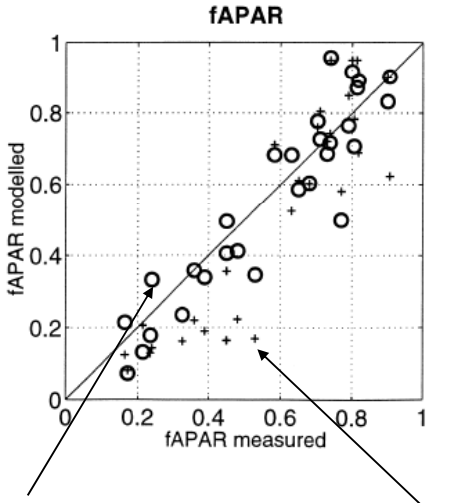


SAIL Pinty Kuusk

Méthode d'Optimisation: échelle globale

- Capteur POLDER

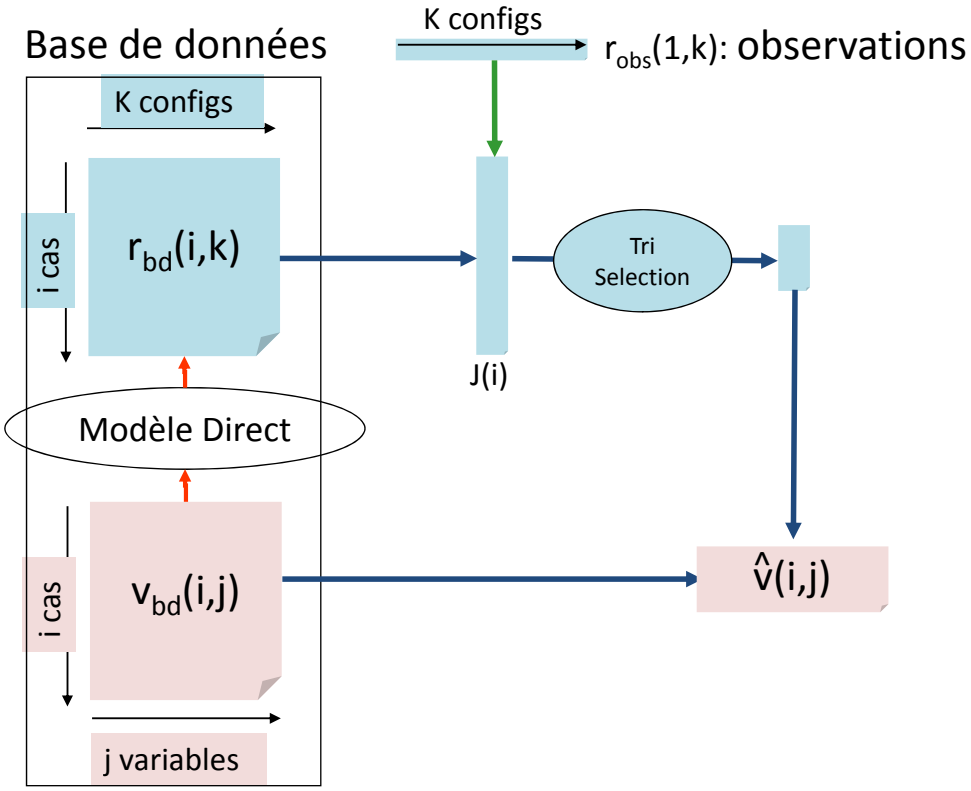




Inversion Modèle

Indice de VGT

Tables de correspondance : LUT

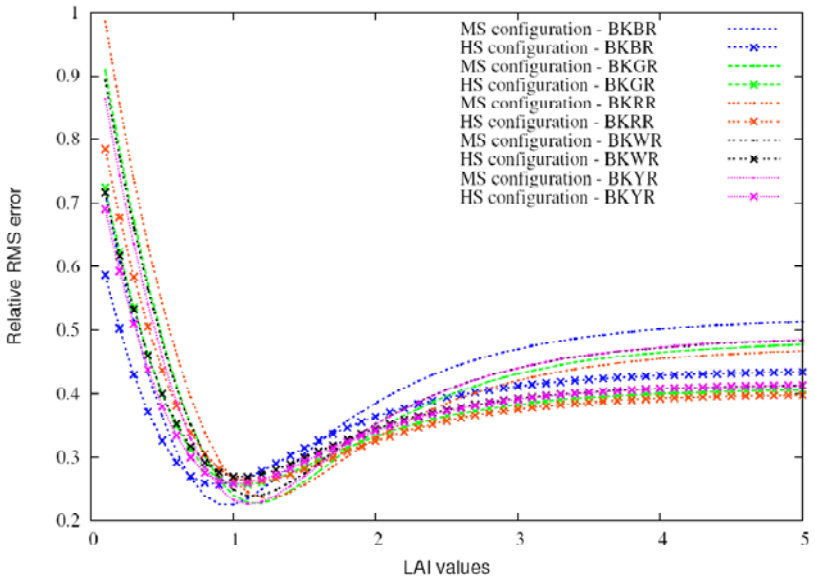


Tables de correspondance : LUT

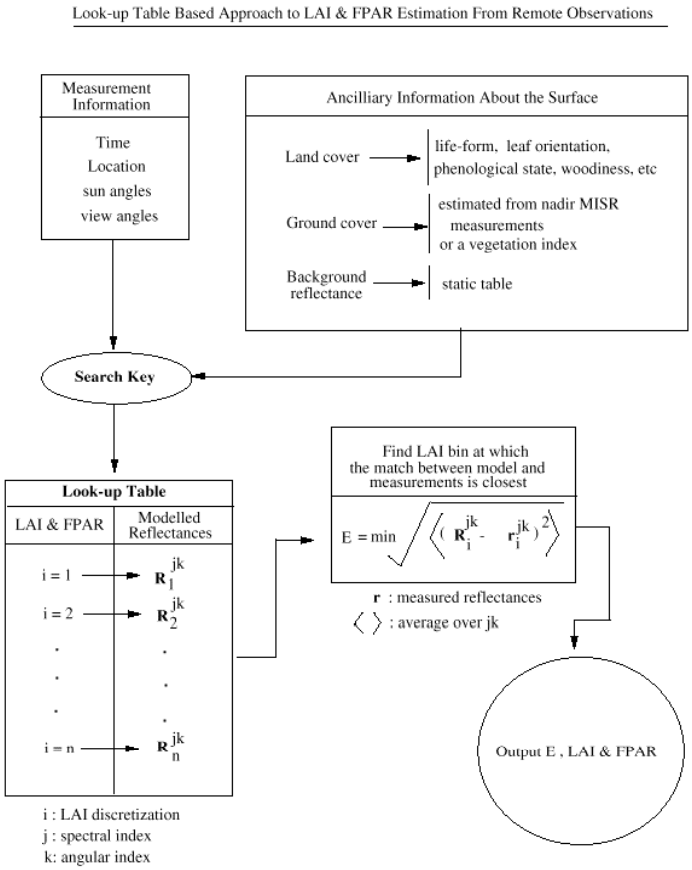
- Avantages
  - Fournit l'ensemble des variables du modèle (indication d'ambiguïtés)
  - Rapide
  - Recherche globale
- Inconvénients
  - Requiert de stocker l'ensemble des cas
- Questions associées
  - Quelle fonction de coût?
  - Constitution de la base de données (distribution des entrées)
  - Le bruit associé aux données (et/ou précision du modèle)

Exemple d'implémentation d'une LUT

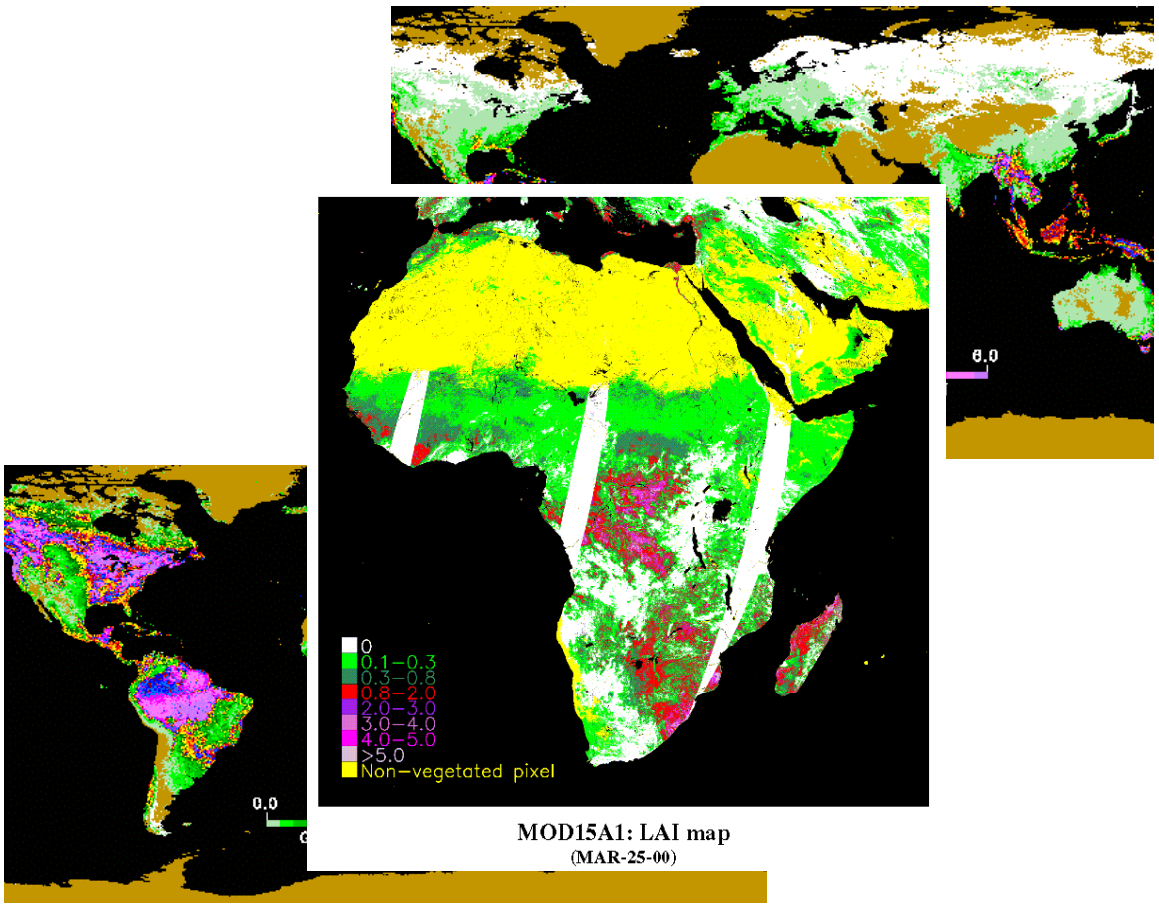
- Comparaison multispectral(MS) / Hyperspectral (HS) sur de l'orge



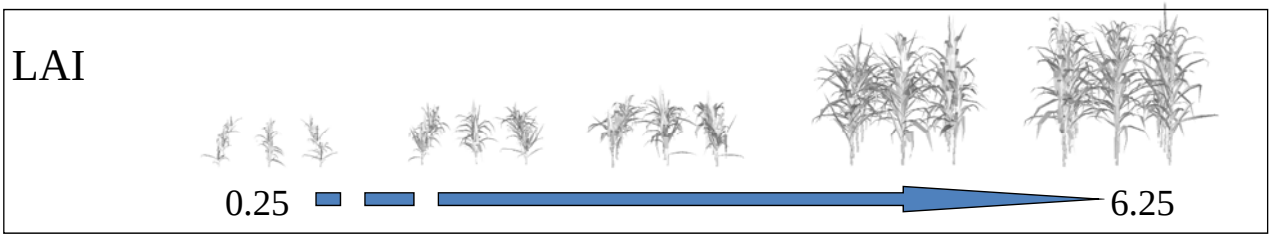
Exemple d'implémentation d'une LUT

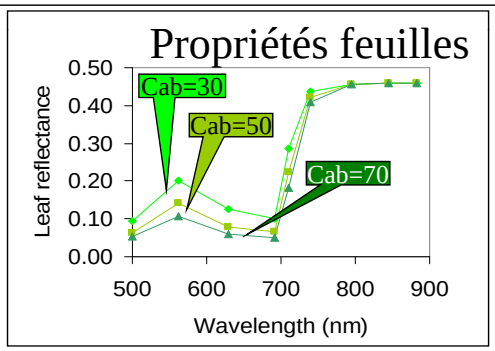


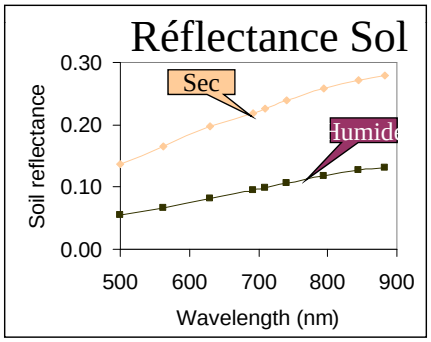
LUT



Comparaison de techniques d'inversion







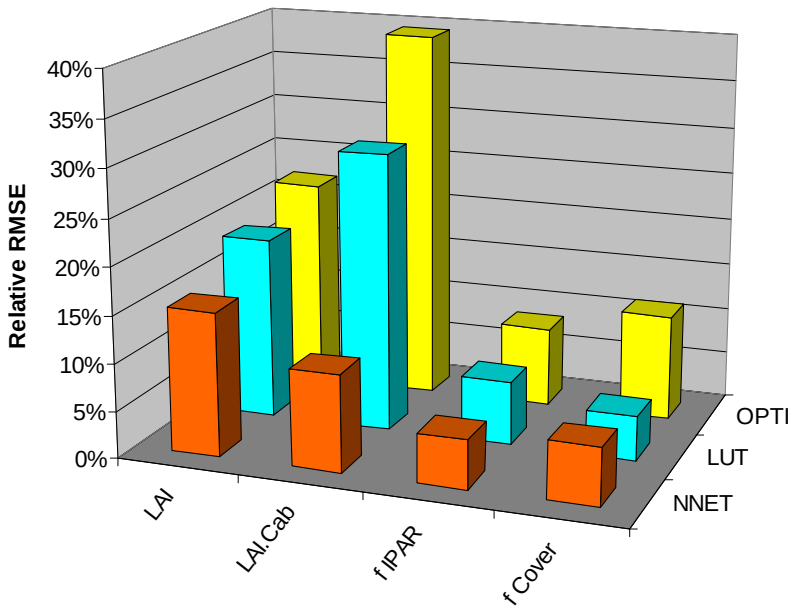
18 cas simulés non orthogonaux

9 bandes spectrales

Modèle 1D de Transfert radiatif SAIL utilisé aussi en inversion

Lancer de rayons sur architecture 3D données de référence

Comparaison de résultats



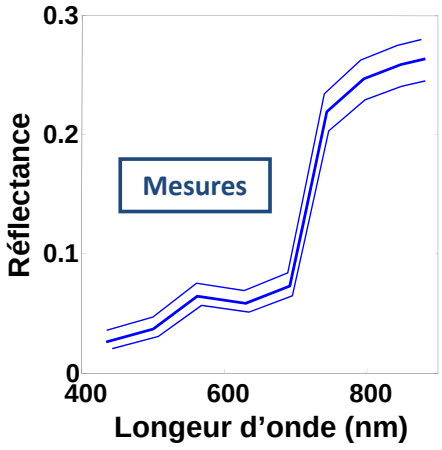
Les performances dépendent fortement de la manière dont les différentes techniques sont mises en œuvre: incertitude, info a priori?

Problème inverse et incertitudes

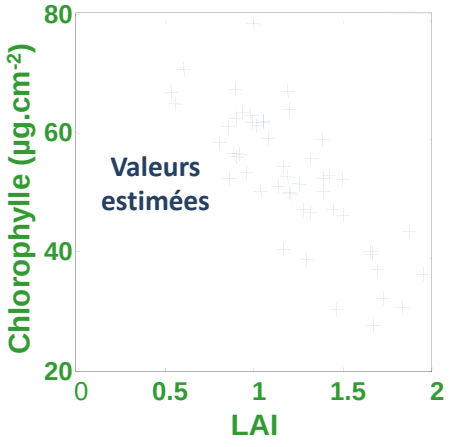
Lai tel que: $R^* = \mathbf{M}(LAI|\ \Omega_0,\Omega_V,\lambda) + \varepsilon^R(LAI|\ \Omega_0,\Omega_V,\lambda)$

- Mesures
- Modèle TR
- Variables à estimer
- Configuration de mesure
- ?????
- incertitudes (modèles de TR & mesures)

Le caractère mal posé du problème inverse



Incertitudes mesure et modèle



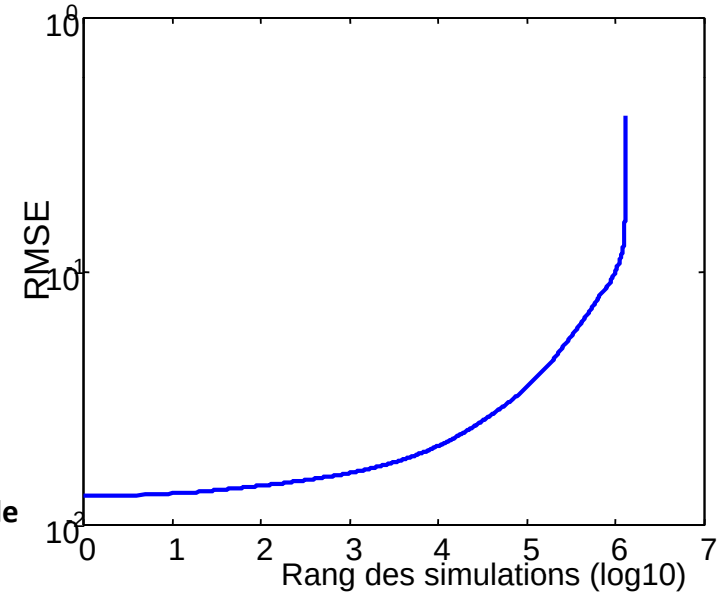
Un ensemble de variables permettent un bon ajustement aux données radiométriques

→ **L'information radiométrique n'est pas suffisante**

→ **D'autres informations sont nécessaires pour régulariser**

Le caractère mal posé du problème inverse

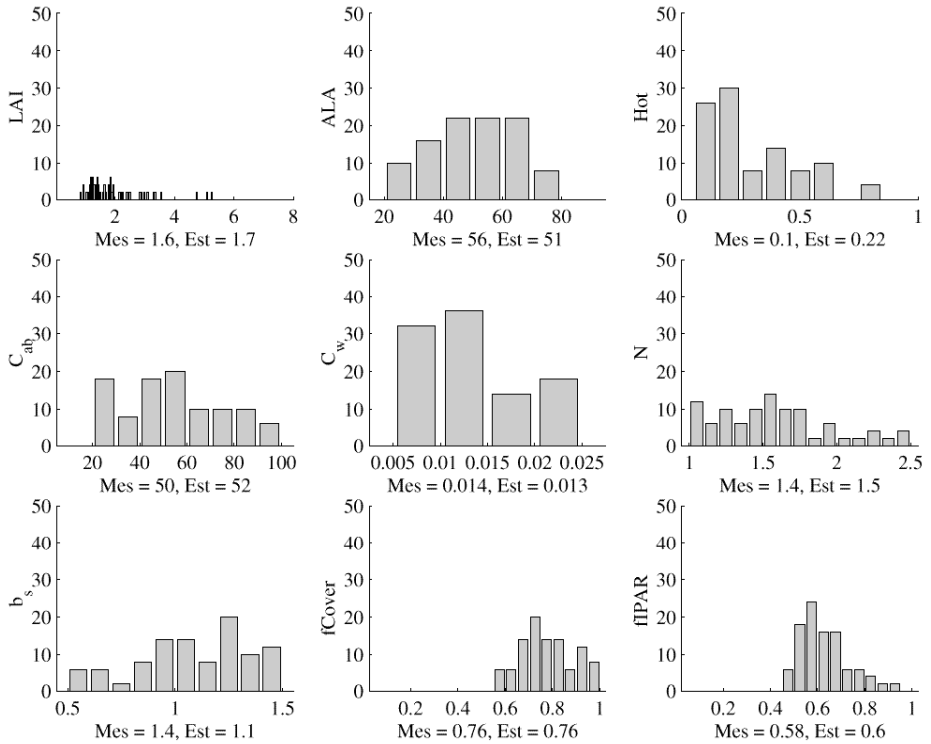
- Autre exemple: tri dans une table de correspondance



incertitude modèle + mesure

Le caractère mal posé du problème inverse

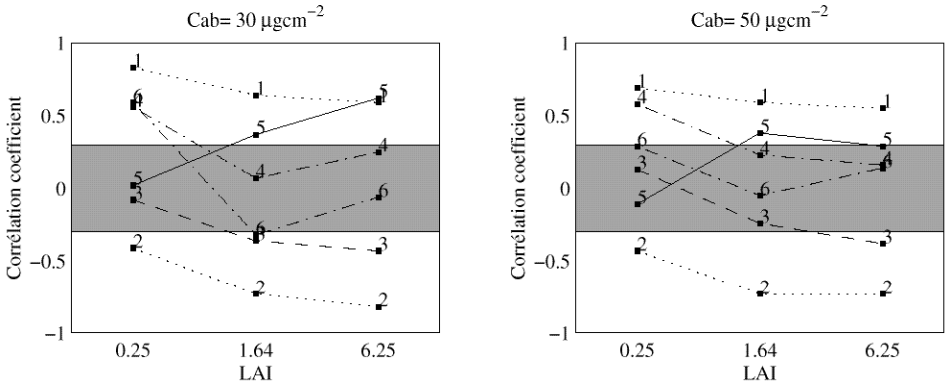
- Distribution des solutions (R,PIR au nadir)



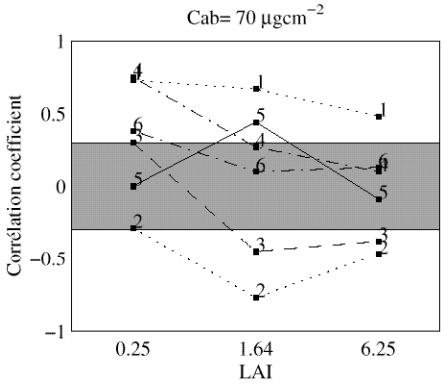
50 cas sélectionnés
Sur 280000

Le caractère mal posé du problème inverse

- Co-Distribution des solutions (R,PIR au nadir)

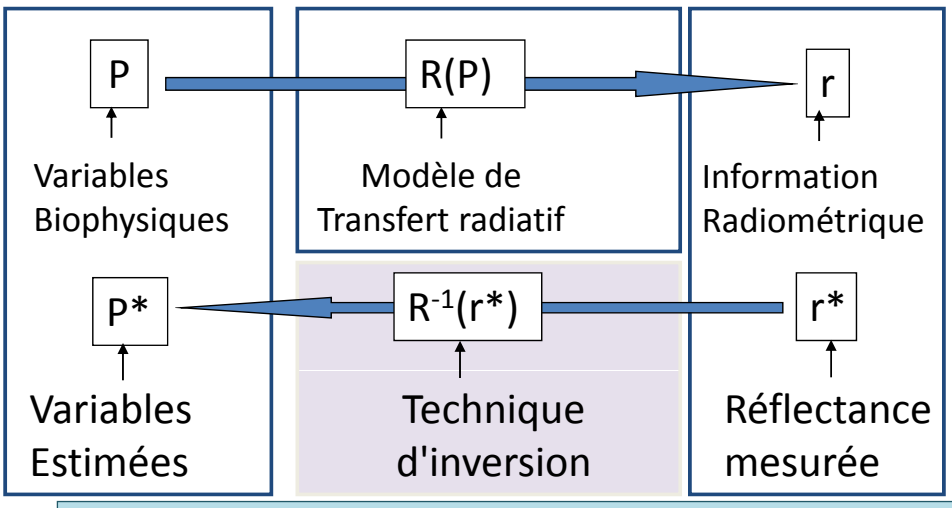


1: LAI-ALA
2: LAI-Cab
3: Cab-ALA
4:ALA-Sol
5: Cab-N
6: LAI-Sol



Intérêt des variables secondaires :
fAPAR, fCover, LAI.Cab

Le problème inverse: vue d'ensemble



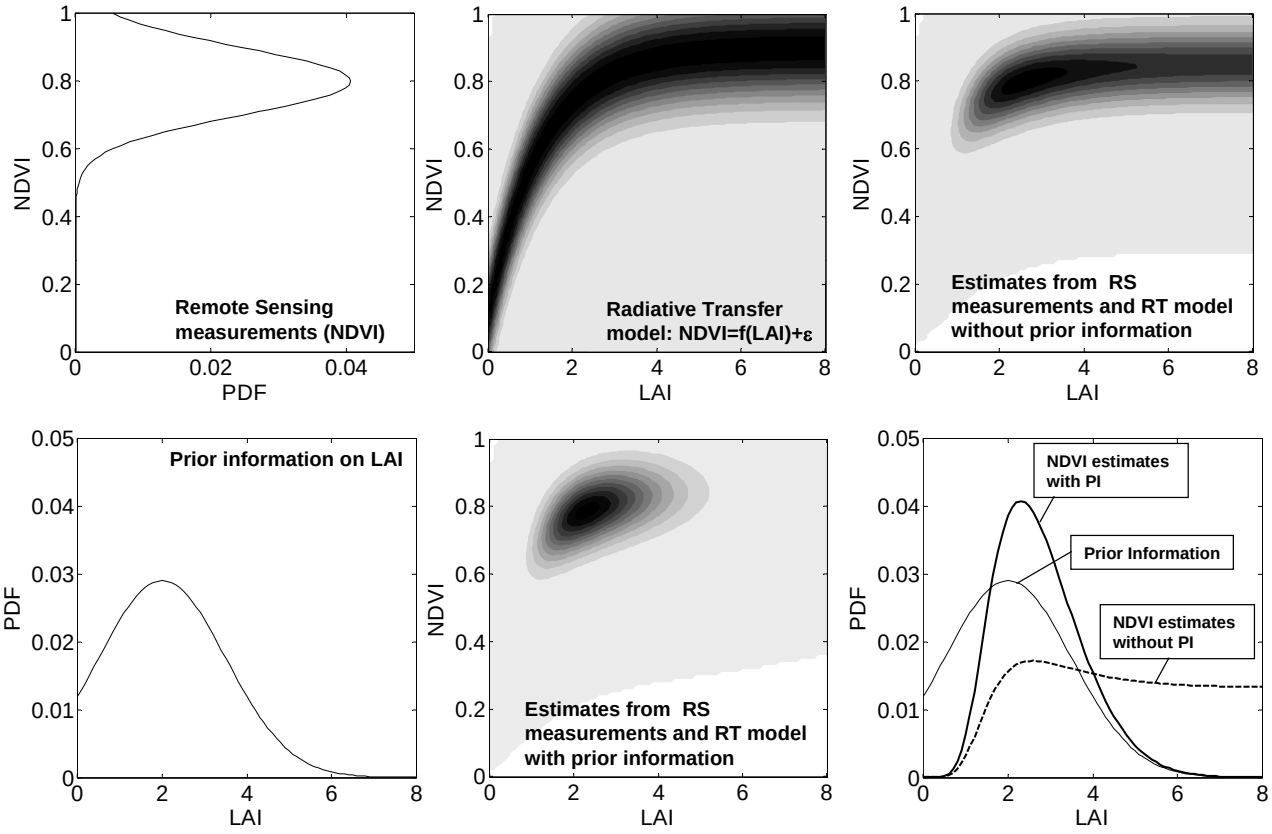
1- Quelle variable biophysique estimer?

2- Quelle information exploiter?

3- Quel modèle de transfert radiatif utiliser?

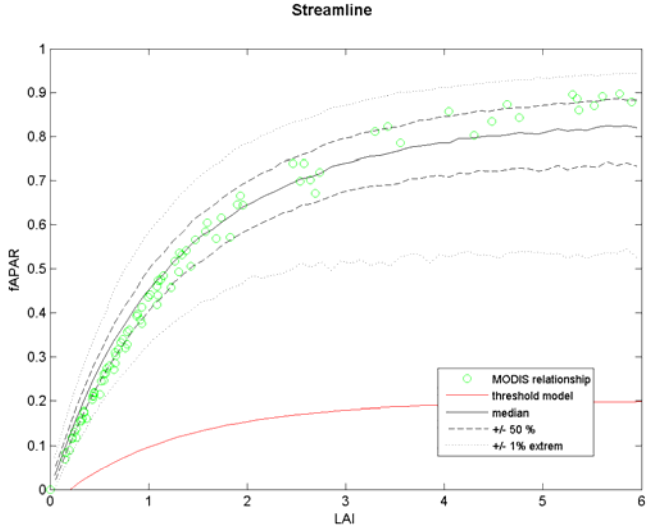
4-Quelle technique d'inversion utiliser?

Importance de l'information a priori



Comment ajouter de l'information a priori ?

- Réseaux de neurones, Indices de végétation, LUT
  - Composition de la base d'apprentissage
    - Distribution des variables d'entrée
    - Incertitudes sur les données radiométriques (modèle, mesures): mismatch, tri des données



Comment ajouter de l'information a priori ?

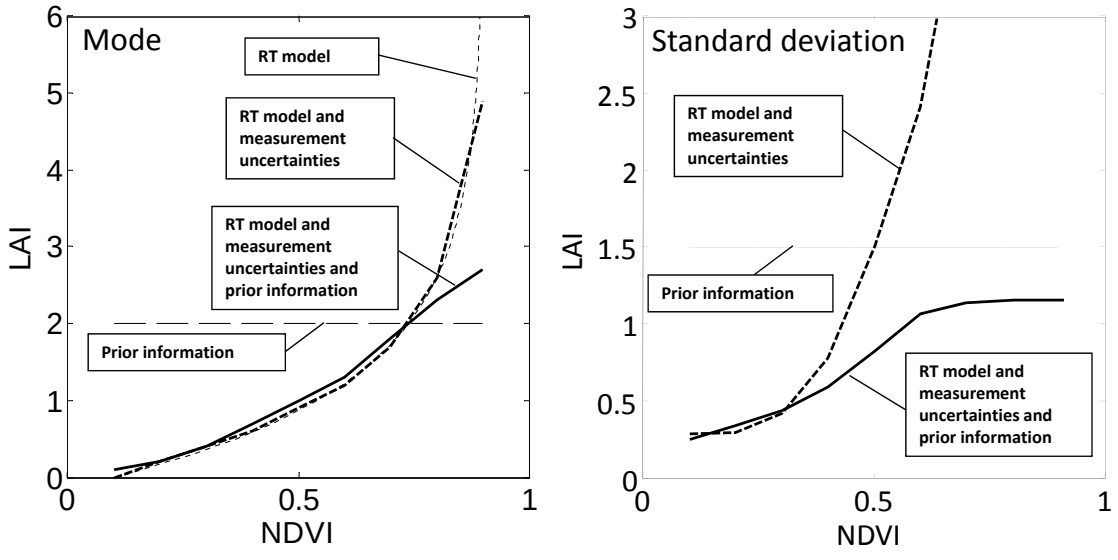
- Optimisation, tables de correspondance
  - Fonction coût

$$J(v) = (R-R)^t.\mathbf{W}^{-1}.(R-R) + (V-V^p)^t.\mathbf{C}^{-1}.(V-V^p)$$

Partie Radiometrique — Matrice de Covariance des incertitudes (modèle & mesures)

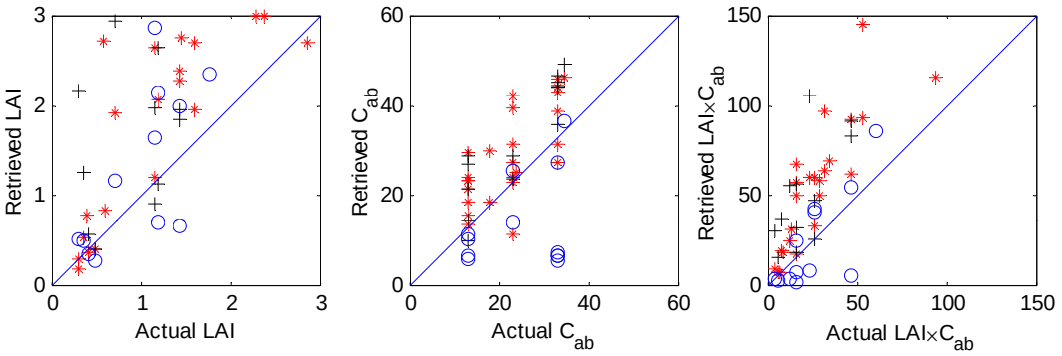
Partie biophysique — Matrice de Covariance Des variables

Comment obtenir l'IAP?

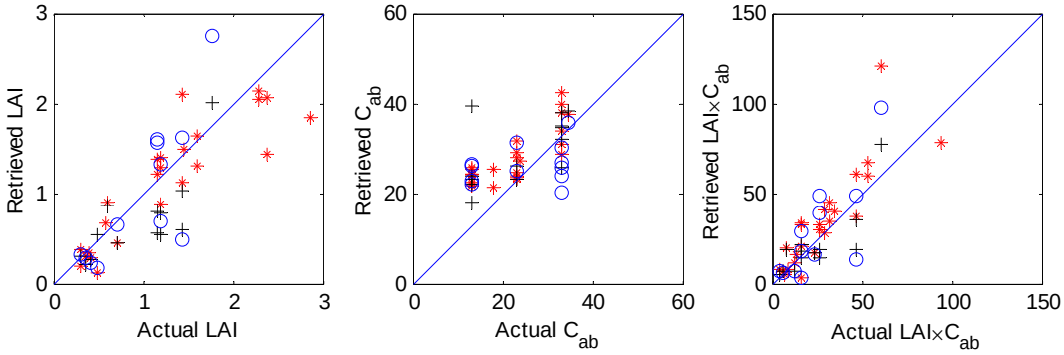


Rôle critique de l'IAP dans l'inversion

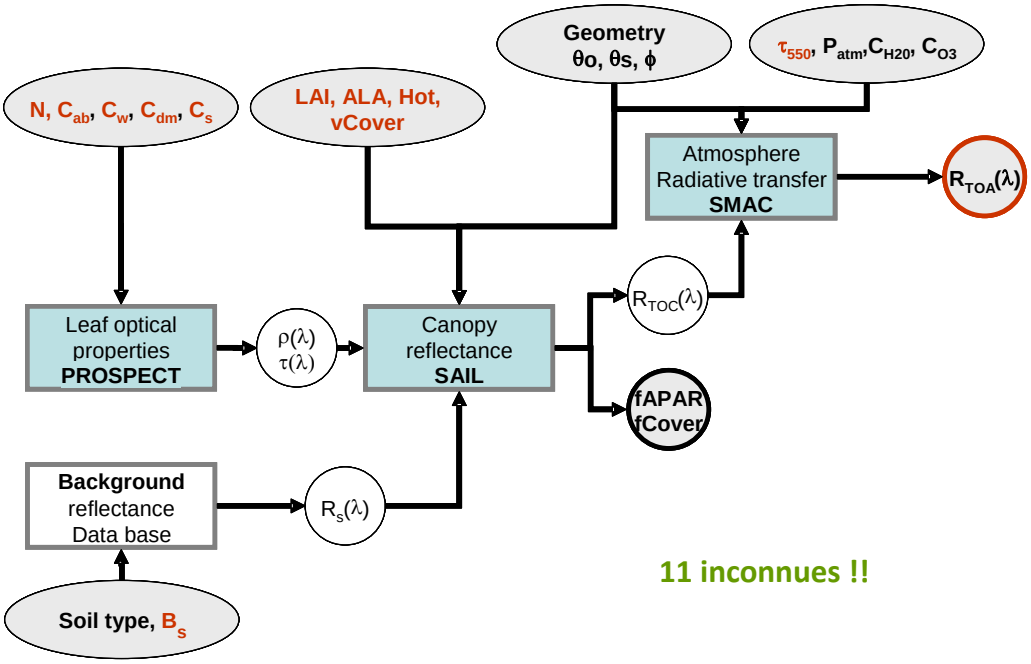
Pas d'information a priori



Utilisation d'information a priori



Prise en compte des contraintes

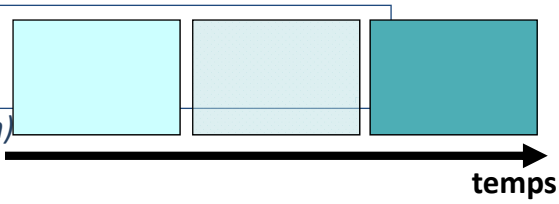


11 inconnues !!

Prise en compte des contraintes

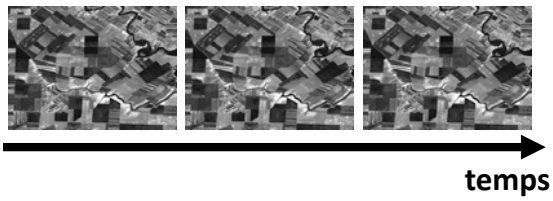
- **Caracteristiques de l'atmosphere:**
  $A = (t_{550}, P_{atm}, C_{wv}, C_{03})$

➔ *fixées sur une fenêtre spatiale (≈ km) mais varient dans le temps*



- **Caractéristiques de la végétation:**
  C = (N, Cab, Cdm, Cs, LAI, ALA , Hot)

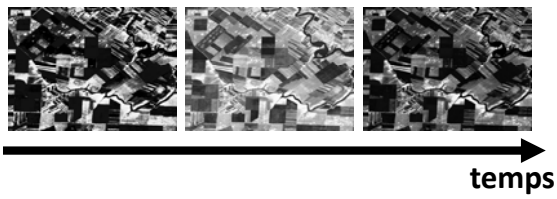
➔ *Peu de variation sur une fenêtre temporelle limitée (≈10 jours) mais varient dans l'espace*



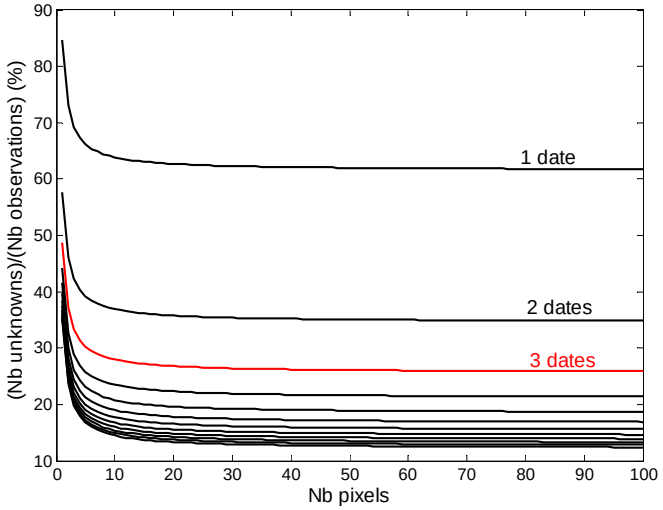
- **Brillance du sol** (Bs)

➔ *varie avec l'espace et le temps*

➔ *pas de contraintes*



Prise en compte des contraintes



Degrés de liberté

Nombre d'observations:
nλ*P*D

Pixels Dates

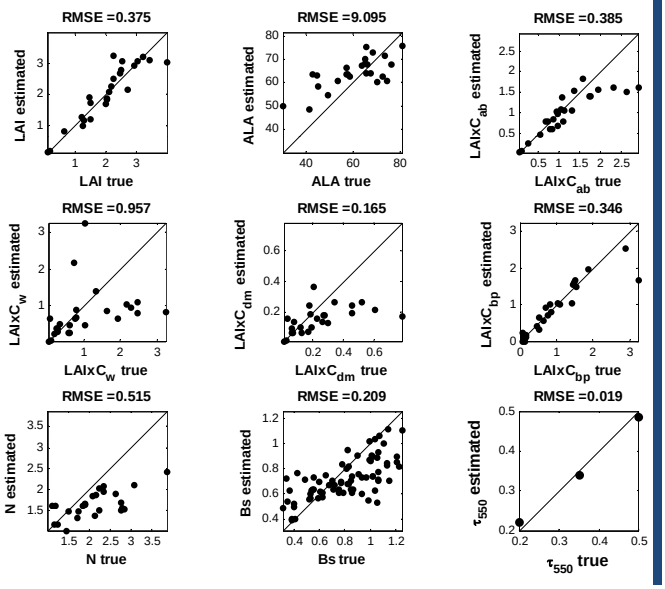
Problème avec contraintes: Inversion simultanée sur P pixels et D dates :

D variables Atmosphere (t550)
+7*P Variables couvert +feuilles (N,Cab,Cdm,Cs,LAI,ALA ,Hot)
+P*D Brillance du sol

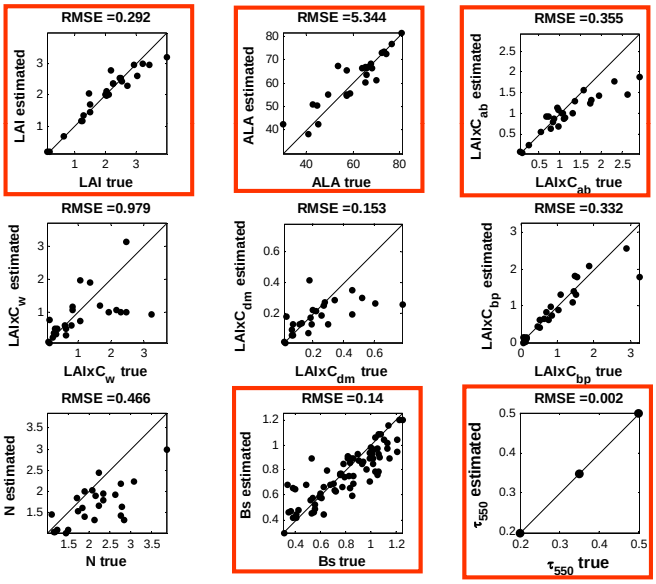
Problème sans contraintes: Inversion indépendante sur chaque pixel à chaque date:
10*P*D variables à estimer

Prise en compte des contraintes

Sans



Avec



- Amélioration de la précision et de la robustesse

Plan

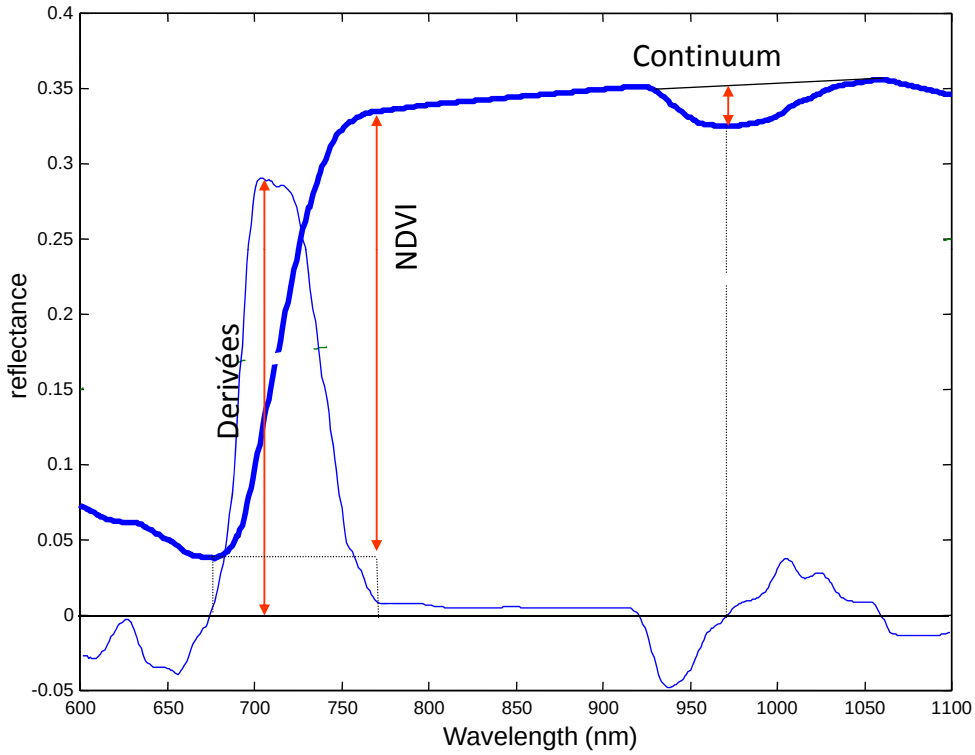
4. L'inversion des modèles de transfert radiatif
   - Les réseaux de neurones
   - L'optimisation
   - Les LUT
   - Incertitudes
   - Apport d'information à priori

5. Comparaison avec des indices de végétation
   - Conception d'indices
   - Relation avec des variables biophysiques

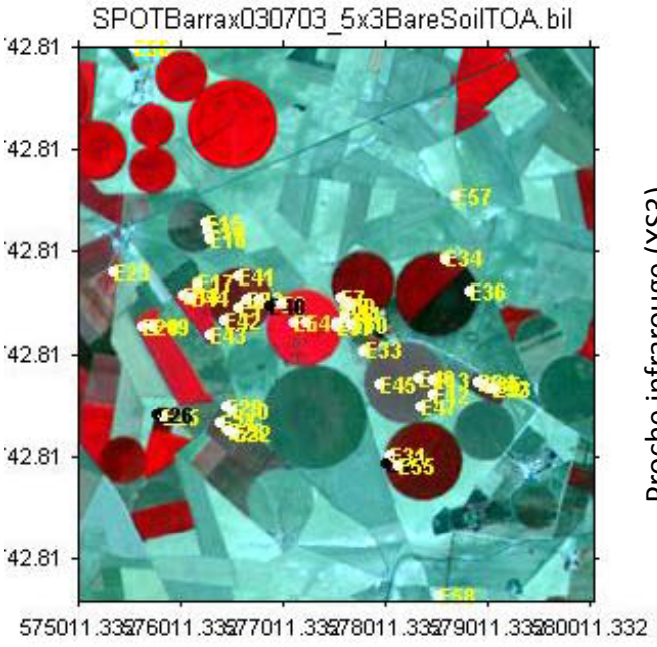
6. La validation terrain
   - Photographies hémisphériques
   - L'instrumentation

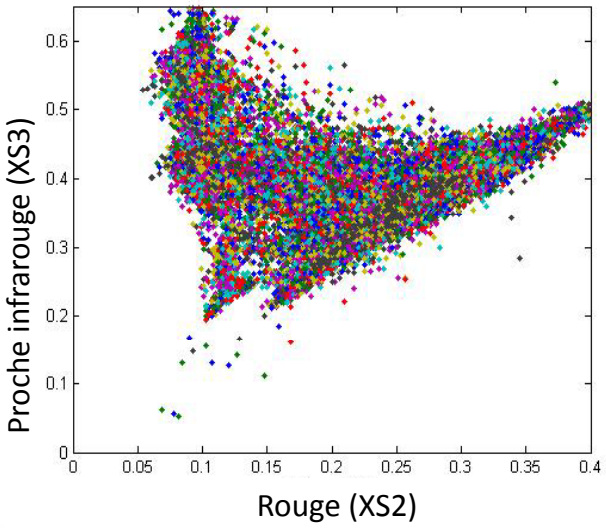
7. Exemples d'application
   - Agriculture de précision
   - Phénologie et suivi
   - Extraction de variables sur les sols avec un capteur hyperspectral
   - Modèle de culture et assimilation

Techniques d'estimation : absorption différentielle

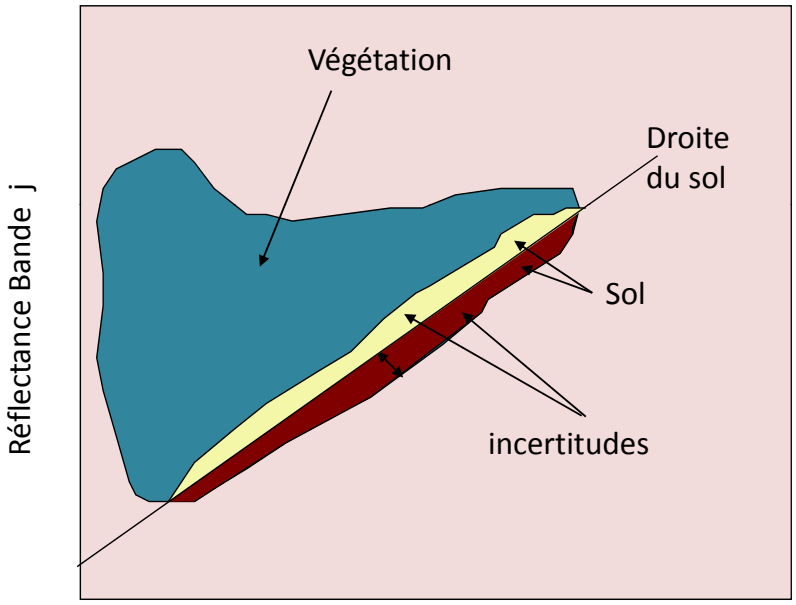


Indice de végétation: corrélation entre bandes

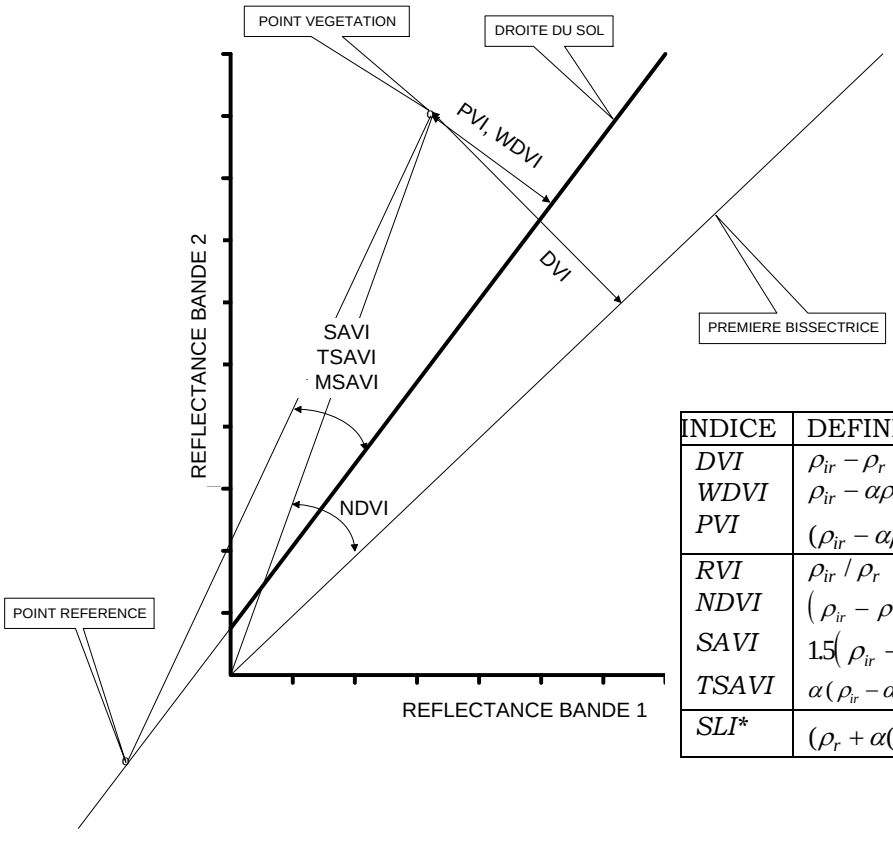




Indice de végétation: corrélation entre bandes



Les différents indices de végétation



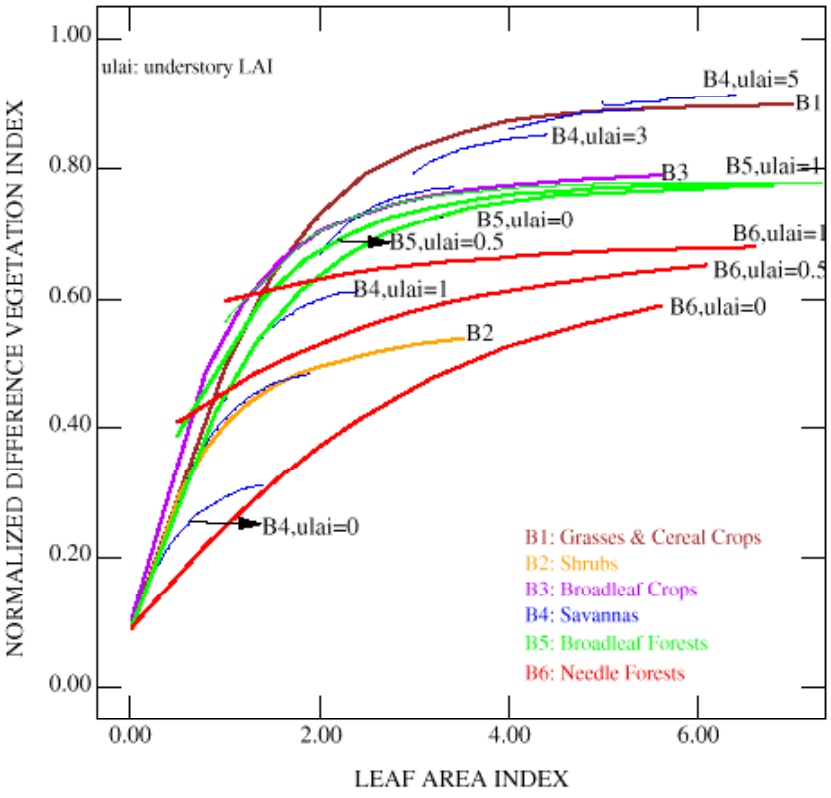
INDICE	DEFINITION
DVI	$\rho_{ir} - \rho_r$
WDVI	$\rho_{ir} - \alpha\rho_r$
PVI	$(\rho_{ir} - \alpha\rho_r - \beta) / \sqrt{1+\alpha^2}$
RVI	ρ_{ir} / ρ_r
NDVI	$(\rho_{ir} - \rho_r) / (\rho_{ir} + \rho_r)$
SAVI	$1.5(\rho_{ir} - \rho_r) / (\rho_{ir} + \rho_r + 0.5)$
TSAVI	$\alpha(\rho_{ir} - \alpha\rho_r - \beta) / (\rho_r + \alpha(\rho_{ir} - \beta) + 0.08(1+\alpha^2))$
*SLI**	$(\rho_r + \alpha(\rho_{ir} - \beta)) / \sqrt{1+\alpha^2}$

Les différents indices de végétation

INDICE	DEFINITION	EQUIVALENCE	REFERENCE
DVI	$\rho_{ir} - \rho_r$		Clevers, 1986
WDVI	$\rho_{ir} - \alpha\rho_r$		Clevers, 1989
PVI	$(\rho_{ir} - \alpha\rho_r - \beta)/\sqrt{1+\alpha^2}$	$(WDVI - \beta)/\sqrt{1+\alpha^2}$	Richardson et Wiegand, 1977
RVI	ρ_{ir}/ρ_r		Pearson et Miller, 1972
NDVI	$(\rho_{ir} - \rho_r)/(\rho_{ir} + \rho_r)$	$(RVI+1)/(RVI-1)$	Rouse et al., 1974
SAVI	$1.5(\rho_{ir} - \rho_r)/(\rho_{ir} + \rho_r + 0.5)$		Huete, 1988
TSAVI	$\alpha(\rho_{ir} - \alpha\rho_r - \beta)/(\rho_r + \alpha(\rho_{ir} - \beta) + 0.08(1+\alpha^2))$		Baret et Guyot, 1991
*SLI**	$(\rho_r + \alpha(\rho_{ir} - \beta))/\sqrt{1+\alpha^2}$		Richardson et Wiegand, 1977

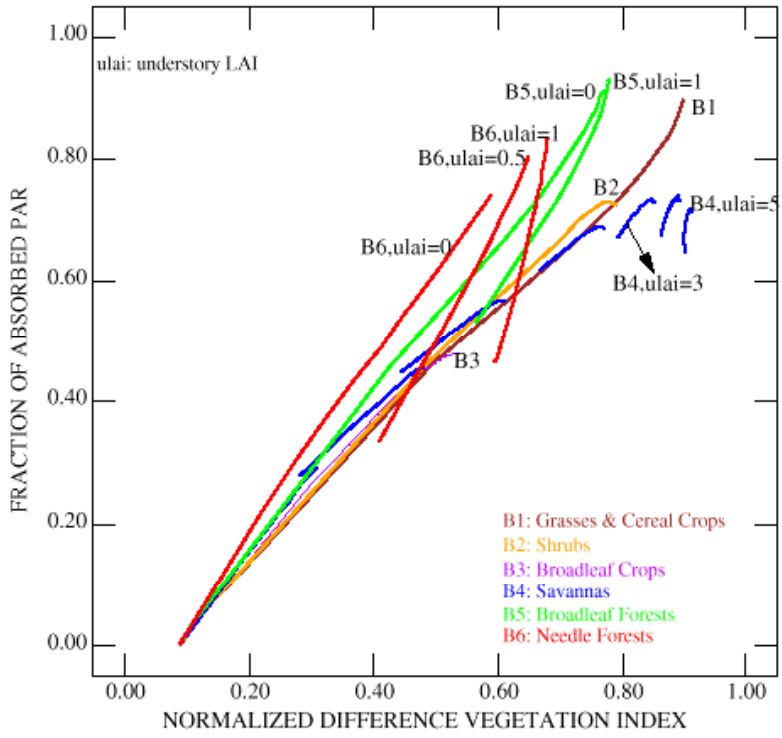
Tableau 2. Liste des principaux indices de végétation et leur éventuelle équivalence. Les paramètres α et β correspondent à la pente et à l'ordonnée à l'origine de la droite du sol définie par: $\rho_{ir} = \alpha\rho_r + \beta$. *L'indice *SLI* (Soil Line Index) est un indice de brillance du sol.

Calage de relations empiriques



$$LAI = -\frac{1}{K_{LAI}} \ln\left(\frac{NDVI - NDVI_\infty}{NDVI_s - NDVI_\infty}\right)$$

Calage de relations empiriques



$$FAPAR = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\infty}}{NDVI_{s} - NDVI_{\infty}} \right)^{KFAPAR}$$

Les indices de végétation: conclusion

- Avantages
  - Très rapide d'exécution!
- Inconvénients
  - Très dépendant de la surface observée, des conditions atmosphériques….la relation empirique est difficilement extrapolable sans perte de précision sur la variable
  - Ne fournit que la variable d'intérêt
- Questions associées
  - Le bruit associé aux données
  - La qualité du calage de la relation

Plan

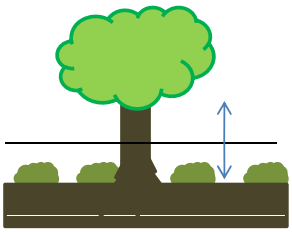
4. L'inversion des modèles de transfert radiatif
   - ➢Les réseaux de neurones
   - ➢L'optimisation
   - ➢Les LUT
   - ➢Incertitudes
   - ➢Apport d'information à priori

5. Comparaison avec des indices de végétation
   - ➢Conception d'indices
   - ➢Relation avec des variables biophysiques

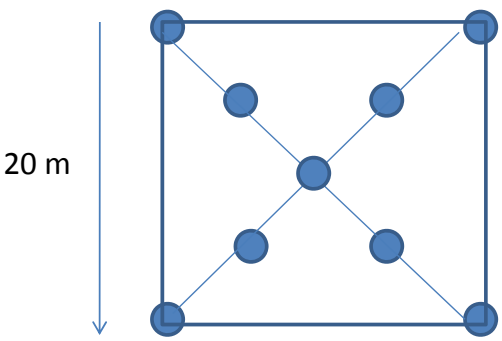
6. La validation terrain
   - ➢Photographies hémisphériques
   - ➢L'instrumentation

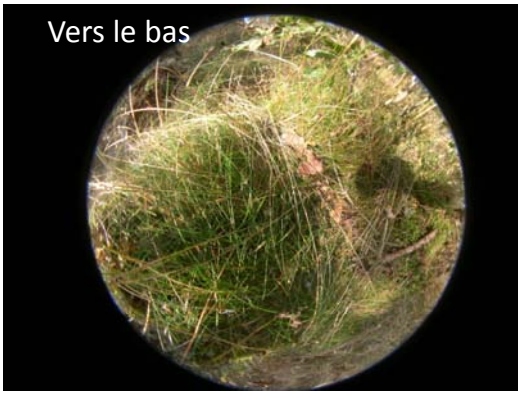
7. Exemples d'application
   - ➢Agriculture de précision
   - ➢Phénologie et suivi
   - ➢Extraction de variables sur les sols avec un capteur hyperspectral
   - ➢Modèle de culture et assimilation

Photographies hémisphériques



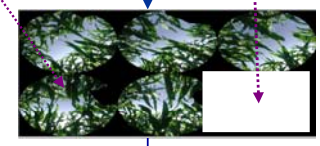
Exemple d'échantillonage



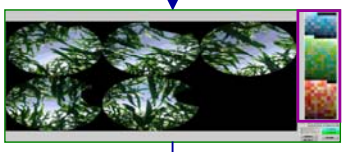


Définition des paramètres 1
- taille de l'image
- paramètres calibration fish-eye
- cercle d'intérêt
- résolution angulaire

Pré-Traitement 2
- Amélioration visuelle Masquage (utilisateur)
- Définition du cercle d'intérêt
- Élimination d'images

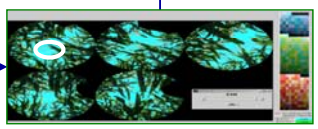


Réduction de la palette de couleurs 3
- k-moyenne
- Définition des classes (nombre et type de classif)

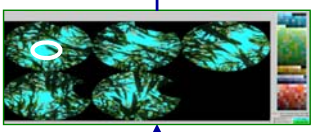


Palette de couleurs réduite

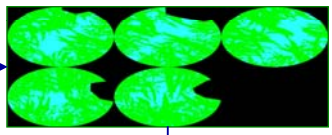
Seuillage 4
- Première Classification grossière



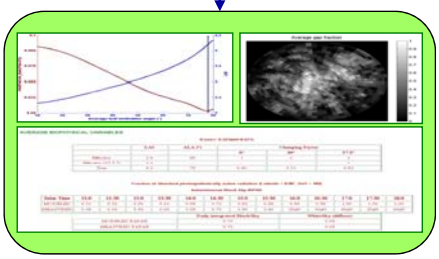
Classification 5
Affinage de la classif



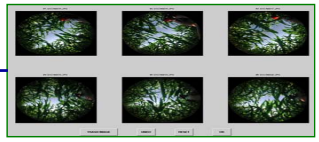
Binarisation 6



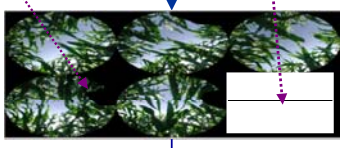
Estimation de variables biophysiques 7
- simulation d'une LUT avec le modèle de Poisson (Nilson, 1971)
- distribution d'inclinaisons foliaires ellipsoïdale (Campbell, 1984)
- Prise en compte de l'agrégation des feuilles
- LAI, fAPAR, fraction de trou



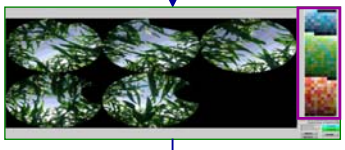
Parameter definition 1
- Image Size
- Calibration parameters
- Circle of interest
- Angular resolution



Pre-Processing 2
- Gamma correction
- Masking
- Image elimination

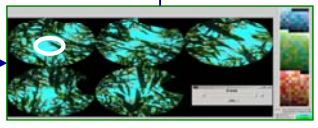


Colour palette reduction 3
- k-means
- class definition

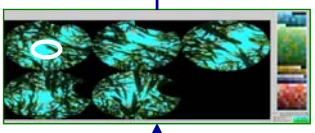


Reduced Colour Palette

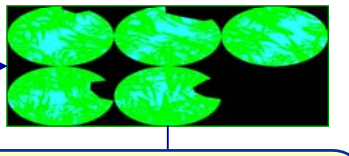
Thresholding 4
- Rough Classification



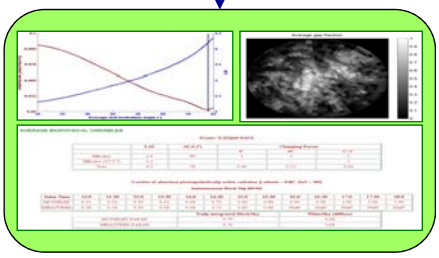
Classification 5
interactive process



Binarisation 6



Output Generation: HTML report + excel file 7
- Look-Up-Table using Poisson Model (Nilson, 1971)
- Ellipsoïdal leaf inclination distribution distribution (Campbell, 1984)
- Leaf Clumping
- LAI, ALA, fAPAR, FCOVER, gap fraction



Introduction

- Need for continuous monitoring of foliage development and senescence from ground for:
  - Phenology modeling
  - satellite products validation and calibration, including phenology products
  - Phenotyping tree species
- If possible accessing GAI
  - ***LAI***: green leaf area (one sided) per unit horizontal ground area
  - ***GAI***: half the developed area of the convex hull wrapping green vegetation elements per unit ground area
  - ***PAI***: half the developed area of the convex hull wrapping vegetation (including non green) elements per unit ground area
- Based on light transmittance measurements
- Need low cost units for better spatial sampling

The sensors

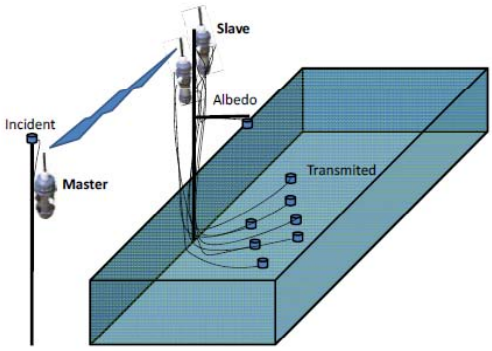
Criterions	Hemispherical PAR sensors	Directional blue photodiode sensors
PAI estimates	Yes	Yes
PAR measurement	Yes	No
Albedo measurements	Yes	No
Sensitivity to illumination conditions	Yes (sun position, diffuse fraction)	No
Sensitivity to leaf clumping (for PAI estimates)	Yes	restricted
Spatial sampling	Larger (±90°)	Restricted (±20°)
Cost	50€	25€

The recording systems

	Wifi network	Independent units
Autonomy	1 month (master)	3 months
Ease for data recording	+++	+
Realibility	+	+++
Installation	+	+++
Synchronization with irradiance meas.	+++	++
Maximum distance with irradiance meas.	400m	1-5 kms
Internet conection	Yes	No
Cost per recording unit	150€ (for 4 sensors)	100€ (for 6 sensors)
Cost for ESU sampling (12 sensors)	1000€	500€

PAR@METER

- Better suited for agriculture



PAI estimation

$$[\tau] = [f] \cdot e^{-K(ALA,h)\cdot PAI} + (1 - [f]) \cdot e^{-K(ALA,[\theta])\cdot PAI}$$

- Transmittance PARt/PARi
- Hemispherical extinction coefficient
- Diffuse fraction
- Directionnal extinction coefficient

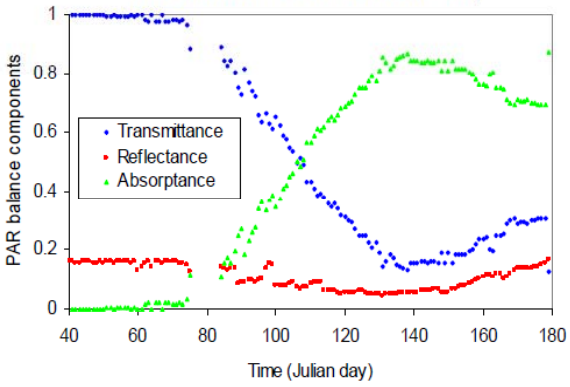
Adjusting ALA and PAI over a temporal window of few days

$$J = \sum_{1}^{n} \omega \cdot (\tau - \hat{\tau})^{2} + J_{prior}$$

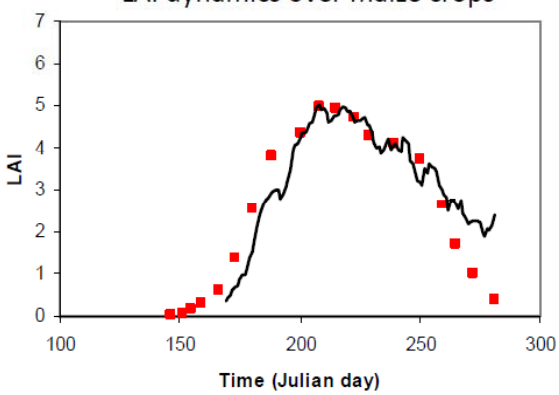
The Poisson model is currently used under randomly distributed vegetation elements
The radiative transfer model may be refined for specific vegetation types

Additional results

PAR balance over Wheat crop

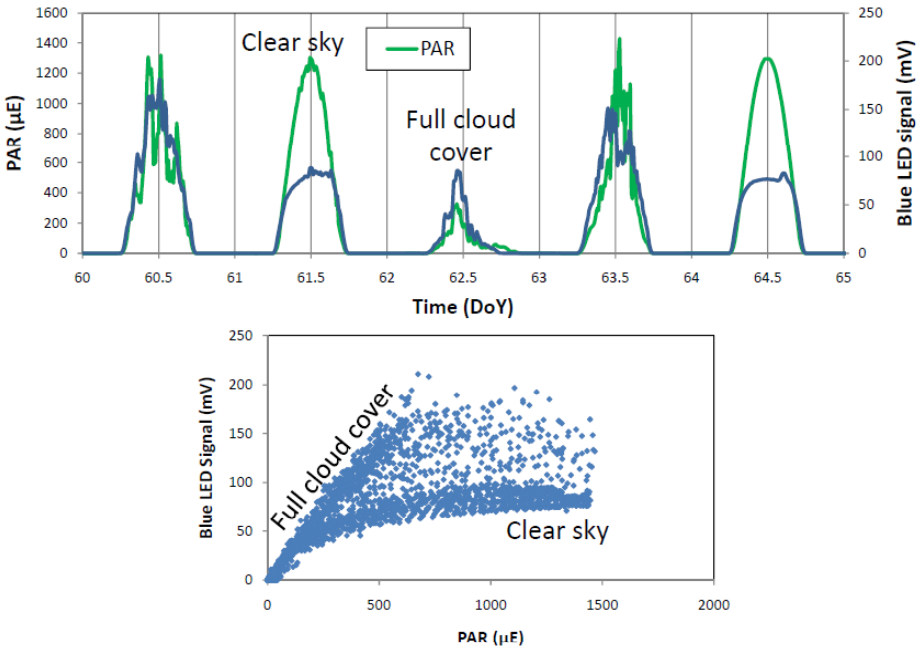


LAI dynamics over maize crops



PASTiS57

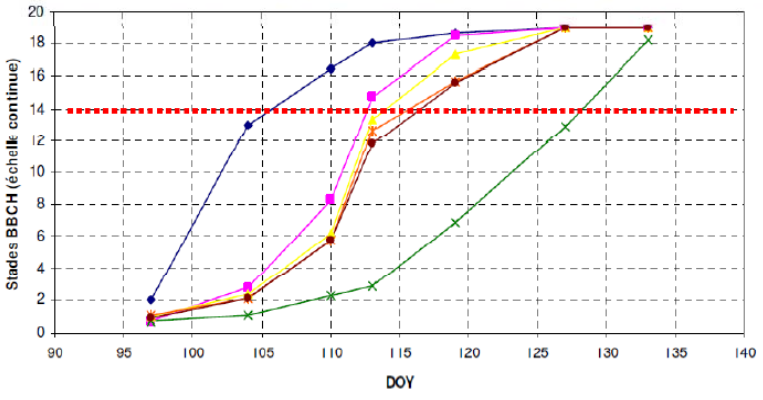
Comparison with PAR sensors



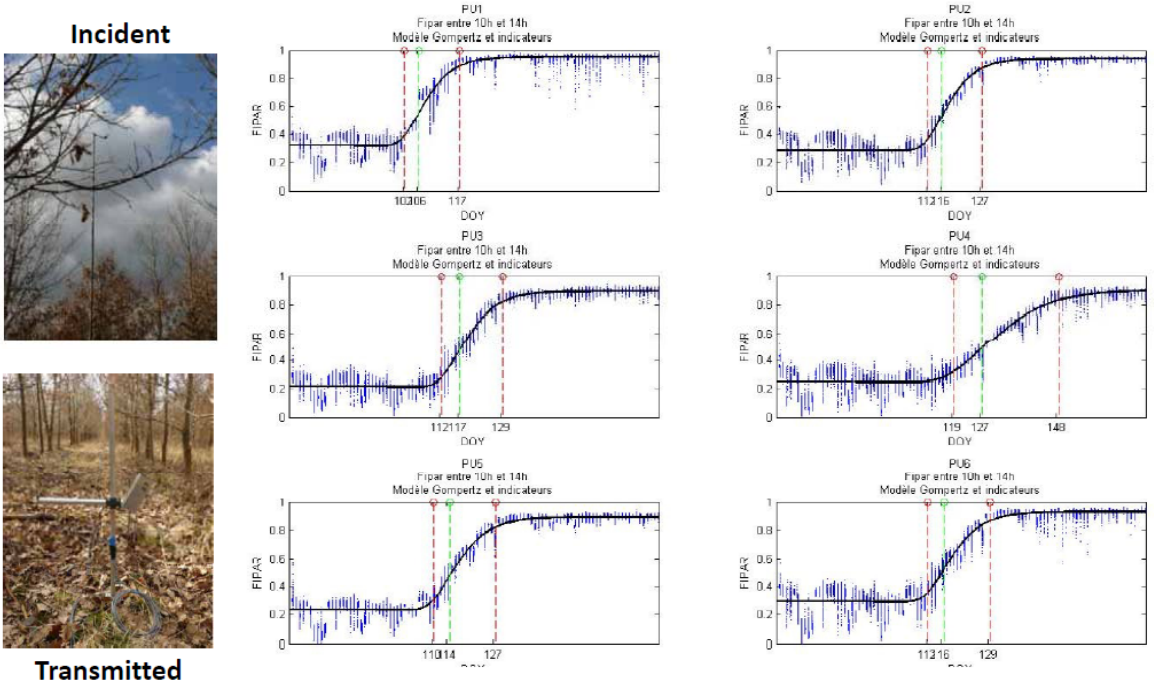
Why 57° towards North in the blue?

- Why blue spectral domain?
  - Better contrast between vegetation (almost black) and sky (rayleigh and aerosol scattering)
  - Limits multiple scattering in the canopy
- Interest of 57°
  - Minimization of leaf angle distribution effect
  - Minimization of plant clumping effect
  - Compromise between sensitivity (short path length) and spatial sampling (longer path length)
- Why North orientation?
  - Avoids direct sun light
  - Reverse to South in the southern hemisphere!

Some results on phenology: direct ground observations



Typical dynamics measured by the sensors



Prototype sensors (PAR domain, 40° zenith angle)

Plan

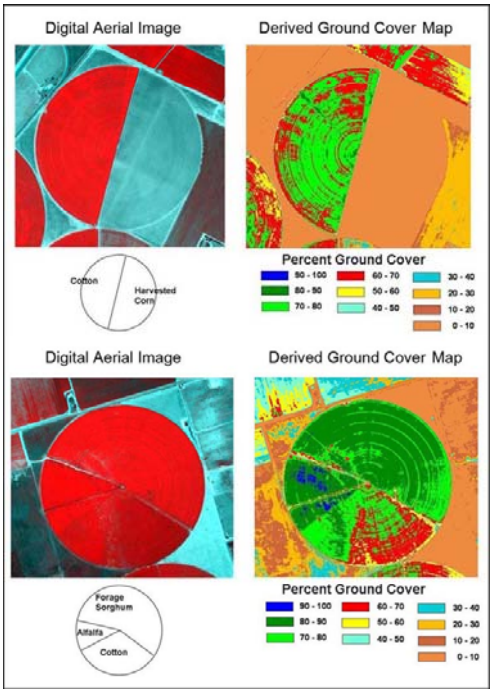
4. L'inversion des modèles de transfert radiatif
   - Les réseaux de neurones
   - L'optimisation
   - Les LUT
   - Incertitudes
   - Apport d'information à priori

5. Comparaison avec des indices de végétation
   - Conception d'indices
   - Relation avec des variables biophysiques

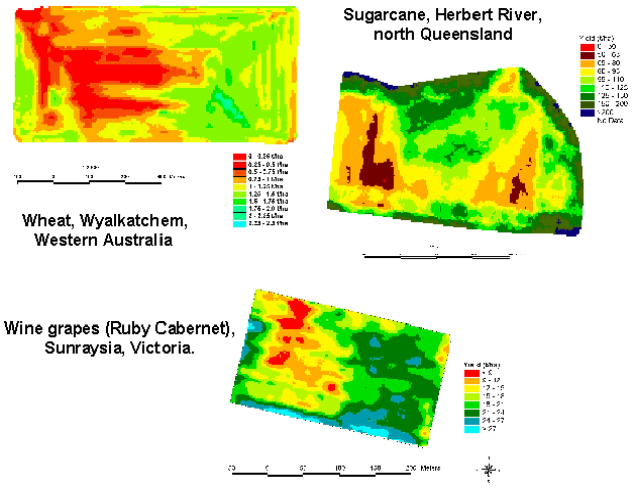
6. La validation terrain
   - Photographies hémisphériques
   - L'instrumentation

7. Exemples d'application
   - Agriculture de précision
   - Phénologie et suivi
   - Extraction de variables sur les sols avec un capteur hyperspectral
   - Modèle de culture et assimilation

Agriculture de précision



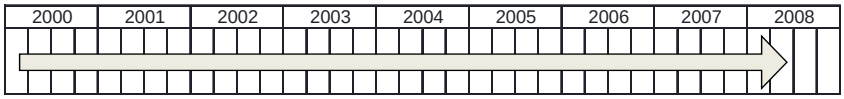
◈ Analyse de l'état de surface (détection de carences, maladies,…)



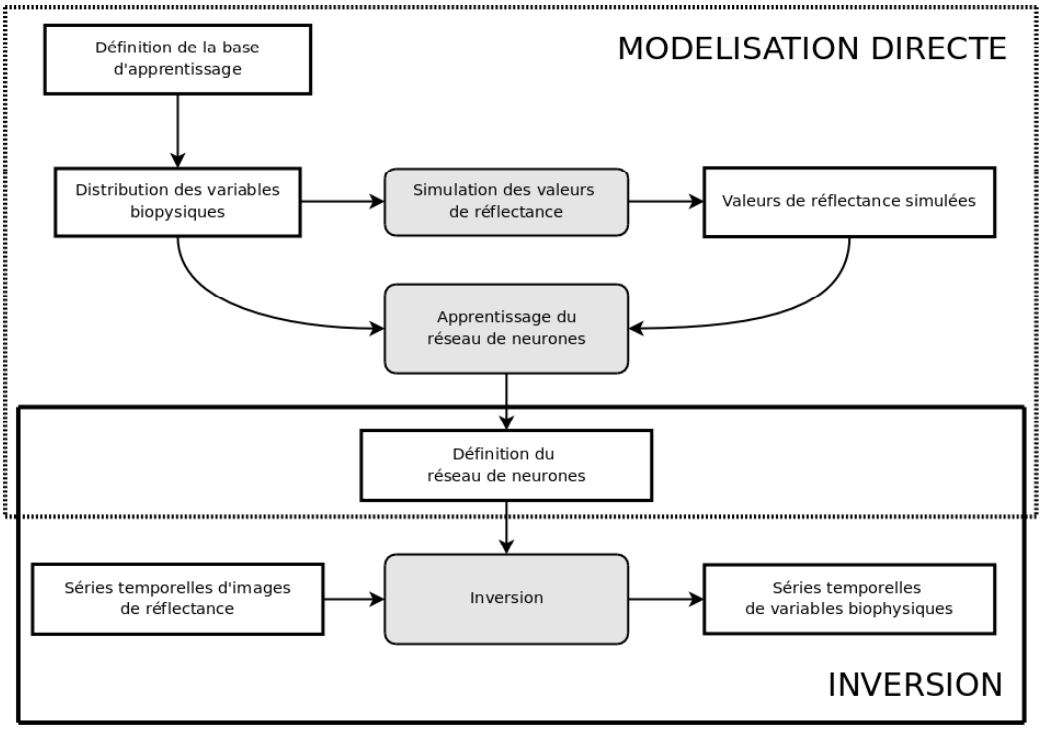
- Prédiction de rendements

Estimation de variables biophysiques avec MODIS

Fonctions robustes **Réseaux de Kohonen**



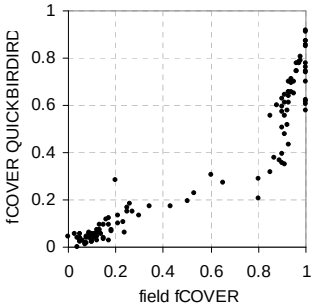
Estimation de variables biophysiques avec MODIS



Validation de variables biophysiques MODIS

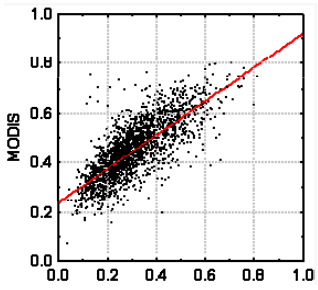
Résultats de l'application du modèle de transfert radiatif PROSPECT/SAIL

Terrain/QUICKBIRD



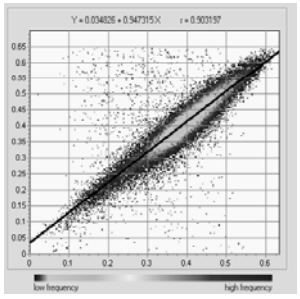
QUICKBIRD/MODIS

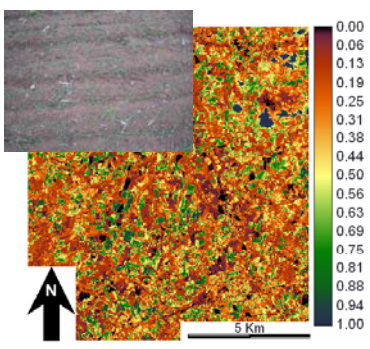
r=0.76

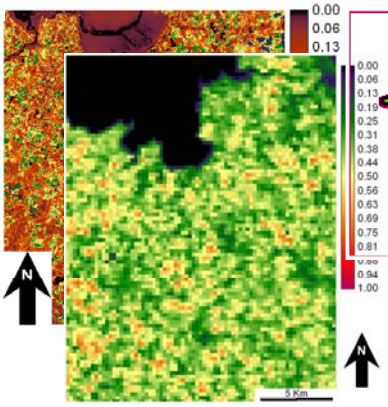


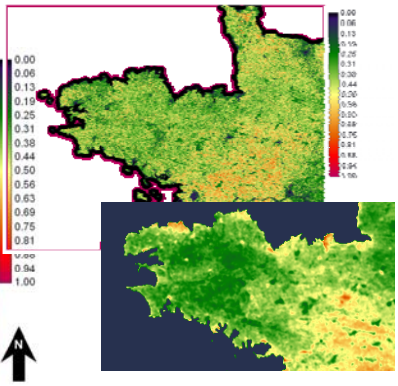
MODIS/CYCLOPES

r=0.9



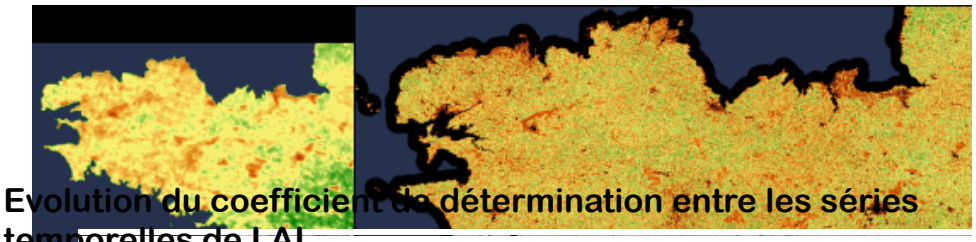




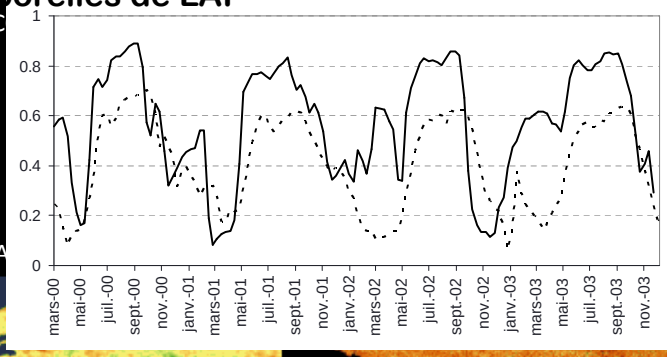


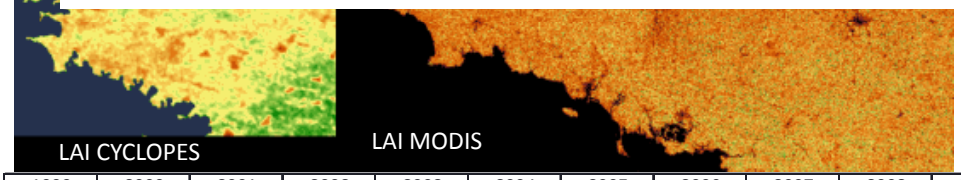
Validation de variables biophysiques MODIS

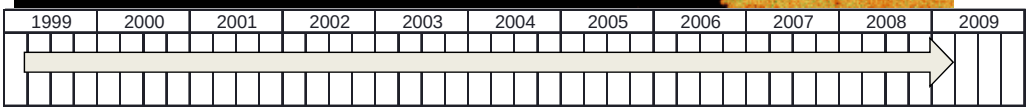
Résultats de l'application du modèle de transfert radiatif PROSPECT/SAIL



Evolution du coefficient de détermination entre les séries temporelles de LAI

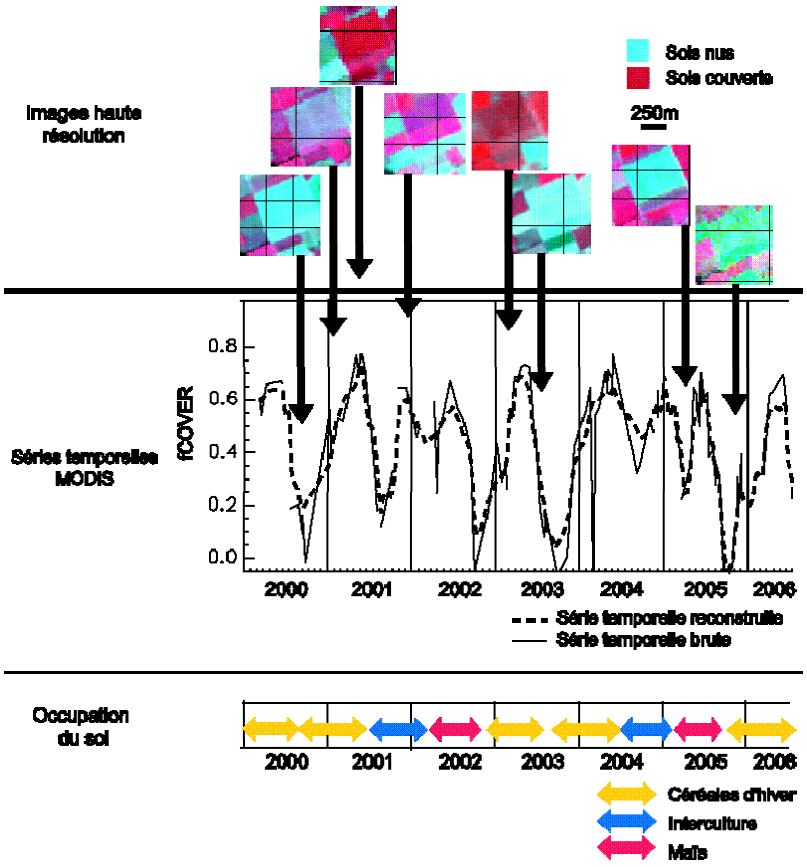




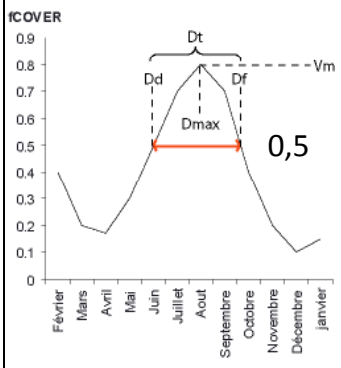
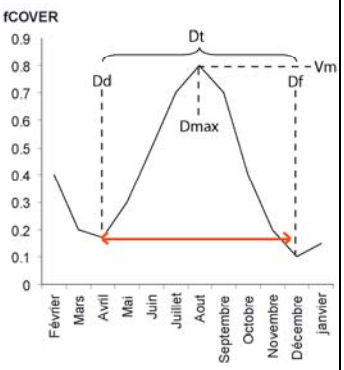
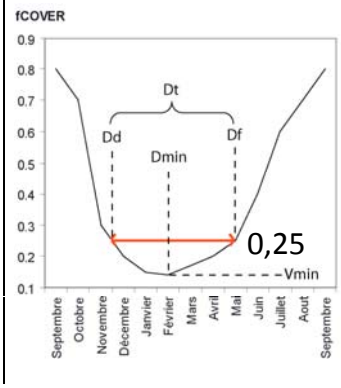
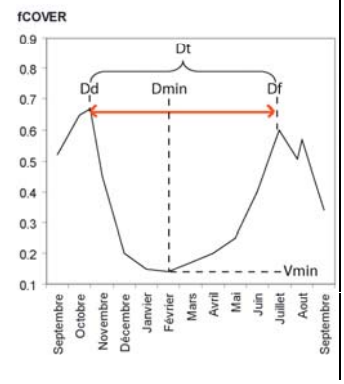


Validation de variables biophysiques

Résultats de l'application du modèle de transfert radiatif PROSPECT/SAIL



Application de métriques temporelles

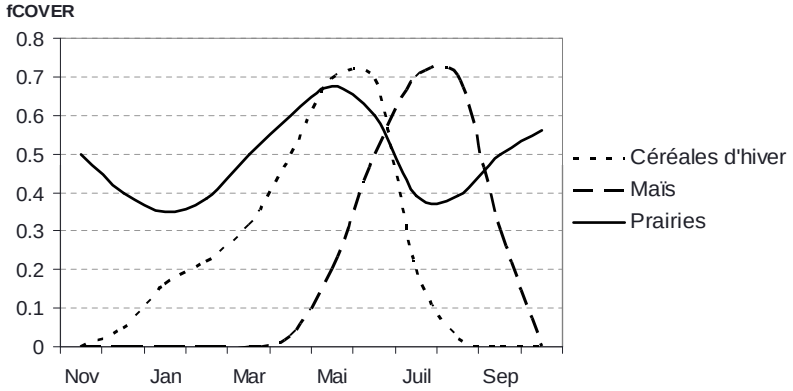
	Seuil fixe	Identification de pics	
Phénologie			**Dd** : Date à laquelle la végétation commence sa croissance **Df** : Date à laquelle la végétation termine sa croissance **Vm** : Fraction maximum de couverture des sols **Dmax** : Date de la fraction maximum de couverture des sols **Dt** : Durée de couverture des sols
Sols nus			**Dd** : Date à laquelle la couverture végétale diminue **Df** : Date à laquelle les sols sont couverts **Vmin** : Fraction minimum de couverture des sols **Dmin** : Date de la fraction minimum de couverture des sols **Dt** : Période entre deux pics de couverture des sols

Application de classifications

- par arbre décisionnel
- fondée sur la connaissance théorique de la phénologie des cultures

	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
Blé d'hiver	Semis								Récolte			
Triticale	Semis								Récolte			
Blé de printemps				Semis					Récolte			
Maïs						Semis					Récolte	

La phénologie des principaux types de couverts végétaux



Application de classifications

Définition de l'arbre décisionnel

1

Définition des classes d'occupation et d'utilisation du sol hors terres arables année par année

2

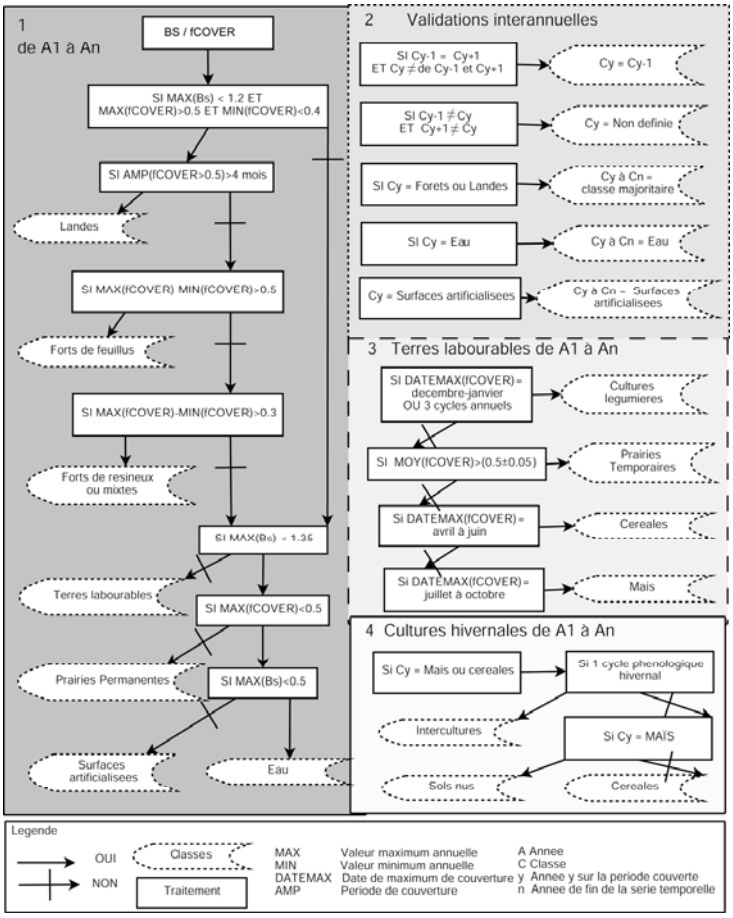
Validation interannuelle des classifications en fonction des changements détectés

3

Identification de l'occupation du sol des terres labourables

4

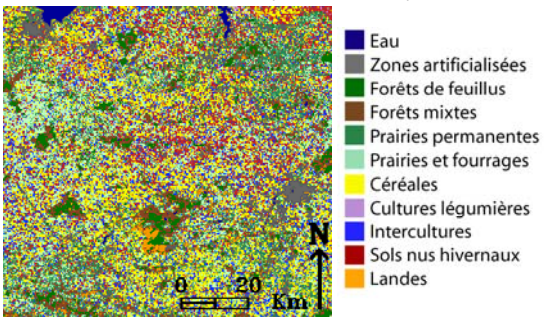
Identification des cultures hivernales



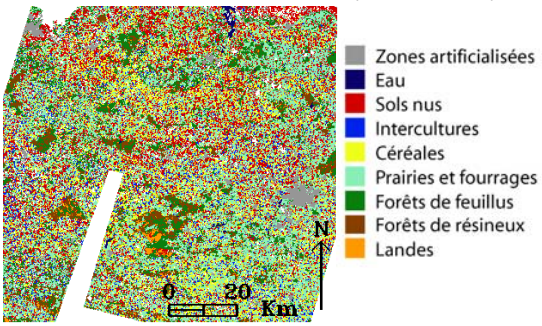
Validation de classifications

Validation des classifications à l'échelle locale

Classification MODIS (2000/2001)



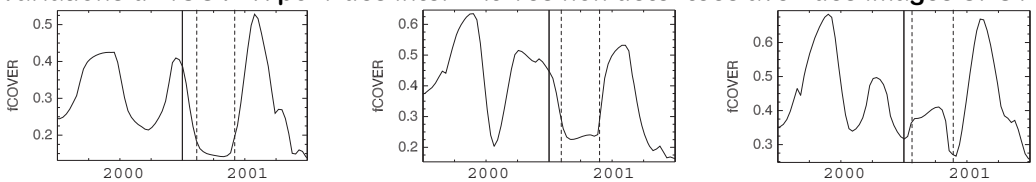
Classification SPOT/LANDSAT(2000/2001)



Classification haute résolution

Séries temporelles MODIS	Eau	Urbain	Forêts	Prairies	Céréales	Sols nus	Intercultures
Eau	**98.04**	0.97	0.06	0	0	0	0
Urbain	1.47	**97.22**	0.67	0.35	1.57	3.17	0.29
Forêts	0.49	0.35	**91.21**	0.81	0.07	0.96	0.14
Prairies	0	0.35	6.04	**89.69**	7.11	6.39	16.09
Céréales	0	0.21	1.02	5.83	**85.38**	4.92	5.36
Sols nus	0	0.9	0.83	0.87	0.46	**71.08**	9.42
Intercultures	0	0	0.17	2.45	5.41	13.48	**68.7**

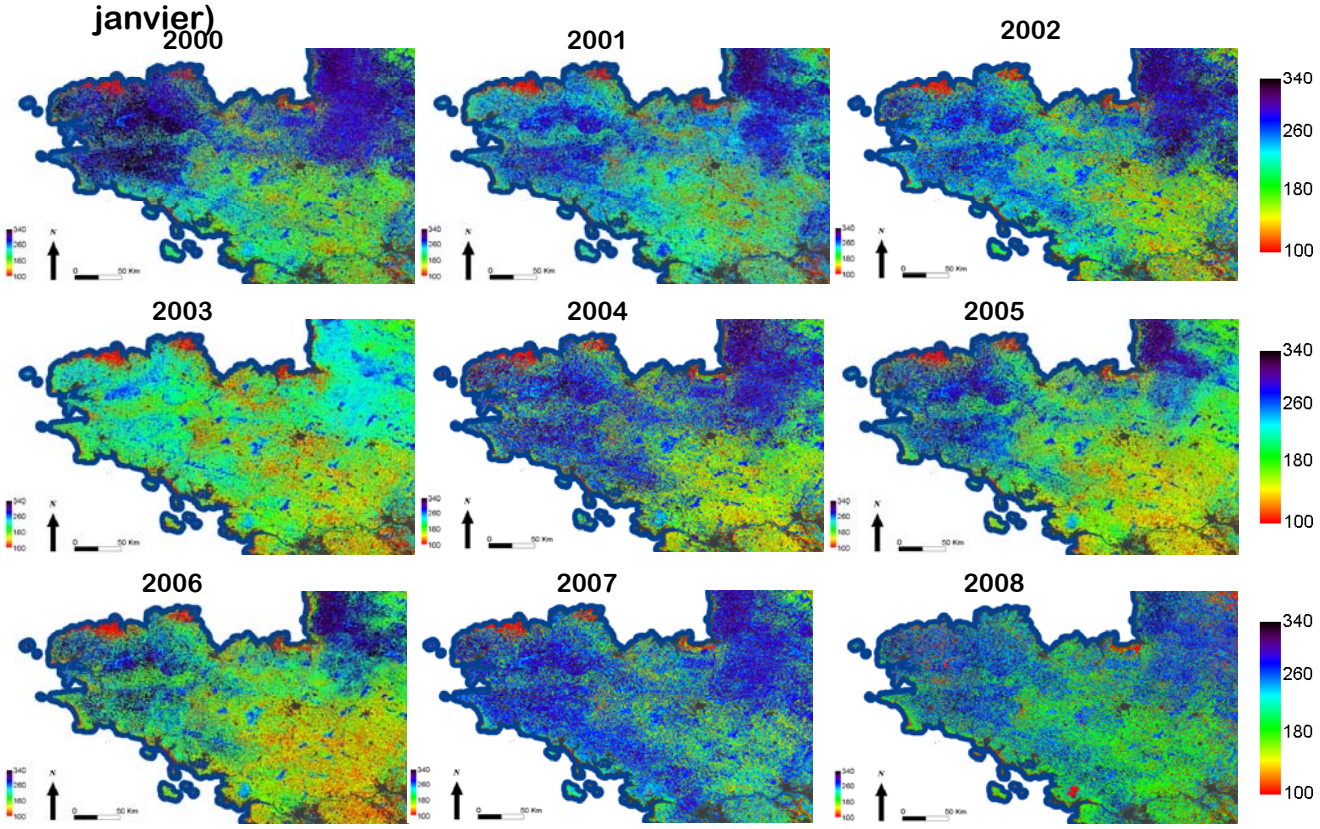
Variations du fCOVER pour des intercultures non détectées avec des images SPOT



Analyse de changements à partir de variables biophysiques

Les changements intra-annuels

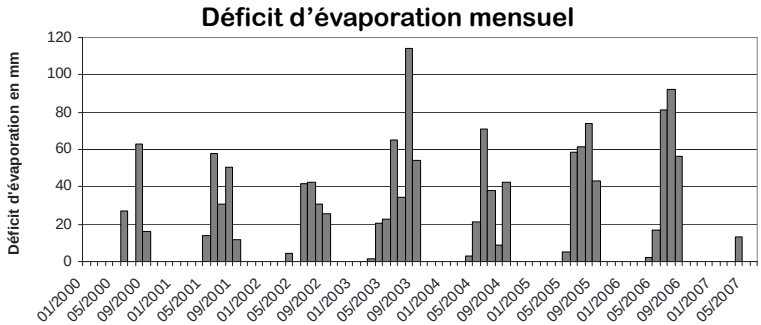
Date de fin de croissance de la végétation (en jours depuis le 1er janvier)

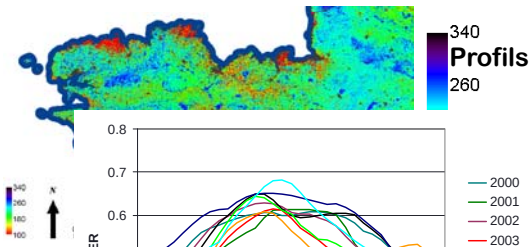


Analyse de changements à partir de variables biophysiques

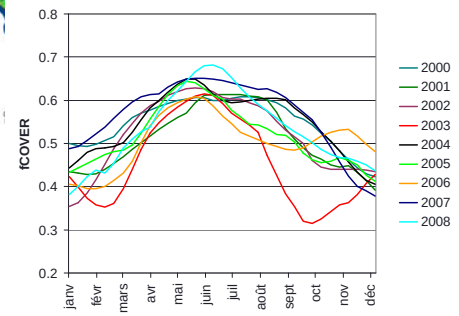
Les changements intra-annuels

Le cas de l'été 2003



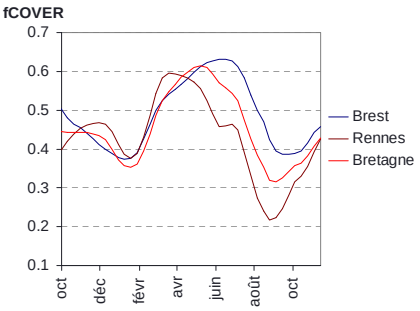


Profils de fCOVER des prairies



Profils annuels sur l'ensemble de la Bretagne

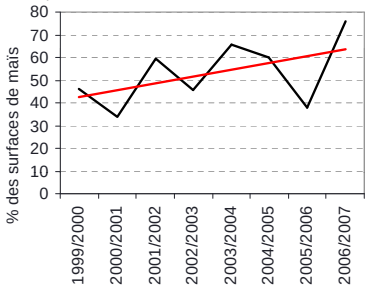
Profils annuels de l'année 2003 pour les 9 stations de référence bretonnes



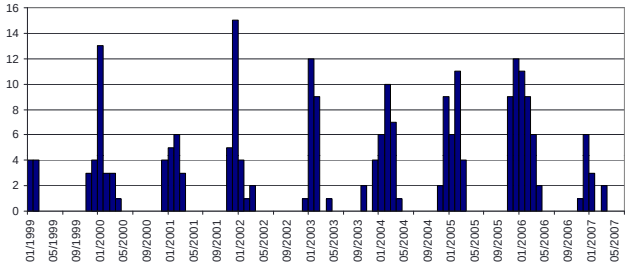
Analyse de changements à partir de variables biophysiques

Le cas de l'hiver 2005/2006

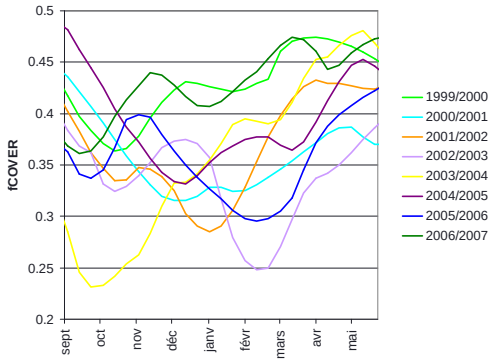
Proportion d'intercultures



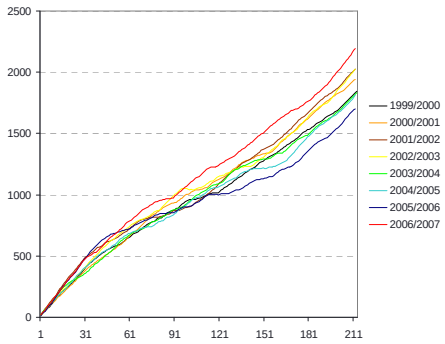
Nombre de jours de gel



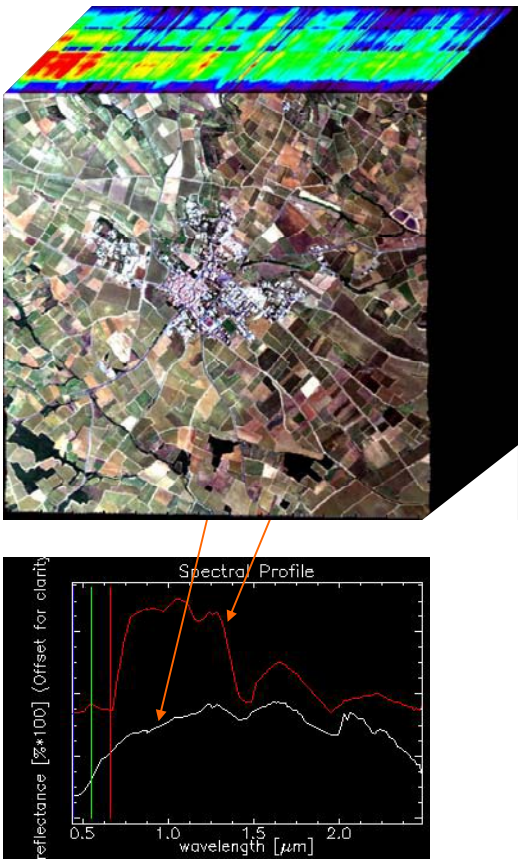
Taux de couverture des intercultures



Cumul degré/jour de novembre à avril



Utilisation d'HYMAP pour l'estimation de paramètres relatifs au sol



HyMap Image

Corrections géométriques, atmosphérique, topographique faites par le Centre Aérospatiale Allemand (PARGE et ATCOR4)

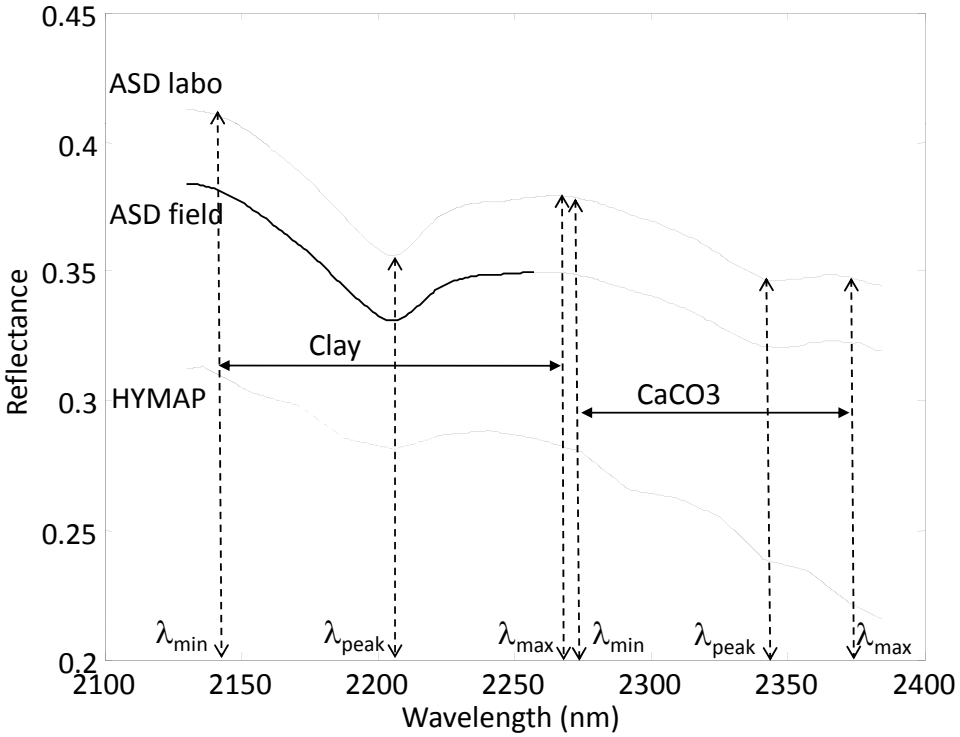
Réflectance

Largeur de bande de 13 a 17 nm

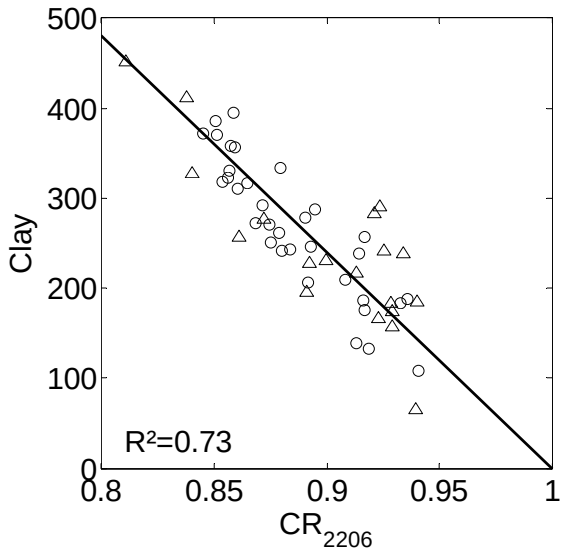
Taille nominale du pixel: 5mx5m

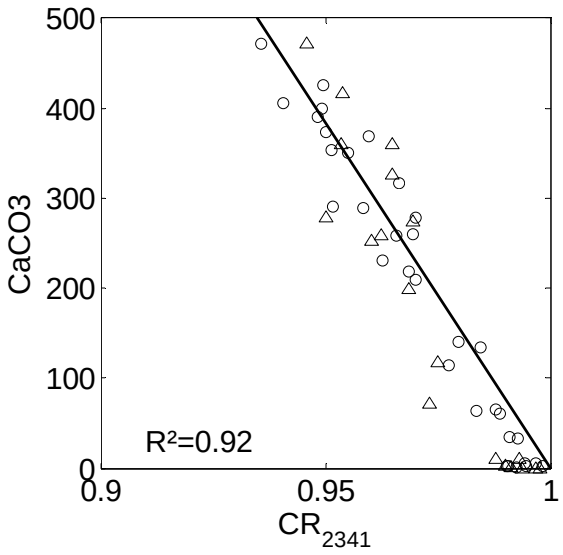
Utilisation du 'continuum removal'

$$CR_\lambda = \min\left(1, R(\lambda_{peak}) / \left(R(\lambda_{max}) + \frac{\lambda_{min} - \lambda_{peak}}{\lambda_{min} - \lambda_{max}}\left(R(\lambda_{min}) - R(\lambda_{max})\right)\right)\right)$$

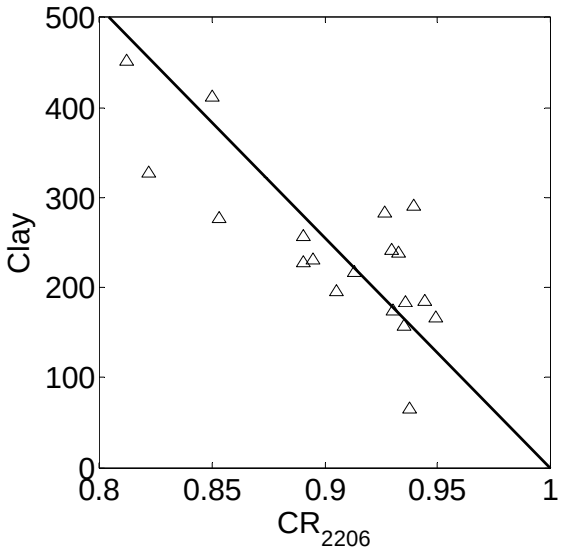


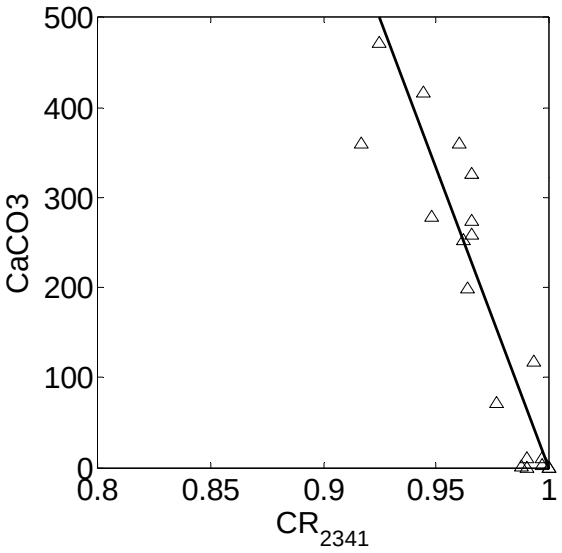
Relation au niveau du Labo



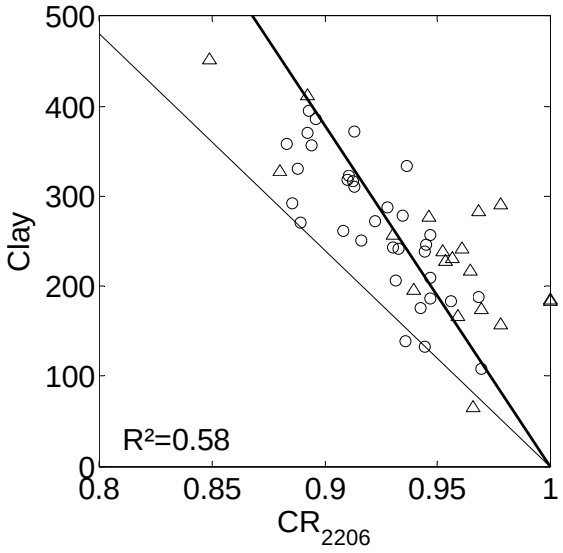


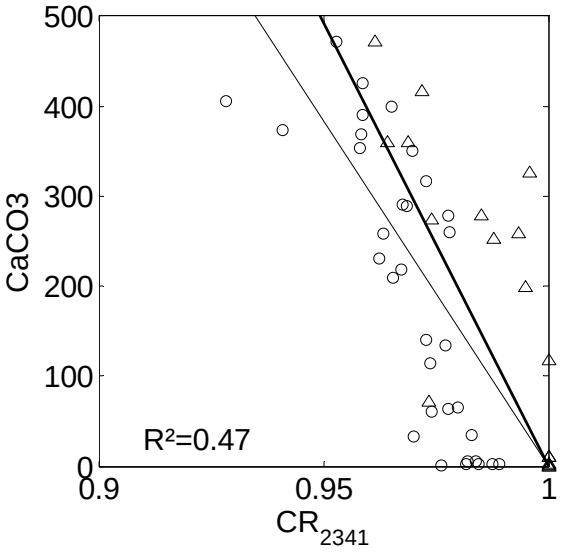
Relation au niveau du champ



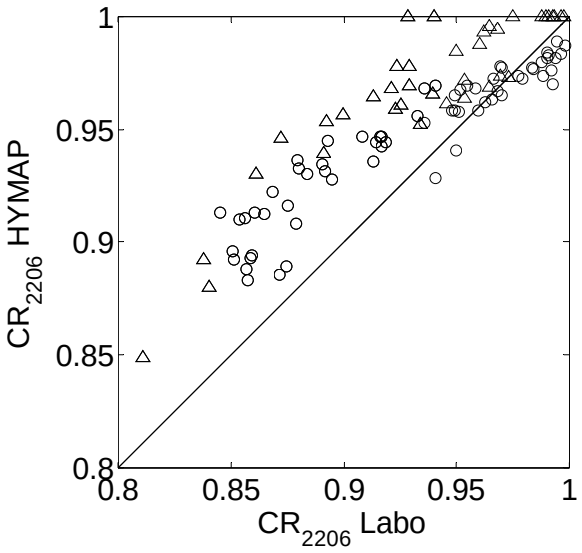


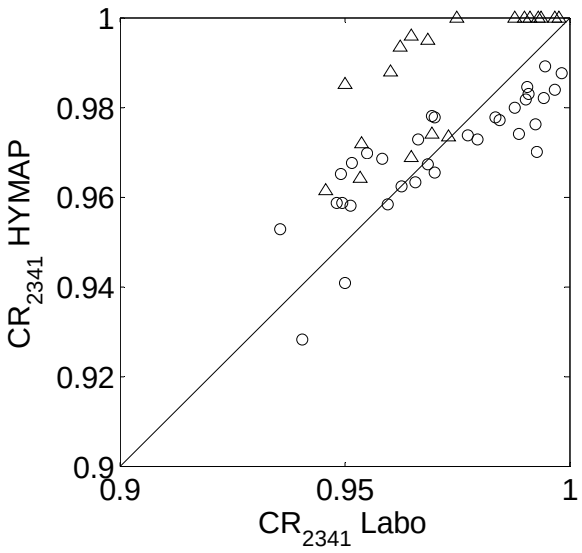
Relation au niveau HYMAP



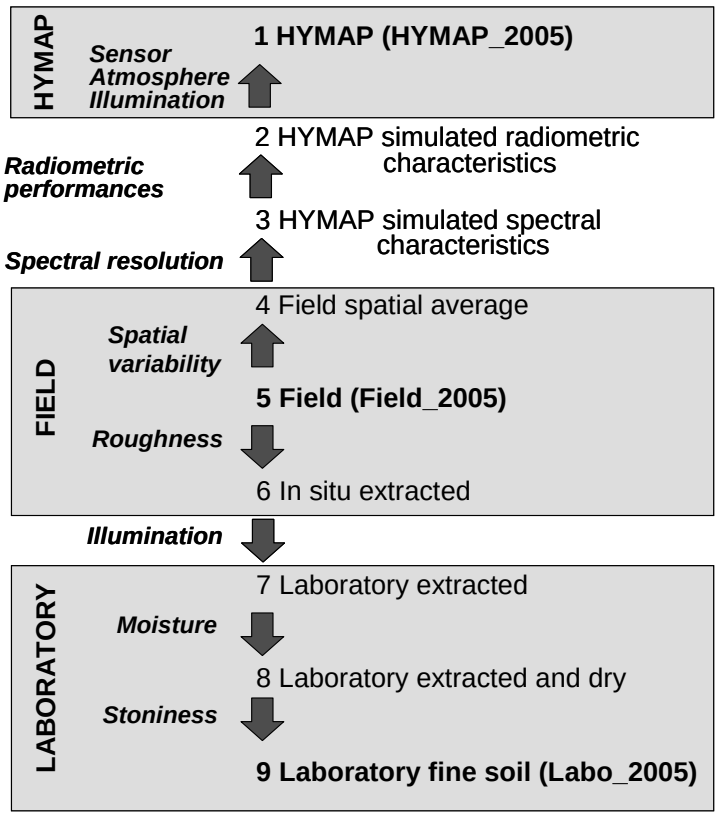


Sans doute problèmes d'étalonnage ou de correction atmosphérique du capteur HYMAP

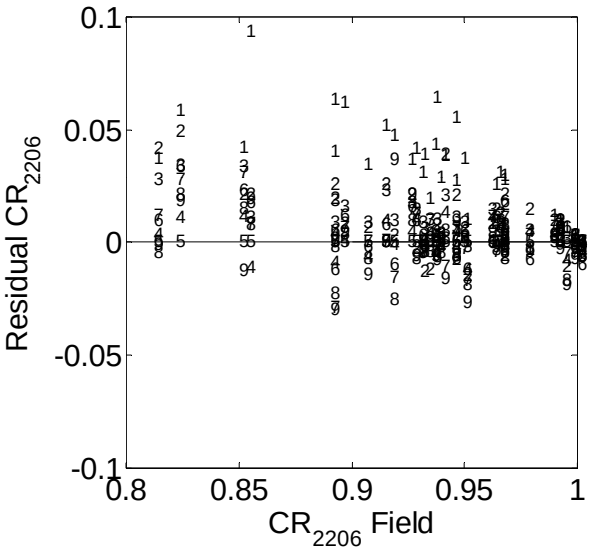


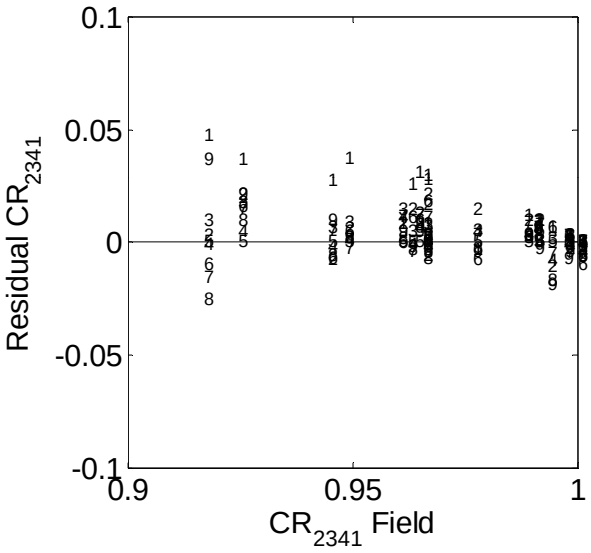


Effets associés aux changements d'échelle

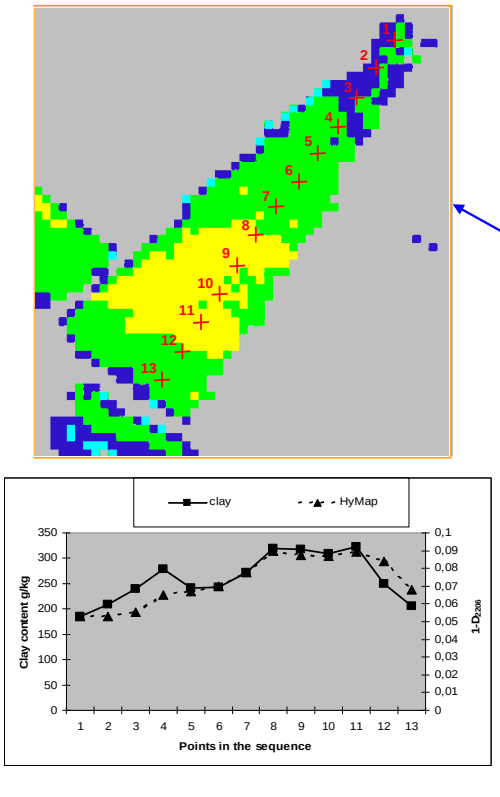


Effets associés aux changements d'échelle





Validation sur une parcelle

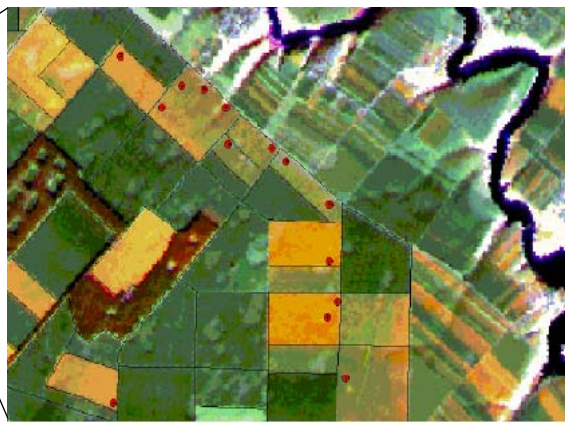


La dimension temporelle

- La végétation évolue (aspect dynamique)
- L'évolution du couvert renseigne sur son fonctionnement (et son type):
  - Type de végétation
  - Phénologie
  - croissance
  - Stress (variation de croissance)
- Exploitation de la dimension temporelle
  - pour améliorer les estimations des variables d'état du couvert en utilisant des contraintes temporelles
  - Pour améliorer la modélisation du fonctionnement du couvert

Exploitation de la dimension temporelle pour améliorer l'estimation des variables d'état du couvert

Cultures de blé

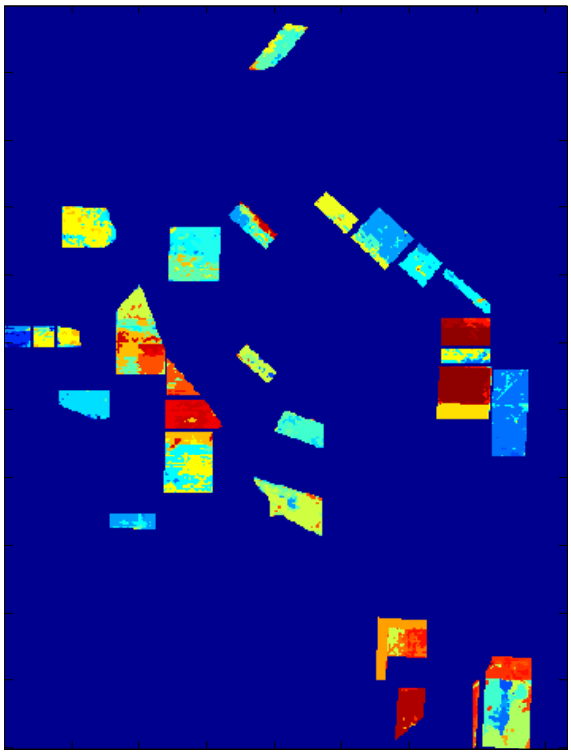


42 unités d'échantillonnage 30x30 m²

- Mesures sur le couvert: LAI, chlorophylle, azote, biomasse, rendement,
- Mesures du sol : texture, chimie, rugosité, humidité, …
- Atmosphère (CIMEL) et mesures météorologiques
- 39 images SPOT
- 15 images Radar (ERS, Radarsat)

http://medias.obs-mip.fr/adam

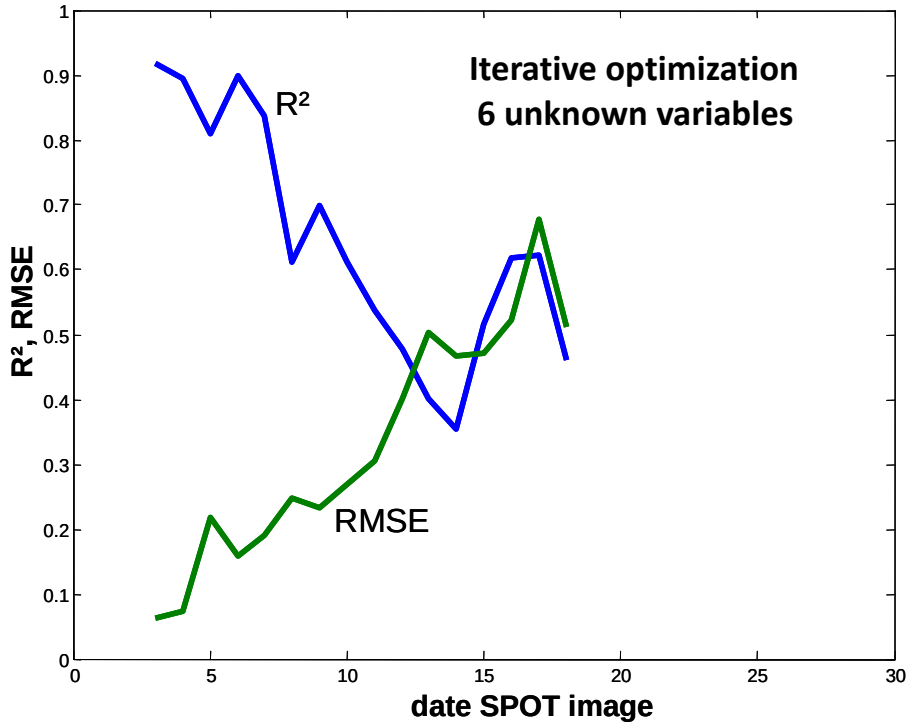
Classification pour réduire la dimension les champs spatio-temporels



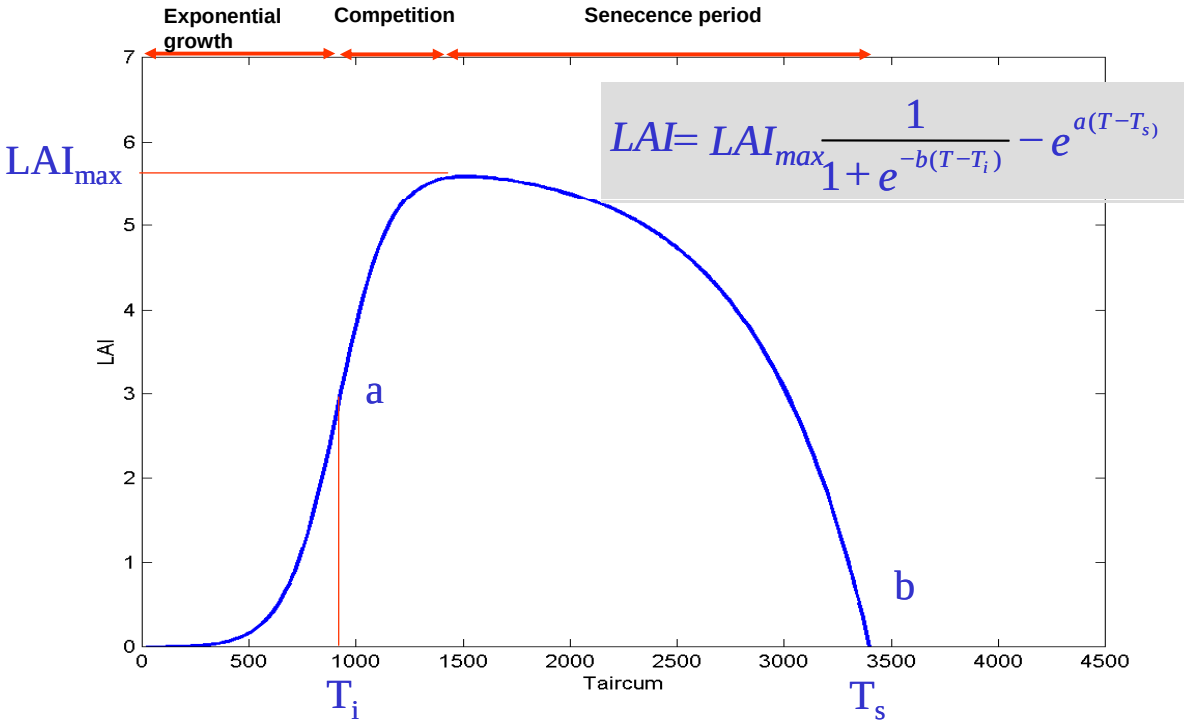
Classification automatique à
30 classes
à partir de 33 images SPOT

Estimation instantanée du LAI

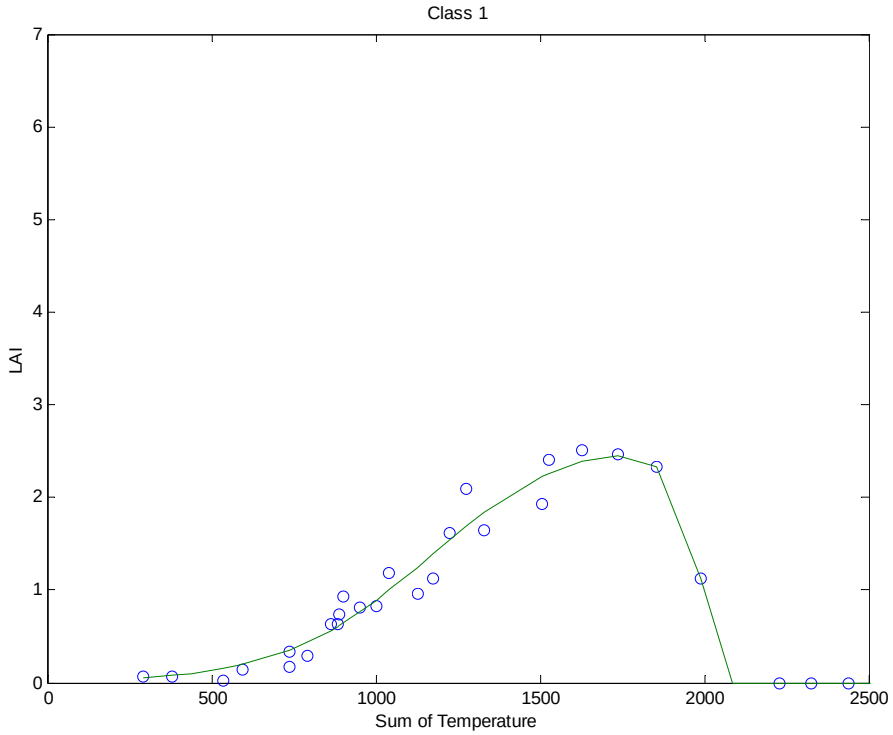
Estimates of LAI from SPOT Top of Canopy reflectance
(inversion de modèle physique de transfert radiatif)



Modélisation simple de la dynamique du LAI



Ajustement du modèle de LAI pour chaque classe

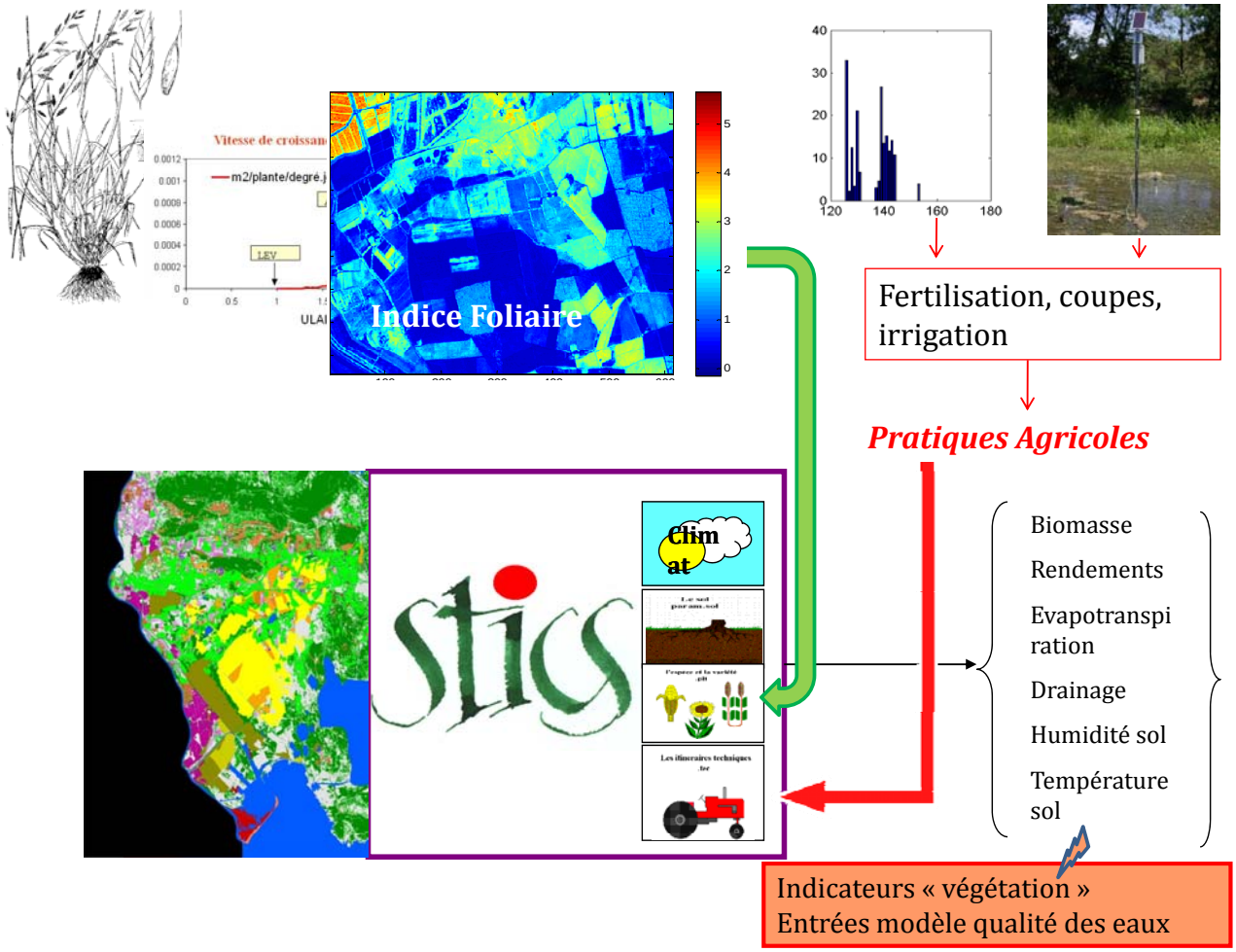


Couplage avec un modèle de culture

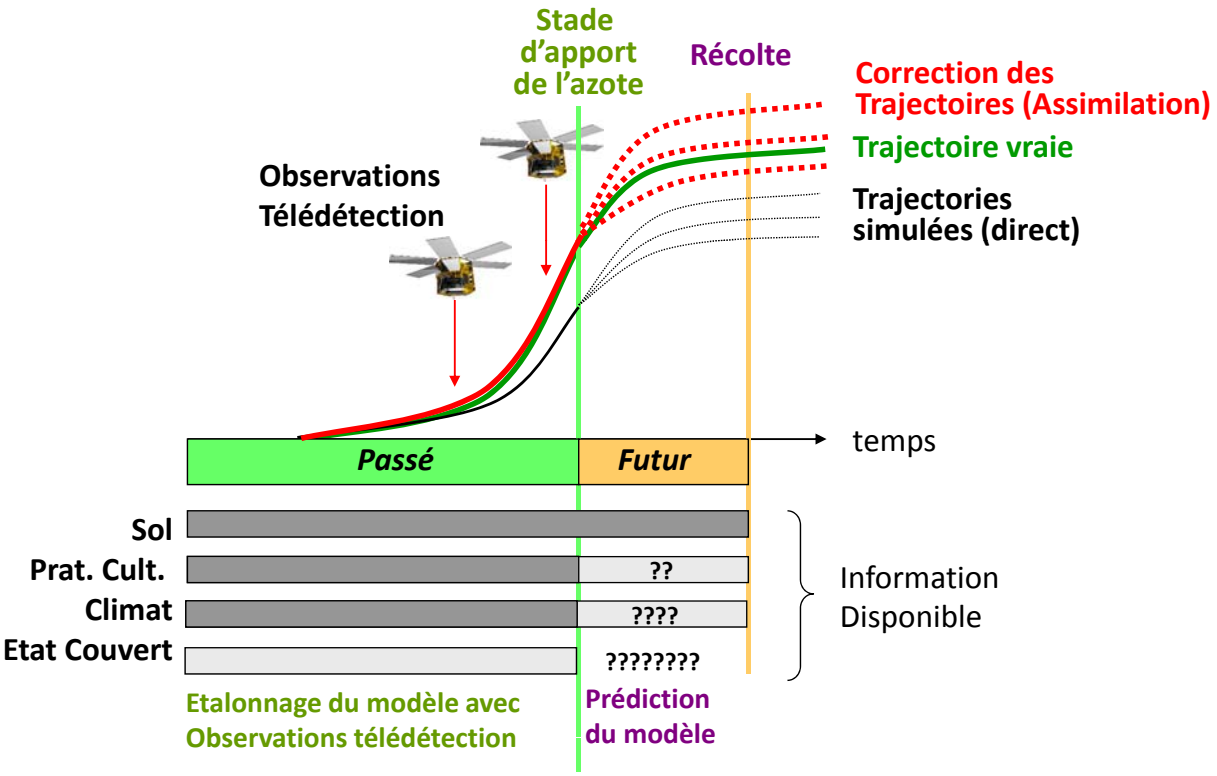
Nécessité de coupler

- un modèle de fonctionnement d'un couvert végétal
  - Décrit l'évolution temporelle de la végétation (LAI, composition des feuilles, humidité du sol) en fonction d'un climat, d'un itinéraire technique, du type de plante

- Et un modèle de transfert radiatif
  - Décrit la réflectance à partir du LAI, de la composition des feuilles, etc….



Un petit mot sur l'assimilation de données



Un petit mot sur l'assimilation de données

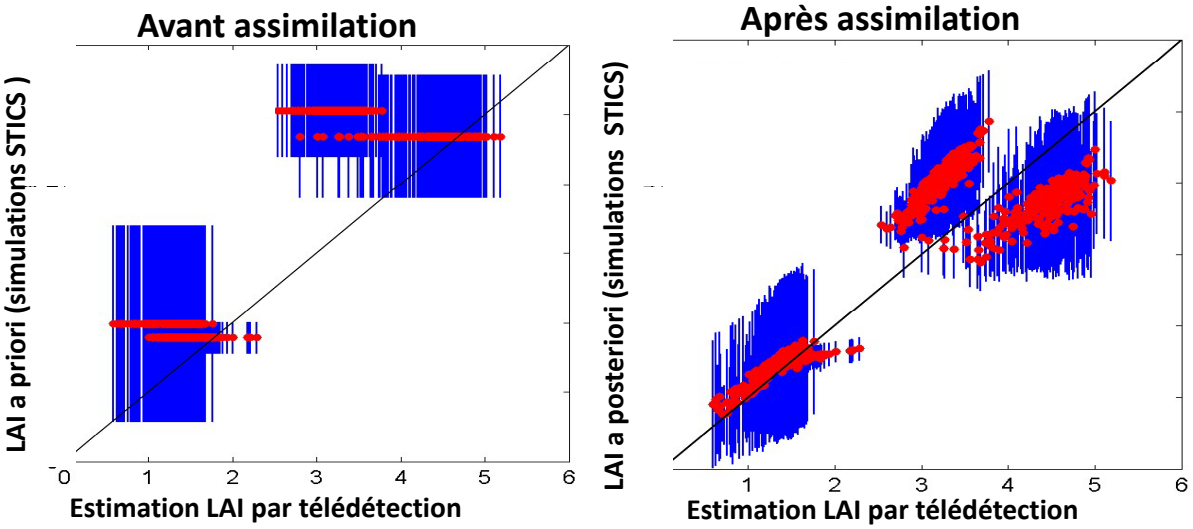
- Ré-étalonnage du modèle de culture à partir des estimations de variables d'état (LAI, Cab)

  Assimilation des observations

- Prise de décision based basée sur des simulations de différentes doses d'apport d'azote sous des scénarios climatiques variables:

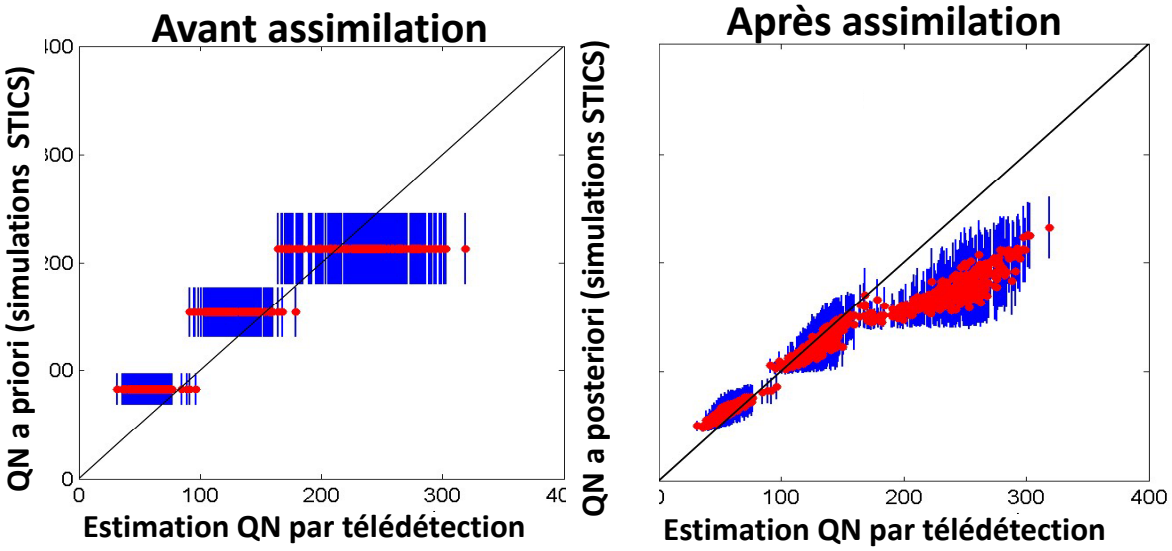
  Optimisation de la dose d'azote

Un petit mot sur l'assimilation de données



- Reduction des biais
- Description de la variabilité intra-parcelle

Un petit mot sur l'assimilation de données



- Reduction des biais
- Description de la variabilité intra-parcelle

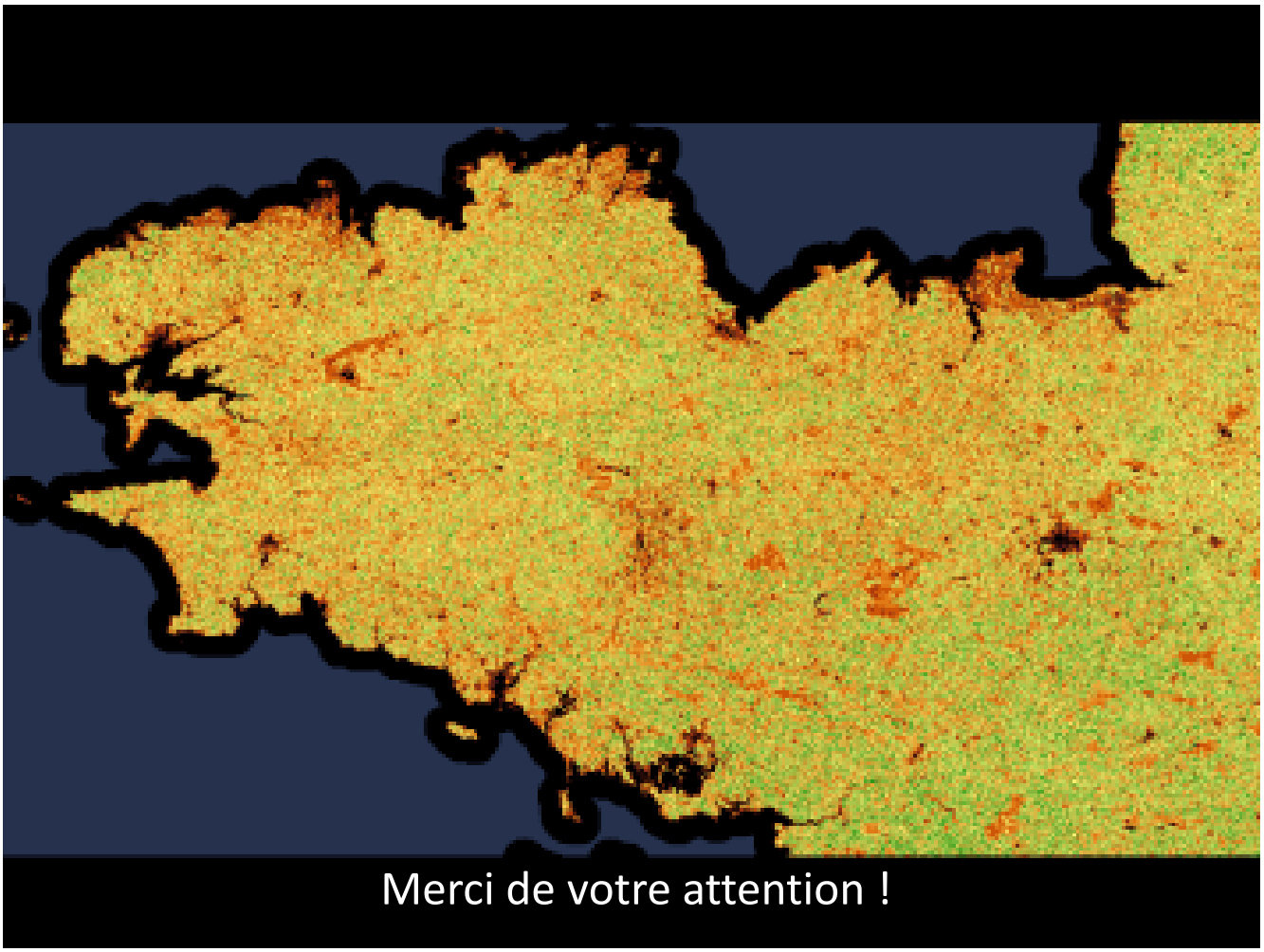
Un petit mot sur l'assimilation de données

- Une approche générale est proposée

- Son succès dépend de:
  - Disponibilité et précision des observations de télédétection …
  - Précision et robustesse des modèles
    - modèles de réflectance
    - Modèles de fonctionnement des cultures
  - Disponibilité et qualité des informations a priori (sol, parameters des cultures),

Conclusion

- La télédétection présente l'avantage de fournir des données spatialisées et avec une forte répétitivité pour observer les variables biophysiques d'intérêt
- Les modèles de transfert radiatif des surfaces et l'inversion permettent d'estimer des variables biophysiques d'importance
- Toutes les variables biophysiques ne peuvent être estimées
- L'inversion d'un modèle de transfert radiatif est une tache coûteuse et approximative
- De meilleurs résultats sont obtenus soit :
  - en utilisant une information a priori
  - en utilisant la télédétection en complément d'un modèle de culture
  - en travaillant par classe de végétation


Merci de votre attention !