



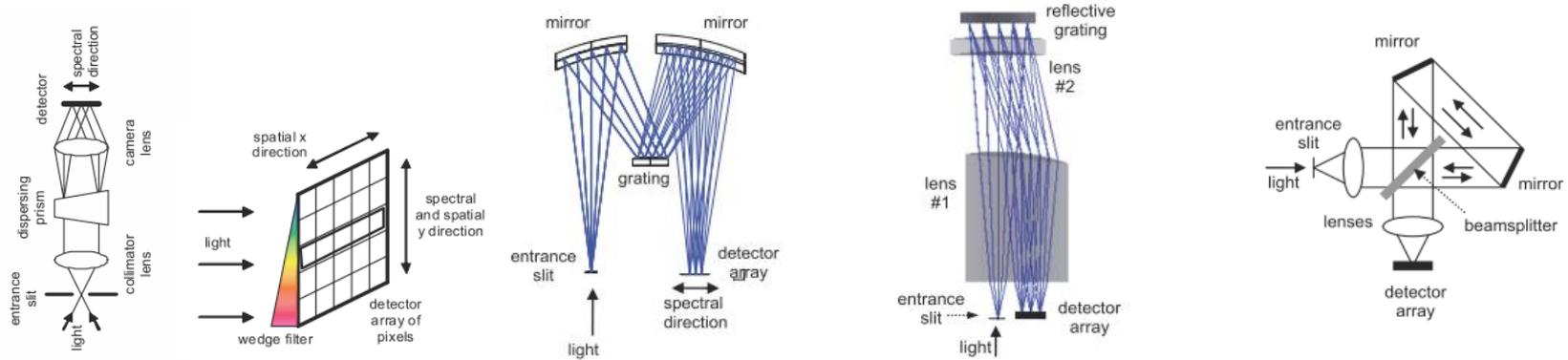
Prétraitements : étalonnage, correction du bruit, ..., compensation des effets atmosphériques

X. Briottet, V. Carrère
Xavier.Briottet@onera.fr

Plan du cours

- Introduction sur les principales techniques d'acquisition
- Défauts instrumentaux
- Corrections radiométriques
- Correction atmosphérique

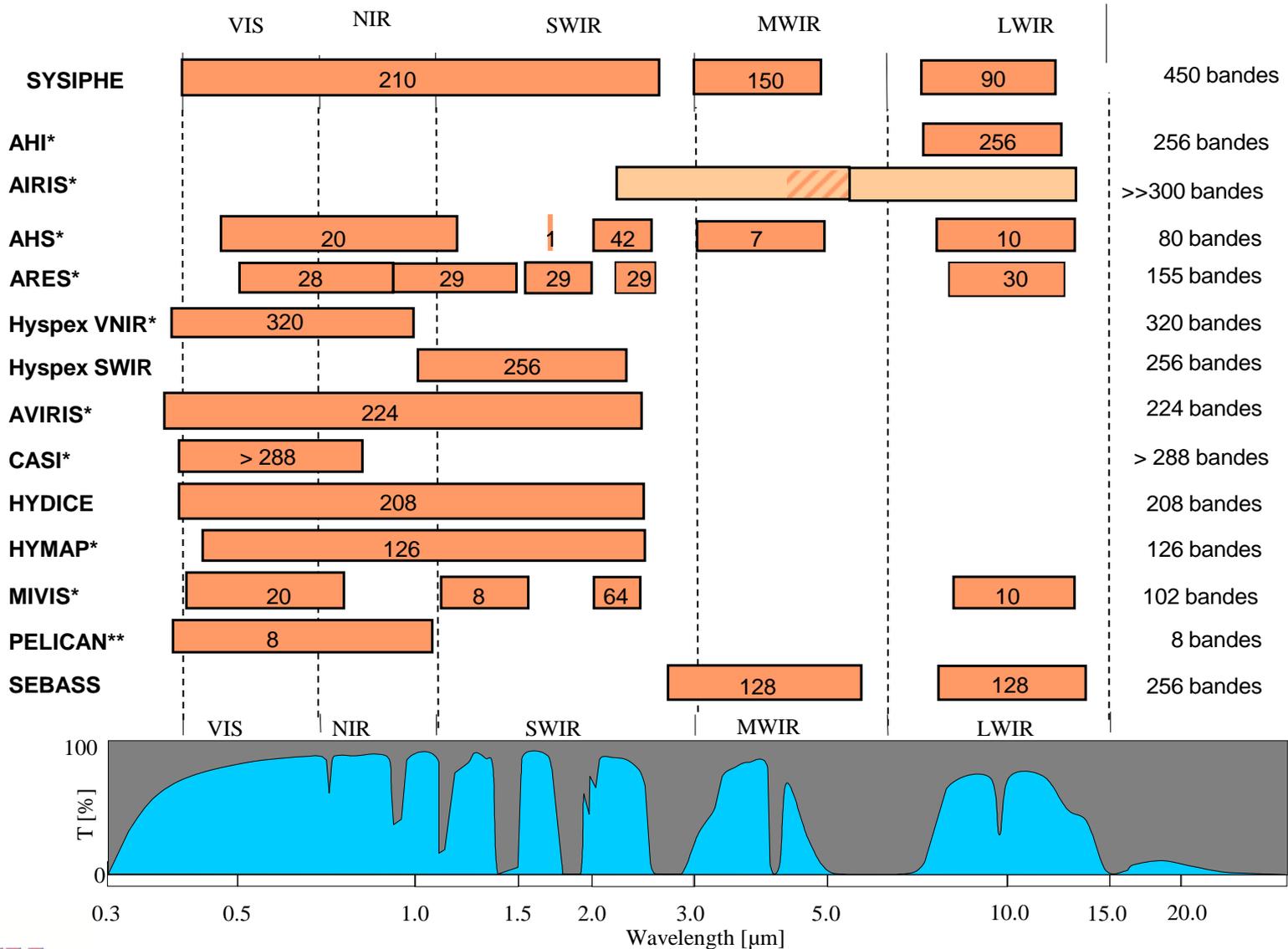
Introduction sur les principales techniques d'acquisition



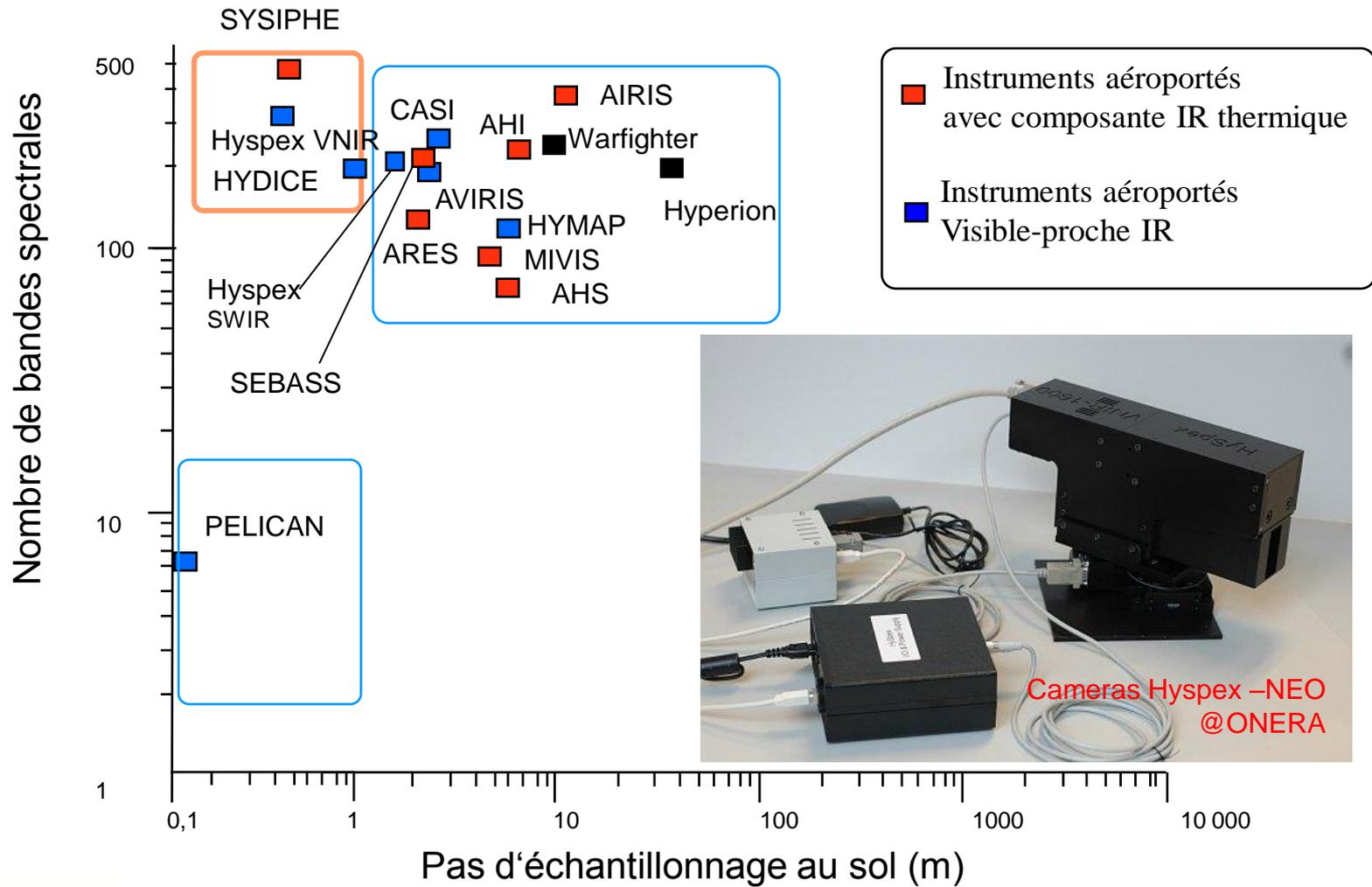
	Collimator-Disperser-Camera	Wedge filter	Offner	Dyson	Fourier Transform Spectrometer
Avantages	Simple, modulaire, bien maîtrisé	Simple, compact, léger, facile à intégrer	Compact, excellente QI, optique réflective => large bande passante, technique mature	Compact, excellente QI	Compact, système optique monolithique possible, très stable, non sensible aux erreurs d'alignement, réglage possible en vol de la résolution
Limitations	Lourd, encombrant, composants optiques complexes	Fabrication de la lame de coin délicate	Moins compact que le Dyson	Bande spectrale limitée par l'indice de réfraction de L2, spécification forte sur les éléments réfractifs, QI	Contrôle délicat des parties mobiles, plus adapté à l'IRT, SNR relativement faible, post traitement complexe, étalonnage critique, sensible à des dépointages court terme
Ex	AISA (1993), APEX (2008)	LEISA (1997), LAC (2000)	AVIRIS (1987), VIMS-V (1997), Hyperion (2000), VIRTIS (2004), M3 (2008)	MERIS (2002), Dyson point chaud (Nasa)	ATMOS (1985), FTHSI (2000)

A Comparison of Optical Design Forms of Hyperspectral Instruments for Remote Sensing, Timothy N. Miller, Raymond M. Bell, Jr., OSA / ORS 2010

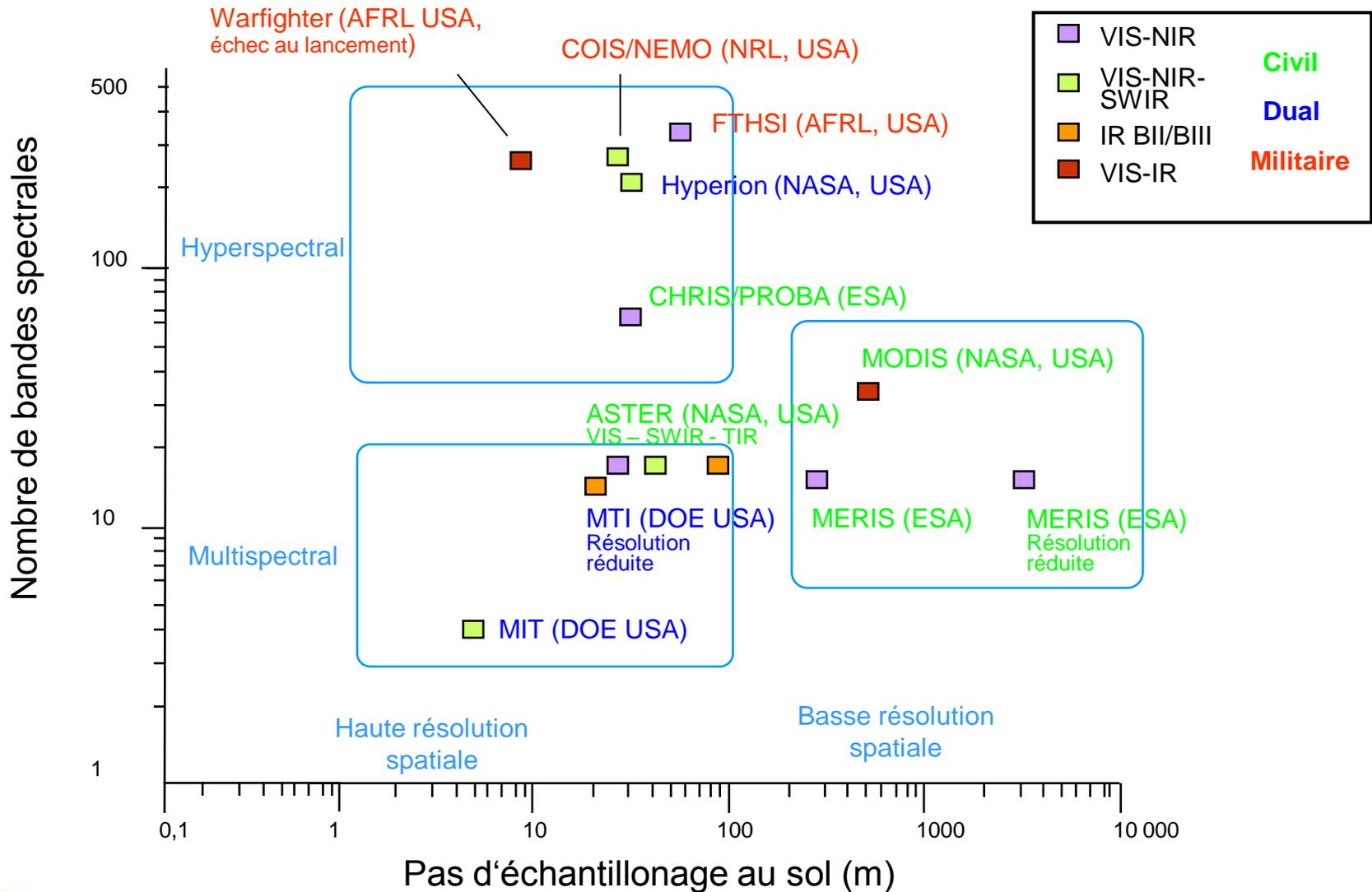
Instrument MS/HS aéroportés : couverture spectrale



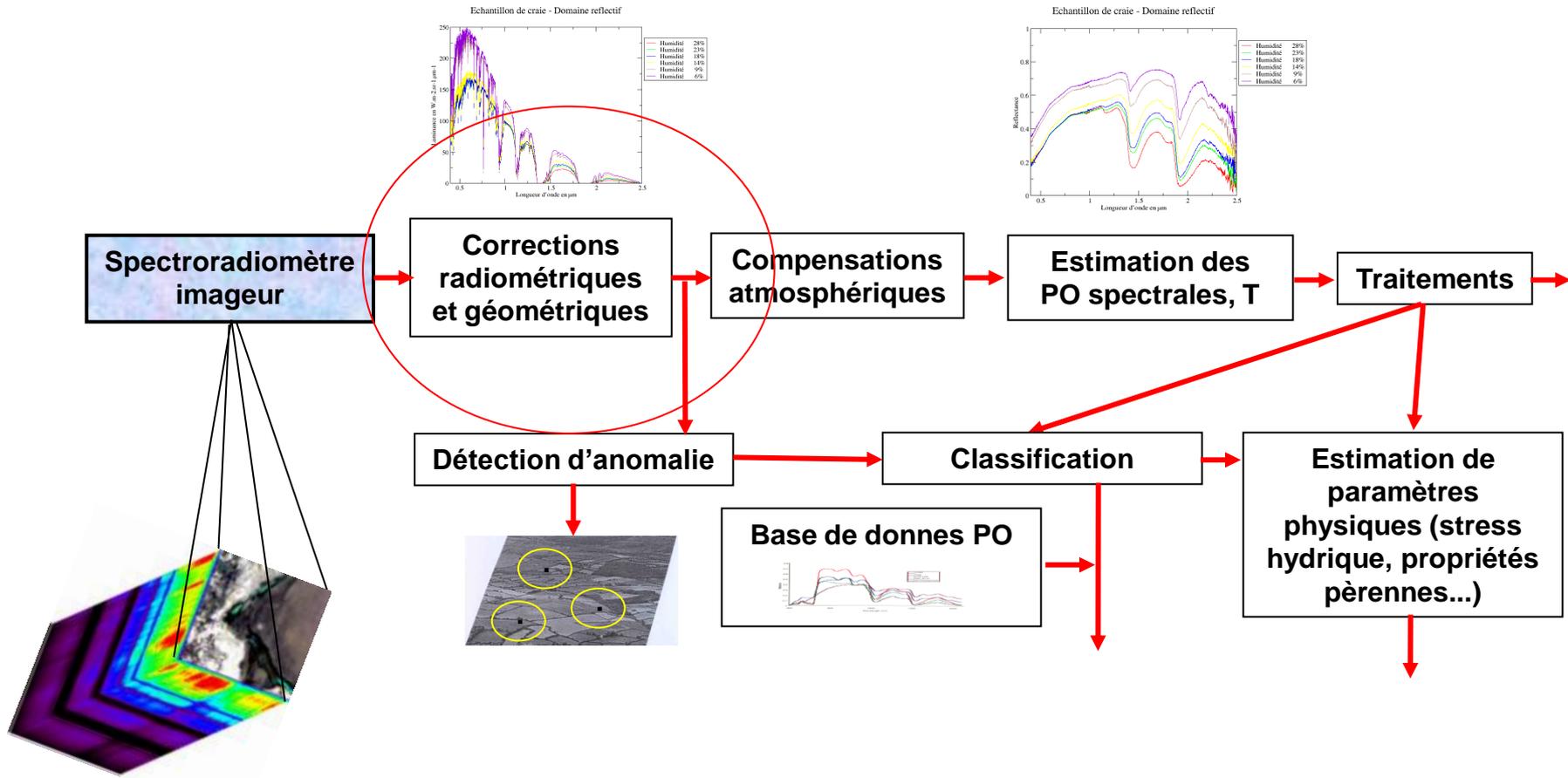
Quelques instruments MS/HS aéroportés



Quelques instruments MS/HS satellitaires



Chaîne d'exploitation typique d'un système Imageur hyperspectral



Pourquoi des corrections géométriques et radiométriques?

L'instrument n'est pas parfait...Hélas!

Comme tout instrument de mesure, pour exploiter ses acquisitions, il nous faut :

- Evaluer / quantifier le bruit instrumental : SNR, Courant d'obscurité, égalisation (flat field) - correction des sensibilités relatives interdétecteur, défauts instrumentaux (tilt, smile)
- Convertir ses données en grandeur physique :
 - Spectral : canal / longueur d'ondes (position des absorptions spécifiques)
 - Radiométrique : convertir les comptes numériques en sortie de la chaîne optoélectronique de détection en grandeur physique (luminance: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

Caractérisation de l'instrument Etalonnage

Ecole d'été en traitement des images hyperspectrales - ONERA

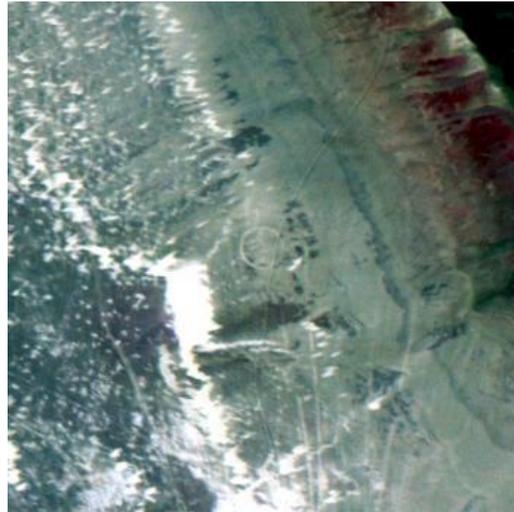
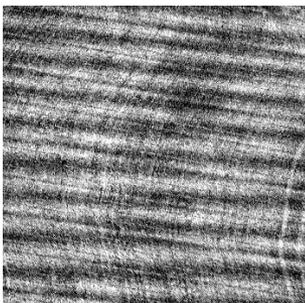
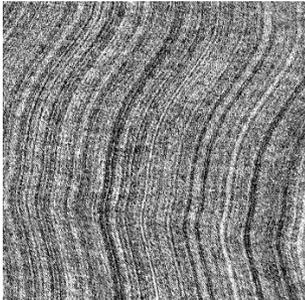
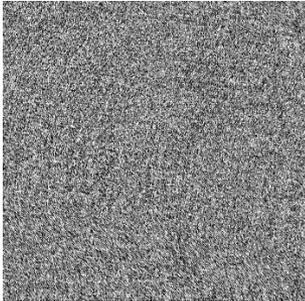
Toulouse (20-22 juin 2012)

Caractérisation de l'instrument: bruit instrumental

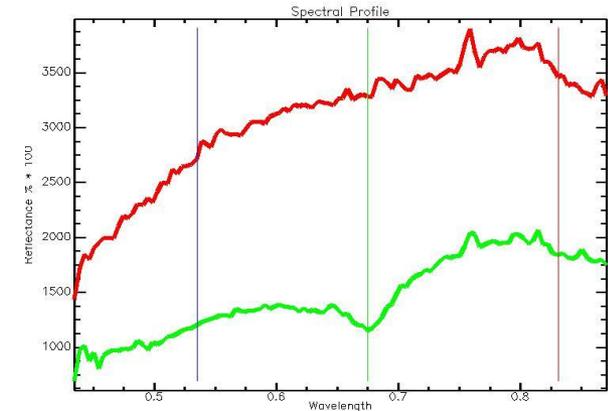
Aléatoire

Evolutions temporelles
Sensibilité interdécteur

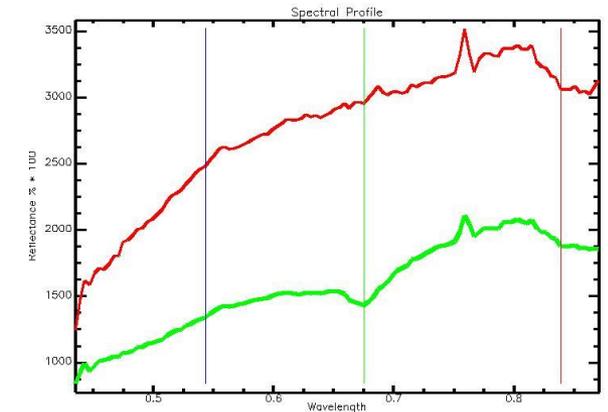
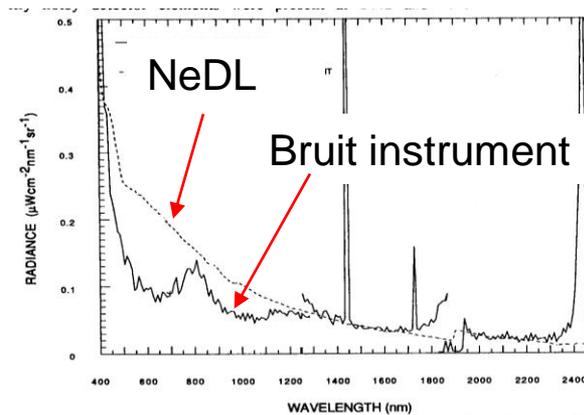
Spatial



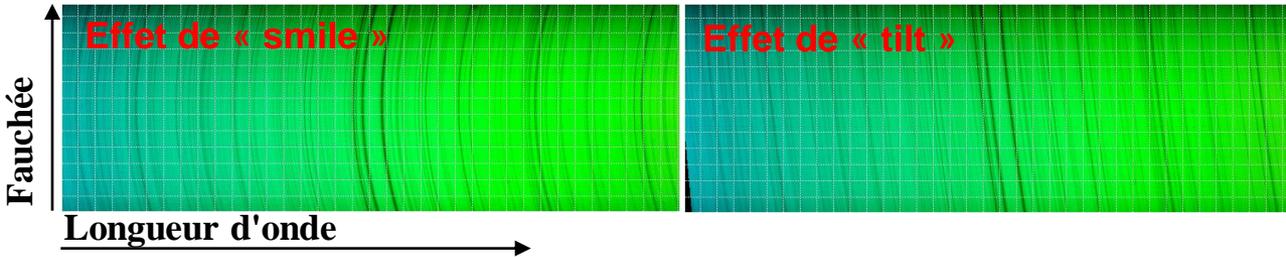
Spectral



Méthode en laboratoire :
Sphère intégrante



Caractérisation de l'instrument: défauts instrumentaux



Smile

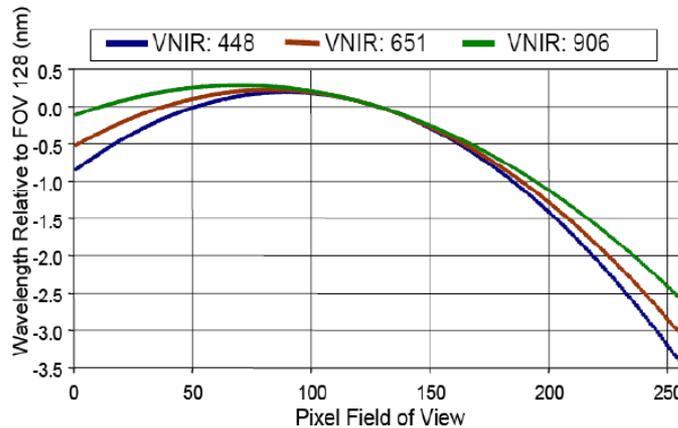


Figure 1-1 Pre-launch smile calibration curves of band 10 (blue), band 30 (magenta) and band 55 (green) for Hyperion (Courtesy CSIRO).

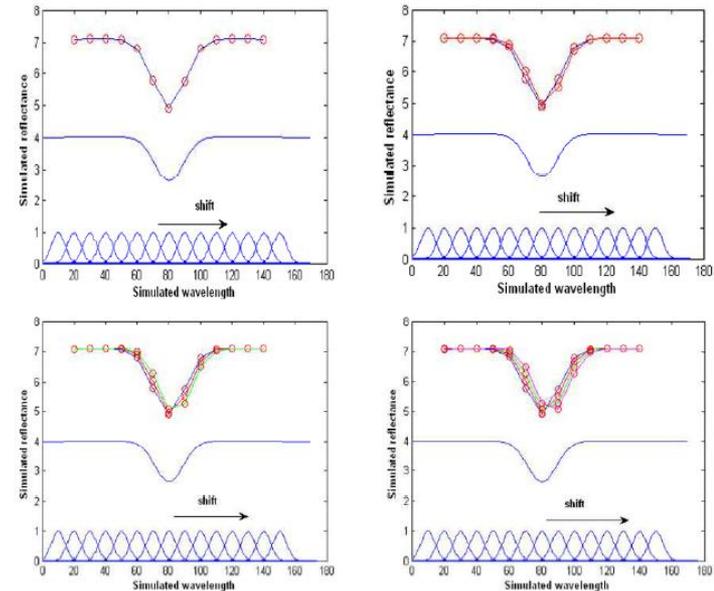


Figure 2-5 Simulation of smile effect; resampled spectrum without any shift in response function (top left), resampled spectra with 1 nm shift (top right), with 1+ 2 nm shift (bottom left) and with 1+2+3 nm shift (bottom right).

Méthode en laboratoire: source ponctuelle

Caractérisation de l'instrument: défauts instrumentaux

Egalisation

En laboratoire : sphère intégrante (Ex VITO)



Figure: Normalizing factors for the VNIR detector.

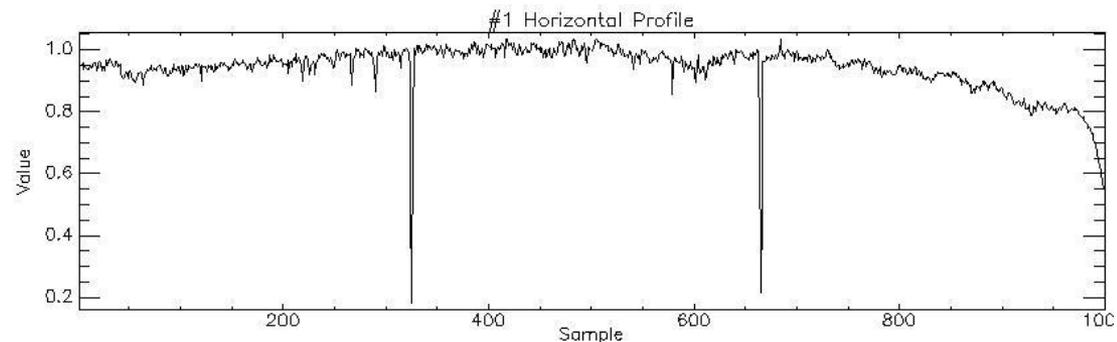


Figure: Across track profile, showing the factors of one band of the VNIR.

En orbite : cibles uniformes (sites neigeux, déserts)

Pourquoi un étalonnage?

Convertir les acquisitions exprimées en compte numérique CN en sortie de la chaîne optro électronique en grandeur physique L (luminance spectrale $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

C'est une étape indispensable avant toute analyse de données hyperspectrales

Pour identifier les positions des bandes d'absorption caractéristiques de la composition chimique => *étalonnage spectral*

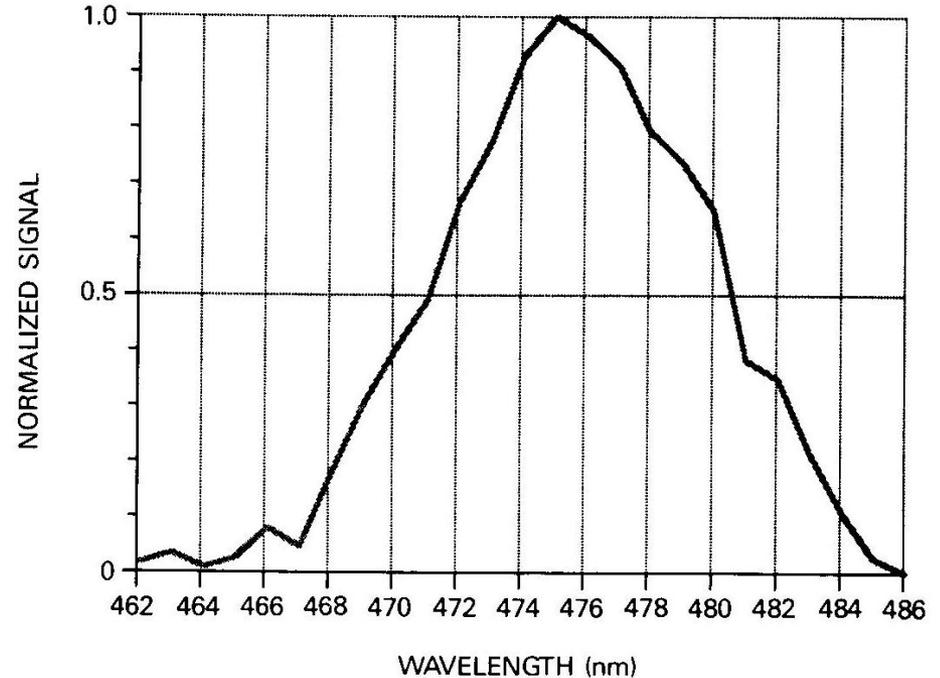
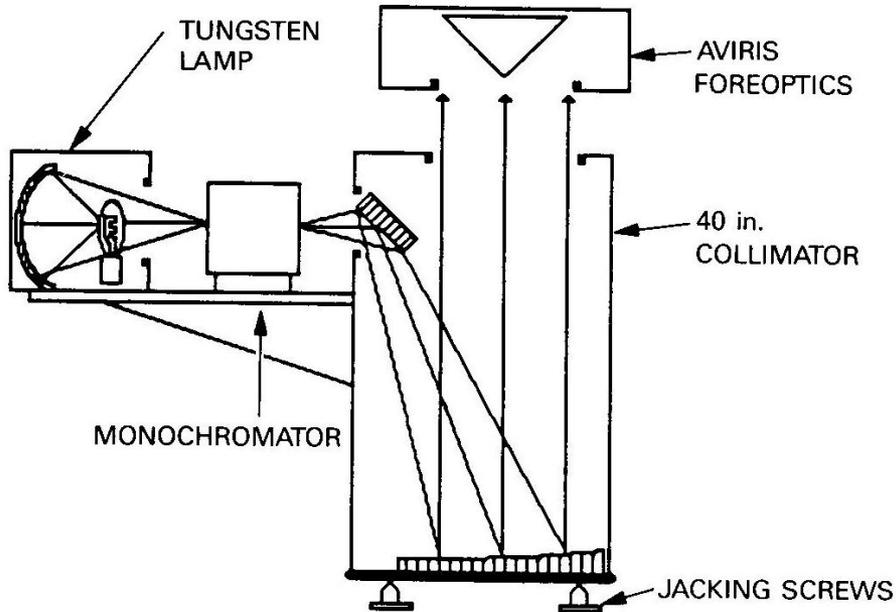
Pour quantifier les différents constituants grâce à l'importance de la raie d'absorption => *étalonnage radiométrique $A(\lambda)$*

Pour s'affranchir des évolutions temporelles de l'instrument => *étalonnage multitemporel $A(\lambda, t) / A(\lambda, t_0)$*

Modèle radiométrique simple : $L = A \cdot CN$ (CN – « Courant d'obscurité »)

Etalonnage spectral

En laboratoire

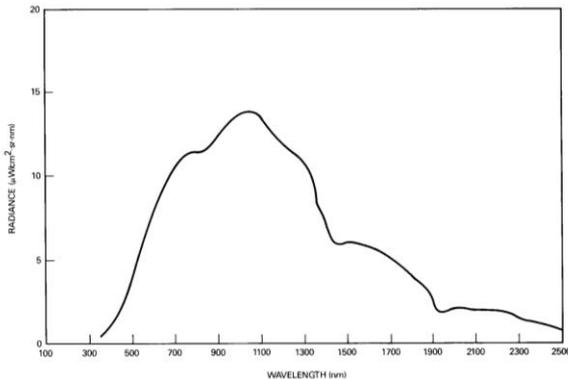
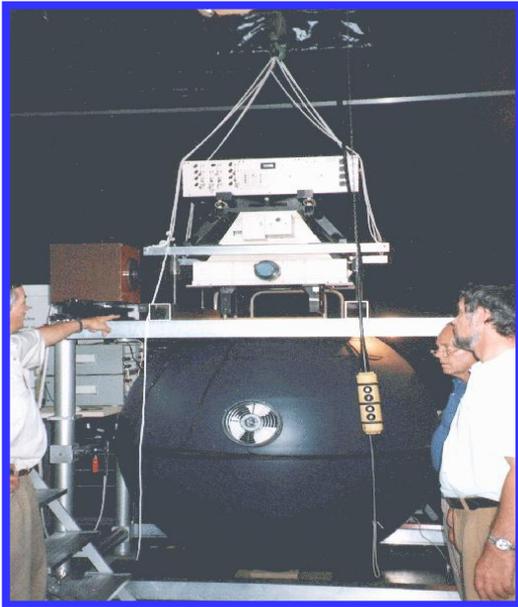


En orbite :

- utilisation des raies d'absorption étroite de certains gaz atmosphériques (O₂), 763 nm (ex de MERIS) => calage spectral
- Utilisation du glitter : interbande

Etalonnage radiométrique

En laboratoire



En orbite

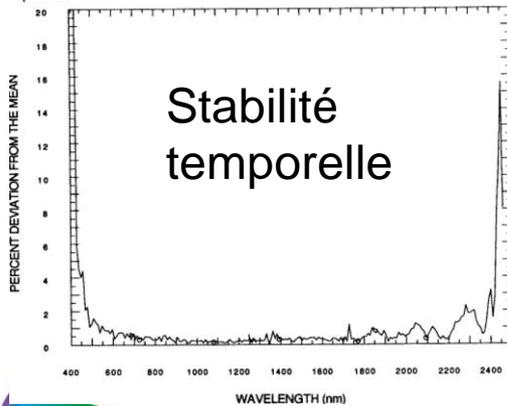
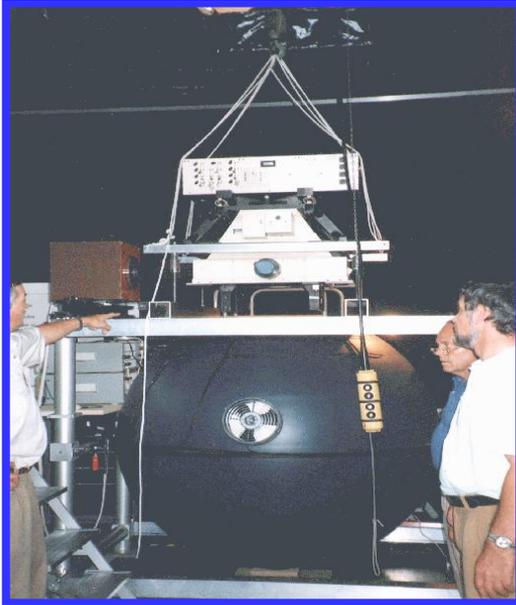
Cible terrestre de haute réflectance+ vérité terrain



Mais aussi : sites océanique (Rayleigh), White sands...

Etalonnage multitemporel

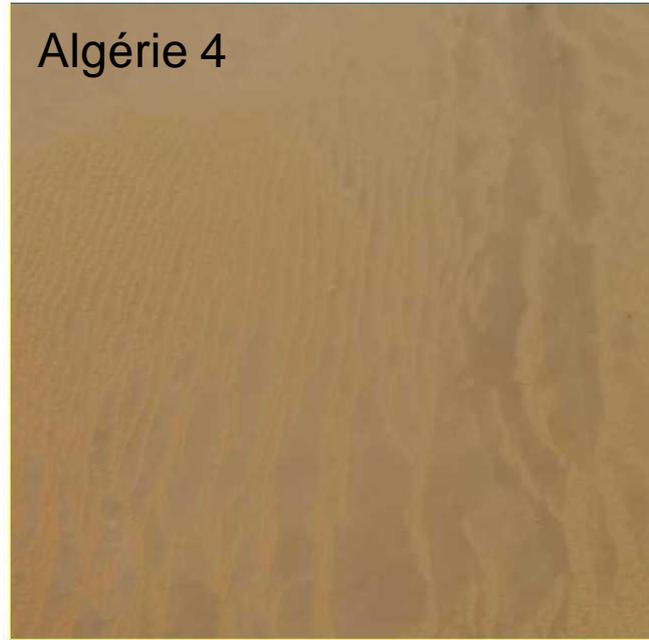
En laboratoire



En orbite

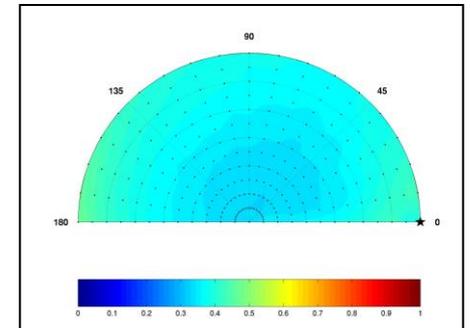
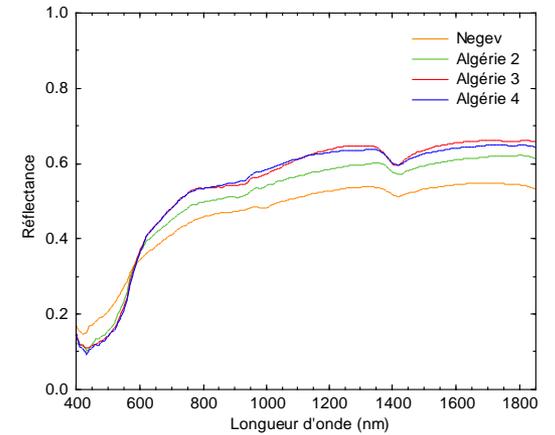
Les déserts

Algérie 4



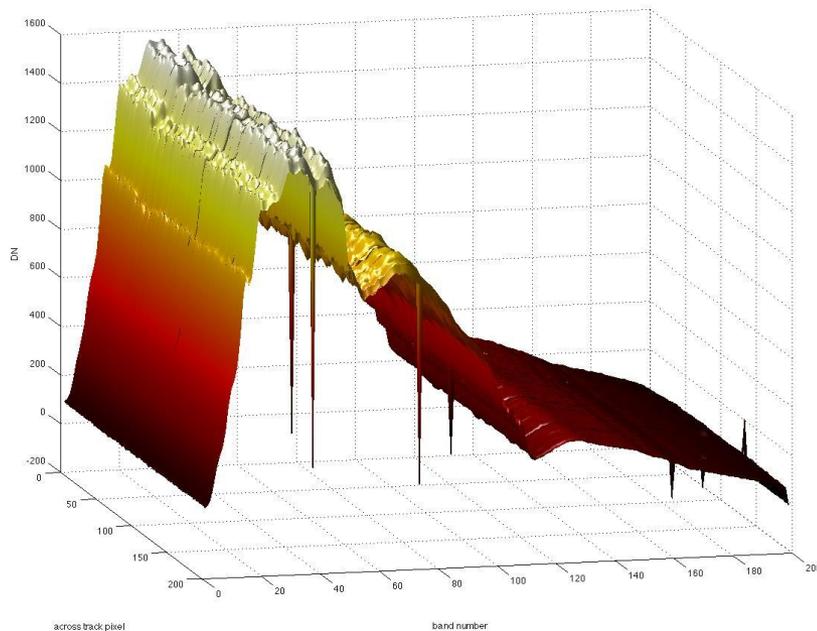
	North:	30.540381	East:
West:	5.1866181	South:	6.1905857
		29.540455	

Mais aussi : la lune, Dome C



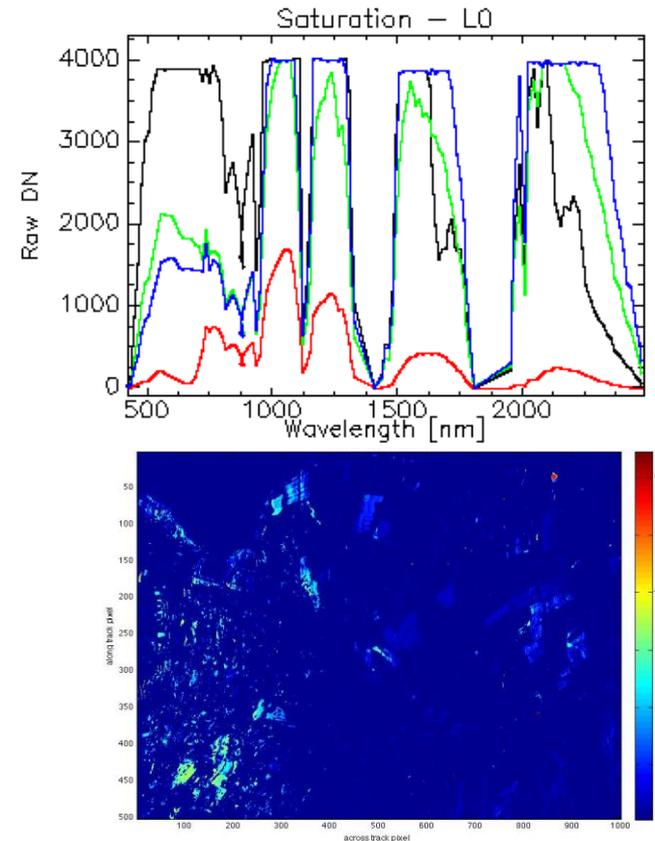
Qualité des données

Pixels "mauvais" (proche du niveau de courant d'obscurité)



Ex : Part of the APEX SWIR detector showing bad pixels as spikes (Eufar)

Pixels saturés

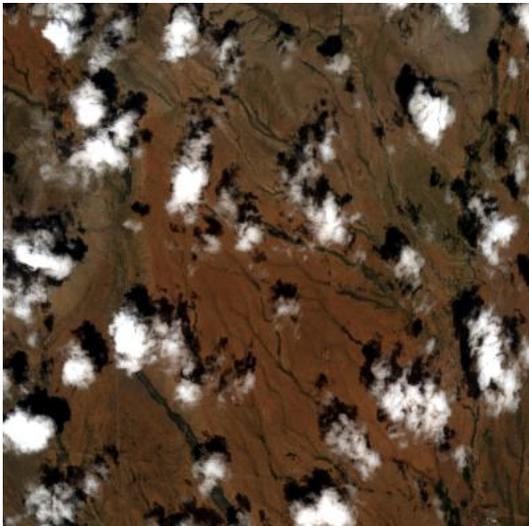


Ex : spatial saturation quality layer showing the number of saturated bands per spatial position (Eufar)

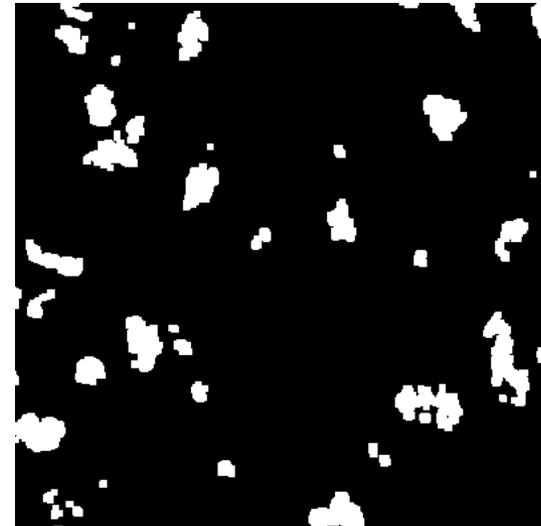
Masque des nuages

Exemple simple

Critère : $\rho^*(0.5 \mu\text{m}) > 35\%$ AND $\rho^*(1.6 \mu\text{m}) > 30\%$



@Eufar
Hyquapro



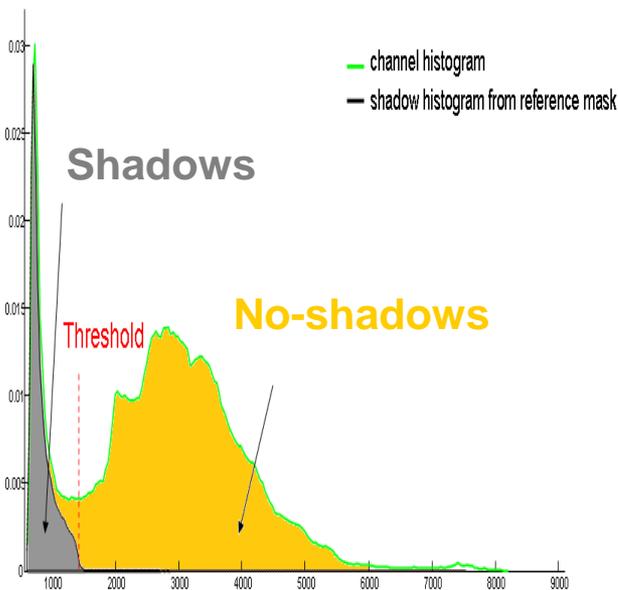
Autres méthodes plus complexes

Richter, R. 2010. Atmospheric/topographic correction for airborne imagery. ATCOR-4 user guide, version 5.1

Richter, R., and Müller, A., "De-shadowing of satellite/airborne imagery", Int. J. Remote Sensing, Vol. 26, 3137-3148 (2005)

Masque des ombres

Exemple simple



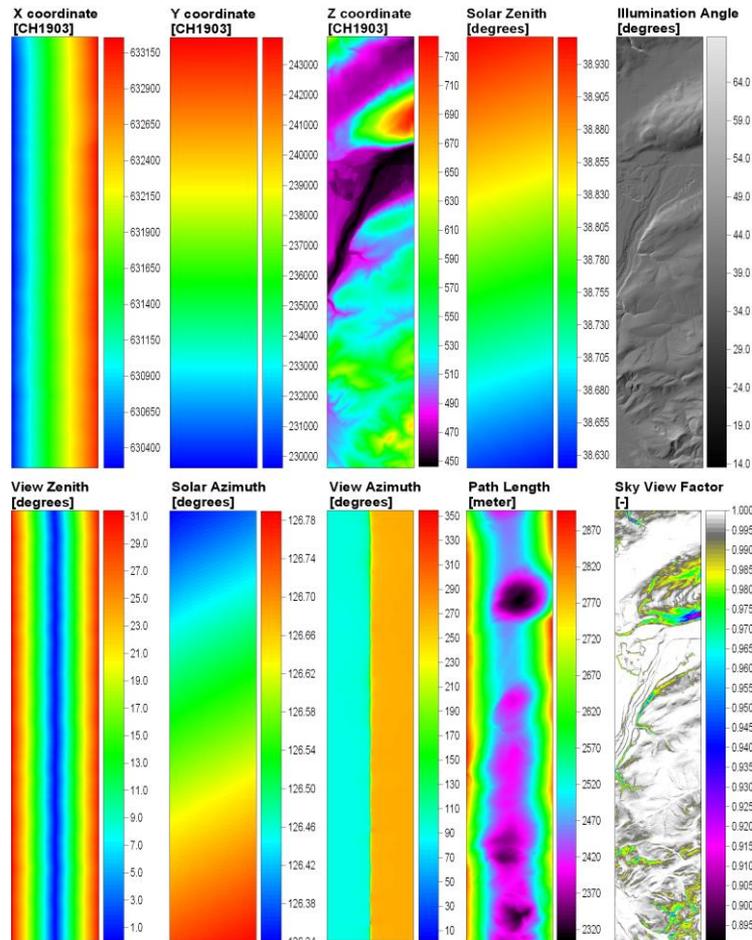
Autres méthodes plus complexes (voir article ci-dessous)

SHADOW DETECTION IN VERY HIGH SPATIAL RESOLUTION AERIAL IMAGES: A COMPARATIVE STUDY, K. R. M. Adeline, M. Chen, X. Briottet, S.K. Pan, N. Paparoditis, JPRS, submitted

2012

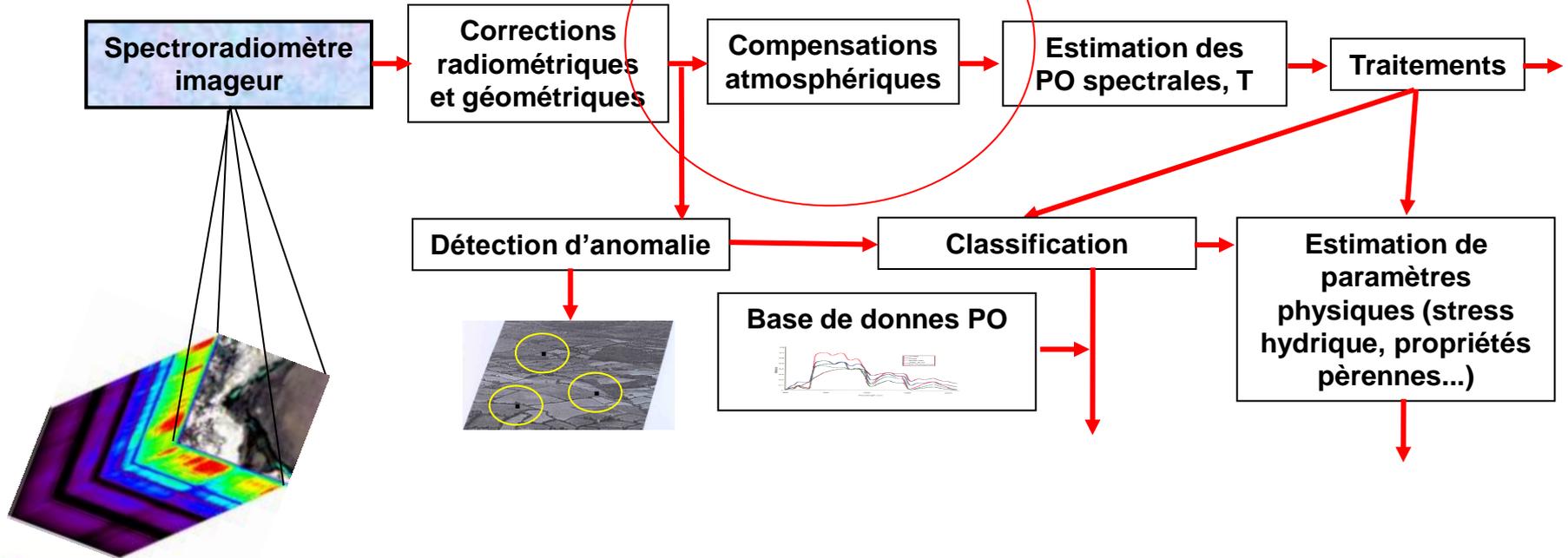
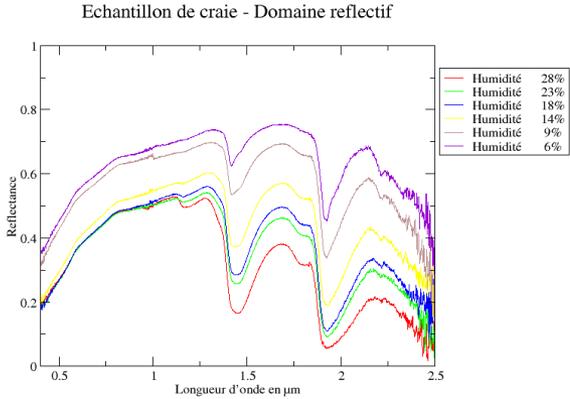
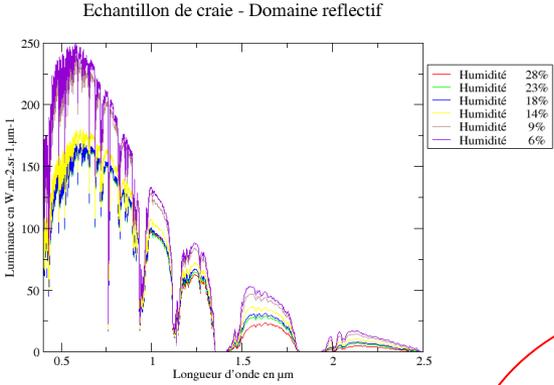
Identification des géométries de BRDF critique

Objectif : fournir les informations géométriques de prises de vue et du relief pour permettre d'alerter l'utilisateur

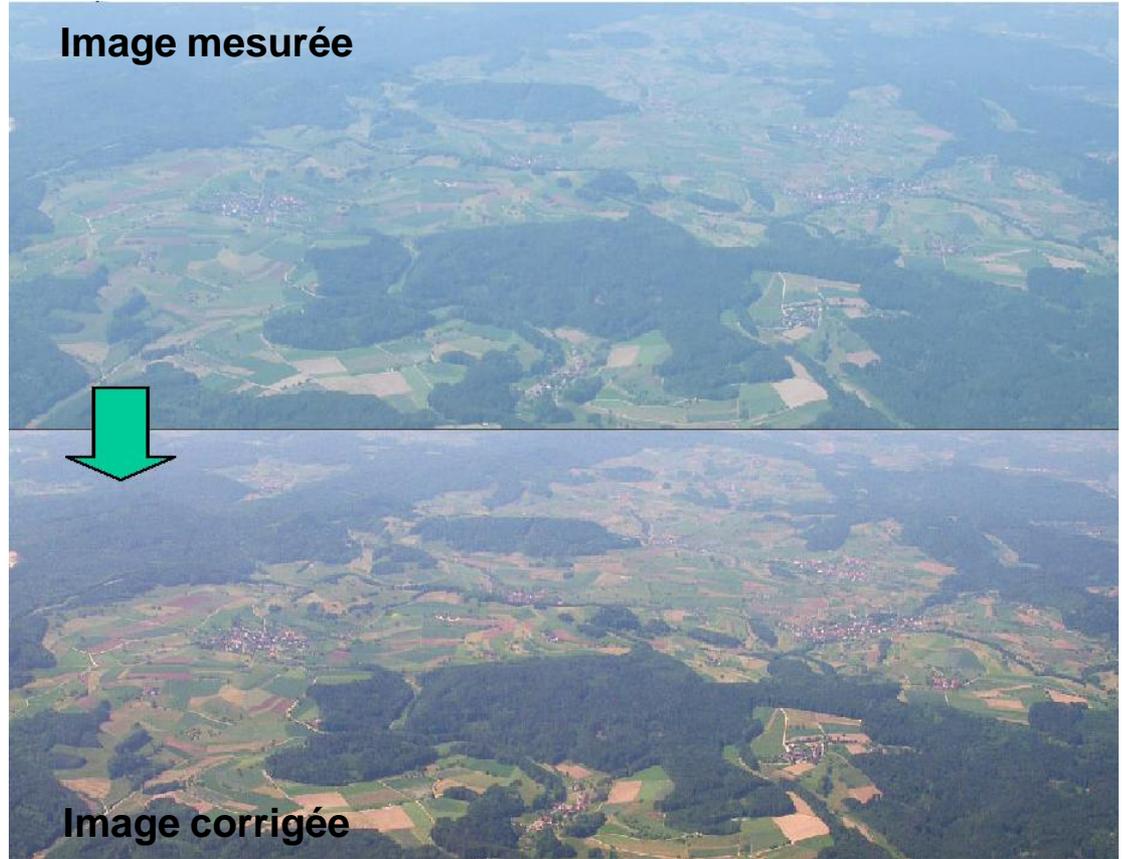
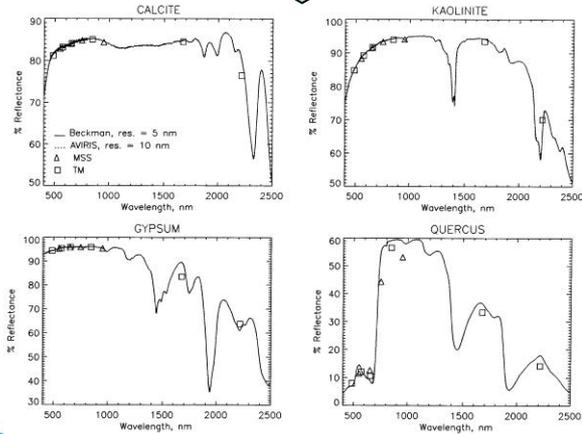
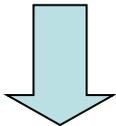
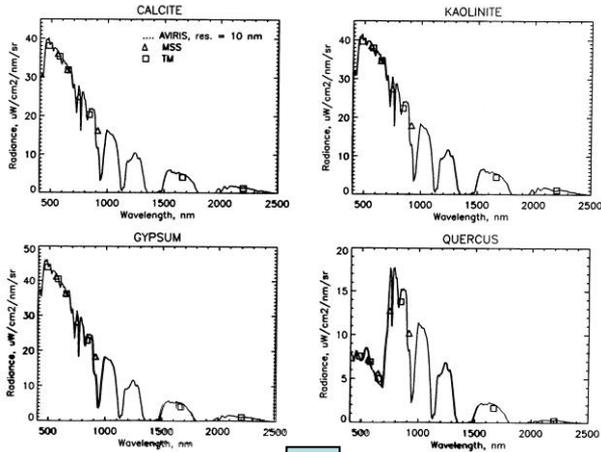


Eufar@Hyquapro

Chaîne d'exploitation typique d'un système Imageur hyperspectral



Pourquoi des corrections atmosphériques ?

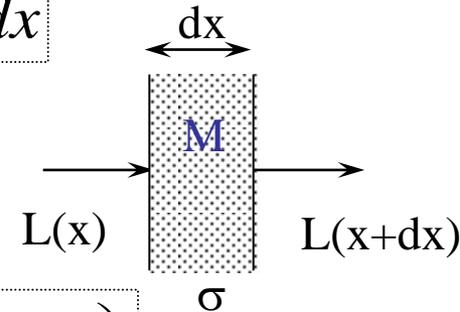


Quelques rappels : Atténuation du rayonnement le long d'un trajet

- Milieu M homogène de molécules et d'aérosols :

– la perte de rayonnement direct s'écrit: $dL = -\sigma.L(x).dx$

où σ est le coefficient d'extinction du milieu



– sur un trajet $A \rightarrow B$, on a: $L(B) = L(A). \exp\left(-\int_A^B \sigma(x).dx\right)$

avec $\tau(AB) = \int_A^B \sigma(x).dx$ l'épaisseur optique du trajet.

– L'exponentielle de l'épaisseur optique est une transmission

- L'extinction $\sigma = \sigma_a + \sigma_s$ est due à:

– absorption par le milieu (σ_a)

– diffusion = redistribution d'une partie de l'énergie (σ_s)

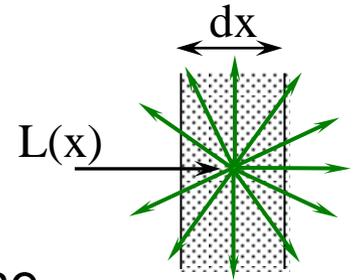
Quelques rappels : contribution du milieu traversé le long d'un trajet

Cette contribution est modélisée par un terme source J :

$$dL = \sigma \cdot J(l) \cdot dl$$

Diffusion par le milieu:

- une partie σ_s de l'énergie incidente est diffusée
- répartition spatiale de l'énergie selon la fonction de phase
 - la fonction de phase dépend de la particule diffusante



Émission par le milieu:

- l'émission du milieu est donnée par la loi de Kirchhof ($\varepsilon_\lambda(\theta) = \alpha_\lambda(\theta)$)
 - émissivité du milieu = absorption du milieu

$$\Rightarrow \boxed{\varepsilon_{milieu} = \sigma_a \cdot dx} \quad \text{et} \quad \boxed{dL_{emis} = \sigma_a \cdot L_\lambda^{CN}(T_{couche}) \cdot dx}$$

Équation de transfert radiatif généralisée

$$\frac{dL}{\sigma \cdot dl} = -L(l) + J(l)$$

= Atténuation + Source

Cas particulier 1 : Les contributions de l'émission thermique et de la diffusion sont négligeables.

$$\frac{dL}{\sigma_a \cdot dl} = -L(l) \quad \text{soit} \quad L(B) = L(A) \cdot e^{-\int_A^B \sigma_a(l) \cdot dl} = L(A) \cdot T(A \rightarrow B)$$

L'atténuation d'une radiation traversant un milieu homogène absorbant suit une loi exponentielle dont l'argument est le produit du coefficient d'absorption par la longueur du trajet.

Application: dans l'atmosphère en condition de ciel clair :

- $\lambda > 1 \mu\text{m}$: la diffusion de la lumière est négligeable
- λ dans $[1 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}]$, l'émission atmosphérique est négligeable

Cette équation sert de base pour le transfert radiatif dans le domaine $[1 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}]$.

Équation de transfert radiatif généralisée

Cas particulier 2 : le milieu n'est pas diffusant et en équilibre thermodynamique à la température T (Equation de Schwarzschild).

$$\frac{dL}{\sigma_a \cdot dl} = -L(l) + L_{CN}(T, l) \quad \text{soit} \quad L(B) = L(A) \cdot e^{-\int_A^B \sigma_a(l) \cdot dl} + \int_A^B L_{CN}(T, l) \cdot e^{-\int_l^B \sigma_a(l) \cdot dl} \cdot \sigma(l) \cdot dl$$

Atténuation du signal par absorption

la contribution du milieu sur le trajet AB.

Application : dans l'atmosphère en condition de ciel clair,

- absorption et émission atmosphérique dominant dans le domaine [3 μm – 14 μm]

Cette équation sert de base pour le transfert radiatif dans le domaine [3 μm – 14 μm].

Équation de transfert radiatif généralisée

Cas particulier 3 : le milieu est absorbant et diffusant uniquement.

$$\frac{dL}{\sigma(l).dl} = -L(l) + L_d(l) \quad \text{soit} \quad L(B) = L(A).e^{-\int_A^B \sigma(l).dl} + \int_A^B L_d(l).e^{-\int_l^B \sigma(l).dl} .\sigma(l).dl$$

Atténuation du signal par absorption
et diffusion

Contribution du milieu sur le
trajet AB.

Application : dans l'atmosphère en condition de ciel clair,

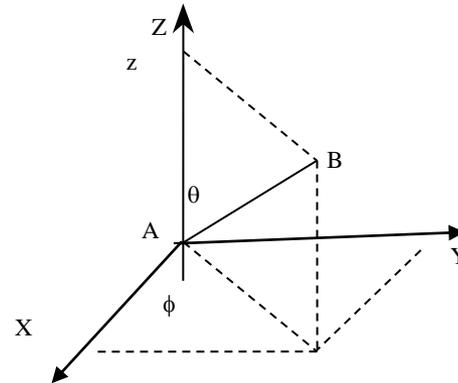
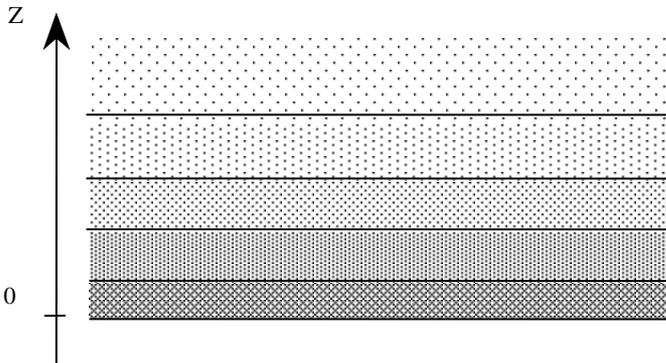
- Absorption et diffusion atmosphérique dominant dans le domaine [0,4 μm – 1,0 μm]

Cette équation sert de base pour le transfert radiatif dans le domaine
[0.4 μm – 1.0 μm].

Équation de transfert radiatif généralisée

Cas particulier 3 : atmosphère plane–parallèle = empilement de couches planes, parallèles et homogènes

• Hypothèse valide si épaisseur de l'atmosphère \ll rayon de courbure de la Terre (Cas d'observations satellitaires avec des angles de visée et d'éclairement solaire inférieurs à 60°)



Calcul plus simple si en épaisseur optique : $d\tau(A, l) = -\sigma(l).dl$

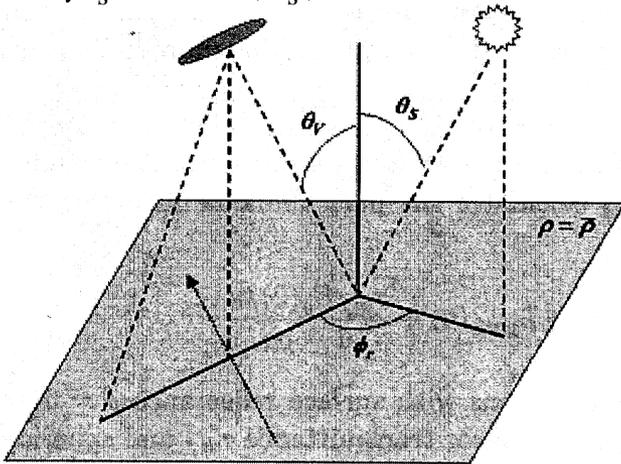
Avec $\tau(\theta) = \frac{\tau}{\mu}$, $\mu = \cos(\theta)$

Cas d'une surface plane homogène dans le système Terre Atmosphère

$$L_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = L_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)E_0\mu_s\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{\pi[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)S]}$$

Luminance atmosphérique
Pas d'interaction avec la surface

$$\mu_s = \cos(\theta_s) \quad \mu_v = \cos(\theta_v)$$



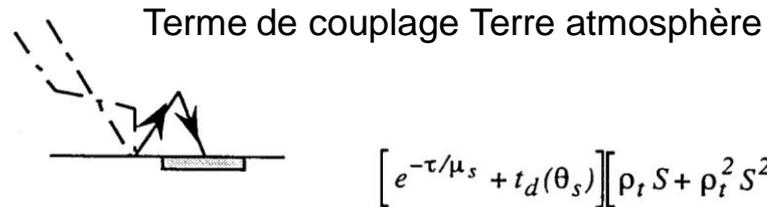
Interactions atmosphère - surface

- $T(\mu_s)$ Transmission totale « descendante »
- $T(\mu_v)$ Transmission totale « montante »
- E_0 Irradiance solaire au sommet de l'atmosphère
- $\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)$ Réflectance de la surface (sans atmosphère)
- S Albédo sphérique = réflectance de l'atmosphère pour un éclaircissement isotrope

$$T(\mu) = e^{-\tau/\mu} + t_d(\mu)$$

Direct

Diffus



$$\left[e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s) \right] \left[\rho_t S + \rho_t^2 S^2 + \dots \right]$$

Cas d'une surface hétérogène en milieu montagneux

$$\rho_{(i)}^{(1)}(x, y) = \frac{\pi [d^2 (c_0 + c_1 DN(x, y)) - L_p(z, \Theta_v, \phi)]}{\tau_v(z, \Theta_v) [b(x, y) E_s \tau_s(z) \cos \beta(x, y) + E_{dif}^*(x, y, z) + E_g(z, \rho_r) \bar{\rho}_{terrain}^{(i)} V_{terrain}(x, y)]}$$

The terms are defined as :

x, y	horizontal coordinates, corresponding to the georeferenced pixel positions;
z	vertical coordinate, containing the elevation information from the DEM;
$DN(x, y)$	digital number of georeferenced pixel;
$L_p(z, \theta_v, \phi)$	path radiance, dependent on elevation and viewing geometry;
$\tau_v(z, \Theta_v)$	ground-to-sensor view angle transmittance, direct plus diffuse components;
$\tau_s(z)$	Sun-to-ground beam (direct) transmittance;
$\beta(x, y)$	angle between the solar ray and the surface normal (illumination angle);
$b(x, y)$	binary factor: $b=1$ if pixel receives direct solar beam, otherwise $b=0$;
E_s	extraterrestrial solar irradiance (earth-sun distance $d=1$ astronomical unit);
$E_d^*(x, y, z)$	diffuse solar flux on an inclined plane (see equation 2.17);
$E_g(z)$	global flux (direct plus diffuse solar flux on a horizontal surf. at elevation z);
$\bar{\rho}_{terrain}^{(0)}$	$= 0.1$, initial value of average terrain reflectance;
$\bar{\rho}_{terrain}^{(i)}(x, y)$	locally varying average terrain reflectance, calculated iteratively ($i=1,2,3$);
$V_{terrain}(x, y)$	terrain view factor (range 0-1).

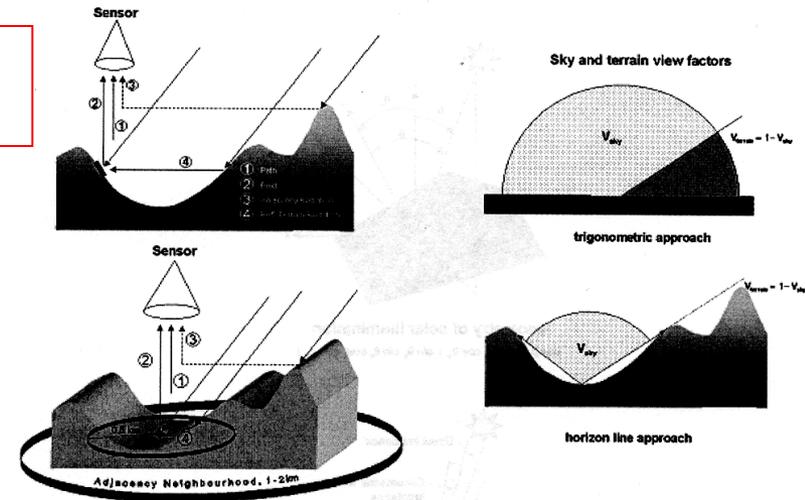


Figure 2.3: Radiation components in rugged terrain, sky view factor. Left: schematic sketch of radiation components in rugged terrain; 1 : path radiance; 2 : pixel reflected radiance; 3 : adjacency radiance; 4 : reflected terrain radiance. Right: sky and terrain view factor.

Compensation atmosphérique

2 étapes :

- **caractérisation de l'atmosphère** : détermination des composants atmosphériques ayant un impact radiatif sur le signal
 - absorbants majoritaires : H₂O, O₃, CO₂, (CH₄)
 - diffusants majoritaires : aérosols (type, abondance), gaz
- **correction atmosphérique**

Compensation atmosphérique : domaine réflectif – caractérisation de l'atmosphère

Gaz : H₂O, CO₂, O₃, O₂

Principe : La profondeur de la bande d'absorption dépend de l'abondance du gaz

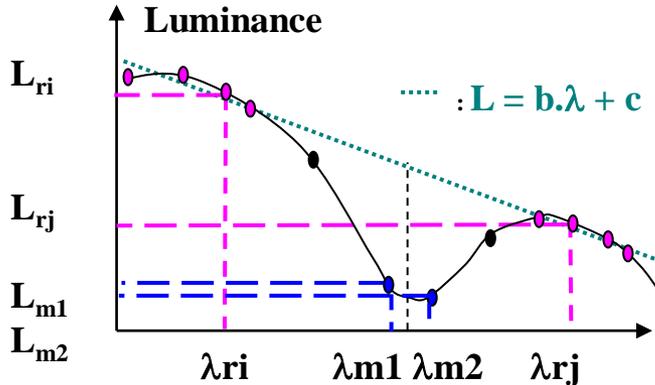
Contraintes : prise en compte de la réflectance sol, impact des aérosols

Outil ONERA-DOTA : Cochise [Miesch, 2004]

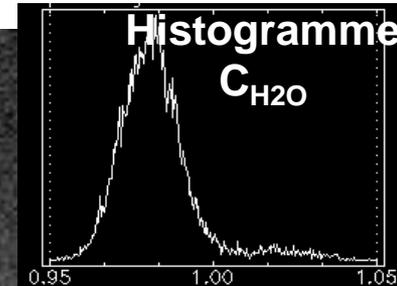


Etat de l'art : sol plat : USA-FLAASH [Adler-Golden, 1998],

Image AVIRIS sur Railroad Valley (USA)



$$R_{LIRR} = f(w_{H_2O}, L_{ref})$$



H₂O terrain : 1.3 g/cm²
 H₂O Cochise : 0.99 g/cm² ± 0.01
 H₂O Flaash : 1.05 g/cm²

Précision compatible avec les précisions recherchées sur les réflectances hors bande d'absorption

Compensation atmosphérique : domaine réflectif – caractérisation de l'atmosphère

Aérosols

Principe : Utilisation de visée sur des cibles sombres

Contraintes : Sélection de cibles sombres (eau) et moins sombres (vgt)

Outil ONERA-DOTA :

Étalonnage absolu des capteurs
satellitaires dans le bleu et vert sur cibles
océaniques [Briottet, 1996]



Etat de l'art :

Sol plat : USA-FLAASH [Adler-Golden, 1998],
Autre méthode : fonction de structure sur sol
stable temporellement

Limites : ces méthodes sont adaptées à des instruments de la classe hm
à km, avec un paysage fortement homogène sombre

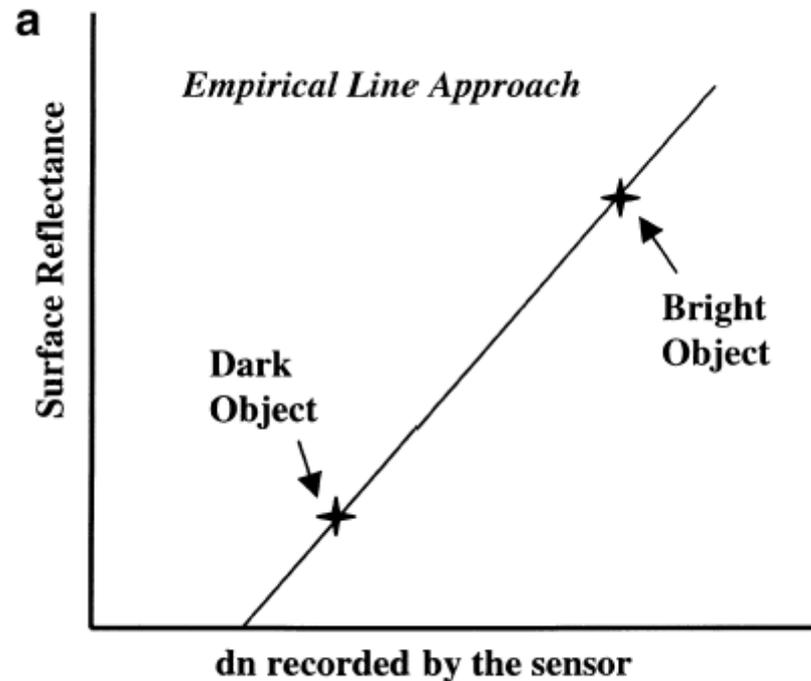
Autres méthodes :

Caractérisation des aérosols par acquisitions spectrales à très haute
résolution spatiale en milieu urbain par utilisation des transitions ombres
soleil (Thomas et al., 2012)

Corrections atmosphériques – méthode empirique

Exemple : « *Empirical line* »

$$\text{Réflectance } \lambda = A_{\lambda} * \text{CN}_{\lambda} + B_{\lambda} \quad \text{ou} \quad A_{\lambda} * L_{\lambda} + B_{\lambda}$$



Nécessite de faire des mesures de réflectance de surface ou de connaître la réflectance de certaines cibles particulières

Corrections atmosphériques – Modèle de transfert radiatif

-> Utilisation de *modèles de transfert radiatif* à haute résolution spectrale (type MODTRAN)

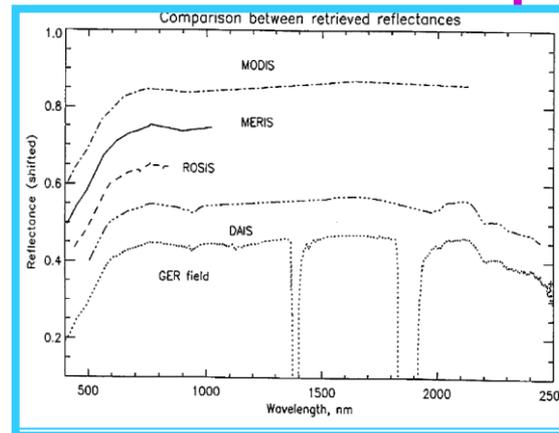
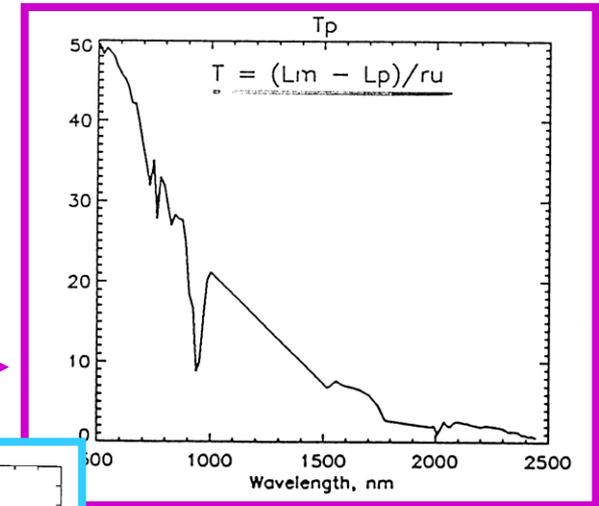
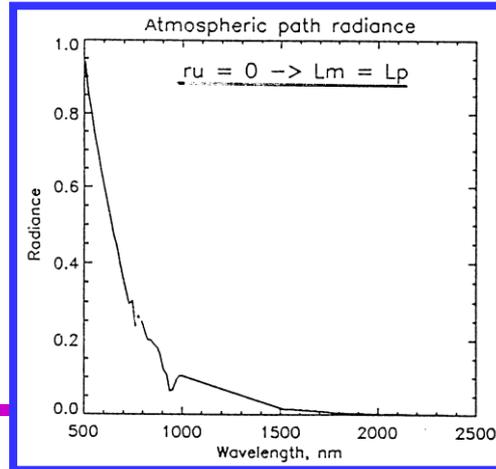
$$L_{\text{capteur}} = L_{\text{atm}} + T * \rho \quad \longrightarrow \quad \rho = (L_{\text{capteur}} - L_{\text{atm}}) / T$$

Étape 1 : Calculer L_{atm}

Étape 2 : Calculer T

Modélisation avec une réflectance choisie

Étape 3 : Utilisation de L_{atm} et de T pour corriger l'ensemble de l'image



Compensation atmosphérique : domaine réflectif (3) – correction atmosphérique

Dépend du type de paysage :

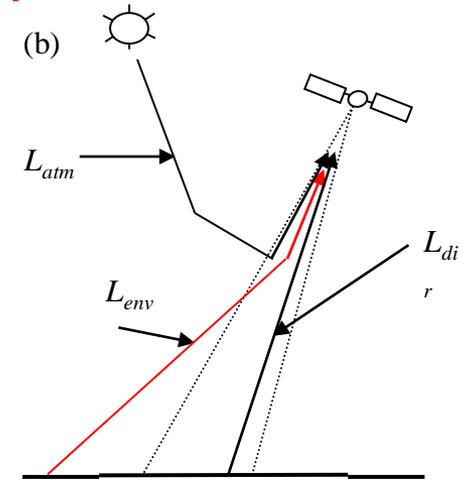
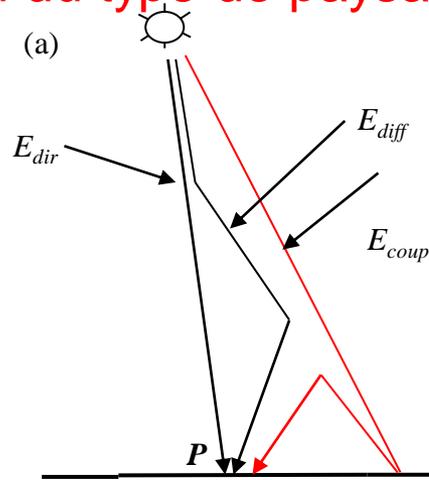
Paysage : sol plat

Principe : inversion de l'ETR

Contrainte : prise en compte des effets de couplage du à l'environnement

Etat de l'art : 6S (LOA, env. homogène),
ATCOR4 (DLR), FLAASH (USA)

ONERA : COCHISE [Miesch, 2004]



Paysage : zone montagneuse

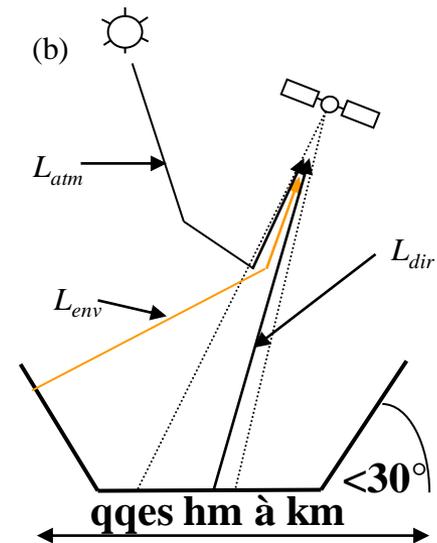
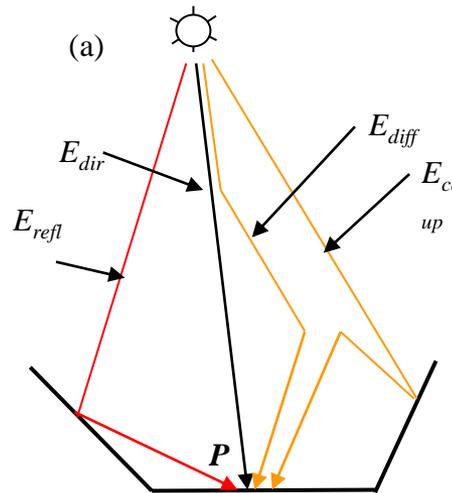
Principe : inversion itérative de l'ETR

Contrainte : effet de pente, couplage du à l'environnement, effet directionnel de la réflectance

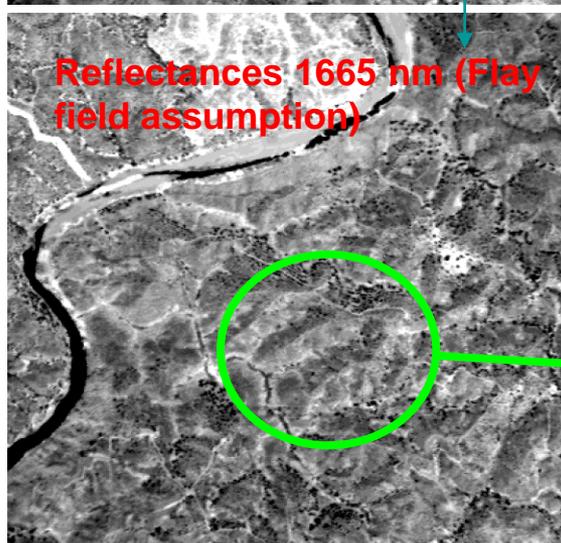
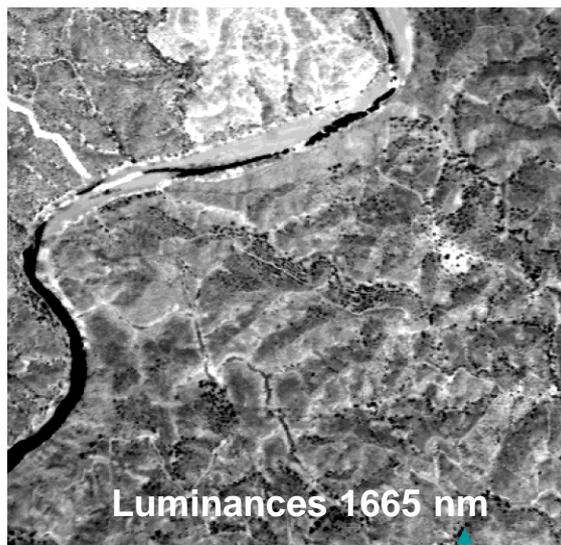
Etat de l'art : ATCOR4 (DLR)

ONERA : SIERRA [LENOT, 2003]

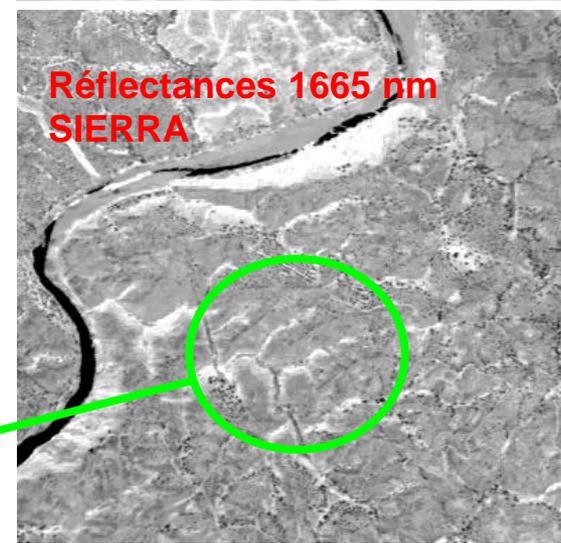
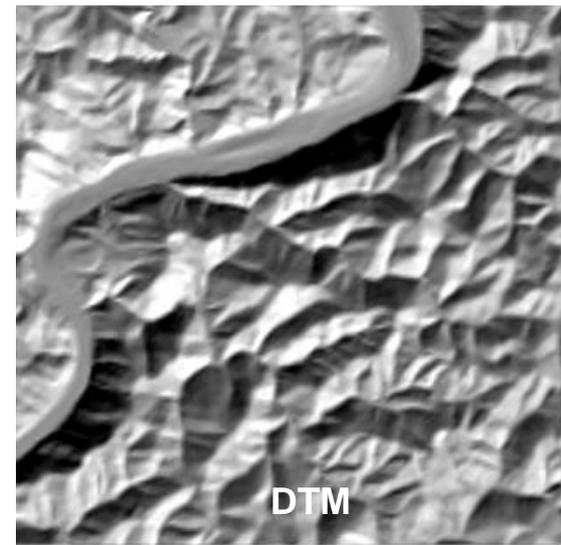
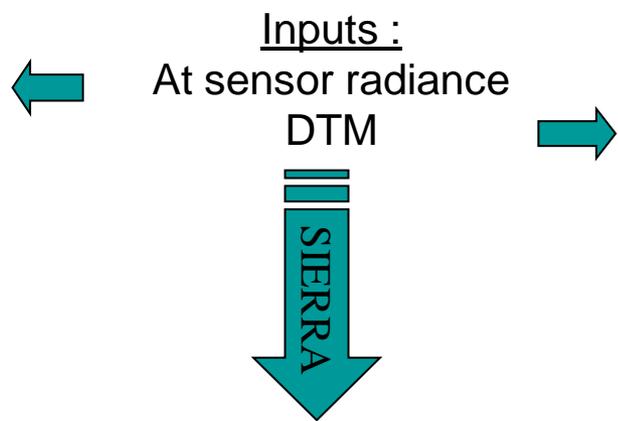
Performances comparables pour les vallées larges. Si étroite, Cochise meilleur



Ex 1 : Atmospheric correction (0.4-2.5μm) over mountainous area (SIERRA)



Hymap on mountainous region
(Calanas, Espagne)
[Thèse **Lenot, 2005, Achard, OMP**]



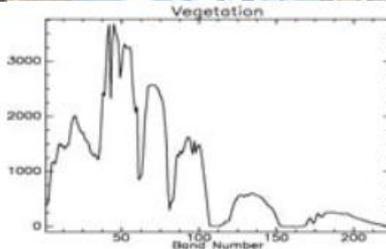
Slope effect
Correction of the slope effect

Similar as ATCOR4 for not too deep mountains, but SIERRA better in sharp valley

Atmospheric/radiometric preprocessing of hyperspectral image data using ATCOR4



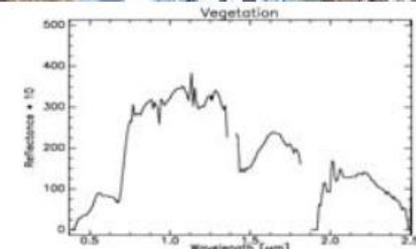
Roh



Illumination



Korrigiert



Compensation atmosphérique : domaine réflectif (3) – correction atmosphérique

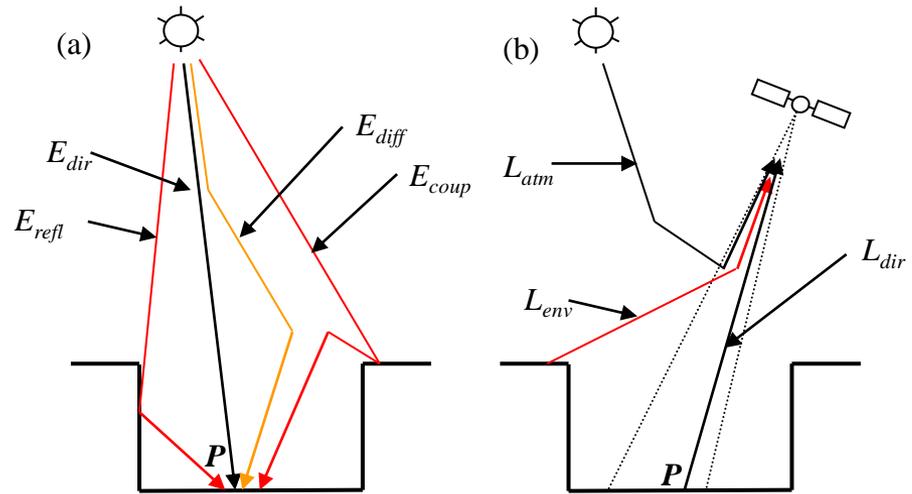
Paysage : milieu urbain

Principe : inversion itérative de l'ETR

Contrainte : effet de pente, couplage du à l'environnement, ombrage, effet directionnel, façade verticale, occultation

Etat de l'art : rien

ONERA : ICARE [thèse Lachérade, 2008, Miesch, Briottet, IGN, CNES] avec des limitations (visées nadir, effet directionnel, hypothèses sur les façades)

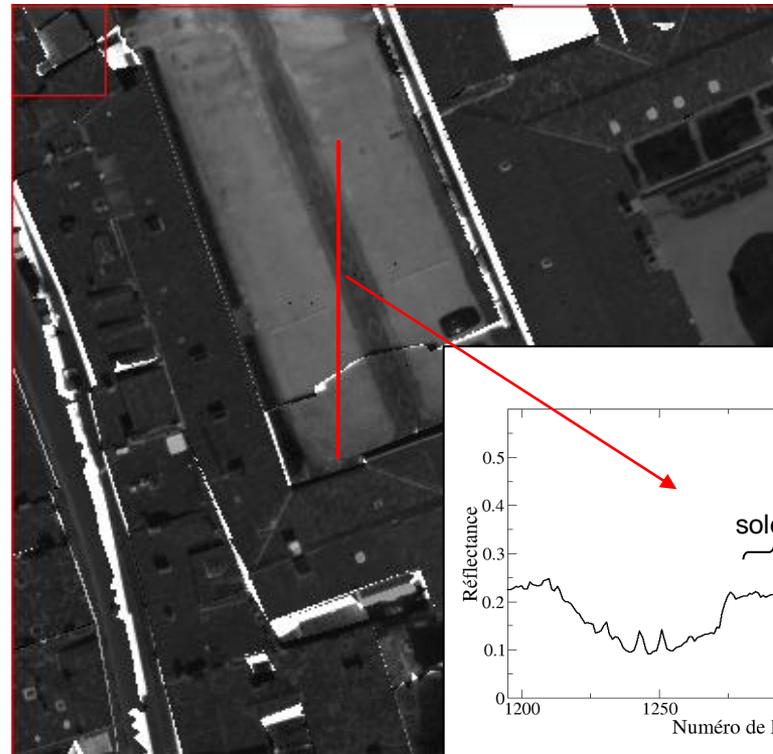


Ex 2 : Correction atmosphérique en milieu urbain dans le VIS-SWIR [Lachérade et al., 2008] – ICARE

Campagne Capitoul ONERA-IGN (PELICAN) sur Toulouse (2003)



Image en luminance



Senseur Pelican
0.4-0.9 μm
 $\Delta\lambda=20\text{nm}$
8 bandes

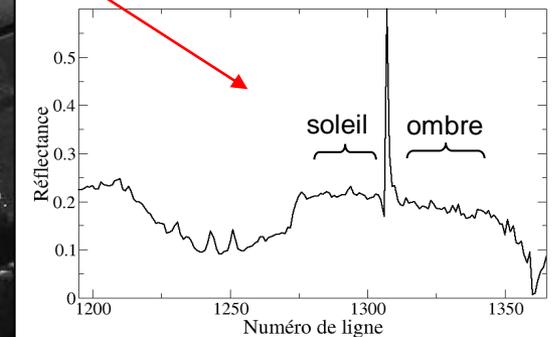


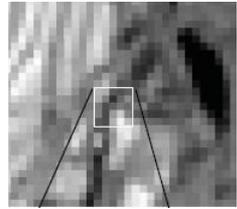
Image en réflectance

Apport : amélioration de la classification des matériaux en milieu urbain en tenant compte des effets de pente et des ombres

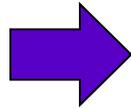
Exemple : toute la chaîne

Image brute (L_0)

Comptes Numériques



Etalonnage



115	111	71	67	74
111	89	52	77	95
87	66	74	87	80
89	64	102	125	90
70	65	113	144	119

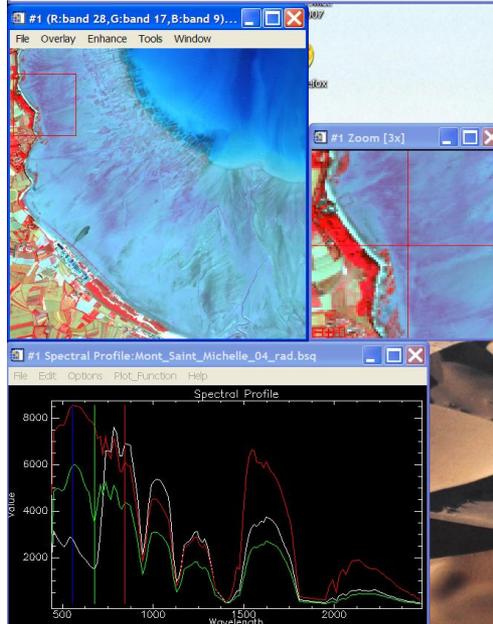
= $f(\text{sensibilité instrument, bruit électronique, etc.})$

Codage = 2^{10} ou 2^{12} bits = 1024 ou 4096 niveaux de gris

INSTRUMENT + SOLEIL + ATMOSPHERE + SURFACE

Image « étalonnée » (L_1)

($W/m^2/\mu m/sr$)



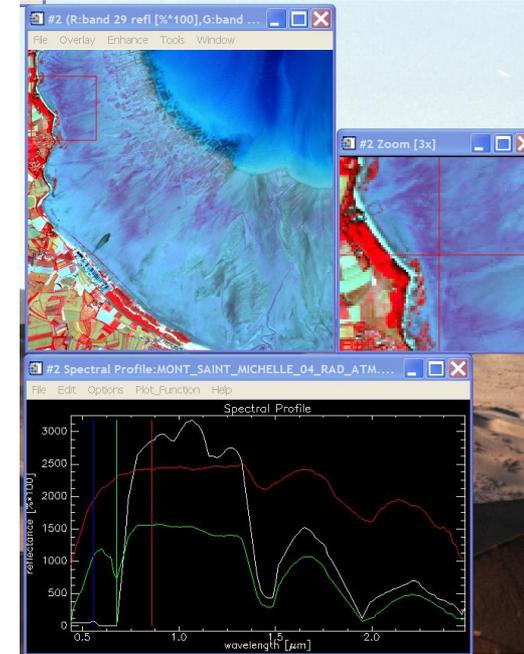
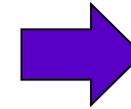
= grandeur physique = énergie / unité de surface
 $L = (CN\text{-bruit}) * \text{coeff étalonnage}$

SOLEIL + ATMOSPHERE + SURFACE

Image « corrigée » (L_2)

Réflectance

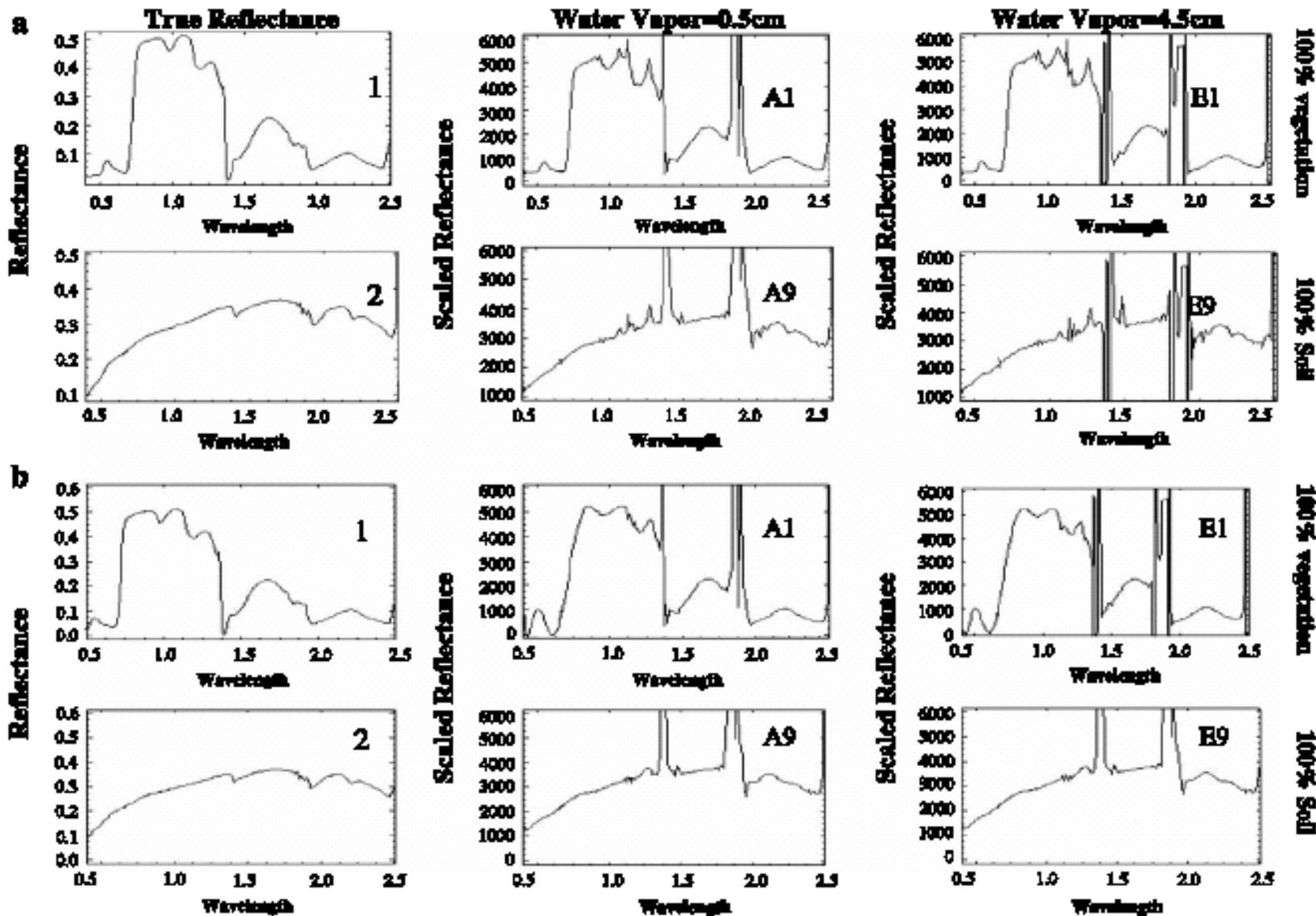
Corr. Atm.



= quantité d'énergie réfléchiée par la surface

SURFACE

Corrections atmosphériques - Comparaisons



Exemple

