INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE ET SON APPLICATION A L'ETUDE DES AEROSOLS

François Dulac

Centre des Faibles Radioactivités (CNRS-CEA)

I - INTRODUCTION

définition de la télédection, avantages, inconvénients, la percée de l'observation spatiale, ...

II - GENERALITES SUR L'IMAGERIE

capteurs actifs et passifs, domaines spectraux, imageurs optiques, vecteurs, segment sol, traitement des données, qu'est-ce qu'une image satellitale, étalonnage, visualisation, produits actuels, applications, ...

III - NOTIONS DE TRANSFERT RADIATIF DANS L'ATMOSPHERE

quelques définitions, émission, absorption, diffusion, réflexion, aérosols, nuages, importance de l'atmosphere sur le signal spatial et exemples, ...

IV - EXEMPLES D'APPLICATIONS AEROSOLS

aérosols "marins", aérosols désertiques, aérosols carbonés, sulfates de pollution, ...

V - PERSPECTIVES

plateformes, mesures polarisées, lidars, spectromètres VIS et IR, assimilation, ...

I - INTRODUCTION

TELEDETECTION (Remote Sensing)

DEFINITION

Acquisition de données sur un objet distant du capteur

Ex.: oeuil

TELEDECTION ≃ TELEDETECTION SPATIALE :

Observation de la surface de la Terre et de son atmosphère à l'aide de capteurs sensibles au rayonnement électromagnétique, embarqués sur des plateformes volantes

HISTORIQUEMENT : Obs. du sol par photographie aérienne.

AVANTAGES
- Vision globale à diff. échelles
- Suivi temporel périodique, durable

INCONVENIENTS
- Volume de données
- Coûts
- Interprétation des mesures

II - GENERALITES SUR L'IMAGERIE

INSTRUMENTS

Capteurs passifs (passive sensors)

Détectent un rayonnement naturel

par ex. : rayonn^{t} solaire (vis-PIR)
rayonn^{t} thermique (IR)

Exemple : APPAREIL PHOTO

Capteurs actifs (active sensors)

Rayonnement artificiel émis par une source embarquée et rétrodiffusé.

Exemple : RADAR

$\Rightarrow$ Energie

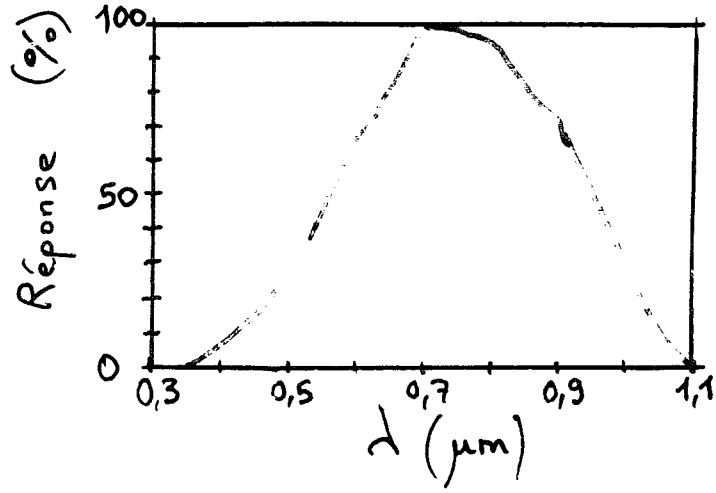
Les capteurs actuels sont très majoritairem^{t} passifs

Bande passante filter function

Un capteur a une bande passante en longueur d'onde (λ). Il intègre l'énergie du rayonnement reçu dans ce domaine de longueur d'onde, ou bande spectrale

Exemples

- capteur Vis (0,4 - 0,7 µm) $\begin{cases} \text{Objet blanc : } E_{max} \\ \text{Objet noir : } E = 0 \end{cases}$
- Fonction filtre de Meteosat 2 :



0,35 – 1,1 µm

intégrale : 0,388

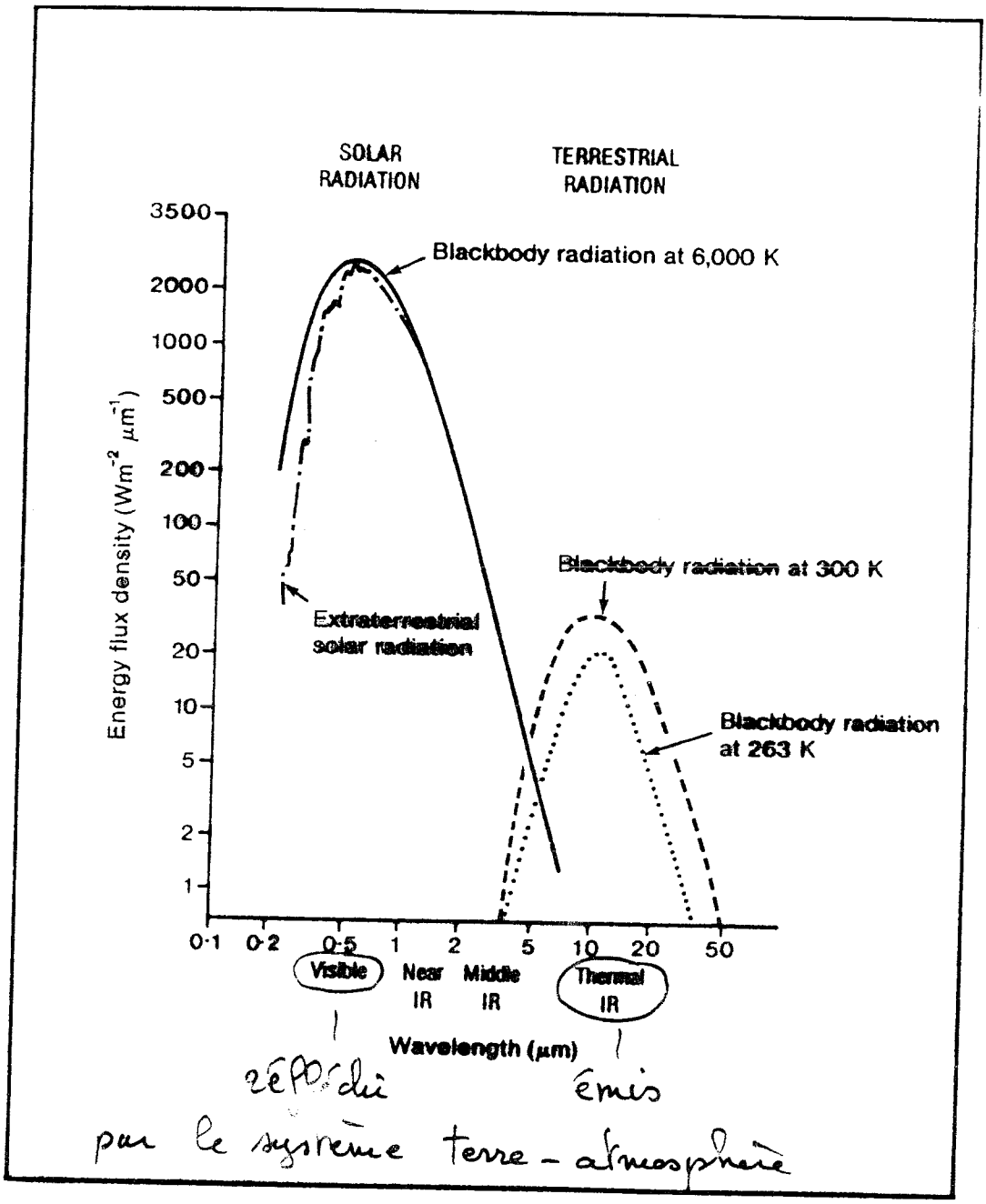
Capteurs multispectraux

Imageurs 2D en (x, y) : visent la surface

Profileurs 3D : visée aux limbes

DOMAINE SPECTRAL "OPTIQUE"

[0,4 - 15 µm[



The spectral distribution of solar and terrestrial radiation. Note the logarithmic scales on both axes. (After Barry and Chorley 1982)

ELEMENTS D'UN IMAGEUR OPTIQUE

Optique collectrice

Détecteur dans le plan focal
- film, tube TV, CCD (vis
- photodiodes (IR)
- photocathodes (UV)

Filtre spectral ou plusieurs

Système de balayage éventuel

Electronique d'amplification

Traitement du signal et codage numérique

Multiplexage

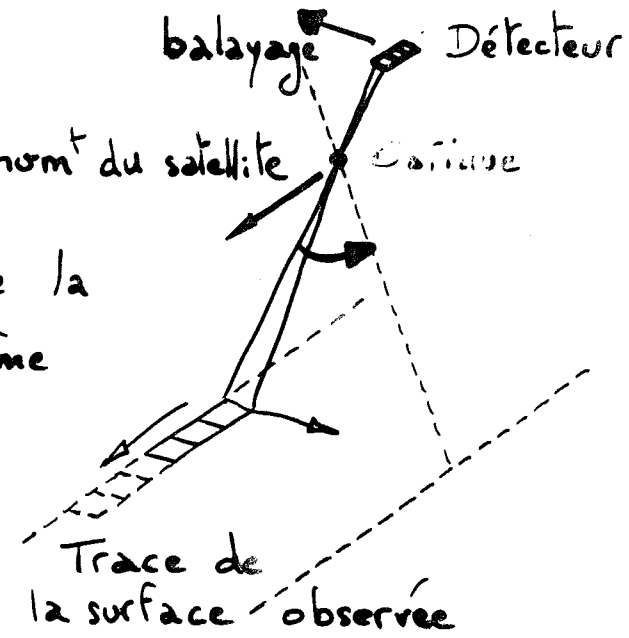
Stockage de bord éventuel

Régulation thermique éventuelle

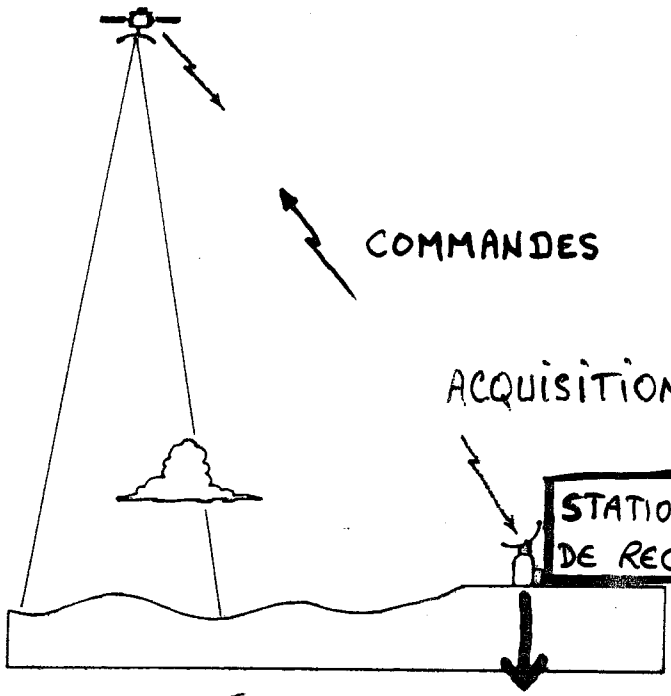
Système d'étalonnage éventuel

Transmission

Exemple d'observation de la surface à l'aide d'un système à barrette de détecteurs et balayage



SEGMENT SOL



Données de Niveau 0

DONNEES BRUTES

STOCKAGE SUR BANDE MAGNETIQUE "CCT"

CENTRE DE CALCUL

PRE-TRAITEMENT:
mise au format
recalage géométrique

IMAGES RECTIFIEES

Niveau 1

TRAITEMENT MATHEMATIQUE:
extraction de paramètres géophysiques

Niveau 2
PRODUITS DERIVES
Ex: T_s)
COMPOSITIONS SPATIO-TEMPORELLES

Niveau 3

AGENCE DE DISTRIBUTION

SERIES DE MATRICES NUMERIQUES SUR BANDE
TIRAGES PHOTO
NEGATIFS

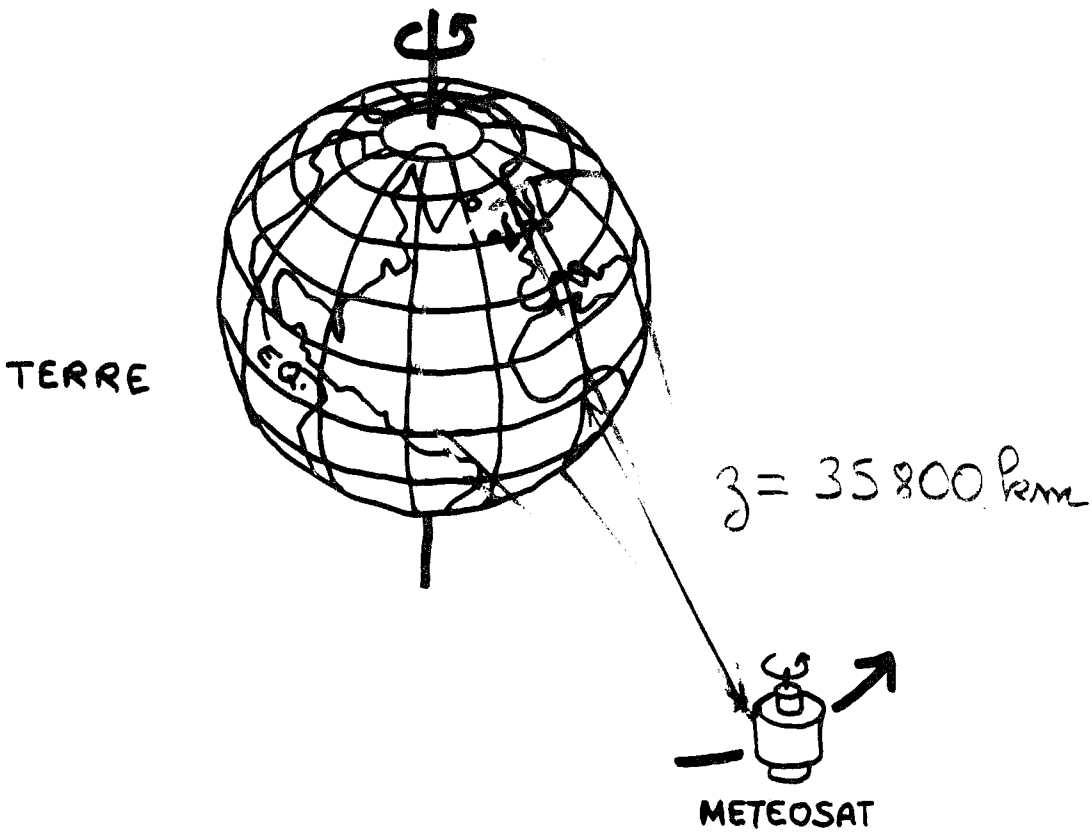
SATELLITES

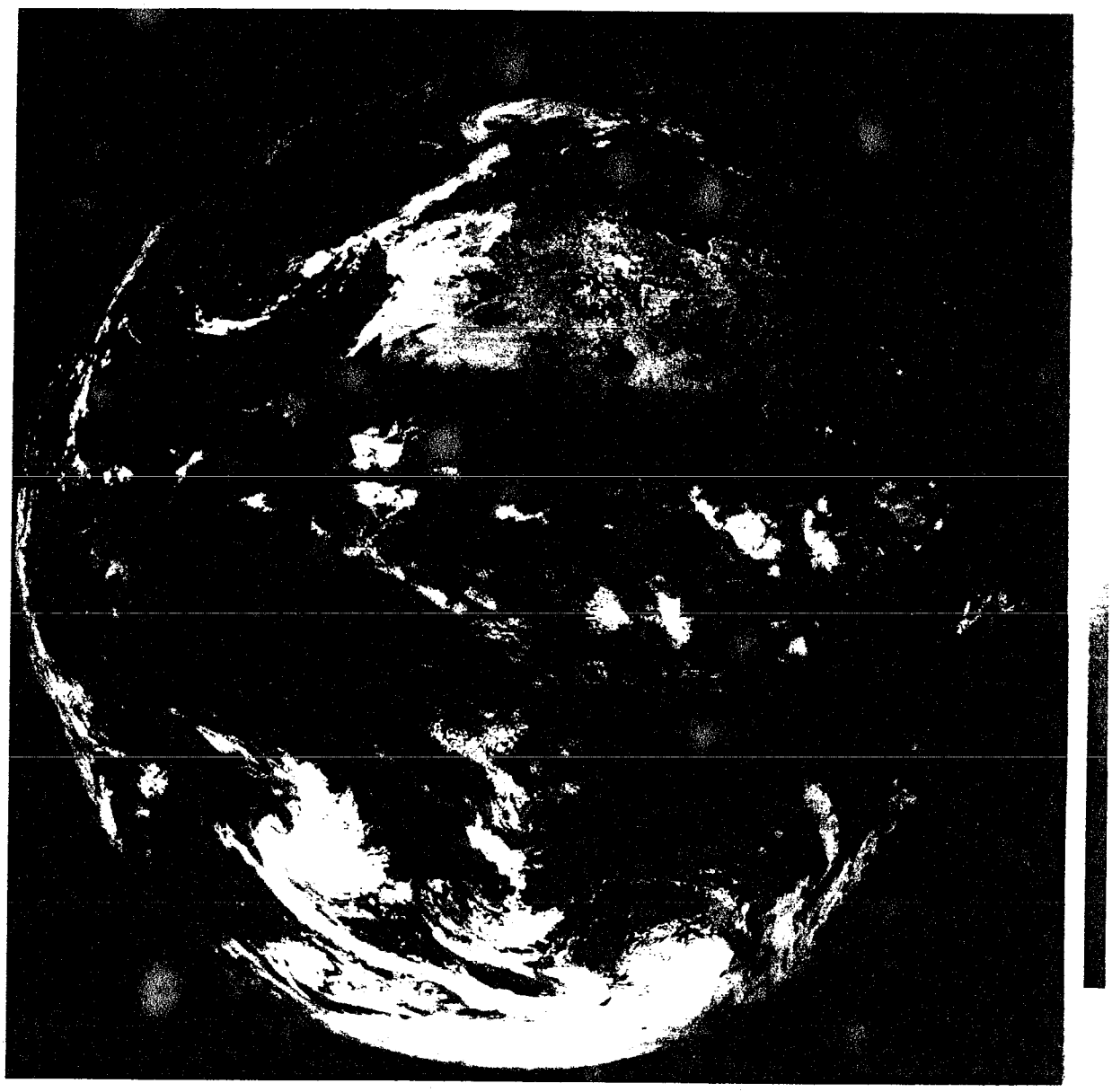
- GEOSTATIONNAIRES
- POLAIRES HELIOSYNCHRONES

<u>Satellite géostationnaire</u> : tourne en synchronisme avec la Terre, avec une orbite circulaire contenue dans le plan équatorial.

Exemple : METEOSAT

Voir une portion constante du globe





METEOSAT 1981 MONTH 10 DAY 17 TIME 1155 GMT (NORTH) CH. VIS 2
NOMINAL SCAN/RAW DATA SLOT 24 CATALOGUE 1034610146

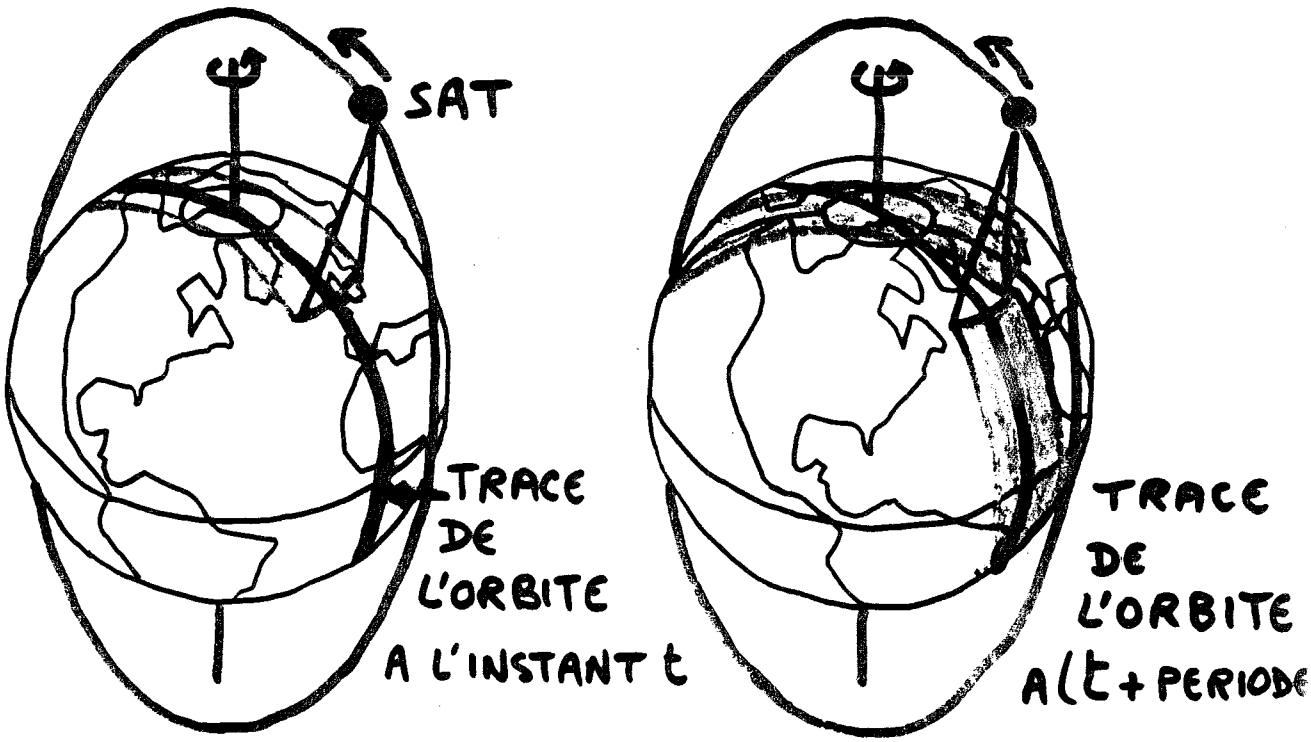
0,4 - 1,1 µm

<u>Satellite héliosynchrone</u> : orbite circulaire dans un plan quasi polaire en position constante par rapport au soleil.

Exemple : SPOT

Voir un même lieu à une heure locale constante.

Orbite circulaire : $z = cte$ (200 à 1500 km)
$\Rightarrow$ Rapport d'echelle constant



SPOT 1 panchromatic image of Montreal, 27 February 1986. The pixel size is 10m. (Copyright CNES 1986)

IMAGERIE

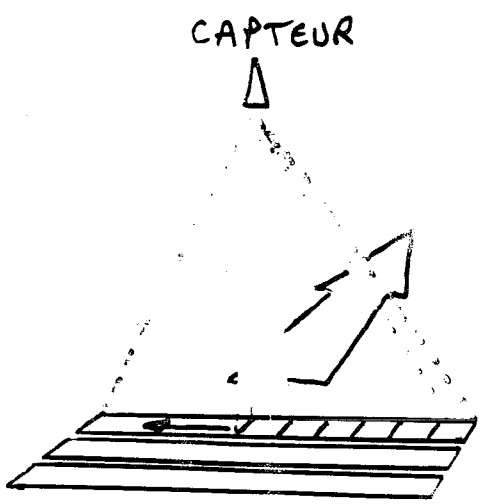
IMAGE DIGITALE = MATRICE (x,y)

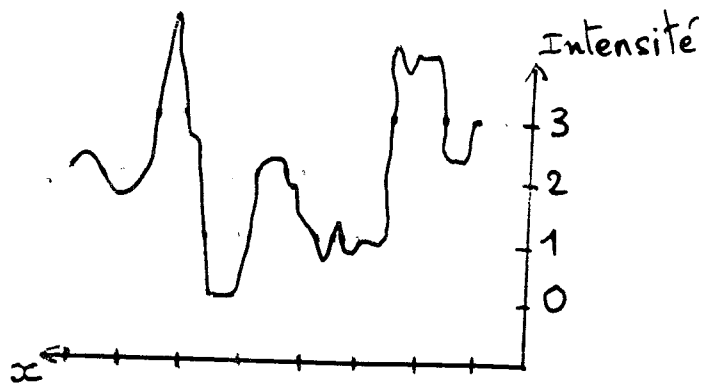
$$P(x_i, y_j) = N_{ij}$$

$N \in [0 ; 255]$ mots de 8 bits

0	0	0	0	0	0	0	0	= 0
1	1	1	1	1	1	1	1	= 255

CAPTEURS EMBARQUES = SCANNERS





ECHANTILLONNAGE SUIVANT UNE MAILLE DISCRETE

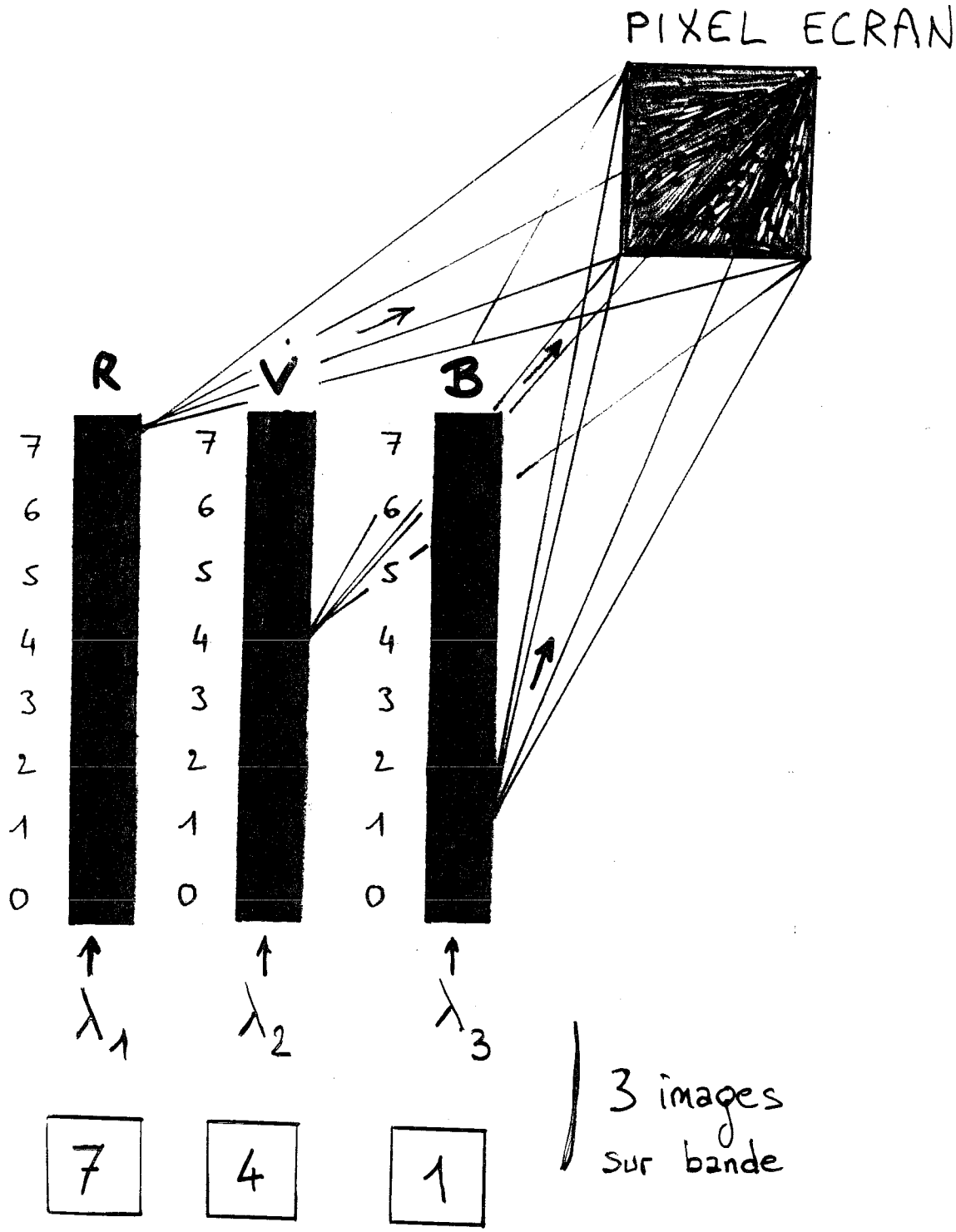
CIBLE CONTINUE

FILTRE DE λ

MATRICE NUMERIQUE RESULTANTE

1	1	2	3
1	2	3	3
2	3	3	1
3	3	1	0

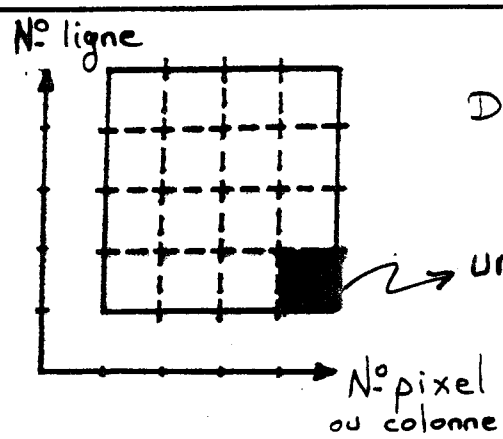
COMBINAISON COLOREE DE PLUSIEURS CANAUX



4 bits 4 bits 4 bits $\Rightarrow$ 12 bits

dégradation éventuelle de dynamique pour s'adapter au nombre de couleurs max possible

LES DIMENSIONS D'UNE IMAGE



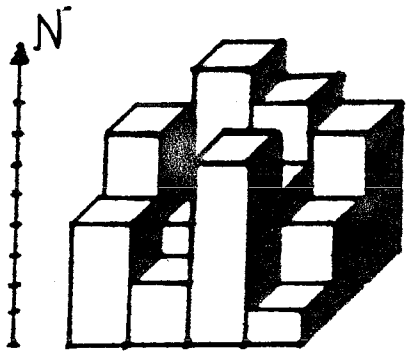
DIMENSIONS GEOMETRIQUES

ligne / colonne

un pixel

RESOLUTION SPATIALE

Facteur d'échelle

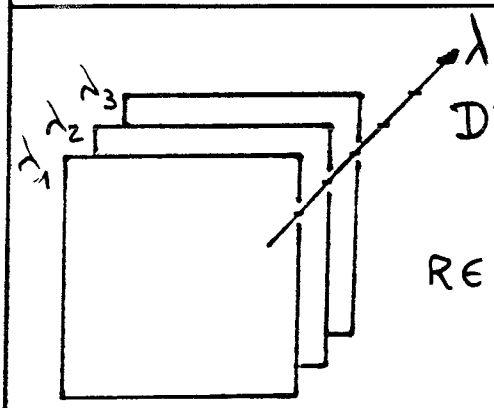


DIMENSION RADIOMETRIQUE

intensité

RESOLUTION RADIOMETRIQUE

$\Delta N \leftrightarrows \Delta$ Radiance

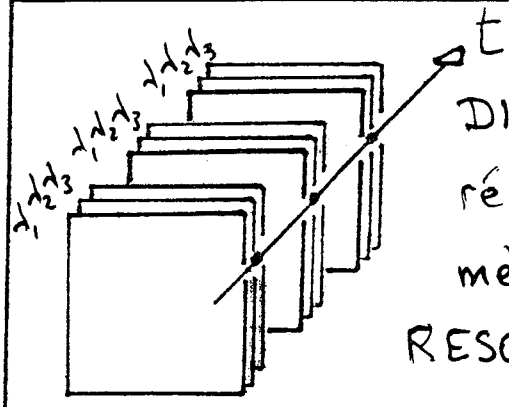


DIMENSION SPECTRALE

bandes spectrales λ_i

RESOLUTION SPECTRALE

largeurs de bandes $\Delta\lambda_i$



DIMENSION TEMPORELLE

répétitivité d'obs. d'une même cible

RESOLUTION TEMPORELLE

Δt

ETALONNAGE Calibration

nécessaire pour convertir un compte numérique (N) en grandeur physique

en général : Luminance $(W\ m^{-2}\ Sr^{-1}) = K_1 + K_2\ N$

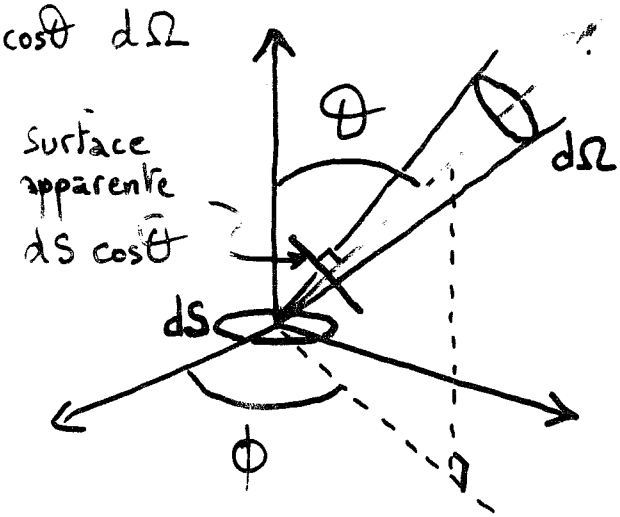
dérive : $K_1(t)$, $K_2(t)$

LUMINANCE Radiance d'une surface :

puissance émise par unité d'angle solide et par unité de surface apparente

$$L_\lambda(\theta,\phi) = \frac{d^2 W_\lambda}{dS \cos\theta \ d\Omega}$$

W_λ → puissance (en Watt)



Surface lambertienne :

la luminance ne dépend pas de la direction (θ, ϕ).

REMARQUES

- Soit 1 image "classique" de 1024 x 1024 pixels à 2 λ :

  1 octet par pixel $\Rightarrow$ 2 Mo de mémoire

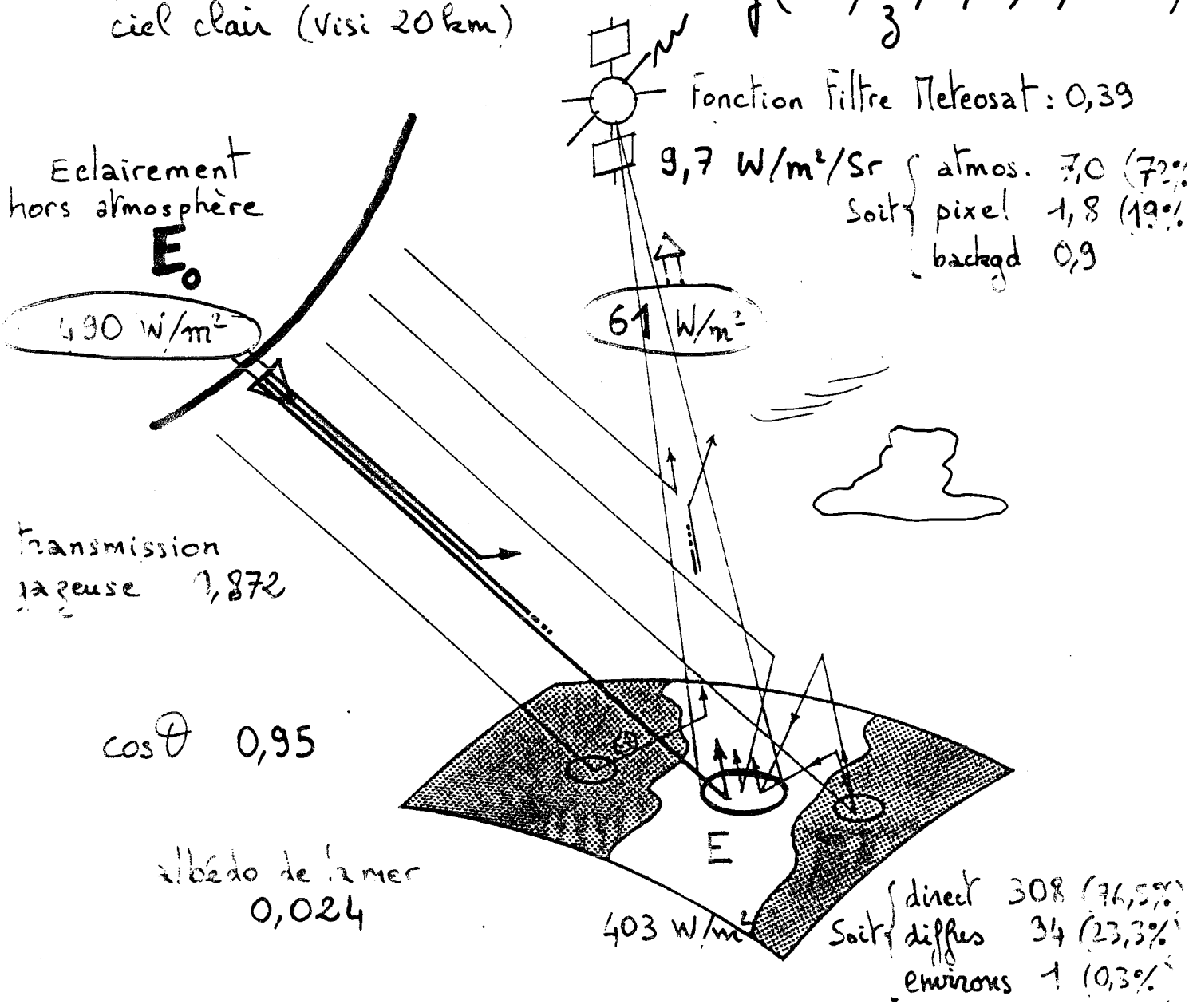
- Chaque distributeur a un format de fichier qui lui est propre : aucun standard (!) sauf le support (bande magnétique 1600 bpi ($\longrightarrow$ 6250)).

- Les prix : quelques centaines à quelques milliers de francs

III - NOTIONS DE TRANSFERT RADIATIF

Ex : Observation de la Méditerranée occidentale
le 3 juillet 11h45
par Meteosat canal visible
ciel clair (visi 20 km)

$$I = f\left(I_0, \frac{1}{z}, r, dt, \lambda, I.R.A.\right)$$



INTERACTIONS RAYONNEMENT - ATMOSPHERE :

- DIFFUSION (Scattering)
- ABSORPTION
- REFLEXION
- EMISSION

$f(\lambda)$

SUPPORT : LES ONDES ELECTROMAGNET^{q}.

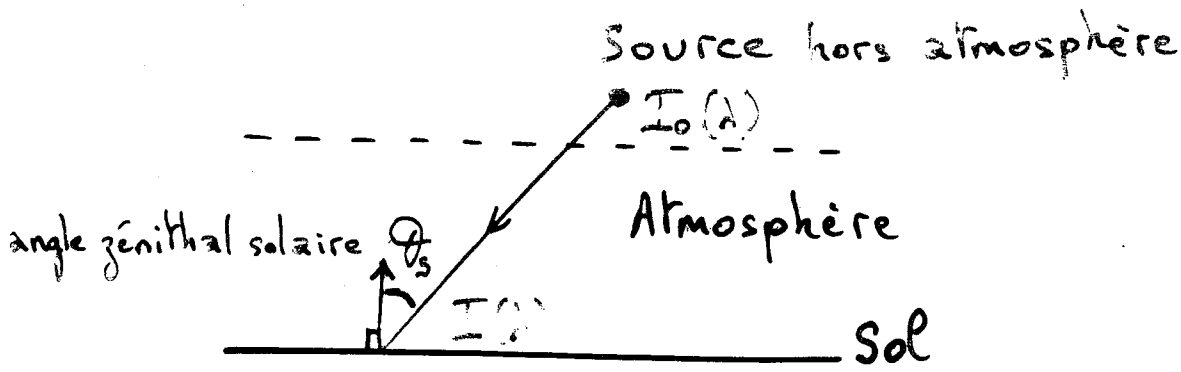
- les photons interagissent avec la matière
- ils vont vite et loin à travers l'atmosp.
- ils voyagent hors atmosphère

LIMITATION: LA TRANSPARENCE ATMOSPHERIQUE

- bandes d'absorption gazeuse
- nuages
- diffusion Rayleigh (molécules)
  aérosols

EXTINCTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

EPAISSEUR OPTIQUE



$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \underbrace{\exp(-\tau(\lambda) \times M)}_{\text{Transmission } T(\lambda)}$$

$\tau(\lambda)$: épaisseur optique atmosphérique

M : masse d'air optique relative ($M = 1$, $\theta = 0$)

Remarque : $I_0 = f(t)$

<u>Epaisseur optique :</u>

$$\tau(\lambda) = \tau_R(\lambda) + \tau_g(\lambda) + \tau_{aér}(\lambda)$$

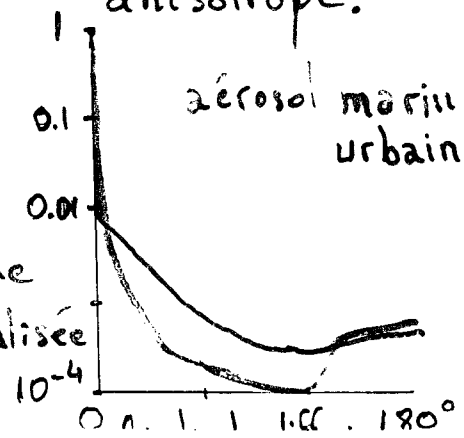
diffusion Rayleigh	absorption gazeuse	diffusion* + absorption aérosols
P	$[O_3, H_2O, \ldots]$	indice granulométrie

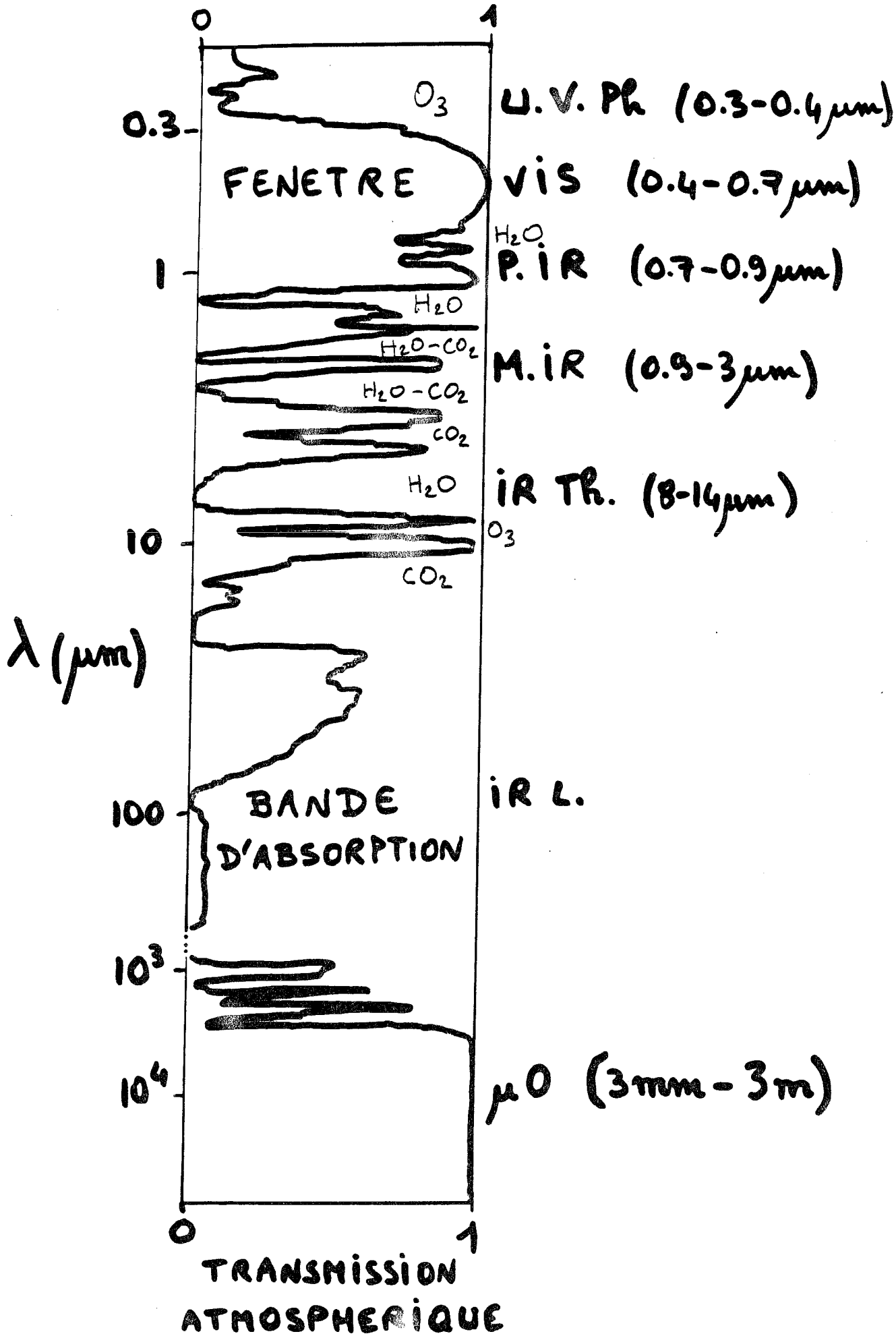
*anisotrope :

<u>Transmission :</u>

$$T(\lambda) = T_R(\lambda) \times T_g(\lambda) \times T_{aér}(\lambda)$$

Fonction de phase normalisée




0
1
0.3
1
10
100
10^3
10^4
λ (μm)
O_3
U.V. Ph (0.3-0.4 μm)
FENETRE
VIS (0.4-0.7 μm)
H_2O
P. IR (0.7-0.9 μm)
H_2O
H_2O-CO_2
M. IR (0.9-3 μm)
H_2O-CO_2
CO_2
H_2O
IR TH. (8-14 μm)
O_3
CO_2
BANDE D'ABSORPTION
IR L.
μO (3mm-3m)
0
1
TRANSMISSION ATMOSPHERIQUE

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Puissance réémise}}{\text{Puissance reçue}}$$

de surface

(α)

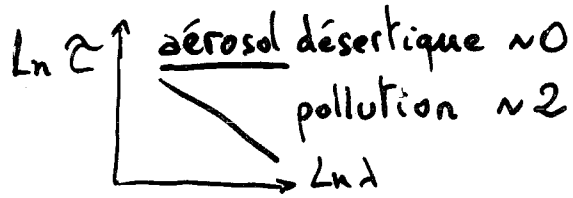
mer : 0,95 – 1

désert : 0,3 – 0,4 nuages

$$\text{Albédo de diffusion simple } (\omega) = \frac{\text{Diffusion}}{\text{Extinction}}$$

aerosols : 0,9 à 1

Exposant d'Angström (α_a)



EMISSION

Luminance d'un corps noir (loi de Planck)

$$L(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{(hc/\lambda kT)} - 1\right)}$$

($W\,m^{-2}\,sr^{-1}\,m^{-1}$)

$$\lambda_{max} = 2898\ T^{-1}$$

(μm) (K) (loi de Wien)

REFLEXION

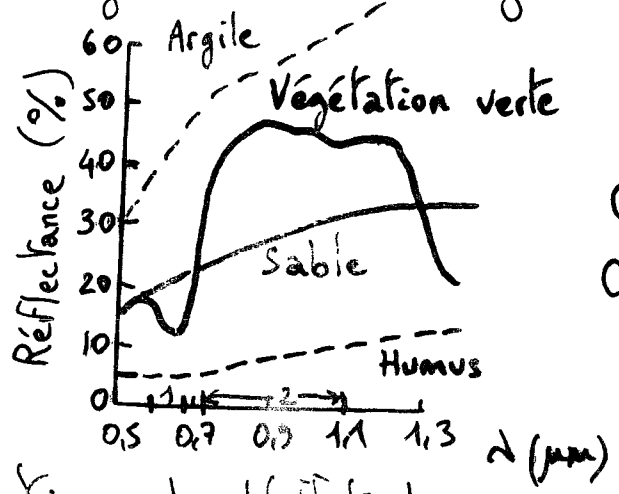
- à la surface entre deux milieux
- réflexion spéculaire (rugosité de surface)
- en volume : l'onde pénètre le 2nd milieu et y subit des effets de réflexion multiple et de diffusion.

CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES D'OBSERVATIONS DE SURFACE

Ex : $$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R}$$

Normalized Differential Vegetation Index

a



AVHRR

Canal 1 : 0,58-0,68 µm

Canal 2 : 0,725-1,10 µm

Correction de l'effet des aérosols :

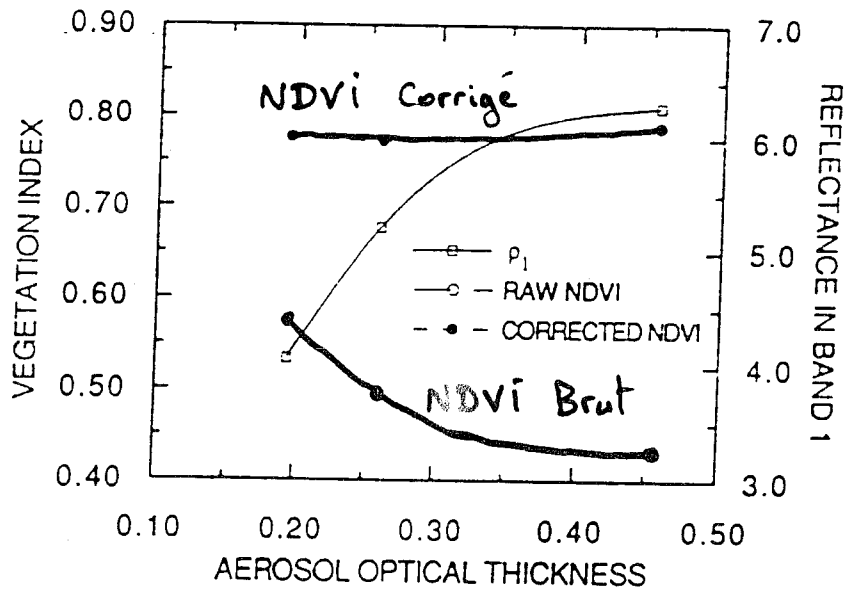


Fig. 14. Vegetation index (dashed line, left y-axis) and AVHRR band 1 reflectance (solid line, right y-axis) over boreal forest near Peterborough, Canada, as a function of the aerosol optical thickness. The open dots correspond to the raw data and the full dots to the aerosol corrected NDVI.

Tanré et al., 1992 a

SATELLITES		RESOLUTION TEMPORELLE	RESOLUTION SPATIALE
METEOROLOGIQUES			
Obs. de l'Atmosphère ou de surface à grande échelle			
– GEOSTATIONNAIRES		20-30 min	0,8-11 km
METEOSAT	Europe		
GOES	U.S.A.		
GMS	Japon		
(INSAT	Inde)		
(GOMS	URSS)		
– POLAIRES		0.5 – 3 j	0,6 – 17 km
NOAA/TIROS	USA		
DMSP	USA		
(METEOR	URSS)		
(KOSMOS	URSS)		
"CARTOGRAPHIQUES"		2-18 j	5 - 250 m
Obs. Fines de surface			
LANDSAT	USA		
SEASAT	USA		
SPOT	FRANCE		
Navette	USA		
"SCIENCES DE LA TERRE" (GEOSPHERE-BIOSPHERE)			
GEOSAT	F/USA		
SEAWIFS	USA (1993)		~1 - 5 km
ADEOS	JAPON (1996)		
Plateformes	(fin du siècle)		
CZCS	USA (1978-1983)		
ER[illegible]-1	EUROPE		

APERÇU DES PRODUITS

IMAGES D'ORIGINE

Satellites Météo

METEOSAT		VIS-P.IR, WV, IRTh
TIROS-n/NOAA	(AVHRR)	VIS, P.IR, WV, 1 ou 2 IRTh
(DMSP	(SSM/I)	VIS-P.IR, IR Th, n µO)

Satellites Carto

LANDSAT	(MSS)	Vert, Rouge, Rouge lointain, P.IR
	(TM)	Bleu, Vert, Rouge, 2 P.IR, M.IR, IR Th
SPOT	(HRV-XS)	Vert, Rouge, P.IR
	(HRV-P)	VIS
† SEASAT		Radars (altimètre, imageur µO)
† NIMBUS-7	(CZCS)	Bleu, Vert, Jaune, Rouge, P.IR, IR Th

PRODUITS DERIVES DE FAÇON OPERATIONNELLE

METEOSAT (ASE / ESA)

- Vents apparents (déplacement des nuages)
- Températures de Surface (max. sur 5j)
- Couverture nuageuse
- Altitude du sommet des nuages
- Index de Précipitation
- Classification / Analyse climatique

METEOSAT (ORSTOM)

- Convergence intertropicale :
  - latitude hebdo à 28W (large Sénégal).
  - intensité de la convection (occurrences mensuelles de nuages à sommet froid).
- Champs thermiques de surface en Afrique de l'Ouest.

NOAA /AVHRR (CMS Lannion)

- Températures de surface de la mer (zône Europe)
  - moyenne des champs quotidiens } hebdo et
  - carte des fronts thermiques } mensuelles

NOAA/AVHRR (GDTA Toulouse)

- Indice de végétation
- Températures de surface jour / nuit
- Réflectances (albédo)

} Europe et Afrique de l'Ouest, j, sem, mois, an

NOAA/AVHRR (NOAA)

- Epaisseur optique Aerosols sur l'Ocean, hebdo

RESUMÉ DES APPLICATIONS
(non exhaustif)

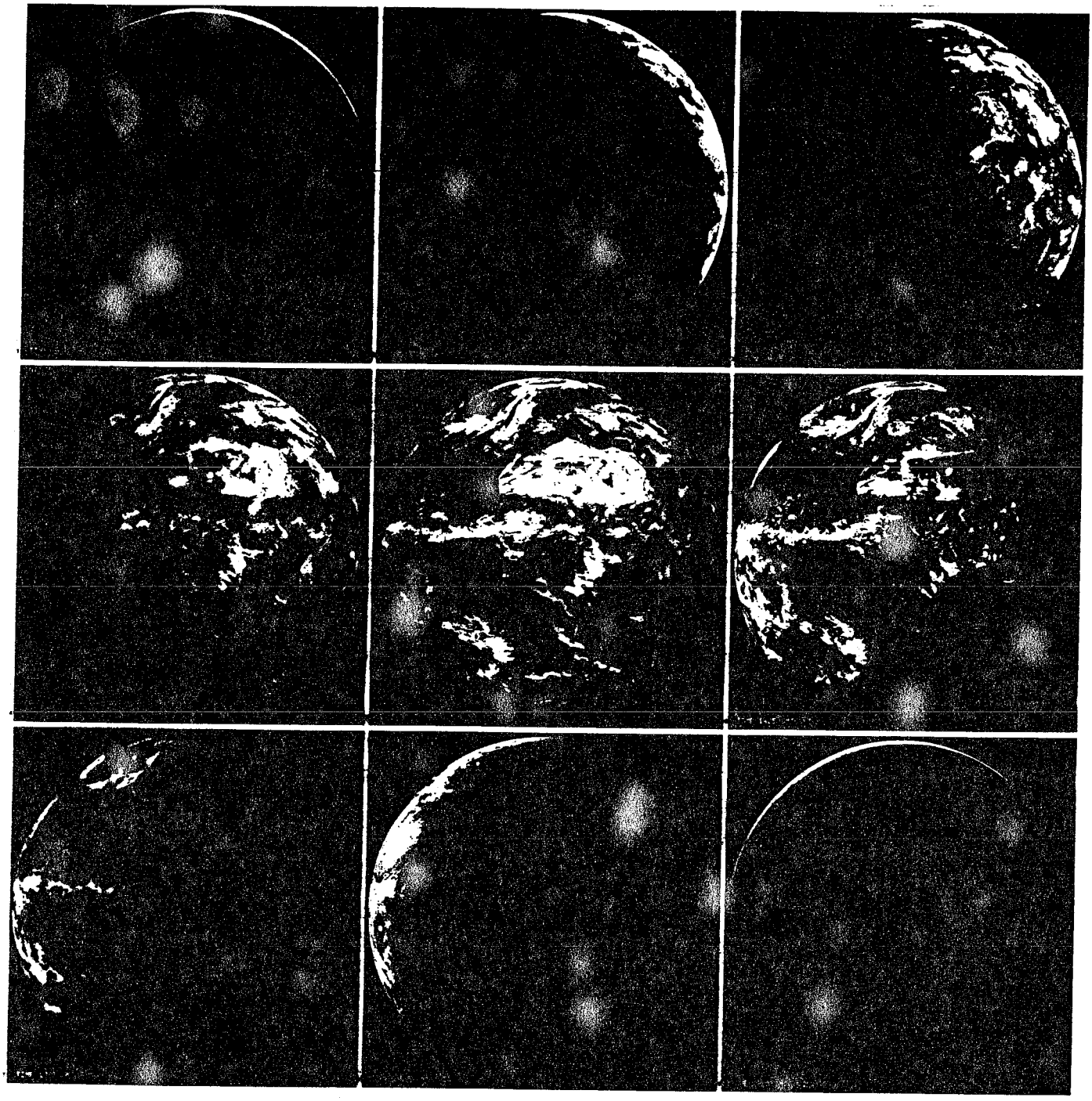
CARTOGRAPHIE	évolutions temporelles
ALTIMETRIE	GEOÏDE
BIOSPHERE	VEGETATION CONTINENTALE
	CHLOROPHYLLE OCEANIQUE
	FEUX
GEOLOGIE	ROCHES DE surface
	STRUCTURES, LINÉAMENTS
	SOLS type, humidité, T_s, couverture végét
	VOLCANS
ATMOSPHERE	BILANS THERMIQUE ET RADIATIF
	PRECIPITATIONS
	VENTS
	PROFILS DE T, h
	AEROSOLS
HYDROSPHERE	
OCEANS, FLEUVES	T_s
	Chlorophylle
	Matières en suspension
	Circulation
	Glace
SOLS	Couvert neigeux
	Humidité
ATMOSPHERE	Nuages
	Vapeur d'eau
	Précipitations

METEOSAT VIS

0h30 - 3h30 - 6h30

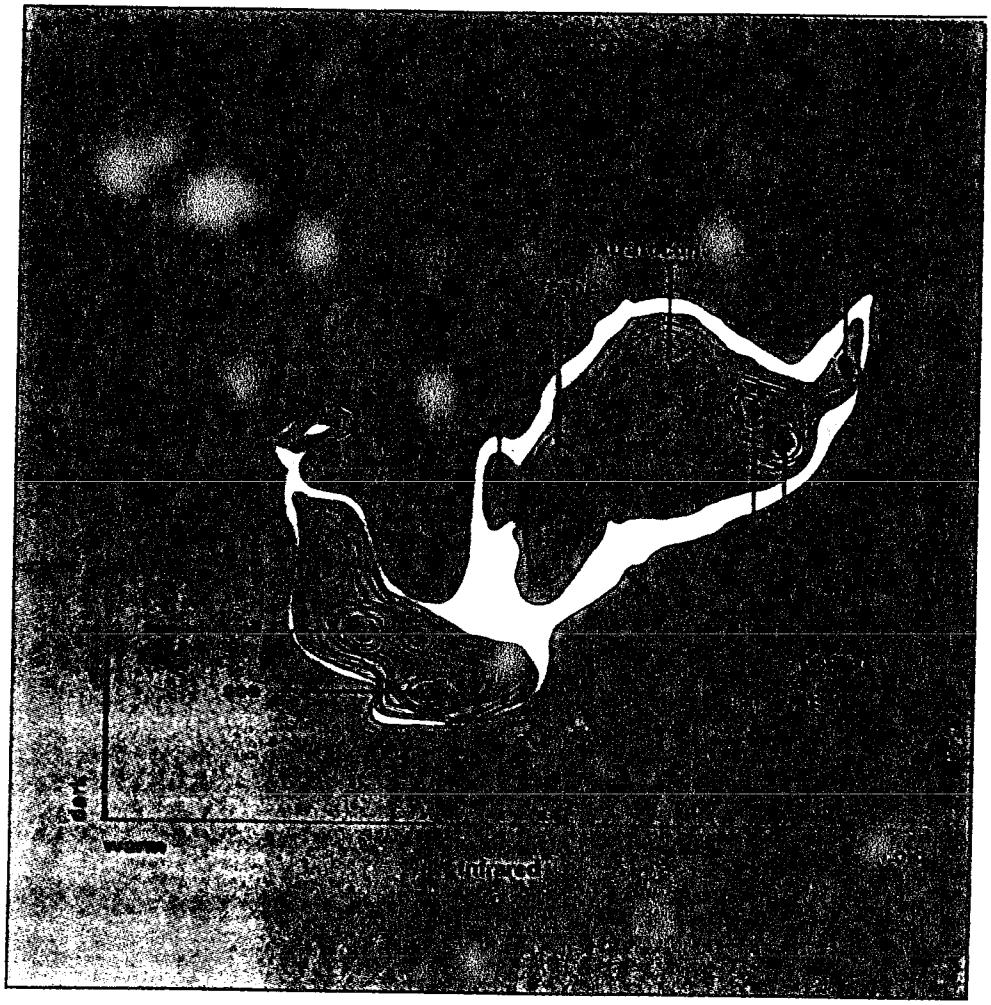
9h30 - 12h - 14h30

17h30 - 20h30 - 23h30



CLASSIFICATIONS METEOSAT

(ESA CLIMATE DATA SET)

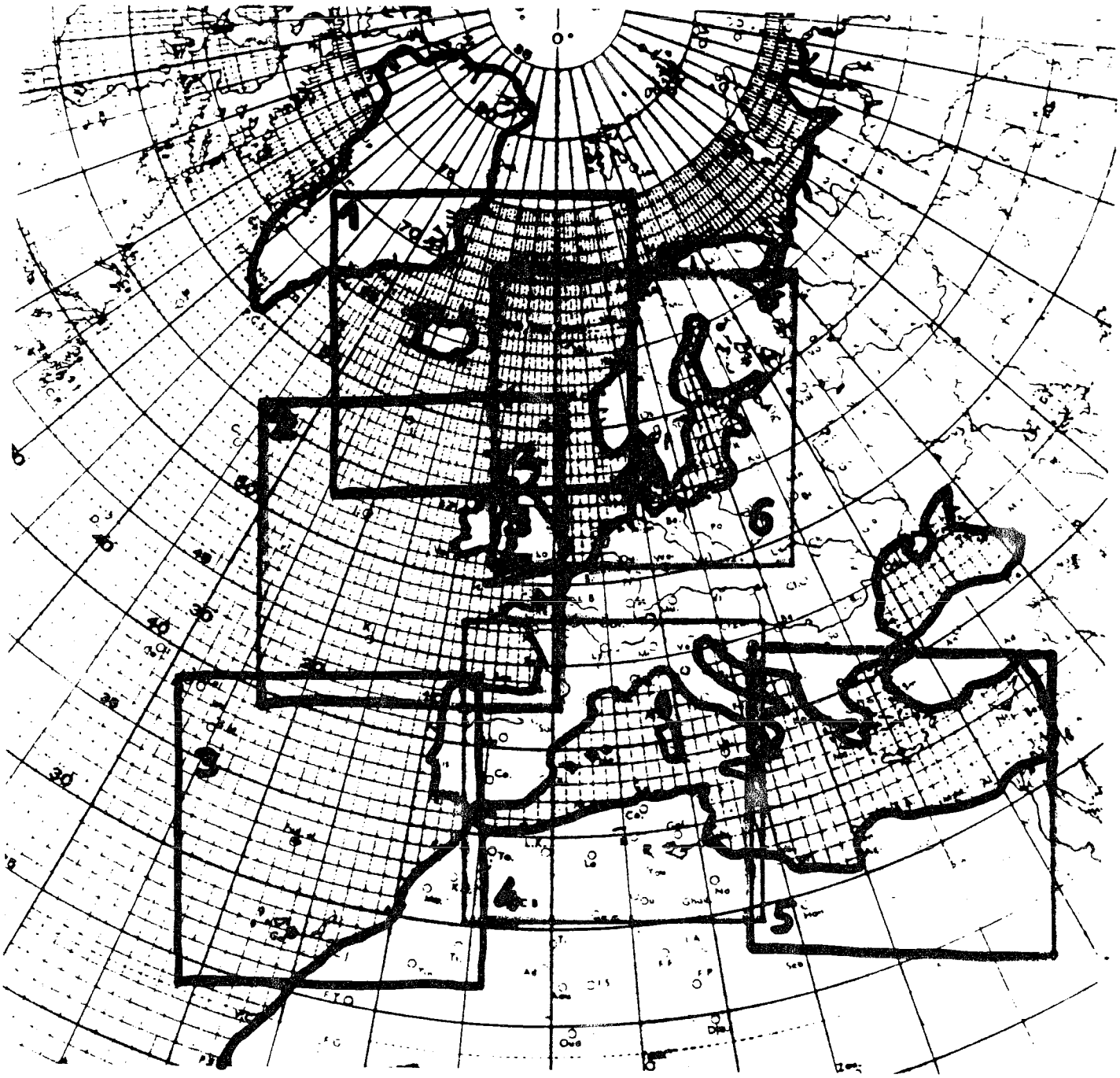


Two-dimensional image histogram.

Histo 2D : IR-VIS et IR-WV

→ moyenne, variance, nb de pixels de chaque nuage identifié

Analyse toutes les 3 heures



Découpage des 6 zones (1024 x 1024) analysées dans le cercle d'acquisition de LANNION pour la détermination de la Température de surface de la mer :

ZONE 1 - MER DE NORVEGE

ZONE 2 - GOLFE DE GASCOGNE

ZONE 3 - CANARIES

ZONE 4 - MEDITERRANEE OCCIDENTALE

ZONE 5 - MEDITERRANEE ORIENTALE

ZONE 6 - MER DU NORD

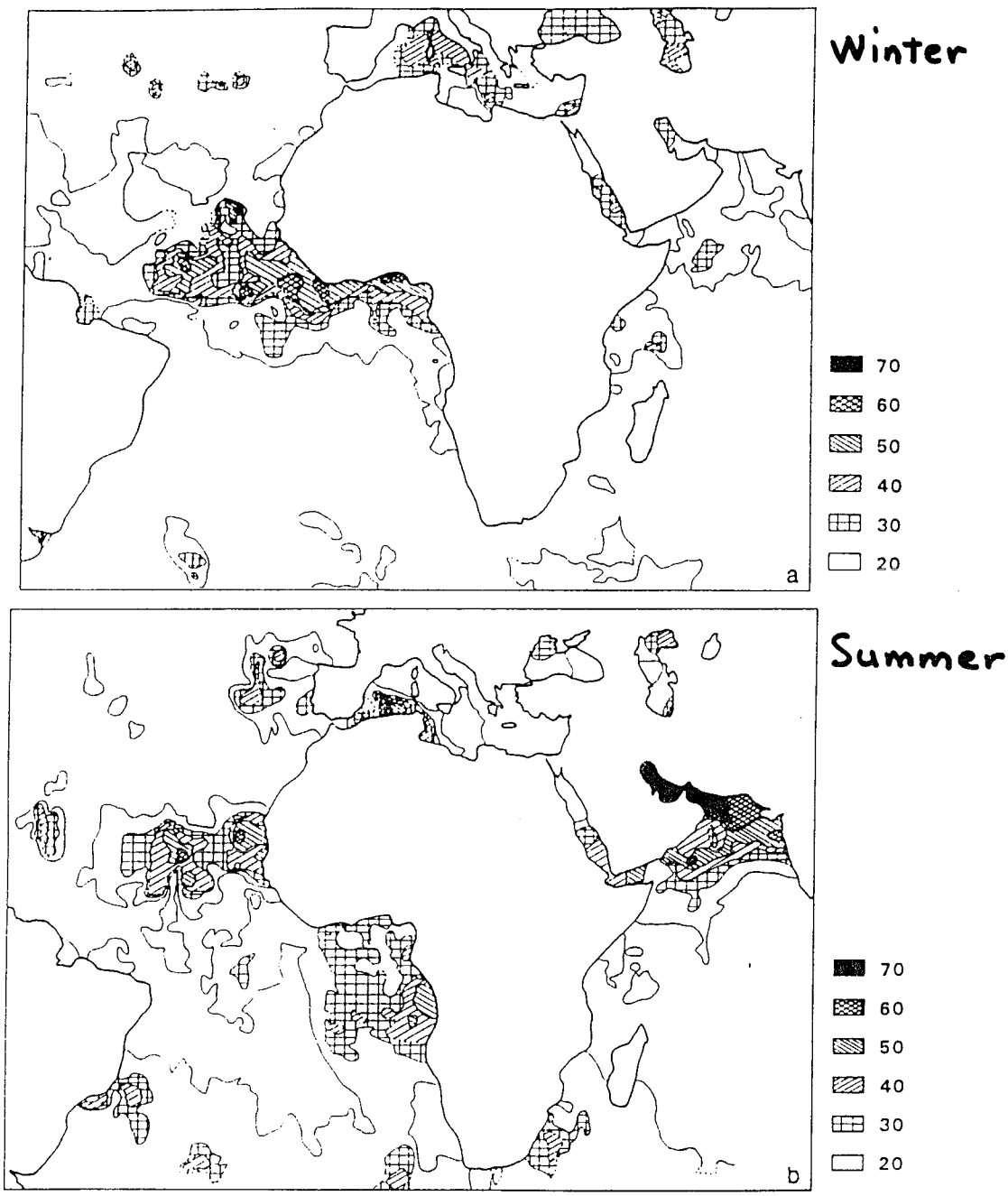
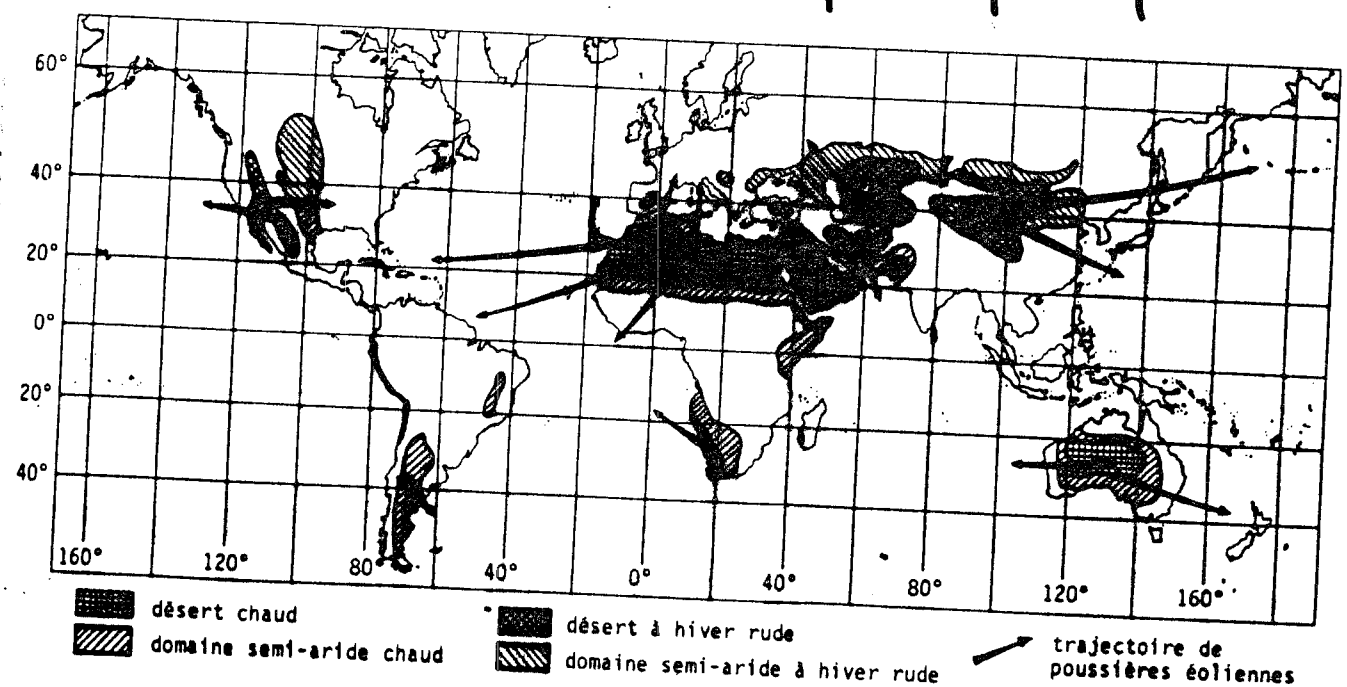


Fig. 7 (a) Weekly average aerosol optical depth (×100) from satellite imagery over the ocean (AVHRR, NOAA), 21–28 January 1988. (b) Weekly average aerosol optical depth (×100) from satellite imagery over the ocean (AVHRR, NOAA), 27 August–3 September 1987. [From L. L. Stowe and C. R. N. Rao in S. Jousseaume (1990). Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model. *J. Geophys. Res.* 95 (D2), 1909–1941.]

Fig. 1

Régions-source de poussières et directions de transport principales



Meigs 53, Coudé-Gaussen 84

Traitement des images:

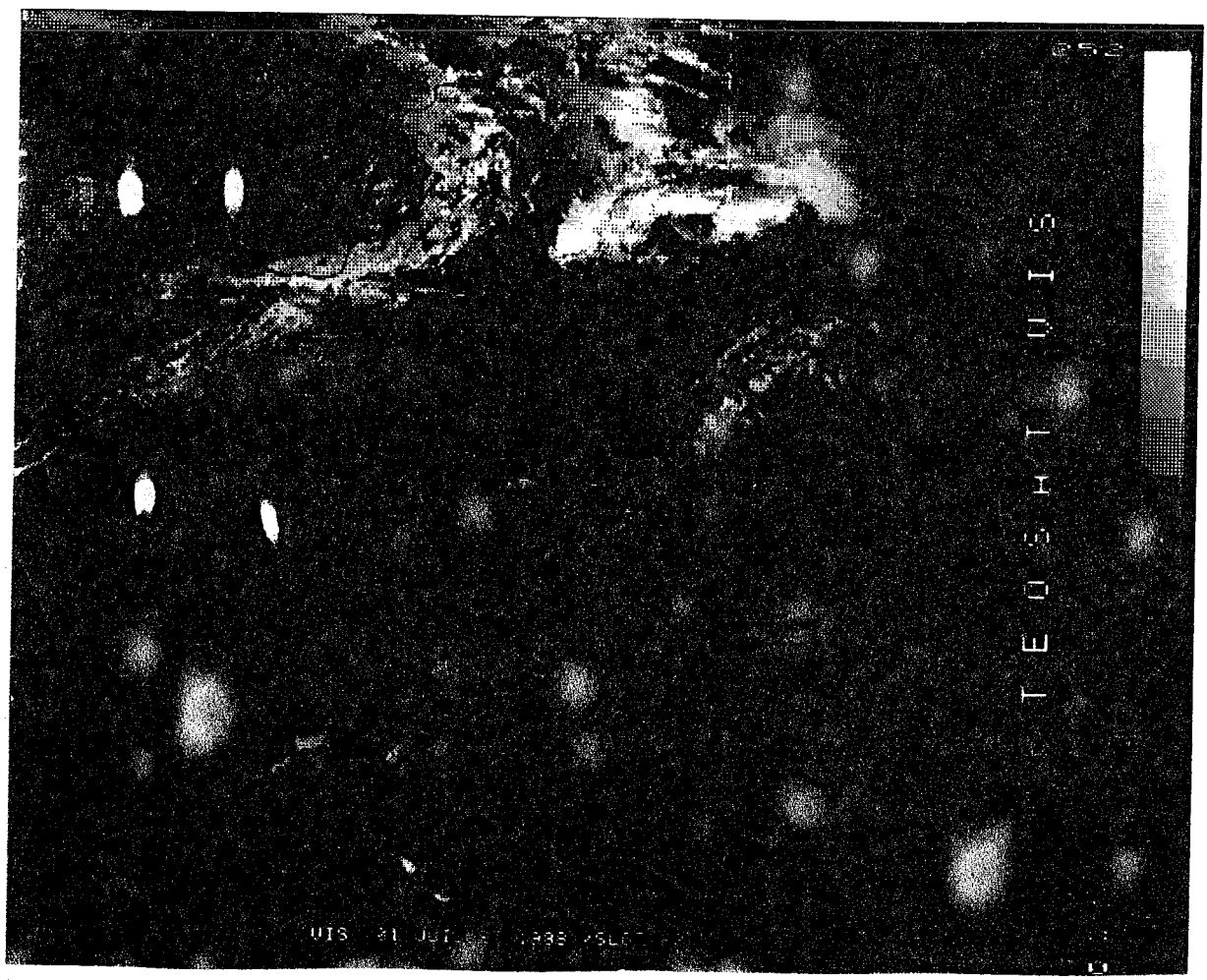
en aerosols

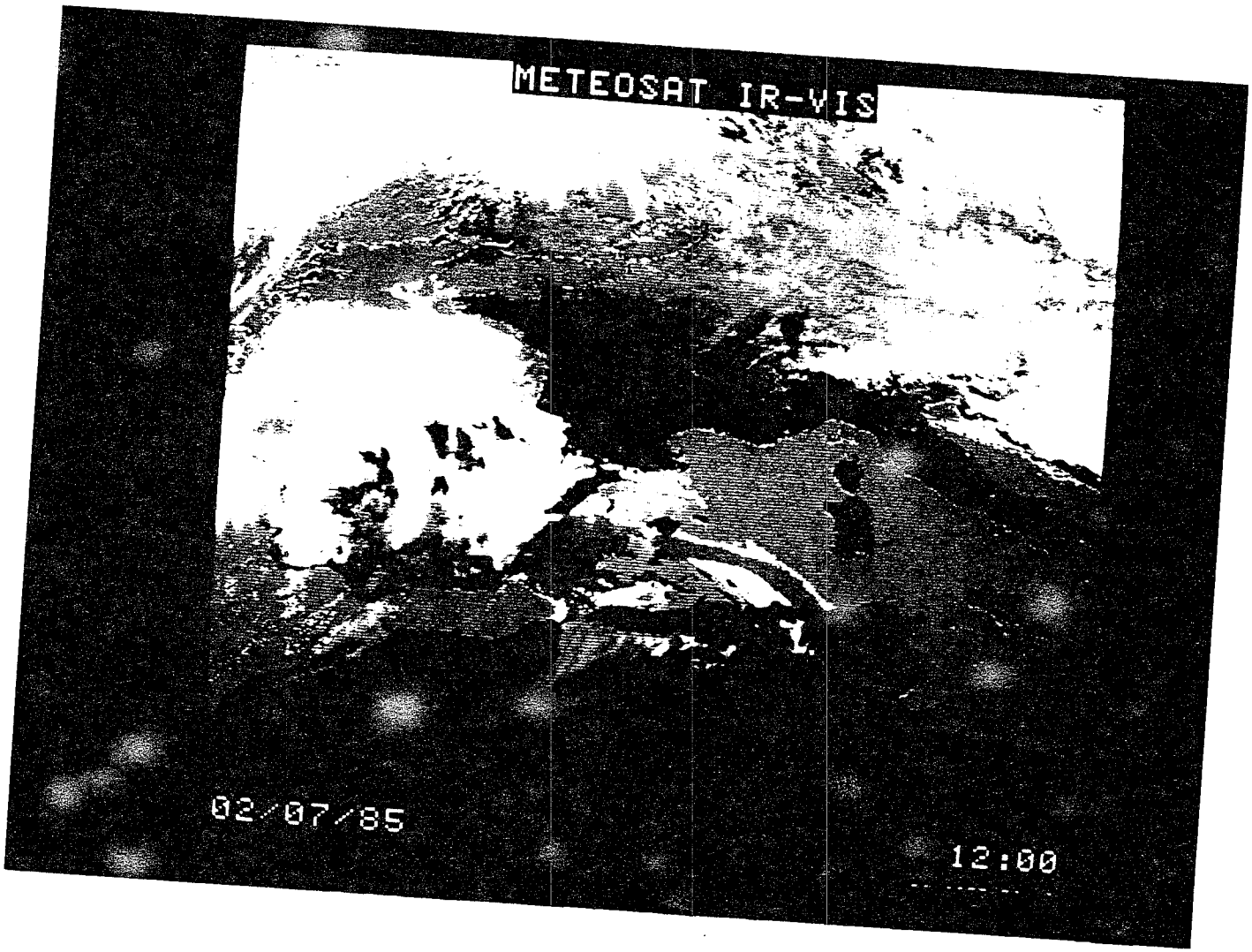
-> **seuillage**: CN visible < 60
CN infrarouge > 120
variance visible [3x3] < 8

-> **calcul de l'épaisseur optique**:
par inversion du signal satellitaire
programme 5S [Satellite Signal Simulation in the Solar Spectrum]

-> **conversion en charge d'aérosol**: $M = \sigma \times \tau$
m^2/g g/m^2

-> **interpolation** (méthode bilinéaire)




METEOSAT IR-VIS
02/07/85
12:00

* IMPACT DE L'AEROSOL SAHARIEN SUR LES RETOMBEES ATMOSPH. D'Al EN MEDITERRANEE OCC.:
  - 70% du Flux.

* INFLUENCE DES PRECIPITATIONS:
  - 2/3 du Flux d'Al sous Forme humide.
  - 30% du Flux annuel sur 1 seul épisode en 86.

* LES APPORTS FLUVIAUX SONT COMPARABLES EN MASSE, MAIS ILS RESTENT CONFINES SUR QUELQUES Km AUTOUR DES EMBOUCHURES.

Bergametti 87; Dulac et al. 89; Martin J-M et al. 89; Remoudaki 90.

AEROSOL DE POLLUTION AU-DESSUS DES ZONES INDUSTRIALISEES :

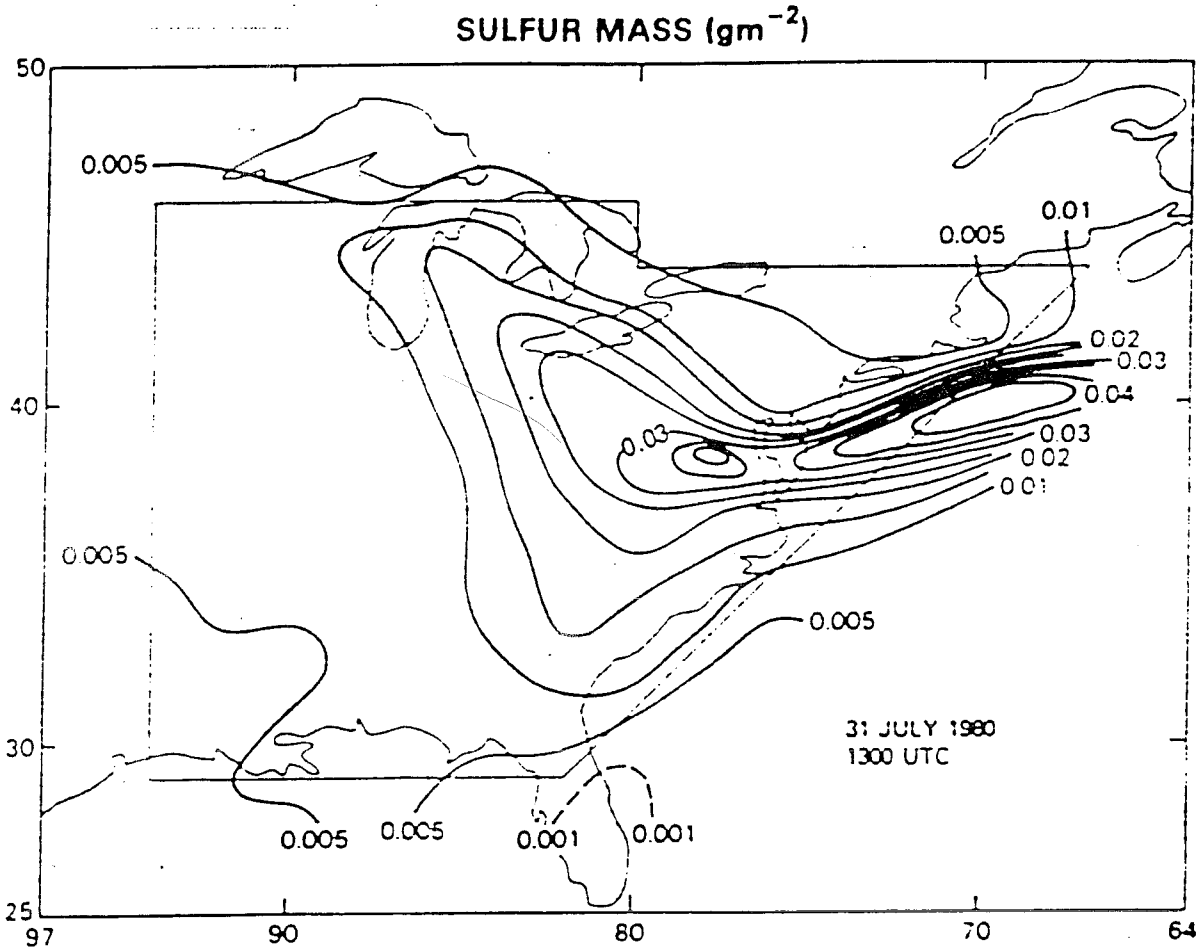
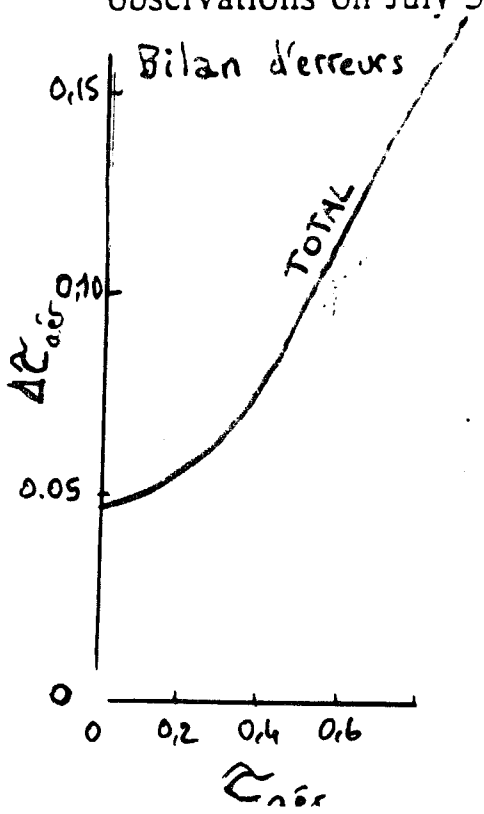


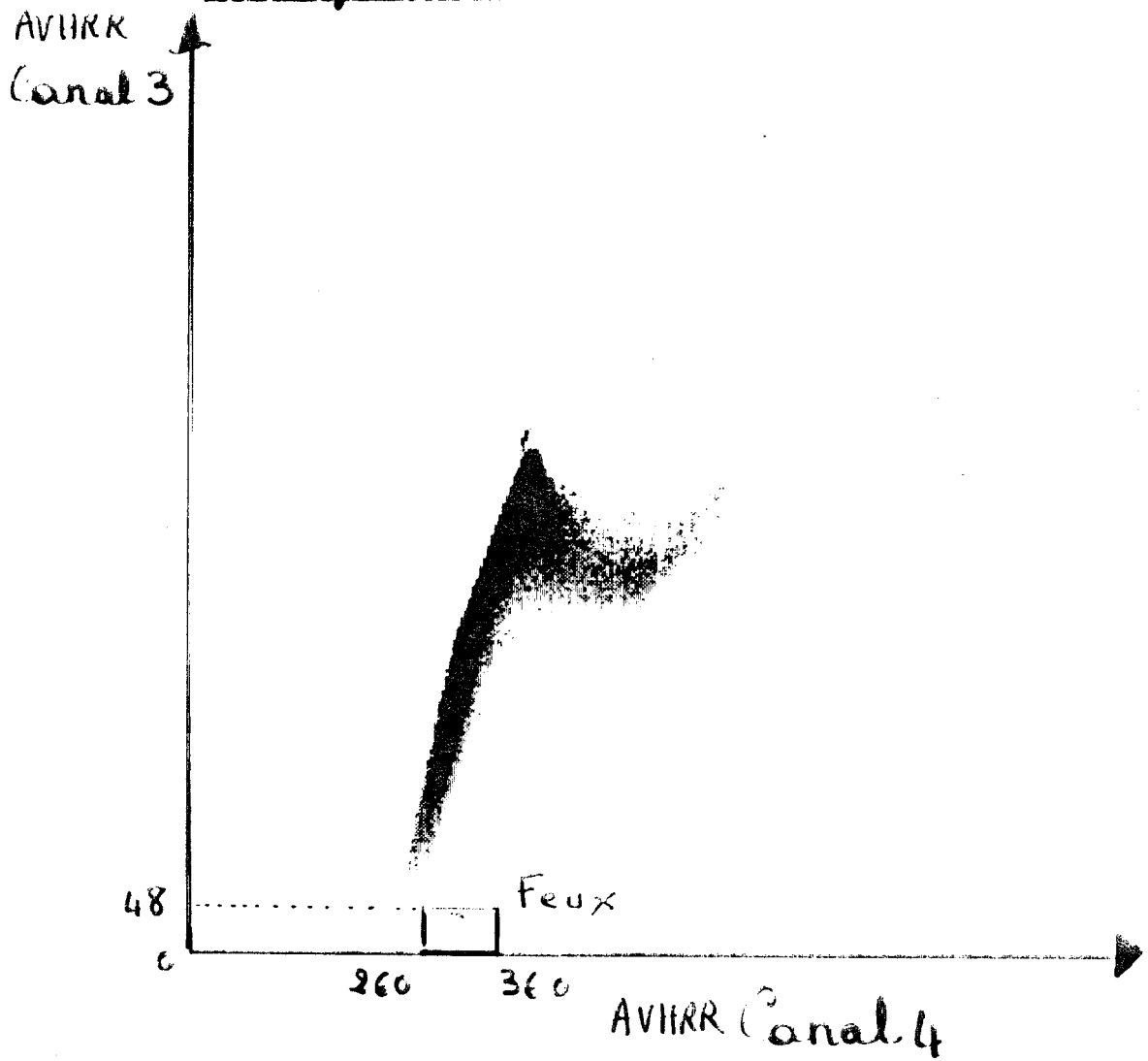
Fig. 21. Columnar mass loading of particulate sulfur obtained from GOES observations on July 31, 1980, in units of g m^{-2}



Fraser et al., 1984

APPLICATION AUX AEROSOLS CARBONES DANS LES FEUX DE SAVANE

Histogramme bicanaux



$T_3 > 515\,°K$

$T_3 \geq T_4 + 10\,°K$

$T_4 > 250\,°K$

(adaptation de Kaufman et al. 90)

influence de l'albédo sur l'effet des aerosols

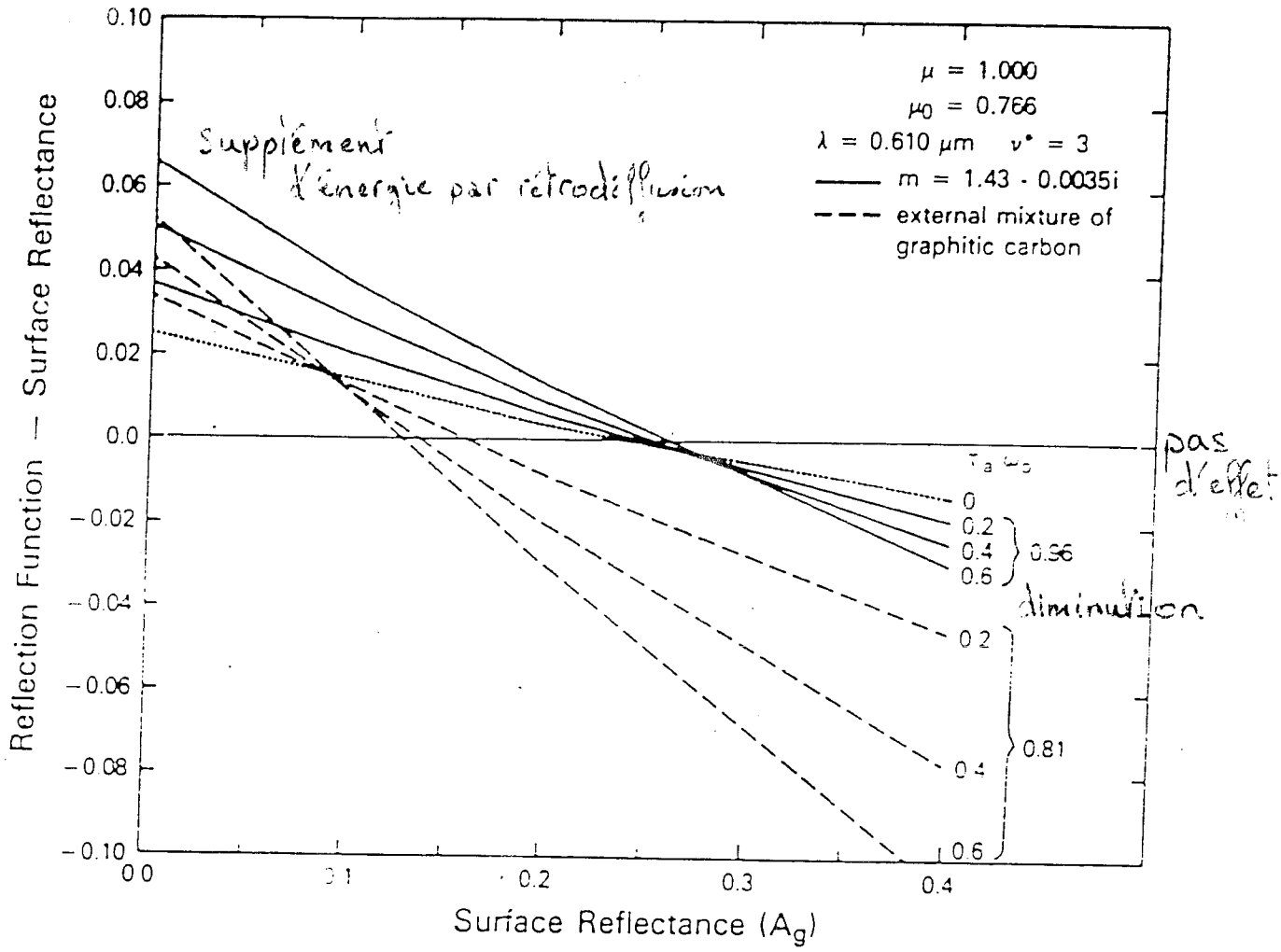


Fig. 22. Difference between the reflection function and surface reflectance at 0.61 μm as a function of surface reflectance for various values of the aerosol optical thickness τ_a and single scattering albedo ω_0. The dotted line corresponds to results for a Rayleigh atmosphere and the solid and dashed lines to an aerosol-ladened atmosphere having a Junge size distribution of the form $n(r) \propto r^{-4}$. Results apply to nadir observations ($\mu = 1$) when $\mu_0 = 0.766(\theta_0 = 40°)$ [25].

King et al., 1992

TENDANCES

RECHERCHE

INTERACTIONS GEOSPHERE-BIOSPHERE

TELEDETECTION

INSTRUMENTS SPECIALISES

T, Vent, Vagues, O_3, Précipitations, ...

PROFILS VERTICAUX

MICRO-ONDES (obs. / nuages)

CONTINUITE DES OBS. A LONG TERME

AUGMENTATION DES FREQUENCES D'OBS.

STANDARDISATION INFORMATIQUE
BASES DE DONNEES ?

AUGMENTATION DES COUTS DE RECHERCHE!

TECHNIQUES D'ASSIMILATION DES OBSERVATIONS PAR DES MODELES DE TRANSPORT