

50376  
1984  
277

N° d'ordre : 1165

# THÈSE

présentée à

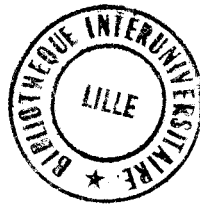
L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE SPECIALITE**

par

Marie-Claire ROUQUET



## **CORRECTION DE L'INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE SUR DES DONNEES ACQUISES EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES**

Soutenue le 22 Juin 1984 devant la Commission d'Examen

Mme J. LENOBLE, Professeur  
Mr. P.Y. DESCHAMPS, Chargé de Recherches C.N.R.S.  
Mr. M. HERMAN, Professeur  
Mr. TANRE, Chargé de Recherche C.N.R.S.  
Mr. G. SAINT, Ingénieur

Présidente  
Rapporteur  
Membres

*A Hamid  
A mes parents  
A tous les miens*

Ce travail a été possible grâce à Madame J. LENOBLE, Professeur qui dirige le Laboratoire d'Optique Atmosphérique.

Cette étude a été dirigée par Monsieur P.Y. DESCHAMPS.  
Je voudrais ici lui exprimer toute ma reconnaissance pour les conseils qu'il m'a prodigués et pour les discussions qui m'ont été profitables.

Monsieur M. HERMAN, a manifesté l'intérêt qu'il portait à mes travaux en me faisant l'honneur de juger ce travail. Je tiens à lui adresser mes sincères remerciements.

Monsieur G. SAINT, directeur du département Thématiques au CNES, m'a permis en m'accueillant dans son laboratoire, d'accomplir mes recherches, qu'il en soit remercié.

Didier TANRE, chargé de Recherches au CNRS, m'a amené tout au cours de ma thèse un soutien non négligeable, et m'a permis de mener à bien la rédaction de ma thèse.

Je tiens à remercier également Monsieur J. SANY, directeur de la division Traitement Images au CNES qui m'a offert les moyens techniques qui m'ont permis d'accomplir mon travail, dans des conditions idéales.

Je tiens enfin à remercier tous mes collègues stagiaires de la division Traitement Images, J. ANGLADE, B. CLUSEAU, F. LAVENU, C. PROY, avec qui, j'ai passé ces années. Enfin, je tiens à remercier Mesdames L. DEVAUX et Y. THEROUX qui par leur gentillesse m'ont permis de régler bien des problèmes administratifs.

INTRODUCTION	p2
CHAPITRE I : INTRODUCTION, PHYSIQUE DU PROBLEME	p4
I 1 : <u>INTRODUCTION</u>	p5
I 2 : <u>RAPPELS-DEFINITIONS</u>	p6
I 2 1 Coefficient d'extinction totale	p6
I 2 2 Transmission directe monochromatique	p6
I 2 3 Epaisseur optique totale	p7
I 2 4 Coefficients d'absorption et de diffusion	p8
I 2 5 Transmission gazeuse moyenne	p10
I 2 6 Fonction de phase	p11
I 3 : <u>PHENOMENE D'ABSORPTION ET DE DIFFUSION DANS L'ATMOSPHERE TERRESTRE:</u>	p12
I 3 1 Phénomène d'absorption	p12
I 3 2 Phénomène de diffusion	p17
I 4 : <u>SIGNATURES SPECTRALES TYPIQUES</u>	p20
I 4 1 observations terrestres	p20
I 4 2 observations marines	p20
CHAPITRE II : PHYSIQUE DU PROBLEME	p23
II 1 : <u>INTRODUCTION</u>	p24
II 2 : <u>RAPPEL DU MODELE ATMOSPHERIQUE</u>	p25
II 3 : <u>ANALYSE DES EFFETS ATMOSPHERIQUES A L'AIDE DU MODELE</u>	p29
ANNEXE	p32
CHAPITRE III : RESULTATS	p33
III 1 <u>ANALYSE VISUELLE DES EFFETS DES AEROSOLS SUR DES IMAGES MSS/LANDSAT</u>	p35
III 2 <u>ANALYSE QUANTITATIVE</u>	p43
III 2 1 Valeur moyenne	p45
III 2 2 Ecart-type	p51
III 2 3 Fonction de structure	p55
III 2 4 Comparaison des différentes méthodes d'estimation des épaisseurs optiques	p75

III 2 5 Comparaison aux observations faites à partir du sol.....	p80
III 3 <u>CONCLUSION</u> .....	p83
CHAPITRE IV : BILAN DES DIFFERENTS EFFETS, METHODES DE CORRECTION, LEURS APPLICATIONS.....	p84
IV 1 : <u>INTRODUCTION</u> .....	p85
IV 2 : <u>CORRECTION ATMOSPHERIQUE A PARTIR DES PARAMETRES OPTIQUES</u> ..	p87
IV 2 1 Paramètres optiques mesurés au niveau du sol.....	p87
IV 2 2 <u>Correction des paramètres atmosphériques à des données sa- tellitaires</u> .....	p88
IV 2 3 Influence de l'atmosphère sur des grandeurs thématiques.....	p92
IV 2 3 1 Histogrammes bidimensionnels.....	p92
IV 2 3 2 Index de végétation.....	p100
IV 2 3 3 Classification supervisée.....	p101
IV 2 3 4 Choix des meilleures acquisitions.....	p105
CONCLUSION .....	p108
BIBLIOGRAPHIE.....	p110

INTRODUCTION



L'observation de la terre à partir de satellites permet d'avoir une vue synoptique d'une région ou d'un phénomène de façon répétitive. Cette répétitivité offre la possibilité de développer des études multitemporelles telles que l'évolution des cultures, de la couverture neigeuse... Mais il existe un certain nombre de phénomènes, eux aussi évolutifs dans le temps, qu'il est nécessaire de prendre en compte si l'on veut interpréter correctement les informations obtenues par les capteurs.

Parmi ces problèmes, certains sont liés aux mouvements du capteur sur son orbite; or il est nécessaire soit de travailler dans des conditions géométriques identiques, soit d'avoir la possibilité de s'y ramener. Nous n'aborderons pas ce type de problèmes dans cette étude et nous les supposons bien maîtrisés.

Le second type de problèmes résulte de la présence de l'atmosphère caractérisée par une grande variabilité quant à sa composition. Le signal reçu par le satellite subit sur les trajets soleil-sol et sol-satellite une atténuation liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion dus à la présence de molécules et de particules. Formellement le problème de la correction atmosphérique se pose dans les termes suivants : connaissant le signal reçu par le satellite, et mesuré dans une géométrie d'observation donnée, comment en éliminer la perturbation liée à l'atmosphère pour remonter à l'information physique significative, le signal du sol.

Avant de décider de la mise en oeuvre d'une correction, qui implique toujours un traitement supplémentaire, il importe donc, dans une première étape d'estimer les ordres de grandeur de la perturbation considérée et de sa variabilité. On évitera ainsi de corriger systématiquement des effets faibles, voire négligeables.

Nous nous proposons dans ce travail d'analyser les différents phénomènes physiques introduits par la présence de l'atmosphère et d'évaluer des méthodes de corrections ou de minimisations des effets atmosphériques. Les deux premiers chapitres sont consacrés à une présentation rapide des propriétés optiques de l'atmosphère et au rappel de la modélisation du signal satellitaire. Dans le troisième chapitre nous avons analysé à l'aide de cette modélisation différentes scènes LANDSAT, analyse qui nous a permis de remonter aux caractéristiques de l'atmosphère, caractéristiques validées à l'aide d'observations in-situ. Dans le quatrième chapitre, nous proposons des algorithmes de correction appropriés à une application courante en Télédétection, les ressources terrestres.



CHAPITRE I

PHYSIQUE DU PROBLEME

## I 1 INTRODUCTION :

Des instruments optiques destinés à observer la surface de la terre, à partir de satellites, existent ou sont en cours de développement ( SPOT Système Probatoire d'Observation de la Terre, OCM Ocean Color Monitoring) Dans le domaine spectral qui s'étend du proche ultra-violet à l'infra-rouge moyen(0.35  $\mu\text{m}$  à 4  $\mu\text{m}$ ), ces instruments mesurent le rayonnement que renvoie vers l'espace l'ensemble de la surface de la terre et de son atmosphère, éclairée par la source primaire, le soleil(1),(2).

Le rayonnement solaire rediffusé porte principalement la signature des propriétés de la surface avec laquelle il a interagi, propriétés que l'on caractérise par la réflectance du sol, mais il est également contaminé par son interaction avec l'atmosphère lors de la double traversée. Ce sont , dans des bandes spectrales bien localisées, les phénomènes d'absorption par certains constituants gazeux ; et sur tout le spectre, les phénomènes de diffusion par les molécules et les aérosols, particules en suspension dans l'air.

Nous rappellerons dans un premier temps les grandeurs qui définissent optiquement un milieu diffusant et absorbant, nous donnerons ensuite ses caractéristiques optiques pour des atmosphères moyennes dans la gamme de longueurs d'onde qui nous intéresse et nous terminerons par les signatures spectrales typiques soit dans le cas d'observations terrestres, soit dans le cas d'observations marines.

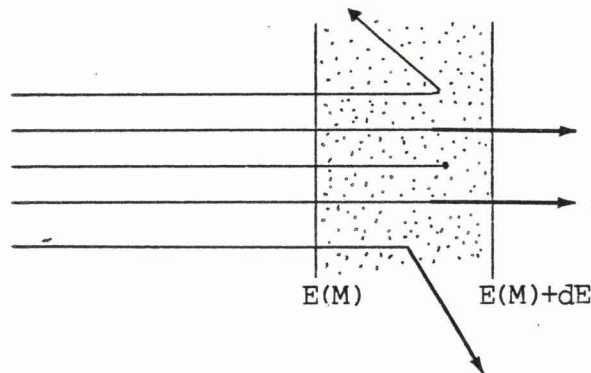
## I 2 RAPPELS - DEFINITIONS :

### I 2 1 - Coefficient d'extinction totale :

Soit en M un faisceau parallèle monochromatique. Il transporte un certain flux de photons par unité de temps et de surface. Ce flux diminue de M en M' si des particules (aérosols, molécules) peuvent diffuser ces photons dans d'autres directions, ou les absorber. Le nombre de photons perdus par le faisceau direct sera proportionnel au nombre de photons incidents et au nombre d'interactions possibles, donc à  $dx$ . L'éclairement  $E(M)$  en M variera donc sur le trajet  $MM'$  de :

$$dE = - K(M) \cdot E(M) \cdot dx \quad \text{I-1}$$

où  $K(M)$ , en  $m^{-1}$ , est le coefficient d'extinction totale du milieu.



### I 2 2 - Transmission directe monochromatique :

Soit un trajet fini de M en P. On considère toujours que les seuls photons directement transmis. Il leur correspondra donc un éclairement, en P,

$$E(P) = E(M) \exp \left[ - \int_M^P K(M) dx \right] \quad \text{I-2}$$

L'intégrale étant calculée le long du trajet suivi par la lumière de M en P.

On posera

$$E(P) = t(M,P) E(M) \quad \text{I-3}$$

en notant

$$t(M,P) = \exp \left[ - \int_M^P K(M) dx \right] \quad \text{I-4}$$

La transmission directe monochromatique sur le trajet MP.

I 2 3 - Épaisseur optique totale :

Dans le cas de l'atmosphère, on admettra que K ne dépend que de l'altitude z. A une longueur d'onde donnée, un niveau d'altitude z sera repéré par sa profondeur optique totale, comptée à partir du sommet de l'atmosphère.

$$\tilde{\tau}_t(z) = \int_z^{\infty} K(z') dz' \quad \text{I-5}$$

On utilisera surtout l'épaisseur optique totale de l'atmosphère en un point, c'est-à-dire la profondeur optique totale au niveau du sol, qu'on notera

$$\tau_t = \int_{\text{sol}}^{\infty} K(z') dz' \quad \text{I-6}$$

$\tilde{\tau}_t(z)$  et  $\tau_t$  seront sans dimensions.

Sauf pour un soleil très bas sur l'horizon, la réfraction atmosphérique est négligeable et les trajets lumineux sont rectilignes. On représentera

un trajet MP par son inclinaison  $\theta$  sur la verticale du lieu, en comptant ici  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  quel que soit le sens de propagation. On posera par la suite

$$\mu = \cos(\theta) \quad \text{I-7}$$

La transmission directe I-4 s'écrira donc :

$$t(M,p) = \exp(-|\tau_t(M) - \tau_t(P)| / \mu) \quad \text{I-8}$$

On notera simplement  $t(\theta)$  la transmission correspondant à un trajet direct à travers toute l'atmosphère sous une inclinaison  $\theta$ , soit

$$t(\theta) = \exp(-\tau_t / \mu) \quad \text{I-9}$$

I 2 4 - Coefficient d'absorption et de diffusion - Albedo pour la  
 -----  
 diffusion des aérosols :  
 -----

Le coefficient K caractérise, globalement, l'atténuation totale d'un faisceau direct. On devra distinguer dans cette extinction les pertes par absorption simple des pertes par diffusion dans d'autres directions. Et on distinguera dans chaque processus la contribution stable et connue des molécules (indice m), de la contribution des aérosols (indice p), beaucoup plus variable.

Raisonnons par exemple sur un faisceau parallèle. Si l'on dissocie ces quatre origines différentes dans la diminution totale  $dE$  de l'éclairement, on leur associera quatre coefficients spécifiques :

- . le coefficient de diffusion moléculaire,  $\sigma_m$ , défini par

$$dE_m^d = -\sigma_m(z) E dx \quad \text{I-10}$$

- . le coefficient de diffusion de aérosols,  $\sigma_p$ , défini par

$$dE_p^d = -\sigma_p(z) E dx \quad \text{I-11}$$

. le coefficient d'absorption gazeuse moléculaire,  $k_m$ , défini par

$$dE_m^a = - k_m(z) E dx \quad \text{I-12}$$

. et le coefficient d'absorption des aérosols,  $k_p$ , défini par

$$dE_p^a = - k_p(z) E dx \quad \text{I-13}$$

$dE_m^d$ ,  $dE_p^d$ ,  $dE_m^a$ ,  $dE_p^a$  correspondant respectivement aux photons extraits du faisceau direct par chacun de ces processus.

Tous les coefficients sont en  $m^{-1}$ , et on aura au total :

$$K(z) = \sigma_m(z) + \sigma_p(z) + k_m(z) + k_p(z) \quad \text{I-14}$$

Dans cette nomenclature, un niveau de l'atmosphère d'altitude  $z$  sera repéré par des profondeurs optiques différentes vis à vis de ces phénomènes respectifs. Dans le cas particulier du niveau du sol on aura ainsi :

$$\tau_m^a = \int_{\text{sol}}^{\infty} \sigma_m(z') dz' \quad \text{I-15}$$

$$\tau_p^a = \int_{\text{sol}}^{\infty} \sigma_p(z') dz' \quad \text{I-16}$$

$$\tau_m^d = \int_{\text{sol}}^{\infty} k_m(z') dz' \quad \text{I-17}$$

$$\tau_p^d = \int_{\text{sol}}^{\infty} k_p(z') dz' \quad \text{I-18}$$

Au lieu de caractériser un type d'aérosols par  $\sigma_p(z)$  et  $k_p(z)$ , on utilisera plutôt ici :

- l'épaisseur optique totale des aérosols :

$$\tau_p = \tau_p^d + \tau_p^a \quad \text{I-19}$$

- et l'albedo pour une diffusion des aérosols :

$$\omega_p = \frac{\sigma_p}{\sigma_p + k_p} = \frac{\tau_p^d}{\tau_p} \quad \text{I-20}$$

Enfin on notera  $\tau$  l'épaisseur optique totale de l'atmosphère, abstraction faite de l'absorption gazeuse, c'est-à-dire :

$$\tau = \tau_t - \tau_m^a = \tau_p + \tau_m^d \quad \text{I-21}$$

#### I 2 5 - Transmission gazeuse moyenne :

Le phénomène de l'absorption gazeuse nécessite un traitement particulier,  $k_m(z)$  variant beaucoup trop vite avec la longueur d'onde pour que son expression monochromatique soit envisageable (spectre de raies). On devra définir des valeurs moyennes de cet effet d'absorption sur des intervalles spectraux  $\Delta\lambda$  assez larges (50 Å).

La transmission ne variant pas linéairement avec  $k_m(z)$ , on ne peut d'ailleurs pas se contenter de tabulations du coefficient moyen  $k_m(z)$ . En principe, pour chaque trajet MP donné, on doit calculer spécifiquement la transmission gazeuse moyenne.

En pratique on n'aura à utiliser que des transmissions gazeuses sur des trajets à travers toute l'atmosphère. On notera  $\bar{t}_g(\theta)$  les moyennes spectrales correspondantes, avec:

$$\bar{t}_g(\theta) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \exp \left[ -\frac{1}{\mu} \int_{s_0}^{\infty} k_m(z, \lambda) dz \right] d\lambda \quad \text{I-22}$$

Sur un intervalle  $\Delta\lambda$  tel que  $\sigma_m, \sigma_p, k_p$  varient peu, la transmission moyenne I-9 s'écrira donc :

$$\bar{t}(\theta) = \bar{t}_g(\theta) \exp(-\tau_m^d/\mu) \cdot \exp(-\tau_p/\mu) = \bar{t}_g(\theta) \exp(-\tau/\mu) \quad \text{I-23}$$

Fonction de phase :

Les coefficients  $k_m$  et  $k_p$  caractérisent entièrement les pertes par diffusion. Les coefficients  $\sigma_m$  et  $\sigma_p$  ne donnent que le nombre de photons. Dans ces interactions les photons sont réémis, sans changement de longueur d'onde dans des directions autre que la direction d'incidence : on doit donc préciser comment ils seront statistiquement distribués dans l'espace.

Si le rayonnement incident n'est pas polarisé, comme dans le cas du faisceau solaire, cette distribution ne dépend que de l'angle  $\zeta$  entre la direction de diffusion considérée et la direction d'incidence ( $0 < \zeta < \pi$ ).

On notera

$$\frac{p(X) d\omega}{4 \pi} \quad \text{I-24}$$

la probabilité pour qu'un photon soit diffusée, dans  $d\omega$ , autour d'une direction d'inclinaison  $\zeta$ . Avec  $d$  sous la forme  $\sin \zeta d\zeta d\eta$ , la condition de normalisation s'écrira :

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi p(\zeta) \sin \zeta d\zeta = 1 \quad \text{I-25}$$

La fonction  $p(\zeta)$  caractéristique d'un type de diffuseur à une longueur d'onde donnée, s'appelle sa fonction de phase.

Le paramètre intéressant est le coefficient d'anisotropie de cette fonction de phase :

$$\langle \cos \zeta \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\pi p(\zeta) \cos(\zeta) \sin(\zeta) d\zeta \quad \text{I-26}$$

Qualitativement, ce coefficient tend vers 1 si les photons sont peu déviés de leur direction d'incidence par la diffusion. Il tendra vers 0 si la diffusion répartit uniformément les photons entre les directions vers l'avant et vers l'arrière.



### I 3 PHENOMENES D'ABSORPTION ET DIFFUSION DANS L'ATMOSPHERE TERRESTRE

#### DANS LE VISIBLE ET LE PROCHE INFRA-ROUGE :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé et absorbé par les gaz et les particules et l'on doit en principe recalculer pour chaque trajet, la transmission gazeuse correspondante.

On peut heureusement simplifier le problème et découpler avec une bonne précision, les processus d'absorption gazeuse, des processus de diffusion.(3) (4)

#### I 3 1 : Phénomènes d'absorption :

Dans le domaine spectral qui nous intéresse (entre 0.3 et 4  $\mu\text{m}$ ) les principaux absorbants moléculaires sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'oxygène moléculaire.

La contribution de la vapeur d'eau est donnée Figure I-1. C'est le principal absorbant atmosphérique mais il n'intervient que au-dessus de 700 nm. Les profils standards de la densité de  $\text{H}_2\text{O}$  en fonction de l'altitude, Figure I-2; donnent une idée de sa variabilité et de sa localisation dans les tous premiers kilomètres.

La contribution de l'ozone est donnée Figure I-3. Le rôle de  $\text{O}_3$  est essentiellement de limiter les mesures à des longueurs d'ondes supérieures à 350nm environ, mais il présente une absorption significative entre 550nm et 650 nm. Ses profils de densité , Figure I-4 , montrent sa localisation en haute altitude.

Enfin, les contributions de l'oxygène moléculaire et du gaz carbonique sont données Figure I-5. L'influence de  $\text{O}_2$  se réduit à une étroite bande d'absorption à 750 nm, l'influence de  $\text{CO}_2$  n'est importante que au-delà de 1000nm et beaucoup plus faiblement que  $\text{H}_2\text{O}$ , mais il est gênant car il contamine les fenêtres laissées libres par la vapeur d'eau. Ces deux derniers constituants,  $\text{O}_2$  et  $\text{CO}_2$ , sont uniformément mélangés à l'atmosphère et ont une abondance constante : leur effet de transmission est donc bien défini.

En résumé on voit, Figure I-6, que sur tout l'intervalle 300nm à 4000nm on dispose de bonnes fenêtres de transparence de l'atmosphère dans les-

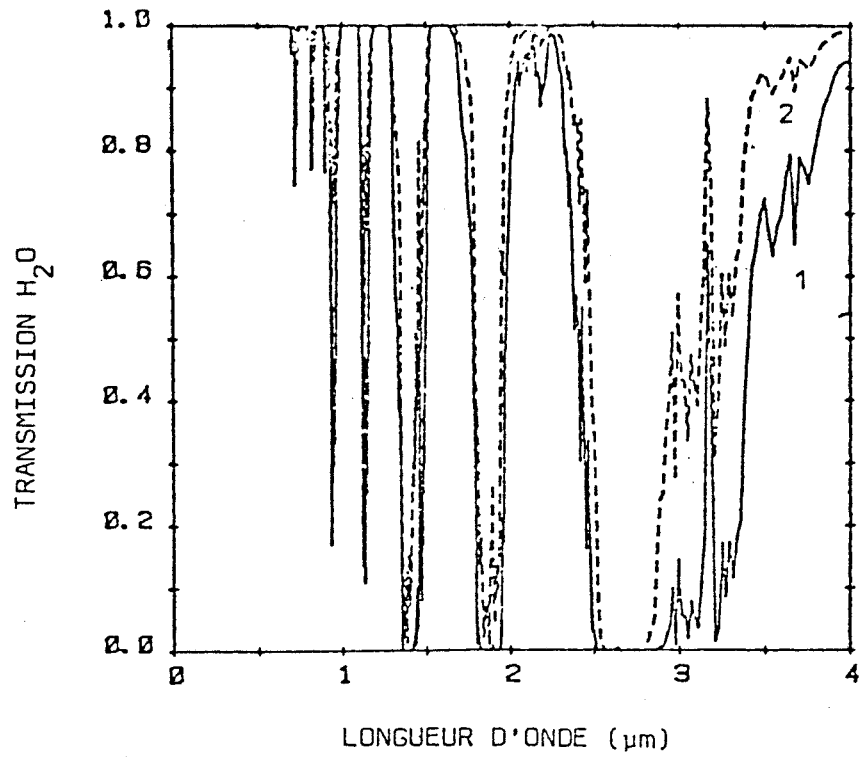


Figure I.1. : Transmission de  $H_2O$  pour une traversée de l'atmosphère à la verticale, dans les 2 modèles d'atmosphère extrêmes

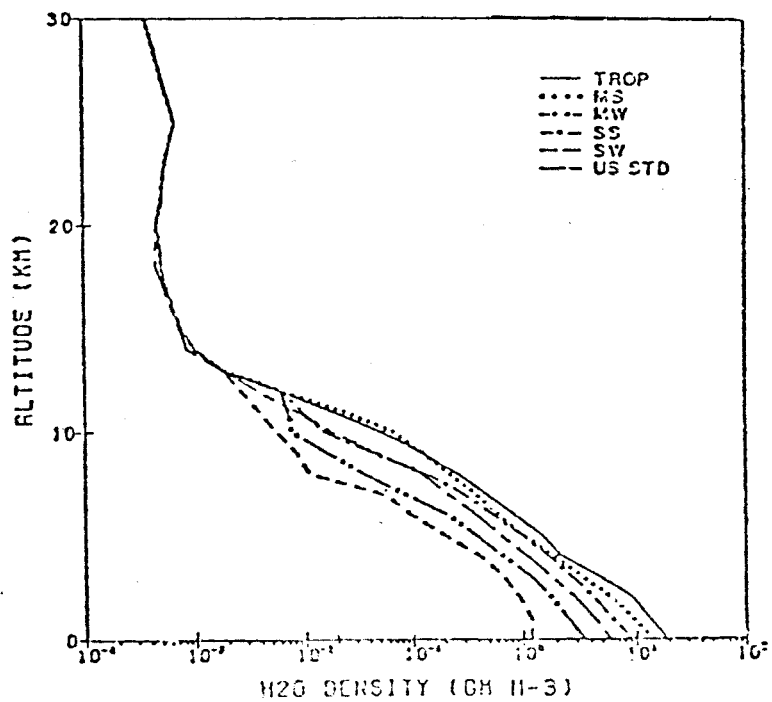


Figure I.2. : Profils de la densité de  $H_2O$  en fonction de l'altitude, pour les différents types d'atmosphère standards

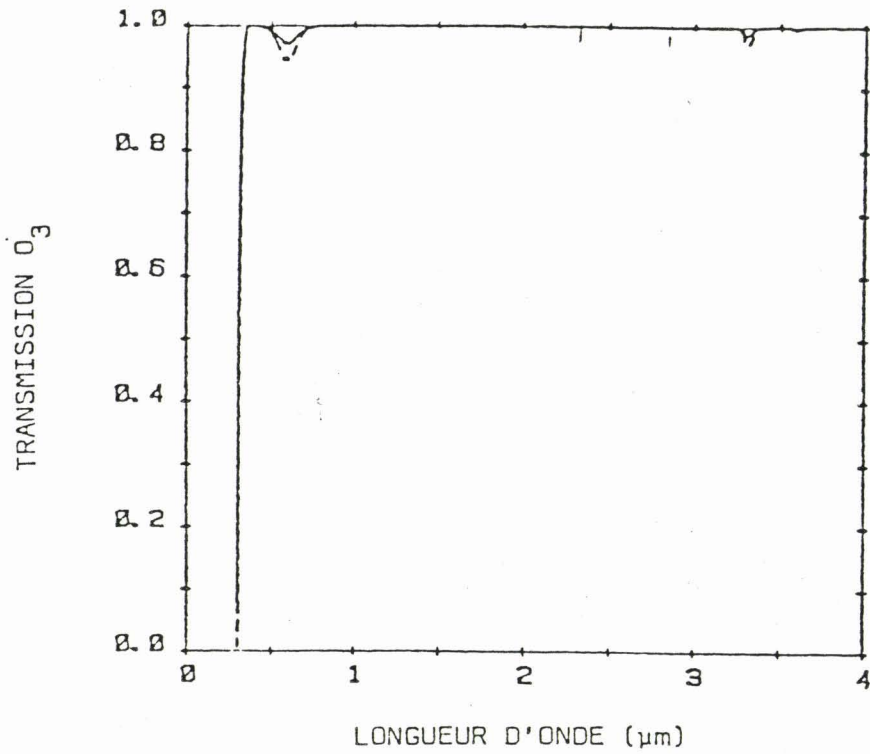


Figure I.3. : Transmission de  $O_3$  pour une traversée de l'atmosphère à la verticale, dans les 2 modèles d'atmosphère extrêmes

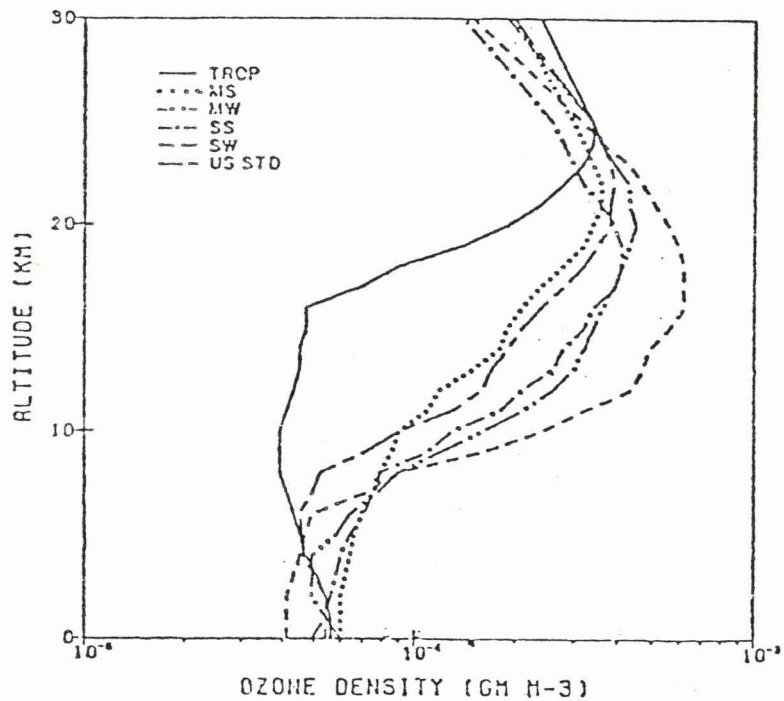


Figure I.4. : Profils de la densité de  $O_3$  en fonction de l'altitude, pour les différents types d'atmosphères standards

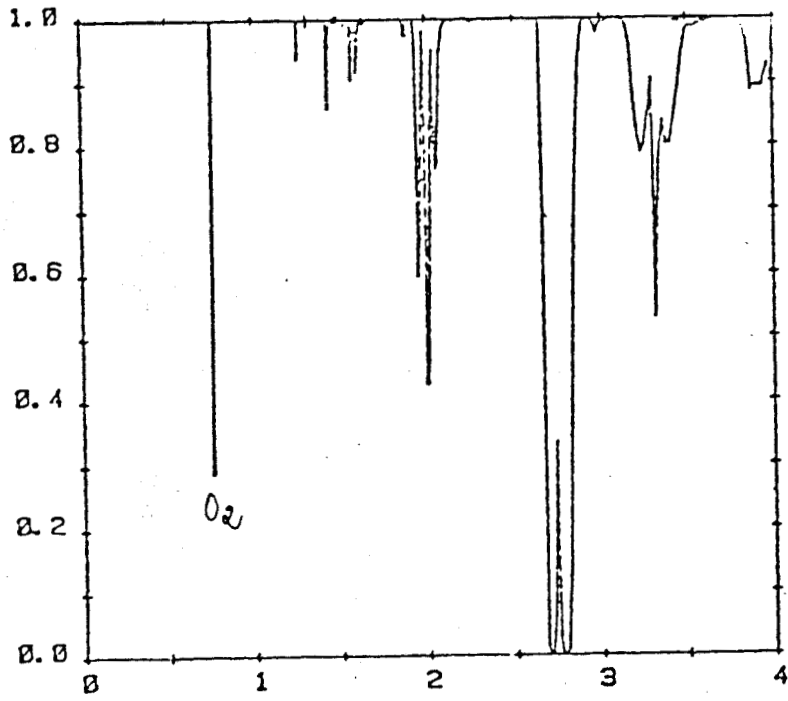


Figure I.5. : Transmission de ( $O_2 + CO_2$ ) pour une traversée de l'atmosphère à la verticale

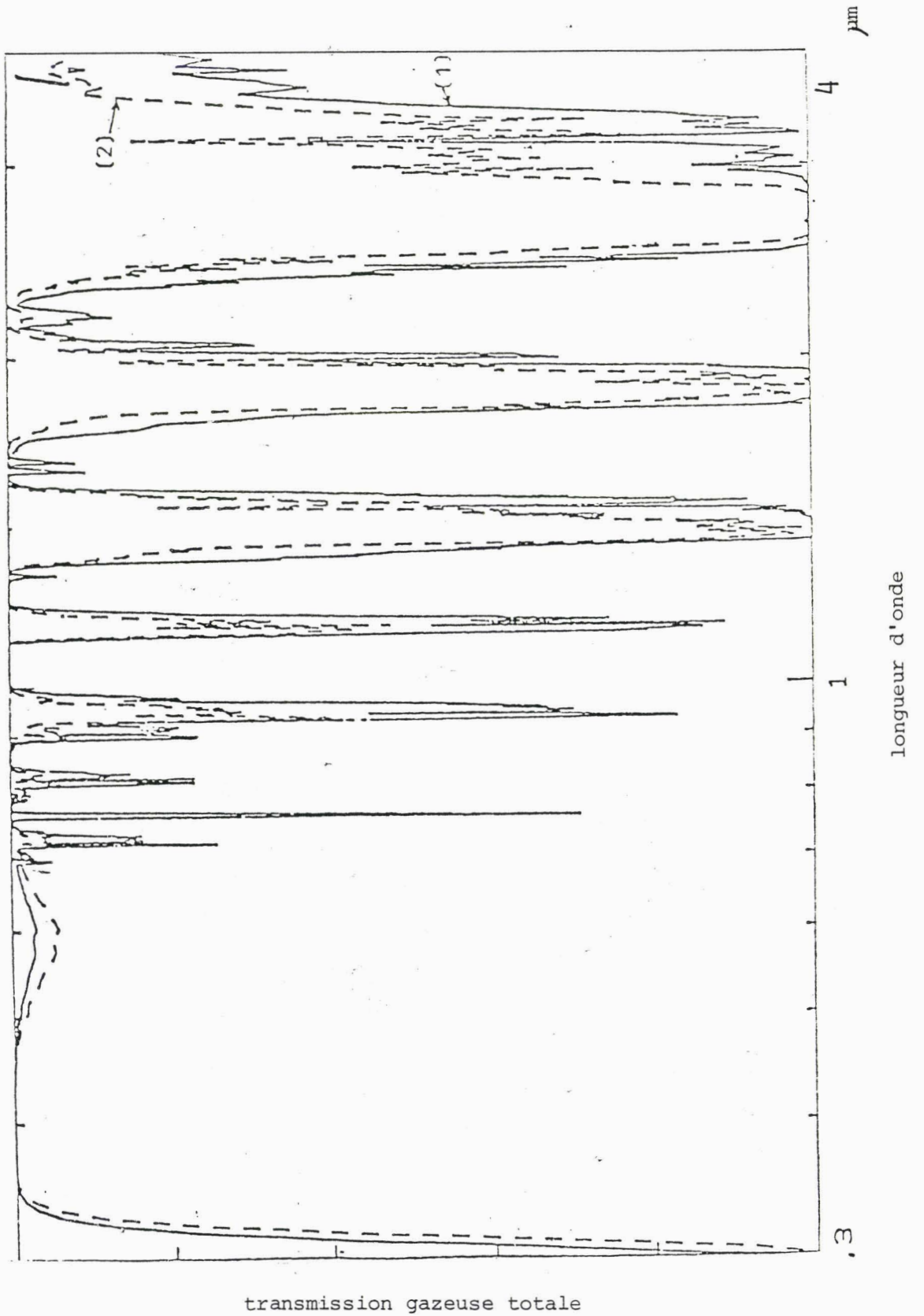


Figure I.6. : Transmission gazeuse totale à la verticale (comme Figure II8a) pour les deux modèles extrêmes de l'atmosphère (1)

quelles des mesures sont possibles, et où l'absorption gazeuse n'intervient, au plus, que comme terme correctif.

### I 3 2 Phénomène de diffusion :

---

Contrairement aux processus d'absorption, où un certain nombre de photons disparaissent ce qui entraîne une atténuation du signal dans la direction de propagation, dans le processus de diffusion les photons, sont redistribués dans toutes les directions et on observe simultanément une atténuation du signal dans la direction d'éclairement et une augmentation dans toutes les autres directions. Comme nous l'avons vu ce processus est géré par l'épaisseur optique de diffusion, la fonction de phase et l'albedo propre.

Ce processus de diffusion est dû soit à l'interaction des photons avec les molécules, composante stable et connue, soit à l'interaction des photons avec les particules en suspension dans l'air (aérosols), composante hautement variable. Rappelons brièvement les caractéristiques de ces deux types de diffusions.

Pour la diffusion moléculaire ou diffusion RAYLEIGH, l'épaisseur optique varie en  $\lambda^{-4}$  et vaut typiquement 0,35 à 400nm et 0,01 à 950 nm. C'est donc aux courtes longueurs d'onde que cette diffusion devient gênante et devra être prise en compte.

La fonction de phase dépend très peu de la nature des molécules, et ne varie pas avec la longueur d'onde. Elle s'écrit sous la forme :

$$P_m(\zeta) = \frac{2(1-\delta)}{2+\delta} \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \zeta) + \frac{3\delta}{2+\delta} \quad \text{I-27}$$

où  $\delta$  est appelé facteur de dépolarisation, lié à l'anisotropie des molécules. Ce facteur est toujours petit. Pour la composition moyenne de l'atmosphère terrestre on a :

$$\delta = 0,0095 \pm 0.004 \quad \text{I-28}$$

La fonction de phase qui en résulte est donnée Figure II-9 a en représentation polaire dans le plan de diffusion. Le phénomène est assez isotrope et la parfaite symétrie avant-arrière donne ici  $\langle \cos \zeta \rangle_m = 0$ .

La composante en aérosols est, quant à elle, beaucoup plus mal définie, les propriétés et surtout l'abondance des particules varient largement en

un endroit donné. De plus certains paramètres optiques( albedo propre, fonction de phase...) sont difficilement accessibles à une mesure directe. Nous présentons ici les paramètres optiques correspondant à un modèle moyen d'aérosols représentatif.

La variation de l'épaisseur optique en fonction de la longueur d'onde ne dépend que du type d'aérosols. Les résultats expérimentaux sont généralement bien représentés par la loi d'Angstrom :

$$\tau_p(\lambda) = \tau_p(\lambda_0) \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha} \quad 0.5 < \alpha < 1.5 \quad \text{I-29}$$

A une longueur d'onde donnée,  $\tau_p$  dépend de la quantité totale de particules, et on estime que l'on a typiquement par temps clair :

$$0.05 < \tau_p < 0.20 \quad \lambda = 1 \mu\text{m} \quad \text{I-30}$$

Pour la fonction de phase, quelque soit le type d'aérosols, l'allure générale est caractérisée par une très forte probabilité de diffusion vers l'avant, qui correspond au phénomènes de diffraction, et une plus légère augmentation de  $p_p(\zeta)$  vers l'arrière, qualitativement liée au phénomène de l'arc-en-ciel.

A un angle donné,  $p_p(\zeta)$  reste cependant très dépendant du type d'aérosols, (Figure II-9 b) particulièrement dans les directions de rétro-diffusion qui intéressent le signal atmosphérique(5). Cette variabilité de  $p_p(\zeta)$  sera ici, après celle de  $\tau_p$ , la seconde source importante d'indétermination.

Pour un type donné d'aérosols par contre, la fonction de phase, dans la gamme de longueur d'onde qui nous intéresse et pour des angles de diffusion supérieur à  $90^\circ$ , dépend peu de la longueur d'onde.

En ce qui concerne l'albedo propre des aérosols, l'absorption semble faible dans le visible, et corrélée à la présence d'eau liquide entrant dans la composition des aérosols de sorte que le domaine spectral où l'absorption pourrait s'avérer importante, est inutilisable vue la forte absorption de  $\text{H}_2\text{O}$ .

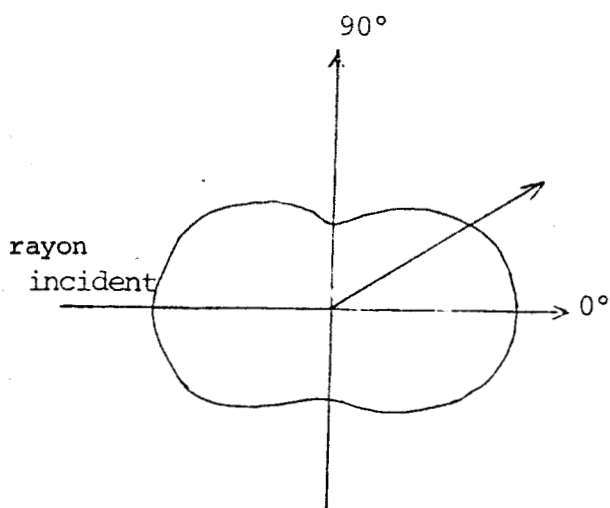


Figure II 9 a : Variation de l'intensité du rayonnement diffusé pour des petites particules = diffusion Rayleigh

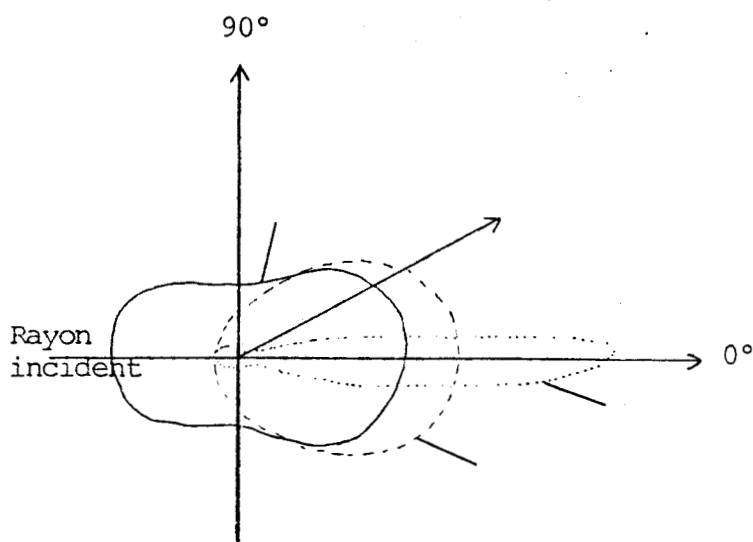


Figure II.9 b : Diffusion de la lumière pour des particules de taille analogue à la longueur d'ondes = diffusion de MIE



## I 4 SIGNATURES SPECTRALES TYPIQUES DE SITES :

La principale information contenue dans le rayonnement que renvoie une cible est sa variation en fonction de la longueur d'onde . On en déduira le spectre de sa réflectance ou de son albedo, dont les caractéristiques aideront à identifier la nature de la cible.

Il n'est pas question ici d'analyser en détail ces signatures spectrales mais simplement d'en indiquer l'allure et les ordres de grandeur afin de mieux réaliser comment les effets atmosphériques perturberont cette reconnaissance.

D'après les applications faites en Télédétection( cartographie, météo, océanographie, agriculture...), nous avons retenu deux principaux types de sites, les sites terrestres et les sites marins.

### I 4 1 Observations terrestres :

Le cas de surfaces végétales est particulièrement important. Leur spectre est très typique, nettement marqué par les fortes bandes d'absorption de la chlorophylle dans le visible. La réflectance des végétaux, forte dans le proche infra-rouge, s'effondre ainsi brutalement à partir de 700 nm, la chlorophylle ne laissant subsister que le pic de réflectance secondaire, vers 550nm, caractéristique de sa couleur verte. (Figure I-11 a).

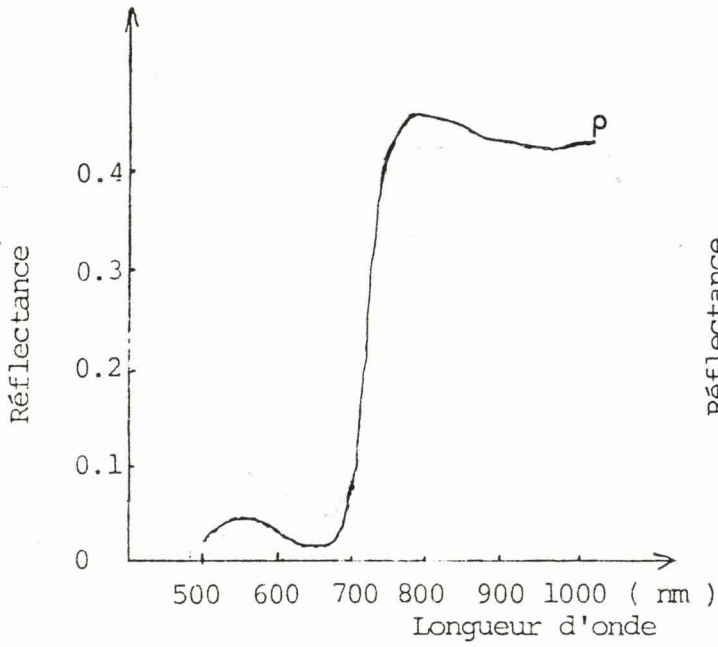
Les spectres des terres nues et arides sont beaucoup plus monotones, et, sauf dans le cas du sable(plages, désert), la réflectance reste généralement assez faible. ( Figure I-11-b)

### I 4 2 : Observations marines :

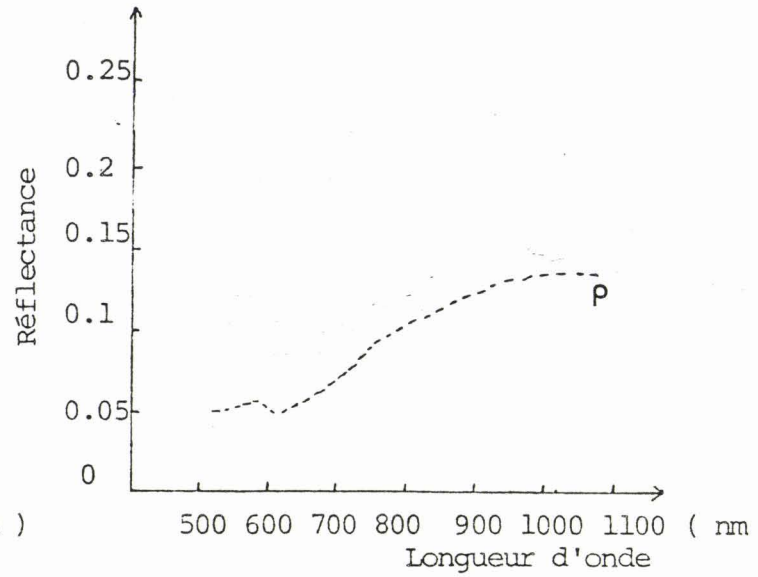
Pour les observations océanographiques il convient de distinguer, dans la réflectance de la cible, la contribution de l'eau de mer proprement dite de celle de l'interface eau-mer (phénomène du "glitter").

Ce phénomène de réflexion pure est défini, en amplitude, par l'indice de réfraction de l'eau et varie peu avec la longueur d'onde. Ceci permettra d'ailleurs d'éliminer assez bien, en tant que phénomène parasite, en opérant sur les différences de réflectances observées à plusieurs longueurs d'onde.

La contribution de l'eau de mer correspond à sa rétrodiffusion. La réflectance correspondante est pratiquement nulle dans l'infra-rouge, au delà de 850nm, les phénomènes de diffusion étant alors inhibés par la très forte absorption propre de l'eau. Vers les courtes longueurs d'onde, surtout pour les eaux très pures, la réflectance croît un peu, avec l'efficacité croissante de la diffusion moléculaire de l'eau. Pour des eaux plus troubles, la diffusion des différentes suspensions marines peut devenir déjà sensible à partir de 700nm. Mais de façon générale, les réflectances qu'on aura à mesurer ne dépasseront pas ici quelques pour cent (Figure I-12).



( a )



( b , )

Figures I.11 a et b : Courbes de réflectance pour la végétation (a) et le sol nu (b)

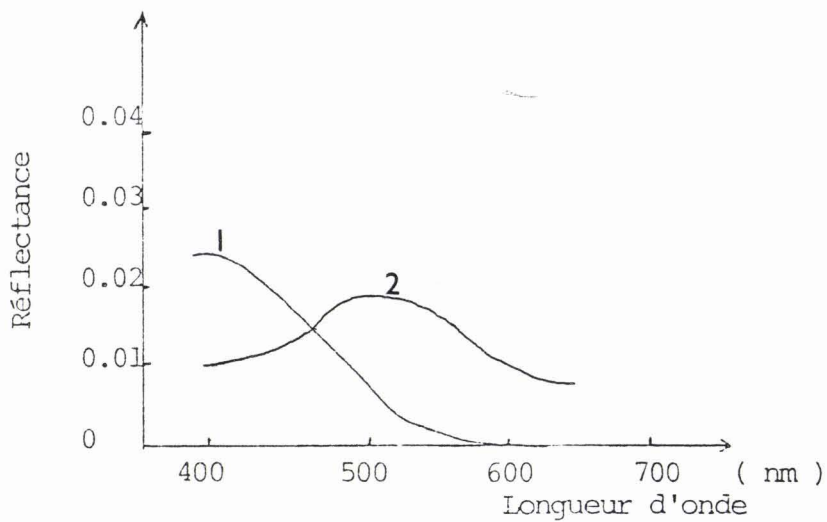


Figure I.12 : courbe de réflectance de l'eau de mer pure (1) et avec une concentration en chlorophylle moyenne (2)

## CHAPITRE II

RAPPEL            DU            MODELE

## II 1 INTRODUCTION :

En atmosphère claire, (sans nuages) les phénomènes perturbateurs qui atténuent le signal reçu par le satellite sont les phénomènes d'absorption ( $O_3$ ,  $H_2O$  ..) et les phénomènes de diffusion. De façon générale, les phénomènes d'absorption par les gaz sont négligeables, (cf Chapitre I) sous réserve que les bandes spectrales des capteurs existants soient placées dans des fenêtres atmosphériques.

Le seul terme à prendre en compte est celui introduit par les phénomènes de diffusion par les molécules et les aérosols. Nous rappelons dans ce chapitre le modèle de diffusion développé au L.O.A. (6), (7), (8), (9). Ce modèle est ensuite utilisé pour estimer l'influence des variations des effets atmosphériques sur l'imagerie satellitaire.

## II 2 RAPPEL DU MODELE ATMOSPHERIQUE :

Le modèle est développé dans la publication en annexe I, nous nous contenterons de rappeler ici, les principaux résultats.

Dans le cas d'un sol de réflectance homogène et lambertienne  $\rho_c$ , la réflectance apparente  $\rho^+(\theta_s, \theta_v, \phi)$  mesurée au niveau du satellite peut s'écrire :

$$\rho^+ = \rho_a + \rho_c \frac{T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - \rho_c s} \quad \text{II.1}$$

où :

- $\theta_s$  est l'angle zénithal solaire et  $\theta_v$  et  $\phi$  repèrent la direction de visée.
- $T(\theta)$  est la fonction de transmission totale
- $s$  est l'albedo sphérique
- et  $\rho_a$  : réflectance atmosphérique intrinsèque

Pour des observations au-dessus de sites contrastés, il est intéressant de dégager dans le signal, les effets perturbateurs dus à l'environnement de la cible.

Supposons d'abord que notre cible, infiniment petite et de réflectance lambertienne  $\rho_c$ , placée dans un environnement uniforme et également lambertien, mais de réflectance différente de  $\rho_c$ . Le signal atmosphérique sera modifié sous la forme :

$$\rho^+ = \rho_a + \rho_c \frac{T(\theta_s) \exp(-\tau/\mu_v)}{1 - \rho_e s} + \rho_e \frac{T(\theta_s) \text{td}(\theta_v)}{1 - \rho_e s} \quad \text{II.2}$$

$\rho_e$  : réflectance de l'environnement

en remarquant que c'est  $\rho_e$  qui intervient maintenant dans la contribution diffuse du sol comme dans l'éclairement total de la cible.

Si la réflectance de l'environnement n'est pas uniforme, la modélisation II-2 restera formellement exacte, à condition d'y définir convenablement  $\rho_e$ . Il est clair qu'on devra, pour cela, définir le poids relatif dans le signal d'un point donné du voisinage, en fonction de la distance à la cible.

Supposons connu la réflectance du sol,  $\rho_C$ , en tout point  $M'$  de coordonnées polaires,  $(r, \psi)$  autour du point visé  $M$ , pris comme origine. On définit la fonction  $F(r)$  (définie pour une observation au nadir), telle que :

$$\rho_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho(r, \psi) \frac{dF(r)}{dr} dr d\psi \quad \text{II.3}$$

$F(r)$  est la fonction d'environnement. Sa signification physique est la suivante :  $F(r)$  représente la probabilité pour qu'un photon, envoyé depuis l'espace vers le point  $M$  puis diffusé par l'atmosphère, atteigne la surface à l'intérieur d'un cercle de rayon  $r$  autour de  $M$ . Réciproquement, une fraction  $F(r)$  du rayonnement provenant de l'environnement de la cible correspond à des photons initialement rediffusés par la surface intérieure à un cercle de rayon  $r$  centré sur  $M$ .  $F(r)$  est une fonction croissante de  $r$ , avec  $F(0) = 0$  et  $F(\infty) = 1$  par normalisation.

L'équation II-1 peut s'employer lorsque la résolution au sol est grande par rapport à l'échelle spatiale du processus de contamination de l'atmosphère soit  $F(r) = 1$ . Pour une atmosphère moléculaire pure, il faut atteindre des dimensions supérieures à 10 km, et pour un contenu moyen en aérosols, des dimensions de l'ordre du km. (Figure II-1)

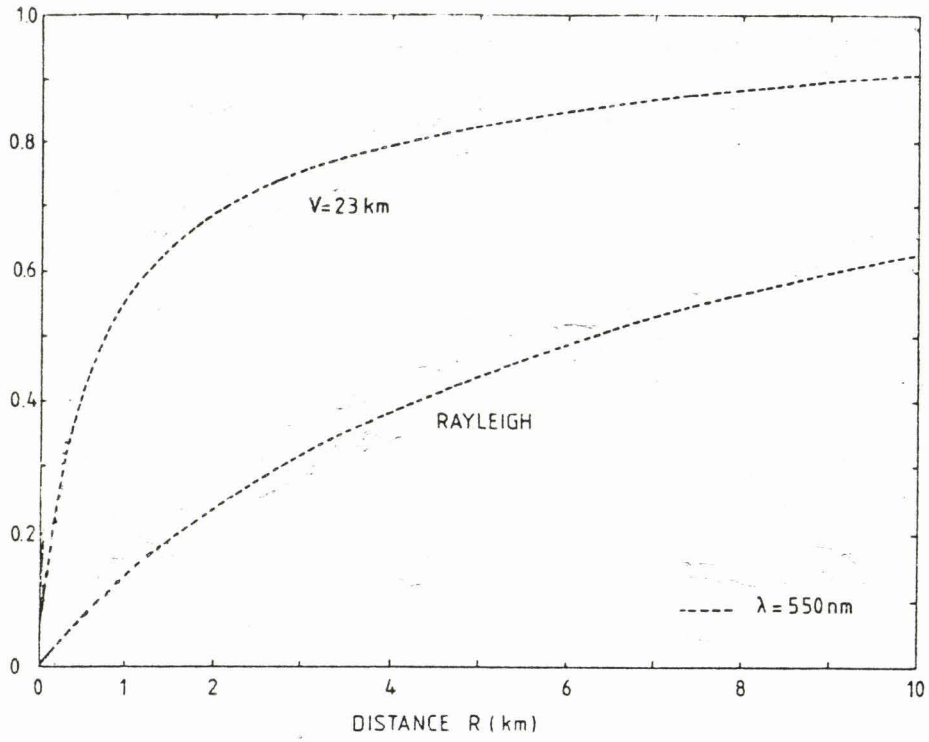


Figure II.1 : Fonction d'environnement  $F(r)$  pour 1 longueur d'onde moyenne



L'équation II-2 fait intervenir une réflectance moyenne de l'environnement  $\rho_e$ , qui est utilisé lorsque la résolution au sol  $r$ , est petite par rapport à l'échelle spatiale du processus de contamination par l'atmosphère, donc pour  $F(r)=0$ . Il faut dans ce cas des cibles inférieures à 1 km dans le cas d'une atmosphère moléculaire pure et inférieures à 100m pour une atmosphère contenant des aérosols.

### II 3 ANALYSE DES EFFETS ATMOSPHERIQUES A L'AIDE DU MODELE:

---

Regardons qualitativement à l'aide de la modélisation précédente, l'influence de l'atmosphère sur le signal satellitaire.

Pour simplifier nous nous placerons dans l'approximation des grandes cibles, la présence de l'atmosphère se traduira :

- par l'addition d'un signal parasite :

$\rho_a$

- par une diminution des variations  $d\rho^+$  du signal mesuré, pour une variation donnée  $d\rho$  de la réflectance de sol, diminution qui peut s'écrire :

$$\rho^+ = \frac{T(\theta_s) T(\theta_v)}{(1 - \rho_s)} d\rho \quad \text{II-4}$$

La figure II-2 nous donne les variations typiques du signal  $\rho^+$  en fonction de la réflectance du sol  $\rho$  supposée homogène, pour différentes conditions d'observations. On observe une très forte variabilité de  $\rho^+$  autour de  $\rho = 0$  (ce qui correspond à l'influence prépondérante de  $\rho_a$ ) et une variabilité plus faible autour de 0.5 (où les influences de  $\rho_a$  et de  $\frac{T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)}{1 - \rho_s}$  se compensent partiellement).

Si le paysage observé a une réflectance faible, de l'ordre de quelques pour cent, c'est donc la réflectance atmosphérique qui entre pour une part importante dans le signal mesuré par le satellite. Par contre, dans le cas de paysages de réflectances plus élevées de l'ordre de 0,3 à 0.5, la réflectance moyenne mesurée sera peu perturbée et la présence de l'atmosphère se caractérise par une dégradation des contrastes observés par le satellite.

En résumé nous voyons qu'il se dégage deux types d'approches pour une estimation de paramètres atmosphériques et cela suivant le type de paysage observé,

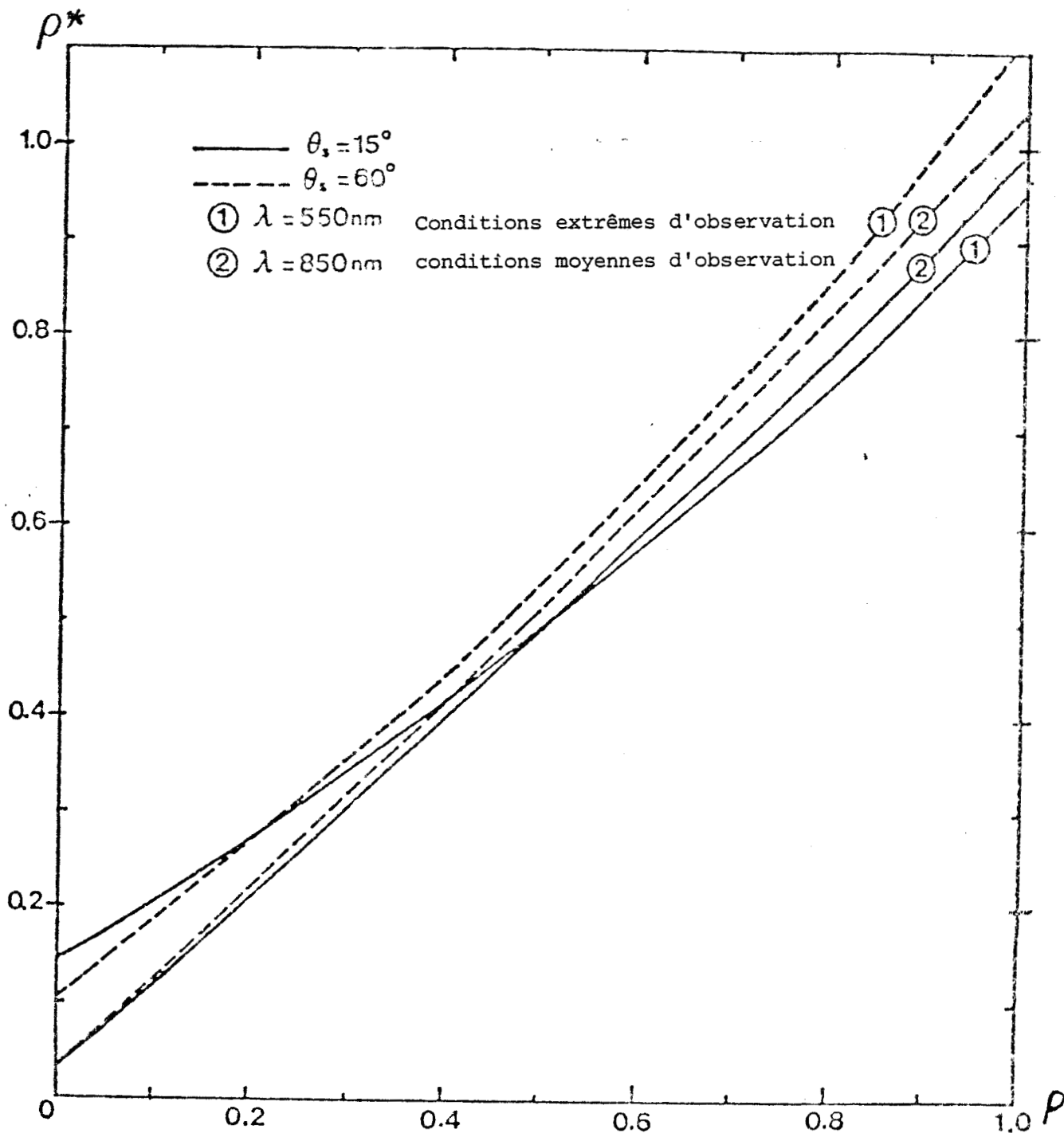


Figure II.2 : Variations de la réflectance apparente  $\rho^*$  en fonction de la réflectance vraie du site,  $\rho$ , pour différentes conditions d'observation (cf. légende)

- l'une à partir de la variation de la réflectance moyenne pour des réflectances au sol faibles , ce qui est le cas de la mer dans le visible et le proche infra-rouge et de la végétation dans le visible.
  
- l'autre à partir de la dégradation des contrastes pour des réflectances du sol plus élevées, ce qui est le cas de la végétation dans le proche infra-rouge.

ANNEXE



P.Y. Deschamps, M. Herman & D. Tanre  
*Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), Lille, France*

M.-C. Rouquet & J.P. Durpaire  
*Agence spatiale européenne,  
Département Observation de la Terre,  
Toulouse, France*

**Effets atmosphériques et évaluation du signal pour de  
instruments optiques de télédétection\***

## Introduction

Les instruments optiques d'observation de la terre qui sont utilisés dans le domaine spectral qui s'étend du proche ultraviolet à l'infrarouge moyen (de 0,4  $\mu\text{m}$ ) mesurent le flux solaire rétrodiffusé par l'ensemble complexe constitué à la fois de la terre et de l'atmosphère. Le soleil est la source primaire, il éclaire la terre à observer qui va renvoyer un rayonnement modifié par ses propriétés optiques, dont une partie seulement atteindra l'instrument placé sur avion ou sur satellite.

C'est la représentation simplifiée des phénomènes physiques qui permettent la télédétection. En fait, un certain nombre d'événements complexes se produisent au cours des traversées aller-retour de l'atmosphère et de la réflexion sur la terre, il s'agit des phénomènes d'absorption dans certaines bandes spectrales et des phénomènes de diffusion par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère.

On peut se demander s'il est raisonnable de chercher à modéliser les effets atmosphériques qui non seulement sont très complexes mais qui, de plus, présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

Chacun sait que les ressources nécessaires au bon fonctionnement d'un instrument à bord d'un satellite sont très limitées. La masse, le volume, l'énergie électrique doivent être utilisés de manière optimale.

Une mission d'observation de la terre étant envisagée, la première étape consiste à établir le bilan de liaison qui permettra un dimensionnement approximatif de l'instrument, et donc de déduire des informations quant à la faisabilité du projet. On recherche une certaine précision car l'époque des missions mono-instrument (type Météosat) est révolue. Il faut partager les ressources disponibles en plusieurs missions (type ERS-1) et la cohabitation est difficile.

Dans la détermination des caractéristiques instrumentales nécessaires, suffisantes pour remplir la mission, on a besoin de connaître la réflectance apparente à mieux que 0,01.

D'autre part, le satellite étant maintenant sur orbite, l'expérimentateur reçoit des informations sur la cible terrestre qui sont affectées par la présence de l'atmosphère. Il faudra qu'il en tienne compte dans ses évaluations, mais aussi pour la définition instrumentale (canaux de corrections atmosphériques).

On voit donc que la connaissance des effets atmosphériques se fait sentir non seulement à la conception, mais aussi pendant l'exploitation des informations au cours de la mission.

L'article qui suit présente une synthèse d'un contrat entre l'ESA et le Laboratoire d'Optique atmosphérique de l'Université de Lille dont le but est d'établir un modèle pratique des effets atmosphériques entre 0,35 et 4  $\mu\text{m}$  à l'usage des ingénieurs chargés de la définition des instruments optiques, et des utilisateurs des données expérimentales.

## Présentation qualitative du modèle d'atmosphère

### Généralités

Le problème à résoudre pour le dimensionnement des instruments optiques de télédétection est d'évaluer la quantité de rayonnement qui parvient jusqu'à l'instrument lorsqu'il est pointé sur les cibles terrestres étudiées. Cette énergie est en fonction du domaine spectral et des conditions géométriques de la prise de vue.

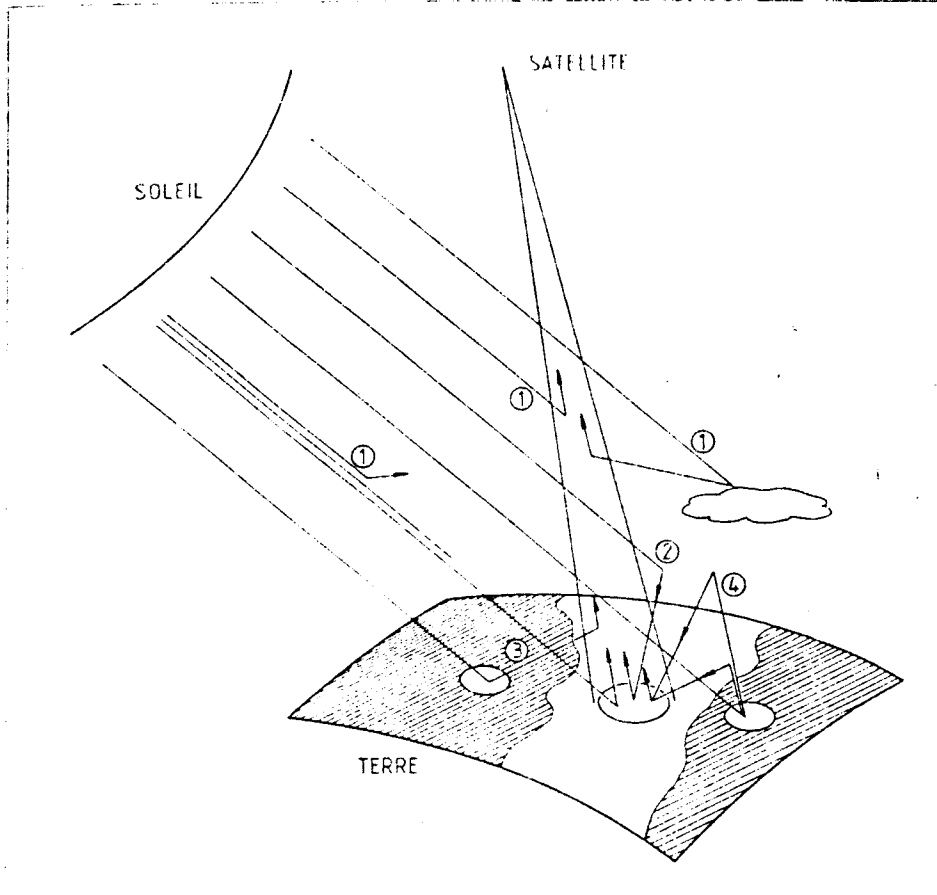
Imaginons que l'on retire l'atmosphère. Le rayonnement solaire parviendra à la surface de la terre sans atténuation. Une très faible proportion pourra être absorbée, mais la plus grande partie sera rétrodiffusée dans un demi-espace. Les seuls photons qui atteindront le détecteur dans l'instrument proviendront de là et ils constitueront le signal utile. Si l'on interpose maintenant l'atmosphère, un certain nombre d'événements plus ou moins complexes vont survenir au cours des trajets aller-retour dans l'atmosphère (Fig. 1).

Typiquement le signal utile représente 80% du signal total à 850 nm et 50% à 450 nm. On voit donc combien il est important de comprendre et de quantifier les effets atmosphériques.

### Eclairement de la cible

Il faut d'abord déterminer le nombre de photons qui tombent sur la cible c'est





aire l'éclairement total qu'elle reçoit. On peut distinguer trois composantes (Fig. 2).

#### *Eclairement direct (Fig. 2a)*

C'est celui qui arrive sur la cible après traversée directe de l'atmosphère. Schématiquement c'est celui que l'on obtiendrait si la cible était placée dans une demi-sphère opaque possédant une ouverture dans la direction du soleil. Il est égal à:

$$E_{\text{direct}} = E_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right)$$

$\tau$  = épaisseur optique totale (diffusion + absorption par les molécules et les particules)

$$\mu_0 = \cos \theta_0$$

#### *Eclairement diffusé par l'atmosphère (Fig. 2b)*

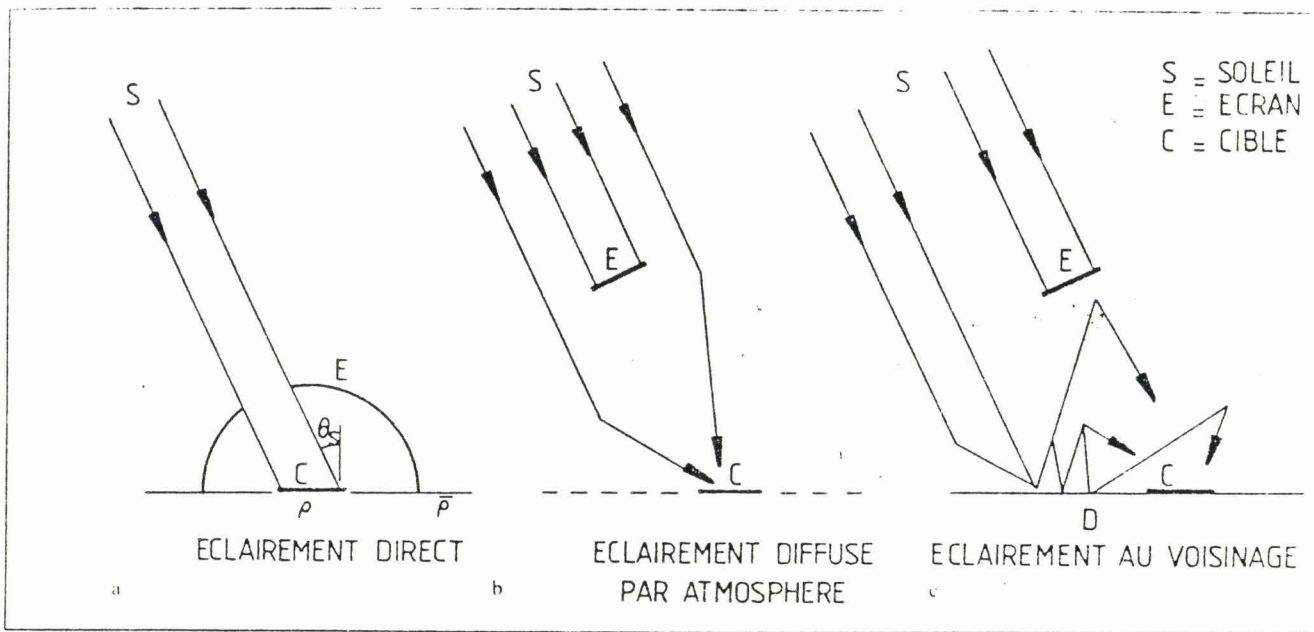
C'est celui qui arrive sur la cible après que les photons solaires aient subi au moins une diffusion dans l'atmosphère mais sans avoir touché le sol. Schématiquement, c'est l'éclairement que l'on obtiendrait si l'on supprimait les photons directs par un écran, la cible étant dans un environnement de réflectance nulle. Il est égal à:

$$E_{\text{diffusé}} = E_0 t_d(\theta_0)$$

$t_d$  (facteur de transmission diffusé).

#### *Eclairement en provenance du voisinage (Fig. 2c)*

Les photons solaires qui parviennent jusqu'au sol vont être rétrodiffusés et peuvent subir ensuite de nouvelles diffusions dans l'atmosphère qui peuvent les amener sur la cible. Ce processus de rétrodiffusion sur le sol puis dans l'atmosphère se reproduit plusieurs fois et sera représenté par une série géométrique:



Figures 2. Les différentes composantes de l'éclairage total au niveau du sol

$$E_s \mu_s \left[ \exp - \frac{\tau}{\mu_s} + t_d(\theta_s) \right] \left[ \rho_s s + \rho_v^2 s^2 + \dots \right]$$

( $\rho_v$ : réflectance du voisinage;  $s$ : albedo atmosphérique diffus)

*Eclairage total*

L'éclairage total de la cible dans un voisinage de réflectance  $\rho_v$  est égal à somme des trois composantes précédentes

$$E(\theta_s) = E_s \mu_s \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_v s}$$

avec

$$T(\theta_s) = \exp - \frac{\tau}{\mu_s} + t_d(\theta_s)$$

(transmission totale = transmission directe + transmission diffuse)

**Observation de la cible**

Plaçons-nous maintenant au niveau du satellite et observons la cible. Certains photons émis dans l'angle solide défini par la cible et ayant une bonne direction parviendront jusqu'à l'instrument. Ils peuvent avoir plusieurs origines.

*Luminance atmosphérique (Fig. 3c)*

Cette composante est constituée par les photons renvoyés par l'atmosphère avant d'avoir touché le sol.

Soit  $\rho_a(E, \mu)$  le signal qui tient compte à la fois de la diffusion sur les molécules et sur les particules. Il sera très important aux courtes longueurs d'onde et pour les grands angles d'observation.

*Luminance de la cible (Fig. 3a)*

Tous les photons éclairant la cible (directement et par diffusion) et renvoyés dans la direction de l'instrument n'atteindront pas l'instrument. Ils subiront une atténuation au cours de leur traversée de l'atmosphère. La réflectance de la cible est modifiée:

$$\rho_v E(\theta_s) \exp - \frac{\tau}{\mu_s}$$

$E(\theta_s)$  éclairage total.

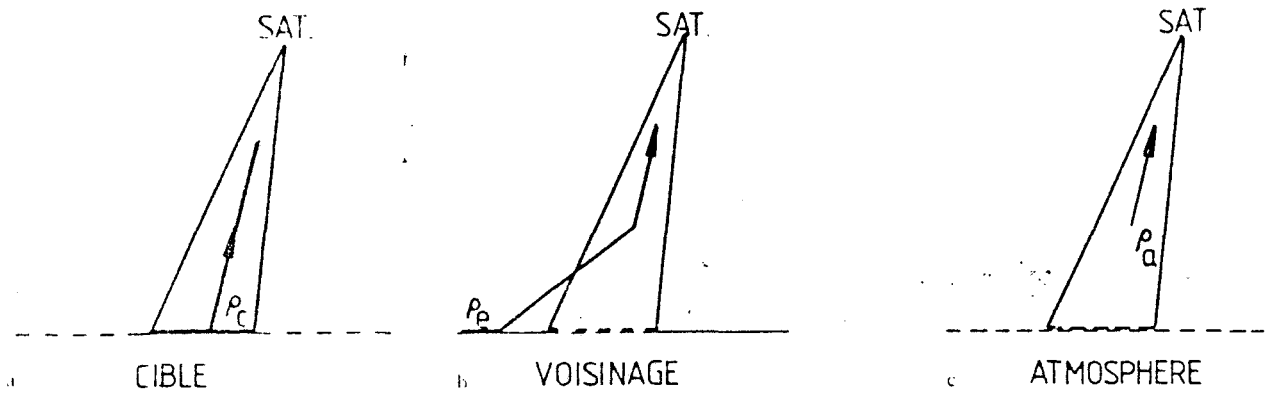


Figure 3. Luminance et réflectance apparentes totales vues du satellite

*Luminance du voisinage (Fig. 3b)*

Certains photons rétrodiffusés par le voisinage peuvent subir une nouvelle diffusion dans l'angle solide vu par l'instrument. Si les photons sont renvoyés dans la bonne direction, on aura une contribution du voisinage:

$$\tau_c I(\theta_c) \tau_p I(\theta_p)$$

$\tau_c$ : facteur de transmission diffuse.

**Réflectance apparente totale**

La luminance totale mesurée par l'instrument est la somme de trois composantes (atmosphère + cible + voisinage) dont les sensibilités spectrales sont assez complexes

- toutes les composantes sont fonction de la distribution spectrale du soleil; elles sont plus intenses dans le jaune que dans le rouge;
- la luminance utile portera la signature spectrale de la cible;
- la luminance atmosphérique moléculaire suit une loi en  $\lambda^{-4}$ , et celle d'origine particulaire une loi en  $\lambda^{-1}$ , avec 1- 1- 3 exposant d'Angström.

En général on préfère parler de réflectance apparente totale plutôt que de luminance.

$$\rho(\theta_c, \theta_p, \theta_a) = \frac{\pi I(\theta_c, \theta_p, \theta_a)}{\int_{\Omega} dI_s}$$

Cette relation n'est valable en toute rigueur que pour un diffuseur parfait mais elle permet de donner un bon ordre de grandeur dans la plupart des cas.

Il est intéressant de parler en terme de réflectance plutôt qu'en luminance car en supprimant la dépendance spectrale d'origine solaire, on fait apparaître les propriétés caractéristiques du milieu que l'on observe. Bien entendu lorsque l'on voudra évaluer l'amplitude du signal, il faudra repasser en termes de luminance.

La réflectance apparente totale vue par l'instrument au-dessus de l'atmosphère s'écrira:

$$\rho^0 = \rho_a + \frac{T(\tau_a)}{1 - \tau_a S} \left[ \rho_c \exp \left( \frac{\tau_a}{\mu_c} + \rho_c \chi_d(\theta_c) \right) \right]$$

Si le paysage est uniforme ( $\rho_c = \rho_s$ ) la formule se simplifie:

$$\rho^0 = \rho_s + \frac{T(\tau_a) T(\theta_c)}{1 - \tau_a S} \rho_s$$

Dans la plupart des cas, cette relation fournit une très bonne approximation du signal.

### Influence de la dimension de la cible

Jusqu'à présent nous avons considéré dans le bilan de la réflectance apparente totale que la cible n'était vue que par transmission directe à travers l'atmosphère et que la contribution du voisinage était prise en compte grâce au facteur de transmission diffuse comme cela est schématisé sur les Figures 4a & b.

Ceci n'est vrai que pour des cibles de dimensions très petites. En effet, lorsque le champ de vue élémentaire de l'instrument s'élargit et donc intercepte des zones de dimensions plus larges, un certain nombre de photons émis par les cibles peuvent atteindre l'instrument après diffusion dans l'atmosphère (Fig. 5).

Soit  $F(r)$  la fraction des photons diffusés en provenance de la cible de dimension  $2r$ , et  $[1 - F(r)]$  la fraction des photons diffusés en provenance du voisinage. La réflectance s'écrira alors:

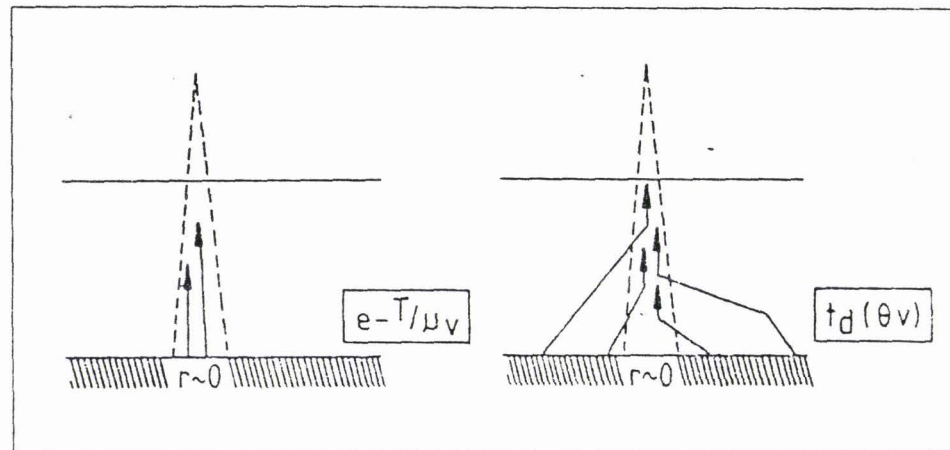
$$\rho^* = \rho_a + \rho_c \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_{cs}} [e^{-T/\mu_v} + F(r)t_d(\theta_r)] + \rho_c \frac{T(\theta_s)}{1 - \rho_{cs}} [1 - F(r)]t_d(\theta_r)$$

Notons que l'équation se simplifie dans le cas d'un sol de réflectance uniforme  $\rho_c = \rho_e$ .

La valeur de  $F(r)$  [ $0 < F(r) < 1$ ] est fonction de l'amplitude des phénomènes de diffusion atmosphérique: elle dépend de la qualité de l'atmosphère caractérisée par la visibilité et aussi un peu de la longueur d'onde de travail.

Sur la Figure 6, on voit que  $F(r)$  est pratiquement nul pour des cibles de quelques douzaines de mètres; par contre  $F(r)$  vaut environ 0.5 pour une cible de 1 km et une visibilité de 23 km.

Figures 4a.b. Transmission directe et transmission diffuse dans le cas de cibles de faibles dimensions



Figures 5a.b. Notion de fonction d'environnement

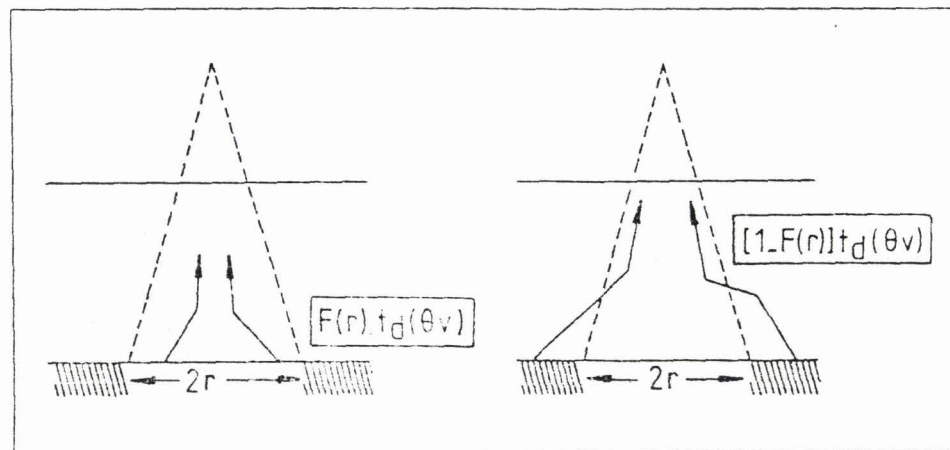
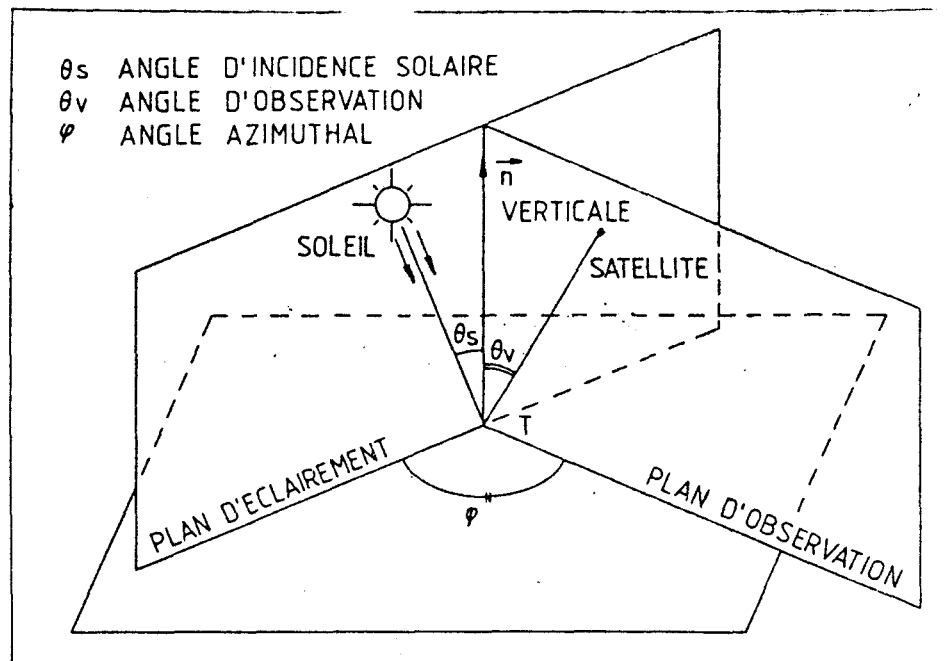


Figure 7. Conditions géométriques d'éclairage et d'observation



- les conditions géométriques d'observation: très fréquemment les exigences de bon fonctionnement s'étendent jusqu'à des angles d'incidence solaire  $\theta_s$  de  $60^\circ$  et des angles d'observation  $\theta_v$  de  $45^\circ$ . Par contre, l'angle  $\varphi$  pourra varier de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  en prenant toutes les valeurs intermédiaires.

#### Formulation analytique approchée

Nous avons vu précédemment que la réflectance apparente totale vue par l'instrument dans le cas d'un paysage uniforme est donnée par la relation:

$$\rho^* = \rho_a + T(\theta_s)T(\theta_v) \frac{\rho_c}{1 - \rho_{cs}}$$

avec

$$T(\theta) = \left[ \exp\left(-\frac{\tau}{\mu}\right) \right] + \iota_a(\theta)$$

L'objectif du modèle pratique d'atmosphère que nous avons voulu mettre sur pied est de pouvoir calculer d'une manière assez simple les différents paramètres atmosphériques qui figurent dans la relation exprimant la réflectance ou la luminance apparente. Les données initiales, caractéristiques de la mission d'observation qui doivent être injectées dans le modèle sont:

- la longueur d'onde d'observation  $\lambda$  et la largeur spectrale des canaux  $\Delta\lambda$ .
- l'épaisseur optique des aérosols à  $\lambda_a = 1 \mu\text{m}$  qui caractérise la proportion et la nature des aérosols;
- les conditions géométriques:  $\theta_s, \theta_v, \varphi$ .

Les différentes fonctions atmosphériques nécessaires au calcul de  $\rho^*$  peuvent être déterminées par approximation selon les relations suivantes:

#### Transmission atmosphérique totale

$$T(\theta_s) = \frac{1}{1 + (b\tau/\mu_s)} \quad \text{et} \quad T(\theta_v) = \frac{1}{1 + (b\tau/\mu_v)}$$

avec  $\tau = \tau_m^d + \tau_p$  et

$$\tau_m^d = \left( \frac{84.35}{\lambda^4} - \frac{1.225}{\lambda^6} + \frac{1.41}{\lambda^8} \right) 10^{-6}$$

( $\lambda$  exprimé en  $\mu\text{m}$ )

$$\tau_p = \tau_p(\lambda_0) \left( \frac{1.0317}{\lambda} - \frac{0.0317}{\lambda^2} \right)$$

[Relation valable pour des aérosols de type continental. Dans ce cas, pour une visibilité de 23 km,  $\tau_p(\lambda_0 = 1 \mu\text{m}) = 0.132$ ].

D'autre part:

$$b = \frac{\tau_m^d h_m + \tau_p h_p}{\tau_m^d + \tau_p}$$

$h_m = 0.5$  et  $h_p = 0.16$  pour des aérosols de type continental.

La Figure 8 donne une représentation graphique de  $\tau_p$  et de  $\tau_m$  en fonction de la longueur d'onde. Le terme prépondérant est  $\tau_p$  sauf quand  $\lambda$  devient inférieur à 400 nm environ.

Les Figures 9a & 9b donnent une idée de l'accord qui existe entre les valeurs exactes et les valeurs calculées par la formule approchée de la transmission atmosphérique totale.

#### Albedo atmosphérique diffus

Il peut s'exprimer sous la forme

$$s = 2b\tau / (1 + 2b\tau)$$

qui fournit une très bonne approximation (Fig. 10).

#### Réflectance intrinsèque de l'atmosphère

Cette fonction atmosphérique importante est beaucoup plus délicate à formaliser. Si l'on néglige les diffusions atmosphériques d'ordre supérieur on peut écrire:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_r, \varphi) = \frac{\tau \bar{p} [\xi(\theta_s, \theta_r, \varphi)]}{4 \mu_s \mu_r}$$

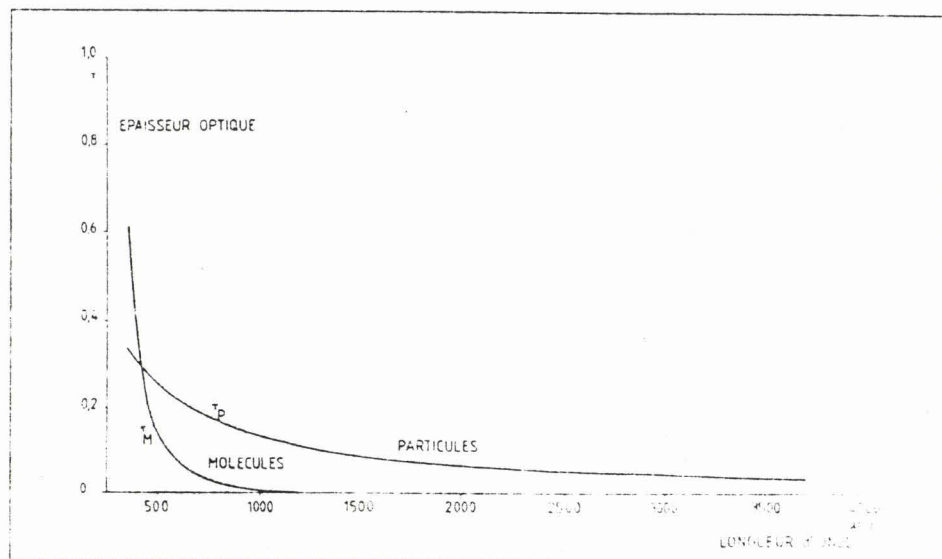


Figure 8. Variation des épaisseurs optiques des molécules et des particules

Figures 9a. b. Transmission totale  $T(\theta_i)$  (directe et diffuse) pour les trois modèles d'atmosphère et pour deux géométries

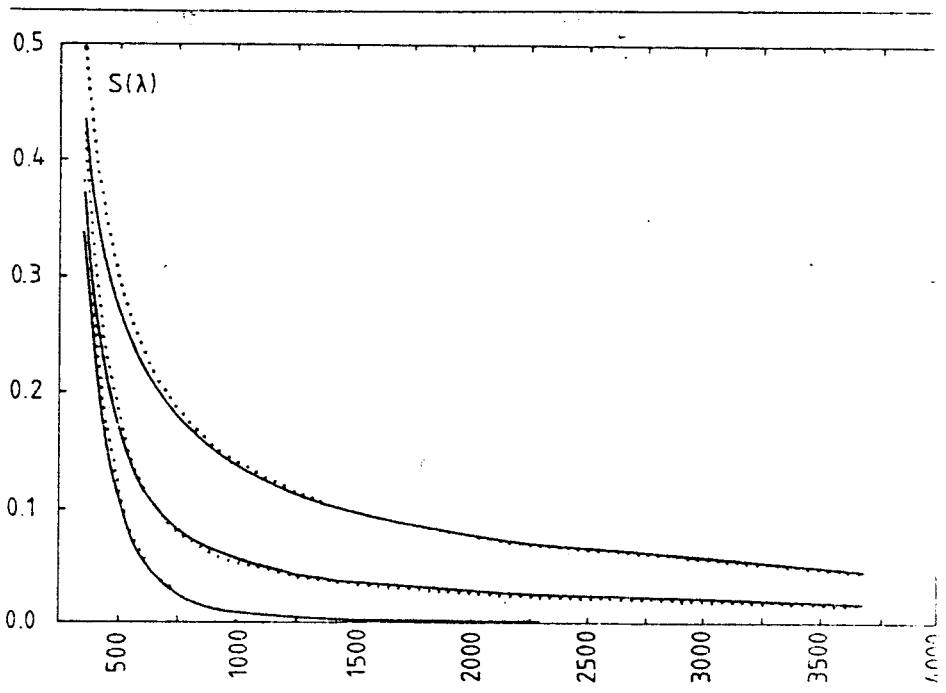
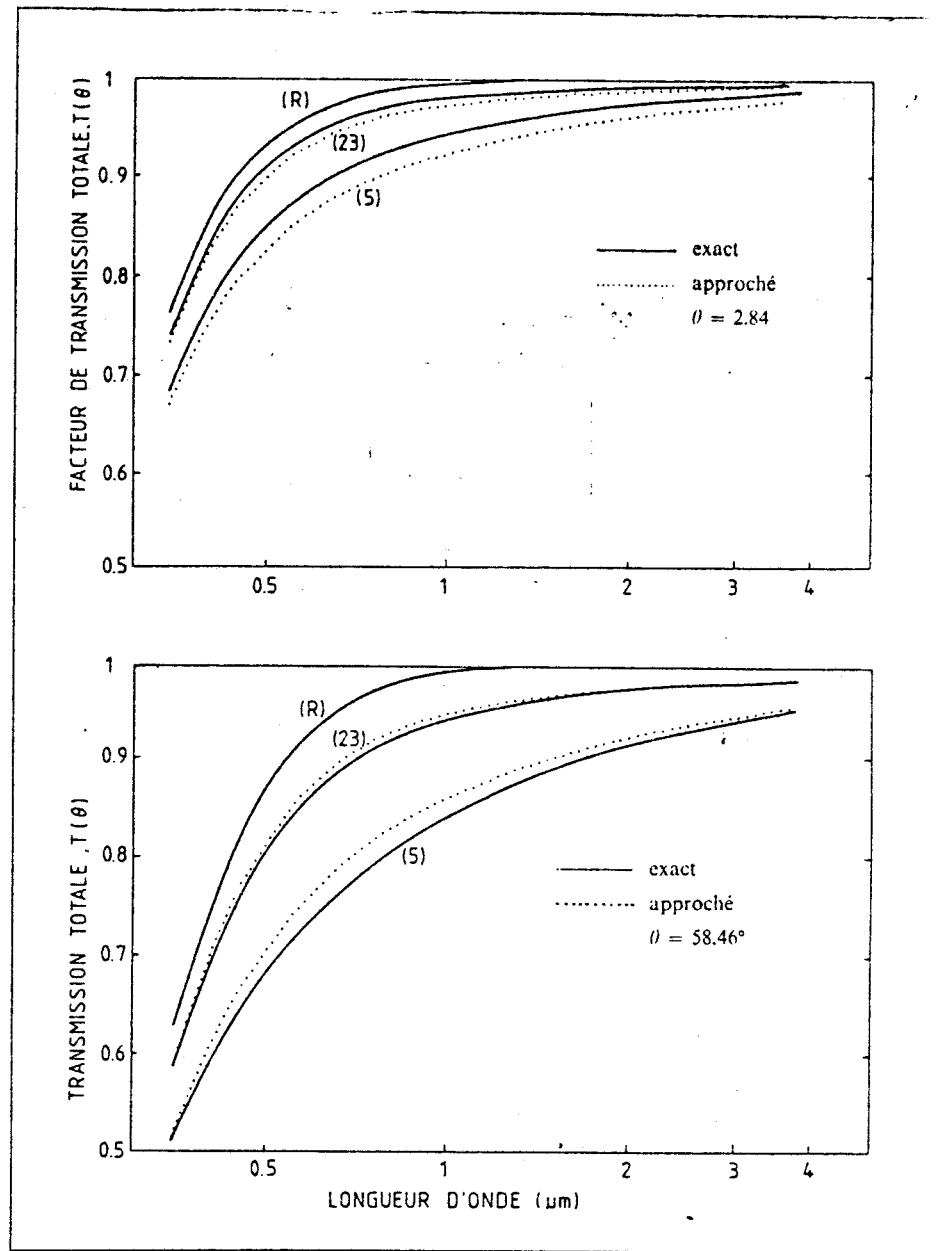


Figure 10. Albedo atmosphérique diffus pour les trois modèles d'atmosphère

$\bar{p}(\xi)$  est la fonction de phase de la diffusion atmosphérique (molécules + aérosols) telle que:

$$\bar{p}(\xi) = \frac{\tau_m^d p_m(\xi) + \tau_r p_r(\xi)}{\tau_m^d + \tau_r}$$

La fonction de la phase des molécules vaut:

$$p_m(\xi) = 0,7552 + 0,7345 \cos^2 \xi$$

et

$$\cos \xi = - [\mu_s \mu_r + (1 - \mu_s^2)^{\frac{1}{2}} \times (1 - \mu_r^2)^{\frac{1}{2}} \times \cos \phi_r]$$

Par contre la formulation analytique de la fonction de phase des aérosols est difficile et il vaut mieux avoir recours à un tableau de valeurs numériques (Tableau 1).

#### Limites du modèle

Une question importante à résoudre concerne les limites des conditions d'utilisation de la formulation proposée. On a pu se rendre compte sur les seuls exemples présentés précédemment qu'il pouvait exister certains écarts entre les résultats des calculs rigoureux et ceux donnés par le modèle.

Tableau 1. Valeurs numériques de la fonction de phase pour les aérosols de type continental

$\xi$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$p(\xi)$	9.7	5.84	3.45	2.09	1.297	0.822	0.538	0.36	0.26	0.195
$\xi$	110	120	130	140	150	160	170	180		
$p(\xi)$	0.168	0.152	0.153	0.172	0.220	0.315	0.356	0.483		

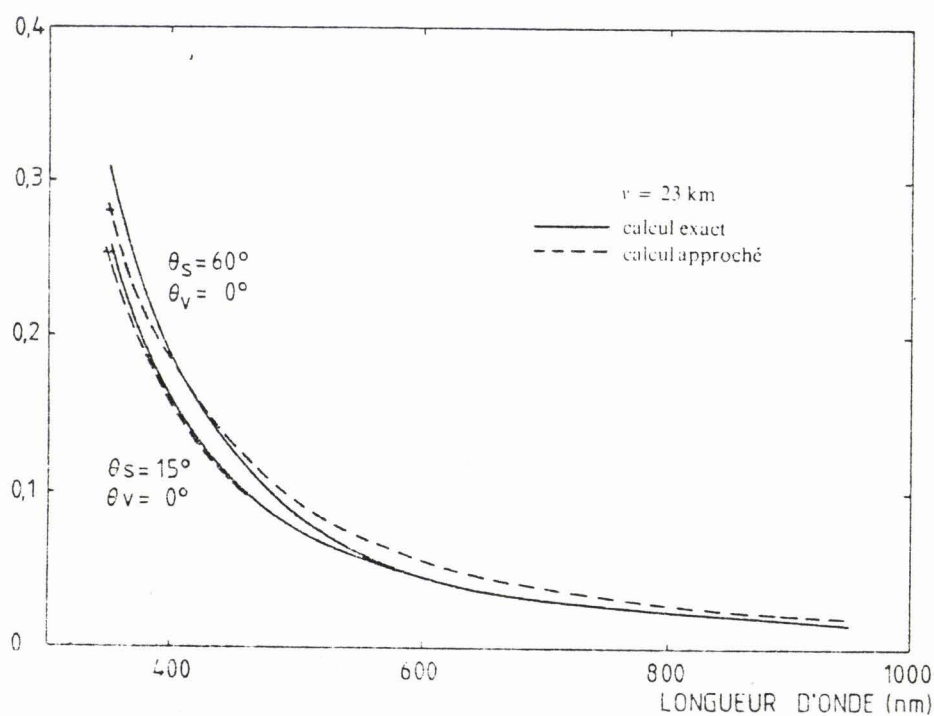


Figure 11. Réflectance atmosphérique  $\nu_a$  en fonction de la longueur d'onde pour une visibilité de 23 km et deux géométries



Pour une atmosphère caractérisée par une visibilité de 23 km l'accord est tout fait correct. Pratiquement, on peut dire que la modélisation analytique proposé donne de bons résultats tant que la condition:

$$\frac{\tau}{\mu_s \mu_r} < 0.5 \text{ est respectée}$$

Exemple: visibilité 23 km; à 0.7  $\mu\text{m}$ .  $\tau_m^d = 0.04$  et  $\tau_p = 0.15$

$$\mu_s \mu_r > 0.38 \quad \begin{cases} \theta_s = 60^\circ, \theta_r < 40^\circ \\ \theta_s = 0^\circ, \theta_r < 68^\circ \end{cases}$$

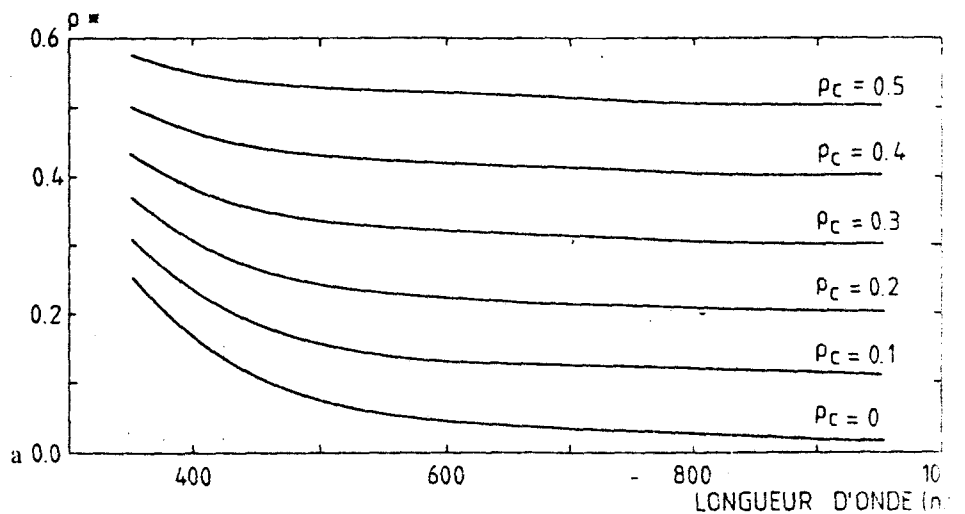
On couvre donc assez bien les conditions géométriques rencontrées dans le cas de missions d'observation de la terre.

Réflectance apparente

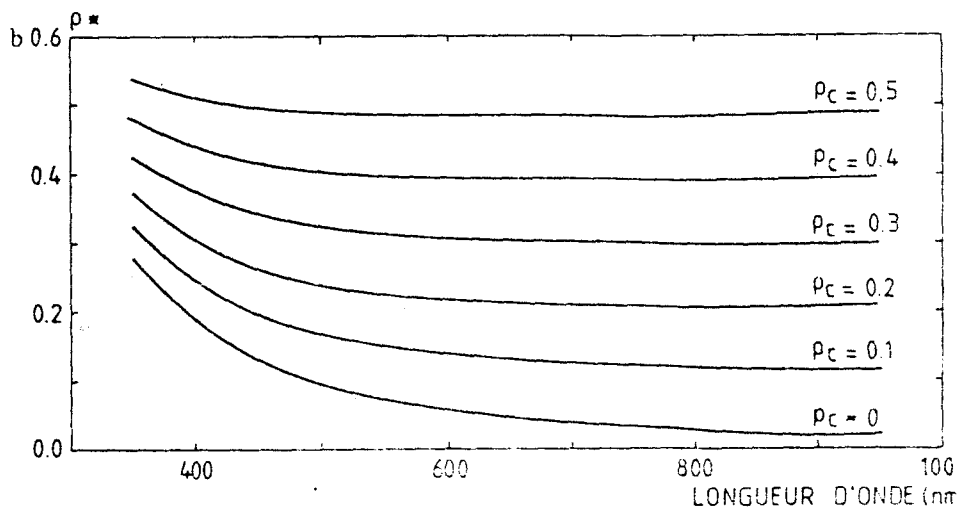
La réflectance apparente d'une région homogène vue par l'instrument placé au-dessus de l'atmosphère est donnée par la relation:

$$\rho^* = \rho_a + \frac{\rho_c}{(1 - \rho_c s)} T(\theta_s) T(\theta_r)$$

Sur les Figures 12a et b, on a représenté les variations de  $\rho^*$  en fonction de la longueur d'onde et pour différentes réflectances.



$V = 23 \text{ km}, \theta_s = 15^\circ, \theta_v = 0$



$V = 23 \text{ km}, \theta_s = 15^\circ, \theta_v = 0$

Figure 12. Réflectance apparente  $\rho^*$  en fonction de la longueur d'onde pour deux conditions de prise de vue et pour une visibilité de 23 km

Malgré l'atténuation due aux transmissions atmosphériques directes, on remarque que la réflectance apparente est presque toujours supérieure à la réflectance de la cible par suite des phénomènes de diffusion qui sont pris en compte dans les paramètres  $\rho_a$ ,  $t_d(\theta_s)$ , et  $t_d(\theta_r)$ .

Aux courtes longueurs d'onde, on peut constater que la diminution due au terme  $T(\theta_s)$   $T(\theta_r)$  est plus que compensée par l'augmentation due à la réflectance atmosphérique.

### Absorption gazeuse (Tableau 2)

Les paramètres d'absorption gazeuse sont très variables et leur tabulation a déjà fait l'objet de plusieurs modèles, le Lowtran 5 notamment. Dans le domaine spectral de 0,35 à 4  $\mu\text{m}$ , on peut trouver un certain nombre de fenêtres dépourvues de bande d'absorption qu'on aura tout intérêt à utiliser.

Au voisinage de 0,6  $\mu\text{m}$ , les effets de  $\text{H}_2\text{O}$  et de  $\text{O}_3$  peuvent atténuer la réflectance totale suivant les relations:

$$t_{\text{H}_2\text{O}}(\theta_s) t_{\text{H}_2\text{O}}(\theta_r) = \exp \left[ - \beta_w \left( \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_r} U_w \right)^{1/2} \right]$$

$$t_{\text{O}_3}(\theta_s) t_{\text{O}_3}(\theta_r) = \exp \left[ - K_o \left( \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_r} \right) U_o \right]$$

$U_w$  et  $U_o$  représentent les contenus moyens en eau et ozone.

Tableau 2. Contenus en vapeur d'eau et en ozone

	$U_w$ (g cm <sup>2</sup> )	$U_o$ (atm. cm)
Latitudes élevées	0,5	0,5
Zones tropicales	5	0,2

$\beta_w$  et  $k_o$  dépendent de la position et de la largeur de la bande choisie.

### Application aux radiomètres 'OCM' et 'OII'

La comparaison entre la formulation analytique approchée et le calcul rigoureux a été fait pour la détermination des réflectances et des luminances apparentes pour les différentes bandes spectrales des instruments OCM et OII. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 donnent une idée de la précision que l'on peut obtenir.

Conditions d'observation: visibilité 23 km,  $\theta_s = 60^\circ$ ,  $\theta_r = 0$

Tableau 3. Comparaisons entre les résultats du modèle simplifié et de calculs rigoureux OCM

Canal	Longueur d'onde apparente centrale (nm)	Largeur spectrale (nm)	Réflectance cible typique	Réflectance modèle amplifié	Réflectance calculs précis.
1	400	20	0,05	0,218	0,218
2	445	20	0,042	0,156	0,161
3	520	20	0,015	0,086	0,095
4	565	20	0,004	0,060	0,069
5	640	20	0,0008	0,04	0,048
6	685	20	0,0008	0,033	0,041
7	785	30	0, ...	0,023	0,029
8	1020	60	0, ...	0,014	0,019
9	1600	100	0, ...	0,007	0,009

1	560	80	0.2	0.223	0.230
2	665	50	0.1	0.122	0.129
3	775	50	0.5	0.487	0.491
4	850	100	0.55	0.537	0.539
5	1650	200	0.3	0.297	0.298
6	2215	270	0.25	0.249	0.249

## Conclusion

Le coût très élevé du kilogramme mis en orbite nous impose un gros effort d'optimisation dans le dimensionnement des instruments optiques d'observation de la terre par rapport à l'objectif scientifique recherché. Il faut bien entendu que la mission soit possible, mais il faut aussi éviter tout surdimensionnement qui se traduirait par un surcroît du coût correspondant. C'est dans cet esprit que nous avons entrepris l'élaboration d'un modèle pratique des effets atmosphériques. Nous nous sommes efforcés de mettre en évidence que le signal utile, c'est-à-dire celui en provenance de la cible visée, n'est pas le seul présent. Il faut tenir compte de la composante atmosphérique  $\rho_a$  ainsi que des contributions à l'éclairement de la cible des diffusions multiples et du couplage par l'atmosphère.

Les informations données dans cet article (à l'exception du spectre solaire hors atmosphère que l'on trouve partout) doivent permettre de calculer des bilans de liaison pour les instruments optiques opérant entre 0.35 et 4  $\mu\text{m}$  avec une précision meilleure que 5%.

Ce modèle pourra être aussi utilisé pour effectuer les corrections atmosphériques sur les données transmises au sol pendant la mission.

## Liste des Symboles

$\lambda, \Delta\lambda$	longueur d'onde, largeur spectrale	
$z, dz/\cos \theta_s$	altitude, épaisseur d'atmosphère traversée	
$\theta_s$	angle d'incidence solaire	
$\theta_r$	angle de visée	
$\varphi$	angle azimutal entre plan d'éclairement et plan d'observation	
$F$	flux (watts, photons/seconde)	
$K = \sigma + k$	Coefficient d'atténuation = coeff. diffusion + coeff. absorption	
m, p	molécules, particules	
a, d	absorption, diffusion	
$d\tau = K dz$	épaisseur optique (sans dimension)	
$p(\xi), \xi$	fonction de phase de la diffusion, angle de diffusion	
$E_s$	éclairement solaire spectral hors atmosphère sur une surface perpendiculaire à la direction du soleil	
$\rho_c, \rho_e$	réflectance cible, réflectance environnement	
$\rho^*$	réflectance apparente	} totale mesurée par l'instrument } au-dessus de l'atmosphère
$L^*$	luminance apparente	
$E(\theta_s)$	éclairement solaire total au niveau du sol (direct et diffus)	
$T(\theta_s) = \exp(-\tau_s) + t_d(\theta_s)$	[transmission atmosphère totale (directe + diffuse)]	
$s$	albedo atmosphérique diffuse	
$0 < F(r) < 1$	fonction d'environnement	
$b$	facteur de rétrodiffusion	

Manuscript reçu le 11 janvier 1982



## CHAPITRE III

RESULTATS
-----------

On se propose , dans ce chapitre, de mettre en évidence et d'analyser les changements intervenus sur des scènes MSS/LANDSAT acquises à des dates suffisamment proches dans le temps pour que les réflectances du sol puissent être considérées comme invariantes et que les changements puissent être attribués aux variations de l'atmosphère.

Les objectifs de cette analyse sont :

(i) valider l'utilisation de la modélisation théorique des effets atmosphériques qui a été développée et exposée précédemment, en montrant que cette modélisation permet d'expliquer les changements intervenus dans les images, en particulier sous l'influence variable des aérosols.

(ii) montrer que les imageries LANDSAT, et bien évidemment du futur HRV/SPOT peuvent être fortement affectées par des effets atmosphériques variables dans le temps et dans l'espace.

(iii) évaluer les conséquences de ces effets variables sur l'utilisation de l'imagerie afin de pouvoir en dégager des propositions en ce qui concerne les méthodes de corrections, point qui sera plus particulièrement développé au chapitre IV.

### III 1 ANALYSE VISUELLE DES EFFETS DES AEROSOLS SUR DES IMAGES MSS/LANDSAT :

---

On a cherché à mettre en évidence des effets atmosphériques sur une même scène observée à des dates différentes. Afin de pouvoir attribuer à des effets atmosphériques les changements intervenus dans l'imagerie, il faut travailler sur des scènes invariantes dans le temps où bien acquises à des dates très rapprochées. Pour cela on a utilisé la zone de recouvrement - un tiers de l'image aux latitudes moyennes - qui existe entre deux scènes MSS/LANDSAT adjacentes acquises à un jour d'intervalle (Figure III 1)

De nombreux couples de scènes ont ainsi été constitués et examinés, et la plupart de ces couples montrent peu de variations d'un jour à l'autre. Un exemple en est donné par le couple de scènes enregistrées les 26 et 27 juillet 1975. Les figures III-2 et III-3 donnent les images des 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone commune de recouvrement ( Vallée de la Loire-Sologne) pour les deux dates, après rectification géométrique de l'une par rapport à l'autre.

Le tableau III 1 rappelle les 4 bandes spectrales de MSS dans lesquelles sont effectuées les mesures avec une résolution spatiale de 80 sur 60 m.

Visuellement, on n'observe pas de changements entre les deux scènes, ce qui est confirmé par l'analyse, du contenu radiométrique, en valeur moyenne et écart-type. Les relevés des stations météorologiques situées dans la zone de recouvrement (Châteaudun, Orléans, Bourges, Châteauroux) indiquent de bonnes conditions de visibilité au sol ( 20 Km ), et constante d'un jour à l'autre. On a donc affaire les 26 et 27 juillet 1975 à un bon exemple de stabilité des effets atmosphériques correspondant à un contenu minimum en aérosols, et à de bonnes conditions de prises de vue.

Par contre le couple de scènes enregistrées, sur la même zone de recouvrement, les 12 et 13 Avril 1976, permet d'illustrer de façon plus radicale, l'influence variable des aérosols sur des images MSS/LANDSAT. Les images obtenues dans les 4 canaux du MSS/LANDSAT, enregistrées le 12 Avril 1976 et traitées en équipopulation sont données sur la figure III-4 et n'appellent pas de remarque particulière : elles correspondent à des relevés de visibilité au sol autour de 15 Km, et donc à des conditions moyennes d'observation. Sur la figure III-5 on a appliqué le même traitement aux images du 13 Avril 1976 en réutilisant les seuils d'équipopulation déterminés le 12 Avril 1976 : les images obtenues dans les canaux MSS4 et MSS5 sont considérablement dégradés par une augmentation du signal qui sature l'image, en particulier dans la partie inférieure gauche; les images obtenues dans les canaux MSS6 et MSS7 sont moins affectés en niveau moyen, si ce n'est en perception des contrastes.

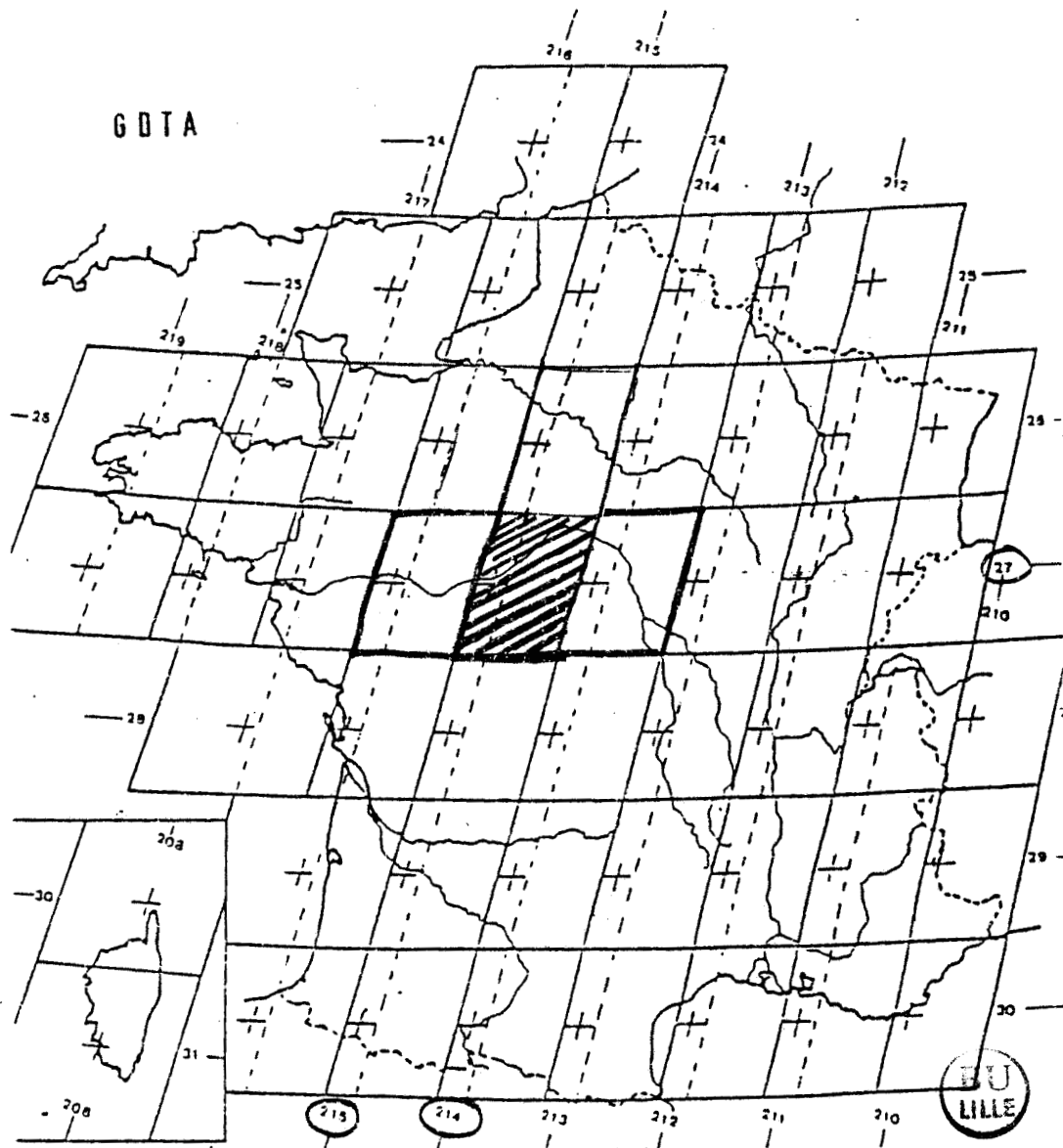


Figure I-1 Couverture LANDSAT de la FRANCE  
 - une image correspond à la partie hachurée  
 - les croix représentent les centres  
 nominaux des images  
 - une image est repérée par les coordonnées  
 du centre  
 La zone sur laquelle nous travaillons est hachurée



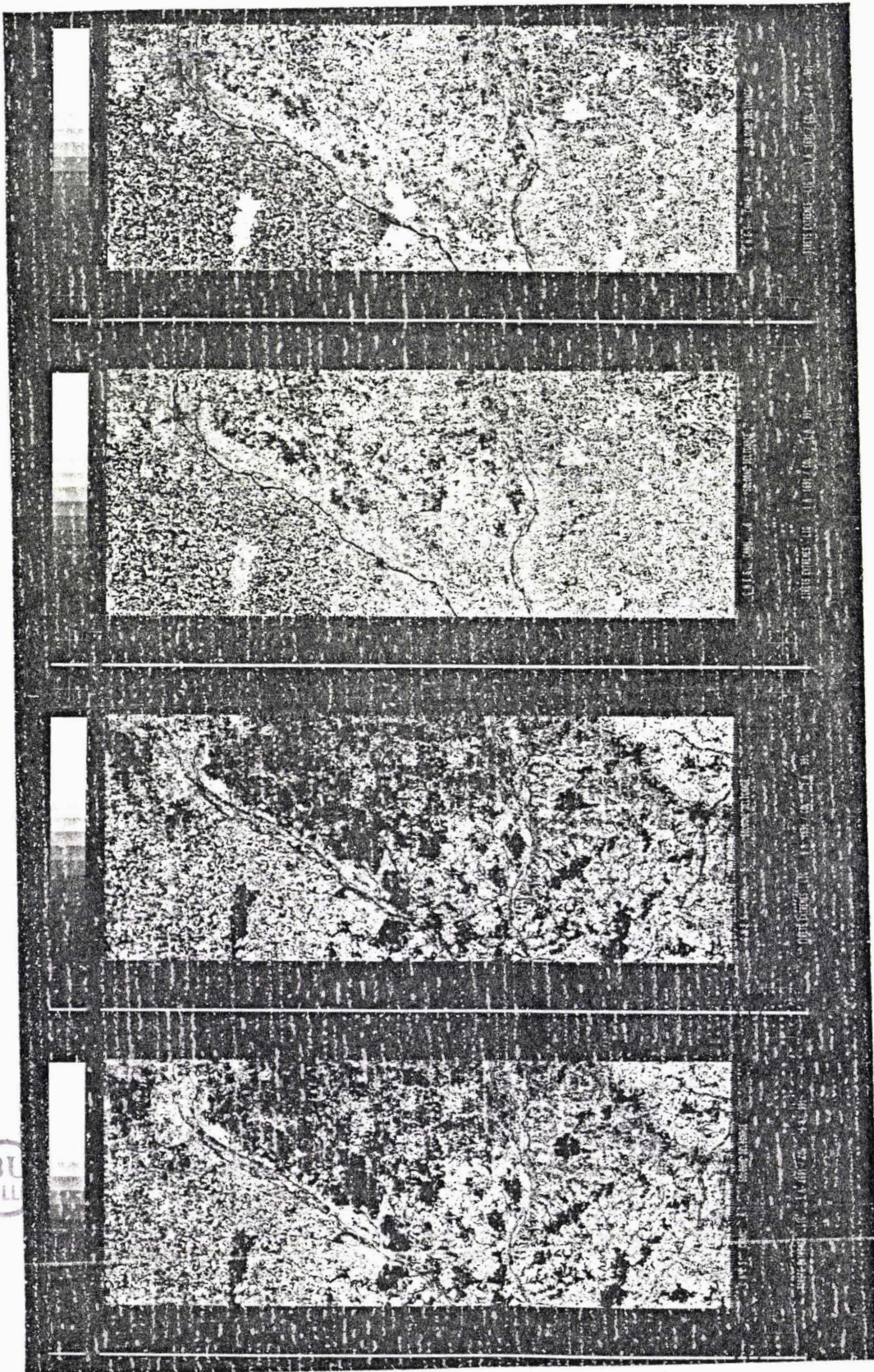


Figure III-2 Scène enregistrée le 26 Juillet 1975 dans les 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone de recouvrement qui existe à une journée d'intervalle pour deux traces adjacentes. Cette image représente la Sologne et le Val de Loire, région située au Sud-Ouest de PARIS.

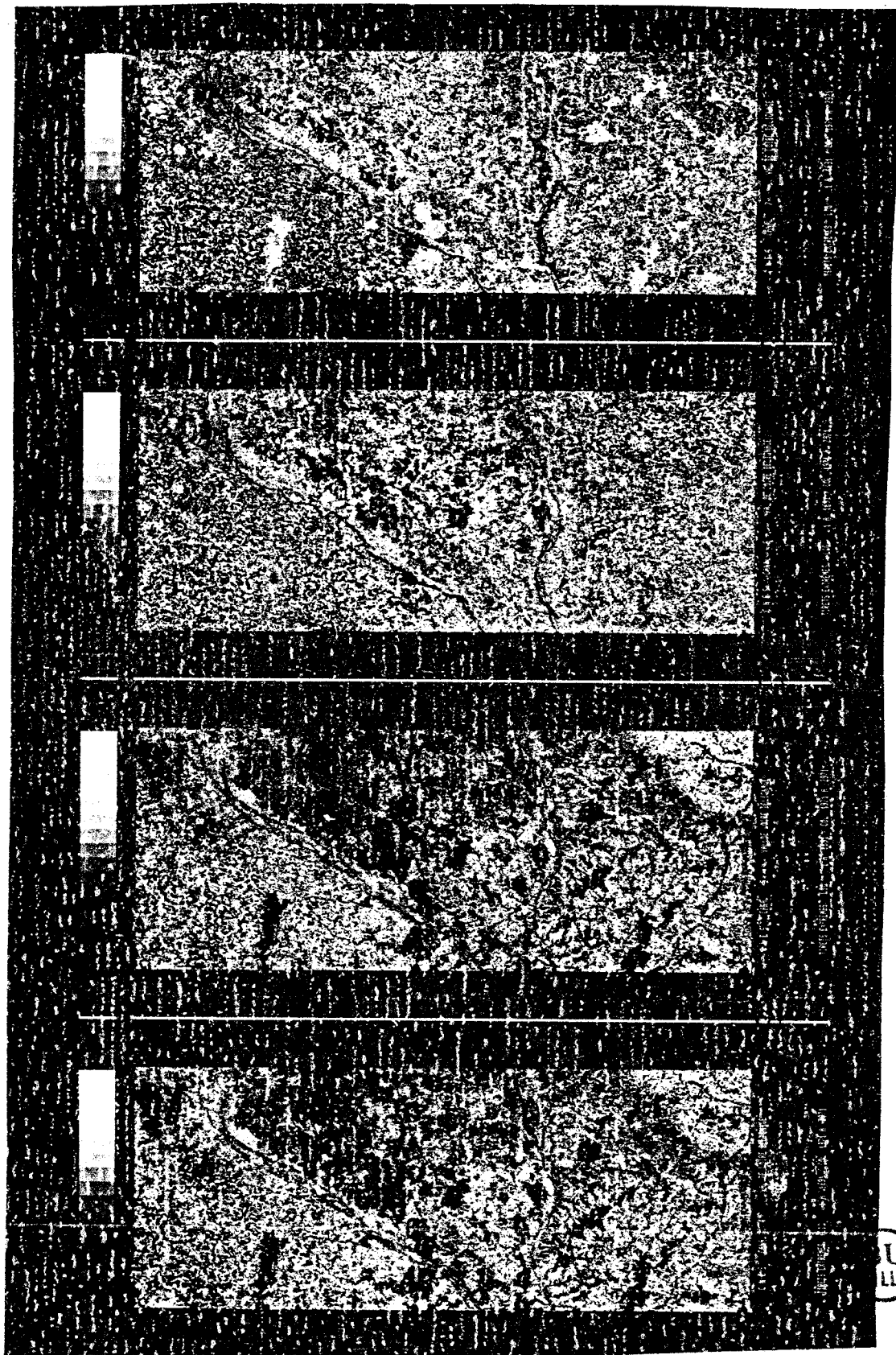


Figure III-3 Scène enregistrée le 27 Juillet 1975 dans les 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone de recouvrement qui existe à une journée d'intervalle pour deux traces adjacentes. Cette image représente la Sologne et le Val de Loire, région située au Sud-Ouest de PARIS.

Figure III-4 Scène enregistrée le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone de recouvrement qui existe à une journée d'intervalle pour deux traces adjacentes. Cette image représente la Sologne et le Val de Loire, région située au Sud-Ouest de PARIS.

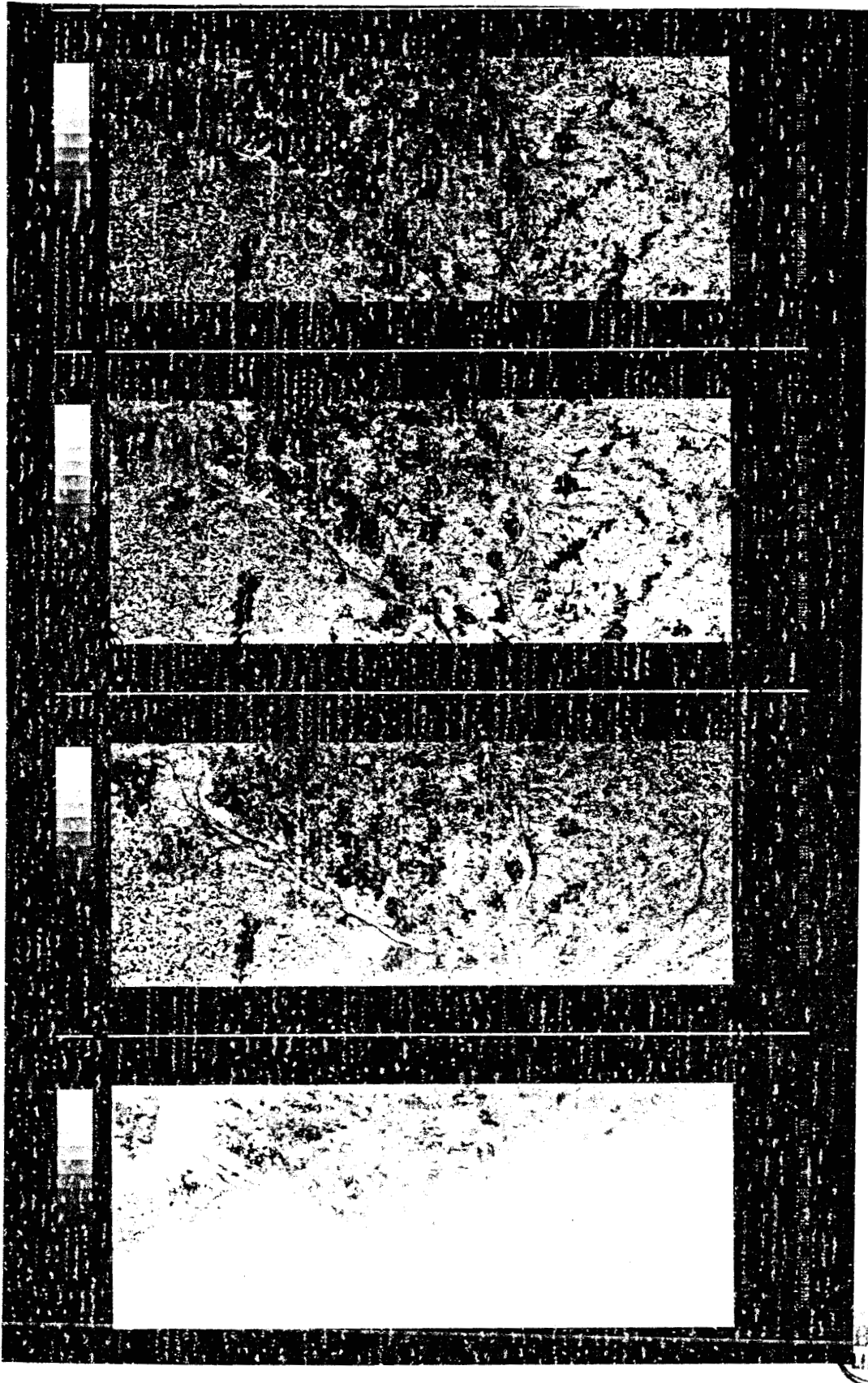


Figure III-5 Scène enregistrée le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone de recouvrement qui existe à une journée d'intervalle pour deux traces adjacentes. Cette image représente la Sologne et le Val de Loire, région située au Sud-Ouest de PARIS.  
Mêmes seuils d'équipopulation que pour le 12 Avril 1976.

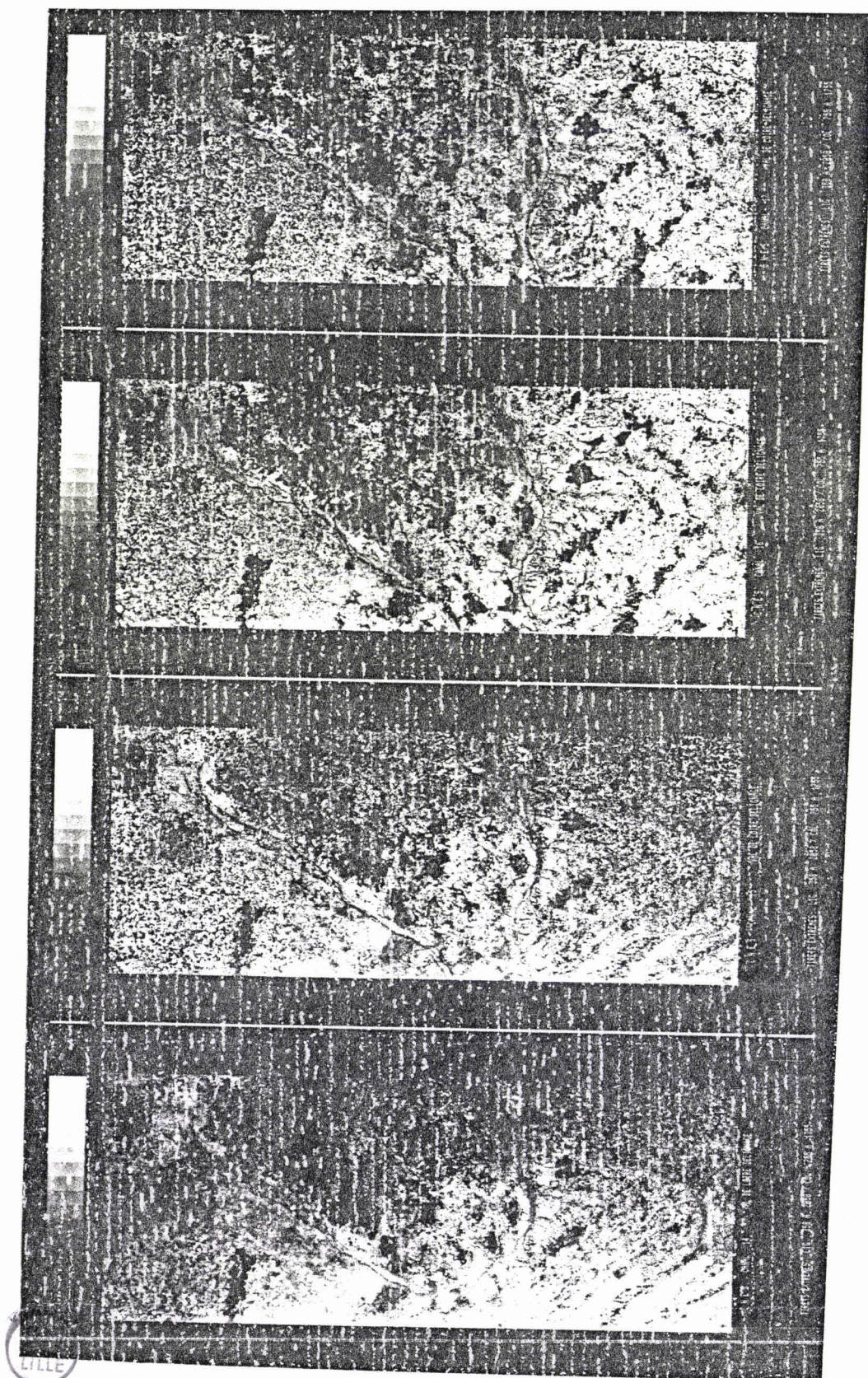


Figure III-6 Scène enregistrée le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS/LANDSAT dans la zone de recouvrement qui existe à une journée d'intervalle pour deux traces adjacentes. Cette image représente la Sologne et le Val de Loire, région située au Sud-Ouest de PARIS.  
Seuils d'équipopulation adapté à l'image.

(La figure III-6 donne à nouveau les images du 13 avril 1976, mais après un traitement en équipopulations déterminés sur ces mêmes images : ce traitement restaure en partie la qualité originale des documents observés le 12 avril, tout au moins dans les canaux 6 et 7 ). L'analyse du contenu radiométrique des images fait apparaître une augmentation du 12 au 13 avril de la réflectance moyenne et une diminution de l'écart-type, ce qui est conforme à ce que prévoit la théorie pour une augmentation de la concentration en aérosols. Les observations des stations météorologiques proches relèvent des visibilités horizontales plus faibles pour les 13 Avril 1976 (5 à 10km) que le 12 Avril 1976, ce qui correspond à une brume assez épaisse et à des conditions d'observations dégradées et conforte donc l'impression plus ou moins visuelle d'une présence de brume le 13 avril 1976, déduite de l'observation des images.

En attendant une interprétation plus complète de ces effets qui sera développée plus loin plusieurs conclusions d'ordre pratique peuvent être tirées dans l'immédiat :

- la variabilité des aérosols et de leurs effets sur les données peut être assez grande dans le temps (à un jour d'intervalle) et dans l'espace (voir le quart gauche inférieur des images du 13 avril 1976)
- les effets atmosphériques apparaissent le mieux dans les canaux MSS4 et MSS5, alors que les canaux MSS6 et MSS7 ne le montrent que plus faiblement, ou même pas du tout après un traitement par équipopulation : le canal MSS4 ou MSS5 devrait être utilisé pour la sélection des images de "bonne qualité atmosphérique" dans les catalogues de quick-looks de préférence aux canaux MSS6 ou MSS7, qui ont l'inconvénient de minimiser les effets,
- le contraste des images et le rapport de l'écart-type à la moyenne sont maximum pour un effet atmosphérique minimum : ce critère plus quantitatif peut être appliqué systématiquement à la sélection de données de bonne qualité atmosphérique, ce qui constitue une méthode de correction atmosphérique approchée mais efficace puisqu'elle tend à minimiser les effets.

Dans ce qui suit on retiendra le couple de scènes des 12 et 13 avril 1976 pour une analyse plus quantitative des changements intervenus dans le contenu radiométrique par suite de la présence d'aérosols, et une interprétation à l'aide du modèle théorique de transfert radiatif.

### III 2 ANALYSE QUANTITATIVE :

---

---

L'effet des aérosols sur les données MSS/LANDSAT peut être analysé de façon plus qualitative à partir des variations de la valeur moyenne, de l'écart-type et de la fonction de structure des réflectances spectrales observées aux deux dates. L'utilisation de la fonction de structure, qui sera définie plus loin, permet de mieux isoler la contribution des structures de petite dimension dans un paysage donné, ce qui est important car on a vu que la modélisation de l'effet des aérosols n'était pas le même selon que l'on a affaire à des structures de petites ou grandes dimensions. L'ensemble de ces fonctions, valeur moyenne, écart-type et fonction de structure, permettent de décrire statistiquement le contenu des images observées et sont affectées par la présence d'aérosols. Dans ce qui suit on cherchera à interpréter les variations de ces fonctions entre le 12 et 13 avril 1976 à l'aide de la modélisation théorique de l'effet des aérosols.

La couche de brume observée sur l'image du 13 avril 1976 présente une variabilité spatiale certaine à l'intérieur de la zone de recouvrement étudiée (800 sur 1600 pixels). L'étude des variations définies ci-dessus doit être faite sur des éléments plus petits à l'intérieur desquels la concentration en aérosols peut être considérée comme à peu près constante, par exemple un pavé de 100 sur 100 pixels; soit environ 8 sur 6 km. La zone de recouvrement est alors décrite par les tableaux de 8 colonnes sur 16 lignes, des valeurs des fonctions, à une date donnée, pour un cas donné. La figure III-7 montre la grille des pavés ainsi définis et superposée à l'image de la zone de recouvrement.

Les comptes numériques sont convertis en luminances, puis en réflectances spectrales après normalisation à l'éclairement solaire. (28)

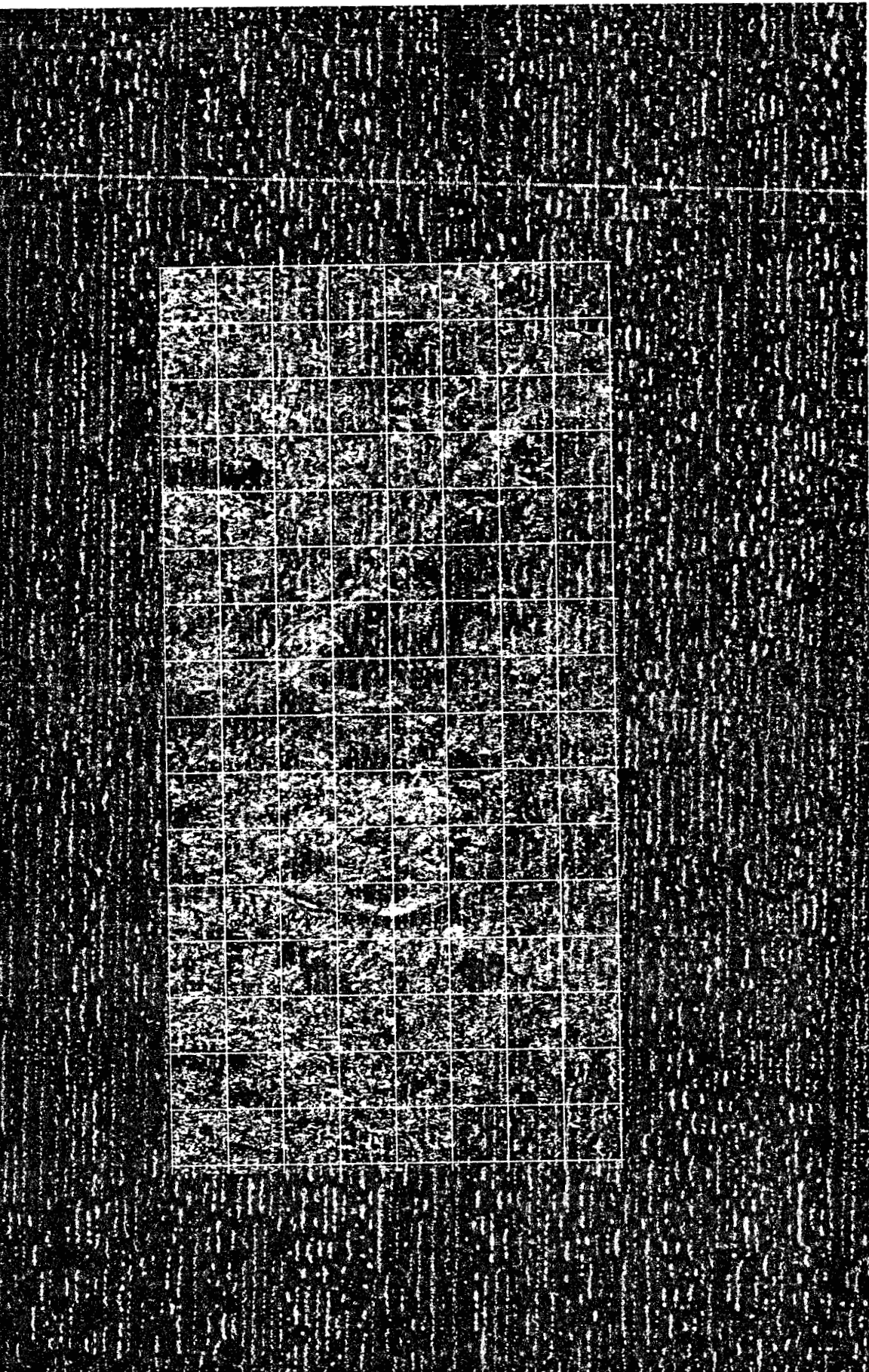


Figure III-7 : Grille des pavés 100x100 pixels superposables à l'image de la zone de recouvrement pour le 12 Avril 1976.



III 2 1 : Valeur moyenne :

---

A l'intérieur d'un pavé de 100 sur 100 pixels, on calcule la valeur moyenne,  $\bar{\rho}'$ , des réflectances  $\rho_{ij}$  observées par le satellite et qui sont contenues dans le pavé :

$$\bar{\rho} = \left( \sum_i \sum_j \rho_{ij} \right) / N \quad \text{III-1}$$

Les tableaux III-1 à III-2 donnent un exemple des résultats ainsi obtenus les 12 et 13 avril 1976 dans les canaux MSS4, MSS5, MSS6, MSS7 pour l'ensemble des carrés de la zone. Les valeurs des réflectances moyennes sont faibles dans les canaux MSS4 et MSS5 (0,1) et assez peu variables spatialement. Les valeurs observées le 13 Avril sont notablement augmentées par rapport au 12 Avril, de 0,02 à 0,05 en particulier dans la partie inférieure gauche où la brume est la plus épaisse. Dans les canaux MSS6 et MSS7, les valeurs de réflectance moyenne sont plus élevées (0,2) mais l'augmentation de ces valeurs le 13 avril est faible. Les figures III-8 et III-9 illustrent les variations spectrales des réflectances moyennes observées aux deux dates pour deux pavés différents, situés l'un dans le bas et l'autre dans le haut de la zone étudiée, et plus ou moins affectés par la brume du 13 avril.

Les variations  $d\bar{\rho}'$  de la réflectance moyenne  $\rho'$  entre le 12 et le 13 Avril 1976 peuvent être interprétées à l'aide de l'équation qui donne la réflectance apparente mesurée par le satellite en présence des aérosols : ( voir Chapitre II , équation II-1 )

$$\rho' = \rho_a + \rho_c \frac{T(\theta_s) \cdot T(\theta_v)}{(1 - \rho_c s)} \quad \text{III-2}$$

En prenant les valeurs approchées des fonctions atmosphériques :

$$\rho_a \approx \frac{p(\zeta)}{4 \mu_s \mu_v} \quad \text{III-3}$$

$$s \approx 2 b \tau \quad \text{III-4}$$

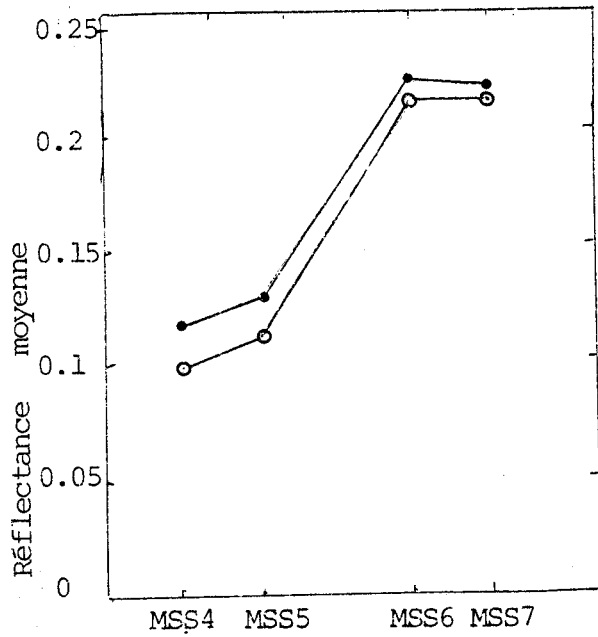
$$T(\theta) \approx 1 - b \tau / \mu \quad \text{III-5}$$

Tableau III-i: Valeur des réflectances moyennes pour le  
 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3  
 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée  
 par 1000.

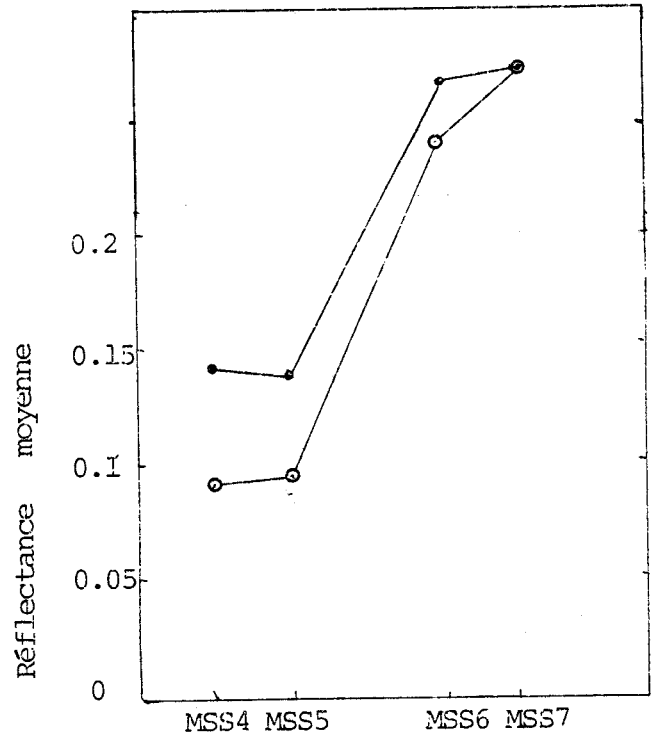
CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
96	92	87	87	91	93	81	74	112	107	102	100	104	107	83	72
94	73	91	87	85	89	90	80	110	109	107	97	87	93	95	91
91	93	93	86	87	92	83	91	105	107	107	97	91	96	79	86
84	85	93	90	92	85	79	79	89	92	108	105	100	93	81	80
93	92	91	90	86	77	80	75	106	103	102	99	89	79	81	70
89	90	93	85	83	77	77	74	97	102	95	92	85	77	75	74
90	86	93	76	76	81	84	82	100	94	102	75	79	81	85	82
86	86	85	82	82	81	84	81	93	91	91	84	85	83	88	83
87	85	90	81	85	85	78	84	86	89	95	83	89	90	81	88
86	91	95	96	100	85	79	80	90	96	105	109	115	92	81	94
88	92	89	90	93	85	76	77	91	99	95	95	100	89	78	77
90	86	92	89	90	91	86	83	94	93	99	95	96	96	88	83
84	90	84	89	91	81	87	86	91	95	86	95	93	86	91	89
90	92	94	86	87	87	82	80	94	95	99	88	89	91	84	84
85	83	91	87	84	84	79	78	85	82	93	89	87	86	81	81
90	89	85	84	85	75	77	75	92	90	85	87	86	74	79	77
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
211	204	200	201	199	194	155	137	211	205	204	206	203	193	161	143
210	204	201	192	171	181	168	158	210	204	201	196	176	187	169	156
204	205	203	191	183	175	168	172	206	204	203	195	191	181	168	171
175	175	205	196	186	185	157	157	182	179	206	200	186	196	165	157
215	208	199	193	187	159	168	149	220	214	202	197	198	176	182	161
216	208	196	177	172	150	153	145	228	213	202	161	185	160	164	155
212	194	193	143	150	156	177	162	220	206	199	155	156	178	196	201
174	167	175	167	165	155	174	172	177	173	164	179	177	177	157	156
175	161	196	166	186	176	153	161	165	193	206	173	177	167	170	195
194	201	206	203	201	175	167	167	208	214	217	210	204	166	174	195
197	203	186	190	194	179	165	171	211	214	196	202	234	191	173	158
203	192	195	190	196	205	206	214	217	202	205	200	216	204	229	241
201	213	184	210	211	152	207	225	216	230	197	226	225	197	227	252
204	226	233	214	222	226	209	201	217	247	260	237	246	249	236	213
248	211	240	222	203	223	210	212	241	237	267	245	229	245	236	237
242	234	225	207	222	235	229	229	257	262	253	229	249	236	256	253

CANAL NO: 1										CANAL NO: 2									
117	114	109	105	120	115	107	102	127	123	117	113	119	123	106	97				
116	115	115	109	105	113	117	115	125	125	123	112	104	113	115	115				
116	115	115	111	108	110	114	117	126	126	124	115	115	112	115	121				
116	115	119	117	115	105	103	100	117	115	125	123	118	110	101	105				
115	123	120	117	115	105	102	102	133	128	125	120	114	103	100	95				
130	126	122	117	109	107	103	101	132	130	122	119	106	104	101	97				
135	127	125	109	106	103	111	107	133	126	125	104	105	106	110	104				
130	127	121	114	112	109	121	109	131	126	121	113	111	108	112	107				
136	125	124	114	114	113	106	110	128	123	124	112	115	114	105	110				
133	130	129	128	127	114	108	114	131	130	132	134	136	116	106	116				
137	134	125	125	125	116	108	106	135	135	127	125	127	115	105	102				
142	133	131	128	125	122	115	111	140	133	132	128	125	122	112	108				
136	135	127	128	126	115	118	114	135	134	125	128	128	116	117	113				
145	137	134	127	125	121	115	112	143	135	133	124	123	120	113	110				
142	136	132	128	124	122	116	112	136	130	128	125	121	116	113	110				
143	136	129	126	125	117	117	113	139	131	125	122	121	111	113	109				
CANAL NO: 3										CANAL NO: 4									
221	215	212	211	209	205	172	155	215	210	210	213	207	197	168	152				
221	216	214	205	185	193	185	176	215	209	207	204	184	191	175	165				
218	218	215	205	195	189	163	168	212	210	205	202	197	185	173	177				
194	194	219	211	200	197	169	173	190	188	212	204	194	199	169	173				
233	225	215	209	203	175	160	164	225	219	208	203	203	177	165	166				
241	229	215	195	186	155	163	161	236	219	209	188	184	167	168	151				
238	219	214	166	167	151	143	145	228	208	205	162	167	182	194	202				
201	195	197	187	183	150	137	137	168	164	191	165	153	151	190	191				
200	205	215	167	165	191	175	193	197	201	213	165	161	190	175	197				
223	225	225	218	213	170	175	200	216	221	219	211	205	158	178	200				
226	219	207	210	211	175	132	137	221	221	202	207	205	195	163	191				
236	226	215	213	216	224	223	229	227	213	211	205	214	226	231	241				
232	239	211	231	230	223	225	237	225	236	207	230	228	203	231	252				
240	232	235	236	242	242	225	218	232	233	201	240	247	230	232	230				
250	246	261	242	230	233	223	227	250	250	275	247	233	240	237	237				
265	257	247	229	242	223	245	243	257	264	254	232	247	238	256	256				

Tableau III-2: Valeur des réflectances moyennes pour le  
13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3  
MSS6, canal 4, MSS7  
Les valeurs du tableau ont été multipliée  
par 1000.



III-8 ( a )



III-9 ( b )

Figure III-8: Valeur de réflectances moyennes pour les zones de parcelles situées en zone claire ( a ) et brumeuse ( b ). Ce qui correspond à la ligne 1 et la colonne 1 (clair) et à la ligne 16 et la colonne 1 (brume). Les ● représentent les points du 13 avril et les ○ représentent les points du 12 avril.

On a un développement approché de l'équation III-2 :

$$\bar{\rho}' \approx \tau p(\zeta) / 4 \mu_s \mu_v + \bar{\rho}_c (1 - b\tau/\mu_s) \cdot (1 - b\tau/\mu_v) / (1 - 2b\tau \bar{\rho}_c) \quad \text{III-6}$$

qui permet d'interpréter les variations  $d\bar{\rho}'$  observées :

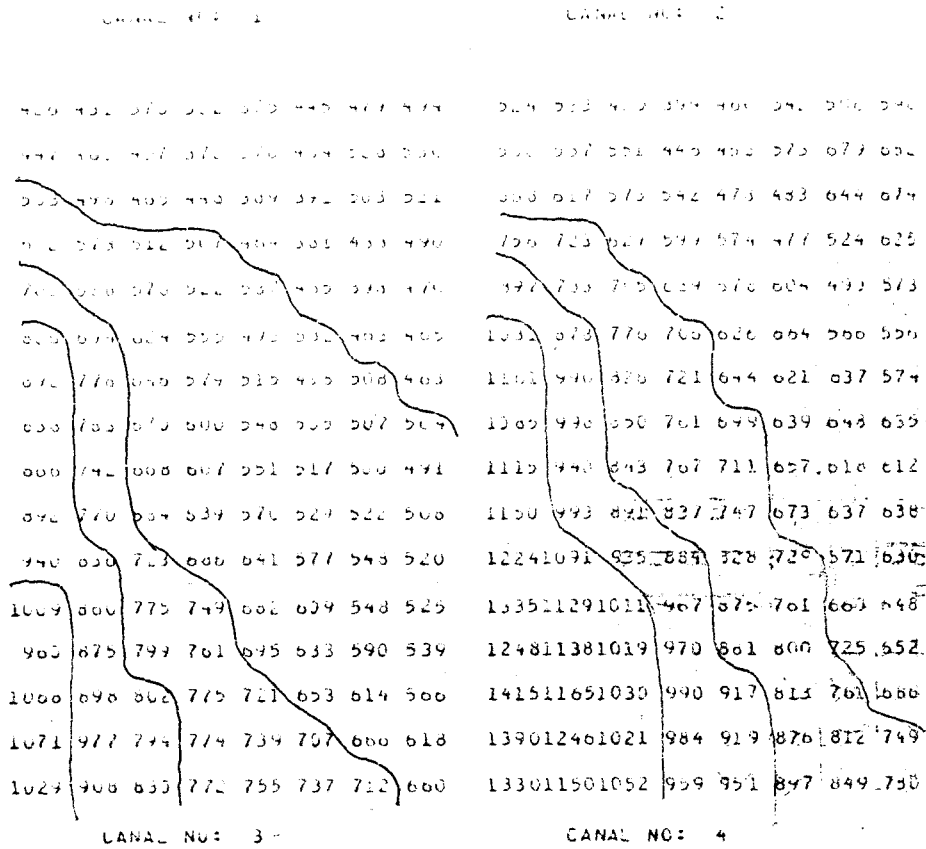
$$d\bar{\rho}' \approx d\tau \left\{ \frac{p(\zeta)}{4 \cdot \mu_s \mu_v} - b \bar{\rho}_c \left( \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v} - 2 \bar{\rho}_c \right) \right\} \quad \text{III-7}$$

en terme de variations d'épaisseur optique en aérosols  $d\tau$  :

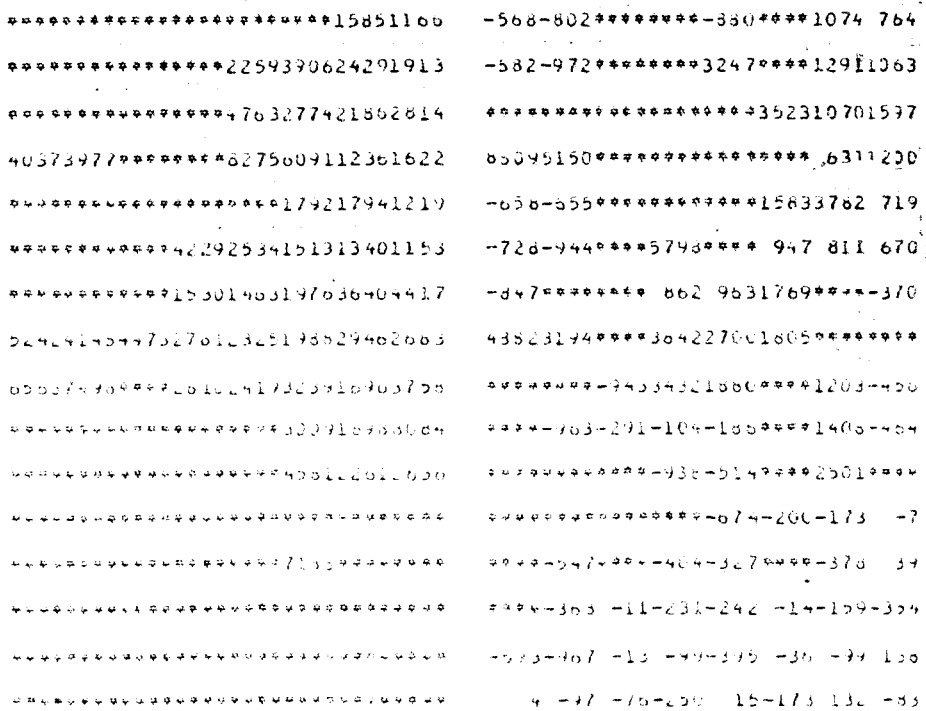
$$d\tau = d\bar{\rho}' / \left\{ \frac{p(\zeta)}{4 \cdot \mu_s \mu_v} - b \bar{\rho}_c \left( \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v} - 2 \bar{\rho}_c \right) \right\} \quad \text{III-8}$$

si l'on connaît la fonction de phase de diffusion  $p(\zeta)$  et  $b$ , en faisant dans III-8 l'approximation  $\rho' = \rho_a$ .

Les tableaux III-3 a et b donnent ainsi les variations d'épaisseur optique,  $d\tau$ , calculées à partir des variations de la valeur moyenne pour chaque pavé de 100 par 100 pixels. On a pris  $p(\zeta) = 0,2$ , à l'angle de diffusion  $\zeta = 150^\circ$  et  $b = 0,2$ . On notera que pour  $\bar{\rho}'_c = \frac{p(\zeta)}{4b(\mu_s + \mu_v)}$  soit 0,2, les variations des réflectances moyennes observées sont faibles, et que le calcul de  $d\tau$  devient alors indéterminé. C'est ce qui se produit pour les valeurs du Tableau III-3 b correspondant aux canaux MSS6 et MSS7 pour lesquels on observe des valeurs de réflectance moyenne proches de 0,2. Par contre, les variations de réflectance moyennes dans les canaux MSS4 et MSS5 (Tableau III-3 a) sont plus correctes et présentent une bonne homogénéité spatiale, on note des valeurs  $d\tau$  de l'ordre de 0,5 dans la partie Nord (haut du Tableau) qui vont croissant vers le Sud (bas du Tableau), ou elles dépassent 1, ce qui traduit une brume assez importante.



(a)



(b)

Tableau III-3: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation de la valeur moyenne.  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6,  
 canal 4, MSS7

### III 2 2 : Ecart-type :

-----

A l'intérieur d'un pavé de 100 sur 100 pixels, on calcule l'écart-type,  $\sigma'$ , des réflectances  $\rho_{ij}$  observées par le satellite autour de la valeur moyenne  $\bar{\rho}'$ :

$$\sigma'^2 = (\sum \rho'_{ij} - \bar{\rho}')^2 / N \quad \text{III-9}$$

Les tableaux III-4 à III-5 donnent les écart-types calculés pour chaque pavé de la zone de recouvrement, les 12 et 13 Avril 1976, dans les 4 canaux du MSS. Les écart-types vont croissant du canal MSS4 au canal MSS7, dans les canaux MSS5 et surtout MSS4 ils sont proches du niveau de bruit instrumental. Dans tous les canaux, on observe que les écart-types du 13 Avril sont plus faibles que ceux du 12 Avril. Les figures III-10 et III-11 illustrent les variations spectrales des écart-types observées aux deux dates pour les mêmes pavés pour lesquels on avait donné précédemment la variation spectrale de la moyenne.

La diminution de l'écart-type provoquée par l'augmentation de l'épaisseur optique en aérosols correspond à la brume du 13 Avril 1976, est prédite par l'équation III-9, et selon que l'on a affaire à des structures de grandes dimensions :

$$\sigma' = \sigma_c T(\theta_s) T(\theta_v) / (1 - \bar{\rho}_c s) \quad \text{III-10}$$

ou à des structures de petites dimensions :

$$\sigma' \approx \sigma_c T(\theta_s) \exp(-\tau/\mu_v) / (1 - \bar{\rho}_c s) \quad \text{III-11}$$

où  $\sigma_c$  est l'écart-type des réflectances du sol. Vu les dimensions du parcellaire observé on a choisi le formalisme correspondant à des structures de petites dimensions. L'équation III-11 peut encore s'écrire :

$$\sigma' \approx \sigma_c \exp(-b\tau/\mu_s) \exp(-\tau/\mu_v) / (1 - \bar{\rho}_c s) \quad \text{III-12}$$

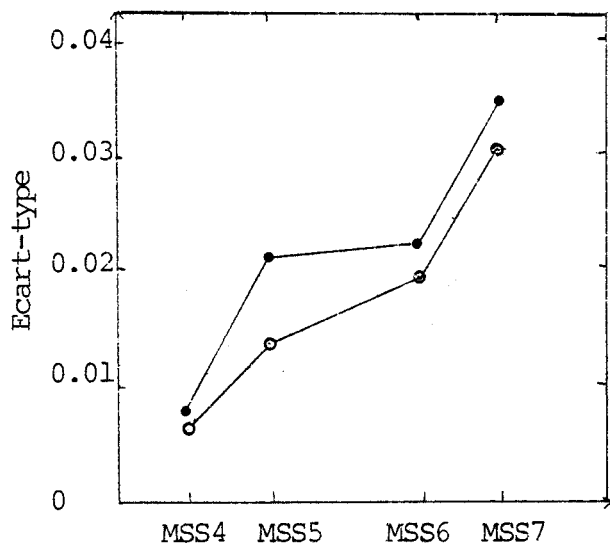
CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
9	7	7	7	7	7	11	9	21	17	20	18	17	18	21	18
0	7	7	7	9	10	12	12	21	18	17	18	17	19	20	19
7	0	0	9	11	11	11	12	19	19	20	20	20	20	21	19
12	11	7	8	9	12	14	10	22	23	18	18	19	22	24	16
9	10	7	7	10	12	11	8	23	22	17	17	19	19	16	13
0	7	9	11	11	9	10	9	20	19	19	21	19	16	16	16
10	9	10	10	10	13	14	12	23	20	20	17	17	21	23	21
13	11	12	12	12	12	13	12	22	20	21	19	20	20	22	20
11	11	11	12	10	15	12	14	21	20	21	20	27	26	20	23
15	12	10	14	17	17	14	14	24	23	27	27	31	29	24	23
15	12	15	15	15	15	12	11	24	22	26	26	26	25	20	19
13	14	14	16	16	13	11	12	23	25	25	27	28	24	21	23
17	16	17	15	13	15	14	13	30	29	27	27	24	24	26	26
17	17	19	17	15	14	13	13	28	29	34	29	27	26	25	24
16	16	16	16	16	14	13	13	27	26	32	30	27	26	23	24
16	16	14	17	16	11	11	12	29	29	25	27	27	20	25	25
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
22	22	25	24	23	23	40	30	34	35	42	41	39	35	46	36
22	20	22	26	34	34	30	32	36	34	37	40	45	45	38	39
24	24	24	31	37	35	35	27	36	38	39	43	49	45	41	31
44	39	24	23	34	35	36	32	49	43	38	37	47	45	42	38
24	32	22	27	36	40	40	31	41	45	35	42	52	49	52	41
29	24	31	37	38	31	33	32	45	39	45	49	49	38	43	39
31	33	35	34	32	41	43	45	44	51	44	39	39	50	54	50
37	36	35	39	35	35	40	41	45	45	37	46	42	47	48	52
42	37	32	36	43	41	37	42	55	41	40	44	49	49	46	52
43	35	35	35	38	41	41	35	52	42	42	38	40	45	40	42
44	35	40	39	37	35	34	34	55	42	45	46	43	43	41	49
37	40	39	40	37	38	31	34	45	45	43	44	42	46	48	48
45	41	32	44	31	45	36	32	53	50	57	52	39	54	47	47
47	45	36	45	36	34	34	43	55	52	45	56	49	46	52	55
51	50	35	40	44	35	40	46	53	53	45	58	55	50	53	55
32	37	34	44	33	46	40	49	41	46	51	55	51	64	51	50

Tableau III-4: Valeur des écart-types (réflectance) pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS.  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3  
 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliées par 1000.

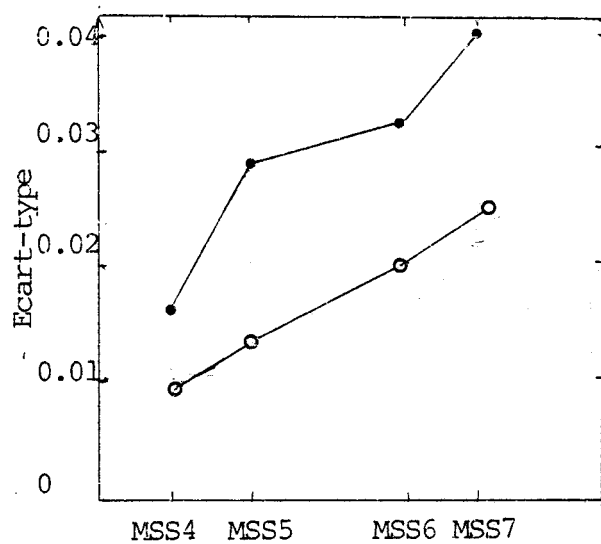


CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
5	5	5	5	5	5	5	5	14	14	15	13	13	11	15	11
5	5	5	5	5	7	7	9	14	11	12	13	12	12	12	14
5	5	5	6	7	7	7	7	12	12	13	13	14	13	13	12
5	7	5	5	6	5	9	6	14	14	11	11	13	16	16	11
5	5	5	5	5	5	7	5	11	13	10	10	11	13	13	9
5	4	5	7	7	6	7	6	9	10	10	13	13	16	12	11
5	5	5	7	6	7	6	7	10	11	11	12	11	13	15	13
7	7	7	6	7	7	8	7	12	11	12	12	12	12	14	12
5	5	5	7	9	9	6	6	9	10	11	11	16	16	12	14
5	7	7	8	10	9	7	6	11	11	14	15	19	17	14	14
5	5	8	5	5	5	6	6	10	10	14	13	14	14	12	12
5	7	6	9	8	7	6	7	11	12	11	15	15	14	12	14
5	7	8	7	6	5	7	7	13	12	13	13	12	13	14	14
11	5	5	7	7	7	7	7	14	13	15	13	13	13	13	13
13	5	5	7	7	6	6	7	15	12	15	13	12	12	11	13
9	5	5	7	7	5	5	5	13	12	11	12	12	9	11	12
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
19	19	22	22	19	19	32	23	30	30	38	37	33	29	38	29
18	16	18	23	28	27	22	24	31	29	32	36	39	36	30	30
20	19	19	25	32	27	25	20	32	31	33	36	43	38	31	24
35	32	19	18	26	30	29	24	40	36	31	30	39	40	35	31
17	24	17	21	28	33	34	24	30	35	28	34	41	42	46	33
15	17	23	25	30	22	26	24	30	29	35	36	40	30	34	32
15	25	24	25	26	31	33	36	26	36	32	31	32	40	43	50
25	24	25	31	25	28	27	30	30	30	26	37	32	37	37	42
25	23	21	23	30	30	27	31	35	29	28	35	37	36	35	40
27	24	23	25	27	29	27	24	34	35	29	26	30	33	37	32
25	21	23	27	26	27	25	30	37	28	33	34	31	33	32	40
22	23	23	29	24	23	23	25	27	28	26	33	31	30	34	39
24	23	35	25	20	35	25	24	31	31	42	36	25	42	35	35
25	25	21	30	23	23	29	33	35	33	35	37	34	34	37	44
32	31	21	25	29	22	25	30	43	42	36	34	35	33	35	43
18	22	24	25	24	30	25	33	25	32	35	37	34	44	43	45

Tableau III-5: Valeur des écart-types (réflectance) pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7 Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.



III-10



III-11

Figures III-10: Ecart-type pour les deux zones de parcelle situées en atmosphère  
 III-11: claire (ligne 1 et colonne 1 et figure III-10) et brumeuse ( ligne 16 et  
 colonne 1, figure III-11 Les o représentent les points du 13 avril et  
 les • ceux du 12.

En négligeant l'effet de sol. ( $\bar{\rho}_c S = 0$ ), on peut obtenir l'épaisseur optique :

$$\tau = \text{Log}(\sigma'/\sigma_c) / (b/\mu_s + 1) \quad \text{III-13}$$

ou la variation d'épaisseur optique entre les deux images consécutives pour lesquelles on observe des écarts types,  $\sigma'$  et  $\sigma''$  :

$$\delta\tau = \log(\sigma'/\sigma'') / (b/\mu_s + 1) \quad \text{III-14}$$

Les tableaux III-6 a et b donnent les variations d'épaisseur,  $\delta\tau$ , calculées à l'aide de la formule ci-dessus à partir des variations de l'écart-type observé pour chaque sous-carré de 100 x 100 pixels. On retrouve dans tous les canaux une bonne homogénéité spatiale des résultats, qui comme pour les valeurs dérivées de la moyenne, présentent un maximum dans la partie sud de la zone de recouvrement. Les valeurs d'épaisseur optique vont également en diminuant lorsque la longueur d'onde augmente, ce qui est cohérent avec la plupart des modèles d'aérosols.

### III 2 3 : Fonction de structure

---

L'utilisation de l'écart-type calculé précédemment a l'inconvénient d'intégrer toutes les variations qu'elles soient dues aux structures de petites ou de grandes dimensions. Pour mieux isoler la contribution due aux structures de petites dimensions, nous avons également effectué l'analyse en utilisant la fonction de structure. La définition utilisée pour le calcul de la fonction de structure  $FS'(d)$  à une dimension (en ligne) est la suivante :

$$\{FS'(d)\}^2 = \sum_{i,j} (\rho'_{ij} - \rho'_{i+d,j})^2 / N \quad \text{III-15}$$

où  $d$  est la distance en pixels. Si l'on compare l'équation III-9 donnant la définition de la fonction de structure à l'équation III-15 donnant celle de l'écart-type, on constate que les deux fonctions sont de même nature, alors que la fonction de structure permet de faire intervenir par l'intermédiaire de la distance  $d$ , le paramètre de dimension des structures étudiées qui échappe à l'écart-type.  $FS(d)$  tend vers l'écart-type, pour  $d$  tendant vers l'infini, lorsque le paysage est statistiquement homogène.

La fonction de structure de chaque sous-carré de 100 x 100 pixels a été calculée aux deux dates pour  $d=1,2,3,5,10$  pixels soit de 80 à 800 m (tableaux III-7 à III-15). Les figures III-12 a et b illustrent les variations de la fonction de structure avec la distance : on observe une croissance rapide de la fonction pour  $1 < d < 10$  pixels.

Pour  $d > 10$  pixels,  $FS'(d)$  tend vers l'écart-type, pour  $d < 1$  pixel,  $FS'(d)$  tend vers le bruit radiométrique.

La variation d'épaisseur optique entre les deux dates,  $\delta I$ , est calculée à partir des fonctions de structures observées  $FS'$  et  $FS''$ , à l'aide d'une équation similaire à l'équation (III-13) donnée pour l'écart-type :

$$\delta \tau = \log(FS'/FS'') / (b/\mu_s + 1) \quad \text{III-16}$$

Les tableaux III-17 à III-21 donnent les variations d'épaisseur optique ainsi calculées pour chaque sous-carré. A nouveau, on observe des résultats ayant une bonne homogénéité spatiale, et très proche de ceux donnés par l'écart-type. Dans les canaux MSS6 et MSS7, les résultats sont peu dépendants de la distance, alors que dans les canaux MSS4 et MSS5, les valeurs obtenues aux faibles distances semblent perturbées par la faible valeur de la fonction de structure comparée au niveau du bruit radiométrique.

MSS4

MSS5

312	208	215	242	255	315	371	380
300	234	251	267	307	277	311	295
281	325	297	336	291	354	397	397
338	390	318	300	291	281	306	404
302	417	314	290	436	340	335	401
370	434	393	334	347	434	315	377
304	354	407	334	394	452	436	439
301	345	433	372	453	445	445	467
304	325	345	435	303	477	312	488
617	304	611	536	466	540	557	441
643	628	531	508	552	438	507	464
411	616	637	470	552	465	452	492
626	734	591	655	561	458	515	533
336	652	695	712	662	618	535	511
175	513	672	740	589	553	635	555
463	551	667	674	734	633	597	635

357	373	257	254	333	346	326	274
347	373	379	275	275	401	407	276
433	393	366	364	294	337	411	389
417	412	416	451	363	270	316	342
533	473	437	450	480	316	262	314
650	503	489	431	364	366	264	307
671	543	499	343	346	390	395	375
493	475	455	416	440	402	405	406
695	587	551	475	451	429	407	431
644	570	559	490	434	465	452	407
721	659	522	547	520	461	437	375
625	650	660	535	500	469	483	447
721	735	624	635	601	495	521	491
504	700	674	671	635	574	523	485
465	684	652	696	672	636	607	509
594	719	672	670	675	670	665	547

MSS6

MSS7

141	161	108	96	156	190	202	225
174	176	150	116	151	219	265	244
167	172	167	193	136	215	292	249
167	174	202	221	213	136	226	233
235	236	225	226	277	172	149	233
406	298	244	237	203	259	202	224
451	331	340	253	201	242	244	198
315	350	277	210	273	272	264	252
460	337	355	236	307	275	276	260
393	323	401	322	318	324	299	270
357	420	315	322	326	277	261	223
453	437	401	234	343	233	267	275
352	495	355	364	376	257	272	263
455	456	456	358	362	337	269	222
308	410	462	405	356	425	352	259
490	410	425	367	405	355	323	330

116	131	81	74	128	164	169	178
130	142	124	88	109	192	208	211
160	157	137	147	101	152	235	206
169	157	165	185	157	102	171	188
261	217	196	182	218	136	107	177
350	252	214	226	167	212	159	169
392	316	269	204	157	193	197	155
317	331	246	187	217	212	210	198
394	306	296	196	237	211	214	211
350	295	324	264	254	248	231	226
354	356	271	266	270	227	212	151
473	404	368	255	255	224	217	173
403	406	302	319	264	212	216	213
390	377	354	309	317	271	241	193
352	345	356	319	301	351	296	233
432	348	353	328	351	311	302	296

Tableau III-6: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation de l'écart-type.

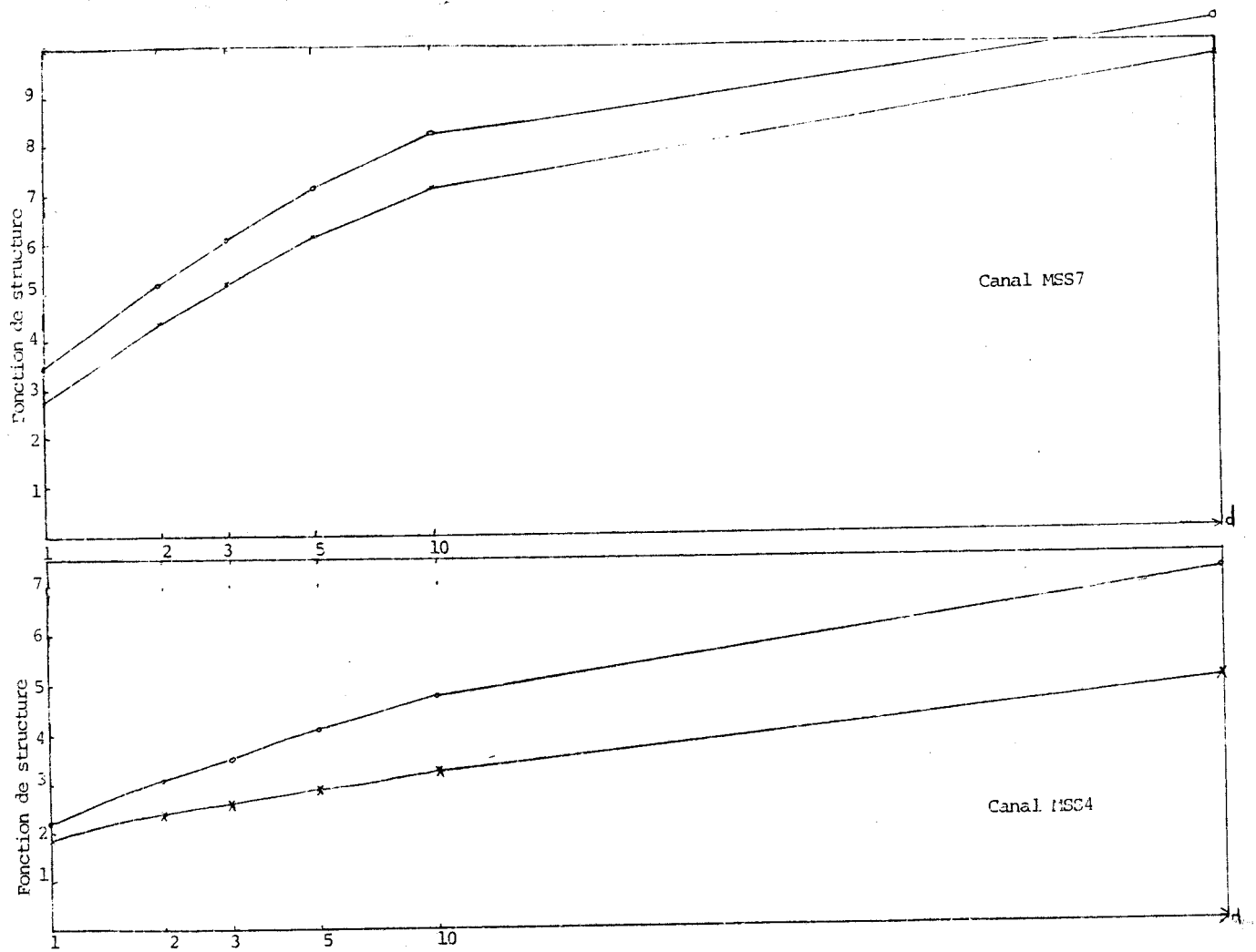


Figure II-12 a Fonction de structure sur lissages pour les zones de parcelle situées en atmosphère claire (ligne et colonne) pour les canaux MSS4 et MSS7.

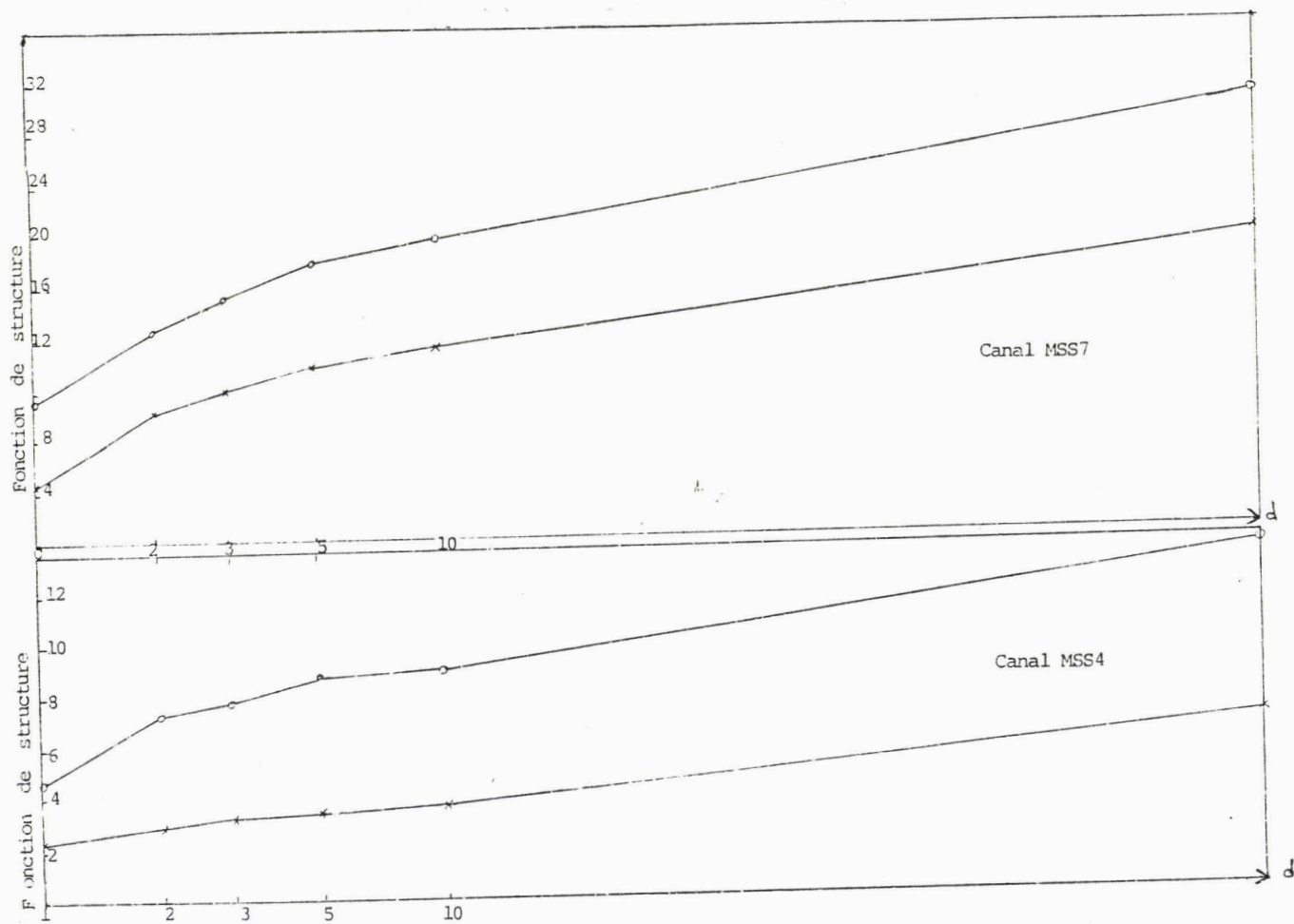


Figure III-12 b Fonction de structure sur lissages pour les zones de parcelle situées en atmosphère brumeuse (ligne 6 et colonne 1) pour les canaux MSS4 et MSS7.

CANAL NO: 1										CANAL NO: 2									
22	20	21	21	21	22	23	23	23	23	47	42	44	44	44	45	42	40	32	
21	21	21	21	22	23	30	27			40	45	44	44	39	40	21	46		
20	22	22	24	25	23	20	33			42	40	47	47	45	51	47	51		
22	21	23	24	20	20	27	24			43	42	51	50	52	52	49	41		
23	24	22	24	28	29	29	23			52	51	50	49	54	45	40	40		
23	23	24	20	27	24	20	20			52	51	40	54	40	41	45	40		
20	24	27	21	25	31	34	32			53	52	53	35	43	55	62	59		
31	25	25	20	29	30	31	31			49	40	45	47	52	51	50	55		
27	20	30	27	35	30	31	35			52	53	50	49	61	04	53	61		
29	31	37	37	40	41	34	34			58	61	71	73	74	72	59	51		
28	31	31	34	34	35	30	28			55	59	58	62	61	62	54	51		
33	35	35	30	33	30	29	32			62	65	60	55	59	58	50	52		
37	39	34	30	35	31	33	36			70	75	63	70	60	60	64	72		
40	43	46	42	30	37	34	34			74	80	80	77	71	73	66	06		
39	38	40	43	37	37	34	33			72	69	83	79	70	72	65	55		
42	43	38	40	40	20	20	27			85	82	68	72	73	55	60	57		

CANAL NO: 3

CANAL NO: 4

52	51	56	50	55	54	59	50			65	64	73	77	74	67	69	58		
51	52	55	03	03	73	67	62			57	68	71	82	79	86	75	70		
55	57	50	73	73	73	68	65			73	73	80	88	90	92	80	71		
52	50	61	61	78	74	65	63			64	62	83	84	99	89	72	70		
59	02	04	09	88	65	69	65			81	82	89	92	113	75	82	77		
73	07	72	07	09	64	71	07			98	93	93	107	83	75	81	76		
73	79	73	50	57	31	80	85			99	107	87	65	63	90	103	104		
03	09	61	03	73	70	77	61			82	64	70	74	82	86	84	97		
00	72	77	07	02	07	03	04			76	37	95	74	88	99	94	100		
09	12	02	10	03	32	03	70			03	31	94	04	34	35	32	32		
07	15	14	14	70	52	77	70			07	90	61	05	95	60	87	92		
10	09	07	10	10	11	00	02			33	93	91	87	85	87	102	108		
03	00	73	00	01	02	74	03			37	109	81	93	74	75	90	111		
04	04	07	74	00	74	02	79			76	37	100	94	103	103	104	102		
02	03	32	01	19	37	01	07			45	75	104	98	74	115	107	110		
07	90	02	03	00	04	79	02			101	109	100	97	109	114	112	109		

Tableau III-7: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=1$  pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.



Tableau III-8: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=2$  pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6,  
 canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
26	27	28	29	30	31	32	27	74	65	70	70	70	65	62	43
29	28	28	29	31	33	43	38	75	70	70	67	59	74	76	67
27	31	30	35	36	41	36	44	71	74	73	76	71	76	69	74
31	28	33	34	38	40	40	35	68	65	74	77	66	80	75	53
33	34	36	35	41	37	38	33	62	62	77	75	84	70	71	57
33	31	34	42	39	34	38	36	53	80	74	84	74	62	66	70
37	35	39	29	35	46	51	49	92	80	79	52	66	84	96	91
40	35	34	37	44	45	47	47	73	66	67	70	81	80	87	36
39	41	44	39	54	56	46	53	81	81	88	74	98	101	82	95
44	46	55	56	61	54	52	50	91	94	108	112	116	115	93	93
41	45	46	50	51	52	45	41	85	87	89	96	94	95	82	78
46	53	54	44	49	44	43	47	95	102	102	83	89	88	87	96
57	61	53	55	53	47	49	55	112	119	100	108	105	94	100	114
61	66	72	65	56	55	51	52	118	125	137	122	113	114	103	104
59	56	71	68	58	55	50	50	113	109	132	127	112	112	101	103
69	67	56	62	62	42	42	41	134	128	107	114	115	85	95	92
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
75	75	85	84	83	81	90	76	101	101	117	123	120	106	105	89
75	76	82	97	99	107	100	91	105	107	112	132	127	134	112	102
82	87	87	113	115	121	103	94	116	117	126	140	143	143	120	134
76	75	92	93	122	113	102	98	98	99	132	131	155	135	110	108
86	95	95	105	139	100	108	100	125	131	137	144	177	114	130	118
112	100	111	137	105	98	108	104	156	144	145	168	127	114	124	116
111	122	112	85	86	127	135	135	154	165	132	160	74	150	162	155
96	105	92	98	113	119	120	129	124	127	104	119	126	135	138	154
126	111	117	102	130	137	131	134	155	132	141	121	140	156	146	157
106	106	109	116	129	145	132	117	138	137	142	126	128	147	146	137
103	115	111	113	115	122	114	126	136	137	124	137	159	136	126	139
119	146	135	114	117	104	121	136	157	146	141	129	128	128	156	156
133	134	113	123	122	130	115	126	151	155	126	142	142	115	146	176
138	127	136	122	123	122	125	122	146	149	155	146	161	157	152	157
127	136	142	125	121	132	123	135	156	155	166	151	146	176	165	182
132	137	127	129	131	131	124	130	154	158	155	151	169	178	177	176

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
35	31	33	32	33	34	37	32	90	80	87	84	86	78	74	57
34	32	31	34	35	34	48	42	92	84	84	81	71	83	83	77
30	36	35	41	42	47	41	49	86	90	88	91	84	91	81	84
35	33	37	36	43	47	48	41	80	79	94	90	93	93	90	74
36	40	33	37	47	43	45	37	100	99	88	88	98	82	84	58
37	35	39	49	46	39	43	44	99	93	86	100	87	71	78	80
43	37	44	33	40	52	59	57	109	92	91	81	76	96	111	107
44	39	39	42	51	52	55	55	82	78	76	80	94	94	101	101
45	47	50	45	65	65	55	61	94	94	101	85	117	118	97	110
52	52	63	64	71	76	61	57	109	108	125	129	135	137	109	107
47	51	54	56	58	61	50	47	101	103	104	111	110	110	92	90
55	63	62	50	56	50	49	55	110	121	118	95	103	101	101	111
67	72	62	63	61	55	57	65	132	141	117	126	121	109	117	135
72	77	85	77	69	65	60	60	139	147	163	144	135	133	121	123
69	67	83	80	68	65	58	59	132	127	155	151	133	130	118	122
80	78	67	74	72	48	50	49	155	150	125	134	134	100	116	112
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
87	88	102	100	99	98	107	91	121	123	144	150	148	130	127	106
89	90	97	116	120	125	115	103	127	129	137	160	155	158	130	116
97	103	102	134	138	144	122	106	140	143	151	167	170	168	140	116
92	69	109	106	146	132	122	118	117	120	158	154	184	157	131	136
103	114	109	123	165	118	130	118	154	159	158	170	209	135	156	146
131	115	130	165	124	114	126	123	185	168	171	201	147	132	144	139
129	143	131	101	100	151	161	163	181	194	152	118	110	176	192	198
116	123	105	114	135	144	143	156	146	151	116	136	149	163	184	184
153	130	135	119	158	165	156	166	156	151	161	146	170	186	176	186
129	126	146	137	152	174	160	135	164	156	163	143	149	173	174	159
123	134	129	132	135	146	130	137	182	157	145	147	149	147	144	159
139	169	166	131	137	115	140	146	159	175	164	147	148	143	181	142
159	159	142	144	141	117	137	151	179	182	182	164	161	135	176	206
152	149	166	144	147	143	147	143	172	174	181	172	191	186	186	155
151	155	165	146	144	153	143	166	178	184	186	175	175	203	191	214
151	166	191	154	153	155	148	157	176	195	182	178	196	211	215	216

Tableau III-9: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=3$  pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 : MSS6, canal 4 : MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliées par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
31	36	33	36	37	37	43	36	107	93	105	100	103	94	86	57
40	36	36	36	41	50	53	46	111	93	100	95	83	100	96	55
35	42	40	46	46	54	46	52	102	103	104	105	96	105	91	93
39	36	41	43	46	53	57	47	93	94	106	102	105	106	107	35
45	46	36	40	53	47	51	41	120	116	97	99	109	93	97	75
42	36	47	57	52	45	43	46	115	103	95	115	98	82	87	89
48	42	51	36	46	53	66	67	122	103	105	71	87	106	123	119
47	47	44	46	59	50	63	62	91	89	86	83	106	103	115	113
52	57	55	51	77	73	63	68	109	107	112	96	136	132	112	123
60	56	71	73	81	83	69	65	125	121	141	145	154	158	124	120
55	57	61	66	67	68	55	54	117	115	118	125	125	123	101	101
62	73	71	56	64	56	55	62	122	146	134	167	118	112	113	126
78	83	70	71	67	62	66	72	153	161	130	142	134	122	134	150
81	65	98	67	79	73	67	66	156	162	187	160	156	148	136	137
76	74	94	91	78	73	65	66	146	140	176	171	151	145	131	136
88	86	75	84	81	55	59	58	170	166	139	153	149	114	138	135
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
101	105	124	116	117	113	123	109	143	151	178	178	179	155	149	125
104	105	112	136	144	145	130	115	151	154	162	188	184	184	147	129
112	119	119	152	163	166	145	117	165	169	177	191	200	191	164	128
106	107	125	122	173	153	147	141	136	143	181	175	216	178	154	154
120	135	116	141	190	140	155	139	153	136	172	194	239	158	183	153
146	125	146	192	144	132	143	141	211	183	192	232	170	149	162	159
145	166	157	120	116	173	166	190	199	226	177	137	126	202	219	229
136	144	122	136	159	171	169	163	170	175	132	152	172	193	189	213
167	150	151	159	192	167	166	166	224	171	175	159	202	211	206	211
151	147	169	157	174	202	167	152	157	174	163	157	166	196	201	177
143	152	145	153	155	157	146	156	156	176	153	167	166	163	166	179
159	200	162	147	156	156	156	164	179	201	182	163	167	157	206	213
167	165	167	166	159	141	162	169	235	235	166	165	177	156	203	223
175	166	165	166	171	155	167	164	145	175	205	196	218	216	212	236
176	179	166	171	166	173	162	165	263	211	206	201	251	224	211	246
167	161	176	162	175	166	177	194	194	219	209	207	219	244	253	257

Tableau III-10: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=5$  pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
47	41	42	39	40	43	51	43	127	117	124	110	113	104	99	79
44	39	39	39	40	54	53	50	127	109	111	100	92	108	106	91
36	40	44	40	56	50	55	54	117	119	117	112	111	115	107	97
45	44	45	42	53	50	67	55	102	107	114	106	115	120	125	99
49	55	37	43	59	55	58	43	135	131	97	106	120	104	107	76
43	40	50	65	57	51	53	52	122	108	110	126	107	92	95	95
50	40	50	44	51	65	70	68	131	115	118	79	95	116	129	125
52	49	51	51	63	65	71	66	103	100	96	97	112	117	129	118
59	60	65	58	68	63	71	76	123	118	128	106	155	144	124	134
66	65	73	60	90	75	75	74	137	132	155	157	168	169	134	137
60	63	68	73	79	75	60	59	128	125	128,137	145	135	109	111	
66	70	75	63	73	62	61	68	129	146	142	118	134	123	124	137
87	90	78	60	73	72	74	76	169	174	145	156	145	135	149	157
85	89	103	89	84	73	73	72	161	168	196	163	164	158	146	143
81	80	100	99	82	78	71	72	154	151	185	184	157	151	143	144
93	87	80	91	88	62	65	66	179	167	148	161	158	127	152	153
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
117	123	146	128	127	127	151	133	165	179	217	193	195	171	167	148
119	112	123	148	163	155	142	125	176	170	180	204	204	207	161	140
124	131	135	176	166	165	170	124	195	187	198	214	223	211	184	136
124	129	134	132	168	159	179	166	151	163	191	189	230	194	183	181
131	154	124	160	204	164	186	150	203	211	177	218	249	181	217	174
159	150	157	204	172	149	161	155	224	168	206	244	203	165	179	172
157	167	165	140	155	147	201	214	212	238	205	155	145	224	231	254
158	162	143	146	181	189	196	203	189	190	146	167	195	210	214	235
214	168	172	165	224	206	206	211	252	189	139	163	225	228	227	234
175	165	191	175	190	216	206	169	206	139	199	171	176	213	221	191
169	171	195	173	152	177	163	177	212	189	176	190	190	136	179	201
161	220	195	165	178	140	168	160	201	220	195	175	185	166	214	225
215	211	205	196	171	136	168	164	234	230	216	213	195	166	226	236
196	169	205	194	167	170	137	190	217	212	229	224	234	226	236	227
211	202	202	197	192	195	163	213	243	239	224	226	265	245	226	255
181	196	201	218	191	204	209	226	256	236	236	233	233	269	271	337

Tableau III-11: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=10$  pour le 12 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
19	16	15	17	15	17	18	17	33	30	33	33	32	29	28	25
19	19	19	16	18	20	21	19	33	31	31	31	29	30	31	29
18	19	19	19	20	20	20	20	30	31	32	33	33	34	31	31
18	17	19	19	20	21	20	18	28	28	33	32	34	37	34	29
19	19	16	20	20	19	20	16	30	31	31	31	33	32	34	30
20	16	19	21	19	18	19	19	28	29	29	33	32	29	33	33
19	19	20	16	18	20	22	21	30	29	32	28	31	36	39	38
18	19	19	19	20	20	21	21	27	27	28	30	33	34	36	36
19	19	20	19	22	23	19	22	27	29	32	30	37	40	34	38
20	20	22	23	25	24	21	23	29	32	38	40	44	42	36	38
20	20	21	21	22	22	20	19	28	31	32	34	35	36	33	34
22	21	21	20	21	21	21	21	31	32	34	30	33	33	33	37
22	22	20	21	22	20	21	22	33	35	31	35	35	34	37	41
31	22	23	22	21	22	22	21	37	37	40	37	36	37	37	38
33	23	23	22	21	21	21	22	42	33	39	37	34	36	34	40
25	22	21	21	22	20	19	19	37	35	33	34	36	29	30	32
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
45	44	49	51	47	45	44	39	55	54	64	69	63	54	54	47
45	45	47	55	52	53	49	45	56	57	61	73	67	66	57	53
46	47	50	56	61	61	50	46	59	60	67	72	78	76	61	54
41	40	50	50	61	51	50	48	50	50	68	66	80	75	58	50
45	46	50	55	63	51	57	49	58	62	69	73	86	60	70	51
49	49	53	62	53	46	55	51	54	65	69	81	66	57	65	51
47	52	52	42	44	50	53	63	51	70	53	51	51	75	80	51
43	44	47	47	53	54	56	60	52	54	52	59	52	68	69	76
46	49	53	46	56	53	53	62	51	59	66	59	57	76	71	77
46	49	55	57	59	56	59	56	56	62	66	60	52	66	70	71
47	46	47	56	52	55	54	57	53	56	56	60	50	64	62	71
47	53	53	49	52	51	60	62	50	56	59	53	59	64	76	53
49	53	46	52	52	43	56	62	52	61	52	62	66	55	72	53
51	52	55	52	52	55	53	57	52	60	55	62	71	74	75	76
52	56	57	55	55	57	57	63	57	56	67	65	64	76	76	53
51	53	53	52	55	57	54	56	58	67	65	63	72	76	74	76

Tableau III-12: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=1$  pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
33	22	21	21	22	22	21	20	40	42	50	50	47	41	39	39
23	22	22	22	22	24	26	24	47	45	44	46	42	43	44	40
41	23	23	24	26	25	24	24	42	46	46	48	49	50	43	44
21	21	23	24	26	27	26	22	39	40	48	46	50	55	50	41
22	23	22	24	25	24	26	21	43	46	43	44	47	46	50	41
22	21	23	26	24	22	24	25	39	41	40	47	47	39	46	47
22	21	24	20	23	27	30	24	41	39	44	35	43	52	58	57
21	22	23	23	26	26	23	28	35	35	36	41	47	49	52	53
23	23	24	24	30	31	26	30	36	39	45	41	56	59	51	56
24	24	26	29	33	34	28	30	41	45	55	59	65	64	54	56
23	24	25	26	27	29	25	24	38	42	45	48	50	52	48	48
26	26	26	24	26	25	26	27	42	46	47	41	46	47	46	55
29	28	25	26	27	26	28	30	47	50	45	50	51	49	54	63
40	29	31	29	28	28	28	28	54	53	59	55	54	55	55	58
44	30	31	29	27	25	26	28	59	47	59	56	50	52	50	57
33	29	27	27	28	23	23	23	53	52	48	49	53	40	44	47
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
63	62	73	75	66	63	64	57	85	85	103	111	101	84	81	70
62	62	67	63	81	78	69	63	87	89	96	116	107	103	83	76
65	68	72	68	94	92	72	67	93	95	105	115	123	117	90	78
57	56	72	71	93	90	75	72	75	77	107	103	126	114	88	85
62	64	71	60	96	75	67	73	90	98	105	114	134	91	110	93
69	68	78	95	78	66	81	76	100	100	108	127	100	85	99	93
65	74	74	61	64	91	76	99	93	106	94	76	75	117	126	130
56	62	61	66	79	63	65	93	78	81	74	86	95	103	106	120
70	70	76	64	67	97	90	95	94	86	98	89	105	126	112	121
63	64	79	77	66	95	91	85	85	92	96	86	93	106	104	107
66	67	64	71	72	61	74	82	80	86	64	84	96	94	95	107
64	77	77	66	74	71	66	93	75	69	86	65	67	94	129	126
64	75	66	74	76	66	82	92	84	94	63	94	94	63	113	130
73	72	74	74	74	61	65	86	83	91	94	95	110	114	116	121
75	72	62	75	76	62	62	93	87	93	103	96	94	118	116	131
76	75	77	76	74	64	74	85	87	101	100	96	104	122	117	122

Tableau III-13: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=2$  pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
Les valeurs du tableau ont été multipliées par 1000.

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
25	23	25	23	24	24	23	21	57	51	60	60	56	48	46	39
25	24	23	24	24	27	26	26	59	52	52	54	49	50	47	45
22	25	25	26	24	29	26	27	50	55	54	57	57	58	48	49
22	22	25	26	26	31	30	25	45	47	57	53	56	64	54	47
24	24	23	25	28	27	29	23	50	54	49	51	55	53	54	45
23	22	24	29	27	23	26	27	45	47	46	57	54	44	52	53
23	22	25	21	25	30	33	32	47	43	47	39	43	58	67	57
22	23	24	24	29	29	31	31	38	38	42	45	55	57	61	52
24	24	26	25	35	35	30	34	41	45	50	46	66	64	60	55
25	26	30	32	37	39	32	33	47	50	62	68	75	76	63	63
25	25	27	26	30	31	27	27	43	47	51	54	57	60	53	55
31	28	28	25	28	27	29	30	48	53	54	46	53	53	55	64
32	31	28	29	30	23	31	34	54	58	51	57	58	57	63	74
45	32	35	32	31	31	31	32	63	61	69	64	64	64	64	68
50	33	35	33	30	29	29	31	69	54	69	65	59	59	57	66
37	32	30	30	32	25	25	26	61	59	55	58	61	46	52	56
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
73	72	68	69	81	73	76	67	103	104	128	136	124	102	96	83
72	71	79	99	98	91	79	71	106	107	117	141	132	123	95	86
75	60	63	104	112	106	83	75	113	116	126	138	147	137	105	88
66	66	64	63	111	105	90	66	89	94	128	122	150	133	104	101
71	61	60	93	114	69	104	65	109	119	122	135	159	108	132	110
79	76	90	114	91	75	94	89	119	117	127	152	117	99	115	109
74	66	65	71	74	106	116	119	109	126	109	89	87	137	150	156
67	76	70	76	94	97	101	111	90	95	84	100	112	123	125	144
63	66	65	66	105	115	107	113	112	101	112	103	126	142	133	143
72	76	71	66	99	114	106	97	100	105	111	100	106	125	136	122
65	76	79	62	66	76	90	97	75	78	97	102	103	106	106	122
73	91	67	77	64	73	101	106	57	105	102	97	100	105	139	149
61	67	61	64	69	77	97	106	99	110	97	107	113	97	133	152
64	62	91	65	92	73	79	103	97	107	115	112	100	133	135	141
69	64	74	66	69	73	95	109	103	110	120	114	117	135	135	154
75	65	90	69	96	78	93	103	100	113	116	114	125	145	141	151

Tableau III-14: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=3$  pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
 Les valeurs du tableau ont été multipliée par

CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
20	20	23	27	27	27	26	24	69	63	74	72	66	57	54	45
28	26	25	26	27	27	30	23	71	61	61	64	56	57	55	50
24	28	27	29	33	33	25	29	60	66	64	66	67	67	54	54
24	25	25	27	31	35	35	28	52	55	65	60	65	74	71	55
26	27	24	27	31	30	33	25	50	63	55	57	61	61	66	50
24	24	25	32	30	26	29	30	51	52	53	66	61	50	56	54
24	23	28	23	28	33	37	36	52	46	56	45	55	64	74	74
23	24	26	26	33	33	36	35	42	42	46	50	52	65	64	54
26	26	28	28	40	39	34	37	46	50	56	52	77	76	64	73
28	26	34	36	42	45	36	37	53	56	70	75	85	88	72	72
27	27	30	31	34	35	30	29	49	52	58	61	65	67	58	62
35	32	31	28	31	29	31	34	54	61	60	52	59	59	62	72
36	35	31	32	32	32	35	37	52	57	57	64	64	63	72	82
51	36	39	36	35	34	35	36	72	68	80	72	73	71	72	76
57	36	40	37	33	31	31	34	73	60	78	74	67	65	64	71
42	34	32	34	35	27	27	24	66	65	61	65	64	52	60	56
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
85	85	107	105	96	86	90	79	122	128	162	162	152	124	113	97
84	83	92	117	118	106	89	79	126	128	134	168	157	143	107	96
87	93	98	119	133	125	100	83	134	138	149	158	173	158	123	98
77	80	97	94	131	123	109	103	134	114	147	140	177	152	123	121
82	95	87	106	133	135	124	99	136	141	134	155	182	127	157	127
86	84	102	134	107	91	107	102	137	129	144	176	136	113	124	124
82	98	101	83	85	125	134	136	120	144	126	163	101	157	171	130
77	82	80	69	110	119	114	130	106	110	95	112	131	146	145	166
94	92	95	94	128	132	125	131	135	114	121	118	144	161	153	152
84	90	104	100	113	133	127	104	115	117	125	110	121	144	156	136
76	87	95	94	99	104	101	111	111	116	116	116	117	117	126	136
83	106	101	87	96	85	112	121	99	122	115	106	113	115	154	157
95	100	97	97	94	113	121		116	125	115	121	124	112	154	171
97	95	104	100	106	105	113	116	111	121	132	125	144	144	153	154
104	96	107	94	103	104	106	126	122	125	135	130	136	144	156	173
87	96	104	105	102	114	111	126	112	135	135	134	136	157	164	165

Tableau III-15: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=5$  pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7  
Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.



CANAL NO: 1								CANAL NO: 2							
32	29	31	30	29	29	31	25	51	75	89	81	75	64	63	53
32	25	28	28	31	32	33	30	53	69	70	69	63	62	60	55
26	30	30	30	37	37	33	30	59	74	74	71	76	75	64	57
26	28	29	28	34	40	40	32	57	63	70	62	73	84	83	64
25	30	25	29	34	34	37	26	59	73	57	62	67	69	76	53
25	25	29	37	34	28	33	31	55	55	60	74	57	57	64	62
26	25	31	26	31	35	39	38	57	53	63	49	51	71	78	79
24	26	29	28	35	37	40	37	46	47	52	54	55	71	77	73
28	29	32	31	47	43	38	41	52	56	63	59	90	83	76	80
30	31	37	39	46	46	40	42	59	62	78	83	94	95	80	83
28	29	32	35	39	39	32	32	53	57	63	68	76	75	63	59
39	35	33	31	35	32	34	37	58	65	64	58	66	64	68	80
41	39	34	35	35	37	39	39	70	74	64	70	70	72	83	87
56	40	43	38	37	37	38	38	79	72	87	74	77	77	77	80
62	39	44	40	35	34	34	36	84	64	85	81	70	69	69	76
45	37	35	36	36	29	29	32	73	68	65	70	73	56	68	76
CANAL NO: 3								CANAL NO: 4							
98	101	129	113	106	97	108	97	143	153	198	174	167	137	130	116
96	92	101	128	134	120	98	86	150	143	156	184	177	160	120	104
98	105	109	134	154	143	117	89	151	156	167	179	195	176	137	105
87	97	105	101	142	139	132	123	116	131	156	151	189	168	148	144
90	110	93	122	142	124	149	109	146	161	139	176	189	145	184	138
95	89	111	146	129	104	122	112	146	135	155	189	162	126	144	136
89	112	121	98	101	140	146	158	130	157	148	117	116	173	182	202
90	94	84	99	129	133	133	149	120	122	106	124	151	151	163	185
116	103	113	114	151	145	147	151	154	126	132	158	159	176	174	161
96	101	119	111	124	145	143	122	113	127	137	120	130	156	167	148
91	98	101	109	117	119	119	107	115	121	119	133	134	151	136	156
96	121	109	97	109	94	121	152	112	136	122	113	126	123	165	150
111	118	121	117	109	123	132	134	133	142	140	143	150	136	171	165
113	107	118	119	118	124	129	136	128	134	149	150	161	161	168	175
119	119	116	114	121	115	120	147	141	144	147	146	154	163	161	143
98	110	119	126	112	129	131	147	124	150	154	154	147	166	193	215

Tableau III-16: Valeur des fonctions de structures définies à une distance  $p=10$  pour le 13 Avril 1976 dans les 4 canaux MSS  
canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3: MSS6, canal 4, MSS7.  
Les valeurs du tableau ont été multipliée par 1000.

MSS4

MSS5

117	78	112	149	192	115	227	154
89	85	75	140	170	244	312	277
79	147	124	207	195	263	243	426
177	141	175	172	221	244	266	266
150	200	140	102	273	254	225	245
137	180	210	200	293	273	260	251
254	191	259	203	255	353	370	363
450	213	204	268	320	351	345	357
255	309	358	260	347	342	394	389
324	384	440	430	418	453	414	351
291	348	361	409	390	401	371	340
340	435	449	344	386	325	290	345
435	439	448	455	423	375	365	404
208	559	579	568	486	450	388	399
129	424	572	567	487	455	411	358
512	580	484	541	531	314	330	314

311	243	256	250	275	317	303	194
317	313	323	281	239	398	411	354
340	329	337	344	264	342	361	426
380	339	371	393	358	290	298	298
450	424	422	398	430	309	258	252
535	483	435	417	335	309	285	291
537	515	442	265	296	376	385	371
520	462	486	390	400	359	316	382
570	524	514	425	435	417	371	408
581	580	540	518	459	461	416	400
571	557	508	524	483	468	416	357
599	600	587	515	498	478	450	440
557	667	600	603	569	498	478	477
601	675	608	634	573	575	499	473
459	639	643	647	623	607	561	407
724	719	614	649	609	557	581	500

MSS6

MSS7

116	126	112	78	146	147	249	205
121	127	132	122	160	240	279	269
158	167	138	197	156	211	272	263
201	180	168	182	209	163	235	230
233	224	212	198	286	221	168	252
330	275	273	291	229	281	225	242
371	370	299	241	222	255	265	258
359	367	273	263	278	267	264	261
432	338	323	292	313	236	301	273
358	330	354	320	314	343	303	261
303	333	355	330	320	325	293	267
439	447	427	384	350	263	254	239
472	425	395	375	329	273	245	269
451	425	413	371	321	305	297	251
389	430	421	373	348	351	326	273
472	465	373	399	379	343	331	315

134	148	113	90	140	183	217	189
154	152	132	110	146	219	242	243
185	171	155	178	132	167	238	237
214	194	177	201	183	140	188	170
271	236	219	195	236	193	145	195
367	309	255	244	197	243	186	191
421	361	278	208	176	214	217	213
362	376	257	250	236	230	225	215
415	335	323	250	235	229	246	224
335	367	314	291	256	280	241	223
431	334	320	303	300	276	252	264
490	404	364	357	319	263	227	225
491	420	373	345	306	267	244	246
478	408	377	350	324	287	259	236
450	420	377	361	331	334	302	274
475	421	376	377	362	324	305	311

Tableau III-17: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation des fonctions de structures définies à la distance p=1 . On a tracé les courbes d'iso-épaisseur optique. On retrouve le gradient Nord-Sud de variation de l'épaisseur optique.

CANAL NO: 1										CANAL NO: 2									
220	194	200	234	242	235	362	274			372	357	301	284	352	401	391	272		
210	189	203	245	280	332	432	398			367	356	334	330	297	403	477	443		
197	274	245	339	302	367	370	507			430	403	405	377	300	331	417	451		
321	267	291	294	331	354	361	374			475	423	425	440	377	316	374	371		
335	300	265	296	413	373	330	376			580	582	490	462	492	364	302	325		
325	348	347	413	410	375	371	374			601	570	516	467	374	391	331	346		
457	374	417	321	371	403	467	450			704	624	515	356	359	420	427	436		
550	390	357	412	446	461	455	453			629	534	477	471	459	415	435	421		
402	442	507	437	516	474	475	408			679	622	564	505	482	458	416	450		
535	538	579	557	527	555	524	447			700	642	592	557	498	479	462	439		
409	526	530	569	530	523	470	465			701	649	589	577	545	515	467	414		
476	613	614	508	540	457	426	465			708	689	662	605	567	539	505	479		
574	677	628	626	576	522	497	514			744	745	696	671	628	560	530	510		
375	710	733	715	634	590	516	513			676	743	727	686	634	622	545	513		
258	500	700	720	653	647	555	502			563	729	694	708	672	665	613	513		
632	727	654	706	674	500	524	495			798	787	689	719	661	650	674	582		

CANAL NO: 3										CANAL NO: 4									
146	164	129	99	171	217	294	251			144	150	107	87	150	202	234	208		
166	176	171	132	178	271	318	310			159	163	137	110	146	226	254	250		
205	208	173	219	176	235	311	292			174	182	161	174	131	171	246	251		
258	242	203	224	232	174	258	265			235	210	183	206	181	144	197	208		
304	274	252	233	316	243	193	276			305	246	225	199	241	196	146	209		
420	332	310	318	262	319	248	275			386	315	262	245	200	254	190	202		
455	428	353	292	255	253	232	272			434	374	289	237	194	216	216	209		
474	406	342	320	307	319	276	289			416	403	275	263	245	237	233	216		
516	401	376	339	345	318	323	277			437	375	314	266	256	241	255	215		
465	371	401	373	349	353	327	261			416	341	323	305	275	235	251	228		
472	407	427	375	375	337	316	291			455	406	340	325	314	264	257	227		
532	510	467	446	400	332	231	262			523	436	411	366	335	274	237	225		
500	500	472	442	364	335	236	271			513	435	373	366	313	263	237	214		
474	475	472	453	383	355	336	262			501	427	367	373	331	276	237	237		
450	513	474	440	463	412	346	323			473	447	366	373	346	346	302	233		
502	523	456	463	436	383	372	301			475	437	364	371	331	327	366	321		

Tableau III-18: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation des fonctions de structures définies à la distance  $p=2$ . On a tracé les courbes d'iso-épaisseur optique pour les canaux 3 et 4. On retrouve bien le gradient Nord-Sud de la variation observée sur l'image origine.

Les valeurs des tableaux ont été multipliés par 1000.

canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 : MSS6, canal 4, MSS7

CANAL NO: 1												CANAL NO: 2											
279	243	240	263	279	237	412	337					337	370	310	274	362	423	410	332				
280	253	255	277	323	432	472	433					355	404	408	341	317	480	477	482				
285	320	293	305	331	400	404	517					481	423	419	404	335	389	442	457				
301	332	337	359	360	352	412	432					479	457	433	458	410	322	355	336				
415	430	324	330	403	433	360	414					570	522	503	477	503	371	311	350				
422	420	414	455	448	442	413	411					635	592	535	476	414	413	347	354				
530	451	455	380	408	437	503	484					731	654	535	365	392	427	445	407				
605	465	420	466	480	445	487	434					581	621	519	494	489	430	442	427				
541	562	500	406	542	525	526	511					729	645	594	531	493	470	423	458				
620	600	622	576	581	534	553	478					732	680	602	562	507	510	470	451				
583	596	585	624	574	588	526	499					742	677	607	563	553	525	475	427				
501	606	676	576	593	526	472	505					726	712	680	625	586	558	518	455				
636	733	680	678	620	575	538	549					770	766	712	688	637	570	538	518				
407	751	775	756	682	641	559	546					584	755	740	701	649	631	557	514				
268	601	735	763	706	703	598	555					567	745	707	725	704	682	624	538				
656	760	733	763	713	675	607	567					307	805	769	732	674	674	701	604				
CANAL NO: 3												CANAL NO: 4											
155	175	131	103	175	240	303	267					140	148	100	83	149	206	240	213				
181	196	177	133	177	276	327	331					154	164	137	107	139	222	267	257				
219	219	175	220	183	244	327	304					170	160	153	167	127	174	250	244				
292	261	222	231	240	193	264	271					234	238	184	203	179	141	195	213				
320	292	261	243	320	245	197	264					303	249	224	199	241	193	145	212				
445	341	313	323	271	325	255	264					355	313	256	243	200	250	195	208				
455	447	368	357	303	245	287	270					457	375	284	244	195	217	212	207				
470	457	303	332	318	323	303	246					415	403	295	263	245	242	234	215				
557	423	371	343	353	317	325	304					441	395	318	286	257	241	239	215				
501	410	413	363	363	357	355	290					458	444	330	306	250	284	253	228				
517	471	420	417	390	363	320	270					456	408	346	323	31	285	252	232				
557	536	368	401	428	345	284	285					527	435	413	365	338	272	235	218				
500	523	406	465	397	355	301	301					511	430	390	371	312	283	257	240				
514	517	479	452	402	371	344	267					447	422	357	374	334	276	236	234				
480	535	484	460	417	432	357	330					471	450	332	372	344	352	304	283				
570	542	492	477	457	374	408	375					474	455	380	365	357	327	360	320				

Tableau III-19: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation des fonctions de structures définies à la distance  $p=3$ . On a tracé les courbes d'iso-épaisseur optique pour les canaux 3 et 4. On retrouve bien le gradient Nord-Sud de la variation observée sur l'image origine. Les valeurs des tableaux ont été multipliés par 1000.  
 canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6,  
 canal 4, MSS7

CANAL NO: 1												CANAL NO: 2											
316	279	269	271	296	333	427	374	336	393	305	267	357	433	410	356								
300	265	294	313	348	456	493	436	388	408	418	337	331	490	503	450								
315	350	326	402	339	417	429	515	457	416	420	396	337	389	451	450								
411	373	347	384	380	350	428	440	509	461	421	468	409	315	359	335								
474	465	348	357	468	422	371	448	604	522	492	478	499	363	305	354								
470	454	449	478	457	483	416	423	722	597	535	480	415	425	350	350								
509	506	527	424	431	498	505	492	732	668	550	404	401	430	441	407								
528	509	467	480	507	508	487	496	580	649	535	498	470	442	439	430								
508	607	587	520	555	536	543	519	750	653	604	527	491	479	421	454								
553	622	649	614	575	587	561	491	745	663	608	571	514	504	470	446								
614	631	621	650	594	576	534	517	757	686	616	619	559	524	478	425								
463	719	710	608	624	559	490	524	713	722	690	622	598	565	518	489								
558	756	701	702	650	587	550	574	778	766	710	689	643	567	535	525								
397	751	786	762	705	652	572	551	554	759	740	699	655	634	556	507								
245	612	742	775	739	725	627	578	543	739	704	725	706	691	626	556								
649	792	725	762	735	610	665	605	792	813	716	734	673	674	715	614								
CANAL NO: 3												CANAL NO: 4											
156	178	122	104	173	236	304	274	135	142	86	78	141	196	237	216								
183	198	172	128	173	274	332	328	145	159	133	96	134	218	269	254								
216	217	171	213	179	241	325	303	178	175	145	163	126	169	251	235								
298	251	220	227	242	138	254	273	234	195	180	193	175	134	142	216								
333	293	259	244	313	243	193	263	276	244	213	247	233	193	135	216								
450	344	307	311	269	320	255	262	377	306	253	242	177	242	175	214								
494	453	300	316	269	259	266	276	437	371	276	250	195	116	214	263								
501	437	370	334	320	315	302	294	411	377	285	262	246	239	237	219								
549	430	393	342	351	311	319	301	443	353	313	257	261	232	237	229								
516	426	423	374	375	354	337	268	424	344	330	309	282	277	254	225								
552	491	452	416	339	357	316	296	452	406	342	324	312	233	251	266								
561	536	503	452	434	342	237	264	514	431	403	357	339	269	226	213								
566	537	465	467	455	351	316	291	537	442	362	372	312	235	245	230								
510	517	499	455	409	375	342	285	466	413	347	358	332	198	283	255								
463	543	463	476	423	433	364	334	455	453	372	377	333	356	274	232								
561	533	463	476	471	393	416	372	475	414	379	374	346	330	368	316								

Tableau III-20: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation des fonctions de structures définies à la distance  $p=5$ . On a tracé les courbes d'iso-épaisseur optique pour les canaux 3 et 4. On retrouve bien le gradient Nord-Sud de la variation observée sur l'image origine. Les valeurs des tableaux ont été multipliés par 1000.

canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7

CANAL NO: 1

CANAL NO: 2

270	267	259	250	271	340	420	305
275	261	271	263	255	347	403	405
344	325	323	327	340	403	443	435
403	332	372	321	287	340	440	450
441	470	337	323	472	413	377	430
477	422	472	421	426	321	402	427
575	547	525	420	433	520	440	483
624	521	521	507	447	470	442	444
632	521	511	523	536	543	550	520
671	525	620	615	573	508	550	469
651	528	537	642	609	571	532	514
451	701	710	610	626	557	503	519
650	723	705	716	642	567	561	562
357	691	757	743	705	682	572	561
232	631	714	723	736	720	644	542
631	743	721	765	733	643	682	623

343	374	247	266	354	415	342	347
377	341	346	312	325	406	472	447
420	404	400	326	332	371	442	426
520	421	414	403	354	367	350	333
337	525	472	464	477	361	303	345
635	521	531	464	421	423	341	327
724	634	547	414	351	427	434	402
620	657	534	503	453	431	442	421
720	650	608	516	473	476	416	452
734	650	598	558	428	504	451	439
761	681	616	603	524	514	467	412
535	710	697	619	592	558	516	455
768	746	711	690	625	541	527	511
622	738	709	681	651	614	554	534
524	740	676	717	697	677	634	555
732	781	712	722	672	680	677	627

CANAL NO: 3

CANAL NO: 4

158	172	107	110	152	230	291	270
186	175	165	123	172	273	321	316
207	147	160	202	160	229	325	290
308	250	213	230	240	173	260	260
327	267	252	234	312	241	197	271
440	321	303	292	240	317	240	274
442	440	370	312	255	301	250	262
440	477	320	332	304	304	306	272
527	422	327	312	344	303	302	241
508	424	412	341	304	327	323	293
522	402	423	400	303	343	274	227
726	317	304	420	424	311	264	272
574	520	400	444	343	327	307	274
405	443	472	420	340	373	325	272
472	220	420	473	402	420	322	321
525	477	424	471	402	323	420	370

125	137	80	86	133	186	220	211
141	147	124	90	123	225	255	255
175	156	149	155	118	160	255	223
232	193	176	197	172	123	187	177
232	234	211	187	241	191	140	231
370	287	249	224	194	231	187	225
425	324	286	242	191	225	205	172
370	387	285	254	225	232	235	227
431	321	307	243	261	225	231	225
414	345	326	307	275	271	243	221
420	384	342	314	302	274	243	222
323	417	406	357	331	252	227	226
411	412	375	345	324	267	246	213
420	402	371	346	324	312	271	225
427	438	367	372	326	323	322	272
412	341	308	374	346	321	327	311

Tableau III-21: Variations de l'épaisseur optique pour les 12 et 13 Avril 1976, estimées à partir de la variation des fonctions de structures définies à la distance p=10. On a tracé les courbes d'iso-épaisseur optique pour les canaux 3 et 4. On retrouve bien le gradient Nord-Sud de la variation observée sur l'image origine. Les valeurs des tableaux ont été multipliés par 1000. canal 1 : MSS4, canal 2 : MSS5, canal 3 MSS6, canal 4, MSS7

### III 2 4 : Comparaison des différentes méthodes d'estimation de l'épaisseur optique

Nous avons vu que chacune des méthodes d'estimation de la variation d'épaisseur optique, à partir des précédentes, moyenne, écart-type, fonction de structure, présentait certains avantages et inconvénients ou limitations. Dans ce qui suit, les résultats donnés indépendamment par chaque méthode sont comparés à ceux des autres (au moyen d'une régression).

#### Comparaison moyenne / écart-type (tableau III-22)

On n'obtient un coefficient de corrélation proche ou supérieur à 0,9 que pour la comparaison des résultats obtenus dans les canaux MSS6 et MSS7 à partir de l'écart type, et dans les canaux MSS4 et MSS5 à partir de la valeur moyenne. Comme précédemment soulignés, les faibles variations de la valeur moyenne dans les canaux MSS6 et MSS7, le faible niveau des écarts types dans les canaux MSS4 et MSS5 perturbent fortement les résultats obtenus pour  $\tau$ . Un exemple de corrélation est donné en figure (III-13)

#### Comparaison moyenne fonction de structure (Tableau III-23 et III-25)

Cette comparaison aboutit aux mêmes conclusions que précédemment : bonne relation entre les résultats obtenus dans les canaux MSS6 et MSS7 à partir de la fonction de structure ( $d = 2$  ou  $5$  pixels), et dans les canaux MSS4 et MSS5 à partir de la moyenne. Les coefficients de corrélation sont nettement améliorés et atteignent ou dépassent 0,95. Ceci démontre la supériorité des résultats obtenus au moyen de la fonction de structure, comparés à ceux donnés par l'écart-type qui ne permet pas d'isoler les structures de petites dimensions.

		Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la variation de la moyenne				
		canal	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Variation de l'épaisseur optique estimé à partir de l'écart-type	MSS4		0.603	0.604	0.413	0.321
	MSS5		0.865	0.827	0.703	0.044
	MSS6		0.884	0.873	0.762	0.041
	MSS7		0.928	0.910	0.817	0.103

Tableau III-22: Coefficient de corrélation entre moyenne et écart-type.

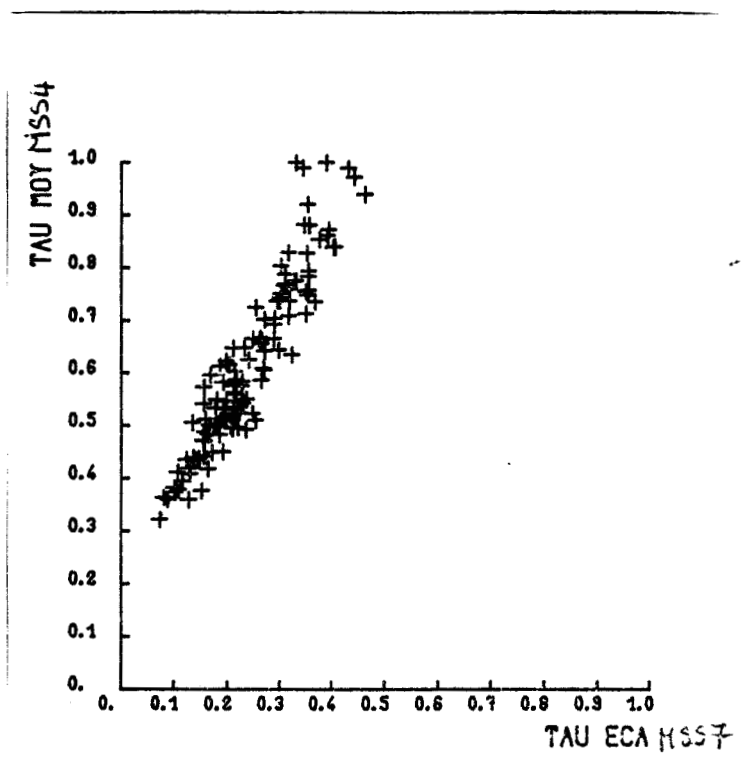


Figure III-13: Corrélation entre les estimations des variations d'épaisseur optique dans les canaux MSS4 pour la moyenne et MSS7 pour l'écart-type.



Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la variation de la moyenne					
	canal	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la fonction de structure définie à $d = 2$	MSS4	0.611	0.635	0.432	0.325
	MSS5	0.905	0.871	0.759	0.011
	MSS6	0.928	0.929	0.840	0.132
	MSS7	0.971	0.958	0.889	0.197

Tableau III-23: Coefficient de corrélation entre moyenne et la fonction de structure définie pour  $p=2$

Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la variation de la moyenne					
	canal	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la fonction de structure définie à $d = 5$	MSS4	0.657	0.666	0.479	0.275
	MSS5	0.906	0.870	0.768	0.039
	MSS6	0.935	0.932	0.850	0.154
	MSS7	0.966	0.955	0.885	0.193

Tableau III-24: Coefficient de corrélation entre moyenne et la fonction de structure définie pour  $p=3$ .

Variation de l'épaisseur optique estimée à partir de la variation de la fonction de structure définie à $d = 2$					
	canal	MSS4	MSS5	MSS6	MSS7
Variation de l'épaisseur optique estimé à partir de la fonction de structure définie à $d = 5$	MSS4	0.976	0.749	0.771	0.699
	MSS5	0.824	0.994	0.924	0.925
	MSS6	0.816	0.919	0.996	0.980
	MSS7	0.728	0.932	0.980	0.997

Tableau III-25: Coefficient de corrélation entre  $p=2$  et la fonction de structure définie pour  $p=5$ .

La comparaison des résultats permet également, en ne retenant que ceux correspondant à un bon coefficient de corrélation ( $r=0,9$ ), d'obtenir une estimation de la dépendance en longueur d'onde de  $\tau$  à partir des pentes de droite données par les régressions (FS2 et moyenne).

$$\frac{\text{MSS4}}{\text{MSS6}} = 1,45 \text{ à comparer avec } \frac{850}{550} = 1.50$$

$$\frac{\text{MSS4}}{\text{MSS7}} = 1,62 \text{ à comparer avec } \frac{950}{550} = 1.72$$

$$\frac{\text{MSS5}}{\text{MSS6}} = 1.38 \text{ à comparer avec } \frac{850}{650} = 1.30$$

soit une loi  $\tau(\lambda)$  proche de  $\lambda^{-1}$

La bonne cohérence des résultats obtenus sur  $\delta\tau$  par les différentes méthodes confirme la validité du modèle théorique d'où sont dérivées les formules permettant d'analyser les changements intervenus dans les valeurs moyenne et écart-type de la scène.

### III 2 5 : Comparaison aux observations faites à partir du sol

---

Nous disposons des relevés de visibilité faites par les stations météorologiques localisées ou proches de la zone étudiée : Chateaudun, Orléans, Tours, Bourges, Chateauroux (Figures III-14 et III-15) et des mesures du rayonnement solaire direct au moyen d'un pyrrohéliomètre, à Trappes, moins de 100 km au nord de la zone étudiée.

#### Visibilités

L'épaisseur optique a été estimée à partir de la visibilité relevée en utilisant la formule empirique suivante :

$$\tau_p = 3.912 \frac{H_p}{V} \quad \text{III-17}$$

Les variations d'épaisseur optique entre les 12 et 13 avril 1976 ainsi déduites ont été reportées en fonction des valeurs calculées les plus proches obtenues dans l'imagerie Landsat (méthode de la moyenne) Figure III-14

Si les résultats ainsi obtenus montrent une nette corrélation entre les deux valeurs, les estimations à partir de la visibilité indiquent une augmentation sur toute la zone le 13 avril 1976, plus marquée dans le sud de l'image. Cependant, cette comparaison reste très qualitative et illustre bien les imprécisions liées à l'estimation de l'épaisseur optique à partir de la visibilité : localisation des stations, méthode plus ou moins subjective dépendant de l'observateur, relation empirique et statistique entre l'épaisseur optique et la visibilité.

### Pyrrhélicmètre

Après tracé de la droite de Bouguer (logarithme de rayonnement en fonction de la masse d'air) pour les matinées des 12 et 13 avril 1976 (figure III-15) on aboutit aux valeurs suivantes :

$$\tau = 0,40 \text{ le 12 avril}$$

$$\tau = 0,65 \text{ le 13 avril}$$

$$\delta\tau = 0,25$$

soit une valeur proche de celle déduite des images dans le nord de la zone étudiée.

Cette comparaison aux observations faites à partir du sol ne permet pas de valider exactement l'analyse effectuée, mais autorise cependant à conclure que les résultats calculés en appliquant le modèle théorique aux images Landsat, correspond à l'ordre de grandeur des observations faites indépendamment et donc à une réalité physique certaine.

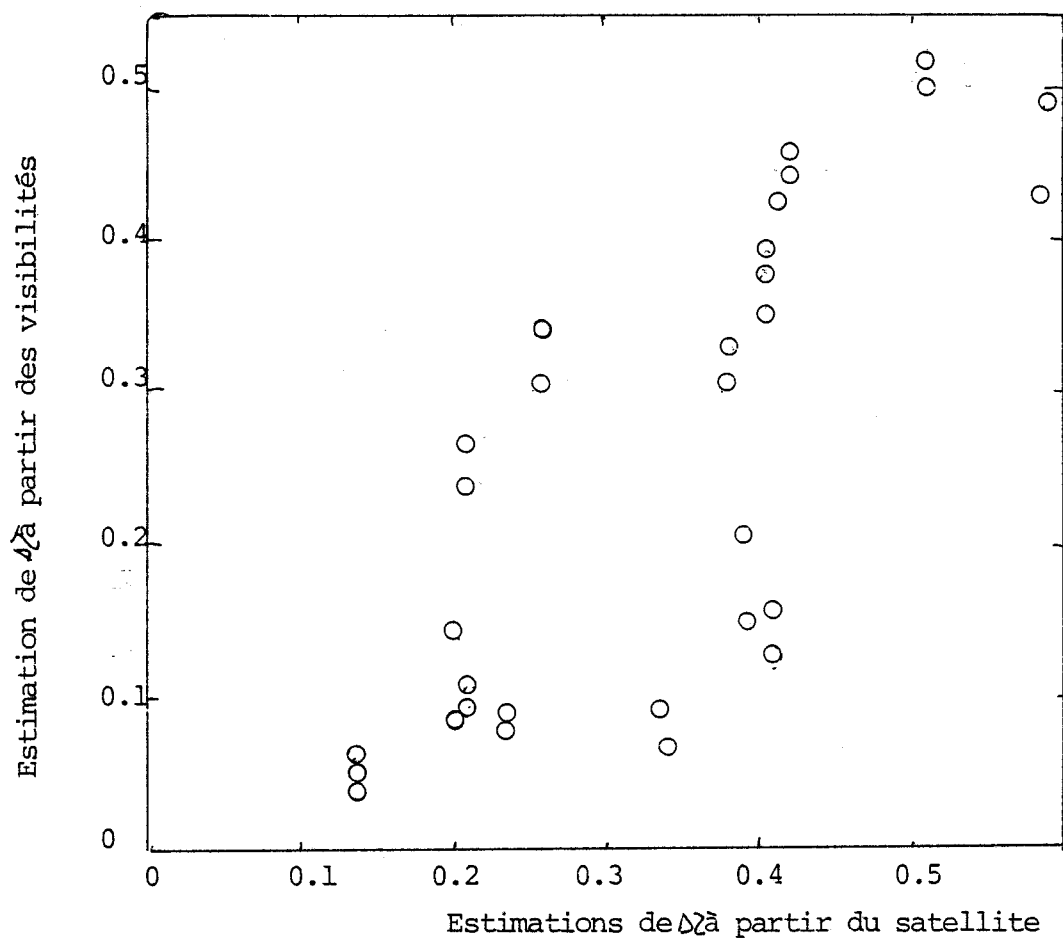


Figure III- 14 Estimations de  $\Delta z$  faites à partir des mesures satellitaires ou des visibilitées horizontales mesurées au sol.

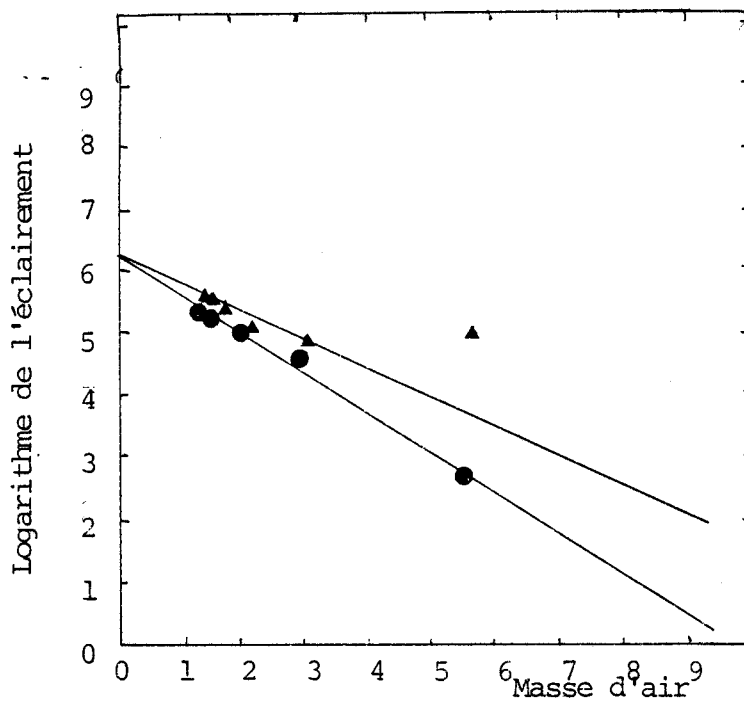


Figure III-15: Droite de BOUGER pour les 2 jours, 12 et 13 avril 1976  
On trouve respectivement :  $\Delta \tau_{204} = 0.397$  et  $\Delta \tau_{1304} = 0.652$ .

### III. CONCLUSION

---

On a montré que le modèle théorique utilisé permettait l'analyse des effets observés dans des images Landsat par suite de variations de l'épaisseur optique en aérosols : augmentation de la valeur moyenne (quand la réflectance moyenne est faible) diminution de l'écart-type lorsque l'épaisseur optique en aérosols augmentait.

Des variations d'épaisseur optique peuvent être déduites des images : les meilleurs résultats sont obtenus à partir des variations de la valeur moyenne dans les canaux MSS4 et MSS5 et de la fonction de structure (distance de quelques pixels) dans les canaux MSS6 et MSS7. Ils présentent une bonne cohérence spatiale et spectrale, et correspondent à l'ordre de grandeur déduit d'observations indépendantes faites depuis le sol (visibilité, rayonnement solaire direct).

## CHAPITRE IV

BILAN DES DIFFERENTS EFFETS  
METHODES DE CORRECTIONS, LEURS  
APPLICATIONS



#### IV 1 : INTRODUCTION :

---

La correction des effets atmosphériques dans l'imagerie satellitaire est un problème souvent rencontré lorsque l'on interprète des images satellitaires(10), (11), (12), (13), (14). Le thématicien désire en effet travailler sur des images "propres", c'est-à-dire corrigées des effets atmosphériques (15), (16), (17). Les questions qu'il se pose lorsque il est devant une image brute sont les suivantes : Quelle est la part de signal "utile" mesuré dans le signal acquis ? Doit-on ou non effectuer une correction ? Est-ce que cela va m'amener des informations supplémentaires sans traitement informatique supplémentaire important(long et parfois coûteux ) ? En fait les réponses à ces questions et les méthodes de corrections éventuellement employées vont dépendre du site observé et des conditions atmosphériques lors de la prise de vue.( brume, nuages ...)(18), (19), (20), (21).

Examinons tout d'abord les différents sites que l'on peut rencontrer et quelle est l'influence de l'atmosphère sur eux. La réflectance mesurée par le capteur  $\rho$  est la somme de la réflectance atmosphérique  $\rho_a$ , et des contributions de la réflectance de la cible  $\rho_c$ , et de la réflectance de l'environnement  $\rho_e$  : (référence CHAPITRE II Modèle)

$$\rho = \rho_a + A \rho_c + B \rho_e \quad \text{IV-1}$$

Sur les sites de faibles réflectances, la réflectance atmosphérique représente une grande part du signal mesuré par le satellite. C'est donc à partir de la variation de la réflectance atmosphérique que l'on développe une correction. Cette approche est très bien adaptée par exemple au problème de la couleur de l'océan où la réflectance est faible dans le visible et nulle dans le proche infra-rouge(22), (23).

Sur les sites de réflectances élevées, la réflectance atmosphérique ne représente qu'une faible partie du signal satellitaire. La dégradation atmosphérique se caractérise par un des contrastes (du aux phénomènes d'environnement) et par une atténuation du signal sur les trajets soleil-sol et sol-satellite. La modélisation précédemment développée nous a montré que le paramètre atmosphérique nécessaire à la correction était dans ce cas l'épaisseur optique des aérosols.

Nous aborderons tout d'abord dans ce chapitre quelles sont les mesures effectuées soit à partir du sol, soit à partir du satellite qui vont nous permettre de caractériser l'atmosphère et d'appliquer ensuite des algorithmes de corrections. Nous passerons ensuite à l'étude des grandeurs couramment utilisées par les thématiciens, histogrammes bidimensionnels, index de végétation et classification supervisée et nous estimerons les effets atmosphériques sur ces grandeurs.

## IV 2 : CORRECTION ATMOSPHERIQUE A PARTIR DES PARAMETRES OPTIQUES :

---

Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent, la grande dépendance spatiale et temporelle de l'épaisseur optique. Il est donc illusoire de vouloir faire une correction globale d'une image, les phénomènes atmosphériques évoluant sur des échelles spatiales beaucoup plus petites.

Nous examinerons dans un premier temps ce que peuvent nous apporter des mesures sol et leur représentativité spatiale puis dans un second temps les moyens d'accéder aux paramètres optiques nécessaires à une correction, principalement l'épaisseur optique, à partir des mesures satellitaires, ces mesures permettant une bonne couverture spatiale et temporelle.

### IV 2 1 Paramètres optiques mesurés au niveau du sol :

---

Il existe, réparties sur toute la France, de nombreuses stations météorologiques qui effectuent un certain nombre de mesures telles que température, pression, humidité et visibilité horizontale. Les mesures de visibilité sont particulièrement intéressantes car elles permettent d'obtenir une estimation de l'épaisseur optique. On peut en effet relier visibilité et épaisseur optique :

$$\tau_p = 3.912 \frac{H_p}{V} \quad \text{IV-2}$$

où V représente la visibilité exprimée en Km

H<sub>p</sub> représente l'échelle de hauteur des aérosols exprimée aussi en Km

Cette méthode d'estimation reste malgré tout très approximative, l'échelle de hauteur H<sub>p</sub> n'étant pas connue a priori. On peut raisonnablement la supposer de l'ordre de 1 Km mais cette valeur n'est qu'une valeur moyenne et la variation suivant le site peut être importante. Nous avons vu d'ailleurs précédemment que nous pouvions avoir un facteur 2. Cette méthode reste cependant intéressante car la mesure de visibi-

lité est routinière et même si la relation  $\tau$  en fonction de  $V$  est approchée, l'ordre de grandeur reste valable.

Il serait, bien sûr, beaucoup plus intéressant de déterminer directement l'épaisseur optique. Cette détermination se fait classiquement à partir à partir du sol, dans les différents canaux de mesure de flux solaire directement transmis pour différentes hauteurs solaires. Mais la mise en oeuvre de ce type de mesures est beaucoup plus difficile et il n'existe pas à l'heure actuelle un réseau de mesures suffisamment étendu pour pouvoir envisager une bonne couverture spatiale.

Quant à la représentativité spatiale de ces mesures, que ce soit la visibilité ou l'épaisseur optique, elle est difficile à estimer. Nous avons vu toujours sur notre exemple des 12 et 13 Avril 1976, qu'un partage de l'image en 4 parties restitue bien les variations d'épaisseur optiques (Figure IV-1) Il semble néanmoins nécessaire de s'assurer de l'homogénéité spatiale des des phénomènes atmosphériques, pour cela le relevé des visibilitées par les nombreuses stations météorologiques reste un bon moyen.

Les mesures sol permettent donc d'obtenir une idée de l'épaisseur optique. Si l'on veut estimer la réflectance atmosphérique au niveau du satellite, nous sommes obligés soit de faire une hypothèse sur  $p(\zeta)$ , soit d'avoir recours à des mesures, type mesure de Duntley.

#### IV 2 2 : CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES A PARTIR DE MESURES SATELLITAIRES :

---

Suivant le type de paysage rencontré, la méthode utilisée pour estimer sera différente :

- si l'on dispose de surfaces d'eau suffisamment étendues et bien réparties, l'on s'intéressera à la variation de la réflectance atmosphérique, la réflectance de la surface d'eau étant faible dans le visible et nulle dans le proche infra-rouge. Les paramètres atmosphériques seront alors étendus à toute l'image ;  $\tau$  étant déduit à partir d'une hypothèse sur  $p(\zeta)$ .

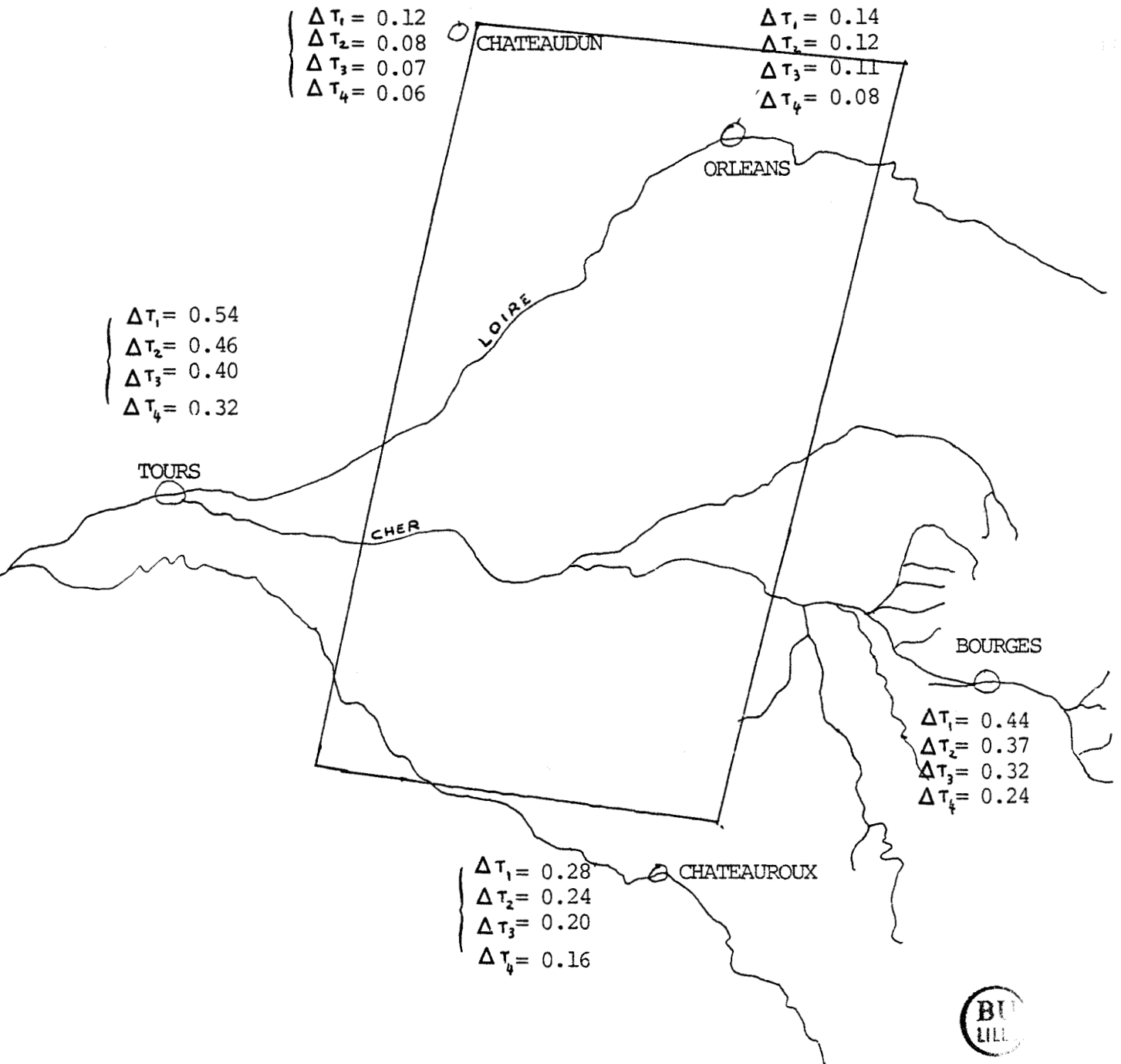


FIGURE IV-2 : Variation d'épaisseur optique calculée en fonction des visibilités observées, pour les stations entourant la zone d'étude qui est représenté par le rectangle pour les 12 et 13 Avril 1976.

- si l'on dispose d'un site de réflectance connue et invariante dans le temps, ce site peut alors être utilisé pour atteindre l'épaisseur optique et l'on étend alors les valeurs à toute l'image.

Regardons les problèmes posés par ces deux méthodes :

Pour la première méthode, suivant la superficie de la cible, la contribution de l'environnement entre pour une part importante dans le signal mesuré. Cette contribution est d'ailleurs mise en évidence sur notre exemple du 12 et 13 Avril 1976 (Figure IV-2). En effet la dépendance spectrale de la réflectance mesurée dans les canaux LANDSAT au dessus des surfaces d'eau présente une anomalie à partir de canaux MSS6 et MSS7 qui s'explique par la forte valeur de la réflectance de l'environnement dans ces deux derniers canaux.

Il faudra donc des étendues d'eau de tailles suffisamment importantes, de l'ordre de quelques kilomètres, pour s'affranchir de cet effet. On peut se reporter à la figure II-1 où nous avons reporté le tracé de la fonction d'environnement et qui précise l'ordre de grandeur du phénomène.

Pour la seconde méthode, la difficulté réside dans le fait de trouver des sites invariants à partir desquels on pourrait extrapoler sur toute l'image les caractéristiques trouvées en ce point. En effet les villes qui dans quelques études sont prises comme invariants (24) présentent des variations importantes dues à la présence de poussières et de fumées qui peuvent entraîner des erreurs d'appréciations importantes. Les invariants qui semblent facilement utilisables et qui ont une réponse spectrale favorable sont les grandes étendues de sol nu (Crau dans le Sud de la FRANCE, désert du SAHARA en Afrique). Une fois ces invariants repérés, on applique la méthode décrite au chapitre précédent pour remonter aux propriétés optiques.

Les différents satellites qui nécessitent en général des corrections sont bien entendus les satellites d'observations de la terre ( LANDSAT, SPOT). Toutefois les satellites météorologiques, (25) tels que NOAA et METEOSAT offrent par leur répétitivité quotidienne une source d'information sur l'atmosphère considérable.

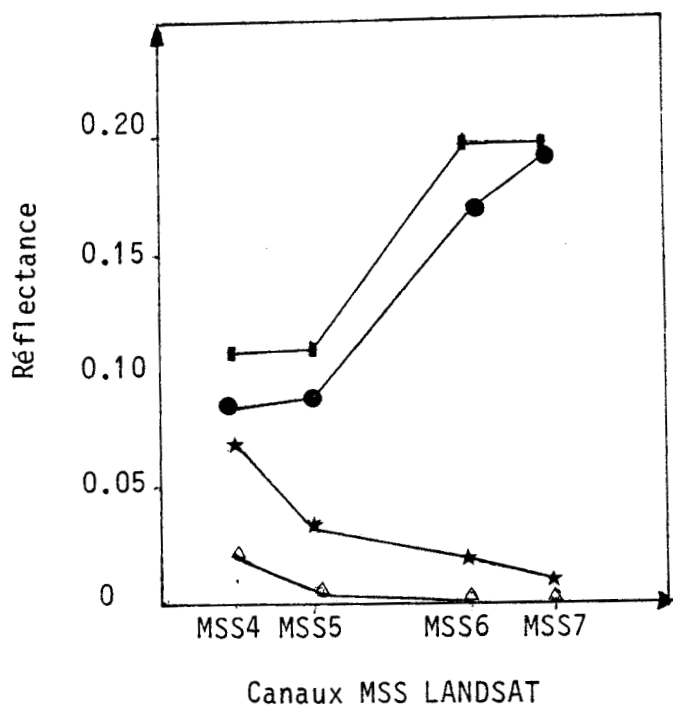


Figure IV-2: Valeurs moyennes des 12 (■) et 13 Avril (●) tracées pour un pavé contenant des lacs. Les courbes de réflectances suivent la courbe d'évolution de la végétation. Nous avons reporté les courbes de réflectances théoriques de l'eau (Δ) et de l'eau plus l'influence de l'atmosphère(★).

#### IV 3 3 : INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE SUR DES GRANDEURS "THEMATIQUES" :

---

Dans le paragraphe précédent nous avons fait le bilan des méthodes de corrections qui peuvent être faites sur des sites terrestres, soit à partir de données externes (mesures météorologiques), soit à partir de données acquises par le satellite.

Les thématiciens utilisent un certain nombre de traitements d'images (tels que index de végétation, histogramme bidimensionnel ...) pour extraire des images des informations spécifiques sur la végétation, les cultures. Avant d'appliquer une correction telle que nous l'avons décrite au paragraphe précédent, nous avons voulu dans ce paragraphe étudier les effets de l'atmosphère sur ces traitements. C'est-à-dire savoir comment les histogrammes bidimensionnels sont transformés par la présence d'une couche de brume, comment évolue l'index de végétation ou bien encore savoir quel est l'impact de l'atmosphère sur une classification.

##### IV 3 3 1 : Histogrammes bidimensionnels :

.....

L'histogramme bidimensionnel représente la fréquence des observations radiométriques des différents pixels dans deux canaux. Sur les paysages agricoles que nous étudions, les canaux choisis sont ceux du visible et de l'infra-rouge, nous observons deux regroupements de points.

- un premier regroupe les points dont les valeurs radiométriques sont relativement proches dans le visible et le P.I.R., ce qui correspond à des sols nus.
- le deuxième regroupe les pixels qui ont une forte réponse dans le proche infra-rouge et une faible réponse dans le visible, qui correspondent à la végétation, ayant une forte activité chlorophyllienne.

Ce type de représentation permet de faire une sélection pour optimiser certains traitements visuels. Nous pouvons, en effet, séparer sur un histogramme bidimensionnel les groupes de points correspondants à du sol



nu , à de la végétation, ou à plusieurs types de végétations, on a ainsi une première idée de classification.

Cherchons à évaluer l'effet de l'atmosphère sur un paysage en supposant que l'on ait plusieurs classes de réflectances, de valeur moyenne  $\rho_i$  , de dispersion,  $\sigma_i$ , et de fréquence  $n_i$ . Cet effet se traduit :

- par une translation de la valeur moyenne de l'ensemble de de la scène, donc une translation de l'ensemble des points de l'histogramme : celle-ci étant liée à l'augmentation de la réflectance atmosphérique, et du terme lié à l'environnement.
- par un rétrécissement des dispersions observées , qui est proportionnel à  $\exp(-\tau)$  . On a donc une homothétie des points sur l'histogramme. On observe aussi un mélange de signatures spectrales car la distance entre classe a diminué.

Ces effets se retrouvent effectivement sur les images des 12 et 13 Avril 1976 que nous avons étudié.

Nous avons reporté sur les figures IV-3 à IV-5, les histogrammes pour des pavés de 100 pixels sur 100 pixels contenant du parcellaire et situés dans la partie claire et la partie brumeuse, de la ville.

Pour les 3 pavés, nous constatons bien les mêmes effets, plus où moins marqués toutefois suivant la plus ou moins grande variation de  $\tau$ . Nous notons bien le déplacement du barycentre de l'histogramme pour la journée du 13 Avril. La forme n'en est pas modifiée, c'est ce que nous notons particulièrement pour le cas de la ville d'ORLEANS (Figure IV-4): la forme de l'histogramme dans le coin supérieur gauche est seulement translaté.

Deux pavés (Figure IV-3 et IV-5) contiennent du parcellaire et sont situés dans le haut de l'image (lignel, colonnel ) et dans le bas de l'image (lignel6, colonnel). Ils ont été choisis car ils représentent le même type de couvert, mais des concentrations en aérosols différentes.

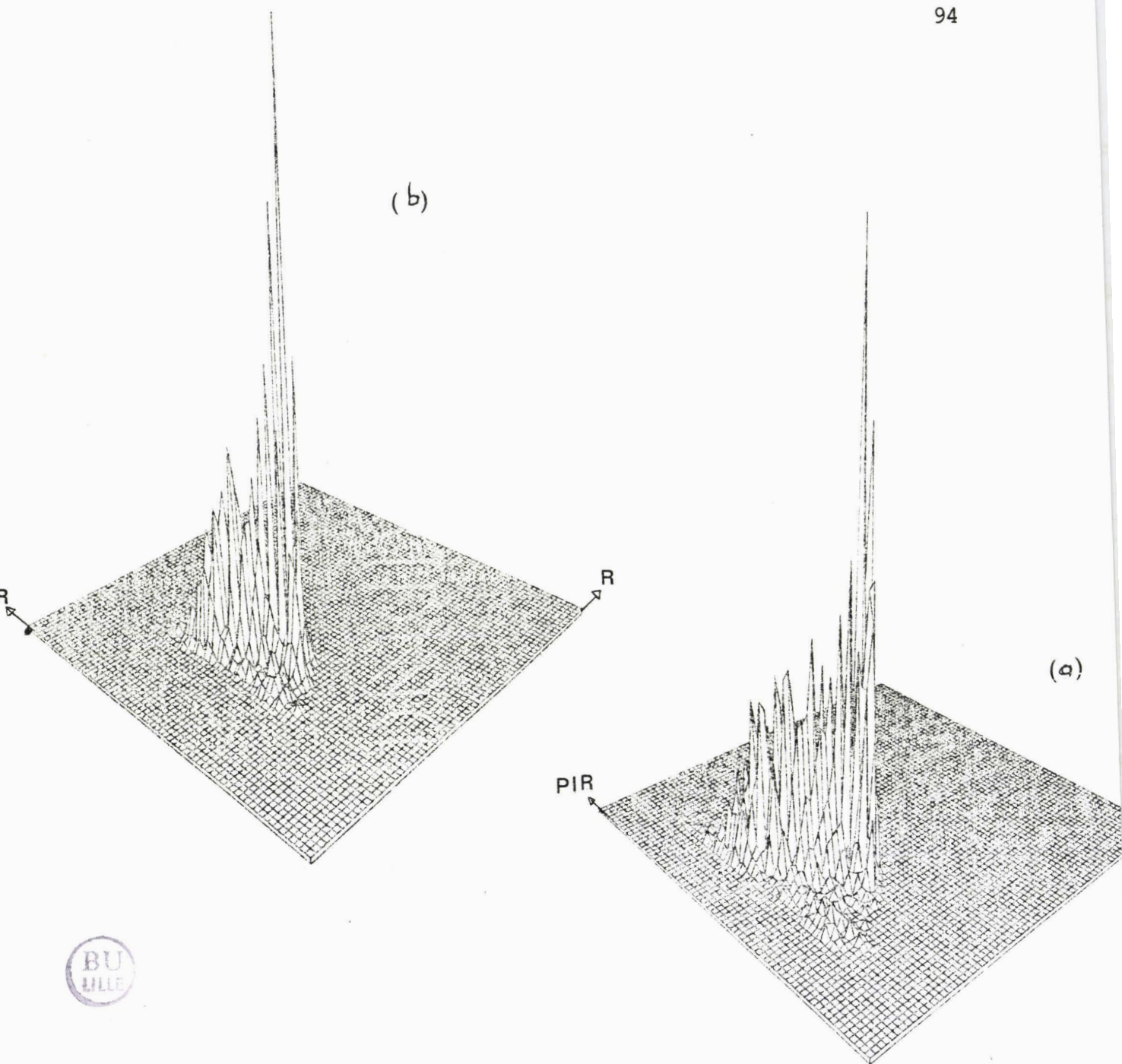


Figure IV-3 : Histogramme bidimensionnel pour le 12 Avril (a) et le 13 Avril (b) pour une zone de parcelle située dans la partie claire (ligne 1 et colonne 1)

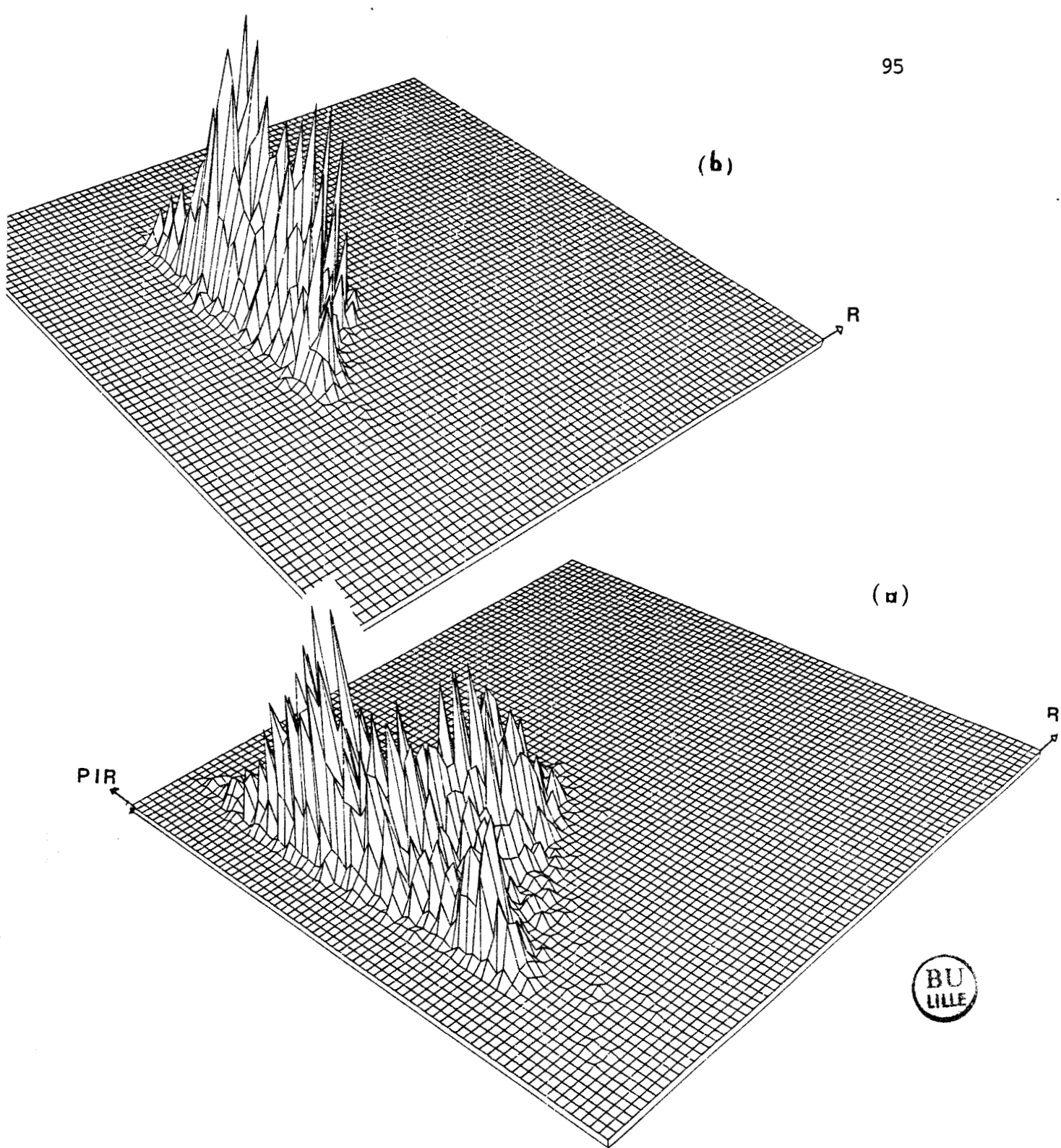


Figure IV-5 : Histogramme bidimensionnel pour le 12  
Avril (a) et le 13 Avril (b) pour ORLEANS

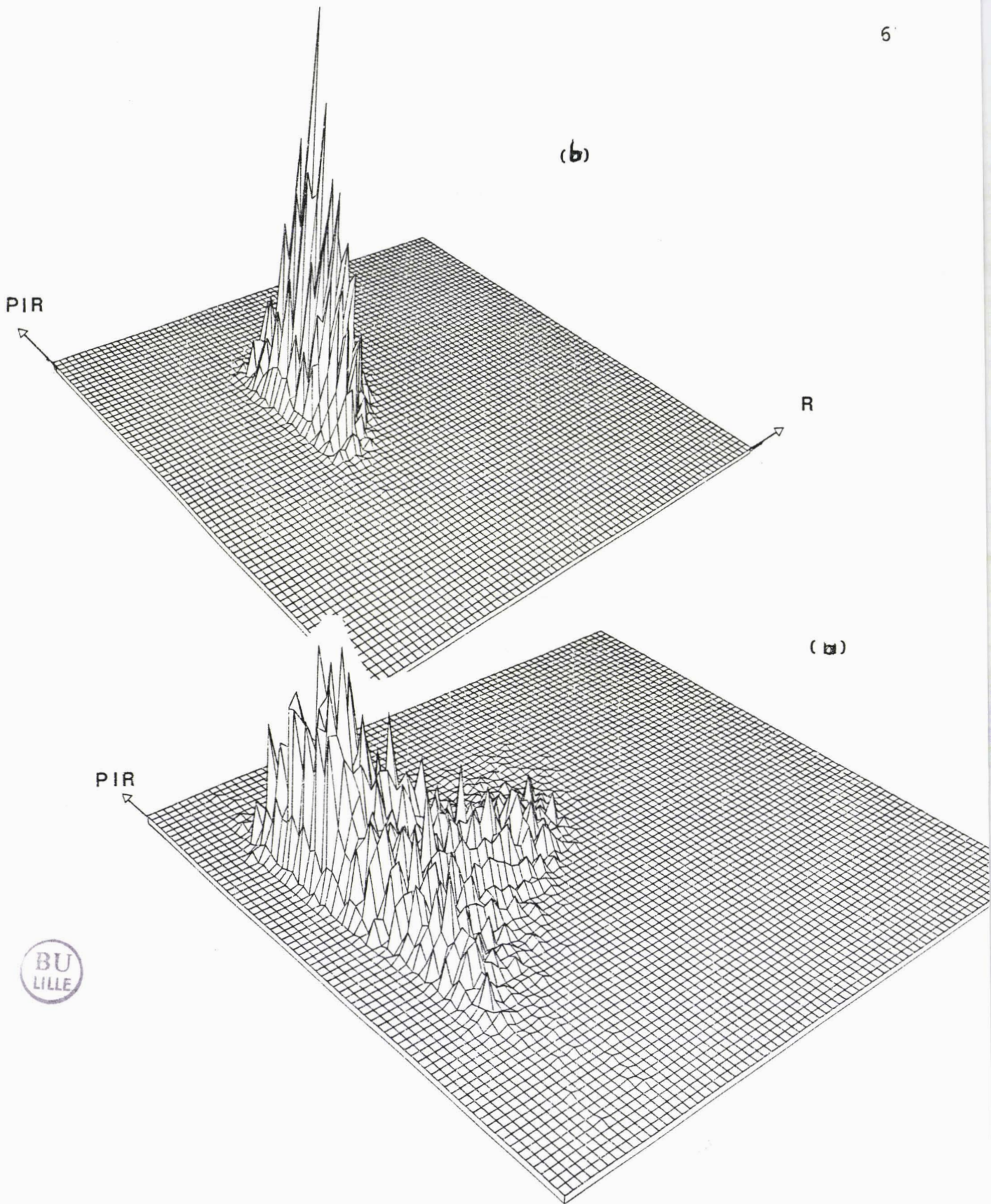


Figure IV-4 : Histogramme bidimensionnel pour le 12 Avril (a) et le 13 Avril (b) pour une zone de parcelle située dans la partie brumeuse (ligne 6 et colonne 1)

Dans ces deux cas nous constatons les mêmes tendances, ( translation des points et resserrement autour de la valeur moyenne ), mais pour le pavé situé dans le bas de l'image cette variation est beaucoup plus marquée. Nous passons en effet d'un maximum contenant 92 points pour la journée claire à un maximum de 294 points pour la journée brumeuse, soit 3 fois plus de points. Alors que pour le pavé situé dans le haut de l'image, nous passons de 316 points à 526 soit moins du double.

Il apparait clairement que pour que les deux images des 12 et 13 Avril 1976 soient exploitables nous devons faire une correction.

Notre correction consiste à estimer dans un premier temps les variations de la valeur moyenne ( ordonnée à l'origine ) et les modifications de l'écart-type ( variations de tau à partir de l'estimation des fonctions de structures FS2 ) puis nous appliquons le rapport de translation et de dilation sur l'histogramme. Les résultats numériques sont reportés dans le tableau ci-dessous. Nous avons considéré pour les zones claires et brumeuses, l'évolution de l'écart-type et de la moyenne à la longueur d'onde  $\lambda$ .

	$\Delta \tau$	$\sigma_{12}$	$\sigma_{13}$	$\sigma_{13}$ corrigé
zone claire	0.37	9	6	8.7
zone brumeuse	0.56	12	7	12.2

	$P_a$	$p_{-12}$	$p_{-13}$	$p_{-13}$ corrigé
zone claire	10	48	55	45
zone brumeuse	18	37	59	41

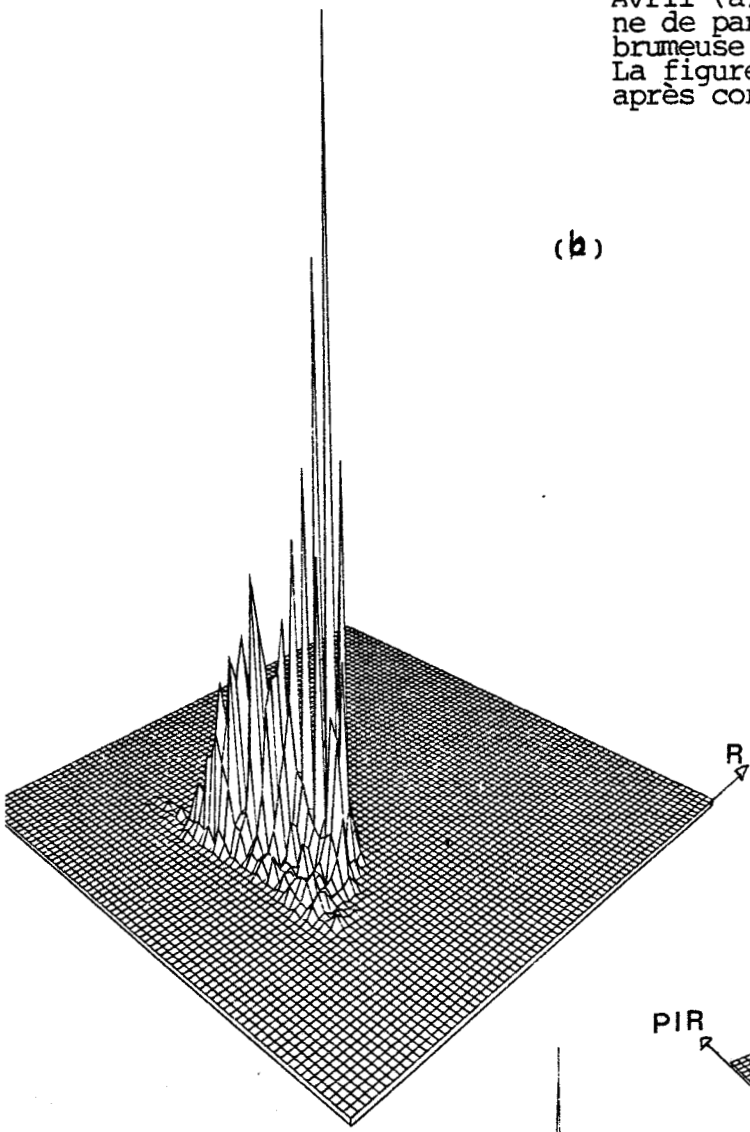
Sur la figure IV-6, nous avons tracé pour la zone brumeuse où les effets moindres, les histogrammes obtenus pour les 12 et 13 Avril 1976 ainsi que pour celui du 13 Avril après correction.

L'utilisation des histogrammes bidimensionnels peut dans certains cas mettre en évidence les effets atmosphérique ( translation, homotétie ). La correction effectuée à partir de l'ordonnée à l'origine bien qu'empirique permet si les variations de concentration ne sont pas importantes, de faire une première correction. La dispersion entre les classes est réduite, mais celles-ci restent identifiables.

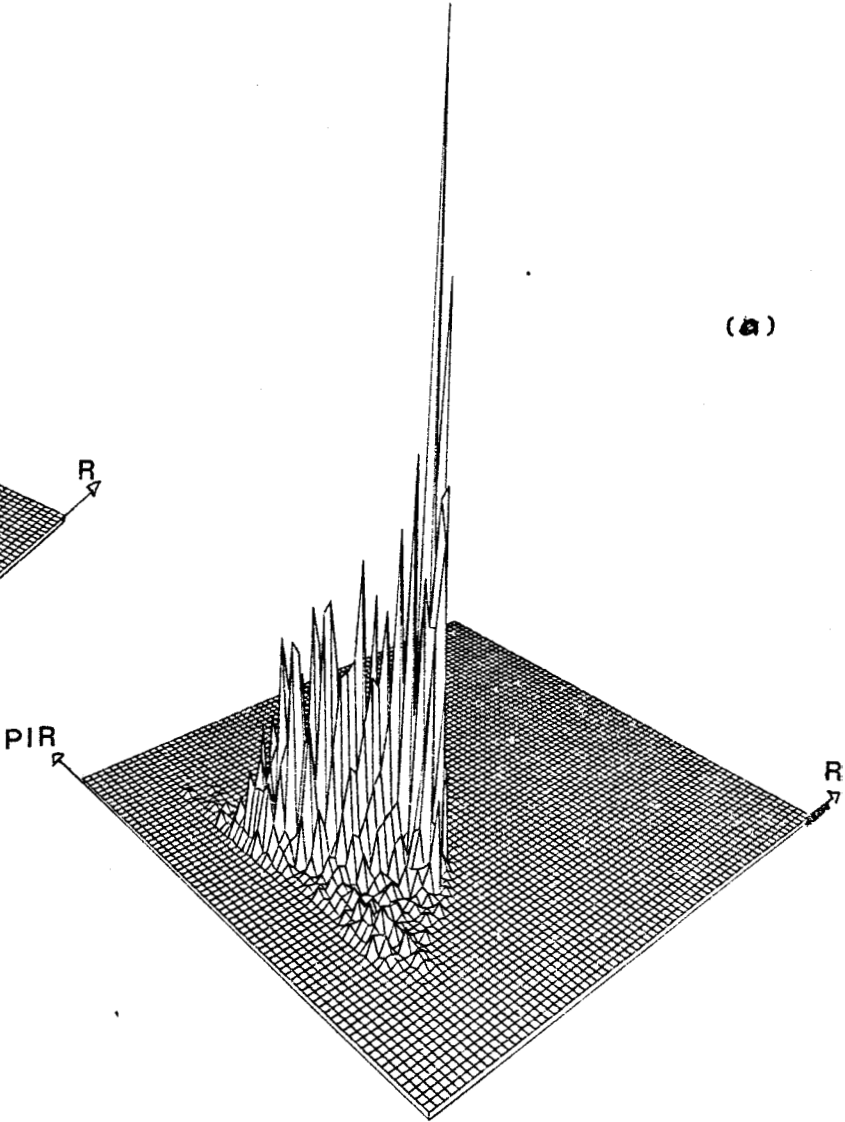
Figure IV-6 : Histogramme bidimensionnel pour le 12 Avril (a) et le 13 Avril (b) pour une zone de parcelle située dans la partie brumeuse (ligne 6 et colonne 1)  
La figure (c) représente l'histogramme après correction.

244

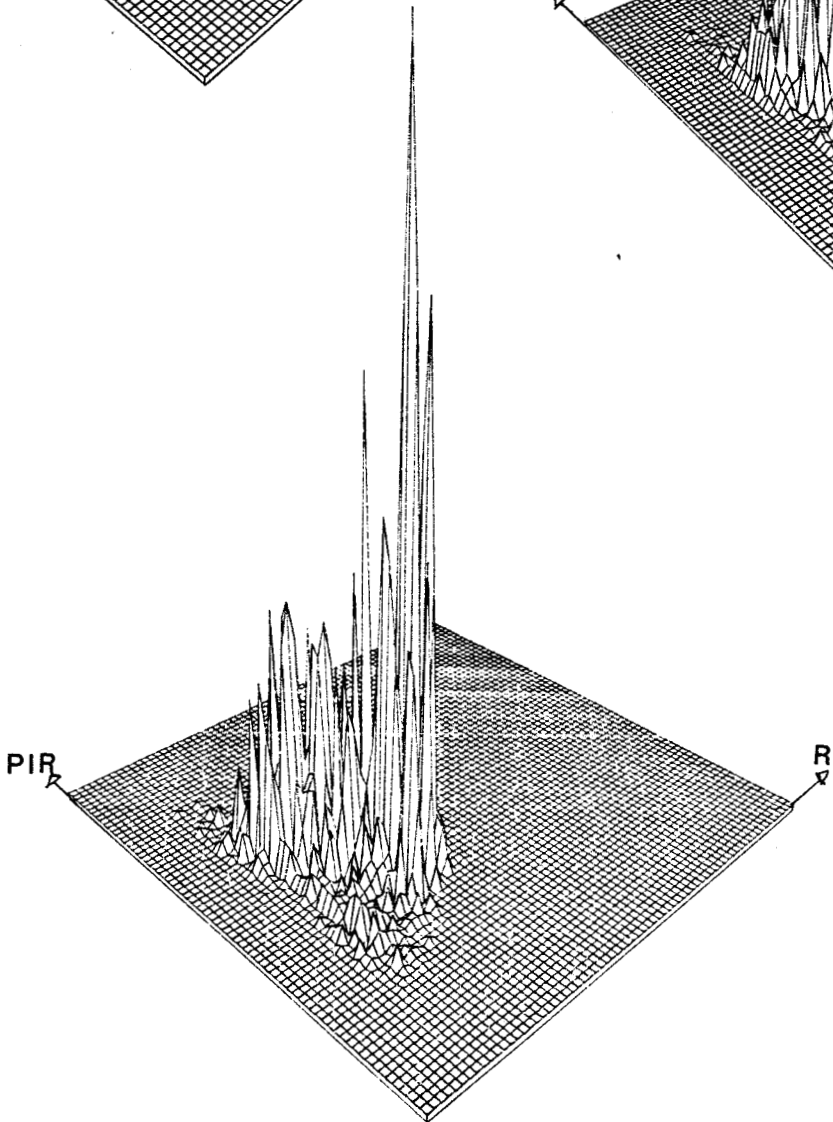
(b)



(a)



(c)



### IV 3 2 : Index de végétation:

---

En agriculture, les thématiciens utilisent une grandeur dérivée de la représentation graphique des histogrammes bidimensionnels et qui est appelé index de végétation. Il est défini dans notre cas comme le rapport de la différence de réflectance dans les canaux proche infra rouge et Rouge, sur la somme de ces deux mêmes canaux.

( pour Landsat on prend respectivement les canaux MSS7 et MSS5)

$$IVG = \frac{\rho_{MSS7} - \rho_{MSS5}}{\rho_{MSS7} + \rho_{MSS5}} \quad (IV-6)$$

Suivant la réponse du couvert végétal, cet index a une valeur diffé-

- les fortes valeurs de l'index comprises entre 1 et 0.3 correspondent à la végétation. Elle a une forte réponse dans le P.I.R. et une réponse faible dans le Rouge.
- les valeurs aux alentours de 0 , correspondent au sol nu. Les réflectances des sols nus dans le visible et le P.I.R. sont peu différentes .
- les valeurs proches de 0 et négatives de l'index sont représentatives de l'eau qui a une réflectance plus forte dans le visible que dans le P.I.R..

Au niveau du satellite, l'index de végétation s'écrit :

$$IVG^+ = \frac{\rho_{MSS7}^+ - \rho_{MSS5}^+}{\rho_{MSS7}^+ + \rho_{MSS5}^+} \quad (IV 7)$$

$$\text{où } \rho_{\lambda}^+ = \rho_{a\lambda} + \rho_{\lambda}^T$$

soit

$$IVG^+ = \frac{TMSS7 \rho_{MSS7} - (TMSS5 \rho_{MSS5} + \rho_a MSS5)}{TMSS7 \rho_{MSS7} + (TMSS5 \rho_{MSS5} + \rho_a MSS5)} \quad (IV-8)$$

Si on néglige la réflectance atmosphérique dans le proche infra rouge, hypothèse justifiée pour des conditions moyennes d'observations.



Nous avons repris les scènes des 12 et 13 avril et nous avons calculé les index de végétation (Figure IV-7). Pour le 12 avril nous avons des valeurs d'index comprises entre 0 et 0.33 et pour le 13 avril les index sont compris entre 0 et 0.6. Les valeurs des index de végétation sont moins étalées pour le 12 avril que pour le 13. Nous voyons apparaître plusieurs classes de points regroupés en fonction des paysages. Pour des index croissants nous retrouvons différents regroupements :

- l'eau : étangs, Loire, Cher
- les villes : Orléans, Blois, Romorentin
- les sols nus
- les forêts
- les cultures

Pour les deux dates nous constatons les mêmes regroupements.

Si nous passons maintenant à une comparaison multitemporelle, c'est-à-dire si nous comparons les images des index des 12 et 13 avril, traitées avec les mêmes seuils d'équipopulation, nous voyons que les entités eau, sol nu, végétation restent dans les deux cas identifiables, mais n'ont pas les mêmes valeurs numériques. Ceci est particulièrement sensible pour le coin inférieur gauche de l'image du 12 avril, où nous avons une saturation du signal.

En reprenant les deux pavés des 12 et 13 Avril ( zone claire et zone brumeuse), nous avons calculé les index de végétation sans correction et pour le 13 Avril après correction de la réflectance atmosphérique dans MSS5.

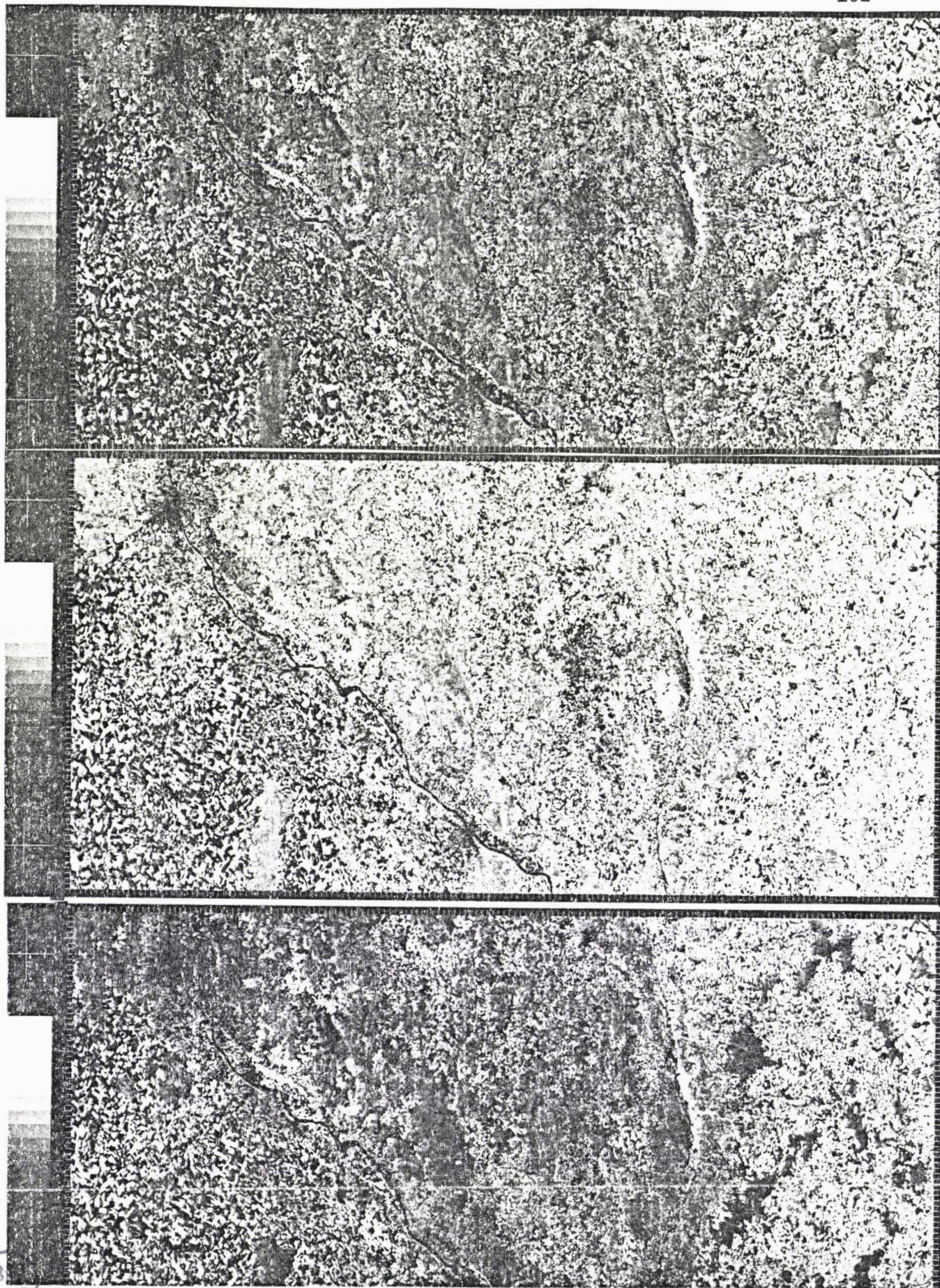


Figure IV-7 : Image des index de végétation pour le 13 Avril(a) et pour le 12 Avril(b) et pour le 12 Avril (c) avec adaptation de dynamique sur l'image. Les valeurs de l'index de végétation varient entre 0 et 0.33 pour le 13 Avril et 0,66 pour le 12 Avril.

	12 avril	13 avril	13 avril corr
L1 C1	0.22	0.16	0.25
L16 C1	0.39	0.20	0.37

Le fait de soustraire la réflectance atmosphérique dans le canal MSS5 nous permet d'avoir des index comparables pour les deux dates.

#### IV 3 4 Classification :

-----

Le classement sur les images est réalisé à partir d'une méthode de type supervisée. Cette méthode comprend plusieurs phases :

- initialisation des paramètres du traitement et détermination des zones d'entraînement .
- classement proprement dit en utilisant des critères de maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne .
- évaluation de classement.

Les zones d'entraînement doivent être choisies suffisamment grandes (nombre de points significatifs) et homogènes( répartition gaussiennes des classes) pour être représentatives.

Le classement est réalisé en utilisant la distance du maximum de vraisemblance. Lorsque l'on suppose une distribution gaussienne de la radiométrie, cette distance prend une forme relativement simple. On calcule la distance entre chaque pixel et toutes de la nomenclature. Le point est attribué à la classe pour laquelle la probabilité d'appartenance est maximale. Cependant la nomenclature n'est jamais exhaustive si l'on décide d'une attribution systématique de chaque pixel à une des classes de la nomenclature, on peut commettre des erreurs notables si les points sont marginaux par rapport à chacune des classes décrites. L'attribution se fait alors à partir des probabilités d'appartenance relativement faibles. Après classement, un filtrage est

réalisé sur l'image afin d'homogénéiser la représentation en prenant compte la notion de voisinage. Si le traitement améliore la lisibilité de l'image, il ne modifie que très peu le résultat du classement.

Nous avons à l'aide des images des 12 et 13 Avril 1976 analysé l'influence des perturbations atmosphériques sur les résultats de la classification. La méthode de classement utilisant les paramètres statistiques moyenne et écart-type, nous pouvions supposer des différences de classement liées au changement de conditions atmosphériques entre ces deux dates. Nous avons effectué une classification et donc déterminé 6 classes assez grossières mais représentatives de la région étudiée : 2 classes de forêts, l'eau, du sol nu, des cultures et la ville. Nous avons choisi pour chaque image des 12 et 13 Avril, les mêmes parcelles d'entraînement réparties de façon homogène sur l'image. Nous avons ensuite appliqué la règle de classement à toute l'image et les résultats des pourcentages des classes sont reportés dans le tableaux ci-dessous :

classe	12 AVRIL	13AVRIL
Forêt1	19,4%	5,6%
Forêt2	21,4%	9,6%
Eau	4,5%	12,3%
Sol nu	21,7%	13,9%
Culture	6,3%	38%
Ville	26,2%	20%

Nous constatons pour le 13 Avril une répartition nettement différente de celle du 12 Avril. La classe culture absorbe une grande partie des points de l'image. Cette migration peut s'expliquer par les arbres de divergence. En effet, les classes culture et Forêt 1 sont radiométriquement proches, ainsi que les classes Forêt 2 et eau. L'atmosphère qui a pour effet de réduire l'écart-type des différentes classes diminuera la séparabilité de classes voisines. Cependant les distances du type maximum de vraisemblance ne sont pas sensibles au changement d'échelle introduit par la réduction des covariances, la séparabilité entre classes et par la suite le classement ne sont pas affectés par ce phénomène. Le facteur d'échelle introduit par l'atmosphère ne doit donc pas être pénalisant lors d'une classification supervisée. En fait ce n'est pas la présence d'une forte concentration en aérosols qui va altérer notable-

ment la classification, mais surtout ce sera le manque d'homogénéité spatiale de la répartition des aérosols qui introduira, la modification la plus importante. Si la concentration en aérosols n'est pas homogène dans toute l'image, les radiométries d'un même type de couvert ne seront pas modifiées de la même façon dans toute l'image ( plus ou moins grande atténuation du signal suivant la concentration en aérosols). Les caractéristiques des différentes classes seront donc moins précises avec notamment une augmentation de la variance de chaque classe. On assistera alors à une migration d'un certain nombre de points radiométriquement proches les uns des autres et qui ainsi se retrouveront dans la même classe. Sur l'image IV-8 on note que le Parc de Ménars ( forme géométrique dans le 1/3 haut de l'image ) a changé de classe. La ville elle ne change pas d'affectation de classe.

En conclusion, nous avons donc montré que l'atmosphère peut amener une modification dans le classement. Cette modification n'est pas essentiellement due à la présence des aérosols mais surtout au manque d'homogénéité de leur répartition. Il est sur que si nous avions pris une zone homogène en concentration en aérosols les résultats de classement pour les 12 et 13 Avril aurait été moins perturbés.

#### IV 3 4 Choix de la meilleure acquisition :

---

Avant de décider de la mise en oeuvre d'une correction, il importe d'estimer les ordres de grandeur des paramètres atmosphériques observés et de sa variabilité. La méthode de correction étant encore d'être dans une configuration où la correction atmosphérique ne s'avère pas indispensable.

C'est donc au moment de la sélection des images qu'il faut respecter certains critères de sélection qui permettent ensuite de s'affranchir des corrections.

- critères classiques de sélection :

La procédure de travail normale est, après avoir sélectionné la zone ou nous voulons effectuer notre étude, de consulter le catalogue des images disponibles. Ce catalogue renferme une série de quick-look, images n'ayant subi aucun traitement spécifique si ce n'est une adapta-

tion de dynamique. Le problème de ces imageries est lié au fait que c'est toujours le canal du P.I.R. qui est disponible. Or nous avons vu que c'est dans ce canal que les effets de diffusion sont les plus faibles, et donc nous ne percevons pas les effets de diffusion qui pourtant existent parfois et entraînent par la suite des erreurs d'interprétation. ( cf images des 12 et 13 avril dans les canaux MSS4 et MSS7 )



CLASSIF. 12 AVRIL 1976



CLASSIF. 13 AVRIL 1976

Figure IV-8 : Classification supervisée pour les 12 Avril (a) et le 13 Avril (b). On a choisi les mêmes parcelles d'entraînement. On remarque que comme on pouvait s'y attendre les points situés dans la zone brumeuse (Bordeaux) sont mal classés. Bleu : villes et eau, Violet : forêts, Bordeaux, jaune, vert : cultures.

CONCLUSION



Nous avons dans ce mémoire, cherché à valider un modèle de transfert radiatif permettant de simuler l'effet des aérosols sur le signal à partir de satellite et à en dégager des méthodes de corrections, cela à l'aide de scènes acquises à une journée d'intervalle les 12 et 13 Avril 1976 sur la SOLOGNE .

Les deux principaux effets de l'atmosphère sur la radiométrie acquise par le satellite sont de provoquer une augmentation de la valeur moyenne du signal observé ( par la réflectance atmosphérique qui croit avec  $\tau$  ) et de diminuer l'écart-type des valeurs observées dans la scène( l'écart-type est atténué par un facteur en  $\exp(-\tau)$  ).

Nous avons vu que le principal paramètre optique nous permettant de faire une correction est l'épaisseur optique de l'atmosphère et surtout de l'épaisseur optique en aérosols qui est le terme le plus variable. Nous avons montré que des méthodes basées sur les variations des comptes numériques, de l'écart-type ou des fonctions de structures permettait d'estimer les variations de ce paramètre. Ces estimations de variations d'épaisseur optique en aérosols sont en bon accord avec celles obtenues à partir de mesures de visibilité.

Dans une deuxième partie nous avons proposé des algorithmes de corrections basées soit sur des mesures faites à partir du sol, soit sur des mesures faites à partir de satellites. Ensuite nous avons cherché à comprendre quel était l'impact de l'atmosphère sur des traitements classiques en Télédétection et qui sont les histogrammes bidimensionnels, les index de végétation et les classifications. La translation et l'homothétie observée pour les histogrammes du 13 avril 1976 (jour brumeux) s'expliquent par les variations de moyenne et d'écart-type dus à l'atmosphère. Pour les index de végétation nous avons constaté que le principal effet perturbateur était lié au terme de réflectance atmosphérique dans le canal visible. Enfin nous avons montré que pour les classifications, l'atmosphère provoque une migration des classes, cette migration toujours due aux variations de la moyenne et de l'écart-type.

Une suite envisageable à cette étude est de prendre en compte les effets d'absorption que nous avons négligé dans une première étape. Pour une extension des méthodes de corrections au futur satellite SPOT, il serait intéressant et nécessaire d'étudier les effets directionnels sur le signal satellitaire (dépointage latéral du satellite). Enfin la connaissance simultanée de l'épaisseur optique estimée à partir de satellites météorologiques serait des plus souhaitables.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M., TANRE, D., ROUQUET, M.C., DURPAIRE, J.P., 1982.  
"Effets atmosphériques et évaluation du signal pour des instruments optiques de télédétection" E.S.A J., 6, 233-246.
- (2) BEGNI, G., 1982.  
"Selection of the optimum spectral bands for the SPOT satellite" Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48, 1613-1620.
- (3) DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M., TANRE, D., 1983.  
"Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la terre entre 0.35 et 4 micromètres"  
Contrat ESA 4393/80/F/DD/SC.
- (4) TANRE D., HERMAN M., DESCHAMPS P.Y., DE LEFFE A., 1979.  
Atmospheric modeling for space measurements on ground reflectance, including bidirectional properties. Applied Optics, 18, 3587-3594.
- (5) BECKER, F., 1978.  
"Physique fondamentale de la télédétection" in Principes Physiques et Mathématiques de la Télédétection, Ecole d'été de physique spatiale du CNES, 1-107.
- (6) TANRE, D., HERMAN, M., DESCHAMPS, P.Y., DE LEFFE, A., 1979.  
"Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties" Appl.Opt., 18, 3587-3594.
- (7) TANRE, D., HERMAN, M., DESCHAMPS, P.Y., 1983.  
"Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties" Appl.Opt., 22, 733-741.
- (8) TANRE, D., HERMAN, M., DESCHAMPS, P.Y., 1981.  
"Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance" Appl.Opt., 20, 3676-3684.
- (9) DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M., TANRE, D., 1983.  
"Short communication. Definition of Atmospheric Radiance and Transmittance in Remote Sensing."  
Remote Sensing of Environment 43, 89-92.
- (10) LENOBLE, J., DESCHAMPS, P.Y., HERMAN, M., TANRE, D., 1981.  
"Correction of the atmospheric scattering effects on Remote Sensing of the ground albedo.
- (11) VIELLEFOSSE, M.  
Corrections Radiométriques des enregistrements multispectraux.  
GDFA.

- (12) ROCHON G., AHERN F.J., GOODENOUGH D.G., JAIN S.C., RAO V.R., 1977  
Les corrections atmosphériques des données Landsat au centre Canadien de Télédétection .  
4th Canadian Symposium on Remote Sensing of Environment", Quebec City  
May. 1977,
- (13) OTTERMAN, J., UNGAR, S., KAUFMAN, Y., PODOLAK, M., 1980.  
Atmospheric effects on Radiometric Imagery from Satellites under Low  
Optical Thickness Conditions.  
Remote Sensing of Environnement. 9, 115-129.
- (14) DANA, R.W., 1982.  
Background reflectance effects on Landsat Data.  
Applied Optics. 21, 15 November 1982.
- (15) TURNER R.E, SPENCER M.M., 1972.  
Atmosphere model for correction of spacecraft data in "Proceedings of the  
Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment",  
Ann Arbor, Michigan, USA, 2-6 octobre 72, 895-934.
- (16) PODAIRE, A., D'ARODES, M.C., SAINT, G., 1983.  
"Analyse des effets directionnels sur la végétation et les sols"  
Signature spectrale d'objets en télédétection. Colloque International de  
la Société Internationale de Photogrammétrie. Bordeaux ,12-16 septembre  
1983
- (17) SLATER, P.N., JACKSON, R.D., 1982.  
"Atmospheric effects on radiation reflected from soil and vegetation as  
measured by orbital sensors using various scanners directions.  
Applied Optics. 21, 1 November 1982.
- (18) SAINT, G., PODAIRE, A., ANGLADE, I., 1981.  
Simulation radiométrique de Spot. Résultats d'expérimentation sur la vé-  
gétation et le sol.
- (19) OTTERMAN, J., ROBINOVE, C.J., 1981.  
Effects of the atmosphere on the detection of surface changes from  
Landsat Multispectral Scanner Data.  
in Journal of Remote Sensing 1981, Vol 2 , N°4 351-360.
- (20) KAUFMAN, Y.J., FRASER, R.S., 1983.  
Different atmospheric effects in Remote Sensing of uniform and non uni-  
form surface.  
in Adv. Space.Res. Vol 2 N°5 pl47-155.

- (21) DESCHAMPS P.Y., HERMAN M., TANRE D., 1981.  
Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres. Modélisation et possibilités de correction. in "Signatures spectrales d'objets en télédétection", Colloque de la Société Internationale de Photogrammétrie et Télédétection, Avignon, France, 8-11 septembre 1981, 543-558.
- (22) OTTERMAN J., UNGAR S., KAUFMANY and PODOLAK, 1980.  
Atmosphere effects on radiometric imaging from satellites under Low Optical Thickness Conditions. Remote Sensing of Environment, 9, 115-129.
- (23) ROCHON G., AHERN F.J., GOODENOUGH D.G., JAIN S.C., RAO V.R., 1977  
Use of clear lakes as standard reflectors for atmosphere measurement in "Proceedings of the XIth International Symposium on Remote Sensing of Environment", Ann arbor, Michigan, USA, 25-29 aug. 1977, 731-755.
- (24) TANIS, F.J., JAIN, S.C., 1983.  
"Comparaison of atmospheric correction algorithms for the Coastal Zone Color Scanner."  
in Seventeenth International Symposium of Remote Sensing of Environnement Ann Arbor, Michigan, May 9-13, 1983.
- (25) FONTANEL, A., LALLEMAND, C., WADWORTH, A. , BLANC, G., 1978.  
"Corrections radiométriques des enregistrements Landsat en vue d'une comparaison chronoséquence.  
Photo-Interprétation. N°5 - Septembre-Octobre 1978
- (26) STOWE, L.C., 1977.  
The use of the AVHRR Measurement of Reflected Sunlight for Global Sensing in Aerosols Particles-Optical Thickness from Tiros-N Satellite.  
Conference on Sensing of The Environnement polluants.  
4<sup>th</sup> New Orleans 6-11 pl43-146.
- (27) ROBINOVE C.J., 1982.  
Computations with physical values from LANDSAT digital data.  
Photogrammetric Engineering, 48, 781-784
- (28) ROCHON, G., AUDIRAC, H., AHERN, F.J., BEAUBIEN, J. 1978.  
"Analysis of a transformation model of satellite radiance into reflectances.  
in "Proceedings of the XII<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing. Vol II 20-26 April 1978.



---

TITRE DE LA THESE : "Correction de l'influence de l'atmosphère sur les données acquises en télédétection des ressources terrestres".

---

RESUME :

On a analysé des scènes LANDSAT acquises à des dates différentes mais suffisamment proches dans le temps pour que les réflectances du sol puissent être considérées comme invariantes et que les changements puissent être attribués aux variations de l'atmosphère, en pratique des aérosols. Les changements observés sur la valeur moyenne et l'écart type des réflectances mesurées, sont analysés à l'aide d'un modèle théorique de transfert radiatif dans l'atmosphère, pour valider l'utilisation de ce modèle par comparaison aux observations in-situ faites sur les aérosols. On essaie finalement d'en déduire les conséquences en ce qui concerne les méthodes de correction des effets atmosphériques.

---

MOTS CLES

- Télédétection
- Diffusion
- Aérosols
- Correction atmosphériques
- Epaisseur optique