

Aec

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

.....
: DIPLOME D'INGENIEUR :
.....

- TELEDETECTION -

MESURE DE REFLECTIVITE BIDIRECTIONNELLE
ET DE TEMPERATURE DU SOL

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

PROPOSE PAR :

M^r A·ABDELLAOUI
D^r DE SPECIALITE

ETUDIE PAR :

M^r HARAUBIA BRAHIM
M^r ZIANI M^{ed} LAMINE

.....

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

.....
: DIPLOME D'INGENIEUR :
.....

-TELEDETECTION-
MESURE DE REFLECTIVITE BIDIRECTIONNELLE
ET DE TEMPERATURE DU SOL

PROPOSE PAR :

M^r A·ABDELLAOUI

D^r DE SPECIALITE

ETUDIE PAR :

M^r HARAUBIA BRAHIM

M^r ZIANI M^{ed} LAMINE

.....

JUIN · 1981

REMERCIEMENTS

Nous remercions :

*Mr A . Abdellaoui directeur du groupe de recherche
en télédetection d'Alger de nous avoir accueilli dans son
laboratoire et aidé à l'elaboration du présent travail*

Mr Halimi pour ses conseils et son aide matérielle

*Melles S.Baya , G.Bahia , S. Fatiha et M.Yasmina pour
leurs aides pratique et morale .*

// @ M M A I R E ---o o o o o---

I. T E L E D E T E C T I O N

A. Présentation de la Télédétection.....	2
A.1. Signification de la Télédétection	2
A.2. Composition d'un Système de Télédétection	2
A.3. Acquisition des données.....	3
A.4. Traitement des données	3
B. Rayonnement Electromagnétique	4
B.1. Introduction	4
B.2. Caractéristiques du rayonnement électromagnétique	5
B.3. Perturbation que subit un rayonnement électromagnétique	5
B.4. Exemple de Télédétection passive	6
C. Radiométrie et grandeurs énergétiques	8
C.1. Classification des grandeurs	8
C.1.1. Classification selon la distribution spatiale du rayonnement.....	8
C.1.2. Classification selon la distribution spectrale du rayonnement....	8
C.1.3. Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement	9
a- Flux total	9
b- Intensité	9
c- Emittance énergétique	9
d- Radiance énergétique	9
C.1.4. Loi de Lambert	10
C.1.5. Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement	10
a- Eclairement	10
b- Relation entre l'éclairement d'un récepteur et la luminance d'un émetteur	11

D. Réception du rayonnement par un corps	11
D.1. Lois du rayonnement	12
D.1.1. Corps noir	12
D.1.2. Loi de Planck	12
D.1.3. Loi de Wien	15
D.1.4. Loi de Stéphan Boltzman	15
D.2. Réflexion - Réflectivité	16
D.2.1. Introduction	16
D.2.2. Les divers types de réflexion	17
D.2.2.1. Etude de la réflexion de surface	17
D.2.2.1.1. Réflexion spéculaire	17
D.2.2.1.2. Réflexion diffuse	17
D.2.2.2. Réflectivité bidirectionnelle-spéculaire-spectrale	18
D.2.2.3. Réflectivité bidirectionnelle	18
D.2.2.4. Relation entre la réflectivité directionnelle et bidirectionnelle	19
D.2.3. Réflecteur Lambertien	19
D.2.4. Indicatrice de réflexion	19
<u>II. OPTOELECTRONIQUE</u>	20
A. Effets photo-électriques	20
A.1. Mécanisme de la photoconduction	21
A.2. Dispositifs photoélectriques	21
A.3. Photo-émetteurs	21
B. Dispositifs utilisés lors de la réalisation	21
B.1. Diode Electroluminescente (IED)	21
B.1.1. Caractéristiques de la diode électroluminescente	23
B.2. Photo récepteur	24
B.2.1. Cellule photoconductrice ou (photorésistance)	24
B.2.2. Caractérisation des photorécepteurs	25
B.2.3. Propriétés et caractéristiques de la photorésistance	25

C. Grandeurs énergétiques et lumineuses	26
<u>III. CHAÎNE DE MESURE DE LA REFLECTIVITE</u>	28
A. Schéma synoptique	20
B. Emetteur - Récepteur	30
C. Présentation de la chaîne de mesure	31
D. Optique de collection	34
E. Calcul de l'I.F.O.V.	35
<u>IV. MESURE DE LA REFLECTANCE BIDIRECTIONNELLES DES SURFACES NATURELLES</u> ...	36
A. Réflectance bidirectionnelle de la surface	36
B. Développement d'un modèle de mesure pour une surface contrôlable	38
B.1. Réponse à la sortie du système détecteur	40
B.2. Calcul de $I(\beta)$	42
B.3. Calcul de $E_d I(q, \psi)$	43
B.	
B.4. Mesure de la réflectivité bidirectionnelle	51
B.4.1. Vérification du caractère Lambertien d'une surface de bois et de détermination de la fonction d'appareil	51
B.4.2. Indicatrice de réflexion d'une surface quelconque	52
<u>V. MESURE DE TEMPERATURE</u>	52
A. Position du Problème	52
B. Montage pratique	53
B.1. Détecteurs de température	54
B.1.1. Caractéristique résistance-température	54
B.2. Caractéristique tension courant	55
B.3. Etalonnage	55
Courbes Température dans le sol	56
- Courbes théoriques	56
- Courbes Expérimentales	57

INTRODUCTION

La naissance de la Télédetection se base sur le fait que l'homme avait senti la nécessité d'avoir un champ de vision étendu du milieu qui l'entoure, l'apparition de la photographie, en apport avec la construction de ballons, d'avions et de satellites permirent un développement considérable au domaine de la reconnaissance par vols aériens qui révélèrent une multitude d'informations (notamment sur la surface terrestre) jusqu'ici insoupçonnées.

Pour accéder à ces informations et connaître la terre, arriver à gérer ses ressources et ses aménagements les chercheurs étaient obligés d'avoir recours à l'utilisation d'outils performants de détection, technique d'analyse à distance, d'enregistrement et de traitement des rayonnements émis ou réfléchis par la surface terrestre.

Dans ce travail on a recherché surtout à établir une corrélation entre le rayonnement réfléchi par une surface et la nature de celle-ci par la réalisation d'une chaîne de mesure assurant une émission de rayonnement qui va frapper une surface rugueuse .

Ce rayonnement va être réfléchi par cette surface et récupéré en partie par notre détecteur (récepteur) nous permettant ainsi de déduire la réflectivité bidirectionnelle pour un angle d'émission et de réception (qui sera variable) donné.

Parmi les paramètres de l'équation du Bilan Energétique figure la température du sol. Pour la déterminer nous avons réalisé une sonde de mesure. Nous facilitons ainsi la résolution de l'équation.

I. TELEDETECTION

A. Présentation de la Télédétection

A.1. Signification de la Télédétection

La Télédétection désigne tout système ou processus permettant d'acquérir des informations à distance, c'est-à-dire sans qu'il y ait, contact entre l'appareil de mesure (capteur) et l'objet étudié. La Télédétection est basée sur le principe que chaque objet absorbe, émet, diffuse et réfléchit des rayonnements qui lui sont propres et que l'on peut enregistrer et analyser.

Elle consiste précisément en :

- L'acquisition d'informations se présentant sous forme de rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets au sol.
- Un traitement de ces données permettant leur restitution et leur transformation en une forme assimilable par l'interprète.
- Un ensemble de méthodes d'interprétation.

A.2. Composition d'un système de Télédétection

Un système de Télédétection comprend :

- Une zone émettant un certain rayonnement (exemple : soleil)
- Un milieu de propagation (air)
- Une plate forme d'observation (capteur)
- Un système de transmission par télémesure
- Un système d'enregistrement
- Un centre de recueil des données et de prétraitement
- Des centres d'interprétation dont le but est d'établir une corrélation entre le rayonnement mesuré et la nature des objets au sol.

A.3. Acquisition des données

Les expériences ont montré que les objets au sol ont des comportements spécifiques dans les différentes longueurs d'ondes, en fonction de leurs propriétés physiques, chimiques et morphologiques.

La réalisation de capteurs et la mise au point d'une méthodologie, ont permis d'appréhender les objets au sol et de les discriminer :

- Etude des caractéristiques des ondes électromagnétiques réfléchies ou émises par les objets.
- Réalisation de saisie des données sur la surface terrestre et l'atmosphère
- Etude de l'interaction rayonnement-matière.

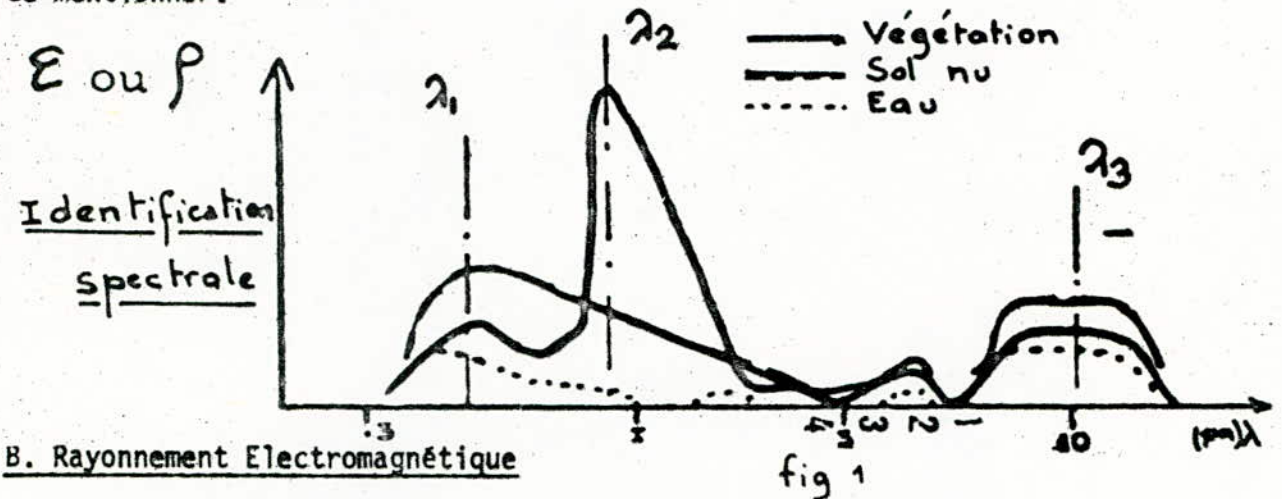
A.4. Traitement des données

Les objets au sol peuvent être distingués de plusieurs façons :

- Par leur couleur (c'est-à-dire par leur réponse spectrale) Exemple : sur une image satellite des points ayant le même ton de gris peuvent désigner des objets identiques.
- Par leur forme ou répartition spatiale : deux objets de nature différentes peuvent avoir la même couleur c'est-à-dire la même réponse spectrale, leur forme propre peut alors les distinguer.
- Par les variations temporelles : deux couverts végétaux différents peuvent avoir à une époque donnée la même signature spectrale, la forme ne permet pas dans ce cas de distinguer les deux objets, toutefois l'observation de ces deux couverts à deux époques différentes apportera des informations supplémentaires pour les distinguer.

- Par le type de réflexion : permet par exemple de classer des sols (ou objets étudiés) par leur rugosité.

Le but des traitements de données en Télédétection est de classer les objets en ensemble homogène suivant l'un (ou plusieurs) des critères que nous venons de mentionner.



B.1. Introduction

La matière émet des ondes électromagnétiques sous l'effet de diverses excitations. On donne l'appellation de rayonnement l'ensemble des échanges d'énergies à distances entre les corps par ondes électromagnétiques.

Les échanges peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu présentant une transparence suffisante pour les ondes électromagnétiques. Le rayonnement se manifeste sous divers aspects :

- Basses fréquences
- Ondes téléphone
- Ondes radio
- Micro ondes
- Infra rouge
- Visible
- Ultra violet
- Rayon x et gamma γ

- Rayon cosmiques

On s'intéressera en particulier au spectre visible qui fera l'objet de notre étude.

B.2. Caractéristiques du rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique, véhicule de l'information, se caractérise par :

- Sa direction de propagation
- Son intensité dans chaque bande spectrale : (l'énergie rayonnée par le soleil est répartie dans tout le spectre électromagnétique dont la moitié se trouve dans le spectre visible.
- Sa polarisation
- Sa phase

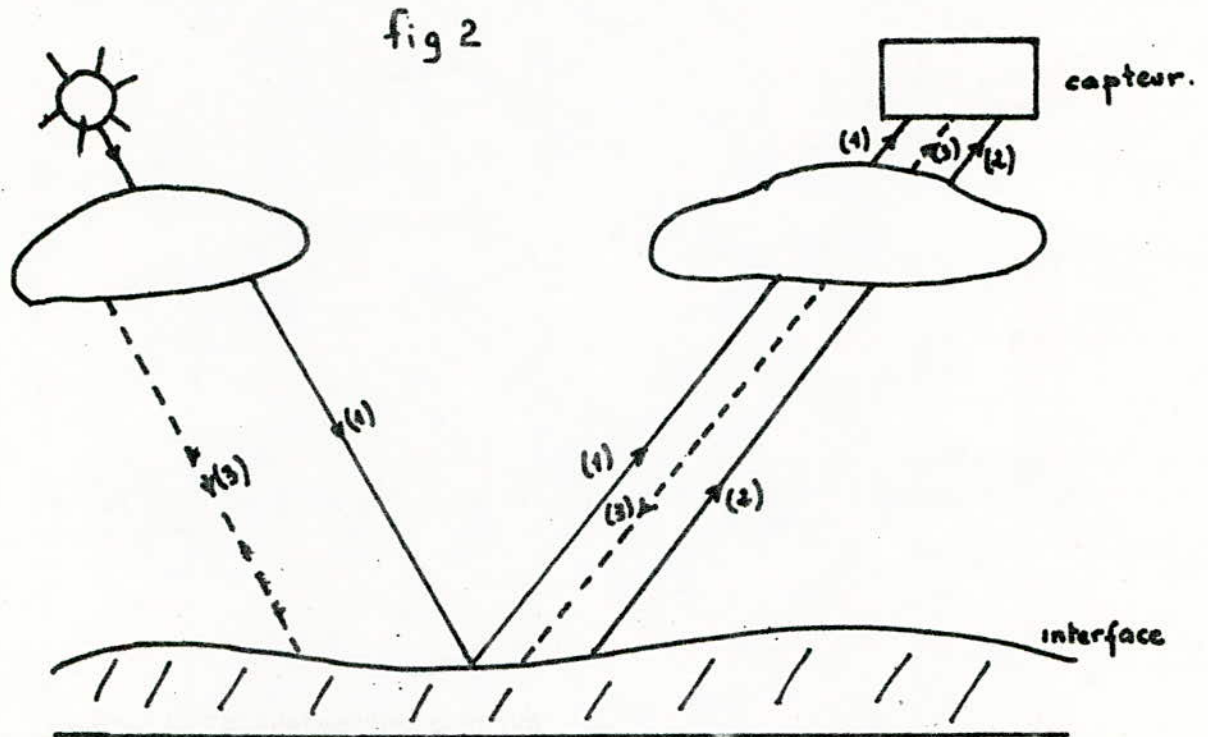
B.3. Perturbation que subit un rayonnement électromagnétique

La propagation d'un rayonnement électromagnétique dans tout autre milieu que le vide subit des perturbations dues à l'absorption, à la diffusion (diffraction), l'émission propre du milieu et la refraction, les principales causes des altérations subies par un rayonnement électromagnétique sont dues aux effets atmosphériques. On note parmi ces effets :

- L'absorption atmosphérique
- La diffraction atmosphérique
- La diffraction de Rayleigh
- La diffraction de Selective

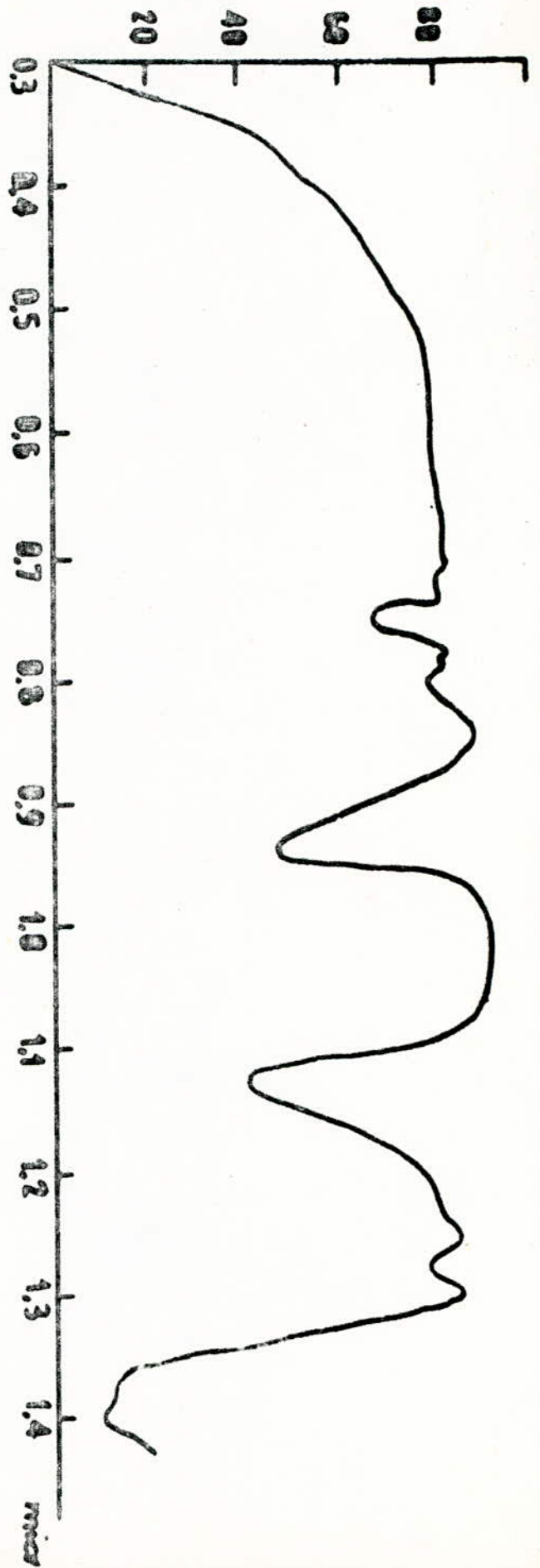
B.4. Exemple de Télédétection passive

La Télédétection passive utilise comme source rayonnante une source naturelle : le soleil



- (1) Rayonnement électromagnétique issu du soleil réfléchi par la surface, absorbé et diffusé en partie dans l'atmosphère et capté par le détecteur (courtes longueurs d'ondes)
- (2) Rayonnement électromagnétique directement émis par la surface absorbé en partie par l'atmosphère et capté par le détecteur (longueurs d'ondes assez grandes)
- (3) a- Rayonnement électromagnétique émis par l'atmosphère par diffusion du rayonnement électromagnétique (1) (courtes longueurs, d'ondes)
b- Ou par émission propre (grandes longueurs d'ondes) renvoyées dans le sol et dans le détecteur — l'explication du comportement de l'atmosphère est donnée par la courbe de transmittance de celui-ci.

TRANSMISSION DE L'ATMOSPHERE CLAIRE DANS LE VISIBLE ET LE PROCHE IR



7

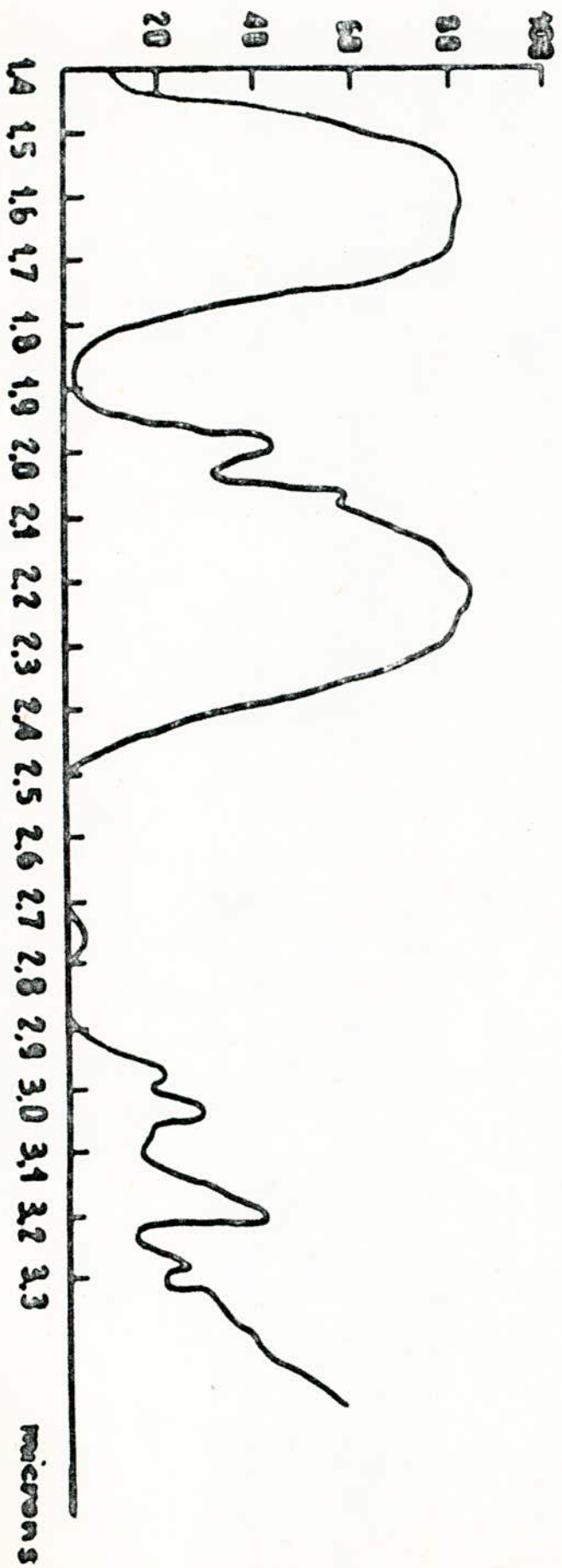


fig 3

C. Radiométrie et grandeurs énergétiques

Avant de passer à la définition de la quantité à mesurer on va d'abord parler de la nature de la lumière, expliquer la terminologie et définir les grandeurs et les unités qui permettent la mesure de la réflectivité.

Nature de la lumière : il s'agit de radiations électromagnétiques dont les fréquences correspondent au spectre visible.

C.1. Classification des grandeurs

Les grandeurs physiques utilisées seront classées selon deux (2) critères indépendants :

- La composition spectrale
- La distribution spatiale (directionnelle) du rayonnement

C.1.1. Classification selon la distribution spatiale du rayonnement :

Les grandeurs sont dites hémisphériques lorsqu'elles concernent l'ensemble des directions.

Les grandeurs sont dites directionnelles lorsqu'elles caractérisent une direction donnée de propagation du rayonnement

C.1.2. Classification selon la composition spectrale du rayonnement composition :

Ce sont des grandeurs relatives à un interval spectral étroit $d\lambda$ centré autour d'une longueur d'onde, λ

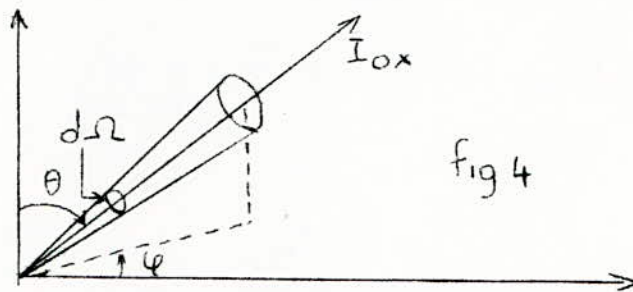
Les grandeurs relatives à l'ensemble du spectre sont appelées grandeurs totales.

C.1.3. Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement

a- Flux total : désigne la puissance rayonnée par une source dans tout l'espace où elle peut rayonner : ce flux est noté ϕ et exprimé en Watts.

b- Intensité (totale) : d'une source dans une direction donnée. On considère une direction OX issue de la surface d'un corps radiant. Cette direction est repérée par son angle θ avec la normale et au besoin un azimut φ . Si $d\phi_{ox}$ est la portion de flux rayonné dans un angle solide $d\Omega$ entourant la direction OX, le flux par unité d'angle solide dans cette direction.

$$I_{ox} = \frac{d\phi_{ox}}{d\Omega} \quad \text{unité W/Sr} \quad 1-1$$



c- Émittance énergétique : soit une source constituée par une surface rayonnante, l'émittance énergétique est le flux rayonné par un élément de surface dans l'ensemble des directions où il peut rayonner : hémisphère limitée par le plan tangent à l'élément ds en son centre.

$$M = \frac{d\phi}{ds} \quad 1-2$$

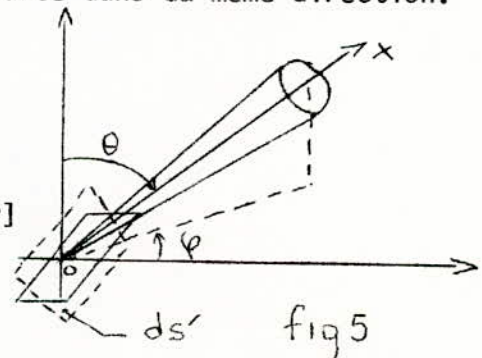
d- Radiance énergétique, luminance, ou brillance dans une direction donnée: on définit la luminance d'une source d'aire ds dans la direction ox comme l'intensité de la source dans cette direction dI_{ox} divisée par l'aire apparente ds' de cette source dans la même direction.

$$L_{ox} = \frac{dI_{ox}}{ds'} \quad ds' = ds \cos\theta$$

$$I_{ox} = \frac{d\phi_{ox}}{d\Omega}$$

$$1) L = \frac{d^2\phi}{d\Omega ds \cos\theta} = R \quad [L \text{ en } W/m^2 \cdot sr]$$

g 1-3



C.1.4. Loi de Lambert : Les sources dont la luminance est indépendante de la direction sont dites obéir à la loi de Lambert ou Lambertienne. Pour une source obéissante à la loi de Lambert on aura :

$$M = \pi L \quad \begin{array}{l} L : \text{luminance} \\ M : \text{émittance} \end{array}$$

Flux énergétique, Intensité et émittance énergétique etc... spectraux
Toutes les grandeurs introduites précédemment concernent le rayonnement total. On peut définir également ces grandeurs dans un domaine spectral étroit de largeur $d\lambda$ centré sur une longueur d'onde λ

1°- Flux énergétique spectral

$$\phi_\lambda = \left(\frac{d\phi}{d\lambda} \right)_\lambda \quad \text{Unité en W/m}$$

2°- de même pour toute autre grandeur G totale

$$G_\lambda = \left(\frac{dG}{d\lambda} \right)_\lambda \quad G = \int_0^\infty G_\lambda d\lambda \quad \begin{array}{l} G_\lambda : G_{\text{deur}}^{\text{spectrale}} \\ G : G_{\text{deur}}^{\text{Totale}} \end{array}$$

C.1.5. Grandeurs relatives aux surfaces révant un rayonnement :

La notion de flux, d'intensité et de luminance s'applique aussi bien au rayonnement incident qu'au rayonnement émis.

La notion d'émittance est remplacée par éclairement de la surface réceptrice dans le cas d'un rayonnement incident.

a- Eclairement E : désigne le flux reçu par unité de surface réceptrice.

Si ds' est l'aire qui reçoit un flux : $d\phi$

$$E = \frac{d\phi}{ds'} \quad [W/m^2] \quad 1-5$$

b- Relation entre l'eclairement d'un recepteur et la luminance d'un emetteur

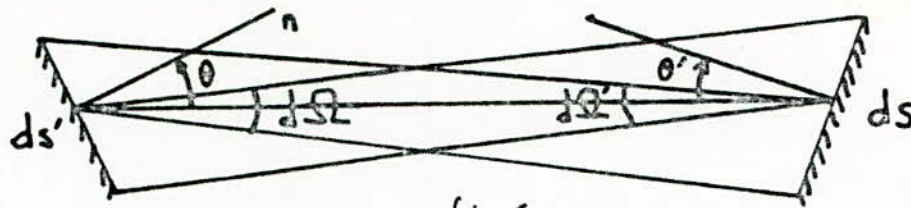


fig 6

Le flux emis par une surface ds en direction d'une surface receptrice ds'

$$d^2\phi = L ds \cos\theta d\Omega$$

$$d\Omega = \frac{ds' \cos\theta'}{D^2}$$

$$d^2\phi = \frac{L \cos\theta \cos\theta' ds ds'}{D^2}$$

L'eclairement de ds' sera:

$$dE = d\left(\frac{d\phi}{ds'}\right) = L \frac{\cos\theta \cos\theta'}{D^2} \cdot ds \quad 1-6$$

D. Reception du rayonnement par un corps

Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps une fraction de la puissance totale incidente est reflechie c'est à dire renvoyée sans avoir pénétrée dans la materiau.

Une autre partie ou fraction est absorbée par ce corps, constituant ainsi un apport d'energie pour ce dernier, une autre fraction peut etre transmise.

La figure ci-dessous schematise ce partage:

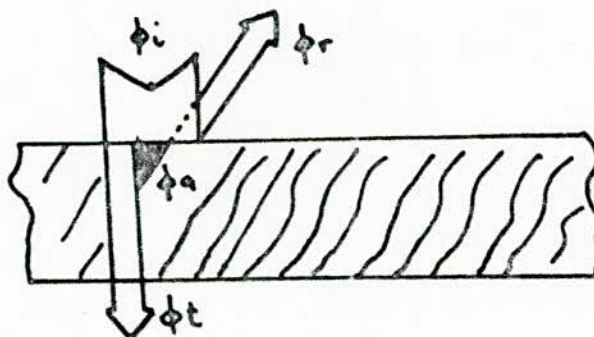


fig 7

$\phi_i, \phi_a, \phi_r, \phi_t$ sont respectivement les flux d'énergies incidents, absorbés, réfléchis et transmis.

On désigne sous le nom de :

- Absorptivité, la quantité : $\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$

- Réflectivité, la quantité : $\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$

- Transmittivité, la quantité : $\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$

$$\Rightarrow \boxed{\alpha + \rho + \tau = 1} \quad 1-7$$

Ces paramètres caractérisent de manière globale le comportement d'un corps vis-à-vis du rayonnement qu'il reçoit, ce sont des grandeurs totales hémisphériques.

D.1. Lois du Rayonnement

D.1.1. Le corps noir

Les substances naturelles rayonnent selon des lois différentes. L'émetteur idéal qui rayonne de l'énergie est le corps noir, il sert d'étalon de rayonnement.

Par définition le corps noir possède un coefficient d'absorption égal à l'unité : $\alpha = 1$ ($\rho = \tau = 0$)

Dans tout ce qui suit les grandeurs relatives au corps noir seront affectées d'un indice supérieur "0"

D.1.2. Loi de Planck

Cette loi relie l'émittance spectrale du corps noir M^0 à la longueur d'onde et à la température absolue T elle s'exprime sous la forme :

$$\boxed{M^0 = \frac{2\pi C^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1}}$$

- 1-7'

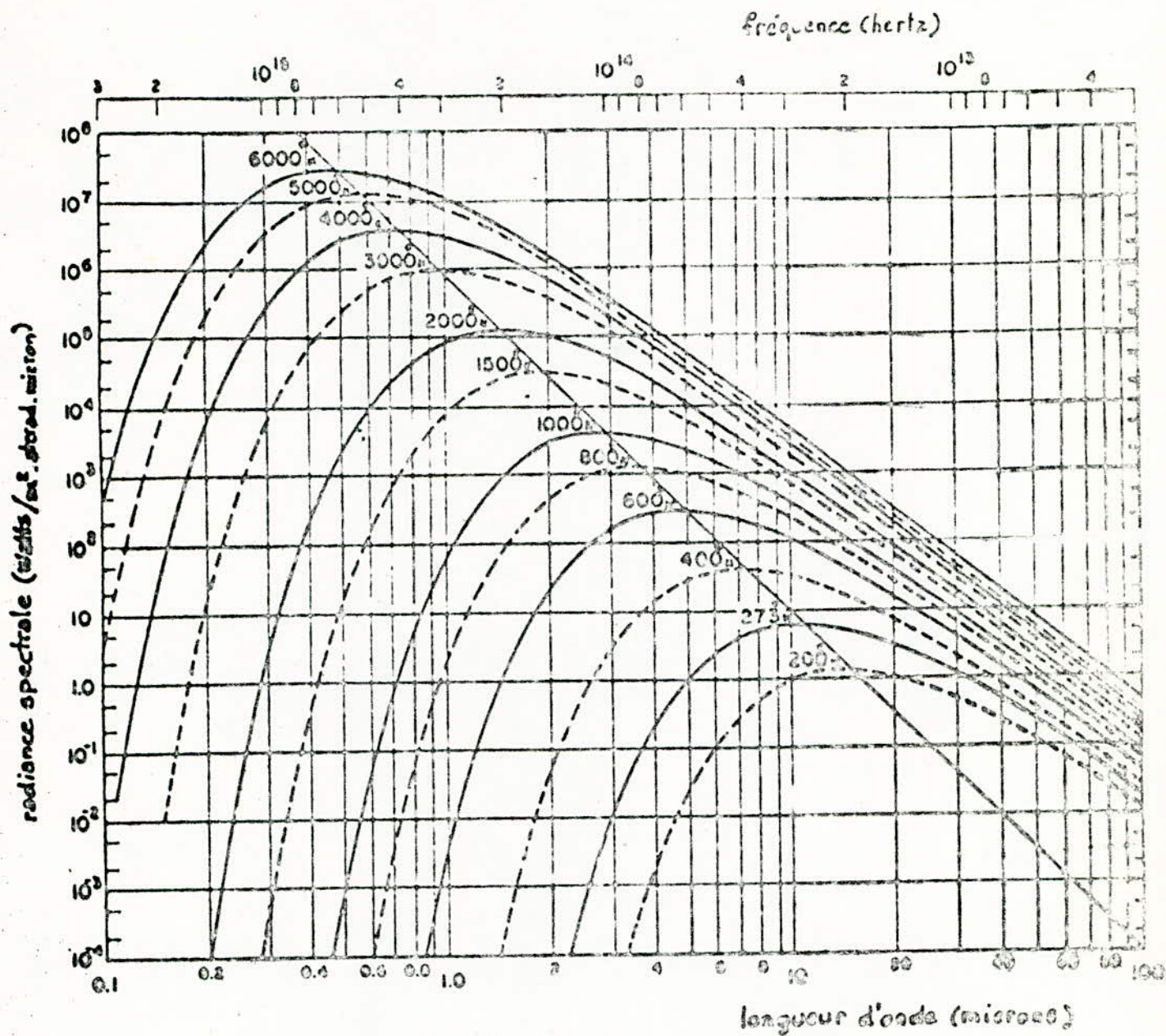


fig 8

Radiance spectrale du corps noir à diverses températures ; la droite des maxima représente la loi de Wien (Handbook of Geophysics)

C = vitesse des ondes électromagnétique dans le milieu où se propage le rayonnement ($C = c/n$) n: indice de réfraction du milieu

$$C_0 = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = \text{Constante de Planck } h = 6,6255 \cdot 10^{-34} \text{ j}$$

$$k = \text{Constante de Boltzman } k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ j/K}$$

Si le rayonnement se propage dans l'air (ou vide), l'indice de réfraction $n=1$, la loi de Planck s'écrit sous la forme suivante:

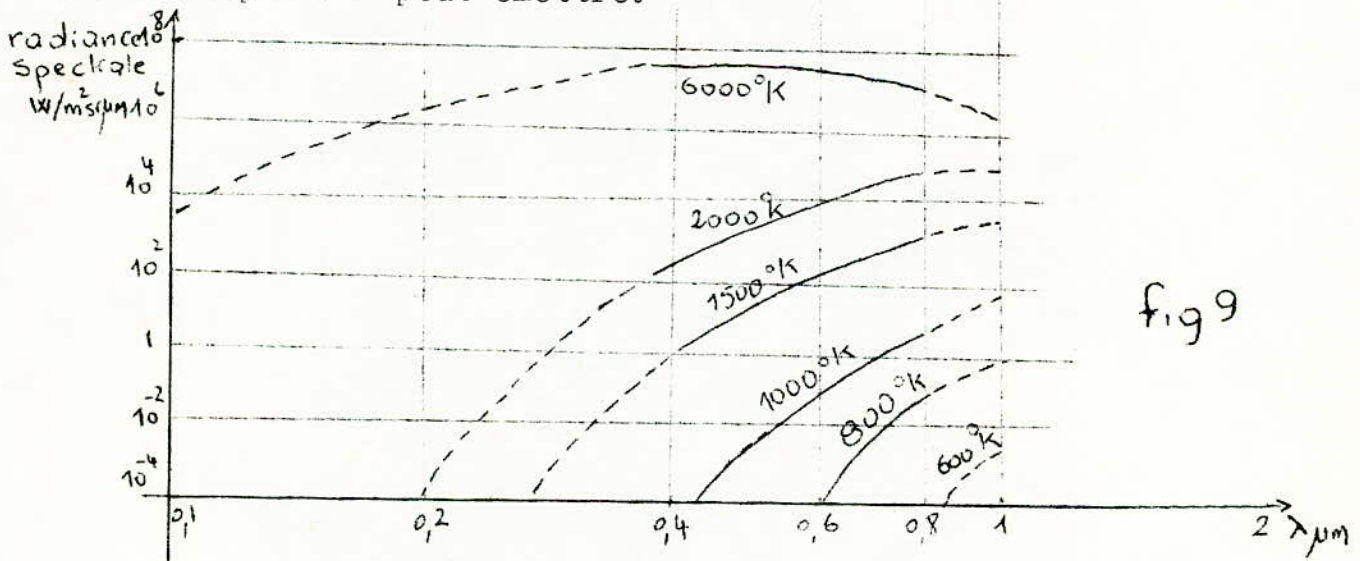
$$M_\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad \lambda - 9$$

$$\text{avec } C_1 = 3,741 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Représentation de la loi de Planck

- fig (9) dans la partie du spectre visible
- fig (8) dans toute la partie du spectre électromagnétique où le corps noir peut émettre.



Approximation de la loi de PLANCK

L'expression de la loi de Planck admet des approximations simplificatrices en particulier pour le cas qu'on a à étudier: (visible).

La formule approchée a pour expression :

$$M^\circ = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad \text{dite formule de Wien} \quad \Lambda-10$$

Domaine de validité de cette approximation : $\lambda T \ll 14000$

D.1.3. Loi de Wien

Deux lois fournissent respectivement l'abscisse du maximum d'émittance spectrale du corps noir pour chaque température.

1ère loi de Wien :

Valeur de λ_{mT} , abscisse du maximum de M°

$$\lambda_{mT} = 2898 \mu\text{mk} \quad \Lambda-11$$

Cette formule est obtenue à partir de $\left. \frac{dM^\circ}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_{max}} = 0$

2ème loi de Wien :

Donne la valeur de l'ordonnée $M^\circ(\lambda_m)$ du maximum d'émittance spectrale du corps noir pour $\lambda = \lambda_m$ par un calcul simple on arrive à :

$$M^\circ \lambda_m = AT^5 \quad A = 1,287 \cdot 10^{-11} \text{ W/(m}^2 \mu\text{mk}^5) \quad \Lambda-12$$

D.1.4. Loi de Stephan Boltzman

$$1.13 \quad M^\circ = \int_0^\infty M^\circ d\lambda \quad M^\circ = \sigma T^4 \text{ avec } \sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{K^4}{c_0^2 \lambda^3}$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ (S.I.)}$$

σ = Constante de Boltzman

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de sa température.

D.2. Réflexion - Réflectivité

D.2.1. Introduction

Un corps absorbe, transmet et réfléchit le rayonnement électromagnétique selon un mode propre.

Le but de notre travail est de déterminer la nature d'une surface, d'une végétation ou d'un corps quelconque en mesurant son pouvoir de réflexion c'est-à-dire sa réflectivité.

En plus de la réflexion des corps, nous devons considérer leur émission propre.

Un corps n'émet de l'énergie que quand il a un pouvoir d'absorption. On définit alors l'émissivité des corps réels en fonction de celle du corps noir.

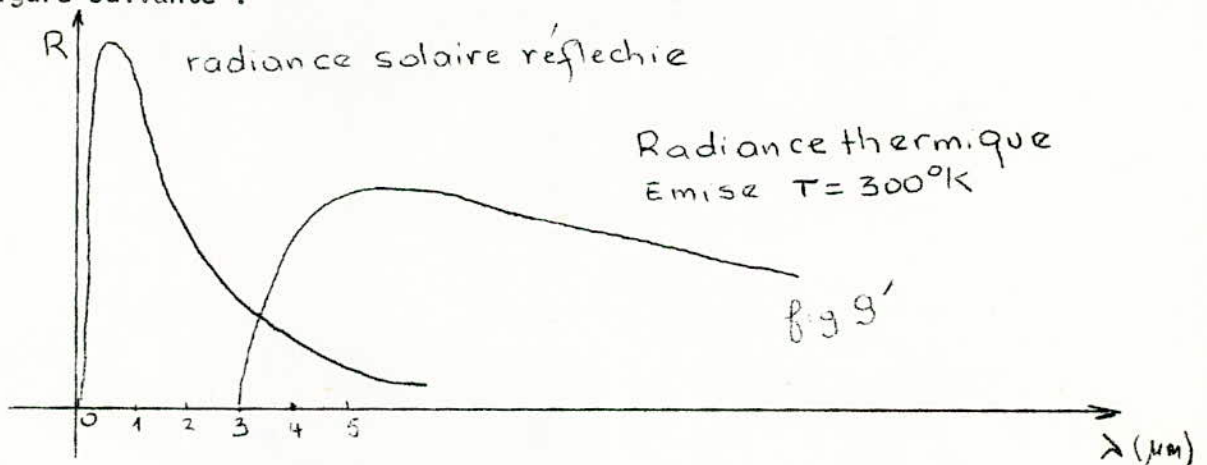
Si $R(\theta, \varphi)$ est la radiance d'un corps à la température T et $R_0(\theta, \varphi)$ la radiance du corps noir à la même température, alors $R(\theta, \varphi)$ est définie par la relation :

$$R(\theta, \varphi) = \epsilon_{\lambda} R_0(\theta, \varphi)$$

ϵ_{λ} = émissivité spectrale du corps.

ϵ_{λ} = émissivité spectrale du corps A
Si nous considérons la surface terrestre comme un corps ^{noir} à la température moyenne de 300 K, nous constatons qu'elle commence à émettre à partir de la longueur d'onde = $3 \mu\text{m}$. Son émissivité est ainsi négligeable dans la partie visible ($0,4 - 0,8 \mu\text{m}$) du spectre électromagnétique comme cela est montré

sur la Figure suivante :



Nous pouvons ainsi nous limiter à la mesure du flux d'énergie réfléchi.

D.2.2. Les divers types de réflexion

Si nous considérons un rayonnement se propageant d'un milieu d'indice n_i vers un milieu d'indice n_t séparés par une surface S et n_i est très différent de n_t nous savons qu'il y a réflexion à la surface S dépendant de :

- la transparence
- L'homogénéité du milieu (t) : (dimension des particules comparées à la longueur d'onde).
- La rugosité de la surface de séparation (dimension des irrégularités comparées à la longueur d'onde).

On distingue deux (2) types de réflexion :

- La réflexion de surface dont il sera question dans la suite de notre étude.
- La réflexion de volume qui intervient lorsque l'onde peut pénétrer dans le milieu (t).

D.2.2.1. Etude de la réflexion de surface

Elle se décompose en deux réflexions de nature différentes :

- la réflexion spéculaire (directionnelle)
- la réflexion diffuse (bidirectionnelle)

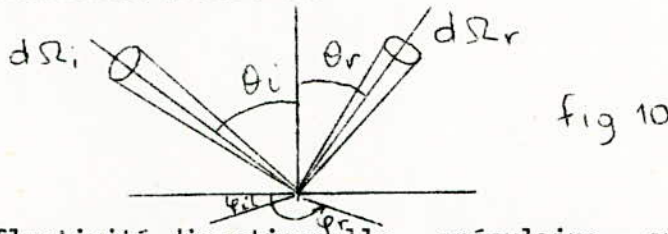
D.2.2.1.1. Réflexion spéculaire : Toute réflexion sur une surface quelconque pourra être localement (au point d'incidence) considérée comme spéculaire. De même, les surfaces parfaitement lisses, polies ont une réflexion spéculaire.

D'après la loi de Descartes : le rayons réfléchi se trouve dans le plan d'incidence et l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

A cette réflexion, nous associons le coefficient de réflectivité spéculaire.

D.2.2.1.2. Réflexion diffuse : Soit un élément $d\Sigma$ d'une surface rugueuse éclairée par une source de luminiecence L_i , si l'élément $d\Sigma$ est vu de la source suivant l'angle solide $d\Omega_i$ dans la direction définie par (θ_i, φ_i) ,

il réfléchit un rayonnement dans toutes les directions par le jeu même de toutes les pentes de la surface qui permettent au rayonnement de rencontrer toutes les incidences possibles.



D.2.2.2. Réflectivité directionnelle - spéculaire - spectrale

Soit une source de luminance $L_{i\lambda}(\theta_i, \varphi_i)$ irradiant un élément $d\Sigma$ de la surface de séparation sous l'incidence θ_i ; la source est vue de $d\Sigma$ sous l'angle $d\Omega_i$ (on supposera que le milieu (t) est infini sinon on doit tenir compte des phénomènes de la réflexion de volume).

- Réflectivité directionnelle : par définition la réflectivité directionnelle spéculaire - spectrale est le rapport :

$$f_{\lambda}(\theta) = \frac{\text{Puissance spectrale réfléchie dans la direction } \theta_r \text{ dans l'angle solide } d\Omega_r}{\text{Puissance spectrale incidente dans la direction } \theta_i \text{ dans } d\Omega_i}$$

Si $L_{r\lambda}(\theta_r)$ est la luminance spectrale produite par la scène, on déduit alors :

$$f_{\lambda} = \frac{L_{r\lambda}(\theta_r) \cos \theta_r d\Omega_r d\Sigma}{L_{i\lambda}(\theta_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\Sigma} \quad 1.14$$

d'après la loi de Descartes

$$\theta_i = \theta_r = \theta$$

$$d\Omega_i = d\Omega_r$$

$$\text{Alors } f_{\lambda}(\theta) = \frac{L_{r\lambda}(\theta)}{L_{i\lambda}(\theta)} \quad 1.15$$

D.2.2.3. Réflectivité bidirectionnelle

Soit $L_r(\theta_r, \varphi_r)$ la luminance de la surface lorsqu'elle est observée dans la direction (θ_r, φ_r) sous l'angle solide $d\Omega_r$, la réflectivité bidirectionnelle est donnée par :

$$f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\text{Luminance réfléchie dans la direction } (\theta_r, \varphi_r)}{\text{Eclairement provenant de la source}}$$

$$f_b = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i \cos \theta_i d\Omega_i} \quad 1.16$$

En se basant sur le principe du retour inverse du rayonnement électromagnétique on peut énoncer la propriété de symétrie suivante :

$$f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = f_b(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) \quad 1.17$$

D.2.2.4. Relation entre la réflectivité directionnelle et bidirectionnelle

L'émittance produite par réflexion sur une surface s'écrit :

$$M_r = \iint_{\frac{1}{2}\text{sphère}} L_r \cos\theta_r d\Omega_r \quad \text{comme } f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i \cos\theta_i d\Omega_i}$$

$$M_r = \iint f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) L_i \cos\theta_i \cos\theta_r d\Omega_r d\Omega_i$$

$$M_r = L_i \cos\theta_i d\Omega_i \iint f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r d\Omega_r$$

et comme : $f_\lambda = \frac{M_r \lambda}{\epsilon_i \lambda} = \frac{M_r \lambda}{L_i \lambda \cos\theta_i d\Omega_i}$ alors $M_r \lambda = f_\lambda L_i \lambda \cos\theta_i d\Omega_i$

$$M_r = L_i \cos\theta_i d\Omega_i \iint f_b \cos\theta_r d\Omega_r$$

$$f_\lambda = \iint f_{b\lambda}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r d\Omega_r$$

1.18

D.2.3. Réflecteur Lambertien

Un réflecteur est dit Lambertien si la luminance due à la réflexion est indépendante des angles d'observation.

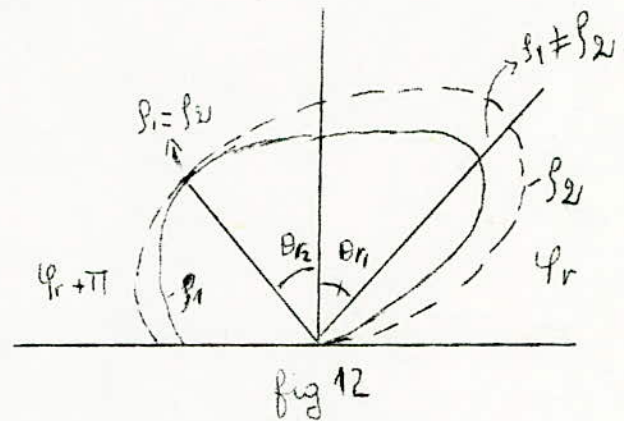
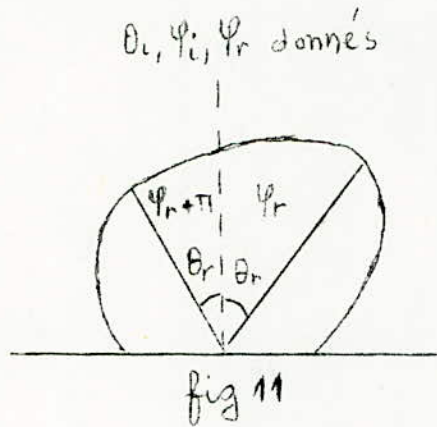
D'après la définition, cela implique que la réflectivité bidirectionnelle ne dépendra pas des angles θ_r, φ_r pour un réflecteur Lambertien et par suite de la symétrie f_b ne dépend pas non plus de θ_i et φ_i ; la relation (1.18) devient :

$$f_\lambda = \pi f_{b\lambda} \quad 1.19$$

D.2.4. Indicatrice de réflexion (fig 11)

C'est la représentation en coordonnées polaires des fonctions de réflectivité bidirectionnelle $f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ pour des angles θ_i, φ_i et φ_r donnés et un angle θ_r variable.

On obtient un réseau de courbes de la forme : fig. (11)



D.2.5. Intérêt de l'indicatrice de réflexion en télédétection

L'intérêt de la réflectivité pour la télédétection est très grand car la luminance enregistrée sur une scène donnée par le radiomètre dans les différentes longueurs d'ondes traduit les propriétés spécifiques du milieu.

Soit deux milieux ayant les indicatrices de réflectivité β_1 et β_2 , pour les mêmes angles θ_i et φ_i . Si l'on vise seulement dans une direction θ_r , il se peut que $\beta_1 = \beta_2$ fig. (12) il est donc indispensable de balayer un secteur d'angle pour distinguer β_1 de β_2 .

Ainsi on accroît les capacités de détection.

II. OPTOELECTRONIQUE

A. Effets photo-électriques

Les effets photo-électriques sont répartis en quatre groupes :

- Photoémissoifs
- Photoconducteurs
- Photovoltaïques
- Photomagnétiques

Nous parlerons ici seulement de l'effet photoconducteur.

A.1. Mécanisme de la photoconduction

Dans une bande interdite étroite, une faible excitation fait diminuer les propriétés isolantes de la substance considérée, ainsi les électrons passent de la bande de valence à la bande de conduction par l'application d'une énergie radiante : lumière visible (380 nm---760 nm), ce qui fait augmenter l'énergie potentielle des électrons qui parviennent à des niveaux d'énergies plus élevés. Inversement un électron de la bande de conduction peut tomber dans un état libre de la bande de valence en cédant une énergie W_{bj} , une telle recombinaison peut être radiative et il y a alors émission d'un photon.

A.2. Dispositifs photoélectriques

Ces dispositifs sont des composants dont le fonctionnement est basé sur l'interaction des électrons et des photons.

Ils se classent en quatre (4) familles :

- les photorécepteurs
- les dispositifs émetteurs de lumière
- les photocoupleurs
- les cellules solaires

A.3. Photo-émetteurs

Moyen d'excitation : Un excès d'électrons et de trous dans un volume de semi-conducteur entraîne un déséquilibre provoquant ainsi l'émission d'un rayonnement. Ce rayonnement peut-être obtenu par plusieurs procédés :

- l'électroluminescence
- la cathodoluminescence
- la radioluminescence

B. Dispositifs Utilisés lors de la réalisation

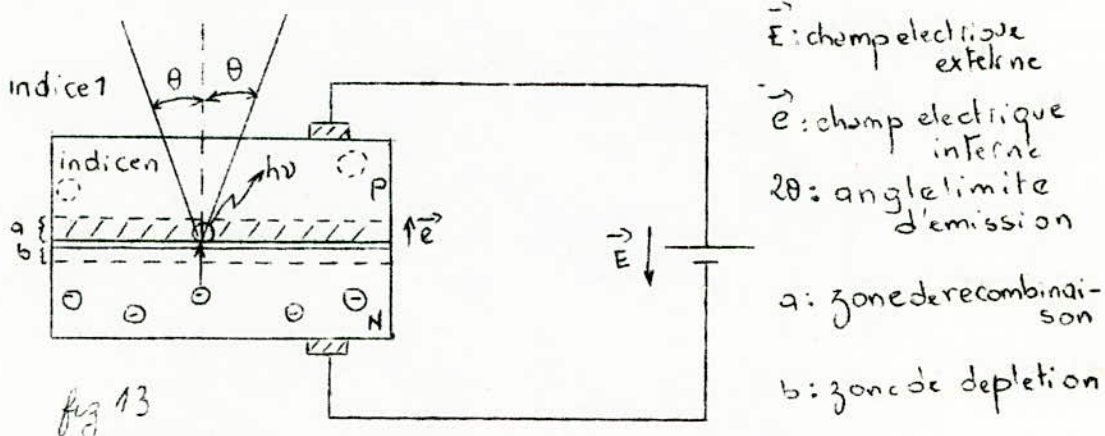
B.1. Diode Electroluminescente (LED)

La LED est une jonction semi-conductrice dont la construction et les matériaux favorisent les recombinaisons radiatives.

Une partie de l'énergie W_{bi} qui résulte de ces recombinaisons est libérée sous forme de rayonnement.

L'électroluminescence peut-être spontanée pour les LED,

Schématiquement, la LED est constituée comme le montre la fig. (13)



*/ La partie essentielle de la LED est la puce semi-conductrice constituant la jonction P N émettrice. Le matériau dépend de la longueur d'onde d'émission recherchée (Tableau I).

La Géométrie de la puce a une incidence importante sur le rendement de sortie du rayonnement crée à la jonction.

L'indice de réfraction des matériaux utilisés est grand ($n = 3,6$ pour GaAs), l'angle limite θ est petit ($\sin \theta = 1/n$ augmente alors θ - diminue).

Il est encore plus faible pour une structure plane.

*/ Pour qu'elle soit émettrice, la LED doit être polarisée en direct ainsi le passage des électrons de la couche N vers la couche P permet des recombinaisons radiatives, donc émission de photons ($h\nu$)

Tableau I

MATERIAUX	LONGUEUR D'ONDE	Wbi MOYEN (eV)	RENDEMENT max %	COULEUR
Ge	1,88	0,65	très faibles	IR
Si	1,14	1,09	non utilise	IR
GaAs	0,95	1,3	20	IR
GaAs (Zn)	0,90	1,37	5	IR
GaAPAs	0,68	1,82	5	Rouge
GaAsP	0,64	1,93	I	Rouge
GaAsP(N)	0,58	2,13	I	Jaune
GaP	0,48	2,3	I	Vert

B.1.1. Caractéristiques de la Diode électroluminescente

Les photo-émetteurs peuvent être caractérisés par trois paramètres

- a- Paramètres optiques : ce sont les grandeurs de sortie
- b- Paramètres électriques : ce sont les grandeurs d'entrée
- c- Paramètres de transfert

-Pour les grandeurs de sortie, il existe deux systèmes d'unités : les unités lumineuses et les unités énergétiques

-Les grandeurs d'entrée sont des grandeurs électriques familières

-Un des principaux paramètres de transfert est le rendement de conversion qui peut-être exprimé sous trois formes.

- Rendement énergétique : η_e

$$\eta_e = \frac{\text{Flux du rayonnement en Watts}}{\text{Puissance électrique appliquée}}$$

$$\eta_e = \frac{\phi}{P} \quad 2.1$$

- Rendement quantique η_q

$$\eta_q = \frac{\text{Photons émis}}{\text{Electrons injectés}}$$

Chaque photon transporte une énergie $M = h\nu$

Si N est le nombre d'électrons par seconde on a : $\phi = Nh\nu$

D'autre part le courant I transporte n électrons de charge e^-
 D'où :

$$I = ne = \frac{P}{V} \quad n = \frac{P}{eV}$$

$$\eta_q = \frac{N}{n} = \frac{\phi}{h\nu} \cdot \frac{eV}{P} = \frac{\phi}{P} \frac{eV}{h\nu} = \eta_e \frac{eV}{h\nu} \quad 2.2$$

- Rendement Lumineux η_L

$$\eta_L = \eta_e K_\lambda \quad 2.3 \quad K_\lambda: \text{efficacite lumineuse absolue}$$

Ces rendements ne sont généralement constants que dans des zones d'utilisation limitées. En particulier η_e dépend de la température, il décroît quand celle-ci augmente.

Un autre paramètre de transfert est la vitesse de réponse

B.2. Photo-Récepteur

Le fonctionnement des dispositifs utilisés dans notre cas, est basé sur l'effet photoconducteur, expliqué précédemment.

B.2.1. Cellule photoconductrice ou (Photorésistance)

La résistance de la cellule diminue sous l'effet de l'éclairement d'où passage de courant dans la charge. Ce courant est fonction de l'intensité de l'éclairnement.

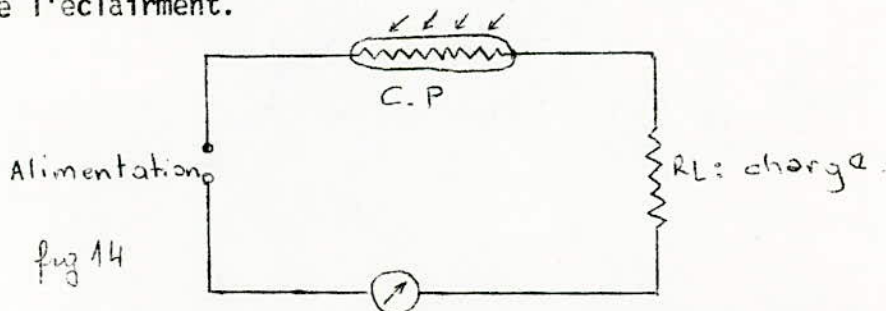


Schéma de principe d'un montage à cellule photoconductrice

B.2.2. Caractérisation des photorécepteurs

- Grandeurs d'entrée (voir grandeurs de sortie des photo-émetteurs)
- Grandeurs de sortie sont les grandeurs électriques classiques
- La sensibilité est le paramètre de transfert le plus usuel.

B.2.3. Propriétés et caractéristiques de la Photo-Résistance

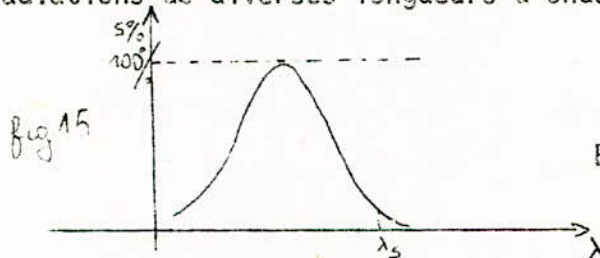
Le bon fonctionnement d'un dispositif photoconducteur donné dans toute application pratique est déterminé par un certain nombre de facteurs qui sont appelés : "conditions de travail"

Elles sont classées en trois groupes :

- en l'absence de signal
- avec un signal
- conditions thermiques

Les caractéristiques importantes d'un dispositif photoconducteur sont :

B.2.3.1. Réponse spectrale : C'est-à-dire la sensibilité relative aux radiations de diverses longueurs d'ondes.



Ex. de courbe de réponse spectrale

Il existe une longueur d'onde limite (λ_s) ou de seuil λ au delà de laquelle aucun effet photoélectrique n'est possible.

Pour les faibles longueurs d'ondes, la réponse diminue. La raison est que le nombre d'électrons excités dans la substance photosensible diminue. i.

B.2.3.2. Sensibilité : La variation du courant qui traverse le dispositif, pour une variation déterminée de l'éclairement

S = Sensibilité

$$S = \frac{\text{Photocourant}}{\text{Flux lumineux}} \quad \text{en mA/Lm}$$

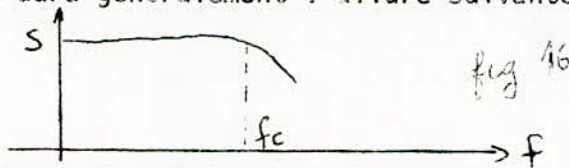
B.2.3.3. Réponse en fréquence : Un dispositif photoélectrique peut être aussi caractérisé par son inertie, c'est-à-dire la mesure dans laquelle sa sensibilité dépend de la fréquence d'un éclairage intermittent.

La sensibilité pour une fréquence f est donnée par l'expression :

$$S(f) = \frac{S(0)}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}} \quad 2.4$$

$S(0)$: sensibilité pour un éclairage constant

$S(f)$: aura généralement l'allure suivante



C. Grandeurs énergétiques et lumineuses

Les grandeurs énergétiques (ou radiométriques) sont définies comme des grandeurs purement physiques pour lesquelles le rayonnement est évalué en unités énergétiques.

A chacune de ces grandeurs correspond une autre pour laquelle le rayonnement est évalué par un observateur de référence qui est la courbe de réponse de l'œil. Ce sont les grandeurs lumineuses (ou photométriques).

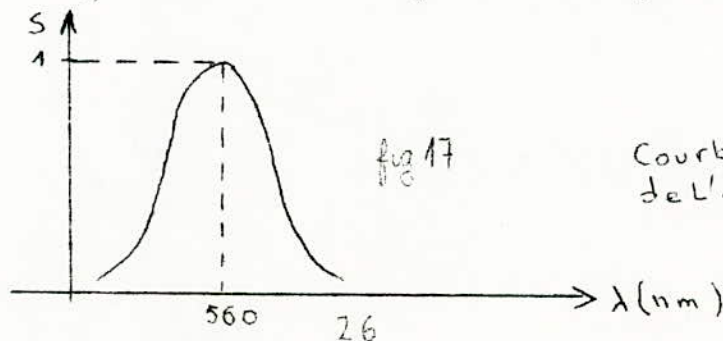
Pour distinguer les grandeurs photométriques on ajoute l'indice V aux symboles utilisés pour les grandeurs énergétiques : exemple I_V, ϕ_V etc...

C.1. Photométrie et grandeurs lumineuses

Connaissant $\phi_\lambda(\lambda)$ spectre d'émission énergétique, le flux visuel est :

$$\phi_V = 680 \int_{\lambda} K(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda$$

$K(\lambda)$ est donné par la courbe de réponse de l'œil
 ϕ_V : en Lm ϕ_V = flux lumineux x l'œil



Courbe de réponse de l'œil

Grandeurs Energétiques et Photométriques

GRANDEURS	DEFINITION	Grandeurs énergétiques		Grandeurs photométrique	
		Symbole	Unité	Symbole	Unité
INTENSITE	Puissance émise par l'unité d'angle solide	ϑ	W	ϑ_v	Lumen Lm
LUMINANCE	C'est l'intensité par unité de surface apparente émissive	$I_e = \frac{\vartheta}{\Omega}$	Wsr ⁻¹	$I_v = \frac{\vartheta_v}{\Omega}$	Candela : Lm sr ⁻¹
FLUX	Puissance émise par la source	$L_e = \frac{I_e}{S_e}$	Wsr ⁻¹ m ⁻²	$L_v = \frac{I_v}{S_e}$	cd m ⁻²
ECLAIREMENT	C'est la puissance reçue par unité de surface	$E_e = \frac{\vartheta}{S_r}$	Wm ⁻²	$E_v = \frac{\vartheta_v}{S_r}$	Lm. m ² = Lux

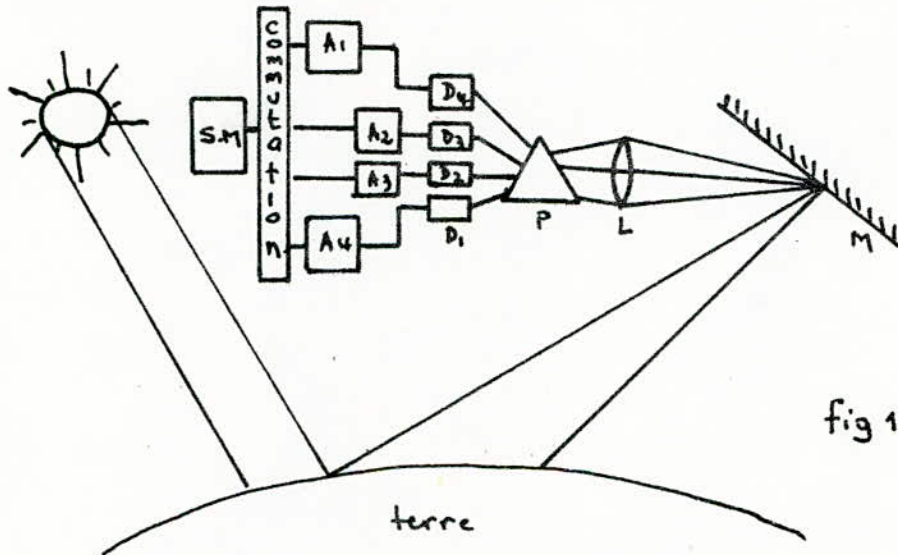
Tableau II.

III. CHAÎNE DE MESURE DE LA REFLECTIVITE

La Chaîne de mesure qui devrait être initialement étudiée est un radiomètre multispectral ayant la configuration suivante : fig. (18). Ce radiomètre doit travailler dans les longueurs d'ondes utilisées par le capteur multispectral embarqué à bord du Satellite. L. ANDSAT.

Canaux utilisés par le Landsat :

- Canal 4 : 0,5 0,6
- Canal 5 : 0,6 0,7
- Canal 6 : 0,7 0,8
- Canal 7 : 0,8 1,1



M: miroir
L: Lentille
P: Prisme
Di: Detecteurs
Ai: Amplificateur
S.M: systeme de mesure.

fig 18

Faute de moyen cette idée n'a pu être concrétisée.

Nous nous proposons alors d'étudier séparément chaque Canal LANSAT.

Le canal qui a fait l'objet de notre réalisation est le canal 4.

A- Chaîne de mesure : Schéma synoptique

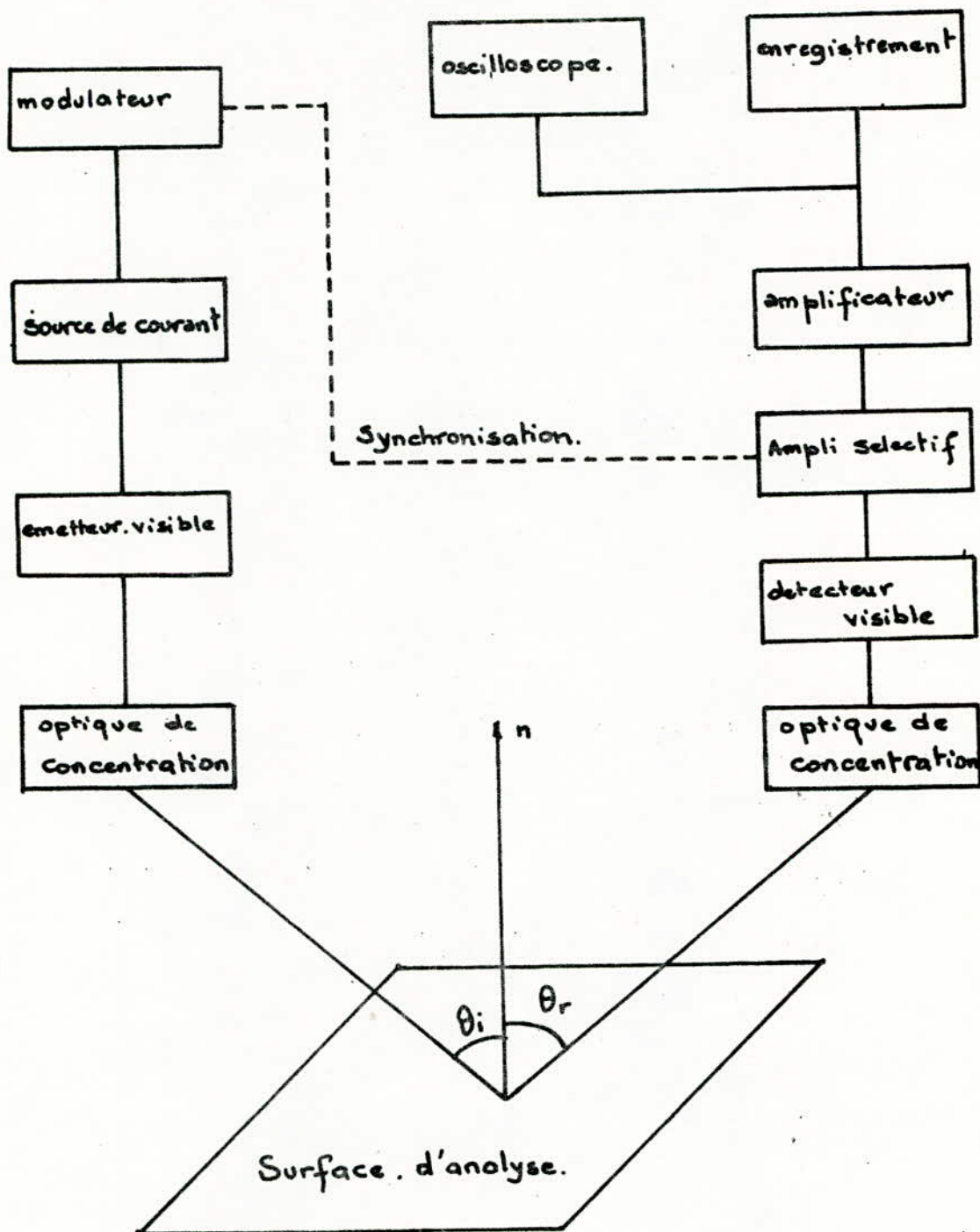


fig 19

- Emetteur

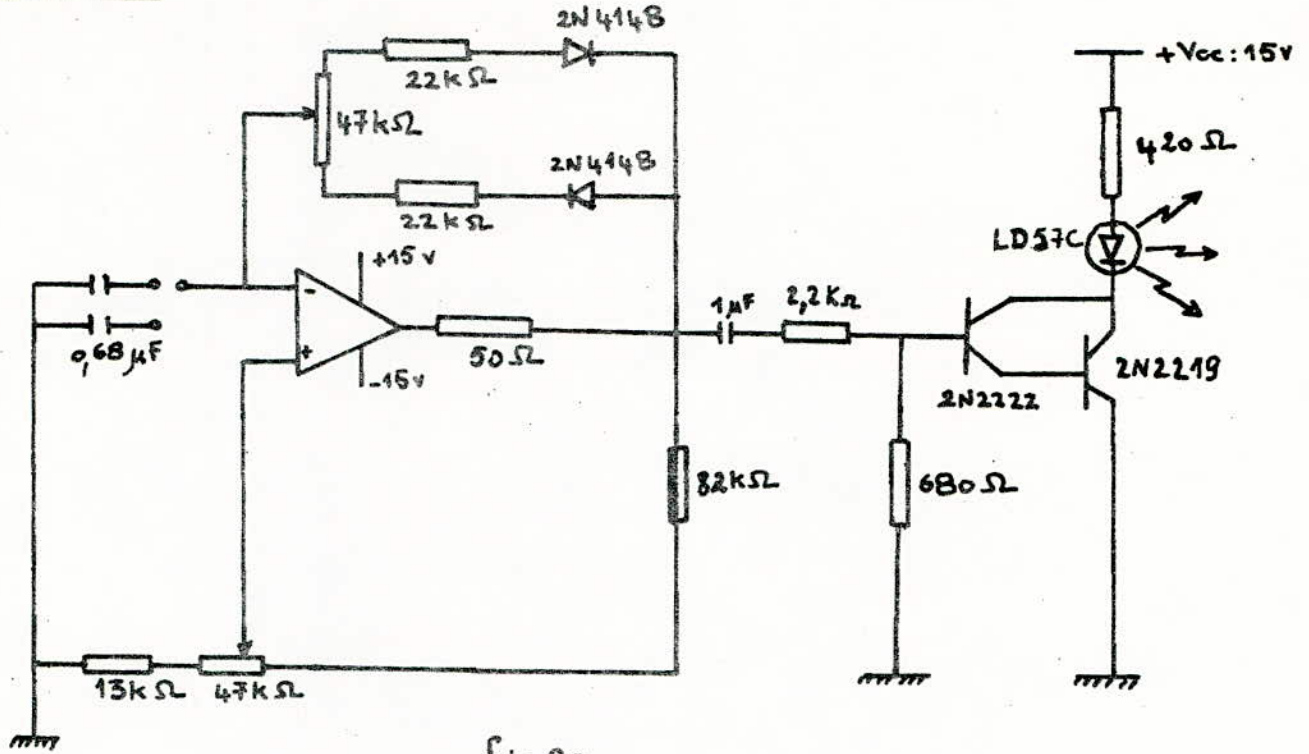


fig 20

- Recepteur

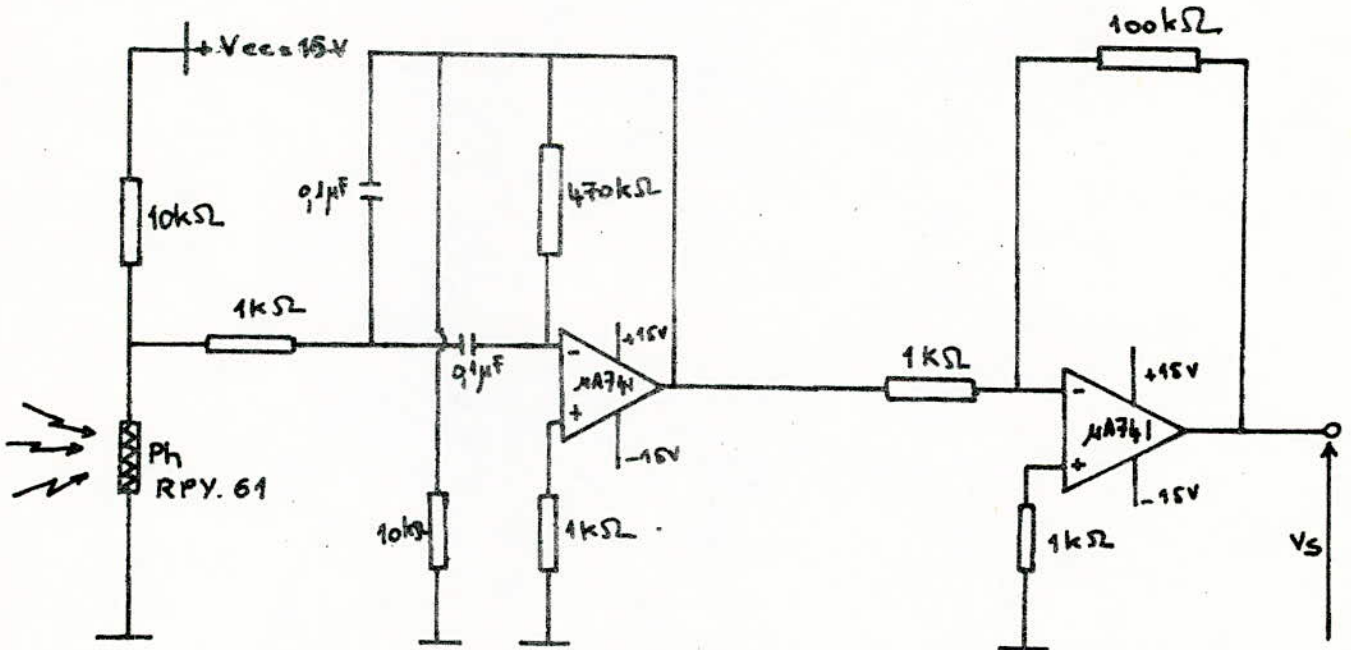
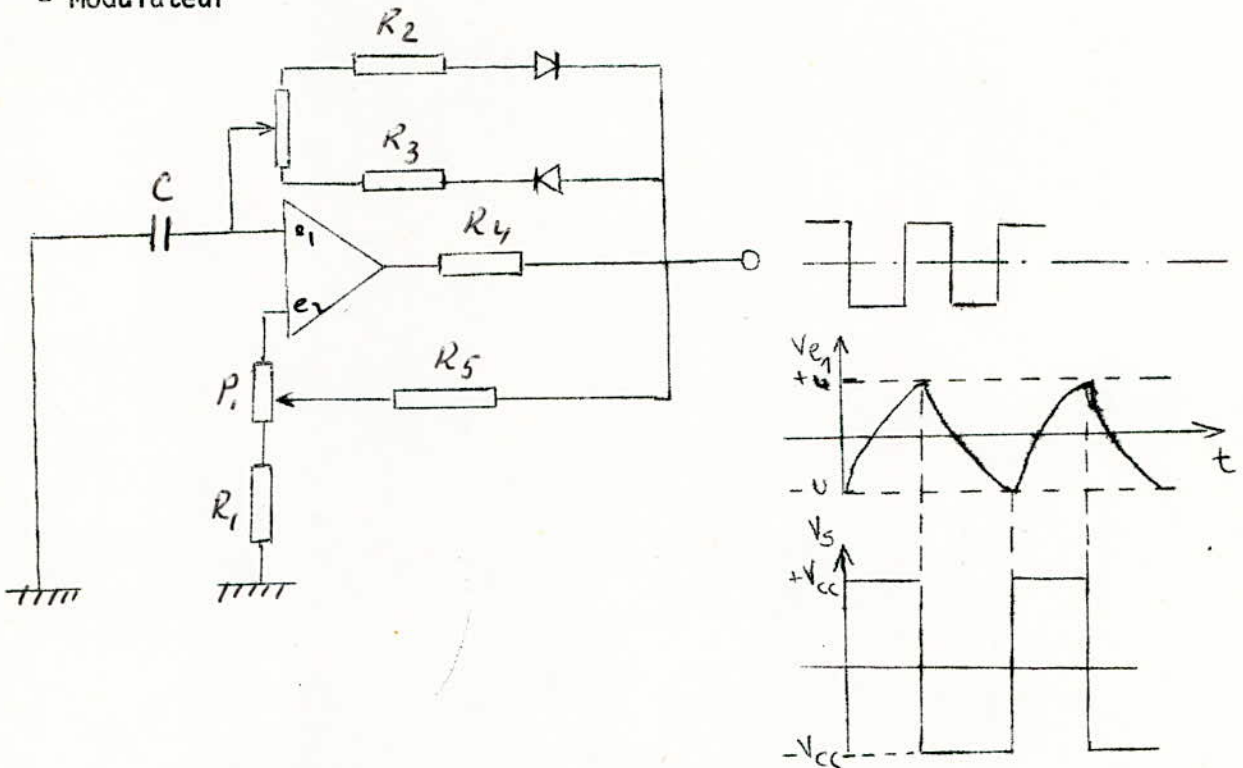


fig 21

c/ Presentation de la chaine de mesure:

1) Emetteur

- Modulateur



Principe de fonctionnement

On applique une tension V_{e1} sur l'entrée e_1 qui sera variable dans le temps et dont les crêtes positives et négatives dépassent les seuils du trigger V_{e2} .

à l'instant t_0 : $V_{e1} < u$: V_s est au niveau haut soit $+V_{cc}$

$$u = \frac{V_{cc} \cdot R'_1}{R'_1 + R'_5} \quad \text{avec } R'_1 = R_1 + a \cdot P_1 ; R'_5 = R_5 + b \cdot P_1 ; a, b \quad I$$

$$a + b = I$$

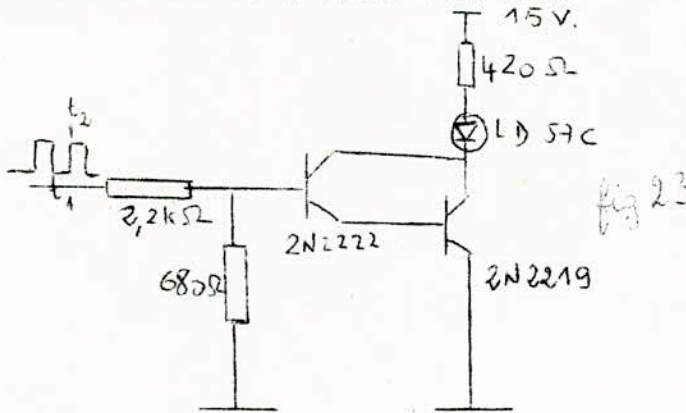
Lorsque V_{e1} atteint $+u$ puis dépasse ce seuil, une tension différentielle positive est appliquée entre l'entrée inverseuse et non inverseuse de l'amplificateur opérationnel ; La sortie V_s bascule vers $-V_{cc}$: niveau bas.

Ce qui entraîne à l'instant t_1 le basculement de V_{e1} vers $-u$.

V_{e1} est obtenue à partir des créneaux de sortie grâce à la résistance R_3 et au condensateur C qui se charge à travers R_3 et se décharge à travers R_2 suivant la fréquence de récurrence (avec : $R_2 = R_3$) :

$$f = \frac{I}{2 R'_2 \cdot C \cdot \ln\left(1 + 2 \frac{R'_1}{R'_5}\right)} \quad 3-1$$

Commande en courant de la diode : LD 57C.



La Diode émettra à partir du basculement du transistor Darlington en saturé bloqué.

À l'instant t_1 le transistor est bloqué le potentiel du collecteur est égal à celui de l'alimentation : V_{CC} , aucun courant ne passe à travers la diode à l'instant t_2 le transistor Darlington est conducteur, le potentiel collecteur va diminuer et un courant circulera dans la diode montée en direct d'où émission de lumière modulée.

- Choix de la résistance de polarisation de la diode : R_7 on s'est fixé un courant d'alimentation de la diode à 30mA d'où le choix de R_7 afin de limiter ce courant, de plus la résistance R_7 a un effet de compensation thermique. La LD 57C présente une résistance dynamique faible ; une variation de température entraîne une variation de V_D (voir effets de la température sur les diodes) donc une variation considérable de I_D : instabilité du flux lumineux.

$$\text{puisque } V_D = R_D I_D ; I_D = \frac{V_D}{R_D} \quad - 3.2 -$$

Si on met, cette résistance R_7 on obtient :

$$I_D = \frac{V_{CC} - V_D}{R_7} \quad (\text{Transistor saturé})$$

Si V_D varie I_D variera dans des proportions moindres que

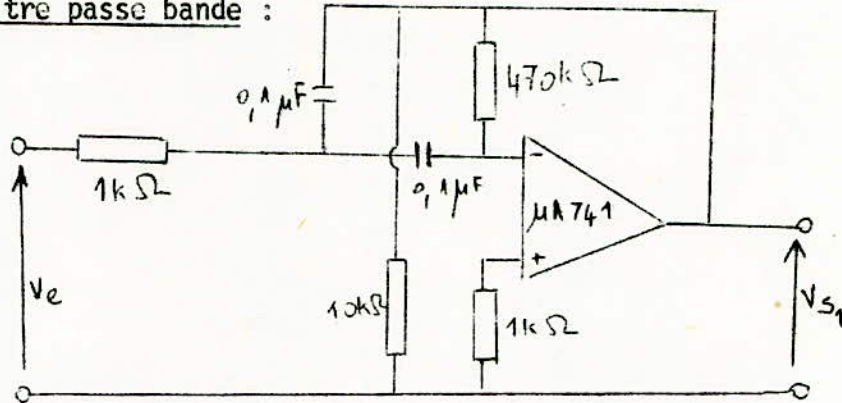
Si R_7 n'existait pas. Plus R_7 est grand, plus I_D est petit

$$R_7 = \frac{V_{CC} - V_D}{I_D} \quad - 3.3 -$$

$$R_7 = 420 \Omega$$

Récepteur

Filtre passe bande :



$f_0 = 75 \text{ Hz}$

fig 24

Coefficient de qualité : $Q = 10$

Bande passante $B = f_0/Q = 7,5 \text{ Hz}$

Fréquences de coupure : $f_{c1} = 71 \text{ Hz}$

$f_{c2} = 79 \text{ Hz}$

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \cdot R_3} \quad - 3.41 -$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad - 3.5 -$$

Amplificateur :

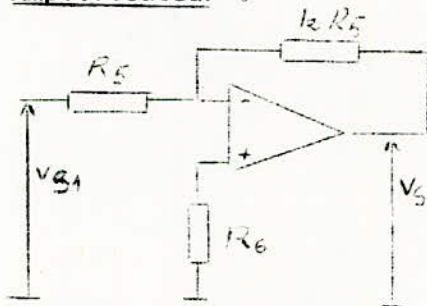


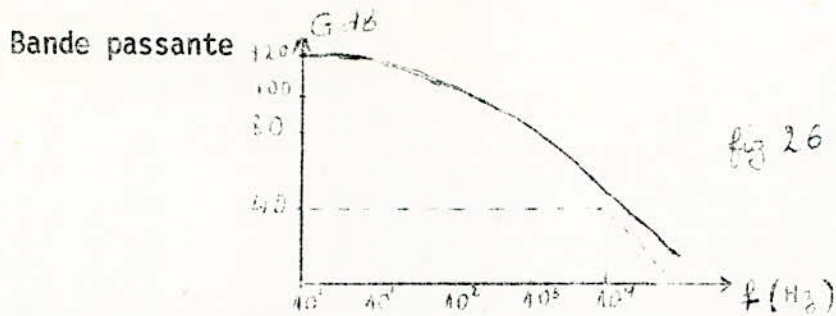
fig 25

$R_5 = 1 \text{ k}\Omega$

$k = 100$

Résistance d'entrée : $R_5 = R_e = 1 \text{ k}\Omega$

Résistance de sortie : $R_s \approx 0$: pratiquement $R_s = 6\Omega$



A vide on a une bande passante du $\mu A 741$ de 10Hz mais notre amplificateur possède une contre réaction, la bande passante va augmenter et son gain va diminuer :

Gain : $\frac{V_s}{V_e} = - \frac{kR_5}{R_5} = -k$; $|G| = k$ - 3.6 -

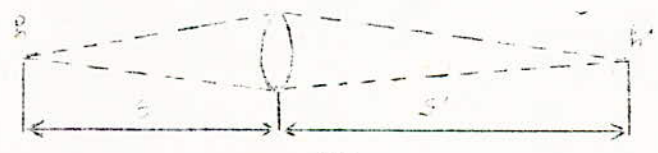
k est pris égal à 100 : $|G| = 100$

GdB = 20 lg |G| = 40 dB

d'où la bande passante : 10 kHz.

D. Optique de Collection

La focalisation d'un faisceau lumineux se fait par une lentille convergente.



$1/s + 1/s' = 1/f$ fig 27

s : distance entre la source ponctuelle et la lentille

s' : distance séparant la lentille de son foyer h'

f : distance focale de la lentille.

La distance focale est fonction de l'indice de réfraction n de la matière dont est constituée la lentille et des rayons r_1 et r_2 .

Avec un faisceau incident parrallèle :

f : distance focale de la lentille s'écrit

$1/f = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ - 3.7 -

fonction de la lentille dans :

- l'émetteur

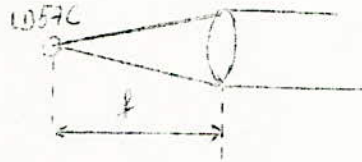
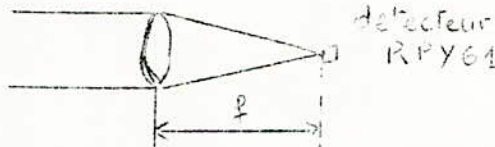


fig 35

- le récepteur



Proportion de lumière perdue due à la réflectance des lentilles :

le coefficient de réflexion R :

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2, \text{ avec } n \text{ indice de réfraction du verre}$$

n' " " " " de l'air

- 3.8 -

$$n = 1, \quad n' = 1,5$$

$$R = \frac{0,25}{(2,5)^2} = \frac{1}{25} = 0,04$$

On déduit alors la transmittance des 2 lentilles

$$\tau + R = 1 \Rightarrow \tau = 0,96$$

- 3.9 -

mais dans une lentille, on a 2 changements de milieu, la quantité de lumière transmise est $(0,96 \times 0,96) = 0,9$ fois la lumière incidente.

De plus, on a une lentille à l'émission et une autre à la réception on obtient alors un facteur de transmission

$$\tau' = 0,9 \times 0,9 \approx 0,8$$

$$\underline{\tau' = 0,8}$$

E. Calcul de l'IFOV

- Définition : C'est l'angle instantané d'analyse.

Calcul de l'IFOV angulaire :

$$-3.10- \quad \alpha = \frac{D}{F} \quad \text{avec}$$

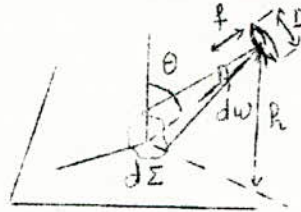
D : diamètre du détecteur

F : 2f, f = distance focale de la lentille

$$D = 0,6 \text{ cm}$$

$$F = 2f = 2 \times 17 = 34 \text{ cm}$$

$$\text{d'où } \alpha = 17,6 \cdot 10^{-3} \text{rd}$$



Dans ce cas l'angle solide dw sous lequel est vue la surface $d\Sigma$ analysée est donné par la relation :

$$-3.11- \quad dw = \frac{\alpha^2 \pi}{4}$$

$$\text{d'où } dw = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ st.}$$

La surface analysée $d\Sigma$ (fig. 1) est alors donnée par la relation :

$$-3.12- \quad d\Sigma = \frac{h^2}{(\cos \theta)^3} dw$$

$$d\Sigma = \begin{cases} 9,8 \text{ cm}^2 & \text{pour } \theta = 0 \\ 19,2 \text{ cm}^2 & \text{pour } \theta = \frac{\pi}{3} \\ 13,5 \text{ cm}^2 & \text{pour } \theta = \frac{\pi}{4} \end{cases}$$

IV. MESURE DE LA REFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE DES SURFACES NATURELLES

A. Réflectance bidirectionnelle de la surface :

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) = \frac{\text{Radiance réfléchie de la direction } (\theta, \varphi)}{\text{Eclairement provenant de la source dans la direction } (\theta_i, \varphi_i)}$$

- L. 1 -

- La Réflectance bidirectionnelle joue un rôle important en télédétection car :

- elle détermine la quantité d'énergie reçue par le capteur
- elle traduit les propriétés d'un milieu irradié (éclairé)

- pour mesurer la réflectance bidirectionnelle on propose la méthode suivante :

Soit $L(\theta, \varphi)$ le rapport entre l'énergie reçue par le capteur (récepteur) dans un angle solide Ω_r et l'énergie qui serait renvoyée dans ce même angle solide par une surface réfléchissante Lambertienne.

$$L(\theta, \varphi) = \frac{\int_{\Omega_r} R(\theta, \varphi) d\Omega_r}{\int_{\Omega_r} R_0 d\Omega_r} \quad 4.2$$

$R(\theta, \varphi)$ = Radiance de la surface étudiée.

R_0 = Radiance d'une surface répondant à la loi de Lambert

R_0 = Constante quelque soit l'angle de visée

Si le récepteur est déplacé suivant une sphère centrée sur la surface Lambertienne, l'énergie captée sera constante quel que soit les angles θ et φ .

Si l'angle d'ouverture du radiomètre est petit la radiance $R(\theta, \varphi)$ de la surface visée variera peu à l'intérieur de celui-ci :

$$L(\theta, \varphi) \approx \frac{R(\theta, \varphi)}{R_0} \quad 4.3$$

D'autre part on supposera que l'éclairement $E(\theta_i, \varphi_i)$ est uniforme

$$\begin{aligned} \text{alors : } R(\theta, \varphi) &= \int_{\Omega} b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cdot E(\theta_i, \varphi_i) \\ R_0 &= \int_{\Omega} b(\theta_i, \varphi_i) \end{aligned} \quad 4.4$$

avec $\int_{\Omega} b$ = réflectance bidirectionnelle de la surface étudiée
 $\int_{\Omega} b^{\circ}$ = réflectance bidirectionnelle de la surface répondant à la loi de Lambert.

$$L(\theta, \varphi) = \frac{\int_{\Omega} b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi)}{\int_{\Omega} b^{\circ}} \quad 4.5$$

Comme ρ° est indépendant des angles on propose de prendre comme référence la radiance de la surface Lambertienne mesurée verticalement

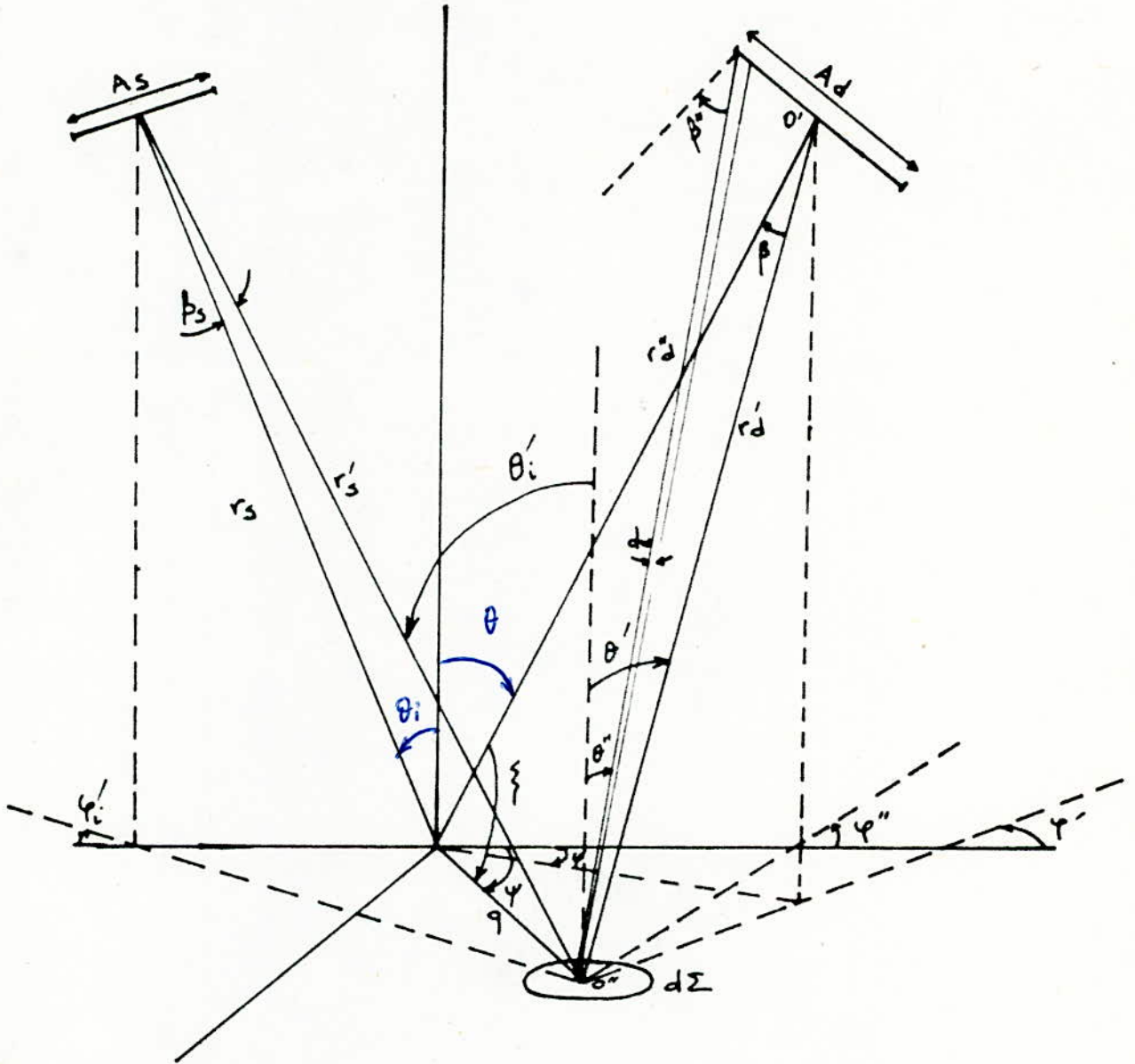
$$R_{\rho}(\theta, \varphi) = R_{\rho}(0,0) = R_{\rho} \quad 4, 6$$

et en mesurant la radiance de notre surface étudiée pour différentes valeurs de θ et φ on pourra après un calcul simple tracer l'indicatrice de réflexion normalisée d'une surface naturelle.

B. Développement d'un modèle de mesure pour une source contrôlable

Le but à atteindre c'est de mesurer la réflectance bidirectionnelle en fonction de (θ , et φ) d'une surface quelconque en évitant les erreurs dues à la position de la source, aux perturbations atmosphériques, c'est pourquoi on a choisi une source contrôlable située à deux mètres environ de la surface à étudier.

Modèle de mesure :



- $d\Sigma$: Une surface élémentaire éclairée par l'émetteur dans le champ visé
- q, ψ : Les coordonnées polaires de $d\Sigma$ dans le plan d'analyse
- r_d : La distance entre le centre de la pupille d'entrée du détecteur à celui de la surface analysée.
- r'_d : La distance entre le centre de la pupille d'entrée du détecteur et celui de $d\Sigma$.
- r''_d : La distance entre un point de la pupille d'entrée du détecteur et celui de $d\Sigma$.
- dw : Un angle solide élémentaire issu de $d\Sigma$ dans la direction r''_d .
- A_d : L'aire de la pupille d'entrée du détecteur
- r_s : La distance entre le centre de la pupille de sortie de l'émetteur et celui de $d\Sigma$.
- r'_s : La distance entre le centre de la pupille de sortie de l'émetteur et celui de $d\Sigma$.
- A_s : L'aire de la pupille de sortie de l'émetteur.

On choisit les vecteurs unitaires $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}, \vec{u}_s, \vec{v}_s, \vec{w}_s$ associés respectivement aux rayons $r_d, r'_d, r''_d, r_s, r'_s, q$ et leur coordonnées sont

$$\begin{aligned} \vec{u} &: (u, \theta, \varphi) & \vec{w}_s &: (w_s, 0, \psi) \\ \vec{v} &: (v, \theta', \varphi') \\ \vec{w} &: (w, \theta'', \varphi'') \\ \vec{u}_s &: (u_s, \theta_s, 0) \\ \vec{v}_s &: (v_s, \theta'_s, \varphi'_s) \end{aligned}$$

B.1. Réponse à la sortie du système détecteur

- Signal électrique

La puissance rayonnée par l'élément de surface $d\Sigma$ dans l'angle solide dw s'écrit :

$$d^3p = R(q, \psi, \theta'', \varphi'') \cos\theta'' dw d\Sigma. \quad 4.7$$

$R(q, \psi, \theta'', \varphi'')$: radiance de la surface élémentaire

Désignons par $I(\beta'', q, \psi)$ la fonction de réponse spatiale du système détecteur. β'' est l'angle entre l'axe optique et 1 rayon courant $r''d$; Le signal électrique de sortie s'écrit :

4.8. $d^3S = \alpha I(\beta'', q, \psi) R(q, \psi, \varphi'') \cos \theta'' d\omega d\Sigma$; α étant un facteur de conversion.

Pour obtenir le signal de sortie quand $d\Sigma$ est vue par l'ensemble de la surface de la pupille d'entrée du détecteur on intègre l'équation précédente sur Ad et on obtient :

$$4.9. \quad d^2S = \int_{Ad} \alpha I(\beta'', q, \psi) R(q, \psi, \varphi'') \cos \theta'' d\omega d\Sigma$$

Les variations de β'' sont petites

On obtient alors par application du théorème de la moyenne.

$$d^2S = \alpha I(\beta) R(q, \psi, \theta', \varphi') \cos \theta' \Delta \omega d\Sigma \quad - 4.10 -$$

avec $\Delta \omega$ = angle solide de la pupille d'entrée du détecteur vu par $d\Sigma$

$$\Delta \omega = \frac{Ad \cos \beta}{(r'd)^2}$$

sachant que $f_b(\theta'_L, \varphi'_L; \theta', \varphi') = R(q, \psi, \theta', \varphi') / E_{d\Sigma}(q, \psi)$ - 4.11 -

avec $E_{d\Sigma}(q, \psi)$: éclairement de la surface étudiée, on obtient :

$$\boxed{d^2S = \alpha I(\beta) f_b(\theta'_L, \varphi'_L; \theta', \varphi') E_{d\Sigma}(q, \psi) d\Sigma} \quad - 4.12 -$$

La connaissance de la surface active qui envoie de l'énergie au détecteur après réflexion nous permet d'obtenir l'expression qui correspond à l'énergie totale.

$$S = \iint_{(q, \psi)} \alpha I(\beta) f_b(\theta'_L, \varphi'_L; \theta', \varphi') E_{d\Sigma} \cos \theta' \Delta \omega d\Sigma \quad - 4.13 -$$

Si la surface éclairée est petite vis-à-vis de la distance surface-

détecteur et si la variation de $\int b$ n'est pas trop brusque, par application toujours du théorème de la moyenne on obtient :

$$S = \int b(\theta_i, \psi_i, \theta, \psi) \cos \theta \iint_{(q, \psi)} E_{d\Sigma}(q, \psi) I(\beta) \Delta \omega d\Sigma \quad -4.14-$$

Pour calculer l'intégrale double ci-dessus on doit connaître $I(\beta)$ et $E_{d\Sigma}(q, \psi)$.

B.2. Calcul de $I(\beta)$

On assimile la réponse spatiale du système détecteur à une courbe de Gauss : la réponse en un point décroît en fonction de l'écart par rapport à l'axe optique selon la loi.

$$I(\beta) = I(0) \exp(-\beta^2/\beta^2 d) \quad -4.15-$$

- calcul de β en fonction de θ , et ψ et ψ avec les notations utilisées dans le modèle de mesure :

$$q^2 = r^2 d + (r' d)^2 - 2 r d r' d \cos \beta$$

$$(r' d)^2 = q^2 + r^2 d - 2 q r d \cos \beta \quad -4.16-$$

- calcul de $\cos \beta$

$$\vec{u} \cdot \vec{w}_s = |\vec{u}| |\vec{w}_s| \cos \beta$$

$$\vec{u} \begin{cases} \sin \theta \sin \psi \\ \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \end{cases} \quad \vec{w}_s \begin{cases} \sin \psi \\ \cos \psi \\ 0 \end{cases} \quad -4.17$$

$$\vec{u} \cdot \vec{w}_s = \sin \theta \sin \psi \sin \psi + \sin \theta \cos \psi \cos \psi = \cos \beta$$

$$d'où \cos \beta = \frac{1 - (q/rd) \sin \theta \cos(\psi - \psi)}{\sqrt{1 + (q/rd)^2 - 2(q/rd) \sin \theta \cos(\psi - \psi)}} \quad -4.18-$$

en pratique $q \ll rd$ on peut alors écrire

$$\cos \beta = 1 - \left(\frac{q}{rd}\right)^2 \times [1 - \sin^2 \theta \cos^2(\psi - \psi)] \quad -4.19-$$

Soit :

$$\beta^2 \approx \left(\frac{q}{rd}\right)^2 \times (1 - \sin^2 \theta \cos^2(\psi - \psi)) \quad -4.20-$$

On obtient enfin

$$I(\beta) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{q}{qd} \right)^2 (1 - \sin^2 \theta \cos^2 (\psi - \varphi)) \right] \quad -4.21-$$

avec $\beta_d \cdot r_d = q_d \quad -4.22-$

B.3. Calcul de $Ed\Sigma(q, \psi)$

- L'étude de la répartition spatiale de l'éclairement produit par un système de projecteur permettra le calcul de $Ed\Sigma(q, \psi)$.

Avec toujours les mêmes notations on écrit :

$$Ed\Sigma(q, \psi) = R_S(\beta_i) \cos \beta_i A_S \cos \theta_i / (r_s')^2 \quad -4.23-$$

Avec $Ed\Sigma(q, \psi)$ éclairement de la surface $d\Sigma$

$R_S(\beta_i)$ radiance de la source dans la direction β_i

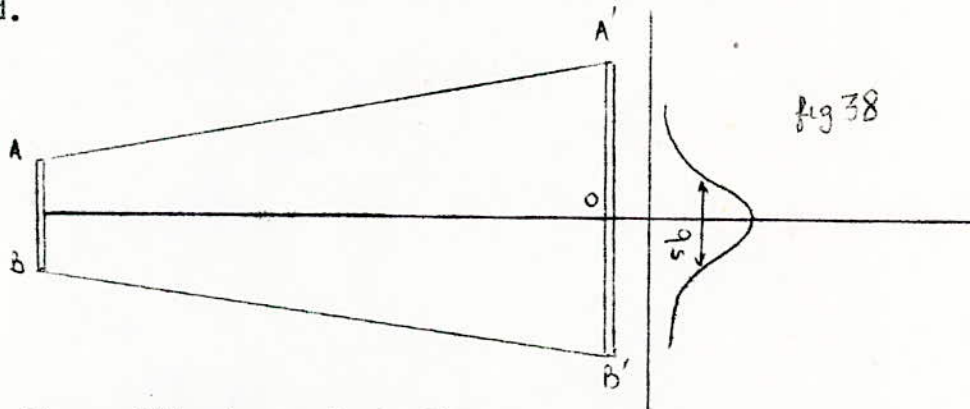
A_S : L'aire de la pupille de sortie de l'émetteur

r_s : Distance du centre de la cible à celui de la pupille de sortie de l'émetteur.

On considère que la source émet dans un angle solide faible alors on peut écrire :

$$Ed\Sigma(q, \psi) = R_S(\beta_i) A_S \cos \theta_i / (r_s)^2 \quad -4.24-$$

On a remarqué que l'éclairement d'une surface par notre émetteur n'est pas uniforme et que la région centrale reçoit une intensité plus forte que le bord.



AB : pupille de sortie de l'émetteur
A'B' surface éclairée

L'hypothèse qu'on va émettre basée sur la remarque précédente est qu'on peut représenter l'éclairement d'un point de la surface éclairée par

$$-4.25- \quad \boxed{E_{\theta, \varphi}(q, \psi) = E(0) \exp(-q^2/q_s^2)} \quad ; \quad q_s \text{ est la demi largeur de la fonction gaussienne}$$

D'après le principe de mesure évoqué plus haut, nous mesurons :

$$\frac{S(\theta, \varphi)}{S(0,0)} = \frac{\int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta K(\theta, \varphi)}{\int b(\theta_i, \varphi_i; 0,0) \cos \theta K(0,0)} \quad - 4.26 -$$

On introduit une nouvelle fonction $N(\theta, \varphi)$

$$N(\theta, \varphi) = \frac{K(\theta, \varphi)}{K(0,0)} \cdot \cos \theta \quad - 4.27 -$$

$$\text{d'où} \quad \frac{S(\theta, \varphi)}{S(0,0)} = \frac{\int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi)}{\int b(\theta_i, \varphi_i; 0,0)} \cdot N(\theta, \varphi) \quad - 4.28 -$$

Si la surface observée suit la loi de Lambert, l'équation précédente s'écrit comme suit :

$$\boxed{\frac{S(\theta, \varphi)}{S(0,0)} = N(\theta, \varphi)} \quad - 4.29 -$$

Pour un radiomètre usuel destiné à la mesure de T° le signal de sortie est proportionnel à la radiance.

Etude de quelques cas particuliers :

On peut écrire ~~avec~~ :

$$R_s(\beta_i) \approx R_s(0) \exp(-\beta_i / \rho_s^2) \quad - 4.30 -$$

avec le même raisonnement que pour le détecteur on arrive

$$\text{à : } \beta_i^2 \approx \left(\frac{q}{r_s}\right)^2 [1 - \sin^2 \theta_i \cos^2 \psi] \quad - 4.31 -$$

$$\beta_s = \frac{q_s}{r_s}$$

En combinant les diverses équations, on arrive à obtenir l'équation finale qui nous donne l'expression du signal de sortie :

$$S = \alpha \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \frac{Ad A_s}{(rd r_s)^2} \cos \theta_i \iint_{(q, \psi)} R(\beta_i) I(\beta) d\bar{\Sigma}$$

$$S = k \cos \theta \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) k(\theta, \varphi) \quad - 4.32$$

Avec :

$$k = R_s(0) I(0) \cos \theta_i \frac{Ad A_s}{(rd r_s)^2} \alpha \quad - 4.33 -$$

$$4.34 \quad K(\theta, \varphi) = \iint_{q, \psi} R_s(\beta_i) I(\beta) d\bar{\Sigma} \text{ appelée fonction de correction}$$

Le calcul de $k(\theta, \varphi)$ nous permet d'arriver à :

$$4.45 \quad K(\theta, \varphi) = \frac{\pi q^2 d q_s^2 / q_d^2}{1 + q_s^2 / q_d^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin^2 \theta_i}{1 + q_s^2 / q_d^2} + \frac{(q_s^2 / q_d) \sin^2 \theta}{1 + q_s^2 / q_d^2} + \frac{((q_s^2 / q_d) \sin^2 \theta + \sin^2 \theta_i)}{(1 + q_s^2 / q_d^2)^2} \right)_{\text{sur}}}}$$

en posant : $q_s / q_d = \eta$ appelé paramètre de l'appareil

$$b_1 = b_1(\theta_i) = \sin^2 \theta_i / 1 + \eta^2 \quad - 4.46 -$$

$$b_2 = b_2(\theta) = \eta^2 \sin^2 \theta / 1 + \eta^2$$

On obtient alors :

$$K(\theta, \varphi) = \frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{1}{\sqrt{1 - (b_1 + b_2) + b_1 b_2 \sin^2 \varphi}} \quad - 4.47 -$$

- Etude du signal de sortie dans le plan parallèle à l'incidence : $\varphi = 0$

La fonction de correction s'écrit :

$$k(\theta, 0) = \frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{1}{\sqrt{1 - (b_1 + b_2)}} \quad - 4.48 -$$

En remplaçant $k(\theta, \varphi)$ par $k(\theta, 0)$ dans l'équation donnant le signal à la sortie :

$$- 4.49 - S(\theta, 0) = k \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, 0) \cos \theta \frac{q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{\pi}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 2\theta_i}{1 + \eta^2} - \eta^2 \frac{\sin^2 \theta}{1 + \eta^2}}}$$

Si on étudie une surface Lambertienne on aura $\int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi)$ qui sera une constante et le signal de sortie sera proportionnel à $N(\theta, 0)$

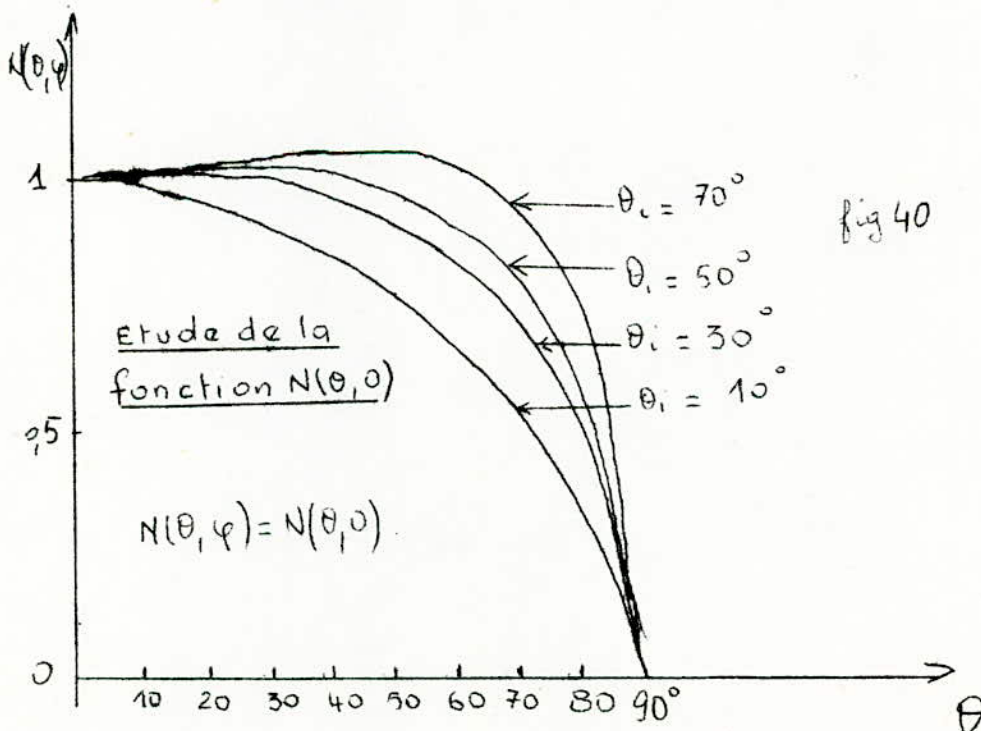
Etude théorique de la fonction $N(\theta, 0)$

$$N(\theta, 0) = \frac{k(\theta, 0)}{k(0, 0)} \cos \theta \quad - 4.50 -$$

$$\theta_i = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ.$$

$$N(\theta, 0) = \frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - b_1 - b_2)}} \frac{\sqrt{1 - b_1}}{\frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2}} \quad - 4.51$$

$$N(\theta, 0) = \frac{\sqrt{1 - b_1}}{\sqrt{1 - b_1 - b_2}} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i / 1 + \eta^2}}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i / 1 + \eta^2 - \eta^2 \sin^2 \theta / 1 + \eta^2}} \quad - 4.52 -$$



Explications sur les formes de figures obtenues

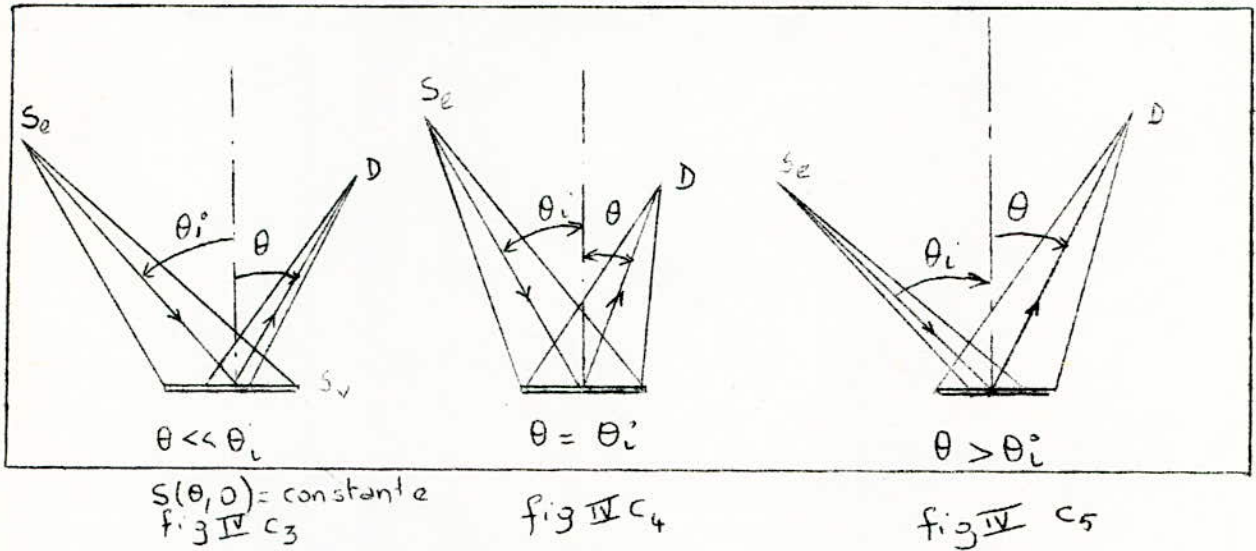


Fig. IV C3/ quand $\theta \ll \theta_i$ la surface illuminée par la source S_e est plus grande que la surface visée : S_v : on est dans la situation théorique de Lambert et le signal à la sortie est constant.

Fig. IV C4/ $\theta = \theta_i$ limite la surface visée est égale à la surface illuminée

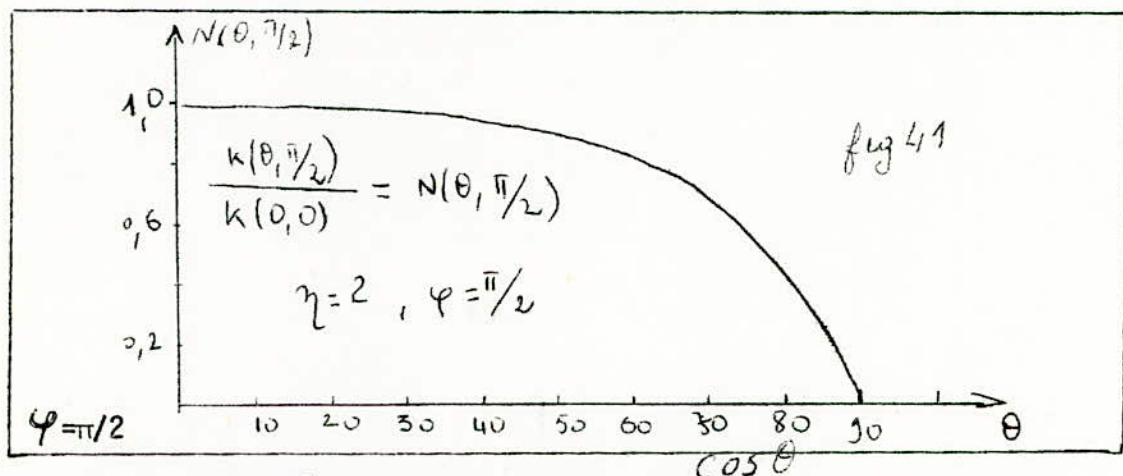
Fig. IV C5/ $\theta > \theta_i$: la surface visée S_v est supérieure à la surface illuminée alors radiance décroît avec l'angle; un calcul nous donne $S(\theta, 0) \propto \frac{\cos \theta}{\theta}$
 x paramètre d'appareil x θ_i

Etude du signal de sortie dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence

$\varphi = \pi/2$
 On écrit alors $k(\theta, \pi/2) = \frac{\pi}{\sqrt{1 - b_1 - b_2 + b_1 b_2}} \cdot \frac{q_d^2 d \eta^4}{1 + \eta^2}$ -4.53-

le signal de sortie est donné par :

- 4.54- $S(\theta, \pi/2) = k \left\{ b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \frac{q_d^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{\pi}{1 - \sin^2 \theta_i} \left(\frac{1 - \eta^2 \sin^2 \theta}{1 + \eta^2} \right) \right\}$



$$N(\theta, \varphi) = N(\theta, \pi/2) = \frac{-4.55-}{\sqrt{\frac{(1-\sin^2\theta_i)}{1+\eta^2} (1-\eta^2 \sin^2\theta / (1+\eta^2))}}$$

On voit que le seul paramètre inconnu du système de mesure est $\eta = \frac{q_s}{q_d}$

q_s = demi-largeur de la fonction gaussienne: source

q_d = demi largeur de la fonction gaussienne: détecteur en traçant la fonction $N(\theta, \varphi, \eta)$ pour différentes valeurs de η (voir courbe ci-dessous) fig.(43) en fonction de θ on remarque que la diminution de η augmente la décroissance de $N(\theta, \varphi, \eta)$ par rapport à θ .

On distingue les 2 cas extrêmes pour η :

$$\eta \rightarrow 0 \quad N(\theta, \varphi, \eta) \rightarrow \cos\theta$$

$$\eta \rightarrow \infty \quad N(\theta, \varphi, \eta) \text{ tend vers la fonction de Heaviside définie}$$

$$\text{par } N(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta \neq \pi/2 \\ 0 & \text{si } \theta = \pi/2 \end{cases} \quad -4.56-$$

Etude de ces 2 cas particuliers :

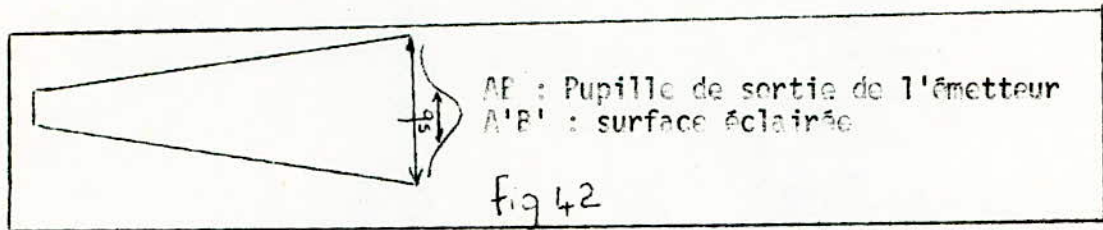
$$\eta \rightarrow 0$$

Ceci signifie que la source éclaire une toute petite surface par rapport à la surface visée par le détecteur

$$b_1(\theta_i) = \sin^2\theta_i / (1 + \eta^2) \quad -4.57-$$

$$b_2(\theta) = \eta^2 \sin^2\theta / (1 + \eta^2)$$

Pour $\eta \rightarrow 0$ on vérifie que : $b_1 \rightarrow \sin^2 \theta_i$
 $b_2 \rightarrow 0$



La surface active est : $S_e = \pi q^2 s$ le signal de sortie est donné par

$$S(\theta, \varphi) = k \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \pi q^2 s$$

$$S(\theta, \pi/2) = k \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \frac{q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} = \frac{\pi}{\sqrt{(1 - \sin^2 \theta_i / (1 + \eta^2)) (1 - \eta^2 \frac{\sin^2 \theta}{1 + \eta^2})}}$$

$\eta = \frac{cs}{\eta d}$: quand $\eta \rightarrow 0$

$S(\theta, \pi/2) = k \int b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \pi q^2 s$

- $\eta \rightarrow \infty$

Ceci signifie que l'ouverture angulaire de l'émetteur est infiniment grande (ou bien la distance émetteur-surface est infiniment grande)

Exemple : l'éclaircissement par le soleil

$b_1 : \sin^2 \theta_i / (1 + \eta^2) \rightarrow 0$

$b_2 = \eta^2 \sin^2 \theta / (1 + \eta^2) \rightarrow \sin^2 \theta$

Ce qui nous permet de calculer $K(\theta, \varphi)$.

$$K(\theta, \varphi) = \frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{1}{\sqrt{1 - (b_1 + b_2) + b_1 b_2 \sin^2 \varphi}} \quad 4-53'$$

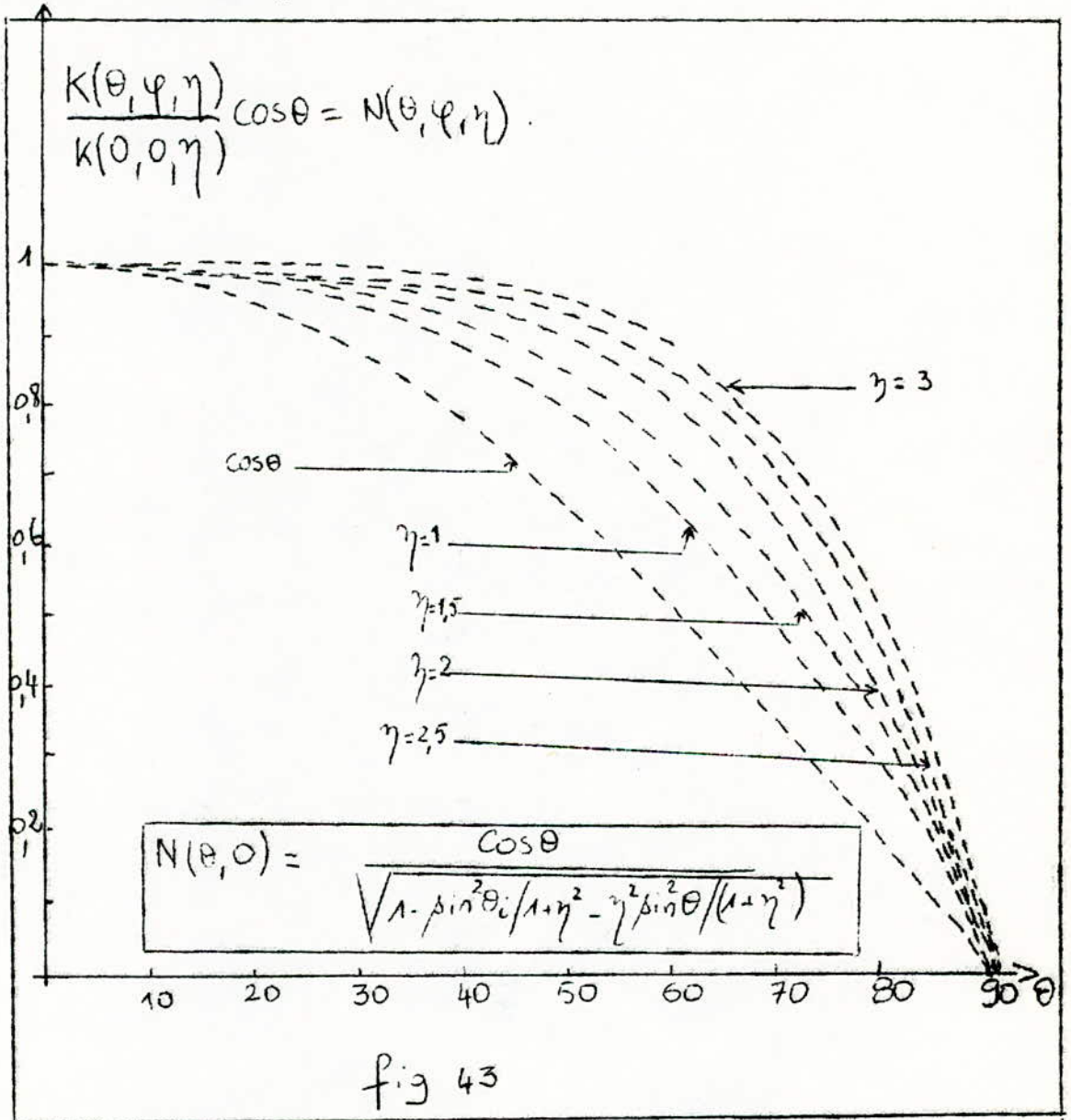
$$K(\theta, \pi/2) = \frac{\pi q^2 d \eta^2}{1 + \eta^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta}}$$

$$K(\theta, \pi/2) = \pi q^2 d \cdot \frac{1}{\cos \theta} = \frac{\pi q^2 d}{\cos \theta}$$

Le signal électrique à la sortie s'écrit :

$$S(\theta, \varphi) = k b(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \pi q^2 d \quad 4-54'$$

Si la surface obéit à la loi de Lambert le signal de sortie est constant quelque soit l'angle de visée.



Etude du signal de sortie dans le plan $\varphi = 0$
 Valeurs théoriques calculées à partir de la fonction $N(\theta, 0)$.

B.4. Mesure de la réflectivité bidirectionnelle

B.4.1. Vérification du caractère Lambertien d'une surface de bois et détermination de la fonction d'appareil

Comme c'est écrit ci-haut, on a besoin d'une surface Lambertienne pour pouvoir effectuer les mesures.

Notre choix s'est fixé sur une surface de bois polie.

Son caractère Lambertien va être vérifié en déterminant la fonction de l'appareil de mesure.

Les mesures que nous avons effectuées sont dans le plan :

$$\varphi = \pi ; \theta_i = 45^\circ ; \theta_r = 20^\circ$$

Soient :

- $S(\theta, \varphi)$ le signal de sortie correspondant à une surface quelconque
- $\Delta(\theta, \varphi)$ la valeur de $S(\theta, \varphi)$ normalisées par rapport à $S(\theta, 0)$.
- $S'(\theta, \varphi)$ le signal de sortie correspondant à la surface de bois
- $\Delta'(\theta, \varphi)$ valeur de $S'(\theta, \varphi)$ normalisées de $\Delta(\theta_i, \varphi_i ; \theta, \varphi)$ de la même surface.

$$\text{On a : } \Delta(\theta, \varphi) = \frac{S(\theta, \varphi)}{S(\theta, 0)} \quad N(\theta, \varphi) \quad (\text{Voir calcul effectué ci-haut})$$

$$\Delta'(\theta, \varphi) = \frac{S'(\theta, \varphi)}{S'(\theta_i, \varphi_i)}$$

$\varphi = \pi , \quad \theta_i = 45^\circ$						
$\theta (\theta^\circ)$	0	10	25	40	60	80
$S'(\theta, \varphi)$ mV	100	95	90	80	63	25
$\Delta'(\theta, \varphi)$	1	0,95	0,9	0,8	0,63	0,25

Tableau III (Voir fig. 49)

$\varphi = \pi, \theta_i = 20^\circ$					
$\theta (d^\circ)$	0	15	40	55	75
$S' (\theta, \varphi)$ mV	172	169	132	95	57
$A' (\theta, \varphi)$	1	0,94	0,76	0,55	0,33

Tableau IV

En reportant les valeurs figurant dans les tableaux III et IV sur la figure 49, nous avons pu déterminer la fonction de correction de l'Appareil :

$$N(\theta, \varphi) \simeq \cos \theta.$$

Ceci justifie notre choix de la surface de bois polie comme étant une surface Lambertienne.

B.4.2. Indicatrice de Réflexion d'une surface quelconque : (voir fig. 49)

- Rose de sable

Nous mesurerons l'énergie réfléchiée par cette surface à différents endroits puis nous corrigerons ces valeurs à l'aide de la fonction de correction de l'appareil déterminée précédemment. Les mesures et calcul sont portés sur le tableau suivant :

$\varphi = \pi, \theta_i = 45^\circ$					
$\theta (d^\circ)$	0	25	55	80	90
$S (\theta, \varphi)$ mV	44	22	28	10	0
$A (\theta, \varphi)$	1	0,5	0,63	0,36	0
$N (\theta, \varphi)$	1	0,9	0,57	0,18	0
$\xi (\theta, \varphi)$	1	0,55	1,1	1,2	0

Tableau V - 52' -

— surface Lambertienne : $\cos \theta$
 —●— indicatrice de reflexion
 d'une surface de bois poli
 -valeurs non corrigees-.

—○— indicatrice de reflexion
 de la rose de sable.

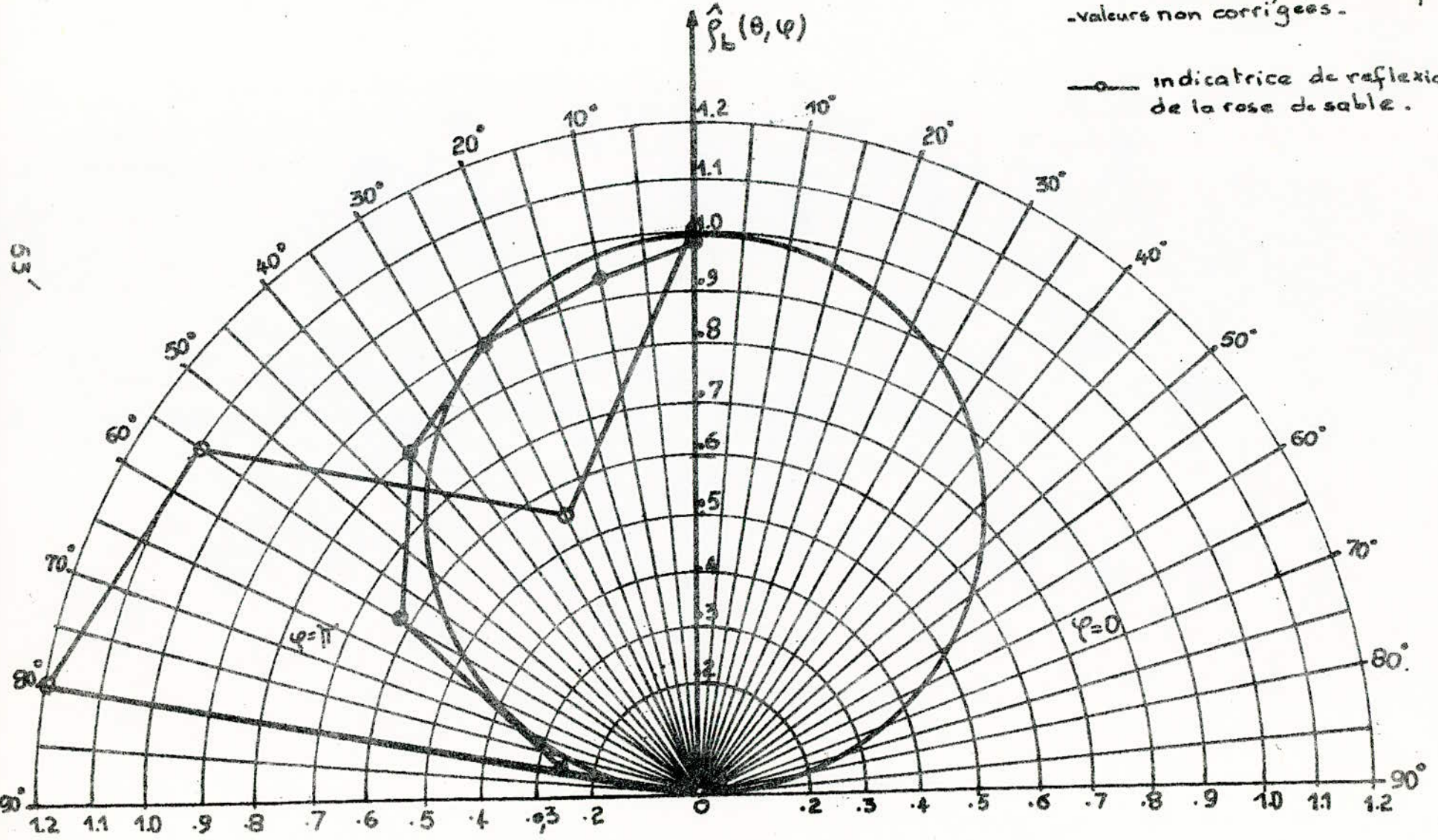


fig: 49

Indicatrice de reflexion.

V. MESURE DE TEMPERATURE

A. Position du problème

La mesure de la température de surface ne peut être effectuée avec les appareils ou instruments de mesure usuels.

L'une des méthodes les plus utilisées actuellement est basée sur la radiométrie, néanmoins celle-ci possède des inconvénients et n'amène pas au résultat escompté.

Nous nous proposons de réaliser un modèle qui possède l'avantage d'être efficace et simple.

La température de surface est l'un des paramètres important dans l'équation du Bilan énergétique.

- Equation du bilan énergétique à l'interface sol-atmosphère

$$\boxed{R_n + G + H + LE = 0} \quad 5-1$$

R_n = rayonnement net composé :

- de la fraction $(1-A)$ R_s du rayonnement solaire et dirigé vers le sol
- du rayonnement émis par l'atmosphère et dirigé vers le sol
- du rayonnement émis par le sol et dirigé vers le haut.

$$\boxed{R_n = (1-A) R_s + R_a - E \sigma T_g^4} \quad (\text{à la surface du sol})$$

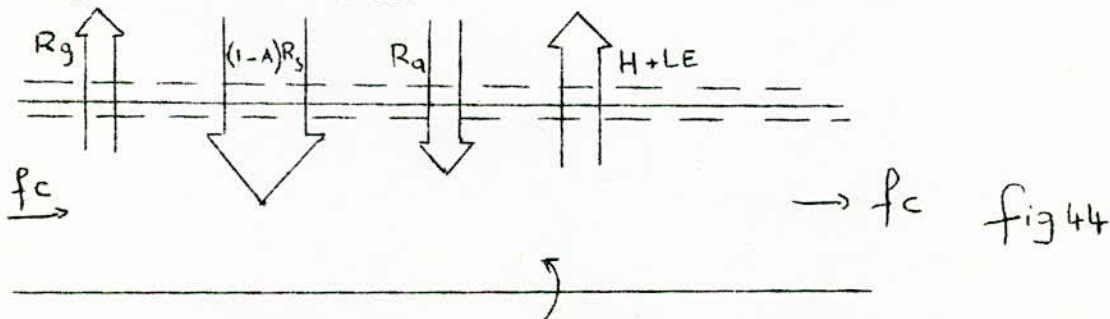
5-2

T_g : température de surface

H : flux de chaleur sensible (gagnée ou cédée par le sol)

LE : flux de chaleur latente (évaporation et évapotranspiration)

G : gain de chaleur du sol



les différents flux à l'interface sol-atmosphère
 f_c : dissipation de chaleur dans le sol par conduction.

Montage pratique :

Synoptique :

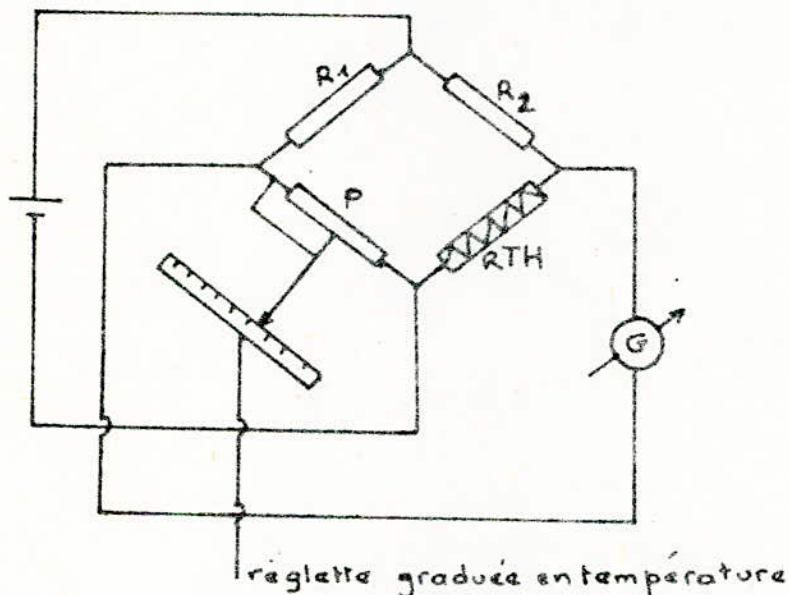
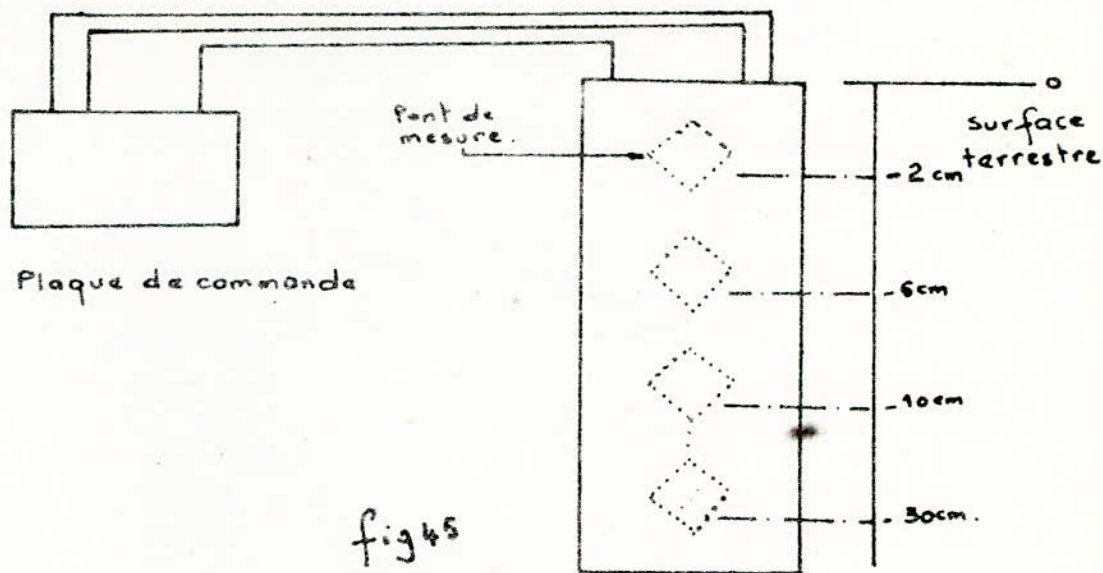


fig 46

Fonctionnement :

A l'équilibre du pont de mesure : $\frac{P}{R_1} = \frac{R_{TH}}{R_3}$, aucun courant ne passe dans le galvanomètre, celui-ci est au zéro.

Dès qu'il y a variation de température, R_{TH} varie et le pont est déséquilibré. L'aiguille du galvanomètre dévie. On rétablit l'équilibre, à l'aide du potentiomètre P (galvanomètre remis à zéro). On a alors la relation :

$$P = R_{TH} \frac{R_1}{R_2} = R_{TH} \text{ si } R_1 = R_2 = R$$

On peut alors traduire les variations du potentiomètre en variation de température. Ces variations sont directement lues sur une réglette graduée en température.

B.1 Détecteurs de températures : C.T.N (coefficient de température négatif)

Les C.T.N ou thermistances sont des résistances non linéaires thermo-sensibles caractérisé par un coefficient de température négatif variant rapidement avec la température.

Propriétés de la C.T.N. B8 3200 1P/1 k3

La relation entre résistance-température d'une C.T.N est approximativement de la forme :

$R = A e^{B/T}$; R valeur de la résistance pour une température donnée.
A et B sont des constantes.

La valeur de B est déterminée expérimentalement.

$$B = \frac{1}{\text{Log}A} \frac{\text{Log } R_1 - \text{Log } R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad 5.3$$

Le coefficient de température a pour expression : $\alpha = -\frac{B}{T^2}$

B.1.1 Caractéristique résistance - température

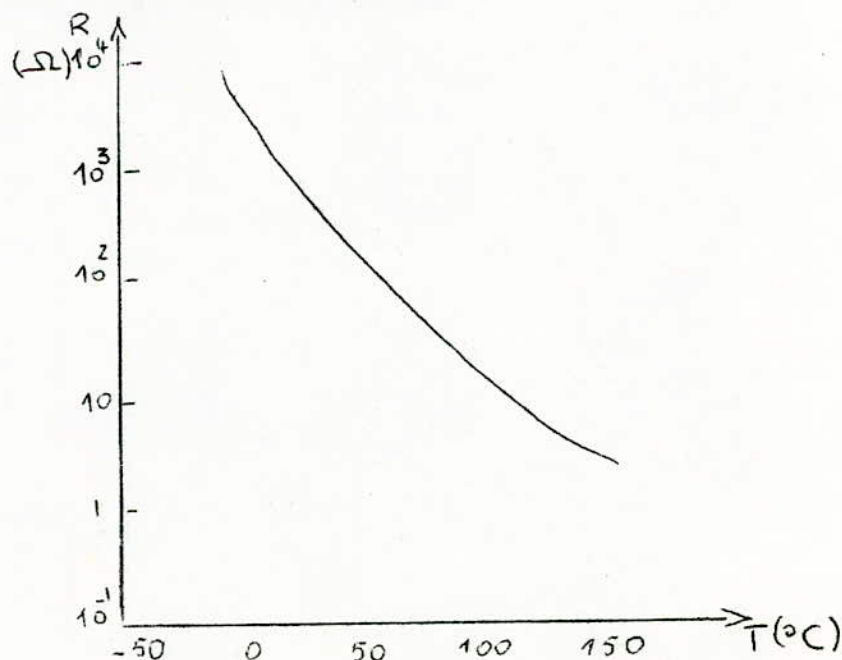


fig 46'

R.2 Caractéristique tension-courant

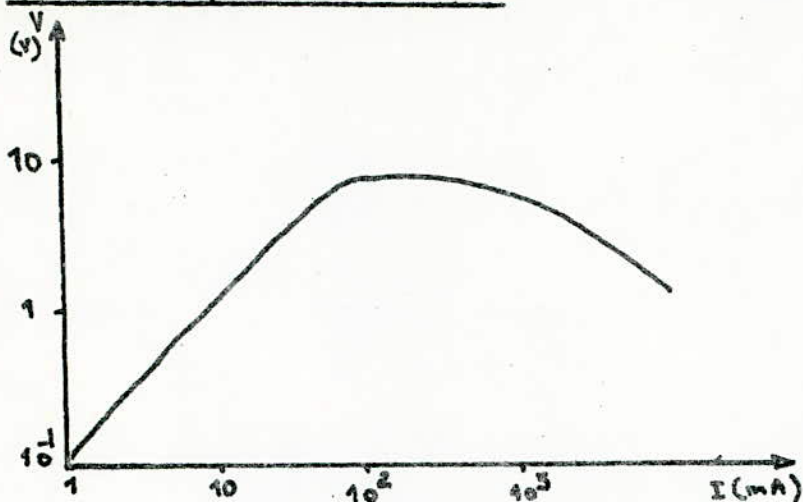


fig 47

Caractéristique électrique.

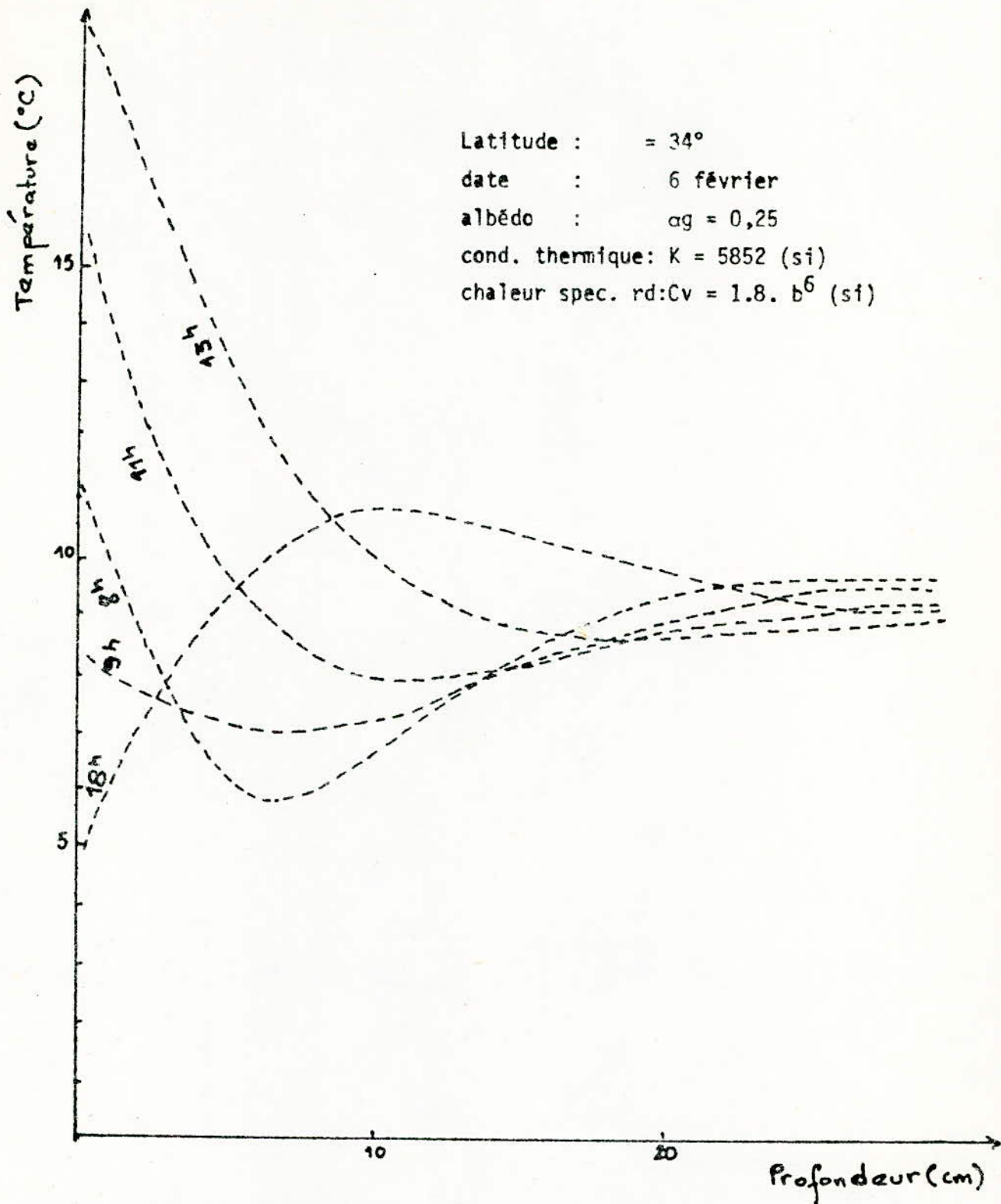
Appelation	R a T° 25°	W max	Facteur de dissipation	B _{25 - 85°C}
32001 PAK3	1,3 KΩ	1 W	10 mW/°C	5450 ± 5% (°K)

B.3 Etalonnage

- Réponse de la C.T.N 3200 IP IK3 a la variation de température

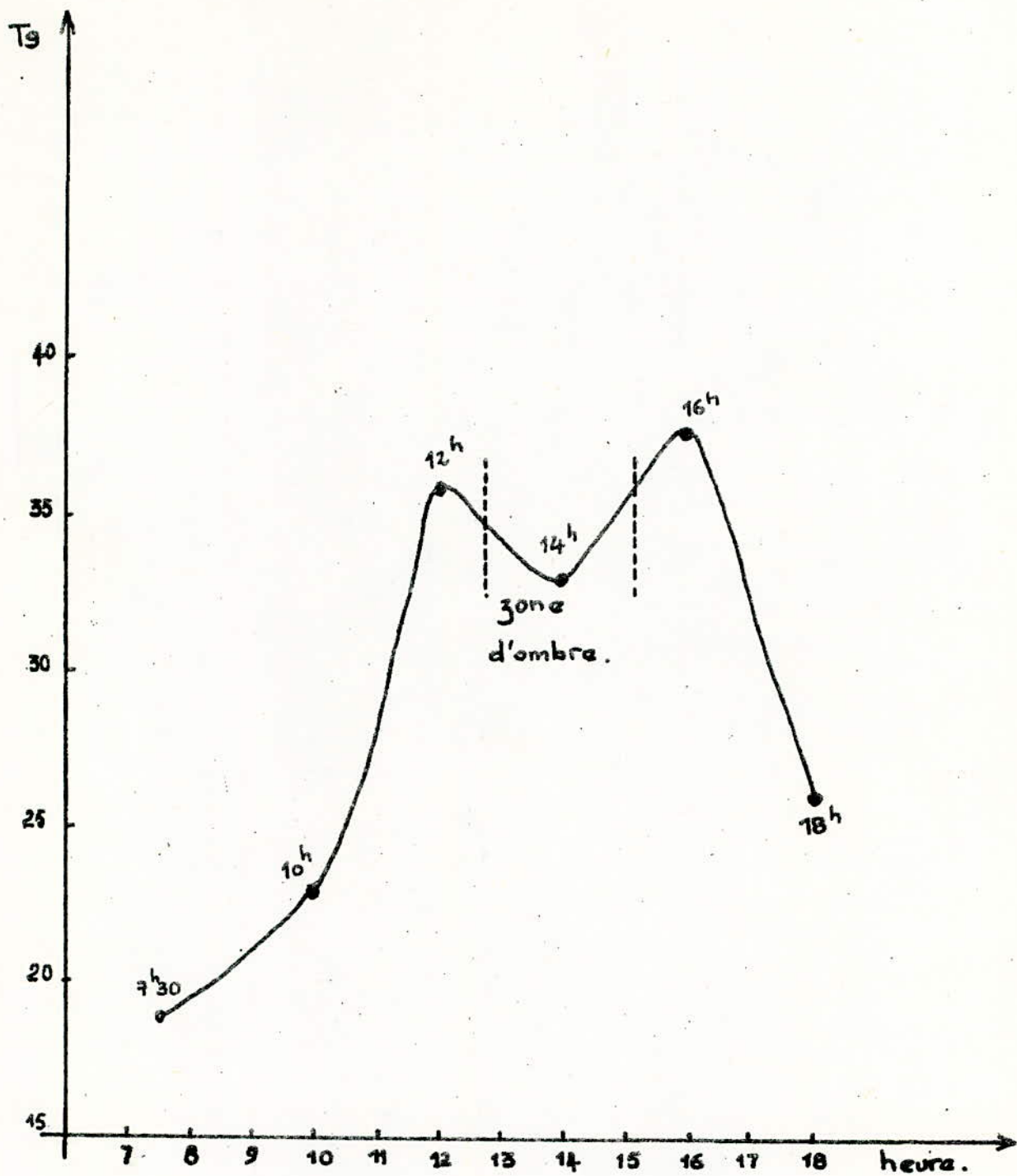
- Mesures expérimentales sur la 3200 IP IK3

T°C	0	1	2	3	4	6	12	16	20	25	27	37	40	45	50
R (KΩ)	5,19	4,8	4,5	4,2	3,9	2,9	2,2	1,7	1,32	0,98	0,9	0,47	0,4	0,3	0,24
	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ



Etude de la température dans le sol pour un cycle journalier :
 Courbes théoriques.

fig 48



Courbe donnant la température de surface pour un cycle Journalier.

• dans la zone d'ombre notre système de mesure a été caché au soleil par un obstacle.

C O N C L U S I O N

-----o o o o o-----

Lors de la mise au point de l'Appareillage de mesure de réflectivité, certains problèmes ont été rencontrés :

- La Photorésistance utilisée possédant un temps de réponse assez grand nous oblige à travailler avec une fréquence de modulation proche de 100Hz. Cette fréquence est cause de bruit (lorsqu'on travaille dans le laboratoire) car elle est de l'ordre de grandeur de celle de l'éclairage.
- Les lentilles utilisées ont un indice de réfraction faible, ce qui fait "perdre" par réflexion une partie du rayonnement qui devrait être captée par la photorésistance.
- L'intensité lumineuse émise par la L.E.D. (LD 57C) est faible vu que l'attaque en courant de cette dernière est limitée.
Concernant la mesure de Température, l'inconvénient majeur réside dans le manque d'une source de température réglable pour l'étalonnage en température. Ceci nous a obligé à utiliser une méthode "artisanale" (chauffer de l'eau à différentes températures).
Malgré ces difficultés, nous avons réussi à mesurer la réflectivité bidirectionnelle et la température du sol, nous permettant ainsi de classer les objets selon le critère de réflectivité et faciliter la résolution de l'équation du bilan énergétique.

En comparant l'indicatrice de réflexion de la rose de sable et de celle de la surface de bois poli, il apparaît une nette différence entre les deux tracés (fig. 49). Par une analyse in situ, la rose de sable est une roche très rugueuse alors que la surface de bois prise était polie.

Ce résultat nous permet alors d'établir un dictionnaire d'indicatrices de réflexion pour un classement zonal selon l'état de surface de la région analysée.

Pour la partie température, le but fixé a été atteint (mesure de la température de surface) ; de plus les courbes obtenues nous amènent à dire que le sol transmet la chaleur selon un mode propre (fig. 50), cette constatation donne alors un nouveau critère de classement des sols, cette fois selon leur manière de conduire la chaleur.

B I B L I O G R A P H I E

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Principes Physiques et Mathématique de la télédetection

Cours d'été 1978

WING HING NGAI *Mesure de l'émissivité pour la Télédetection infrarouge thermique . Thèse de docteur de spécialité - Strasbourg 1980.*

H. CARTE, M. DONKER : *Théorie pratique des dispositifs Photoélectriques.*
Bibliothèque technique Phillips 1964

Abdelkader ABDELLAOUI *Notion de base pour la télédetection 1977*

Abdelkader ABDELLAOUI I.R. *Rapport Scientifique Juin 1979*

European Space Agency (Agence Spatiale Européenne).

Earth Observation from space and management of planetary resources.

Toulouse Mars 1978.

C. Morgier, P. Meylan, A. Muzy

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Traitement d'Image par classification.

- E R R A T A -

- Page 8 : Au paragraphe C.1.2.
Lire, seulement classification.... du rayonnement.
- Page 28 : Avant dernière ligne
Lire, chaque canal LANDSAT
- Page 30-32: Transistors 2N2222 NPN ; 2 N 2219 : NPN
- Page 39 : Ajouter :
Modèle de mesure θ_i : Angle entre la normale et le rayon V_s
- Page 41 : Avant dernière ligne
Lire α à la place de a
- Page 45 : Lire $R_s(\beta_i) R_s(o) \exp(-\beta_i^2/\beta_s^2)$
- Page 49 : n'existe pas