

2ca

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
C.S.T.N. LABORATOIRE DE TELEDETECTION

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

THESE D'INGENIORAT
OPTION ELECTRONIQUE

TELEDETECTION RADIOMETRIQUE
Etude et réalisation d'un système de mesure
monospectral bande visible (0,6 - 0,7) μ m.

Proposé par :
A. ABDELLAQUI
Docteur de spécialité

Etudié par :
Rania BOUBEKEUR
Nassira CHERID



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

C.S.T.N. LABORATOIRE DE TELEDETECTION

THESE D'INGENIORAT
OPTION ELECTRONIQUE

TELEDETECTION RADIOMETRIQUE
Etude et réalisation d'un système de mesure
monospectral bande visible (0,6 - 0,7) μm .

Proposé par :

A. ABDELLAQUI

Docteur de spécialité

Etudié par :

Rania BOUBEKEUR

Nassira CHERID

REMERCIEMENTS :

Nous remercions Monsieur A. ABDELLAOUI
Chercheur au C.S.T.N pour nous avoir reçu dans son
laboratoire de Télédétection.

Nous tenons à remercier particulièrement
Messieurs : R. LABGAA, HALIMI et BOUMGHAR pour leur
aide pratique et matérielle.

Nos vifs remerciements à Messieurs /
BOUBEKEUR et CHERID pour leur aide matérielle.

Nous remercions : Monsieur le Directeur
et le personnel du lycée technique de Lafarge pour leur
participation au tirage de ce polycopé, Monsieur LAZIB
chargé de tirage au CSTN, Monsieur A. AIT-ALDJET pour
nous avoir aidé à la traduction de certains ouvrages de
télédétection et tout le personnel du laboratoire IV du
C.S.T.N.

Enfin nous remercions nos camarades de
l'école polytechnique en particulier Malika, Merzouk
Wahida, Saïd et El-Hadj.

تحتوي دروسنا هذه على إيضاح علاقة بين
الأشعة المعكوسة من طرف الأشياء الموجودة
على سطح الأرض وطبيعتها

وحد بحث للمبادئ التي مررنا بها في الإشعاع
الكهرطيسي ثمنا بإيجاز سلسلة قياس مكوناته من:
- جهاز بحث الأشعة

- جهاز الإلتقاط الأشعة من المجال (0.6 - 0.7) ميكرومتر
ثم دروسنا نموذج رياضي للحصول على رسوم
بيانية للتعبير عن ذات الأجزاء

Notre travail consiste à établir une relation entre le rayonnement réfléchi par les différents objets ou surfaces et leur nature .

Après un rappel théorique des principes de la télédétection du rayonnement électromagnétique , des capteurs et de leur calibration , nous avons réalisé un système de mesure constitué d'un récepteur système d'acquisition du rayonnement dans la bande $(0.6 - 0.7) \mu m$; ensuite nous nous avons établi un modèle mathématique pour déterminer des courbes de réflectance bidirectionnelle .

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I . Definitions et principes de télédétection .	- 4
II . Etude de la réflexion et son application	- 14
III . Etude des capteurs .	- 21
IV . Calibration	-30
V . 1 .OPTOELECTRONIQUE	- 38
V . 2 .Systeme de mesure	-48
VI . METHODE DE MESURE DE REFLECTANCE BIDIRECTIONELLE .	-63
CONCLUSION .	- 76
ANNEXE .	

££££/££££

INTRODUCTION

APERCU SUR LA TELEDETECTION

La télédétection est un ensemble de techniques qui permettent d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur les surfaces de la terre à partir des mesures faites à distance sur le rayonnement électromagnétique (visible ou non) émis ou réfléchi par les surfaces observées.

D'après cette définition, l'homme depuis toujours, fait de la télédétection tout simplement en utilisant sa vue. La forme, la couleur ou le brillant sont transmis par l'intermédiaire de la lumière réfléchie par les objets et nous permettent de les reconnaître à distance. Cependant l'oeil humain, bien qu'il soit un merveilleux instrument, reste limité dans ses possibilités. En particulier, il ne donne que des informations qualitatives, et il ne capte les ondes électromagnétiques que dans le domaine très restreint des rayonnements visibles, de plus notre cerveau ne peut mémoriser tout ce qui est vu par l'oeil, pour une exploitation ultérieure des images. Enfin tant que l'homme reste au niveau du sol, son champ de vision est limité et il ne peut observer que les objets relativement proches.

Pour pallier ces limitations, les spécialistes de la télédétection utilisent tous les moyens que les différentes techniques mettent à leurs dispositions. Ils ont pu, ainsi à la conjugaison des moyens photographiques et de la vidéo, prendre du recul, par rapport à la surface du sol et saisir instantanément l'ensemble d'un paysage. L'utilisation des films spéciaux tels que les films à infra-rouge et des capteurs tel que le radiomètre à balayage ou le radar, a permis d'étudier des domaines des rayonnements électromagnétiques encore inexplorés. Le développement de l'informatique a mis à la disposition des spécialistes des moyens considérables pour le traitement et l'exploitation des images, enfin les techniques spatiales automatiques et habitées, ont permis de franchir un nouveau pas en offrant une vue plus globale de la terre.

UTILISATION DE LA TELEDETECTION

Nous commençons à peine à explorer les possibilités immenses qu'offre la télédétection pour une meilleure connaissance des ressources naturelles de notre planète. Les images obtenues à partir d'avions, de ballons ou de satellites intéressent les disciplines nombreuses, parmi lesquelles nous nous contenterons d'énumérer les plus prometteuses :

.../...

1) L'AGRICULTURE :

L'étude du rayonnement solaire réfléchi par la végétation dans différents domaines du spectre électromagnétique, devait permettre de reconnaître les différentes espèces végétales, de suivre leur évolution d'établir des statistiques agricoles, de prévoir des récoltes (avec les conséquences économiques qui en découlent) de déceler les maladies ou des parasites dès leur apparition et en conséquence d'intervenir plus rapidement pour protéger les récoltes.

2) LA SYLVICULTURE :

Comme pour l'agriculture, la télédétection rendra possible l'identification des différentes essences d'arbres. Elle contribuera à un meilleur inventaire et à une exploitation plus rationnelle de notre capital forestier elle facilitera également la prévention des incendies.

3) L'HYDROLOGIE ET LA POLLUTION DE L'EAU :

L'estomation des quantités d'eau contenues dans les masses neigeuses, les glaciers, les lacs, les rivières etc... Et la surveillance de leur pollution à l'échelle planétaires.

Aideront à résoudre un problème qui se pose avec de plus en plus d'acuité celui de nos réserves d'eau douce.

4) LA GEOLOGIE ::

L'étude des structures géologiques à grande échelle permettra de mettre en évidence de nouveaux gisements de minéraux ou d'hydrocarbures.

L'observation des volcans pourra être développée et la recherche de zones de l'écorce terrestres propices à l'exploitation de l'énergie géothermique que sera possible.

5) L'ÉNERGIE :

5) LA PECHE :

L'étude de la surface des océans et la sélection des régions favorable à la présence de bancs de poissons auront des conséquences considérables sur l'industrie de la pêche qui doit être rendues à la fois plus efficace et plus rationnelle.

6) L'AMENAGEMENT ET L'URBANISATION :

La télédétection pourra aider à planifier l'urbanisation, l'utilisation des sols, l'aménagement du territoire et l'organisation des régions cotières, en fournissant des données permettant de prendre les décisions en toute connaissance de cause.

7) LA PROTECTION CIVILE :

L'étude de la formation et de l'évolution des catastrophes, naturelles permettra de mettre en évidence les connaissances qui président à leur naissance et partant d'alerter ensuite les populations menacées.

PLAN DU CHAPITRE I

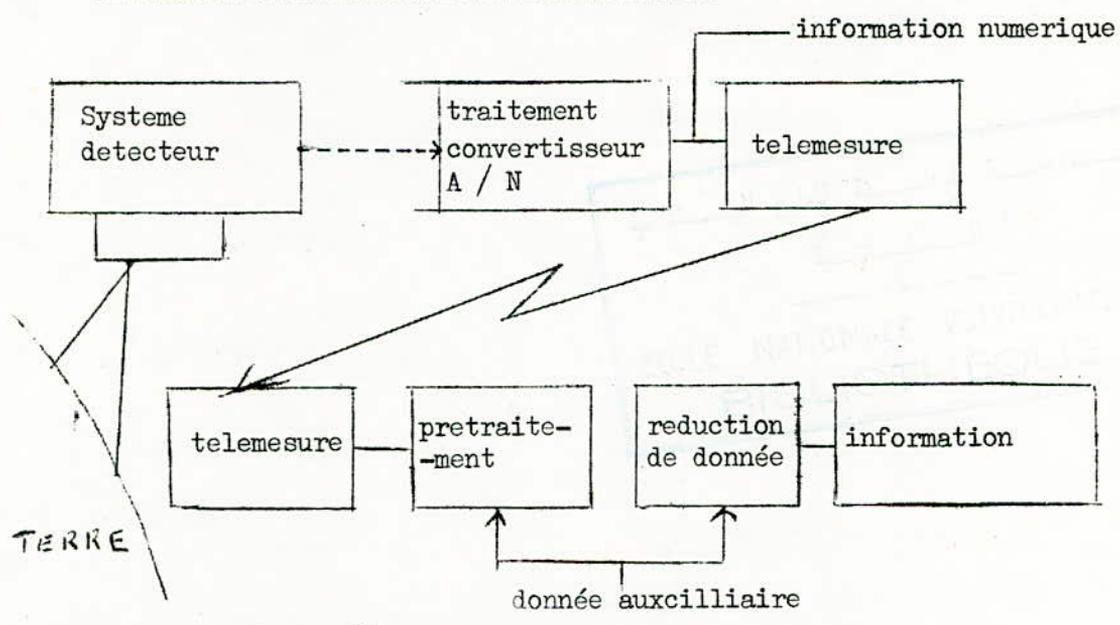
- I .Definitions et Principes de la téledetection .
- I . 1 . Principes
- I .2 . Interaction entre le rayonnement electromagnétique
et la surface .
- I . 3 . Influence de l'atmosphere sur le rayonnement electromag
electromagnetique .

...../.....

DEFINITIONS ET PRINCIPES DE LA TELEDETECTION

I.1 La télédétection peut être définie comme la mesure à distance des propriétés du milieu, cette mesure est faite en plusieurs étapes et ceci à l'aide d'un système de mesure qui comprend généralement une source de lumière, un capteur et en utilisant comme véhicule d'information entre la surface à étudier et le capteur le rayonnement électromagnétique.

I.1 a - Phases d'une opération de mesure en T.D



I.1 b - Sources de lumière

La source de lumière utilisée peut être naturelle (soleil , lune , étoiles) et on qualifie le système de passif . Elle peut être artificielle (lazer , radar) et le système est dit actif . - ou peut aussi utiliser les deux sources en même temps et le système est appelé actif passif corrélé .

I.1 c - Capteurs

Les capteurs sont des appareils qui reçoivent les ondes électromagnétique émises ou reflechies par les objets , on distingue là aussi deux sortes de capteurs .

- Capteurs actifs

ils sont à la fois émetteurs et récepteurs ils possèdent une source de radiation émettant dans une longueur d'onde déterminée on irradie la surface à étudier , cette dernière absorbe , transmet et reflechit . le rayonnement mais le récepteur ne reçoit que le rayonnement reflechi .

- Capteurs passifs

Ces derniers enregistrent d'une part les radiations provenant du rayonnement solaire qui sont réfléchies par les objets et d'autre part les radiations provenant d'une auto-émission, ces appareils uniquement récepteurs sont souvent nommés " Scanners " ou senseurs .

I.1 d - Rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique c'est l'énergie créée en tout point de l'espace par un double champ périodique : électrique et magnétique . Ce rayonnement se propage à une vitesse constante C dépendant du milieu de propagation dans le vide $C = 310^8$ m/s. **NON DISTINGUE** successivement en partant des ondes inférieures .

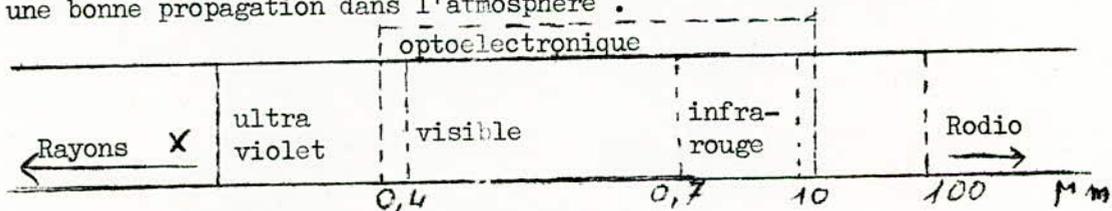
- rayons cosmiques
- rayonnement γ
- rayons X
- le spectre visible, infrarouge , micro-ondes ou hyperfréquences du domaine radar et faisceaux hertziens puis on a les fréquences métriques etc ...

pour l'instant le domaine utilisé en télédétection sont

- 1 . l'ultra violet (290 - 400) nm qui est utilisé mais correspond à des longueurs d'onde fortement absorbées par l'atmosphère .
- 2 - Cette bande est suivie par le domaine visible (400 - 700) nm et dans cette bande on a peu d'absorption .
- 3 - bande infra-rouge

proche infra-rouge (700 - 900) nm
 infra-rouge moyen (3000 - 5500) nm
 infra-rouge thermique (8 - 14) μ m

4 - on trouve ensuite les hyperfréquences ou on **aborde** des longueurs d'onde d'ordre millimétrique et plus elles sont utilisées car elles ont une bonne propagation dans l'atmosphère .



- avantage du rayonnement électromagnétique .

Ce rayonnement est utilisé à cause des nombreux avantages qu'il offre .

- raisons techniques , la technologie de ce rayonnement est très avancée .
- sa richesse en information .
- on a vu que ce spectre est constitué de plusieurs bandes visibles et infra-rouge , la bande visible nous donne des informations sur la surface et la bande infra-rouge nous donne les propriétés physico-chimiques .

I.2. INTERACTION ENTRE LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE ET LA SURFACE .

Le rayonnement électromagnétique ne se manifeste que par ces interactions avec la matière celle ci est susceptible selon sa nature et son état de produire un tel rayonnement (émission propre).

Tandis qu'un rayonnement rencontrant la matière peut y provoquer et subir des modifications , mais avant d'introduire les interactions des radiations avec la matière on doit commenter la transmittance spectrale et la reflectance spectrale .

L'absorptance selective est commune aux deux , cependant elle affecte beaucoup plus la transmittance spectrale .

On peut facilement estimer la composante spectrale du flux transmis qui est fortement influencé par la différence entre la composante spectrale du flux incident et l'absorptance spectrale propriété du milieu .

Un des but de la recherche en télédétection c'est de connaitre les caractéristique (Pysionomie) du sol et d'identifier sa nature à l'aide du rayonnement réfléchi ou flux rayonné par ces derniers.

Ce flux traverse l'atmosphère ou il subit des atténuation avant d'être capté par le système détecteur, ce problème peut être résolu en supposant que la résolution spectrale est suffisante pour identifier les différentes caractéristiques du sol et aussi en supposant que nous pouvons corriger les effets atmosphériques .

I.2.a. FLUX REFLECHI ET EMIS :

Le flux réfléchi par les objets au sol est une partie du rayonnement solaire spectrale réfléchi par ces mêmes objets **est modifié par les** caractéristiques de ces derniers telle la reflectance spectrale et l'emittance spectrale (fonction de la température et de l'emissivité) . Généralement le rayonnement est partiellement réfléchi et transmis avec ou sans modification .

L'equation générale des interactions du flux rayonné avec une surface est:

$$\Phi_{NE} + \Phi_{Nr} + \Phi_{Na} = \Phi_{Ni} \quad (1)$$

En divisant l'equation par , on obtient l'equation de conservation de l'energie d'un objet .

$$r(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1$$

- $r(\lambda)$ /: LA réflectance spectrale $\frac{\Phi_{Nr}}{\Phi_{Ni}}$
- $\tau(\lambda)$ /: La transmittance spectrale $\frac{\Phi_{NT}}{\Phi_{Ni}}$
- $\alpha(\lambda)$ /: L'absorptance spectrale $\frac{\Phi_{Na}}{\Phi_{Ni}}$

En teledetection on mesure le flux rayonné provenant de la source. En générale ce flux est une combinaison du flux solaire réfléchi et le flux thermique d'ou le flux total est:

$$\Phi_{\lambda}E = \underbrace{\Phi_{\lambda}r}_{\text{(refléchi)}} + \underbrace{\Phi_{\lambda}e}_{\text{(émis)}}$$

I.2.b LA LUMINANCE :

La radiance ou luminance qui arrive au niveau d'un detecteur se trouvant dans une plate forme à une hauteur importante est constitué de deux composantes:

Le rayonnement électromagnétique dispersé par L'atmosphere dans la direction de direction du detecteur est notée LA et la deusième composante; le rayonnement électromagnétique qui atteint la surface de la terre et reflechi dans la direction du detecteur est elle est notée L

LA luminance totale est donnée par :

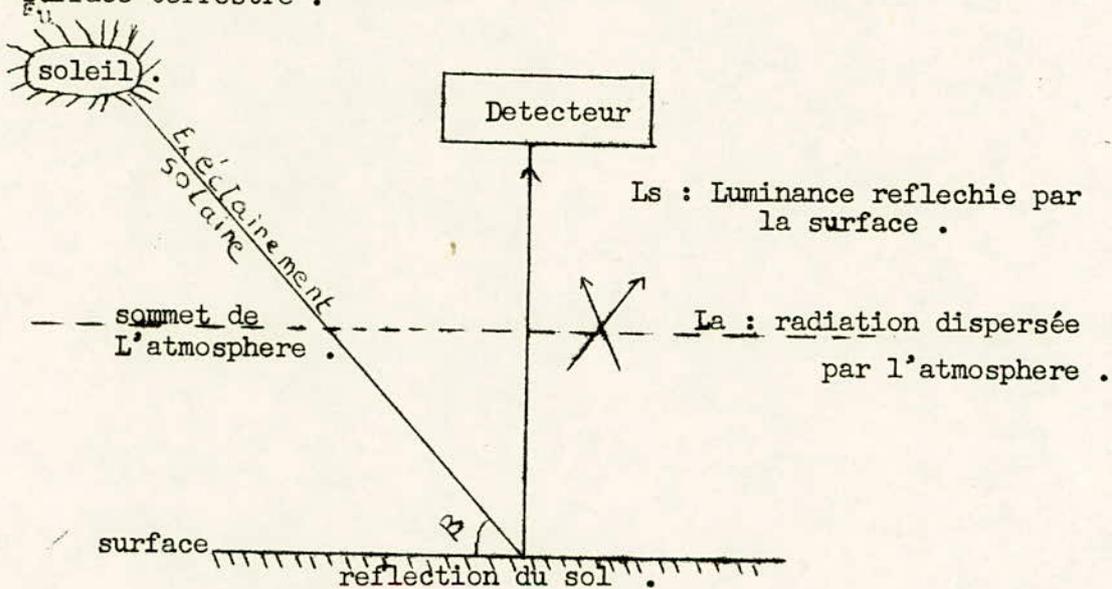
$$L = LA + LS$$

L'eclaircement solaire E est donné dans un interval spectral qui atteint la surface de la terre est :

$$E_{\lambda} = A \sin \beta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \tau(\lambda) d\lambda$$

E : C'est l'éclairement spectral solaire au sommet de l'atmosphère.

$\tau_{\beta}(\lambda)$: Transmittivité monochromatique de l'atmosphère dépendante de l'angle β ; Etant l'angle fait par la direction du rayonnement incident et la surface terrestre .



La fraction d'éclairement réfléchi par la surface dans la direction de la plate forme de detection dépend de la réflectance ρ qui est fonction des angles des incidences, de reflection, de la longueur d'onde et de la surface .

La luminance spectrale réfléchi par le detecteur vers la terre est donnée par : $L_s = \frac{\sin \beta}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \tau_{\beta}(\lambda) \tau_z(\lambda) \rho(\lambda) R(\lambda) d\lambda$

$\tau_z(\lambda)$: Transmittivité monochromatique de l'atmosphère dans la direction zénitale zénitale .

$R(\lambda)$: Reponse spectrale qui est fonction du canal étudié .

LA est donnée par : $LA = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \rho'(\lambda) R(\lambda) d\lambda$

$\rho'(\lambda)$: Réflectance atmosphérique

En combinant les deux equations de la luminance LA et LS on obtient la

luminance totale . $L = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R(\lambda) [\tau_{\beta}(\lambda) \tau_z(\lambda) \sin \beta + \rho'(\lambda)] d\lambda$

Ce modele mathematique de luminance ne s'applique que si on travaille dans la bande visible et proche infra_rouge .

I.2 C MESURE DE RAYONNEMENT :

Les appareils de mesure presente au flux provenant des objets une surface d'entrée (ds) et soit (l) la luminance de l'objet dans la direction du capteur dans un angle solide (dw) et soit (t) la durée de la mesure alors l'énergie mesurée (w) = $L \cdot t \cdot ds \cdot dw$.

donc la mesure porte sur la luminance qui est proportionnelle à la reflectance et comme (W) dépend de deux directions celle de l'eclaircissement incident et celle de la visée, pour la bande du spectre visible, pour les bandes de longueur d'ondes hyperfréquences et infra-rouge la luminance mesurée comporte la reflection qui est encore importante dans la bande (3 - 5) μm ou elle peut représenter jusqu'à 50 % du signal pour la bande (8 - 14) μm la reflexion est négligeable , la luminance est due essentiellement à l'émission propre de la surface analysée.

I.3 - Influence de l'atmosphère sur le rayonnement electromagnetique

Le comportement de l'atmosphère relativement au transfert du rayonnement vers le detecteur dépend à la fois de la longueur d'onde et de la composition atmosphérique .
 pour ($\lambda < 0,3 \mu\text{m}$) : le rayonnement est fortement absorbé notamment par l'ozone (O_3)
 dans le visible (0,4 - 0,7) μm on a surtout le phénomène de diffusion , dans l'infra-rouge moyen on a l'absorption qui est due aux constituants tel que l'oxygène , le gaz carbonique et la vapeur d'eau .
 Mais ces phénomènes interviennent pour des longueurs d'ondes bien définies séparées par ce qu'on appelle des zones de transparences ou fenêtre atmosphériques .

I.3 a - Fenêtre atmosphériques

Théoriquement en télédétection , toute la gamme des ondes electromagnetiques devrait être utilisée : ultra violet aux ondes radio ; cependant bien que la technologie se soit largement développée avec l'apport de nouveaux capteurs et d'appareils spéciaux , les mesures restent limités à un certain nombre de gammes d'ondes appelés " fenêtres spectrales " .

1) fenêtre de l'ultra violet et visible
 c'est le domaine de la photographie aeriennne et des appareils à balayage multispectraux.

2) fenêtre du proche infra-rouge
 dans cette region on a de grandes bandes d'absorption dues à la vapeur d'eau (H_2O) . Le domaine de proche infra-rouge joue un rôle particulièrement important dans la mesure ou les longueurs d'ondes correspondantes sont celle des ondes fortement reflechies par la chlorophille et donc par la surface terrestre .

3) fenêtres de l'infra-rouge moyen
 pas de possibilités de photographies , on mesure ici l'énergie electromagnetique rayonnée (energie emise) par le corps terrestre.

4) fenêtres de l'infra-rouge lointain
 on a de très grandes bandes d'absorption de vapeur d'eau et de gaz carbonique dans ce domaine , on mesure la température de la surface terrestre .

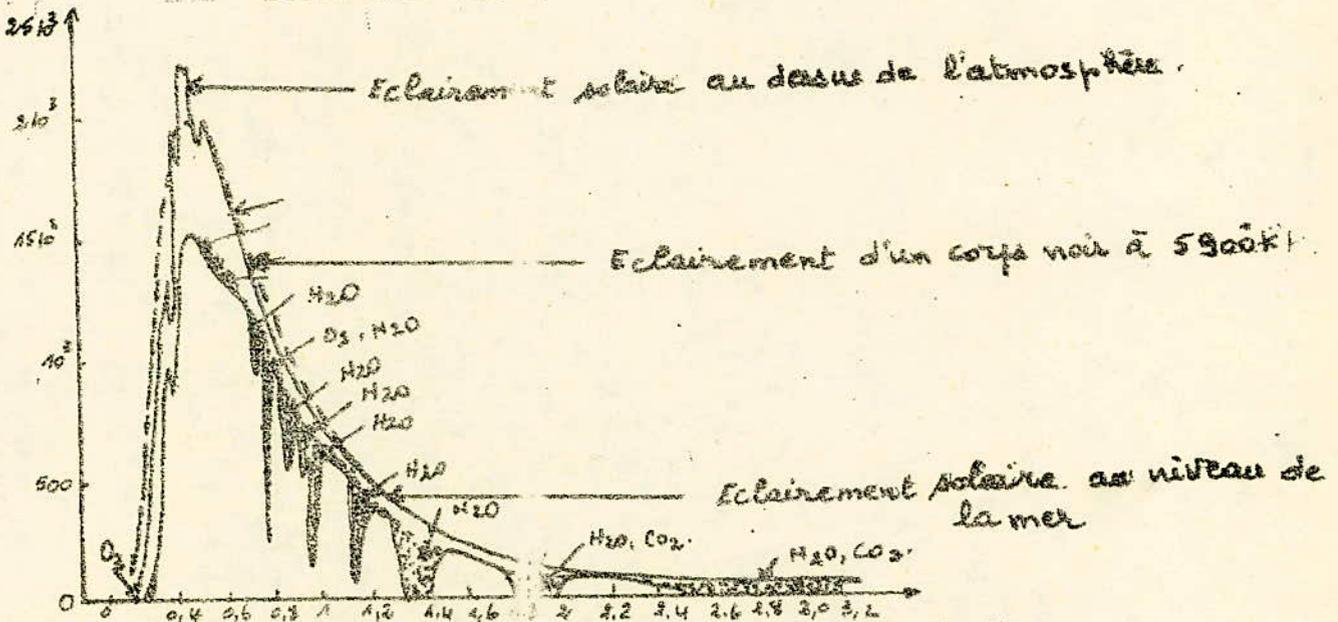
5) fenêtres des micro-ondes

C'est le domaine des radars, on a deux possibilités

- les radiomètres mesurant l'énergie électromagnétique émise naturellement par les corps terrestres dans ces longueurs d'ondes.
- les radars proprement dits émettent artificiellement de l'énergie dans ces longueurs d'ondes et mesurent l'énergie réfléchie.
- principales fenêtres

U - violet visible mm	proche infra- rouge mm	inf-rouge moyen mm	inf-rouge thermique mm	micro-onde mm
(0,3-0,77)	0,77 - 0,91	3,5 - 4,16	8,0 - 9,2	2,06 - 2,22
	1,0 - 1,12	4,5 - 5	10,2 - 12,4	3,0 - 3,75
	1,19 - 1,34		17,0 - 22,0	7,5 - 11,5
	1,55 - 1,75			20,0 -
	2,05 - 2,4			

La première fenêtre atmosphérique est située dans la partie visible, dans cette bande les photons sont très faiblement absorbés alors que dans le proche infra-rouge on a de grandes bandes d'absorption dues à la vapeur d'eau.



Courbe représentant l'éclaircissement spectral solaire à différents niveaux et différentes absorptions dans la bande (0,2 - 3,2)

1.3 b - Effets atmosphériques

a - atténuation atmosphérique

l'atténuation qui affecte le rayonnement électromagnétique à travers l'atmosphère est due à l'absorption sélective de gaz, de la vapeur d'eau et à la diffusion atmosphérique. L'atténuation due à l'absorption joue un rôle mineur dans la partie visible du R.E.M elle est de l'ordre de 10 % mais malgré tout il existe des bandes d'absorption de l'ozone à 690 nm et l'oxygène moléculaire à 760 nm d'où on déduit qu'il existe une absorption d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde qui suit la loi

$$I_A = I_{0A} e^{-\alpha_A m_A}$$

I_{0A} : intensité de rayonnement avant la pénétration dans l'atmosphère

I_A : intensité après absorption

m_A : coefficient d'air-masse lié au trajet atmosphère du rayonnement

α_A : coefficient d'extinction qui est égal au coefficient d'absorption plus (+) le coefficient de diffusion de l'atmosphère.

Ce dernier coefficient doit en réalité être séparé en deux (2)

composantes : nous avons

$$\alpha_A = \int \alpha_A'' p dh$$

avec p = densité du milieu

dh = épaisseur d'atmosphère traversée

$$\alpha_A'' = \alpha_A'' + \sigma_A''$$

α_A'' : coefficient d'absorption

σ_A'' : coefficient de diffusion

les bandes d'absorption de l'eau sont beaucoup plus importantes dans le rouge et le proche infra-rouge (0,7, 0,8, 0,9, 1,1) μm

b - Effet de diffusion

lorsqu'un rayon élémentaire rencontre sur son trajet des corps de dimensions même très petites, il subit une série de réflexion, réfraction et de diffraction qui dispersent dans toutes les directions, la radiation élémentaire incidente c'est ce qu'on appelle le phénomène de diffusion, cette diffusion se présente différemment suivant la dimension de la particule

1 Diffusion non sélective

Cette diffusion est causée par la poussière, les brumes et les nuages. Les dimensions des particules sont dix (10) fois plus grandes que la longueur d'onde de la lumière. Ces particules dispersent toutes les longueurs d'onde d'une manière égale, par conséquent les nuages et la brume apparaissent sans couleur (blanche) et parfois leur vapeur d'eau (particules d'eau condensées sont colorées)

2 Diffusion sélective

La diffusion de Mie et la diffusion de Raleigh sont les deux processus de la diffusion sélective.

a - Diffusion de Raleigh

elle est liée à des atomes ou molécules ayant une taille de l'ordre de $1/10$ et elle varie en λ^{-4} si $d \ll \lambda$

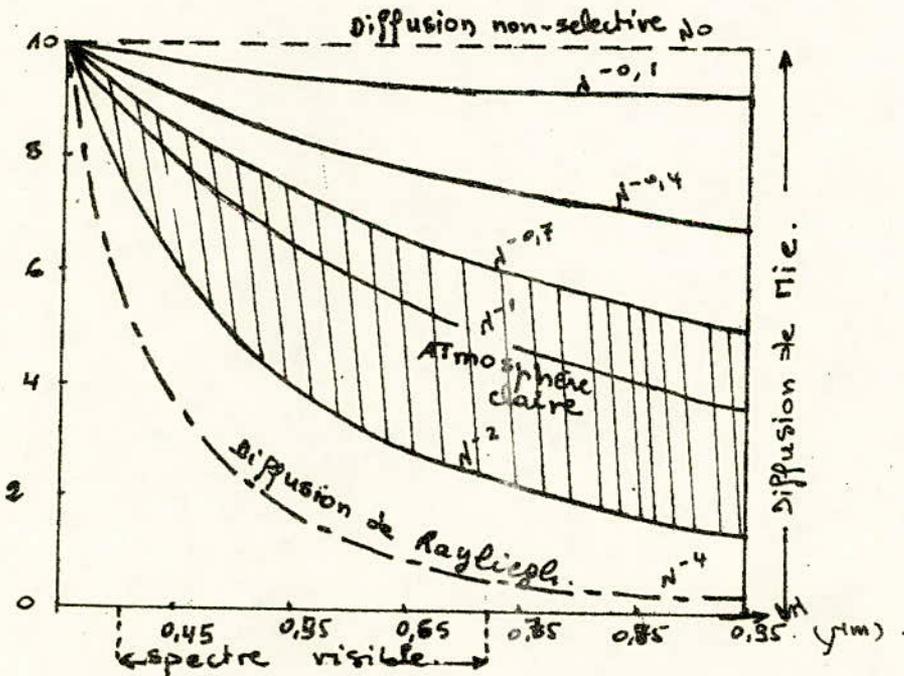
b - Diffusion de Mie

Cette diffusion est liée à des particules de tailles supérieures à $\lambda/4$ pour $d \approx \lambda$, on utilise la théorie de Mie, la diffusion est proportionnelle à λ^{-3}

Pour les particules ayant un diamètre $d \gg \lambda$, la diffusion est indépendante de la longueur d'onde ainsi on constate que la diffusion de Raleigh est beaucoup plus importante dans le bleu que dans le rouge ou le proche infra-rouge.

processus de diffusion atmosphérique

processus de variation	variation en fonction de λ	taille de la particule	genre de particules
selective	λ^{-4}	$\ll 0,1$	molécules de gaz,
Rayleigh	$\lambda^0 \text{ à } \lambda^{-4}$	$0,1 \text{ à } 10$	fumée, vapeur,
Mie	λ^0	> 10	brume
non selective			nuage, brouillard
			poussière



Courbe donnant la diffusion en fonction de la longueur d'onde

PLAN DU CHAPITRE II

- II. Etude de la reflexion et son application
- II. 1 .Etude de la reflexion .
- II. 2 Reflectance hemispherique conique P_H
- II. 3 ~~Reflectance Bihemispherique~~ P_C
- II .4 Reflectance bidirectionnelle P_B
- II. 5 Importance de la reflectance
- II .6 Albedo .

...../.....

II. Etude de la reflexion et son application

Dans la bande visible du spectre électromagnétique [0,4 - 0,7] μm la télédétection n'est qu'une extension moderne de la photographie aérienne, car celle-ci ne peut enregistrer que le rayonnement solaire (ou artificielle) réfléchi par les différents objets présents à la surface du sol, car ces derniers émettent par ailleurs un rayonnement propre dans l'ensemble du spectre et les différentes techniques employés visent à matérialiser sous formes d'image le rayonnement émis.
Paramètres définissant la mesure dans la bande (0,4 - 0,7) μm .

- Source de lumière
- Distribution spatiale
- Contenance en humidité
- Transmission atmosphérique
- Réflexion des objets

Ce dernier paramètre est la propriété la plus importante car le Scanner enregistre la luminance (Flux réfléchi) par la scène donnée dans les différentes bande de longueurs d'ondes d'ou l'importance de l'étude de ce paramètre.

II.1 Etude de la reflexion

Les expressions de reflexion apparaissent dans la litterature sous les différentes formes, notre objectif dans cette présente étude n'est pas d'étudier toute les formes de reflexion, mais plutôt de présenter seulement celles qui sont utilisées en télédétection. Tel que et l'albedo. Mais avant d'introduire ces deux termes, on doit définir certains types de reflexion en général.

II.a 1. Réflexion de surface

Elle se produit sur la surface de séparation à ce niveau ou distinguera suivant la rugosité de la surface soit,

- a - La reflection spéculaire: qui se produit lorsque la surface de séparation entre les deux milieux est plane.
- b - La reflexion diffuse: qui se produit lorsque la surface de séparation est rugueuse.

II.1.b. 2. Réflexion de volume

Cette reflection intervient lorsque l'onde peut pénétrer dans le milieu et suivant l'heterogeneité du milieu on distinguera :

- Réflexion diffusante.
- Réflexion non diffusante.

II.2 Réflectance Hemispherique conique PH FC

Elle est considérée comme le rapport du flux réfléchi d'une surface dans la direction de l'angle de mesure (duIFOV) terme défini par la suite, par le flux réfléchi dans cette même direction par un parfait lambertien.

$$P_H = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_r(\theta_r, \phi_r) d\Omega_r}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i}$$

θ_r et ϕ_r : angle zenithal et azimuthal de la source réfléchissante
 θ_i et ϕ_i : angle de zenith et azimuth de la source incidente
 L_r et L_i : valeur du rayonnement des sources réfléchissantes et incidentes en fonction de θ et ϕ

$$d\Omega_i = \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$$

$$d\Omega_r = \cos \theta_r \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r$$

M : émittance (rayonnement de la source réfléchie)

E : éclairement (rayonnement de la source incidente)

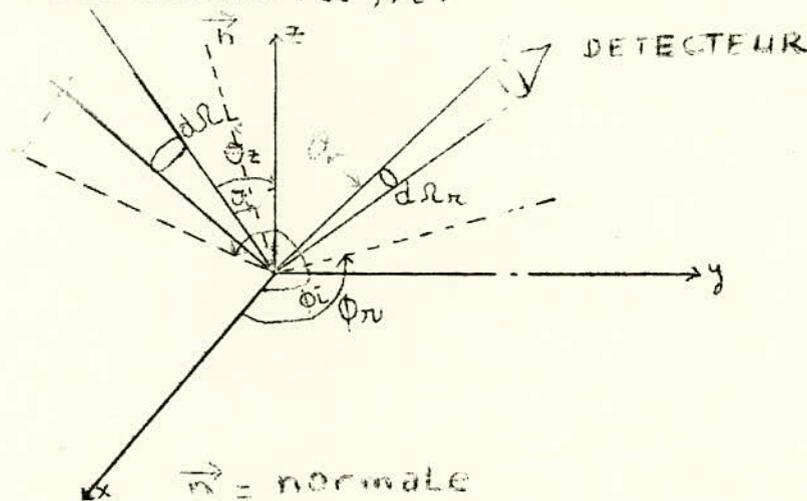
II.3 Reflectance bihemisphérique P_c
 on la définit comme suit :

$$P_c = \frac{\int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} L_r(\theta_r, \phi_r) d\Omega_r}{\frac{E}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} d\Omega_r}$$

$(\theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2)$: les limites du champ de zenith et l'azimuth du détecteur

II.4 Reflectance bidirectionnelle .

Énoncée par Kriebelen en 1976, c'est l'une des caractéristiques les plus importantes de la surface. Cette fonction est définie comme la relation entre le rayonnement réfléchi $dL_r(\theta_r, \phi_r)$ dans la direction (θ_r, ϕ_r) et le rayonnement incident $dL_i(\theta_i, \phi_i)$ dans la direction (θ_i, ϕ_i)



II.4.a on considère une source de luminance L_s de laquelle provient un flux incident capté par une surface A centrée à l'origine du système :

1) on a un flux incident donné par la relation :

$$d^2\phi = L_s \cos\theta_i d\Omega_i dA$$

ou $d^2\phi = dA \cdot dE$ avec dE éclairement de la surface .

Le flux réfléchi par un élément de surface dA dans une direction donnée, crée par un certain niveau de luminance dans cette direction, ces deux quantités sont proportionnelles à $d^2L = F d^2\phi$. dans la plus part des cas la fonction F dépend des angles d'émission et de réception tel que :

$$F = F(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$$

la luminance due au flux réfléchi par la surface (A) peut être trouvée par intégration de d^2L sur toute la surface .

$$dL = \int_A d^2L = \int_A F d^2\phi = \int_A F dE dA = dE \int_A F dA$$

$$dL = dE \int_A F(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) dA$$

d'où on a $dL = dE f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$
donc on tire la relation en f et F

$$f = \int_A F(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) dA$$

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$

comme on a la relation

$$dE = L_s \cos\theta_i d\Omega_i$$

et que

$$f(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_B$$

alors on a la réflectance bidirectionnelle

$$\rho_B = \frac{dL(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{L_s(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i d\Omega_i}$$

Cette relation peut être donnée aussi en fonction de la distribution de l'intensité réfléchi tel que

$$\rho_B = \frac{dI_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, I_i)}{d\Omega_i(\theta_i, \phi_i) I_i}$$

I_r : intensité réfléchi

I_i : intensité incidente .

II.4.b. Propriétés :

1. Propriété de symétrie

Théorie de HELMOLTZ

En s'appuyant sur le principe du retour inverse du rayonnement électromagnétique, on comprend que l'on puisse écrire

$$\rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_B(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$$

- Puissance reemise :

La puissance reemise par un élément de surface ds , dans l'angle solide

$$d\Omega_r \text{ est : } dP = L_r(\theta_r, \phi_r) \cos\theta_r d\Omega_r ds$$

$$dP = L_i(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i d\Omega_i \rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos\theta_i d\Omega_i ds$$

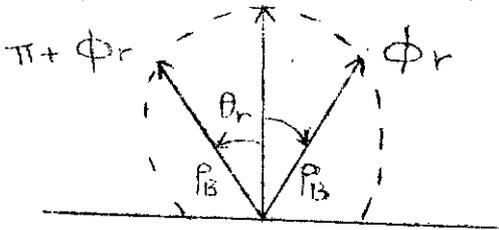
- Réflecteur Lambertie :

C'est un réflecteur dont la réflectivité ne dépend pas des angles de réflexion θ_r, ϕ_r on aura alors $\rho_B = \text{constante}$.

Indicatrice de reflectance

Les indicatrices sont des courbes ou représentation en coordonnées polaires des fonctions $\rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ pour les angles (θ_i, ϕ_i) et (θ_r) donnés

$$\rho_B(\lambda) (\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \rho_B(\theta_r, \phi_r) L_i(\lambda, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i$$



II.5 . Importance de la reflectance .

Suivant la nature des objets terrestres , ceux-ci émettent ou réfléchissent une énergie électromagnétique répartit inégalement sur tout le spectre, donc la reflectance est ^{un} des paramètres les plus important avec l'emissivité et la température. Cependant certains facteurs influent sur la reflectance des objets, la signature spectrale des objets est fonction de nombreux facteurs notamment .

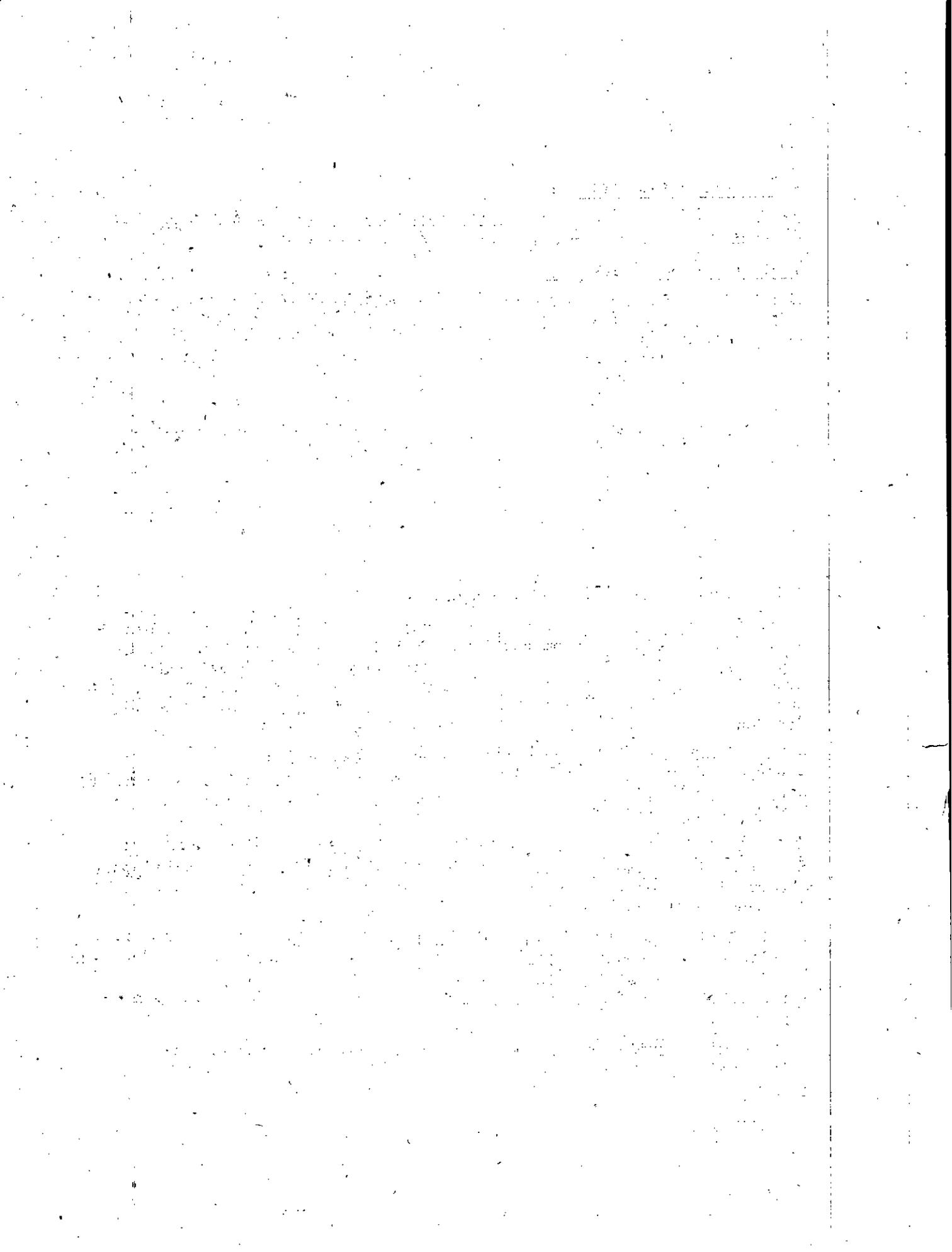
- Conditions météorologiques (l'atmosphère plus ou moins)
- réflexion propre de l'atmosphère (nature et importance du rayonnement)
- Le relief et le problème des ombres .
- teneur en humidité .

Une relation existe entre ces différents facteurs car les conditions météorologique affectent le rayonnement solaire, la teneur en humidité affecte la reflectance spectrale qui varie en fonction de la couleur, de la longueur d'onde et de la texture du sol .

Les variations de l'état végétatif explique les différences enregistrés au niveau des réponses suivant les périodes de l'année, elle est fonction aussi de la composition minéralogique du sol donc on peut dire que la reflectance determine le taux d'humidité et identifie la végétation et son état .

Pour savoir à quoi correspondent les enregistrements radiométriques on doit donner les reflectances correspondant à des corps comme :

- Sols .
- Végétaux .



II.5.a .1. Réflectance du sol .

a/ Texture et humidité .

Pour les sols argileux les caractéristiques de réflectance sont les mêmes quelque soit le degré d'humidité , la seule différence c'est que les valeurs de réflectance sont plus moins grande de l'un à l'autre car la variation de la longueur se fait dans le même sens. Par contre pour les sols sableux , la variation de la réflectance n'est pas la même selon le degré d'humidité .

- Quelques courbes théorique .

1. Sol sableux très sec : on a une courbe de réflectance régulière avec des minima très peu visible car les sols sableux ayant une faible humidité présente des minima à 1400 nm et à 2000 nm dûes aux bandes d'absorption de l'eau . on a aussi des facteurs tel que la teneur en calcaire ou la matière organique modifie la réflectance des sols dans le visible en leur donnant une couleur particulière .

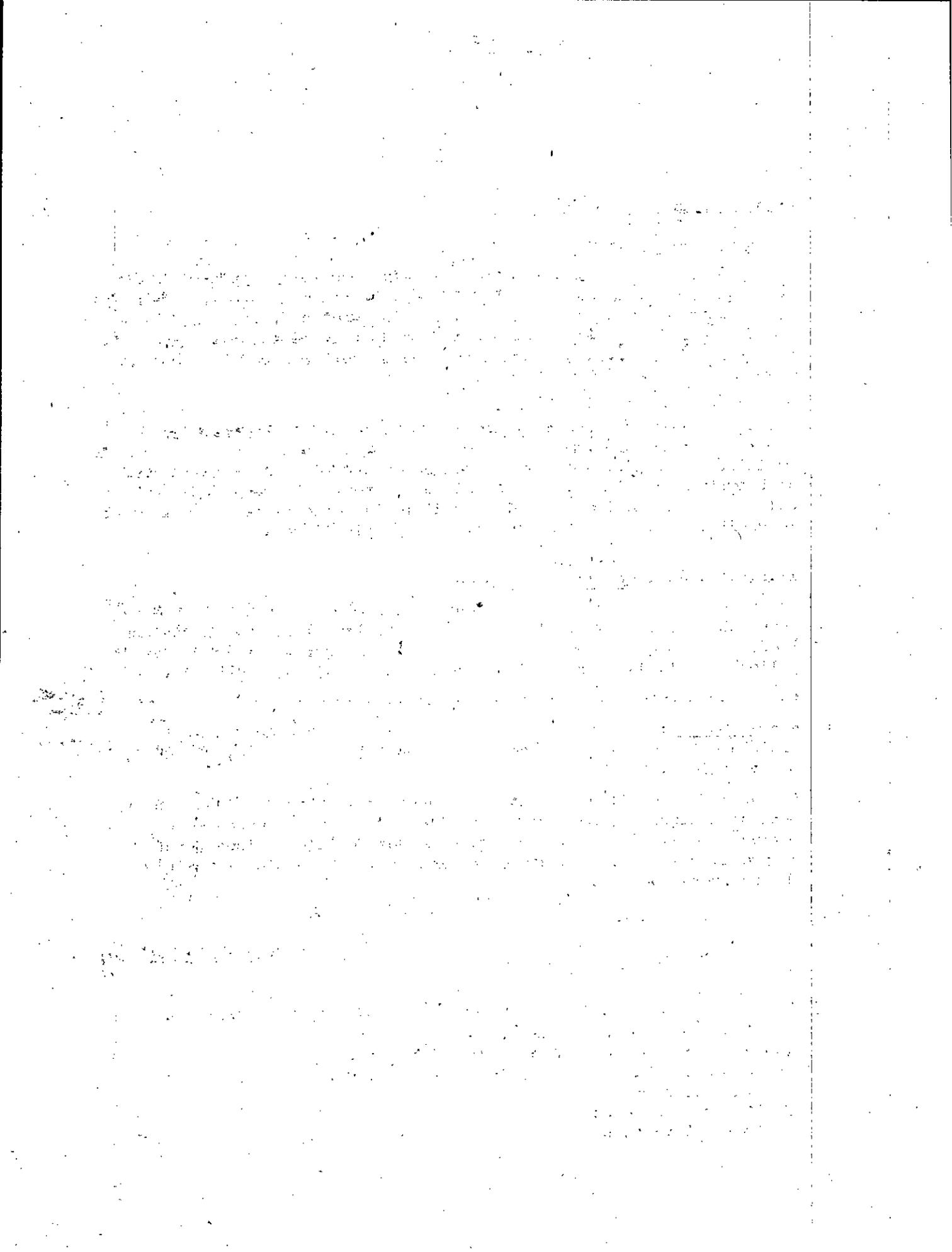
II.5.b. 2. Réflectance des végétaux .

La réflectance des végétaux présente pratiquement le même phénomène pour tous les végétaux. C'est à dire un maximum à 550 nm un minimum à 650 nm et une brusque augmentation à 750 nm qui se prolonge par un palier jusqu'a 1300 nm suivi par un nouveau minimum à 1400 nm .

Les causes de ces variations de réflectance sont :

à - pigments : la faible réflectance des végétaux dans la partie visible est due à la présence de pigments (Chlorophylle, carotène, Xanthophylle) .

La chlorophylle n'absorbe pas les longueurs d'ondes voisine à 550 nm cela s'explique par le maximum que l'on voit sur les courbes de réflectance ainsi que la couleur verte des feuilles saines , par contre la chlorophylle absorbe le bleu et le rouge d'ou les minima observs vers 650 nm .



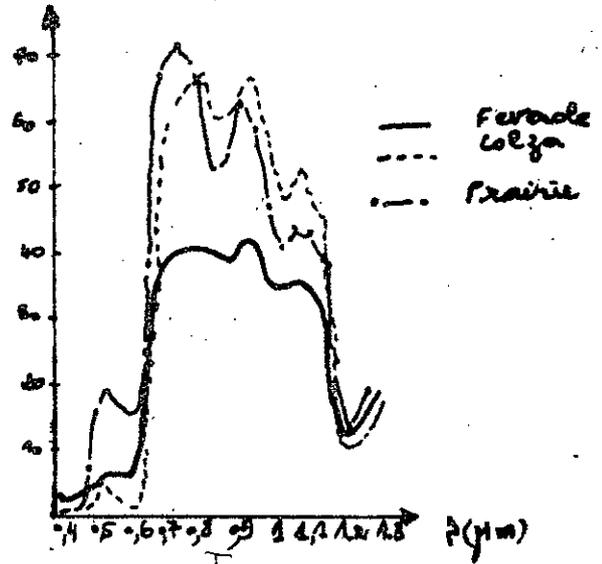
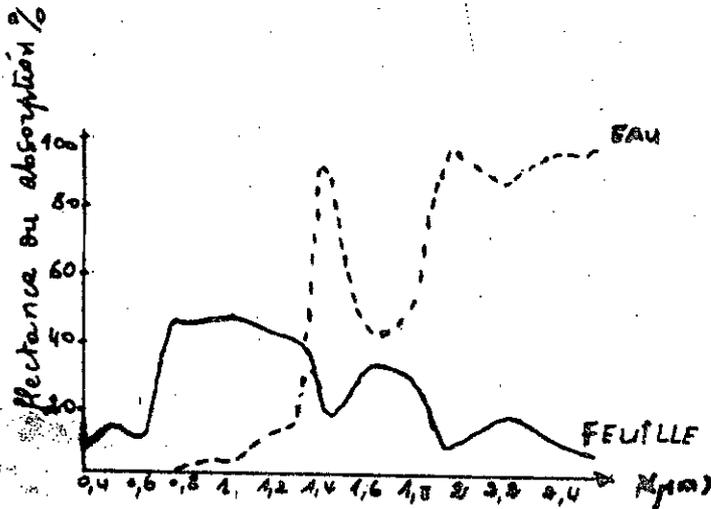
b/ Structure .

La chlorophylle absorbe peu l'infra-rouge et pour la bande (750 - 1300) nm les pigments n'ont que peu d'influence sur la reflectance des végétaux mais c'est la structure interne des feuilles qui prend de l'importance, les végétaux ont une structure foliaire qui varie suivant les familles on comprend alors pourquoi certains végétaux réfléchissent le proche infra-rouge plus que d'autres .

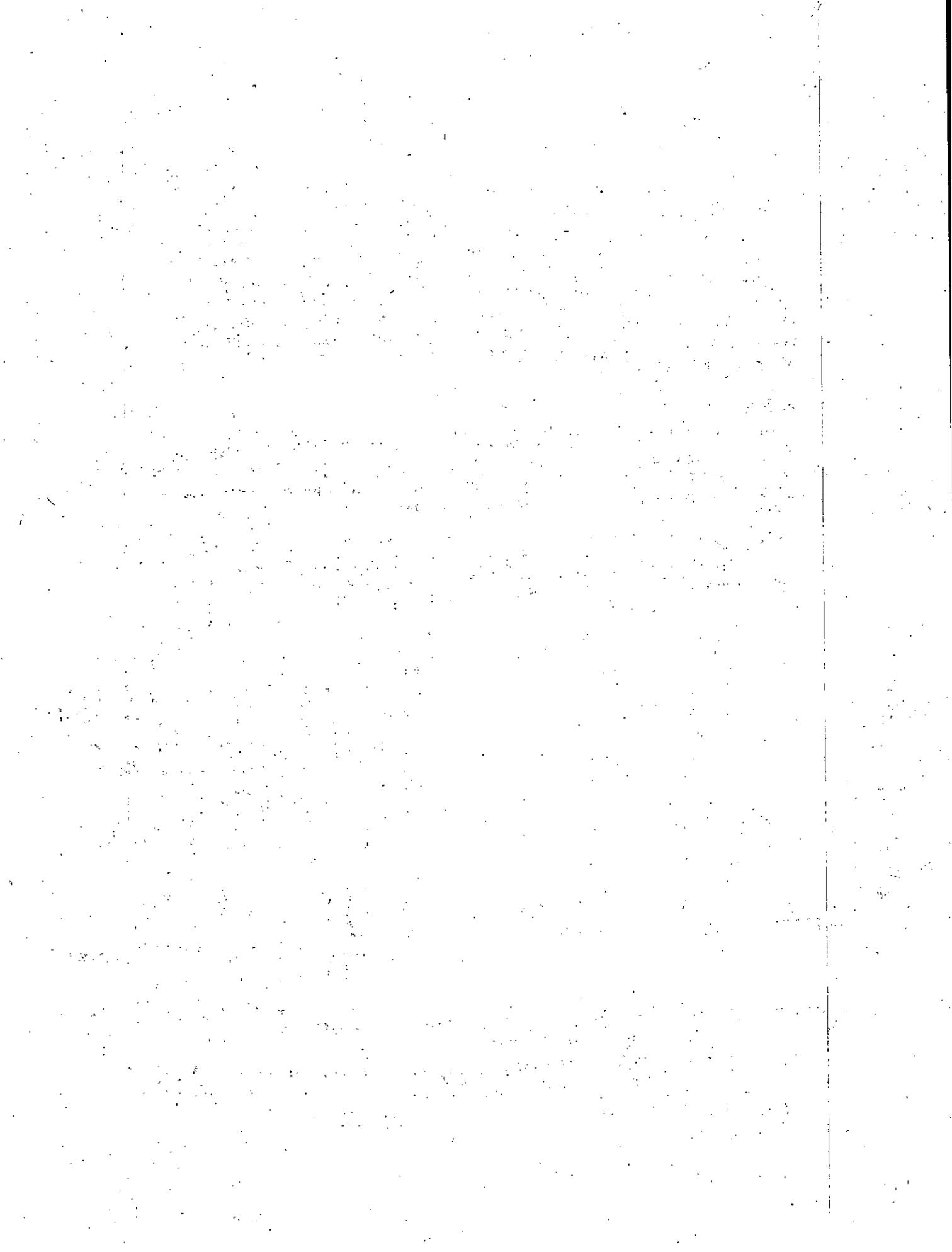
c/ L'eau :

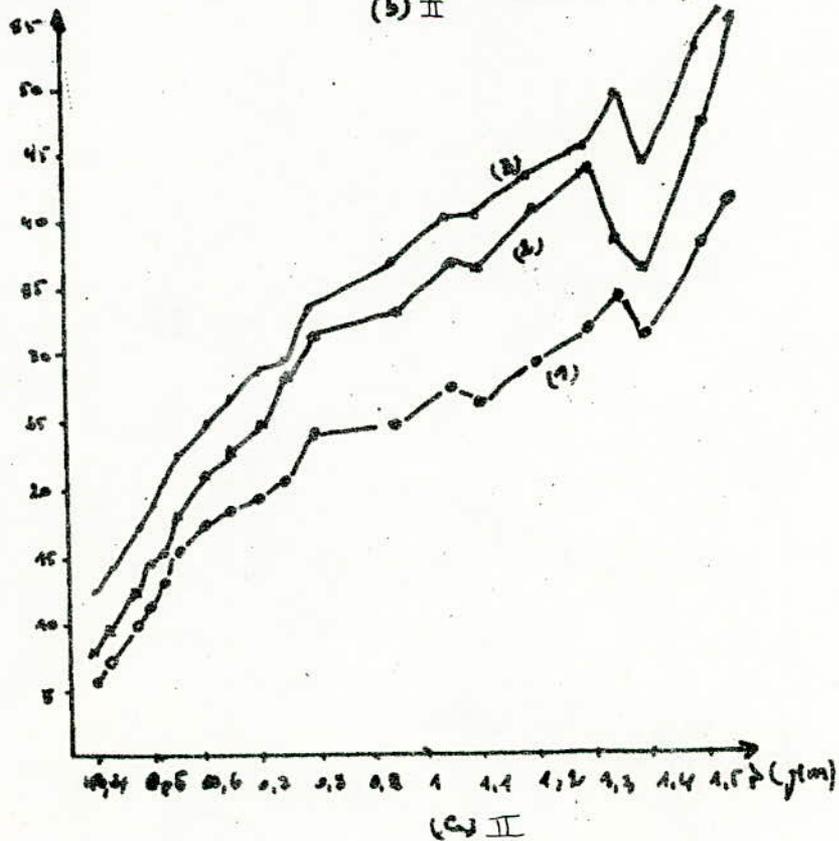
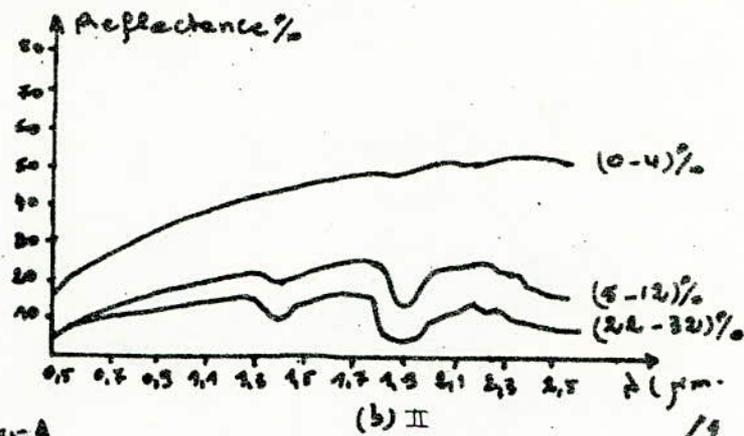
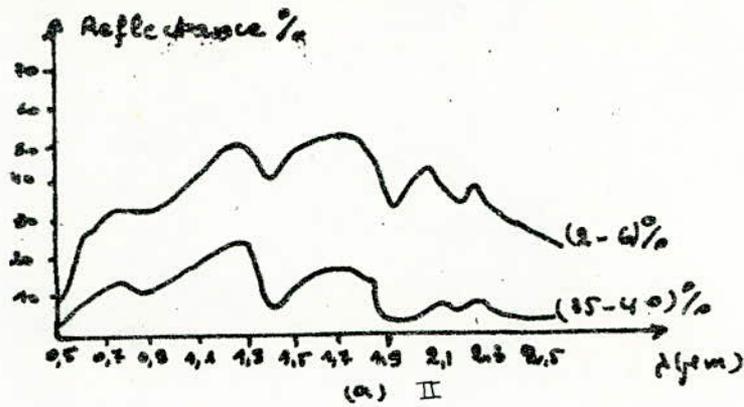
au delà de 1500 nm les propriétés spectrales des feuilles et des végétaux dépendent directement de la teneur en eau. donc on peut dire que le comportement des végétaux dans le spectre visible et proche infra-rouge est influencé par les facteurs suivants .

- (400 - 750)nm : influencé par les pigments
- (750 - 1300)nm : influencé de la structure d'interna
- (1300- 2500)nm : influence de la teneur en eau



- I b- Comparaison entre la courbe de reflectance d'une feuille et celle de l'absorption de l'eau .
- II fig a - sol argileux à deux degrés d'humidité
- fig b - sol sableux à trois niveaux d'humidité
- (1 - sol argileux
- (2 - sol jaunâtre
- (3 - sol blanchâtre





II.6 albedo

on appelle albedo le rapport de l'énergie globale ^{réfléchie} par diffusion à l'énergie incidente (référence on prend l'énergie solaire pour des longueurs d'onde de (300 - 3000) nm).

L'albedo dépend fortement de l'angle d'incidence, décroît avec la hauteur du soleil, mais croît avec le rayonnement diffus.

Il dépend également de la teneur en eau, de la structure du couvert les valeurs moyennes montrent que les valeurs peuvent être rencontrées entre (0,7 - 0,9) pour la neige, et (0,03 - 0,12) pour l'eau.

L'albedo est un coefficient global c'est donc lui qui intervient lorsque l'on calcul le bilan d'énergie d'un élément de la surface terrestre.

- Bilan du rayonnement solaire $Q_1 = G - \alpha(S + D)$
- Bilan du rayonnement terrestre $Q_2 = T - \alpha_n A - A$
- Bilan global $Q = Q_1 + Q_2$

Si on a une source d'énergie de faible étendue on a

$$a(\theta) = \frac{\int_0^\infty P_r \lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_i \lambda d\lambda}$$

si $L_i(\lambda)$ et $L_r(\lambda)$ sont les luminances spectrales incidente et réfléchie on aura

$$a(\theta_i, \phi_i) = \frac{\int_0^\infty L_i(\lambda)(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i \iint_{\text{hémisphère}} P_r(\lambda)(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_r d\Omega_r d\lambda}{\int_0^\infty L_i(\lambda)(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda}$$

[a] coefficient sans dimension.

L'albedo dépend du spectre électromagnétique et si la réflectance est indépendante de la longueur d'onde alors on aura une relation entre l'albedo et la réflectance qui s'écrira.

$$a(\theta_i, \phi_i) = P(\theta_i, \phi_i)$$

Par contre si la source est de grande étendue (hémisphère sup) dans ce cas la relation définissant l'albedo en fonction de la réflectance sera.

$$a = \frac{\int_0^\infty \iint_{\text{hémisphère}} L_r(\lambda)(\theta_r, \phi_r) \cos \theta_r \iint_{\text{hémisphère}} P_r(\lambda)(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \cos \theta_r d\Omega_r d\lambda}{\int_0^\infty \iint_{\text{hémisphère}} L_i(\lambda)(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda}$$

L'albedo désigne donc la réflectance totale de la surface, il est égale au rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie incidente. d'où une surface sombre à un faible albedo et une surface claire à un grand albedo.

PLAN DU CHAPITRE III

III . Etude des capteurs .

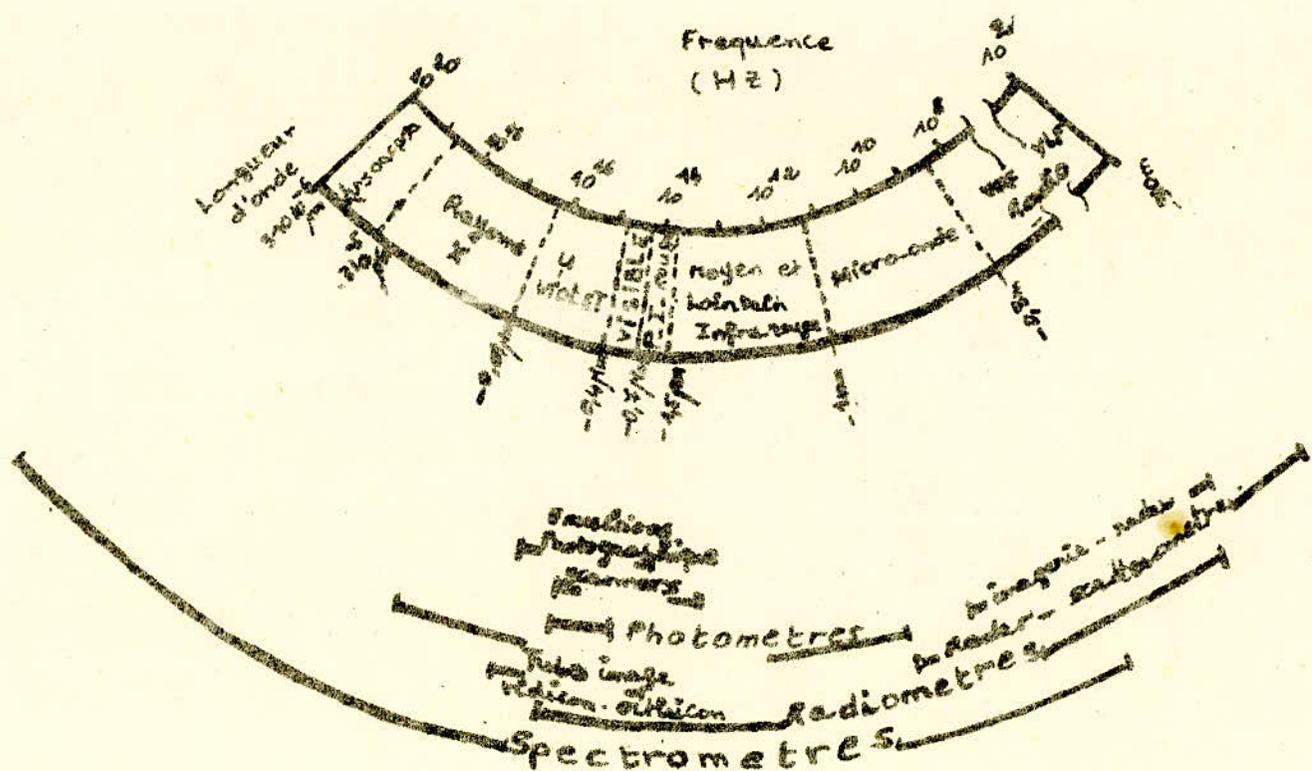
III. 1 . Capteurs électro-optique .

III . 2 . Différents parties du capteur électro-optique

- Filtre
- Optique
- ' - Détecteur

...../.....

Spectre électro-magnétique
et instruments de mesure



III Etude des capteurs

Une des recherches en télédétection à pour but d'établir ou de vérifier les corrélations existantes entre les radiations observées et le phénomène à détecter ou à mesurer, ainsi l'opération de mesure demande l'utilisation de capteurs qui mesurent les caractéristiques spectrales de l'objet ou de la surface à étudier .

on distingue différents capteurs

- 1- Capteurs photographiques
- 2- Capteurs électro-optiques
- 3- Radars

Dans notre étude on se limitera aux capteurs électro-optiques vu que notre réalisation pratique est classée dans cette catégorie .

III.1 Capteurs électro-optiques

Ce sont des capteurs dans lesquels un système optique reçoit les faisceaux lumineux issus des différents éléments d'une scène pour les renvoyer sur des détecteurs qui transforment l'énergie lumineuse reçue en un signal électrique.

on distingue différents types :

III.1a Les caméras à tubes images .

Leur système optique filtre et focalise le rayonnement reçu par la cible capable de conserver un certain temps l'image impressionnée , celle-ci est alors lue par balayage électronique qui génère un signal vidéo permettant de mémoriser la mesure , exemple on a les caméras RBV montées sur les satellites américains Landsat.

III 1.b - Radiomètres ;

Ils mesurent l'intensité du rayonnement électromagnétique des objets soit relativement , soit par comparaison avec le rayonnement d'un corps noir calibré donnant alors une mesure absolue, il fonctionne en mode monospectral ou multispectral .

Les radiomètres sont utilisés pour mesurer les distributions spectrales des radiations observées. Ces radiomètres ne donnent pas d'images en sortie mais un signal de sortie soit une tension ou un courant et dans cette catégorie on a

a) - Les Spectromètres : sont des radiomètres auxquels on ajoute des éléments de dispersions d'où la radiation provenant de la cible est mesurée en fonction de la longueur d'onde .

- Les polarimètres sont des radiomètres des photomètres et des spectromètres auxquels on ajoute un appareil qui permet de passer d'un plan de polarisation à un autre , la rotation de l'analyseur permet la mesure de la polarisation selon les différentes directions .

Les radiomètres de profil : permettent des sondages de température .

b) Les radiomètres multispectraux :

Ces radiomètres appelés dans la littérature anglo-saxonne des scanners ce sont des appareils qui analysent dans plusieurs bandes spectrales, les radiations provenant de la surface survolée.

Ils sont munis d'un système à balayage le plus souvent c'est un miroir rotatif ou oscillant qui dirige le rayonnement sur un objectif servant à le focaliser, le faisceau ainsi déterminé est dirigé sur un spectromètre comprenant plusieurs détecteurs. Chaque détecteur émet en sortie un signal électrique correspondant à l'énergie contenue dans une bande bien définie du spectre .

III.2 Différentes parties du capteur électro-optique

La partie optique

Elle comprend :

- Un collecteur qui dirige le faisceau et le focalise .
- Un champ d'arrêt pour définir les limites du champ de vue.
- Un filtre optique qui détermine la longueur d'onde de la réponse
- Un détecteur qui convertit le rayonnement incident en un signal électrique , c'est un des éléments le plus important dans un capteur .

Partie électronique

Elle comprend :

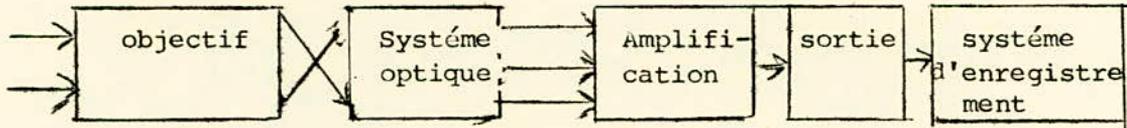
- Un préamplificateur pour augmenter le signal avant d'être utiliser.
- Un signal de sortie représentant les données.
- Un amplificateur pour augmenter le niveau du signal de sortie .
- Une unité de puissance pour fournir l'énergie électrique dont le système a besoin .
- Des panneaux de contrôle des mesures .

Unité de sortie

Elle comprend :

- Un indicateur pour contrôler le signal de sortie .
- Un enregistreur pour stocker les données .

schéma



III.2.a Collecteur optique

Ce système peut être un objectif ou une lentille convergente placée à l'entrée du système électro-optique. Son but est de focaliser la lumière émise par la source vers le détecteur, de diminuer la perte d'énergie et aussi de déterminer l'angle de vision. Ce système optique peut être amélioré et ceci en utilisant différentes lentilles, où chacune correspond à une bande spectrale bien définie, ainsi on peut travailler sur une large bande spectrale. Comme exemple de ce système on peut citer les monochromateurs modulaires qui ont des lentilles incorporées .

III.2.b Filtrés optiques

Ce filtre constitue un élément important de la partie optique du capteur car il permet de diminuer le bruit donc d'augmenter le rapport signal sur bruit . Il est placé à l'entrée du détecteur, ou il y est incorporé .

Il existe différents filtres qui fonctionnent différemment :

- Soit ils augmentent l'importance relative de certaines radiations
- Soit ils éliminent toute une bande de radiations et de laisser passer les radiations désirées .
- Soit de ne laisser passer qu'une seule bande spectrale relativement étroite en éliminant toutes les autres radiations.

Généralement pour la partie visible du spectre électromagnétique on utilise des filtres colorés ou écrans , ils possèdent du point de vue absorption des propriétés fortement sélectives pour certaines longueurs d'ondes.

On peut citer principalement :

- Les filtres interférentiels qui ont pour principe de réfléchir les radiations indésirables et de transmettre vers le détecteur les radiations voulues dans un interval spectral étroit .
- Les filtres à bande fixe , présentés sous forme de disque (bande) chaque filtre disposé sur l'axe de la source de lumière ne laisse passer qu'un échantillon de la bande spectrale désirée .
- Les filtres continus , ils sont étalés le long d'une circonférence d'un disque , la sélection de longueur d'onde est déterminée par l'emplacement du système optique sur la surface du filtre .

III.2.C Etude du détecteur

Le détecteur est l'élément le plus important dans le capteur, il convertit le flux en un signal électrique, on distingue deux classes de détecteurs : Les détecteurs thermiques et les détecteurs quantiques .

1) Détecteurs thermiques :

Exemple: Les bolomètres , les thermocouples , l'énergie des photons est transformée en chaleur par absorption du rayonnement incident par une substance qui a la propriété d'avoir une excellente adaptation optique du milieu ambiant et une capacité calorifique réduite . Les détecteurs thermiques ont besoin d'un certain temps pour atteindre leur équilibre thermique avant de pouvoir donner des mesures exactes .

2) Détecteurs quantiques :

Ils sont basés essentiellement sur l'effet photoélectrique d'où la nécessité de définir ce phénomène .

Effet photo électrique : quand une radiation arrive sur une matière les électrons sont éjectés de la surface, ils donnent naissance à un courant électrique mesurable appelé : photo courant et qui a les propriétés suivantes :

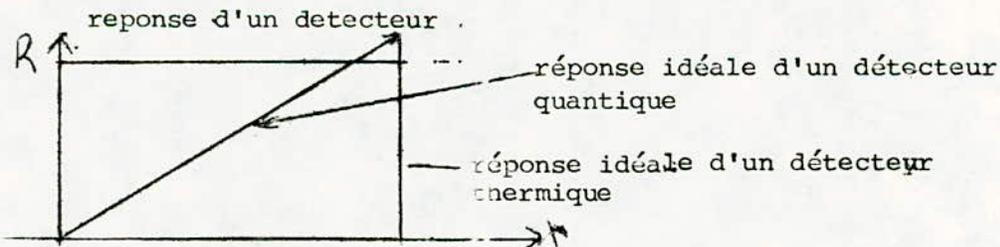
1- L'énergie cinétique des électrons dépend de la fréquence des radiations et non de leur intensité .

2- Le courant obtenu est proportionnel à l'intensité des radiations .

3- Le courant n'existe que si on travaille au dessus d'une certaine fréquence appelée fréquence de coupure .

Les détecteurs quantiques sont classés ainsi :

- détecteur à effet de surface
- détecteur à effet de volume qui peuvent être photopil , photodiodes cellules photovoltaïque et les photo-transistors .



3) Caractéristiques du détecteur .

Les caractéristiques qui définissent les performances d'un détecteur sont :

- La fonction de transfert
- Responsivité
- Normalisation
- Rapport signal sur bruit
- Linéarité
- Temps de réponse
- champ de vue (IFOV)
- sensibilité
- Detectivité

Fonction de transfert :

La fonction de transfert d'un détecteur est fonction de sa taille, si on augmente le diamètre du système optique, on augmente le flux reçu et par la même, on améliore la fonction de transfert mais il ne faut pas dépasser le rapport $D/f = F$

$F =$ focale de la Lentille
 $D =$ Diamètre de l'optique.

Reponsivité .

La radiation de sortie du détecteur est propriété physique observable c'est la réponse ou, le signal qui caractérise le flux incident à l'entrée du détecteur le radiomètre idéale (détecteur) est celui qui donne en sortie un signal proportionnel au flux incident dans une direction déterminée à l'intérieur d'un angle solide connu .

$$S = R \phi (\lambda_1, \lambda_2)$$

S: signal de sortie

Si dans une bande étroite $\Delta\lambda$ centrée sur λ_1 on a un flux arrivant sur le détecteur, produit un signal $\Delta S_1 = R(\lambda_1) \phi(\lambda_1) \Delta\lambda$

quand ce flux est centrée sur λ_2 on a

$$\Delta S_2 = R(\lambda_2) \phi(\lambda_2) \Delta\lambda$$

d'où on suppose que la réponse simultanée du détecteur due au flux provenant des deux bandes spectrales différentes l'une centrée sur et l'autre sur λ_2 tel que le flux incident produit un signal

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = [R(\lambda_1) \phi(\lambda_1) + R(\lambda_2) \phi(\lambda_2)] \Delta\lambda$$

$$= R(\lambda) \phi(\lambda) \Delta\lambda$$

d'où

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda$$

d'où de cette relation on peut constater que la reponsivité dépend de la longueur d'onde du flux incident, elle est déterminée par une calibration du détecteur .

La reponsivité est indiqué pour une longueur d'onde donné on dit que la réponse spectrale on peut distinguer la :

- réponse dynamique
- réponse élémentaire
- réponse uniforme .

Normalisation :

La reponsivité spectrale du détecteur n'est pas généralement constante sur toute la bande spectrale dans laquelle est donnée la réponse, il est donc important de trouver une méthode de mesure pour minimiser l'erreur Généralement pour cela on utilise la normalisation de la valeur maximale pour une longueur d'onde λ et décroît pour les autres longueurs d'onde. La reponsivité maximale est symbolisée par R (peak) d'où on approxime la valeur du flux incident par

$$S = R_{peak} \phi(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_0)$$

où λ_1 et λ_2 déterminent les limites effectives de la réponse spectrale du détecteur qui sont déterminée après normalisation

$$R_{peak} \lambda^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda \quad R_{peak} K(\lambda_1 - \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda$$

Rapport signal sur bruit

Les bruits

a) Les bruits instrumentaux : Les effets de ces bruits peuvent se comparer dans la mesure du signal, cette imprécision peut se mesurer en termes du rapport signal sur bruit

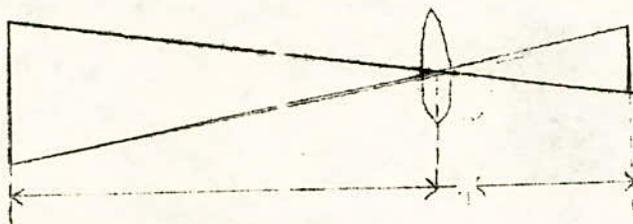
b) Les bruits électroniques : Les éléments passifs des circuits électroniques conduisent à un bruit thermique que l'on peut considérer comme bruit "blanc" qui est indépendant du niveau du signal

c) Calcul du rapport signal sur bruit :

La puissance incidente du détecteur $P(\lambda)$ est donnée par

$$P(\lambda) = \frac{T_s(\lambda) T_o(\lambda) / S A_c L \lambda}{R^2} \quad (1)$$

- A_s : Surface étendue de la source
- A_c : Surface effective du collecteur
- $L \lambda$: La radiance spectrale ($W/m^2 \cdot sr \cdot nm$)
- R : Distance entre la source et le collecteur
- $T_s(\lambda)$: Facteur de transmission de l'atmosphère
- $T_o(\lambda)$: Facteur de transmission optique



Cette puissance incidente produit un rapport sur bruit S/B

$$S/B = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda}{A_D NEP_{\lambda}} \quad (2)$$

où $NEP_{\lambda} = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{D_{\lambda}}$

- A_D : Surface du détecteur
- Δf : La largeur de la bande électronique
- D_{λ} : Détection spécifique

En combinant les équations (1) et (2) on obtient :

$$S/B = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} D_{\lambda} d\lambda}{\sqrt{A_D \Delta f}} = \frac{T_s(\lambda) T_o(\lambda) A_s A_c L \lambda D_{\lambda} d\lambda}{\sqrt{R^2 A_D \Delta f}}$$

Linéarité

Le signal de sortie du détecteur doit être proportionnel à la luminance incidente, dans le cas où il n'est pas linéaire, on spécifie généralement une linéarité à 0,5 % près.

Temps de réponse :

C'est le temps d'intégration minimum nécessaire pour obtenir une mesure fiable , il peut être de 10⁻¹ secondes à quelques secondes .

Champ de vue :

Dans la plupart des applications en télédétection , on mesure la radiance ($W \lambda^{-1} m^{-2}$) ou la radiance spectrale ($W \lambda^{-1} m^{-3}$) de la source , pour que ces mesures soient significatives, il faut que l'objet à observer occupe tout le champ de vue appelé aussi et ceci pour éviter la mesure des objets à proximité du détecteur . Lorsque la radiance de la source occupe tout le champ de vue du détecteur on dit qu'on a une source étendue, si par contre, la radiation est très fine , on dit qu'on a une source ponctuelle .

Sensibilité :

La qualité d'un détecteur est donnée par la valeur de la sensibilité définie par :

$$S(\lambda) = \frac{1}{L_{\lambda}} \frac{dV(\lambda)}{d\lambda}$$

avec $V(\lambda)$: tension de sortie du détecteur

$L(\lambda)$: luminance incidente

Elle dépend essentiellement du choix du détecteur, de son ouverture angulaire et l'angle de vision .

Délectivité :

La détectivité spectrale $D(\lambda)$ est l'inverse du $(NEP)_{\lambda}$, elle a été introduite comme un facteur de mérite du détecteur, car elle détermine la performance de ce dernier, elle est donnée en fonction de la fréquence de résonance et dépend de la surface du détecteur, de la largeur de la bande et aussi de l'angle de vue, son unité: $[W^{-1/2}]$ et elle est donnée par

$$D(\lambda) = \frac{1}{(NEP)_{\lambda}}$$

La détectivité est définie aussi par sa valeur spécifique valeur normalisée en fonction de la largeur de la bande et de la surface D^*

$$D^*(\lambda, \Delta\lambda, \Delta F) = D(\lambda) \sqrt{\Delta\lambda \Delta F}$$

Cette valeur est normalisée et elle est donnée en fonction de l'angle de vue par :

$$D^{**}(\lambda, \rho_0, \Delta\lambda) = \left[\frac{\Omega}{\pi} \right]^{1/2} D^*(\lambda, \rho_0, \Delta\lambda)$$

4- Caractéristiques des radiations captées par le détecteur .

- Distribution spatiale :

Les variations des radiations réfléchies par l'objet à étudier permettant de reconnaître cet objet à travers l'information comme la texture, le contexte ect

- Distribution spectrale :

L'intensité rayonnée varie avec la longueur d'onde c'est ce qui produit la couleur dans la bande visible du spectre électromagnétique .

- Polarisation :

Les radiations captées par l'objet ou la surface créent des perturbations dans la distribution du champ, d'où création d'un certain potentiel appelé polarisation .

- Variation temporelles :

C'est l'étude des variations des radiations en fonction du temps :

- Variations géométriques :

Toute mesure faite en télédétection dépend de l'angle de vue du détecteur à partir duquel on observe l'objet ou la surface à étudier .

5- Mesures faites à l'aide du détecteur .

A quelques exceptions près , les mesures faites ne mesurent pas, ni n'observe directement l'information demandée par l'utilisateur, mais on mesure ou on observe plutôt les radiations, provenant d'un élément de la scène et de ces données l'utilisateur tire l'information désirée.

Exemple : Le scanner "infra-rouge ne peut pas observer directement l'humidité de la végétation, il détecte seulement les variations dues à la différence de la température de surface et de l'émissivité .
Le détecteur observe les effets de variation des radiations issues de l'objet. Car généralement l'utilisateur ne s'intéresse pas aux effets observés mais aux causes qui les produisent donc on peut dire que la recherche dans ce domaine a pour but de trouver une relation entre la cause et l'effet observé.

La cause étant l'information nécessaire à l'utilisateur et l'effet étant le phénomène observé par la télédétection .

PLAN DU CHAPITRE IV

IV .CALIBRATION .

IV . 1 Specifications générales de la performance
de l'instrument .

IV .2 . Conditions experimentales de calibrtion

IV .3. Technique de calibrage .

...../.....

C A L I B R A G E

IV

La spectroscopie est le terme général qui décrit les techniques, instruments et considérations nécessaires à l'obtention des spectres de réflexion, d'émission et de rayonnement de la végétation du sol ainsi que leur environnement naturel. Les mesures sont faites sous éclairage naturel avec toute la variabilité associée au recouvrement du ciel par les nuages lequel point doit être pris en considération dans les efforts de calibrage. Ce dernier a longtemps fait l'objet de recherche car le calibrage d'un instrument est défini de manière à quantifier la sortie.

La calibration nous permet de savoir si les mesures dans une bande spectrale peuvent être utilisées pour reconnaître un objet ou les propriétés qui lui sont associées car les variations enregistrées peuvent être dues aux paramètres géométriques, ou aux variations qui affectent le signal et qui ne sont pas considérées comme un bruit.

En point de vue spectroscopie et radiométrie, on a des divisions naturelles dans l'intervalle des longueurs d'ondes de $(0,35 - 16)\mu\text{m}$, de $(0,35 - 4)\mu\text{m}$ la scène fixée réfléchit le rayonnement solaire d'une façon directe et dispersée. Aux environs de $4\mu\text{m}$ et $(18 - 14)\mu\text{m}$, la scène émet un rayonnement comme un corps gris avec une certaine variation d'émission qui est fonction de la longueur d'onde. Au voisinage de $4\mu\text{m}$ on a superposition d'émission et de réflexion.

Ces aspects posent différents problèmes de calibrage et d'angle de prise de vue dans chaque bande spectrale et on a aussi une forte influence sur le choix de la conception de l'instrument.

IV.1. Cette étude commencera par ce que l'on pourrait appeler les paramètres extérieurs. Ce sont ces points là dont on doit tenir compte en supposant qu'on dispose d'un instrument adéquat.

Divers aspects vitaux de spectroscopie peuvent être discutés en considérant seulement les spécifications générales de la performance de l'instrument.

Ces spécifications sont :

- l'angle de vision.
- L'ouverture effective de l'objet
- La capacité de mise au point
- La sensibilité à la polarisation.

IV.1. . ANGLE DE VISION :

L'angle de vision est mieux défini en fonction du procédé utilisé pour mesurer sa valeur, dans le but de tracer le graphe de l'angle de vision d'un instrument particulier. On place une petite source de rayonnement sur l'axe optique de l'instrument. La source peut bien être une lampe en tungstène qui émet des rayons dans la région du spectre qui soit visible ou proche infra-rouge. De $(3 \text{ à } 16)$, un objet chauffé, tel qu'un fer à souder placé derrière la plaque d'ouverture suffira.

Pendant que l'instrument est maintenu fixe, on déplace la source de quelques intervalles donnés dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et on contrôle le signal relatif que donne l'instrument. De cette manière, on détermine le lieu géométrique des signaux que produit l'instrument. Les profils d'intensité qui en résultent peuvent être changés en contours de puissance à l'aide de calculs appropriés.

IV.1b. OUVERTURE EFFECTIVE DE L'OBJECTIF :

La surface d'ouverture effective est la surface de la coupe transversale, à l'entrée optique de l'instrument du faisceau de rayons émanant d'une source placée dans le champ de vision. On utilise le mot "effective" pour indiquer que seuls les rayons qui se dirigent vers un détecteur de l'instrument sont inclus. Plus l'ouverture effective est large et plus ^{est} importante la quantité des rayons rassemblée des sources placées dans le champ de vision.

IV.A.c. CAPACITE DE MISE AU POINT :

Les possibilités de mise au point d'un instrument dépendent de la tâche qu'on veut faire. Les instruments d'utilisation générale devraient avoir une possibilité de mise au point de (1 m à l'infini) cependant si la scène est distante de 1m et le champ de vision est petit, il est plus raisonnable de déplacer le spectromètre sur le terrain ou de constituer un dispositif de détecteurs et de composants optiques. Pour ce but, il est préférable d'utiliser des lentilles de réflexion qui permettent de déterminer l'objet fixé et l'exactitude de mise au point de l'instrument.

IV.1.d. SENSIBILITE A LA POLARISATION :

Chaque fois que le rayonnement se réfléchit ou se réfracte à travers un milieu : miroir ou une surface dispersante, l'intensité après chaque événement, sera généralement une fonction de la polarisation des ondes électromagnétiques incidentes. La sensibilité d'un instrument est connue, cette caractéristique permet de mesurer les propriétés de la polarisation des objets naturels. Dans la région visible et proche infra-rouge, il n'est pas difficile de calibrer un instrument avec une source lumineuse et un polariseur. Pour la gamme émissive du spectre de longueur d'onde, on a aussi des polariseurs qui sont disponibles.

IV . 2.a : Si le spectromètre travaille à une longueur d'onde et qu'il fixe une scène immobile pendant le temps de mesure ; la plupart des paramètres de l'instrument peuvent être rassemblés en une notation concise qui clarifie ce qui est mesuré et la quantité de puissance de rayonnement entrant dans l'objectif .

$$\Delta P = \tau_a N_\lambda A_o \Omega_f \Delta \lambda \quad (1)$$

A_o : ouverture effective de l'instrument .

Ω_f : angle solide du champ de vision .

τ_a : transmission atmosphérique entre l'objet et l'objectif .

Le rayonnement spectral N_λ d'une surface est mieux défini de manière opérationnelle . ON mesure dans l'intervalle $(\lambda, \lambda + \Delta \lambda)$ la puissance de rayonnement circulant à partir d'une source de surface (ds) et pénétrant dans l'angle solide $d\Omega$ par rapport à la direction donnée, normale à la source .

Cette mesure de puissance est divisée par l'angle solide $d\Omega$, par la projection de (ds) sur la direction de la mesure et de la longueur d'onde λ , ce résultat nous donne le rayonnement spectral N_λ .

Le rayonnement entrant dans l'objectif du spectromètre est une mesure $\tau_a N_\lambda$ simplement multipliée par A_o et Ω_f qui relève du choix de l'expérience .

pour la région réfléchive du spectre , on s'attend à ce que N_λ soit fonction de $(\theta_s, \phi_s, \theta_e, \phi_e)$ des conditions atmosphériques et de la géométrie détaillée de la scène fixée . Dans cette zone , on suppose que le rayonnement solaire est dominant ; ou N_λ est le produit de la puissance solaire par unité de surface arrivant sur la scène $(H_\lambda \cos \theta_s)$ dans l'intervalle $\Delta \lambda$ et de la réflectance bidirectionnelle de la même scène , on a alors :

$$\Delta P = \tau_a H_\lambda \cos \theta_s (r_\lambda(\theta_s, \phi_s, \theta_e, \phi_e)) A_o \Omega_f \Delta \lambda \quad (2)$$

ou $\tau_a H_\lambda \cos \theta_s$: rayonnement incident modifié par les conditions atmosphériques .

$\cos \theta_s$: effets angulaires et géométriques de la scène .

H_λ : normale directe des rayons solaires .

r_λ : réflectance bidirectionnelle .

Suivant ce que veut l'expérimentateur , l'un des termes a plus d'importance que les autres .

Si le premier but du chercheur est de faire correspondre les spectres avec les données que fournit un balayage fait à partir d'un avion , alors on a N_λ qui est le terme le plus important car , c'est la grandeur détectée par le (scanner) . D'autre part, si le but est de mettre en corrélation les spectres du terrain avec les données concernant les objets naturels obtenues au laboratoire alors r_λ est le terme le plus important .

TERMES AFFECTANT LE SIGNAL :

- Source d'éclairement
- Fonction de transfert électronique et sa stabilité
- Longueur d'onde du détecteur
- Résolution du détecteur
- Réponse du détecteur

Le grand développement des techniques fait que la calibration de certains paramètres est négligée car on arrive à la compenser par d'autres moyens mais cette calibration reste nécessaire pour d'autres

IV.2.b. CALIBRATION DES PARAMETRES.

- Calibration de l'intensité :
C'est la calibration de l'amplitude de la réponse de l'instrument qui est donnée par le niveau de sortie Vs pour un certain niveau d'entrée.
- Calibration spectrale: C'est la réponse de l'instrument en fonction de la fréquence de la radiation incidente (entrée impulsionnelle directe), la pureté spectrale (finesse de l'impulsion) et la position de la source de calibration doivent être compatibles avec la précision de l'instrument.
- Calibration spatiale.

La calibration spatiale (résolution) d'un instrument consiste à trouver réponse (la mesure) qui donne le plus grand contraste de la source .

IV/2.C.

Catégorie de la calibration . Pour calibrer ces paramètres, on a deux catégories de calibration, : la calibration absolue fait référence à une radiation comme, pour faire une bonne calibration absolue, la forme spectrale de la source de calibration doit être similaire à la forme du spectrale de l'objet inconnu. Cette calibration absolue dépend de la forme relative de la luminance spectrale de la source à calibrer . En fait, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur absolue mais plutôt l'amplitude d'un élément de la scène par apport à un autre. La stabilité et la répétitivité dans le temps sont beaucoup plus importants que la connaissance de la source.

.../...

IV.3.b. DEUXIEME SOURCE DE CALIBRATION .

- Source de calibration se trouvant à l'interieur de l'instrument

Le détecteur fixe tour à tour la scène et la source avec une grande vitesse de l'ordre d'une centaine de cycles par seconde .

Le signal résultant du détecteur est électroniquement démodulé pour produire un signal qui mesure la différence entre le signal de la scène et celui de la source

$$V(\lambda)_{\text{scène}} - V(\lambda)_{\text{source}} = R(\lambda) \left\{ \Delta P(\lambda)_{\text{scène}} - \Delta P(\lambda)_{\text{source}} \right\} \quad (6)$$

Pour la classe des longueurs d'ondes reflectives , $R(\lambda)$ peut être déterminée en couvrant simplement l'objectif du spectromètres .

$$R(\lambda) = \left\{ \frac{V(\lambda)_{\text{scène}}}{\Delta P(\lambda)_{\text{source}}} \right\} \quad (7)$$

Si on substitue l'équation (7) dans l'équation (6) on obtient le résultat suivant :

$$P(\lambda)_{\text{scène}} = \left\{ \frac{\Delta P(\lambda)_{\text{scène}}}{\Delta P(\lambda)_{\text{source}}} \right\} \cdot V(\lambda)_{\text{source}}$$

Ce qui nous donne une valeur égale à la valeur trouvée au laboratoire , donc cette méthode est identique au calibrage avec la source au laboratoire .

Cependant l'importance de cette méthode est que l'instrument fixe la source et la scène dans le même environnement .

IV.3.c. TROISIEME METHODE DE CALIBRATION

La troisième méthode de calibrage consiste à placer près de la scène un matériau étalon dont la réflectance est connue ou bien une source de corps noir dont la température est connue.

Si la vitesse de balayage spectral de l'instrument est suffisamment rapide, on a le balayage de la scène qui est suivi immédiatement d'un balayage de la réflectance du matériau étalon ou du corps noir.

- Dans la région réflective, ceci équivaut à comparer la réflectance de la réflectance de la scène à l'échantillon standard dans les mêmes conditions.
- Dans la partie émissive du spectre, cette méthode élimine essentiellement l'effet de la transmission atmosphérique entre la scène et l'instrument de mesure. Mais un sérieux problème persiste : c'est la détermination de la taille nécessaire des échantillons qui remplaceront le champ de vision.

La deuxième difficulté avec l'étalon ou le corps noir est d'assurer la qualité de l'étalon dans le terrain, car la source de corps noir doit être maintenue à une température uniforme à l'encontre du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, de l'humidité etc...

Alors que la réflectance étalon est soumise aux subtils changements de surface dus à l'interaction de la matière superficielle avec les gaz ambiants.

On peut introduire des modifications dans cette méthode qui est la méthode réflectance - panneau : On place près de l'objectif de l'instrument une petite réflectance étalon et on mesure le spectre de la scène. Immédiatement après, on mesure le spectre de cet étalon. L'avantage de cette méthode est que la taille du panneau est petite, son inconvénient est de ne pas inclure les effets atmosphériques sur une distance qui est pratiquement le double de la longueur-scène- instrument, mais cet inconvénient est négligeable.

Cette méthode est la seule qui soit pratique pour un instrument ayant un grand angle de vision. Ce procédé de calibrage (par réflectance étalon) réalise des données qui conviennent à la comparaison avec des données du spectromètre de laboratoire.

PLAN DU CHAPITRE V

V- 1 - OPTO-ELECTRONIQUE .

- Sources de lumiere
- R ecepteurs photo sensibles

V- 2 - SYSTEME DE MESURE

- V-2 -a realisation de l'metteur
- V-2-b realisation du recepteur .

...../.....

L'opto-electronique

V.1 - Pendant longtemps l'homme a utilisé ses yeux pour détecter la lumière et les flammes pour la produire, il y a seulement quelques années qu'il a pu transformer les fonctions électriques en fonctions lumineuses. En 1839 Becquerel a été le premier à observer l'effet photoélectrique à partir de la lumière rayonnée par une électrode, Willoughbi Smith a observé en 1873 une diminution de la résistance de sélénium lorsqu'il est exposé à la lumière solaire. Ainsi les chercheurs se sont intéressés aux semi-conducteurs et ils ont remarqué que les diodes et les transistors sont sensibles à la lumière, alors que d'autres matériaux émettent de la lumière visible sous certaines conditions. Les détecteurs de lumière en silicium ont été commercialisés à partir de 1950 et les diodes électroluminescentes en 1960, maintenant ces composants constituent la pointe de certaines industries spécialisées.

V.1a-Sources de lumière :

Dans les dispositifs opto-electronique, il existe un nombre considérable de sources lumineuses, cependant trois (3) catégories de sources sont plus fréquemment utilisés et qui sont :

- Lampes à incandescence
- Tubes à néon
- Diodes électroluminescentes

Dans certaines applications spéciales on peut rencontrer :

- Le soleil
- Lasers
- Cellules électroluminescentes

Dans cette étude on développera les théories des diodes électroluminescentes vu que notre réalisation pratique utilise une L.E.D comme source de lumière.

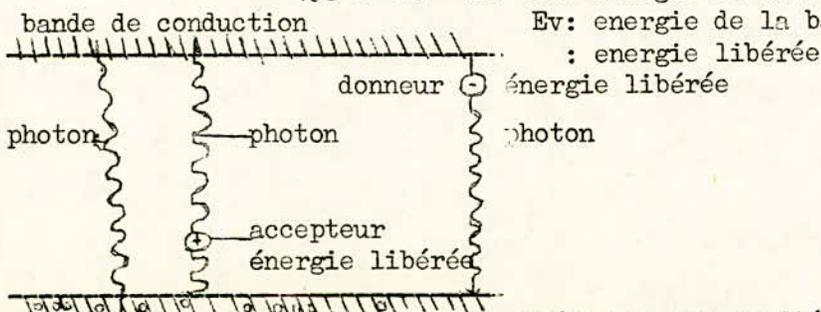
V.1b-Diodes électroluminescentes L.E.D

Toute jonction P.N parcourue par un courant direct et du fait de la recombinaison des porteurs de charge au niveau de la jonction, l'énergie rayonnée est sous forme de photons. Ce phénomène s'explique ainsi : Soit un électron libre de la bande de conduction venant prendre place laissée vacante par l'absence d'un électron de la bande de valence d'un atome chargé positivement (trou), il le fait en libérant une énergie égale à la différence des énergies des états initiaux.

$$h\nu = E_c - E_v \quad E_c: \text{énergie de la bande de conduction}$$

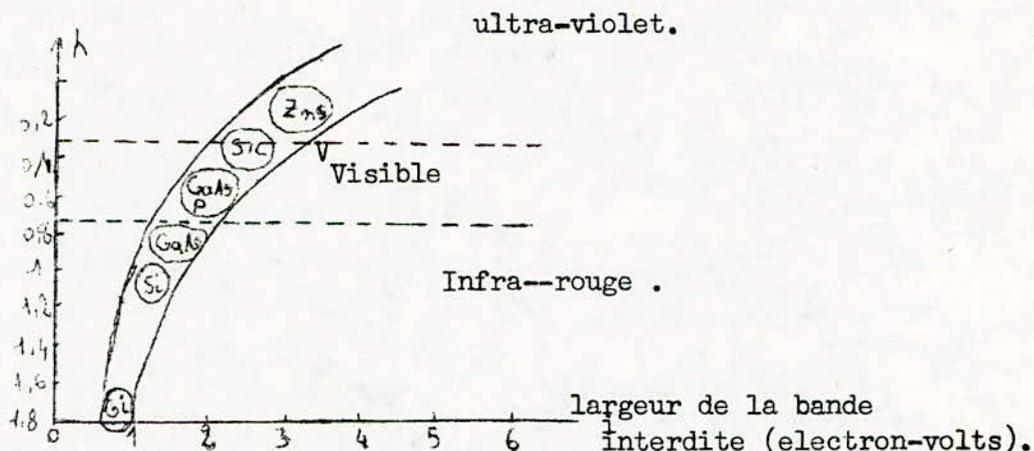
$$E_v: \text{énergie de la bande de valence}$$

$$h\nu: \text{énergie libérée}$$



Modèle des bandes d'énergie

On conçoit que la fréquence de la radiation émise et par conséquent sa longueur d'onde soit directement liée à la bande interdite du semi conducteur envisagé où elle même est liée à la tension du coude de la caractéristique directe .



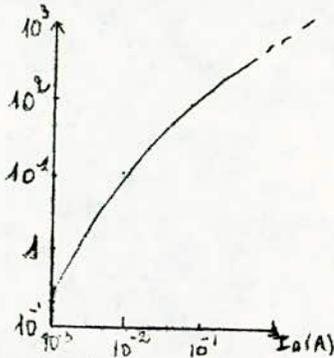
plus la tension de coude de la diode est élevée, c'est ce qui explique que le germanium et le silicium dont on fait des diodes à faibles tension de coude, émettent des radiations dans l'infra-rouge lointain, alors que l'arséniure de gallium, dont la tension de coude se situe vers 1,3 V émette dans l'infra-rouge proche et le carbure de silicium (tension de coude 2 à 3 V) des radiations visibles (jaune-vert), tout ceci est matérialisé par le tableau suivant :

Materiau	l'approximation du gap en eV	l'émission typique en longueur d'onde en nm
Ga P, dopé N	2. 18	530 - 595
Ga P, dopé ZN	2. 24	530 - 575
Si c	1. 97	430 - 700
Ga.As.P	1. 92	630 - 660
Ga P, dopé ZNO	1. 76	615 - 730
Ga APAS, rouge	1. 78	660 - 720
Ga as, dopé ZN	1. 37	890 - 920
Ga.AS.Si	1. 33	890 - 980

° Rendement quantique théorique de la jonction (η théorique)
tous les électrons injectés dans une jonction ne donnent pas naissance à des photons, le rapport entre nombre de photons émis et celui des électrons injectés dans la jonction est appelé rendement quantique théorique

° Rendement quantique externe (η externe)
on le définit comme étant le rapport du nombre de photons réellement émis vers l'extérieur à celui des électrons qui leur ont donné naissance, généralement il est traduit en rapport de puissance lumineuse émise au courant qui lui a donné naissance, soit en watt par ampère ou en milli watts par ampère (W/A ou mW/A)

V.1c - Caractéristiques des diodes à électro luminescentes
puissance rayonnée en fonction du courant direct : I_D



La puissance lumineuse rayonnée par les diodes électro luminescentes est une fonction quasi linéaire du courant d'entrée. On remarque sur la courbe qu'après une zone correspondante au très faible courant, on ne sait pas trop ce qui se passe, la puissance rayonnée est linéaire sur au moins de deux décades puis on a en flexion assez brutale .

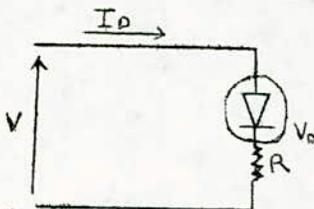
Influence de la température :

La température influe sur le rendement quantique qui diminue lorsque la température augmente et aussi sur le spectre d'émission qui se déplace vers les longueurs d'ondes élevées .

Vecteur intensité :

La diode électro luminescente se caractérise par une tension directe et un courant nominal, si elle est suffisamment alimentée, elle émet une lumière à laquelle correspond une certaine puissance totale optique émise par unité d'angle solide ou encore vecteur intensité, on mesure le vecteur intensité en milliwatt par stéradian (M w / St) par ailleurs, on définit l'éclairement E comme étant la puissance optique émise par unité de surface, il est exprimé en m W / Cm²

Valeur du courant direct



en écrivant l'équation de la maille

$$V = V_D + RI_D$$

V_D : tension aux bornes de la diode

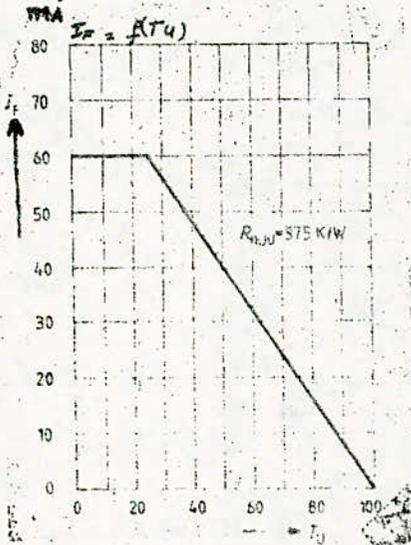
$$I_D = \frac{V - V_D}{R}$$

R : résistance de charge

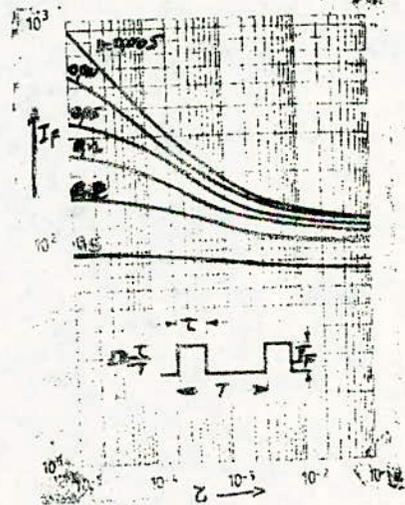
- i) Le courant I_D ne doit pas avoir des valeurs faibles ($I_D < 10 \text{ mA}$) et ceci s'explique par le fait que pour ces valeurs, la variation relative de la puissance optique émise en fonction de la température est élevée. Mais il ne faut pas non plus utiliser des diodes électro-luminescentes à fort courant I_D car la puissance émise décroît lorsque la température de jonction augmente .

Caractéristique de la diode
electroluminescente CQV 31

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>	<u>Unités</u>
Maximum du spectre d'émission	645 ± 15	nm
longueur d'onde minimum	638	nm
demi-angle d'ouverture	25	Grad
tension directe VF à IF	IF = 20 VF = 1,6 (2)	mA V
courant inverse UR à IR	UR = 5 V IR = 0,01 (10)	µA
intensité lumineuse IF = 10 mA	IV 40	Mcd
temps de montée	Tr : 100	ns
temps de descente	tf : 100	ns
capacité UR = 0 V f = 1 MHz	Co = 12	PF



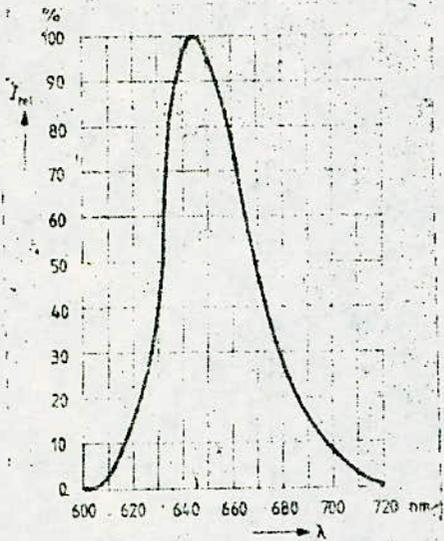
Courant direct en fonction de la température



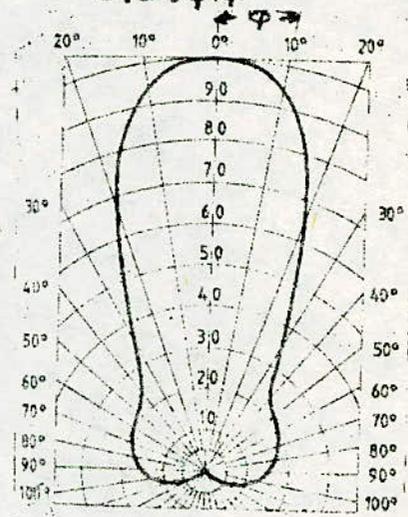
Courant variant en fonction du palier $I_F = f(z)$.

T période
z palier.

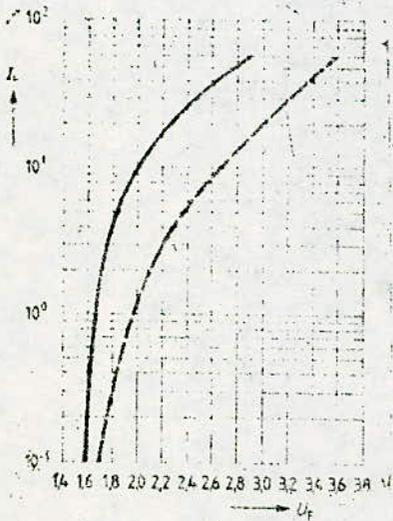
Spectre d'émission relative
 $I_{rel} = f(\lambda)$



caractéristique angulaire
 $I_{rel} = f(\phi)$

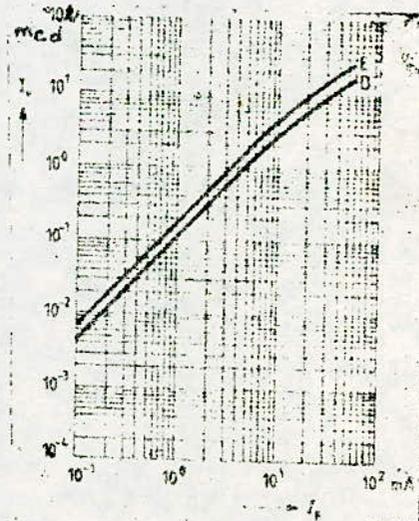


$I_p = f(u_p)$



Courant direct.

$I_v = f(I_p)$



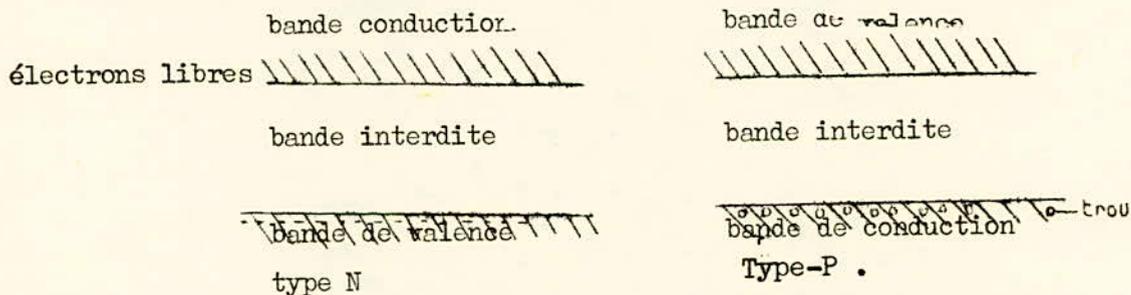
Intensité lumineuse.

V.1d - Récepteurs photo sensibles :

Le fonctionnement des différents éléments photo sensibles à semi conducteurs découle du phénomène physique par lequel une radiation lumineuse (qu'elle fasse partie du spectre visible ou non) cède son énergie aux électrons d'un solide en les faisant passer de la bande de valence à la bande de conduction un photon d'énergie $h\nu$ peut en lever un électron à la bande de conduction en laissant un trou à condition que $h\nu > \Delta W$ ou $hc/\lambda > \Delta W$ est l'écart entre les bandes de valence et de conduction, en d'autres termes la longueur d'onde de rayonnement $\lambda = \frac{hc}{\Delta W}$ doit être inférieure à $\lambda_0 = hc/\Delta W$ avec $\lambda_0 = 1,237/\Delta W$ (λ_0 exprimé en μm et ΔW en eV)

Application des semiconducteurs dopés

L'action de la lumière produit un transfert d'électrons des atomes donneurs aux espaces libres de la structure du cristal. Quand le matériau est du type n, on a une augmentation de la conductibilité par les électrons introduits dans la bande de conduction au détriment des atomes donneurs



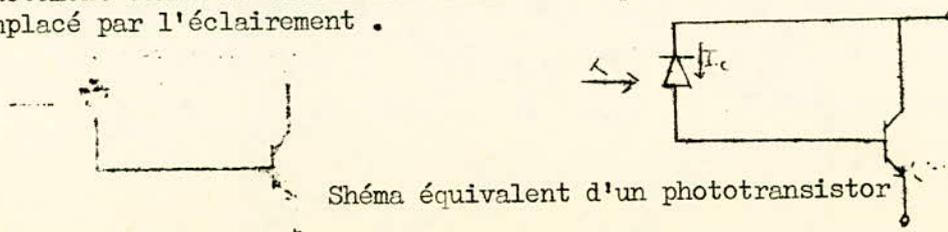
Dans le cas d'un semi conducteur de type P, si un photon a une énergie suffisante pour amener un électron à la bande de valence au niveau de la bande de conduction des atomes accepteurs, alors on a une augmentation de la conductibilité par création de trous .

Les principes définis ci-dessus trouvent leur application dans la construction de différents types de récepteurs photo sensibles on peut les photodiodes, les duo-photodiodes, les cellules photovoltaïques et les phototransistors, ce dernier cité est le détecteur utilisé dans notre réalisation pratique d'où sa théorie est développée ci-dessous

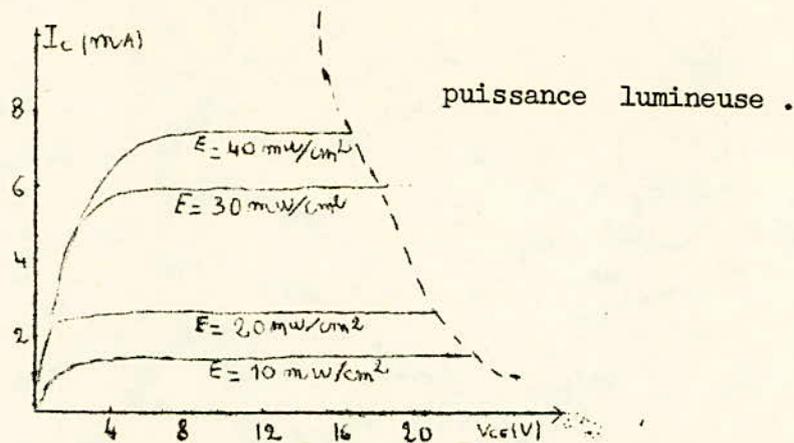
V.1c - Etude de phototransistor :

principe :

Il est considéré comme l'association d'une diode de jonction plane et d'un transistor amplificateur, la sensibilité de la diode est alors pratiquement multipliée par le gain (B) du transistor. Le phototransistor fonctionne exactement comme un transistor normal sauf que le courant de base I_b est remplacé par l'éclairement .



V.1 f - Caractéristiques d'un phototransistor



Cette courbe montre la caractéristique I_c en fonction de V_{ce} pour différentes valeurs d'intensité de lumière pour un phototransistor au silicium .

sensibilité :

C'est la variation, ou la valeur de la variation du courant I_c en fonction du flux lumineux qui la produit $S = \frac{dI_c}{dE}$

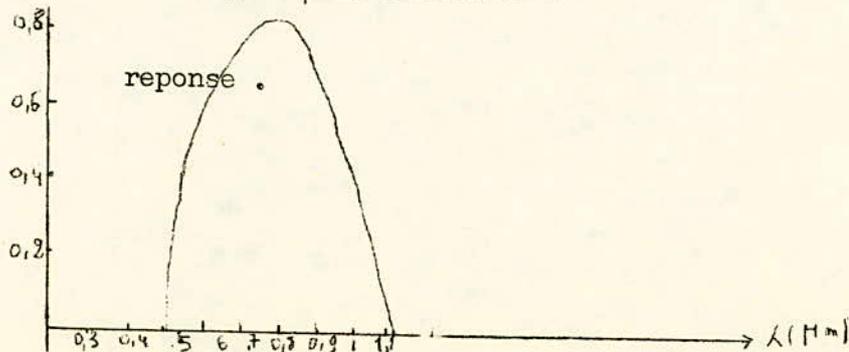
La sensibilité est exprimée en milliampères par Lumen $\frac{\text{mA}}{\text{lm}}$.

Courant d'obscurité :

Il est défini comme le courant dont le phototransistor est le siège lorsqu'il est dans l'obscurité, il est noté I_0 . Ce courant subsiste lorsque le phototransistor est éclairé, il s'ajoute au courant de collecteur I_c et ceci provoque généralement la saturation du phototransistor. Pour diminuer l'effet de ce courant d'obscurité, on peut faire "sortir" la connexion de base pour en fixer la polarisation et ceci permet d'agir simultanément sur le courant de collecteur par voie électrique et optique

Réponse spectrale :

La réponse spectrale d'un phototransistor (à une longueur d'onde et intensité de la diode données) est une fonction de la surface de jonction collecteur base et du gain β du transistor .

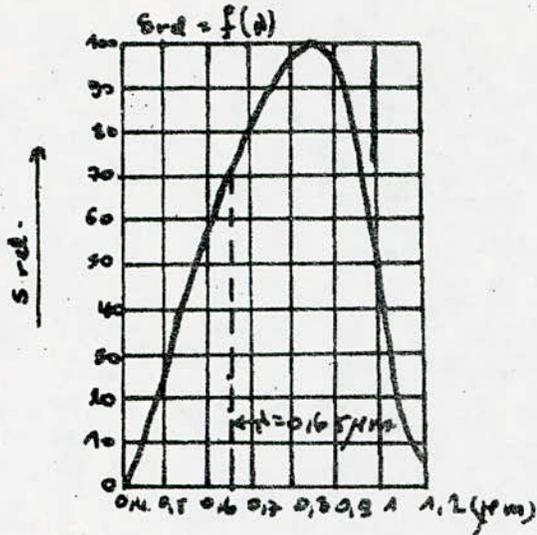


Caractéristiques du phototransistor B P 103 II

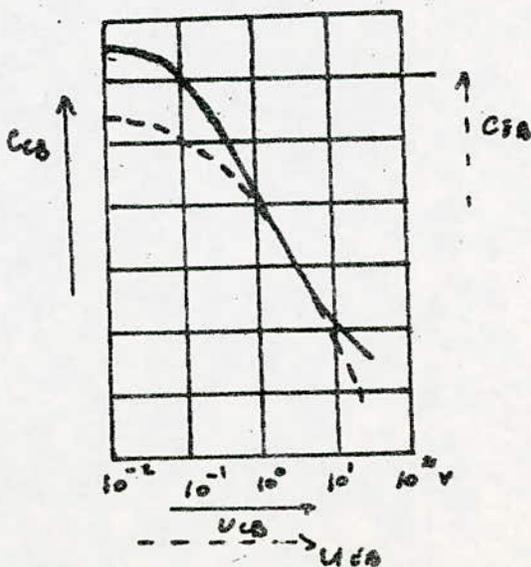
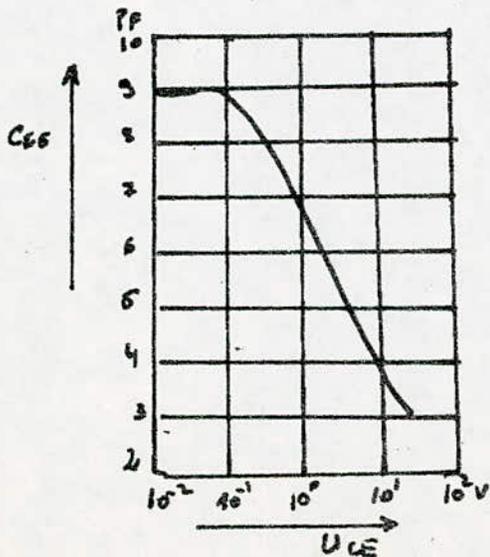
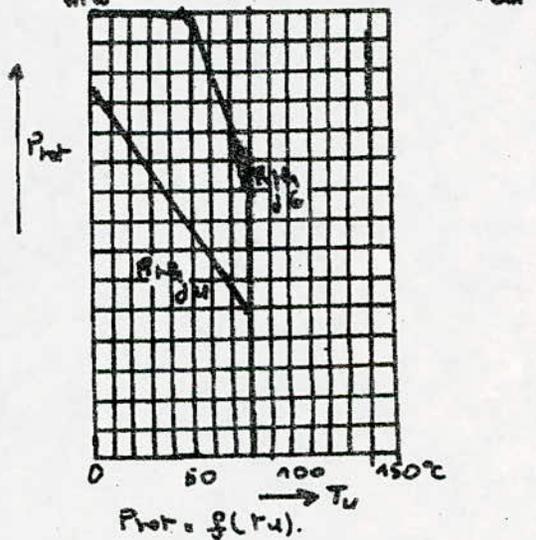
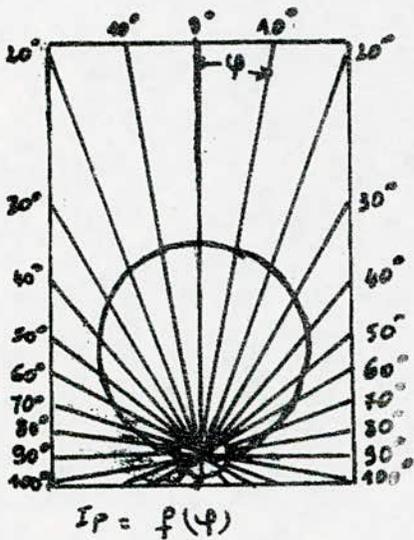
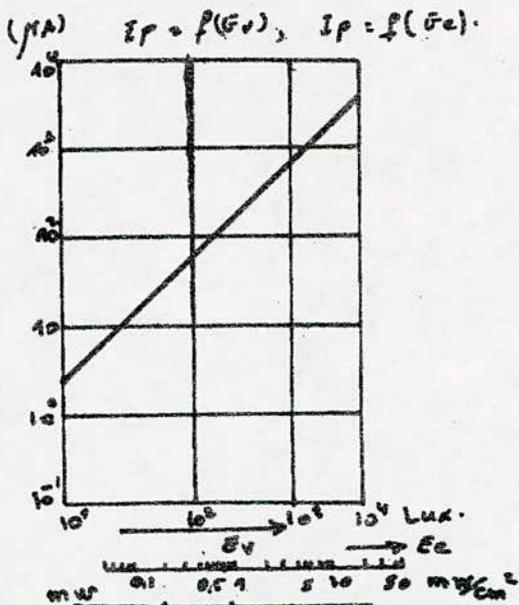
<u>Paramètre</u>	<u>Symbole</u>	<u>Valeur</u>	<u>Unité</u>
tension collecteur émetteur	V _{ceo}	50	V
tension base-émetteur	V _{EB0}	7	V
Courant collecteur	I _c	100	mA
Courant de pointe ($t \geq 10 \mu s$)	I _{ch}	200	mA
température de travail	T _j	125	°C
Température de seuil	T _s	- 55 à + 80	°C
Température de soudure	T _l	260	°C
Résistance thermique	R _{th}	500	K/W
Résistance thermique du boîtier	R _{thB}	200	K/W
Bande spectrale	λ_s	440 - 1070	nm
longueur d'onde maximale	λ_{peak}	856	nm
photo courant collecteur-base (E _v = 1000 Lux UCE 5 V)	I _{pcB}	2,1	μA
photo courant collecteur-base (E _c = 0,5 mm/cm ² V _{ce} = 5 V, λ = 950nm)	I _{pcB}	0,55	μA
photo courant de sortie (UCE = 5 V, E _c = 20 mW/cm ²)	I _P	0,7 - 1,4	mA
Surface de reception	A _d	0,12	mm ²
temps de montée à 90 % de sa valeur finale	T _r	5 - 10	
temps de descente à 10 % de sa valeur initiale	T _d	5 - 10	μs
capacité collecteur-émetteur (UCE = 0V f = 1 MHz, E = 0)	C _{ce}	9	PF
capacité collecteur-base U _{cB} = 0 f = 1 MHz E = 0	C _{cb}	13	PF
capacité émetteur - base	C _{eb}	21	PF
demi-angle d'ouverture	θ	54	deg °

Caractéristiques du BP 103 II.

sensibilité relative spectrale



Photocourant.



V.2 Système de mesure monospectral .

Le détecteur multispectral à balayage est un radiomètre à quatre canaux, qui balaye la surface de la terre et enregistre l'intensité et l'énergie réfléchi par la physionomie et les objets de la surface terrestre .
 Ces caractéristiques sont détectées par chacun des quatres canaux de longueurs d'ondes différentes .

- Canal 4 (0,5 - 0,6) μm
- Canal 5 (0,6 - 0,7) μm
- Canal 6 (0,7 - 0,8) μm
- Canal 7 (0,8 - 1,1) μm

Les détecteurs Landsat sont sensibles aux radiations dans la région visible et proche infra-rouge. Les éléments sensibles utilisés répondent différemment d'une bande à une autre .

Canal 4 (0,5 - 0,6) μm .

Ce canal à une grande capacité pour déterminer la pénétration en eau, la turbidité et la contenance des corps en eau et distingue la végétation verte et identifie les structures géologique .

Canal 5 (0,6 - 0,7) μm .

Cette bande définit la culture et les caractéristiques topographique et nous permet de classer les différents types de végétation verte qui couvre le sol .

Canal 6 (0,7 - 0,8) μm .

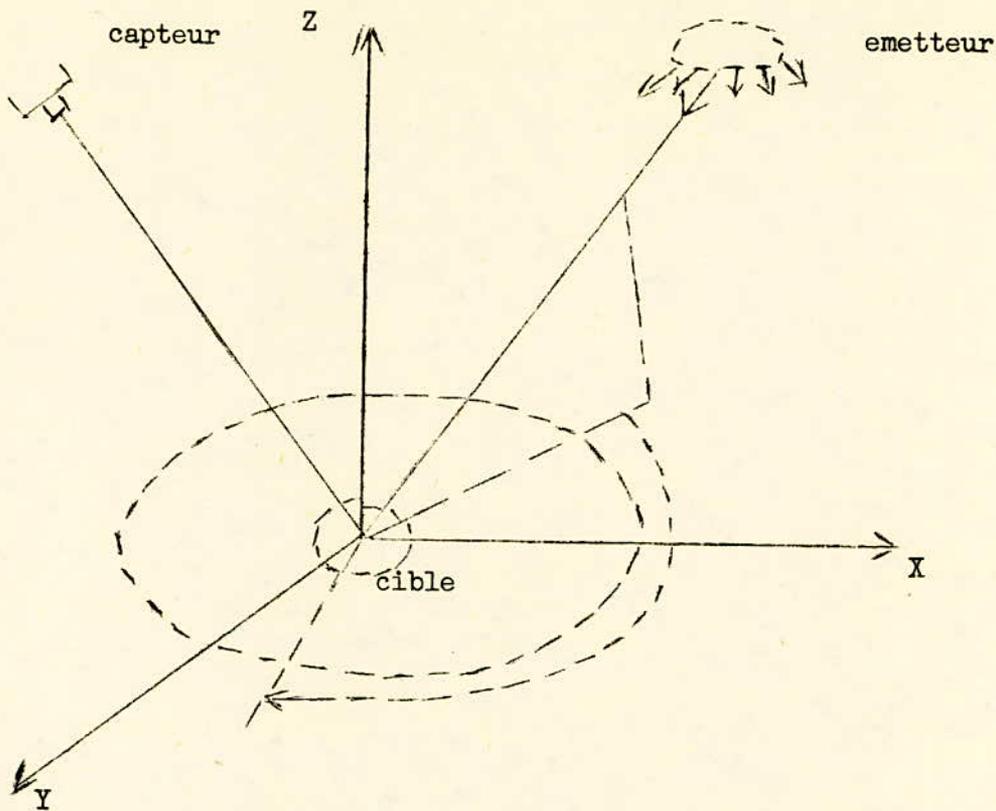
Se trouvant dans la zone limite entre le visible et le proche infra-rouge, elle est utilisée pour identifier les différences du sol et aussi rescencer les valeurs de la biomasse verte dans la végétation .

Canal 7 (0,8 - 1,1) μm .

Bande proche infra-rouge utilisée pour délimiter les surfaces contenant de l'eau souterraine et aussi pour reconnaître les terrains de récolte.

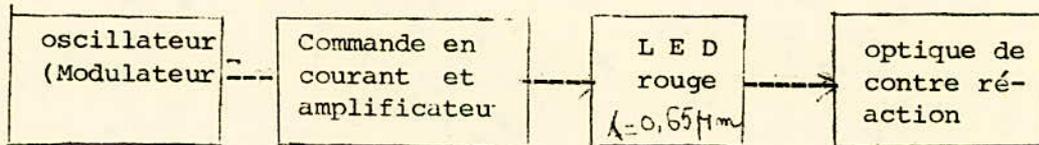
Le système de mesure est constitué de deux grandes parties .

- un emetteur délivrant une énergie maximale autour de la longueur d'onde $[\lambda = 0,65 \mu m]$ Cette énergie est envoyée sur la surface analysée dans la direction (θ_i, ϕ_i) , par rapport à la normale de la surface analysée, l'énergie réfléchi est détectée et mesurée dans la direction (θ_r, ϕ_r) par un récepteur tel que la surface analysée se situe au centre du cercle horizontal défini par $\theta_i = \theta_r = \pi/2$, d'où l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion .

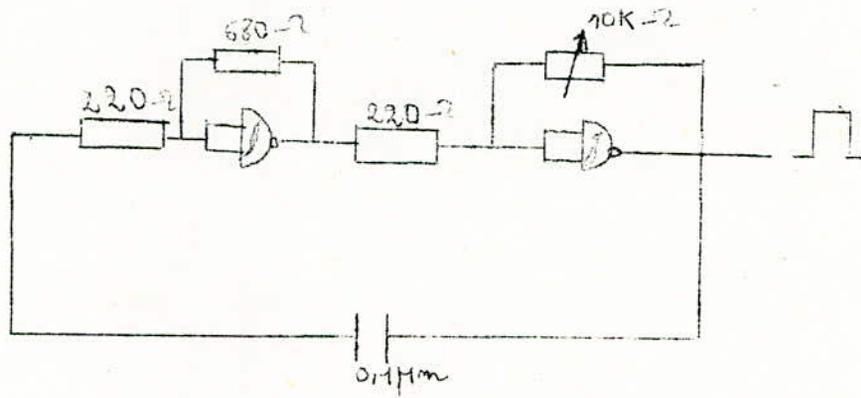


V.2.a Réalisation de l'émetteur :

Schéma synoptique de l'émetteur



Cet émetteur est bâti essentiellement autour d'un oscillateur fournissant à sa sortie un signal échelonné (carré) qui nous permettra de commander la L E D (diode) en courant et d'avoir un flux lumineux modulé (pulsé) en sortie . L'oscillateur est constitué à l'aide d'un circuit CMOS MC14093B (voir caractéristiques) .



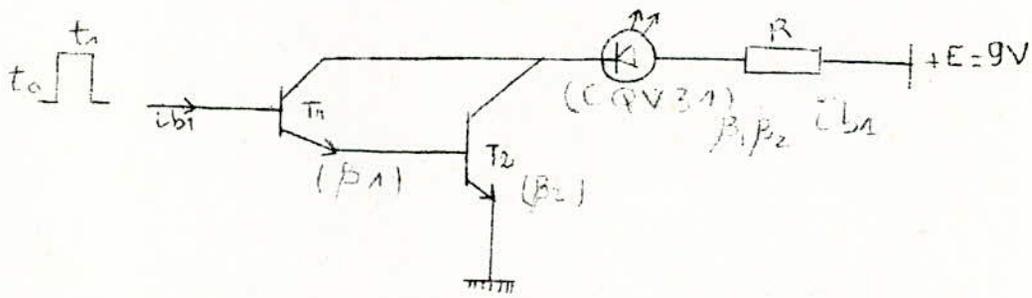
Multivibrateur (oscillateur)

Ce multivibrateur est un oscillateur constitué de deux portes "NAND", la fréquence d'oscillateur est donnée par les éléments R et C à une constante près, cette constante dépend de la technologie de construction de la porte .

$$f = k_0 \cdot \frac{1}{RC}$$

Commande en courant et polarisation de la diode :

L'émetteur visible est composé essentiellement d'une diode électro-luminescente (CQV 31) dont les caractéristiques ont été donné précédemment, cette diode est commandée en courant par un montage très simple, le montage Darlington, qui amplifie le courant, car le courant à l'entrée du montage est très faible, or on a besoin d'un courant de quelques dizaines de milliampères (mA).



La diode émettra à partir du basculement du montage Darlington en bloqué saturé, d'où émission d'un faisceau lumineux modulé . Au temps T₀, le transistor T₁ est bloqué, d'où T₂ bloqué donc aucun courant ne passe dans la diode donc V_{ce2} ≈ +E

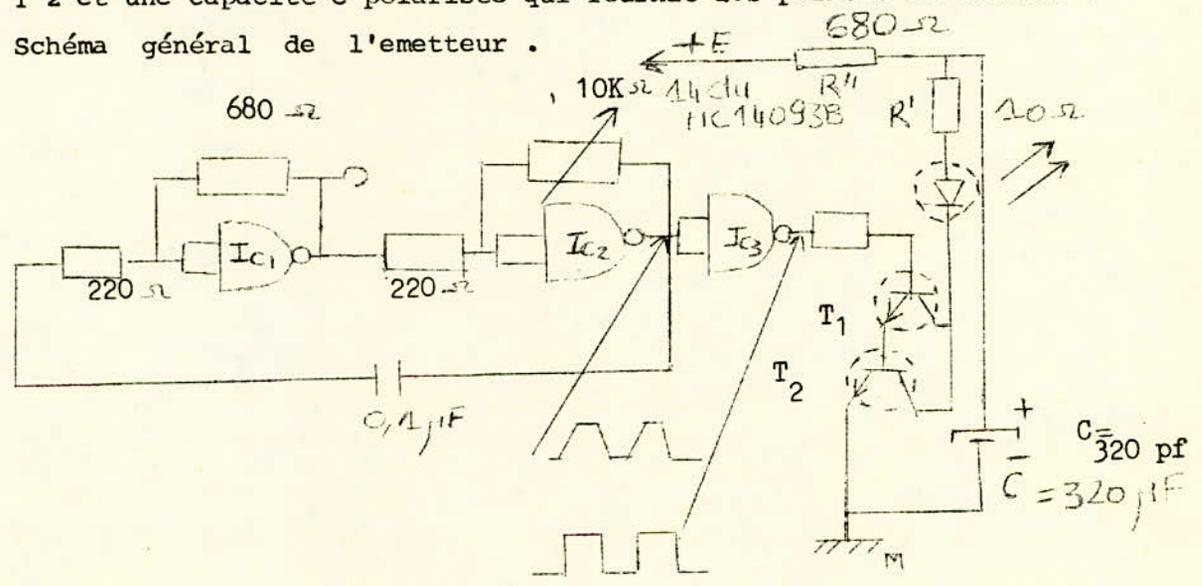
à T_1 le transistor (T_1) est saturé donc on a $V_{CE2} \text{ saturé } 0V$ et
 o a l'équation $RI + V_d = E$.
 V_d étant la tension directe de la diode pour une diode rouge $V_d = 1,6 V$
 Si on prend un courant I_d de 10 mA et la tension d'alimentation
 $E = 9 V$

$$RI = E - V_d$$

$$R = \frac{E - V_d}{I} = \frac{9 - 1,6}{\frac{10}{1000}} = 740 \Omega$$

La résistance de polarisation R est de 740Ω
 donc la résistance $R = R' + R''$
 tel que R'' limite le courant en cas de court circuit du transistor
 T_2 et une capacité C polarisée qui fournit les pointes de courant.

Schéma général de l'émetteur.

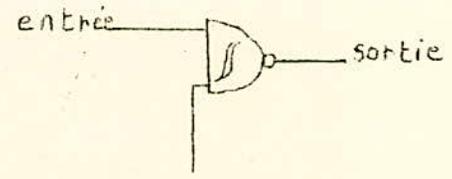
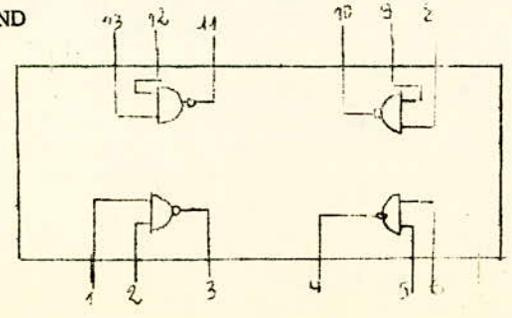


Les portes IC_1 et IC_2 forment le multivibrateur alors que la porte
 IC_3 ne sert qu'à mettre en forme le signal.
 C étant une capacité de $0,1 \mu F$ et R un potentiomètre de $10 K \Omega$

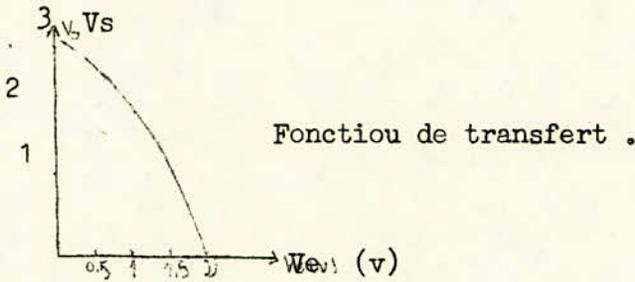
Caractéristiques des différents éléments de l'émetteur

MC 4093B

Le MC 4093 B est un circuit intégré CMOS formé de quatre (4) portes
 NAND



Quelque soit la forme du signal d'entrée, à la sortie on a un signal rectangulaire. Ce circuit intégré est un trigger qui fournit des signaux très stables .



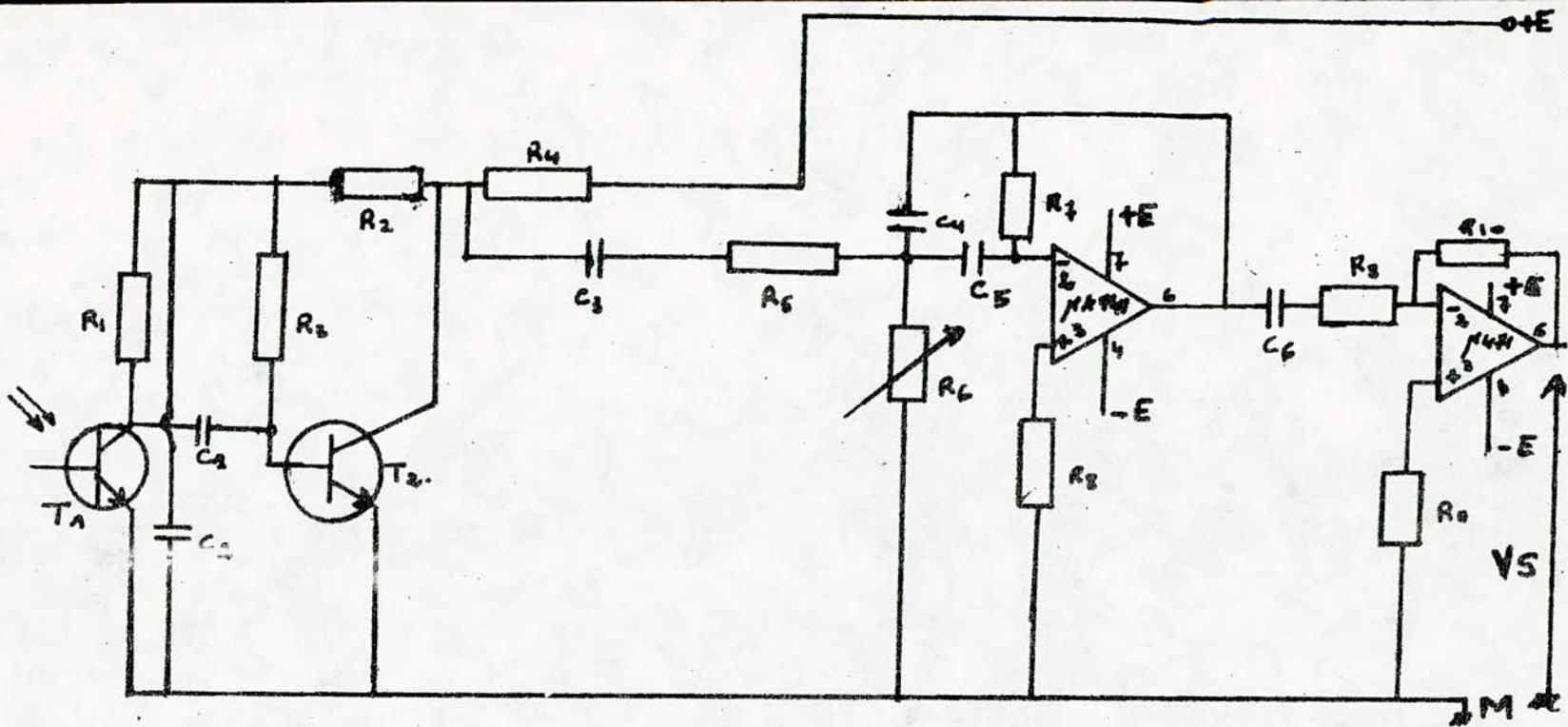
Caracteristiques	symbole	valeur	unite
tension d'alimentation	V_{oD}	0,5- 18	V
Tension d'entrée	V_{in}	0,5 à $V_{DD}+0,5$	V
courant	I	10	mA
Température de travail	T_A	-55 à 125	°C
Température du boitier	T_B	-65 à 150	°C

Transistor NPN T1: 2N22.22

Puissance totale	I_c	V_{cE}	min	max
400 mW	800 mA	30 V	50	50

Transistor NPN T2: 2N3055

Puissance totale	I_c	V_{cE}	β min	β max
115 W	15 A	60 V	20	70



Schema general du recepteur

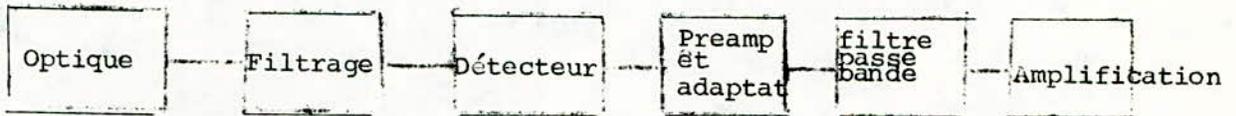
V.2.b Réalisation du récepteur.

Les récepteurs sont des instruments qui reçoivent et enregistrent l'énergie émise par la surface à étudier ils sont caractérisés par :

- leur bande spectrale
- pouvoir d'analyse spatiale
- sensibilité
- fidélité

l'élément essentiel, est le détecteur qui est basé sur le mode d'interaction existant entre le rayonnement incident et le semi-conducteur.

Schéma synoptique du récepteur.



Optique :

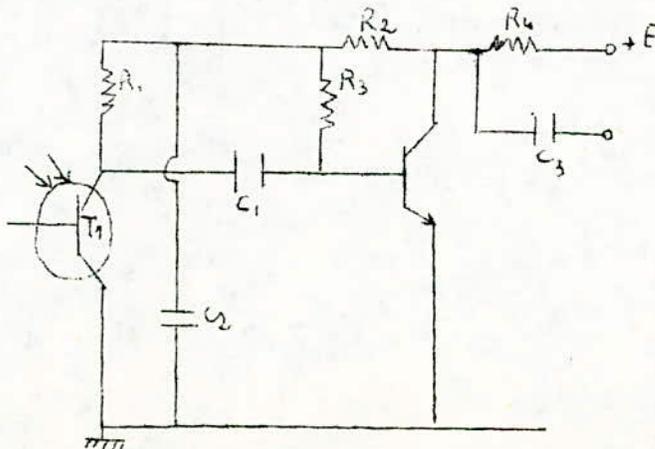
La lentille utilisée est une lentille convexe qui fait converger le rayonnement incident sur l'élément sensible du détecteur caractéristique de la lentille.

- (Diamètre) 5 cm = 8,5 cm
- (Distance focale) = 19 cm

Détecteur :

le détecteur utilisé est un phototransistor BP 103 II basé sur l'effet photoémisif il a une largeur de bande de $[0,4 - 1,1] \mu m$ et une sensibilité maximale pour une longueur d'onde $\lambda = 0,85 \mu m$.
 pour $\lambda = 0,65 \mu m$ la sensibilité est de 70 %.

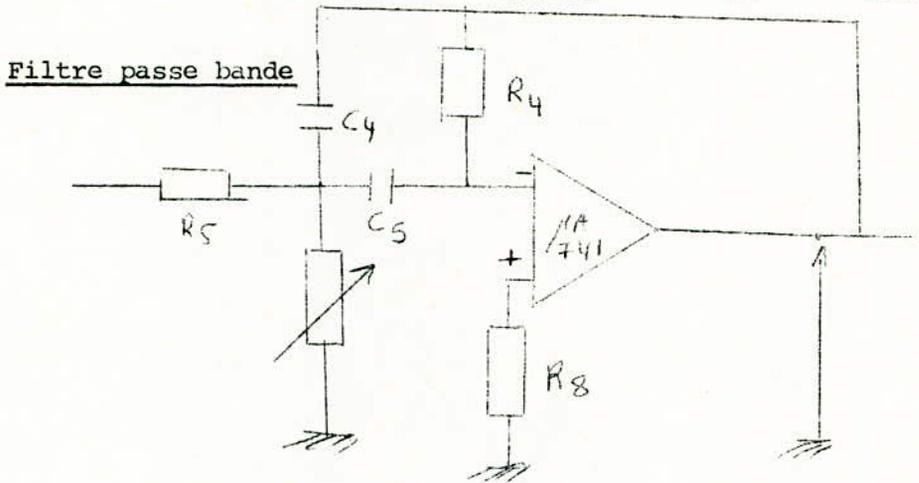
1 / Polarisation, préamplification et adaptation.



- $R_1 = 1,2 M\Omega$
- $R_2 = 150 K$
- $R_3 = 4,7 M\Omega$
- $R_4 = 68 K$
- $C_1 = 2,2 nF$
- $C_2 = 10 nF$
- $C_3 = 3,3 nF$

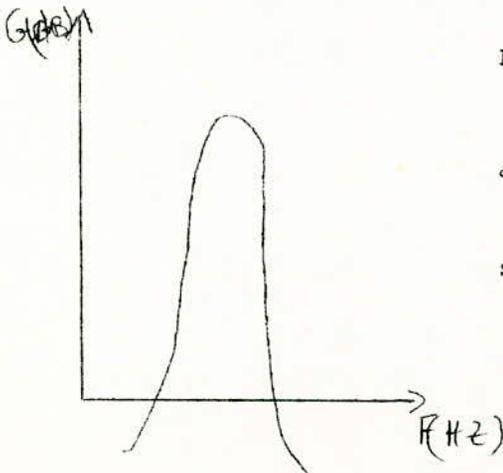
Le phototransistor T_1 est polarisé par une résistance de charge R_1 de valeur convenable pour empêcher la saturation pour un haut niveau de lumière ambiante. La réactance de la capacité C_1 à la fréquence de travail doit être faible (basse) devant la résistance R_1 . La résistance R_2 , alimente le phototransistor et la cellule (R_2, C_2) assure la polarisation du transistor (T_2) et assure un découplage sélective réduisant la gain aux fréquences inférieures à la fréquence de travail ($f = 2 \text{ KHZ}$) la résistance R_4 alimente le transistor T_2 , C_3 transmet la composante alternatif du collecteur de T_2 au filtre passe bande.

(T ₂)	2N 1398	VCE max	Puissance totale	Hfe	Ic max	Ic Hfe
		15 V	150 mW	80	300mA	10mA



C'est un filtre actif passe bande à contre réaction multiple (Structure de Ranch)

La résistance R_8 n'intervient pas dans les calculs alors que la résistance R_6 est mise pour avoir une selectivité.



$$F(p) = \frac{G_m 2 \zeta \omega_0 p}{-p^2 + 2 \zeta \omega_0 p + \omega_0^2}$$

$$\text{avec } G_m = - \frac{R_7}{R_5} \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

si on prend $C_1 = C_2$

$$G_m = \frac{R_7}{2 R_5}$$

$$\Delta W = \frac{2}{R_7 C_1}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_7 \cdot \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} \cdot C_1 C_2}} = \frac{1}{C \sqrt{R_7 \cdot \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6}}}$$

$$R_5 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{G_{f_0} \Delta \omega}$$

$$R_6 = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta \omega}{2\omega_0^2 - G_{\beta} \Delta \omega^2}$$

$$R_7 = \frac{1}{C} \cdot \frac{2}{\Delta \omega}$$

$$C = 0,1 \mu\text{F}$$

$$f_0 = 2 \text{ kHz}$$

$$\Delta \omega = [10 \text{ Hz} \times 2\pi]$$

$$G_m = 3 \text{ dB}$$

Calcul numerique.

$$R_7 = \frac{1 \times 2}{0,1 \times 2\pi \times 10^{-5}} = 318 \text{ k}\Omega \approx 320 \text{ k}\Omega$$

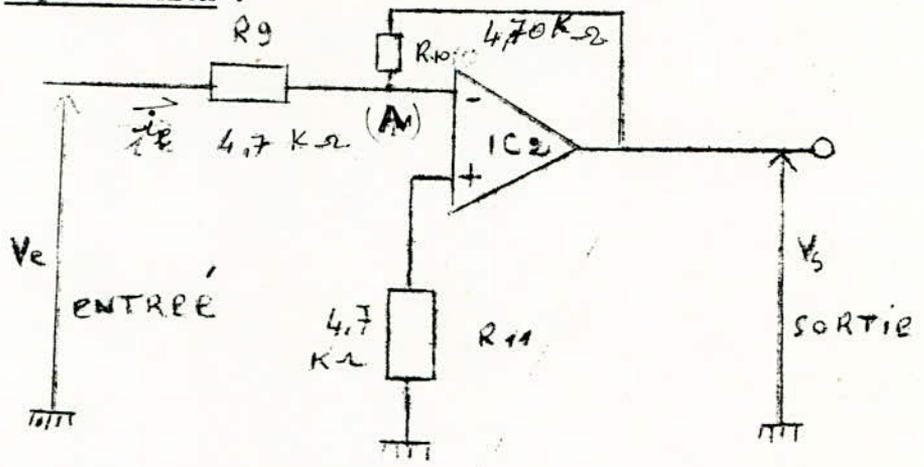
$$R_5 = \frac{1}{0,1 \times 10^{-6} \times 1,41 \times 6,28 \times 10^3} = 110 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = \frac{10 \times 6,28^2}{10^7 \times 2 \left((2 \times 10^3 \times 6,28)^2 - 1,41 \times (6,28)^2 \right)} \approx 10 \text{ k}\Omega$$

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{2 \times 10^3}{10} = 200$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_7 \approx 320 \text{ k}\Omega \\ R_6 \approx 10 \text{ k}\Omega \\ R_5 \approx 110 \text{ k}\Omega \\ R_8 \approx 320 \text{ k}\Omega \\ C_4 \approx C_5 \approx 0,1 \mu\text{F} \end{array} \right.$$

- Amplification :



L'amplificateur operationnel peut fonctionner comme inverseur en boucle ouverte, son gain est de 10^3 et un signal de 1 mW peut provoquer une saturation en sortie, mais une fois utilisé en boucle fermée son gain est déterminée par :

1) le point (A) est considéré comme masse virtuelle de tension nulle d'ou on a .

$$\frac{V_A - V_e}{R_3} + \frac{V_A - V_s}{R_{10}} = 0 .$$

$$\frac{-V_e}{R_3} - \frac{V_s}{R_{10}} = 0 \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = - \frac{R_{10}}{R_9}$$

$$\boxed{\frac{V_s}{V_e} = G_1 = - \frac{R_{10}}{R_9}}$$

$$G_1 = \frac{-R_{10}}{R_3} = \frac{-470 \cdot 10^3}{4,7 \cdot 10^3} = -100$$

Résistance d'entrée
 $V_e = R_9 i_e \Rightarrow \frac{V_e}{i_e} = R_9 = R_e .$

Résistance d'entrée est égale à la résistance $R_9 = 4,7 K\Omega$
 Résistance de sortie

$$R_S = R_o \frac{1 + R_{10}/R_9}{A}$$

$|A| \rightarrow \infty$
 RS très faible

La résistance R est utilisée pour limiter la derive thermique donc on utilise une resistance

$$R_{11} \approx R_{10} // R_p \approx R_9$$

$$R_{11} = 4,7 K\Omega$$

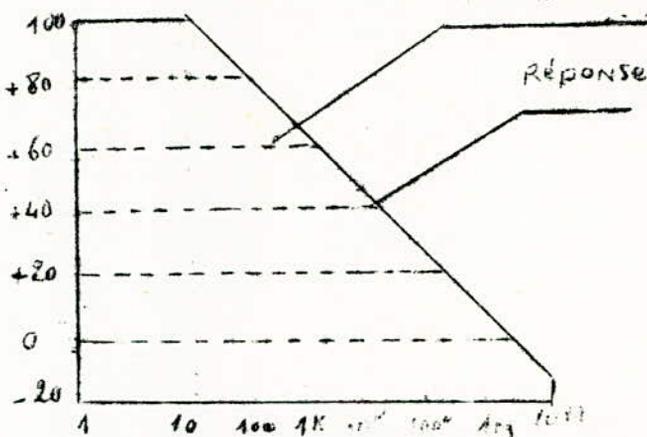
Calcul de la bande passante de l'amplificateur .

Le gain d'un ampli operationnel est lié à sa bande passante tel que

$$G \times B = K = \text{cte}$$

Le gain de l'ampli en boucle ouverte est égale à $G_0 = 10^5$ et sa bande passante à 10HZ d'ou la bande passante pour un gain de 100 on a.

REponse en chaîne Fermé



$$B_1 G_1 = B_0 G_0 = K$$

$$B_1 = \frac{B_0 G_0}{G_1}$$

$$B_1 = \frac{10^5 \times 10}{10^2} = 10^4 \text{ Hz}$$

$B_1 = 10^4 \text{ Hz}$ $G_1 = 100$

on définit donc K facteur de mérite d'un ampli : plus le gain diminue plus la bande passante augmente .

Capacité de liaison .

La capacité de liaison est considérée comme un court circuit vis à vis de l'alternatif donc pour relier la sortie du filtre à l'entrée de l'amplificateur on utilise une capacité de liaison C tel que si la résistance de sortie est R_S et la résistance d'entrée est R_e alors C doit vérifier la relation suivante .

$$\frac{1}{C\omega} \ll R_e + R_S$$

Comme $R_S \approx 0$

$$\omega = 2\pi f$$

$$C \gg \frac{1}{R\omega}$$

$$C \gg \frac{1}{2\pi f R} = \frac{1}{2\pi \times 210^3 \times 4,710^3} = 169 \text{ nF}$$

$$C \gg 169 \text{ nF}$$

on a pris $C = 1\mu\text{F}$

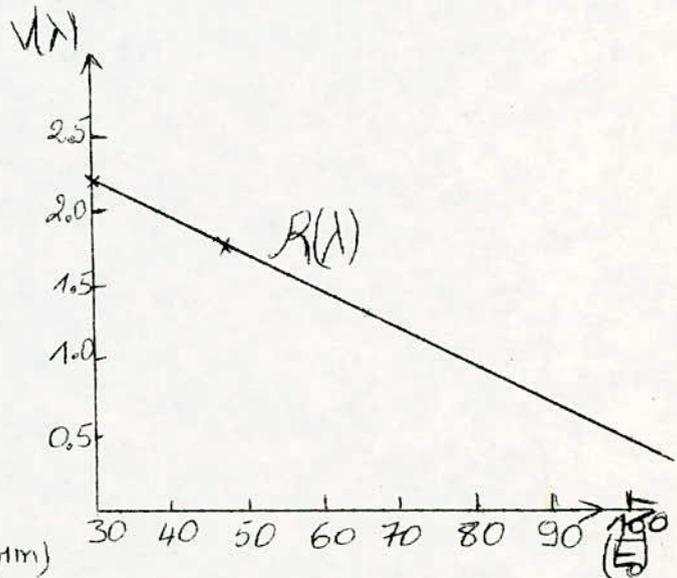
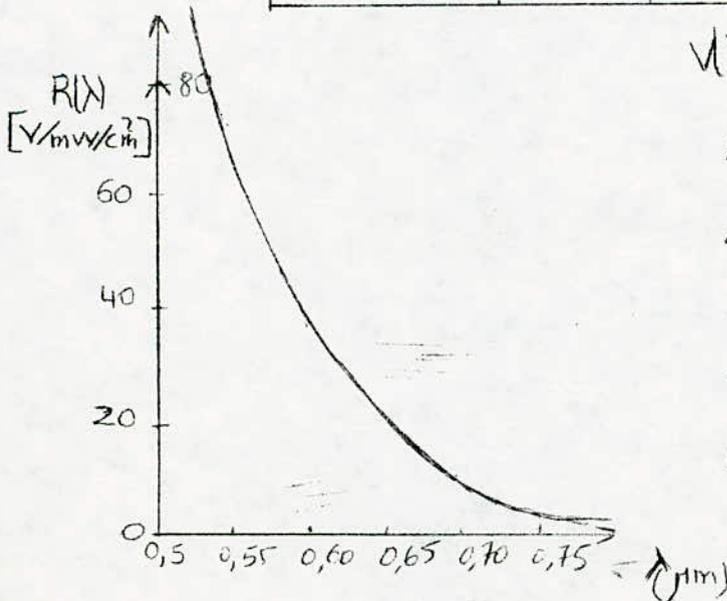
IV . 2 . C - Calibration du phototransistor :

Ce calibrage est fait à l'aide d'un monochromateur ayant une bande spectrale de (400-3200) nm donc englobe la bande de reponse de notre phototransistor qui va de (400-1100) nm . Le calibrage consiste à déterminer la réponse spectrale relative du phototransistor .

La grandeur de sortie est prise entre collecteur et l'émetteur

d'où la tension prise pour des éclairagements donnés pour des longueurs d'onde comprise entre (0,55 - 0,75) μm sont :

λ (μm)	V _{CE} (V)	E ₀ (éclairage) μW/cm ²	R(λ) V/mW/cm ²
0.55	2.2	30	73
0.60	1.8	48.7	36.96
0.70	1	88	11.36
0.75	0.5	104	4.80
0.65	1.45	66.2	21.90



calcul de R (λ) moyen :

on calcul la tangente de la courbe $V(\lambda) = f(R(\lambda))$

$$R(\lambda) \text{ moy} = \frac{1.75 - 0.75}{98 - 50} = 20.83 \text{ V/mW/cm}^2$$

V.2.4 Couplage source lumière -recepteur .

Un dispositif opto-electronique est un système électronique dans lequel une ou plusieurs liaisons électriques sont remplacées par autant de liaisons optiques. Comme ces liaisons peuvent causer des pertes et des distorsions , on recherche le mode de couplage qui donnera le meilleur resultat :

On rencontre trois principaux types de liaisons entre la source et le photo-détecteur à qui on a recours chaque fois que la distance entre eux est plus grande que le diamètre de la surface sensible du détecteur .

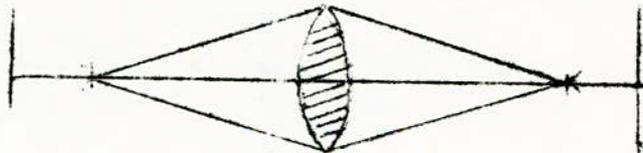
- 1 . Liaison directe .
- 2 . Mode de couplage faisant appel à des lentilles ou des miroirs de focalisation .
- 3 . Couplage par guide de lumière .

- 1. Liaison directe :

Ce dispositif est formé d'une seule lentille, il peut être utilisé dans le cas où la distance source-lumière est relativement faible .

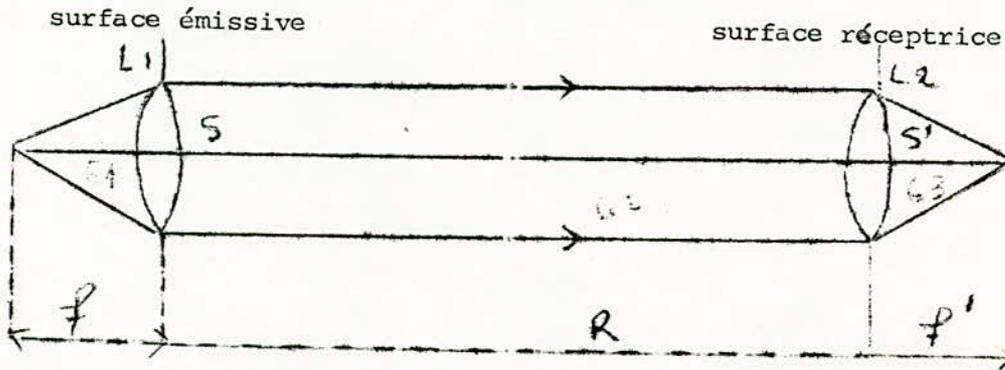
surface émissive

surface réceptrice



On peut améliorer ce dispositif par le système suivant .

- 2. Mode de couplage faisant appel à des lentilles ou à des miroirs de focalisation:



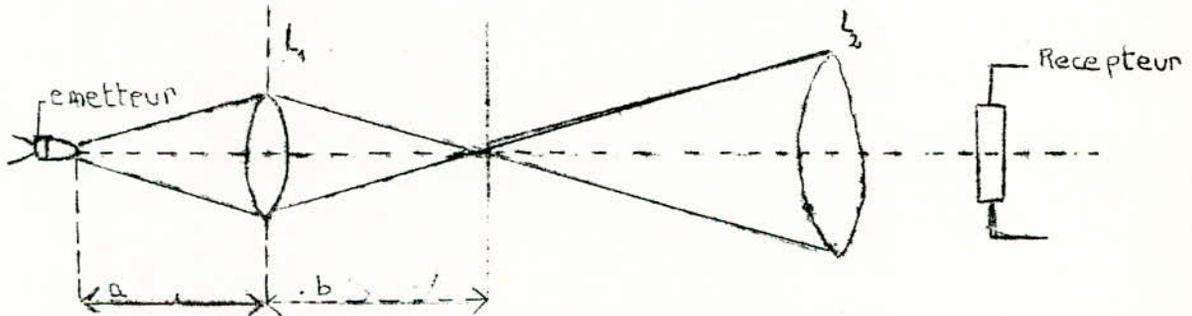
La première lentille ou groupe de lentilles transforment le rayonnement émis en un faisceau parallèle qui est focalisé sur la surface sensible du détecteur à l'aide du second groupe de lentilles, Ces dernières peuvent être remplacées par des miroirs sphériques ou paraboliques .

- 3 .Guides de lumière :

Ce dispositif est utilisé lorsqu'il n'est pas possible de disposer du détecteur et la source en regard , le guide de lumière est souvent constitué par l'association sous forme de faisceau , de fibres optiques qui ne sont autres que de minces fibres de verres de faible diamètre (10 à 100)recouvertes extérieurement d'une fine couche de verre ayant un indice de refraction plus faible que celui qui constitue l'axe de la fibre .

Couplage source-recepteur utilisé dans la réalisation pratique.

La méthode de couplage utilisée dans notre montage est le mode de couplage faisant appel à deux lentilles l'une à l'émission ayant un diamètre de 2 cm et de 5 cm de focale. Et celle utilisée à la réception à un diamètre de 8,5 cm et une focale de 13 cm . Ces deux lentilles sont du types convergent .



A l'émission comme à la réception , la diode sera placée au foyer de la lentille c'est à dire en un point de l'axe optique situé à une distance de la lentille égale à sa distance focale .

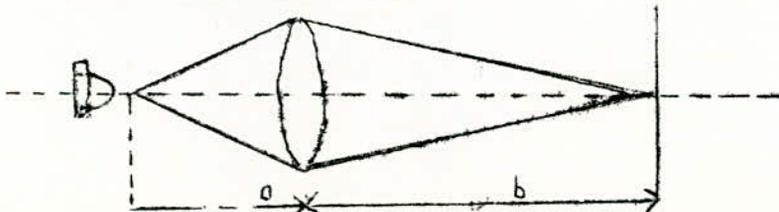
Cette caractéristique se mesure en formant sur une feuille de papier l'image d'un objet situé à "l'infini " lorsque l'image est nette alors la distance lentille papier est égale à la focale de la lentille .

$f_1 = 5$ cm distance focale de L 1

$f_2 = 19$ cm distance focale de L 2

Définition des paramètres d'une lentille .

1) Facteur d'agrandissement :



$$m = \frac{b}{a} = \frac{\text{distance entre l'image et la lentille}}{\text{distance entre l'objet et la lentille}}$$

2) Distance focale

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad f : \text{distance focale}$$

3) Coefficient de réception

$$\frac{f}{D} \quad D : \text{diamètre de la lentille}$$

pour la lentille L₁ .

$$1 = \frac{5}{2} = 2,5$$

pour la lentille L₂ .

$$2 = \frac{19}{12} = 1,5$$

4) Coefficient de transmittancePar définition on a $T + R = 1$

$$R = \frac{n - n'}{n + n'} \quad \begin{array}{l} T : \text{coefficient de transmission} \\ R : \text{coefficient de reflexion} \end{array}$$

 n' : indice de refraction de verre : 1 n : indice de refraction de l'aire : 1,5

$$R = \frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} = 0,2$$

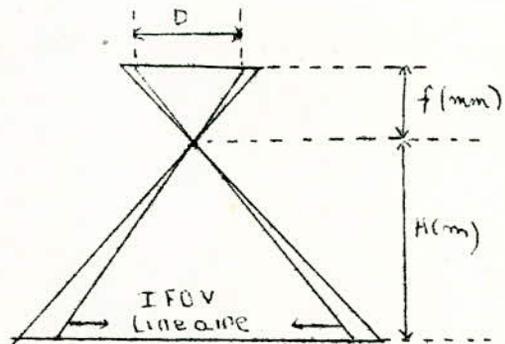
$$\text{d'ou } \tau = 0,8$$

V.2.d. Champ de vue instantané (IFOV) :

Le champ de vue instantané est défini comme l'angle sous lequel on observe la surface à mesurer à un instant donné, on le calcul par deux méthodes .

1) on a l'IFOV angulaire.

2) on a l'IFOV linéaire.



1) (IFOV) angulaire.

$$\text{IFOV} = \frac{D}{F} = \frac{D}{2f} = \frac{39 \cdot 10^{-2}}{2 \times 19} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ rd} .$$

D : diamètre du détecteur

F : 2 f avec f distance focale.

$$\boxed{\text{IFOV (angulaire)} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ rd}}$$

2) IFOV linéaire .

$$\text{IFOV} = \frac{H \cdot D}{f} = \frac{1 \times 39 \cdot 10^{-4}}{19 \cdot 10^{-2}} = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ m} .$$

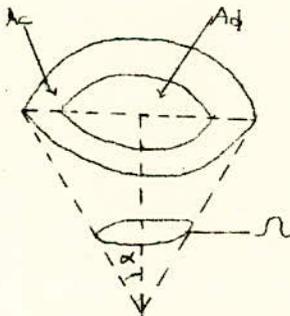
$$\boxed{\text{IFOV (lineaire)} = 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ m}}$$

Calcul de l'angle solide

L'angle solide c'est l'angle sous lequel on voit la scène à mesurer et il est défini comme rapport de la surface du cône AC centrée en (O) qui intercepte l'aire du détecteur AD.

$$\alpha = \text{IFOV}$$

$$\alpha = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ rd}$$



$$\Omega = \frac{A_c}{R^2} = \frac{\pi (R \sin \frac{1}{2} \alpha)^2}{R^2}$$

$$\Omega = \pi \sin^2 \frac{1}{2} \alpha$$

or α est très petit on peut l'approximer $\sin \frac{1}{2} \alpha \approx \frac{1}{2} \alpha$
d'où

$$\Omega = \frac{\pi \alpha^2}{4}$$

$$\boxed{\Omega = \frac{\pi \alpha^2}{4}}$$

$$\Omega = \frac{\pi (1,02 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 0,81 \cdot 10^{-4} \text{ st}$$

$$\boxed{\Omega = 0,81 \cdot 10^{-4} \text{ st}}$$

PLAN DU CHAPITRE VI

chapitre VI METHODE DE MESURE DE LA REFLECTANCE
BIDIRECTIONELLE .

VI 1- Indicatrice de reflexion

VI -2- Etude du signal à la sortie du detecteur

VI-3- Mise en equation de $I(\beta)$

VI- 4- Calcul de $E d\Omega(\theta, \psi)$

VI-5- Etude du signal de sortie dans differents plans.

VI- 6 - Etude du signal de sortie en fonction de η .

VI-7- Verification du caractere Lambertien

VI-8-Indicatrice de reflexion .

...../.....

Méthode de mesure de la réflectance bidirectionnelle

Nous avons vu qu'un radiomètre est un instrument qui convertit le flux d'énergie traversant la lentille d'entrée ou encore la radiance de la scène en une autre grandeur physique. La conversion et la précision de mesure dépendent des facteurs technologiques. La grandeur de sortie est fonction à la fois de la réflectance bidirectionnelle et de la fonction de transfert de l'appareil.

VI.1-Indicatrice de réflexion

La méthode consiste à mesurer le rapport entre l'énergie captée par le radiomètre dans un angle solide Ω_r et l'énergie qui serait envoyée dans ce même angle solide par une surface réfléchissante répondant à la loi de Lambert pour une surface de grande dimension. Cette quantité est définie comme suit :

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

$R(\theta, \varphi)$: radiance de la surface étudiée
 R_0 : radiance d'une surface répondant à la loi de Lambert.

Si l'angle d'ouverture du radiomètre est très petit on a :

$$L(\theta, \varphi) = \frac{R(\theta, \varphi)}{R_0}$$

d'autre part si l'éclairement $E(\theta, \varphi)$ est uniforme :

$$R(\theta, \varphi) = \rho_B(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) E(\theta_i, \varphi_i)$$

$$R_0 = \rho_B^0 E(\theta_i, \varphi_i)$$

ρ_B : réflectance bidirectionnelle de la surface à étudier

ρ_B^0 : réflectance bidirectionnelle de la surface répondant à la loi de Lambert.

Le facteur de réflexion est alors défini par :

$$L(\theta, \varphi) = \frac{\rho_B(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi)}{\rho_B^0}$$

VI.2-Etude du signal à la sortie du détecteur.

Cette étude est faite à l'aide de la figure (1) mais avant cela on définit les notations qui s'y trouvent

$d\Sigma$: surface élémentaire éclairée par l'émetteur dans le champs de visée

(θ, φ) : 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 et 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 et celui de $d\Sigma$.

$d\omega$: angle solide élémentaire issu de $d\Sigma$ dans la direction de $r''d$,

A_d : l'aire de la pupille d'entrée du détecteur

r_A : la distance entre le centre de la pupille de sortie de l'émetteur et celui de la surface à analyser.

r'_A : 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

Si $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}, \vec{u}_s, \vec{v}_s$ sont des vecteurs associés aux rayons r_d, r'_d, r''_d, r_A , et r'_A respectivement leurs coordonnées sont données par :

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

La puissance rayonnée par $d\Sigma$ dans l'angle solide $d\omega$ est donnée en fonction de la radiance $R(\rho, \psi, \theta, \varphi)$ de la surface élémentaire $d\Sigma$.

$$d^3P = R(\rho, \psi, \theta'', \varphi'') \cos \theta'' d\omega d\Sigma \quad (1)$$

Le signal électrique de sortie s'écrit :

$$d^3S = \alpha I(\beta'', \rho, \psi) R(\rho, \psi, \theta'', \varphi'') \cos \theta'' d\omega d\Sigma \quad (2)$$

α : facteur de conversion

$I(\beta'', \rho, \psi)$: fonction de réponse spatiale.

Le signal de sortie, lorsque $d\Sigma$ est vue sur l'ensemble de la surface de la pupille d'entrée, est obtenue en intégrant l'équation (2) sur A_d (surface de détection)

$$d^2S = \int \alpha I(\beta'', \rho, \psi) R(\rho, \psi, \theta'', \varphi'') \cos \theta'' d\omega d\Sigma \quad (3)$$

mais comme généralement la variation de β'' est très petite, on peut appliquer le théorème de la moyenne :

$$d^2S = \alpha I(\beta) R(\rho, \psi, \theta', \varphi') \cos \theta' \Delta\omega d\Sigma \quad (4)$$

où $\Delta\omega = A_d \cos \beta / (r'_d)^2$ c'est l'angle solide de la lentille de détection, on suppose que l'éclairement de la surface étudiée vaut $E d\Sigma(\rho, \psi)$.

on obtient :

$$d^2S = \alpha I(\beta) \rho_B(\theta'_s, \varphi'_s, \theta', \varphi') E d\Sigma(\rho, \psi) \cos \theta' \Delta\omega d\Sigma \quad (5)$$

avec $\rho_B = (\theta'_s, \varphi'_s, \theta', \varphi') = R(\rho, \psi, \theta', \varphi') / E d\Sigma(\rho, \psi)$

d'où on obtient pour le signal de sortie

$$S = \iint_{(\rho, \psi)} \alpha I(\beta) \rho_B(\theta'_s, \varphi'_s, \theta', \varphi') E d\Sigma(\rho, \psi) \cos \theta' \Delta\omega d\Sigma \quad (6)$$

si la surface éclairée est petite vis à vis de la distance surface-détecteur la variation de β_B n'est pas trop brusque et en appliquant toujours le théorème de la moyenne on a :

$$S = P_B(\theta_i, \psi_i, \theta', \psi') \cos \theta \iint E d\Sigma(\varphi, \psi) U_{\beta} \Delta \omega d\Sigma \quad (7)$$

Le calcul de cette integrale demande la connaissance de $I(\beta)$ et $E d\Sigma(\varphi, \psi)$

VI.3- Mise en equation de $I(\beta)$

La réponse spatiale du détecteur peut être représentée par une gaussienne $I(\beta) = I(0) \exp(-\beta^2/\beta_d^2)$ (8)

l'angle β est donné par les équations suivantes déduites de la figure

$$(8) \begin{cases} Q^2 = r_d^2 + r_d'^2 - 2 r_d r_d' \cos \beta \\ r_d'^2 = Q^2 + r_d^2 - 2 Q r_d \cos \psi \\ \cos \psi = \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi + \sin \theta \cos \varphi \cos \psi = \sin \theta \times \cos(\psi - \varphi) \end{cases}$$

en combinant les équations (8) on obtient :

$$\cos \beta = \frac{1 - (Q/r_d) \sin \theta \cos(\psi - \varphi)}{1 + (Q/r_d)^2 - 2(Q/r_d) \sin \theta \cos(\psi - \varphi)}^{1/2}$$

comme généralement $Q \ll r_d$ on peut écrire :

$$\cos \beta \approx 1 - (Q/r_d)^2 [1 - \sin^2 \theta \cos^2(\psi - \varphi)]$$

$$d'où \beta^2 \approx (Q/r_d)^2 [1 - \sin^2 \theta \cos^2(\psi - \varphi)]$$

En combinant les équations (7) et (8) on trouve :

$$I_{\beta} = I_0 \exp\left\{-\frac{Q^2}{\beta_d^2} [1 - \sin^2 \theta \cos^2(\psi - \varphi)]\right\} \quad (10)$$

avec $Q_d = r_d \sin \theta$

VI.4- Calcul de $E d\Sigma(\varphi, \psi)$

L'éclairement de la surface $d\Sigma$ s'écrit :

$$E d\Sigma(\varphi, \psi) = R_s(\beta_i) \cos \beta_i A_s \cos^2 \theta_i / (r_s)^2$$

si l'angle solide est petit on a :

$$E d\Sigma(\varphi, \psi) = R_s(\beta_i) A_s \cos^2 \theta_i / (r_s)^2$$

Vu la non-uniformité de la radiance de la source on peut exprimer $R_s(\beta_i)$ par :

$$R_s(\beta_i) = R_s(0) \exp\left\{-\beta_i^2/\beta_s^2\right\} \quad (12)$$

Avec le même raisonnement que pour l'équation (9) :

$$\beta_i^2 \approx (Q/r_s)^2 [1 - \sin^2 \theta_i \cos^2 \psi] \quad (13)$$

avec $\beta_s = Q/r_s$

En combinant les équations (6), (10) et (12) on obtient le signal de sortie

$$S = \alpha f_B(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \frac{\cos \theta A_d A_s \cos \theta_i}{(r_d r_s)^2} \iint_{(\theta, \varphi)} R(\beta_i) d\Sigma \quad (14)$$

$$= k_2 \cos \theta f_B(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) K(\theta, \varphi)$$

ou $k_2 = R_s(0) I(\alpha) \cos \theta_i \frac{A_d A_s}{(r_d r_s)^2} \alpha$

et $K(\theta, \varphi) = \iint R_s(\beta_i) I(\beta_i) d\Sigma$ (fonction de correction)

en intégrant l'équation donnant $K(\theta, \varphi)$ on obtient :

$$K(\theta, \varphi) = \frac{\pi \cdot \varphi_d^2 m^2}{1+m^2} \frac{1}{(1 - (b_1 + b_2) + b_1 b_2 \Delta \sin^2 \varphi)^{3/2}} \quad (15)$$

avec $b_1 = (\sin^2 \theta_i) / (1+m^2)$

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

$m = (\varphi_s / \varphi_d)$ paramètre de l'appareil

pour faciliter les mesures on introduit $S(0,0) = f_B(\theta_i, \varphi_i; 0,0) \times k_2 K(0,0)$ et on a le rapport suivant :

$$S(\theta, \varphi) / S(0,0) = \frac{f_B(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) k_2 \cos \theta K(\theta, \varphi)}{f_B(\theta_i, \varphi_i; 0,0) k_2 K(0,0)} \quad (17)$$

si on appelle

$$K(\theta, \varphi) / K(0,0) \times \cos \theta = N(\theta, \varphi)$$

on obtient :

$$\frac{S(\theta, \varphi)}{S(0,0)} = \frac{f_B(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi)}{f_B(\theta_i, \varphi_i; 0,0)} \cdot N(\theta, \varphi) \quad (18)$$

Cas particulier :

$$f_B(\theta_i, \varphi_i; 0,0)$$

si la surface observée suit la loi de Lambert on a

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

VI.5- Etude du signal de sortie dans différents plans .

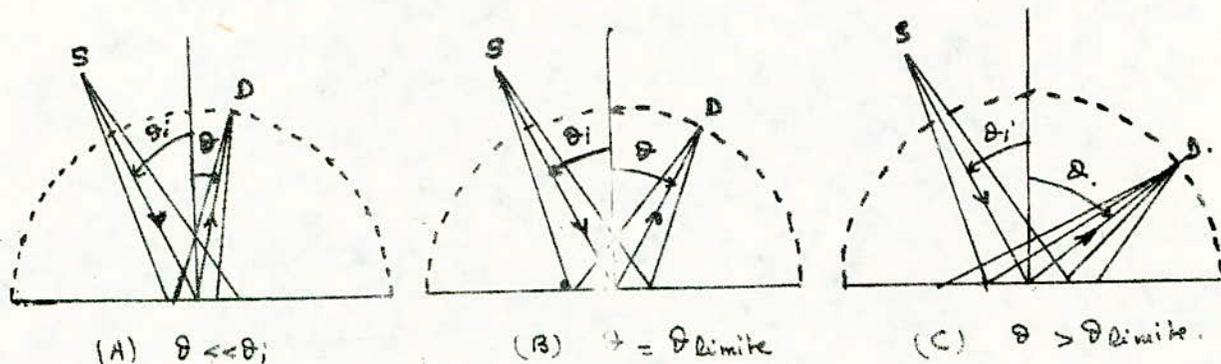
1) dans le plan parallèle à l'incidence

dans ce cas $\psi = 0$ et la fonction de correction s'écrit :

$$K(\theta, \psi) = \frac{\pi q_d^2 \eta^2}{1 + \eta^2} \times \frac{1}{(1 - b_1 - b_2)^{1/2}}$$

$$N(\theta, 0) = \frac{K(\theta, 0)}{K(0, 0)} \cos \theta.$$

la courbe $N(\theta, 0)$ fig (2) peut s'expliquer par les trois (3) schémas suivants : fig (3)



- a) dans la figure (A) $\theta \ll \theta_i$ la surface illuminée par la source est plus grande que la surface visée par le détecteur, on est dans le cas théorique de Lambert et le signal de sortie est constant.
 - b) pour $\theta = \theta_{\text{limite}}$ La surface illuminée est égale à la surface visée fig. (B)
 - c) $\theta > \theta_{\text{limite}}$, la surface visée est supérieure à la surface illuminée, dans ce cas la radiance décroît avec l'angle
- 2) dans le plan perpendiculaire du plan d'incidence

dans ce cas $\psi = \pi/2$

la fonction de correction s'écrit :

$$K(\theta, \pi/2) = \frac{\pi}{(1 - b_1 - b_2 + b_1 b_2)^{1/2}} \cdot \frac{q_d^2 \eta^2}{1 + \eta^2}$$

on normalise cette fonction et on remarque qu'elle est indépendante de l'angle d'incidence θ_i et proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2 \sin^2 \theta / 1+\eta^2)^{1/2}}}$

et ceci s'explique par le fait que :

dans la zone critique où la surface visée n'est pas entièrement éclairée par l'émetteur, la surface active qui rayonne reste constante quelque soit la valeur θ_i d'où l'angle d'ouverture effectif du système détecteur reste également constant. La variation de θ_i modifie essentiellement la valeur de l'éclairement donc l'aplitude du signal .

VI.6-Etude du signal de sortie en fonction du paramètre détecteur η .

on a défini $\eta = \varphi_s / \varphi_d$

on distingue 2 cas particuliers

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

- si $\eta \rightarrow \infty$ $N(\theta, \varphi, \eta) \rightarrow$ vers la fonction de Hean iside

définie par :

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

1) $\eta \rightarrow 0$

dans ce cas, la source n'éclaire qu'une toute petite surface par rapport à la surface visée par le détecteur, le signal de sortie est donné par l'équation

$$S(\theta, \varphi) = k f_B(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \cos \theta \cdot \pi \cdot \varphi_s^2$$

si la surface répond à la loi de Lambert, f_B est constante, le signal de sortie est proportionnel à $\cos \theta$.

2) $\eta \rightarrow \infty$

on a $b_1 \rightarrow 0$ et $b_2 \rightarrow 1$

le signal électrique à la sortie est donné par :

$$S(\theta, \varphi) = k_2 f_B(\theta_i, \varphi_i; \theta, \varphi) \times \pi \varphi^2 d$$

ici on retrouve que le signal de sortie est constant quelque soit l'angle de visée .

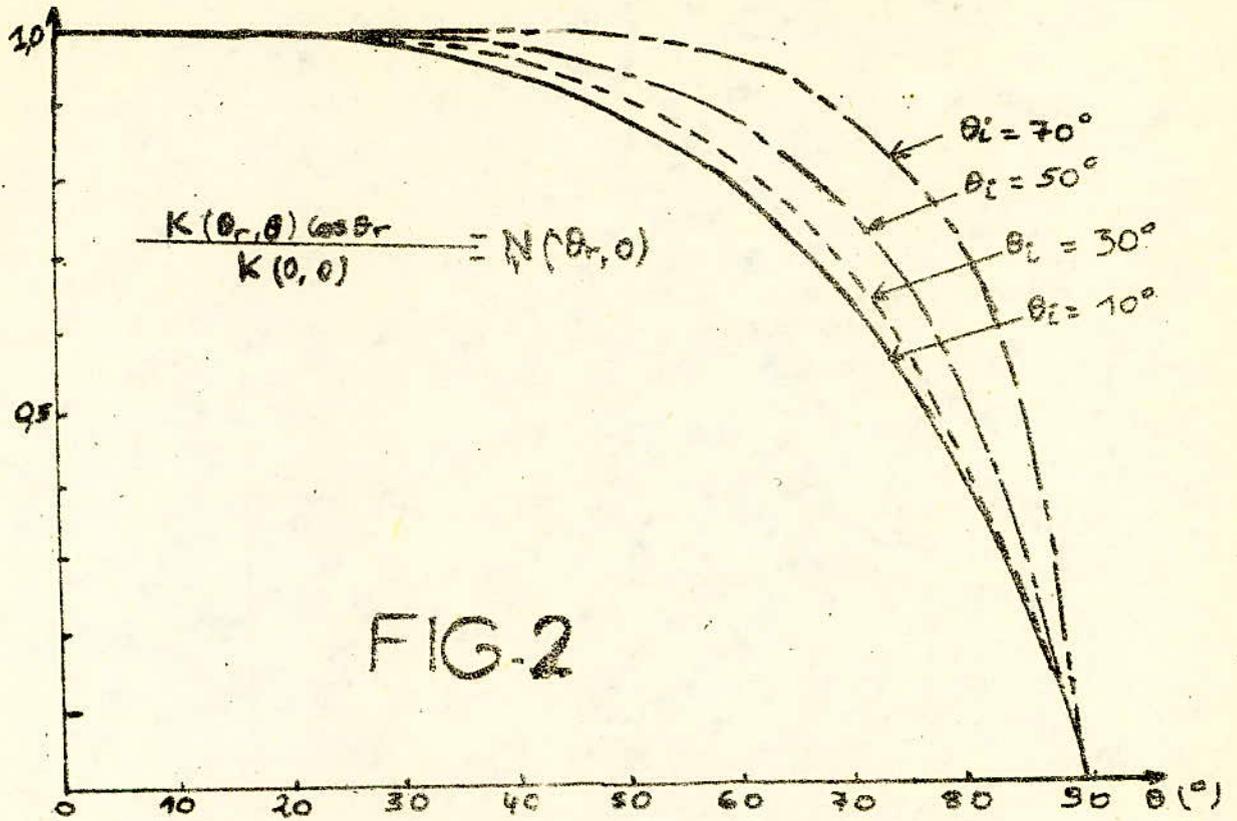


FIG-2

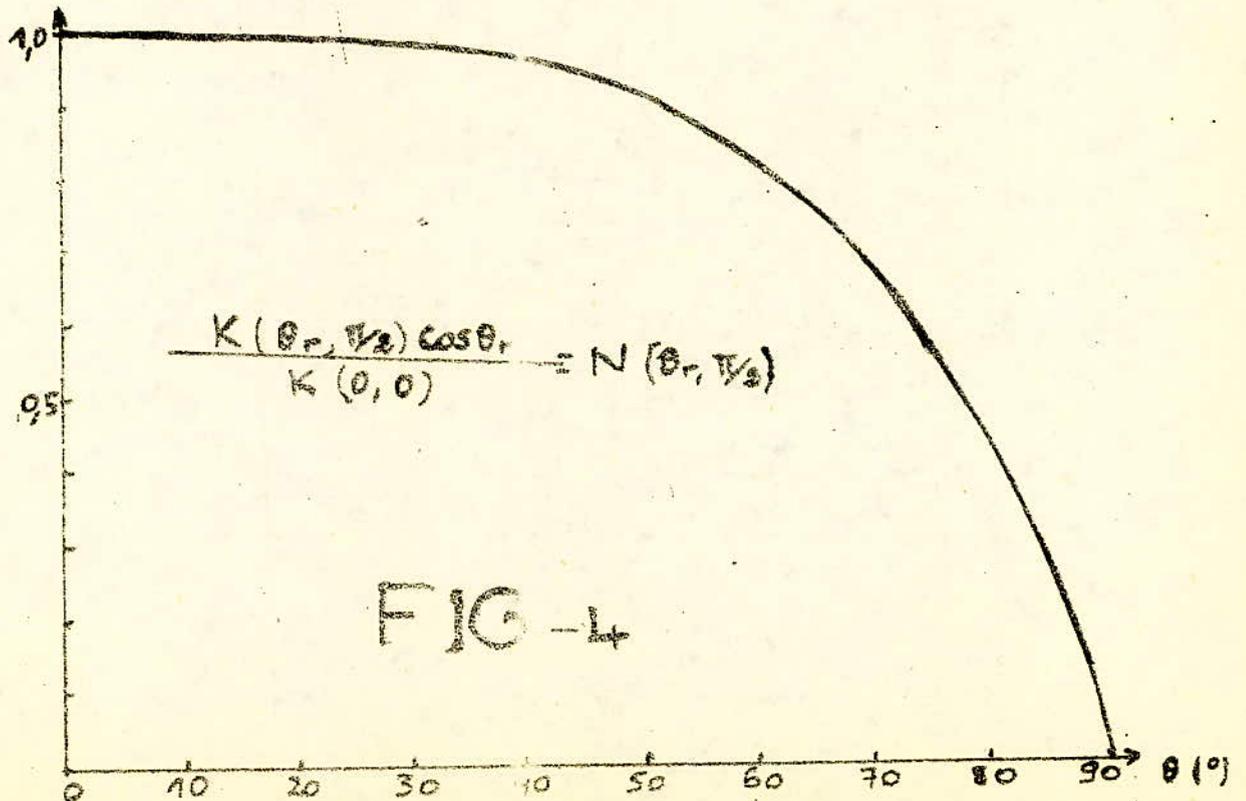


FIG-4

VI. 7. VERIFICATION DU CARACTERE LAMBERTIEN-

Nous avons utilisé, pour ces mesures, une surface de bois poli

- Les mesures sont faites dans le plan $\varphi = \pi$
- Dans la suite, nous utilisons les notations suivantes :

$S(\theta, \varphi)$: Signal de sortie correspondant à une surface quelconque .

$\mathcal{S}(\theta, \varphi)$: Valeurs normalisées de $S(\theta, \varphi)$ par rapport à $S(0,0)$

$S'(\theta, \varphi)$: Signal de sortie correspondant à la surface de bois poli .

$\mathcal{S}'(\theta, \varphi)$: Valeurs normalisées de $S'(\theta, \varphi)$ par rapport à $S'(0,0)$

$\hat{P}(\theta, \varphi)$: Valeurs normalisées de $P(\theta, \varphi)$

on définit $\Delta(\theta, \varphi) = \hat{P}(\theta, \varphi) N(0, \varphi)$
avec $\mathcal{S}'(\theta, \varphi) = N(\theta, \varphi)$

La première série des mesures a été faite avec l'angle d'incidence $\theta_i = 30^\circ$, Les valeurs obtenues sont données dans le tableau(1)

$\varphi = \pi$		$\theta_i = 30^\circ$					
θ dég		0	10	30	50	70	90
$S'(\theta, \varphi)$ mV		250	240	220	160	90	0
$\mathcal{S}'(\theta, \varphi)$		1	0,96	0,88	0,64	0,36	0

La deuxième série des mesures a été faite avec un angle d'incidence de $\theta_i = 40^\circ$ et en utilisant toujours une surface de bois poli, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (2)

$\varphi = \pi$		$\theta_i = 40^\circ$					
θ dég		0	10	30	50	70	90
$S'(0, \varphi)$ mV		270	262	233	175	92	0
$\mathcal{S}'(0, \varphi)$		1	0,97	0,86	0,65	0,34	0

Tableau (2)

VI 8 INDICATRICE DE REFLEXION D'UNE SURFACE QUELCONQUE

Les mesures ont été faites à différentes positions du récepteur
 Les résultats donnés dans les tableaux ci-dessous représentent les
 valeurs du signal de sortie du récepteur et les valeurs corrigées
 à l'aide de la fonction de correction $N(\theta, \varphi)$ déterminée pré-
 cédemment .

Mesures faites avec une surface végétale: Feuille de "misère"

$\varphi = \pi$		$\theta_i = 30^\circ$				
θ dég	0	10	30	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$	300	275	200	100	45	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,91	0,66	0,33	0,15	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,88	0,64	0,36	0
$\hat{P}(\theta, \varphi)$	1	0,95	0,75	0,52	0,41	0

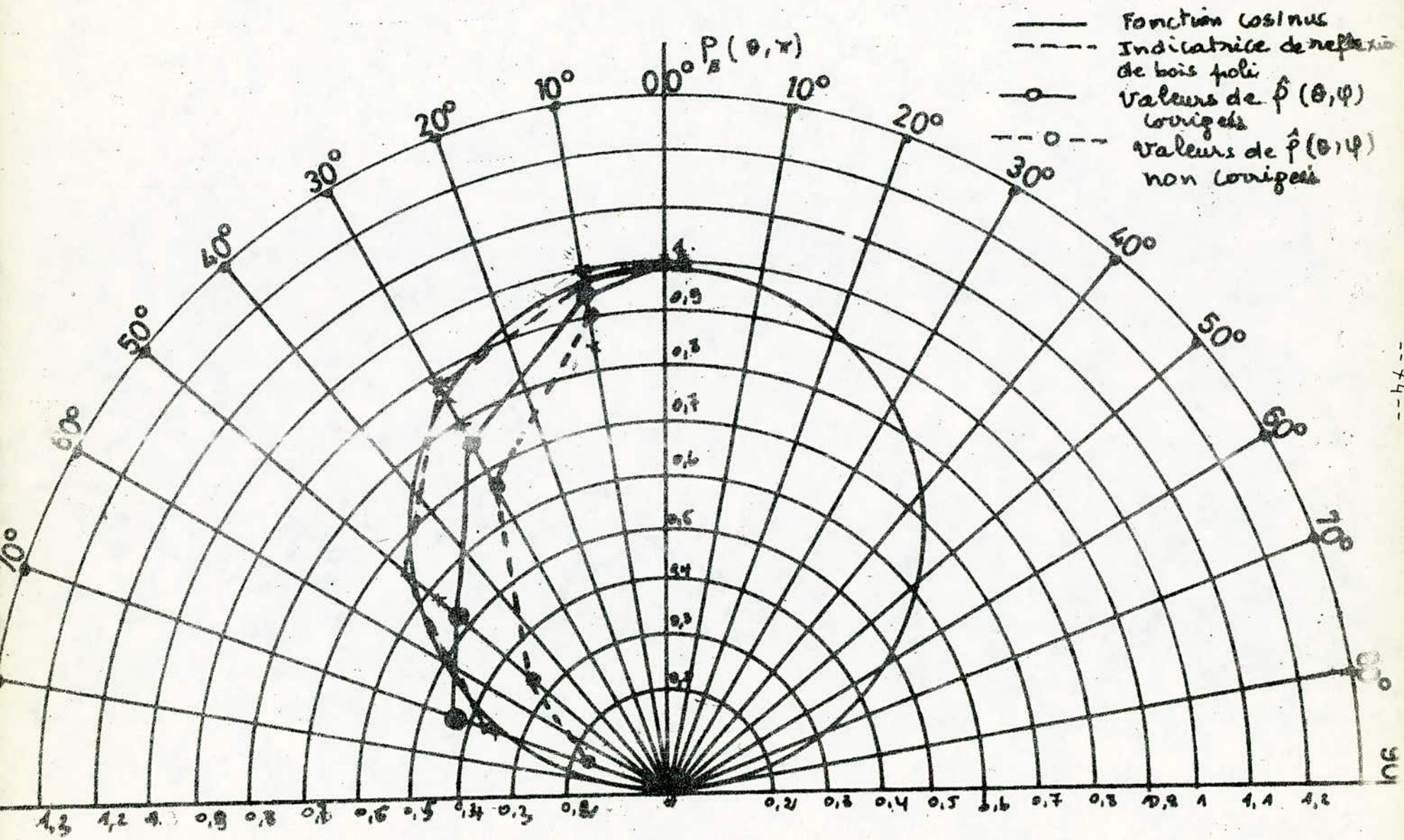
Mesures faites à l'aide de la rose sensible .

$\varphi = \pi$		$\theta_i = 40^\circ$				
θ dég	0	10	30	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	190	150	80	40	12	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,78	0,42	0,21	0,063	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,97	0,86	0,65	0,34	0
$\hat{P}(\theta, \varphi)$	1	0,81	0,78	0,36	0,18	0

INTERPRETATION DES COURBES OBTENUES FIGURES (5) et (6)

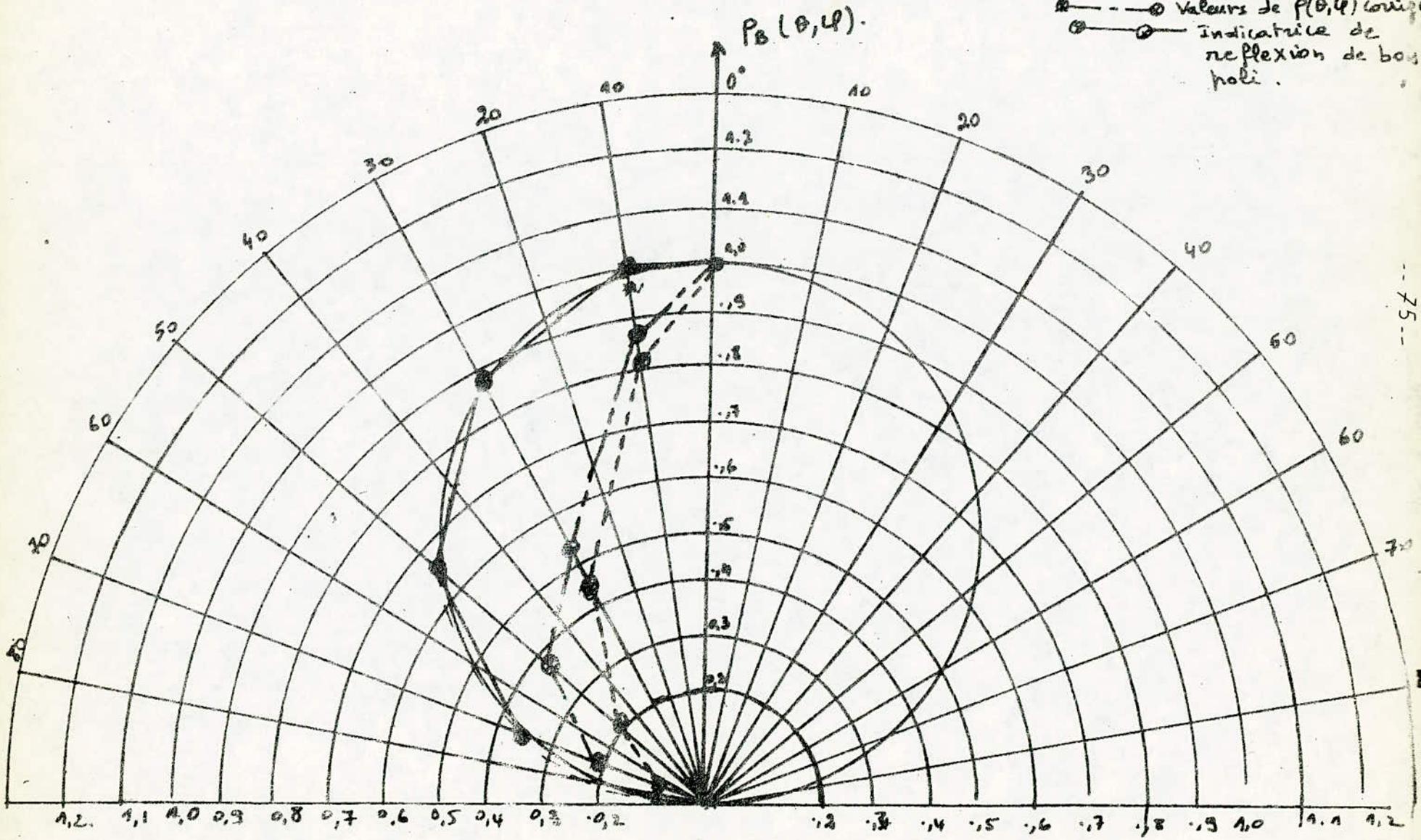
Nous avons tracé les valeurs du signal de sortie obtenues par la mesure de l'indicatrice de reflexion d'une surface de bois poli pour deux angles d'incidence respectivement $\theta_i = 40^\circ$ et $\theta_i = 30^\circ$, ces valeurs expérimentales montrent que le tracé de ces valeurs suit le tracé de la fonction cosinus. On peut donc dire, dans une première approximation, que P_b est constant, par conséquent le bois poli peut être considéré comme une surface Lambertienne. Ce résultat nous permet d'obtenir la fonction de correction $N(\theta, \varphi)$.

Le tracé de la courbe $\hat{p}(\theta, \varphi)$ de la surface des feuilles de "misère" montre que l'indicatrice de reflexion obtenue s'écarte quelque peu du tracé de la fonction cosinus, ceci montre que cette surface n'obéit pas à la loi de Lambert. Le tracé de la courbe $\hat{p}(\theta, \varphi)$ de la rose de sable s'écarte sensiblement de la loi de feuilles "misère" donc on peut conclure que la surface de la rose de sable est beaucoup plus rugueuse que celle des feuilles. Ainsi on constate que la mesure de reflectance est un moyen très simple pour classer les différents objets se trouvant dans la nature.



Indicatrice de Réflexion d'une surface végétale
 (feuille de misère.) (FIG 5)

- ⊙---⊙ valeurs de $\hat{p}(\theta, \varphi)$ non corrigées.
- Fonction cosinus
- ⊙---⊙ valeurs de $p(\theta, \varphi)$ corrigées
- ⊙---⊙ Indicatrice de réflexion de boue poli.



INDICATRICE - DE REFLEXION ROSE DES SALLE. FIG 6

75

C O N C L U S I O N :

Notre travail consistait à étudier et à réaliser un système de mesure des paramètres caractérisant la nature des objets tel que la réflectance .

Lors de réalisation du système de mesure nous avons rencontré certains problèmes:

- La source de lumière a une intensité assez faible car son attaque en courant est limitée.

- L'indice de réfraction du système optique (lentilles) est assez faible, ce qui cause la Perte d'une partie du rayonnement réfléchi.

- Bien que nous avons utilisé un phototransistor comme élément sensible du capteur où son temps de réponse est assez court nous permettant de travailler à des fréquences assez hautes pour éviter les bruits ,malgré cela le transistor, en plus du signal utile ,produit un bruit de fond dont l'intensité dépend de l'éclairement de sa surface ,pour réduire ce bruit, on doit limiter les radiations arrivant sur le phototransistor qu'aux radiations visibles en particuliers les radiations de lumière rouge (Vu que notre étude se limitait à ce domaine). Cette limitation de radiations se fait en plaçant un filtre interférentiel rouge ne laissant passer que la bande (0,6 - 0,7) Mm.on peut éviter comme genre de ces filtres : les films KODAK tel que : Trix.X.506 3 (0,6 - 0,72)Mm.

Plux - 2402 - (0,6 -0,7) Mm.

Mais vu que ces films ne sont pas disponibles sur le marché, nous avons du faire les mesures dans l'obscurité.

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

- R. DAMAYE.
 optro - ELECTRONIQUE 1 9 7 1
 bases theoriques et applications pratiques
 edition raddo .

- PHILLIP N. SLATER .
 Remote Sensing 1 9 8 0
 optics and optical systems.
 Addison - Wesley Publishing .

- Joseph lintz , Jr
 David S. Simonett. 1976
 Remote sensig of environment
 Addison - Wesley Publishing Company .PNC

- Manuel of remote sensing .
 Volume I - Teory instruments, and Techniques American Solyety of
 photogrammetry .
 National Academy of sciences.
 Remote sensing
 (With special reference to Agriculture And Foresty ;;.).

- MADANI __Naidjate
 thèse d'ingéniorat janvier 1981 .
 (chaine de mesure de réflectivité
 en proche _infra rouge .)

A N N E X E

1) Définition des quantités radiométriques:

1) Energie de rayonnement :

C'est la quantité d'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique qui est utilisé comme véhicule de l'information en télédelect.

L'énergie Q Est exprimée en joules (J)

2) Densité de rayonnement W :

C'est la quantité d'énergie rayonnée par unité de volume de volume

$$W = \partial Q / \partial V \text{ elle est exprimée en joules par m}^3$$

3) Flux rayonné Φ :

Il est défini comme la puissance de rayonnement, il désigne l'énergie rayonnée par unité de temps.

$$\Phi = \partial Q / \partial t \text{ d'où } Q = \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t) dt$$

Si Φ est constant $Q = \Phi(t) t_2 - t_1$

Le flux s'exprime en joules Les seconde (J/S)

4) Densité de flux rayonné

a) Eclairement E :

Le flux rayonné étant intercepté par une surface plane et divisé par l'aire de cette dernière donne la densité moyenne du flux rayonné. Cette densité est appelée : flux incident, il est représenté par le symbole E .

$$E = [W m^{-2}]$$

Il est important de noter que la direction du flux arrivant sur un point de la surface n'est pas spécifiée car l'éclairement d'une surface peut être différente d'un point à un autre .

b) Émittance: C'est la densité de flux rayonné qui est réfléchi par une surface A.

Elle est représentée par le symbole M.

$M = \partial\phi / \partial A$ Elle s'exprime en watt par mètre carré comme pour l'éclairement, la direction du flux réfléchi peut ne pas être spécifiée .

5) Intensité de rayonnement I : L'intensité rayonnée par une source est le flux rayonné par unité d'angle solide $d\Omega$ dans une direction donnée.

Elle est notée par le symbole I.

$I = \partial\phi / \partial\Omega$, elle s'exprime en watt par stéradian [Wsr^{-1}]
Si la source est isotrope (elle rayonne d'une façon égale dans toutes les directions) l'intensité rayonnée sera égale à

$$I = \phi / 4\pi$$

6) Radiance: R

La radiance est le flux rayonnée par unité d'angle solide et par unité de surface perpendiculaire à la surface apparente A . On appelle la radiance, dans certains cas, la brillance notée par le symbole R.

$$R = \partial^2\phi / \partial\omega(\partial A \cos\theta) = \partial I / (\partial A \cos\theta)$$

Elle s'exprime ^{en} watt par stéradian x mètre carré
[$Wsr^{-1}m^{-2}$].

Loi de Lambert .

Lorsqu'une source de la lumière possède une radiance constante quelque soit la direction de l'angle solide sous le que elle émet, on dit que cette source obéit à la loi de Lambert ou source Lambertienne.

Quantités spectrales.

Généralement en télédétection, on considère le spectre électromagnétique comme un ensemble de bandes étroites, il sera donc nécessaire de définir les grandeur radiométriques spectrales:

$R_\lambda, \Phi_\lambda, \Phi_\nu, E_\lambda, \pi_\lambda, I_\lambda$ qui sont défini dans le tableau suivant.

Tableau des Quantités radiométriques Spectrales

Quantités	Symbole	Définition	Unités	Symbole
Flux rayonnement spectral	Q_λ	flux rayonné par unité de longueur d'onde	Watt par micromètre	
Flux de rayonnement spectrale	Q_ν	flux rayonné par unité de fréquence	Watt seconde ou Watt hertz	
Eclairement spectral	E_λ	Eclairement par unité de longueur d'onde	Watt par mètre carré et micromètre	
Emitance spectrale	M_λ	émittance par unité de longueur d'onde de	Watt par mètre carré et micromètre	
Intensité de rayonnement spectrale	I_λ	L'intensité de rayonnement par unité de longueur d'onde	Watt par stéradian et micromètre	
Radiance spectrale	R_λ	Radiance par unité de longueur d'onde	Watt par mètre carré steradien et micromètre	

LOI DE RAYONNEMENT DES CORPS NOIRS.

Définition d'un corps noir:

Un corps noir est un corps qui absorbe totalement le rayonnement qu'il reçoit, le coefficient d'absorption est égale à un (1), les coefficients de transmission et de réflexion sont nuls.

Le corps noir est utilisé comme référence pour les autres corps.

LOI DE PLANCK:

L'émittance spectrale d'un corps noir est donnée par la relation mathématique suivante.

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 [\exp(ch/\lambda kT) - 1]}$$

h : constante de Planck = $6,6256 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$

c : vitesse de la lumière = $2,997925 \times 10^8 \text{ mS}^{-1}$

k : constante de Boltzamm = $1,38054 \times 10^{-23} \text{ WST}^{-1}$

T : température absolue en degrés.

h : Longueur d'onde en mètres.

LOI DE KIRSCHOFF:

1ère Loi;

La radiance spectrale R_{λ}^{CN} d'un corps noir dépend, uniquement de la température absolu de ce corps.

R_{λ}^{CN} : Radiance d'un corps noir

2ème Loi:

La radiance d'un corps quelconque (à une longueur d'onde et température donnée) est égale au produit de son facteur d'absorption par la radiance du corps noir.

$$R_{\lambda} = \alpha R_{\lambda}^{CN}$$

Loi de stephan baltzman

La radiance d'un corps noir est donnee par la formule mathematique suivante :

$$E^N = T^4$$

σ = Constante de stephan baltzman

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,6710 \cdot 10^{-8}$$

Radiance spectrale $L(\lambda)$ [$W m^{-2} Sr^{-1} m^{-1}$]

