

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE  
CSTN - LABORATOIRE DE TELEDETECTION

PROJET  
DE FIN D'ETUDES

DIPLOME D'INGENIORAT  
OPTION ELECTRONIQUE

TELEDETECTION  
ELECTROMAGNETIQUE

contribution à l'exploitation des images spatiales

PROPOSE PAR :  
A. ABDELLAOUI

ETUDIE PAR :  
Leïla Ali BENALI  
Mouhoub BENHABILES

JUIN 82



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

U. S. T. H. B.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE  
CSTN - LABORATOIRE DE TELEDETECTION

PROJET  
DE FIN D'ETUDES

DIPLOME D'INGENIORAT  
OPTION ELECTRONIQUE

TELEDETECTION  
ELECTROMAGNETIQUE

contribution à l'exploitation des images spatiales

PROPOSE PAR :  
A. ABDELLAOUI

ETUDIE PAR :  
Leïla Ali BENALI  
Mouhoub BENHABILES

JUIN 82

DEDICACES

- A la mémoire de mon père
- A ma mère
- A mes frères et soeurs
- A mes neveux et nièces
- A tous mes amis
- A tous ceux qui m'ont aidé.

MOUHOUB

- A la mémoire de mon père, mort trop tôt
- A ma mère, à laquelle je dois tout
- A mon cousin Bouziane
- A mes frères et soeurs
- A mes beaux frères
- A ma belle - soeur
- A tous mes proches et amis.

LILA



## REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements et notre chaleureuse reconnaissance à Monsieur A. ABDELLAOUI pour nous avoir accepté dans le laboratoire de télédétection, pour nous avoir initié à la télédétection, pour son aide continuelle malgré tous les obstacles matériels, pour son aide morale et sa gentillesse.

LILA et MOUHOUB

### REMERCIEMENTS

En ces moments mémorables où notre étude tire à sa fin, nous voudrions remercier tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce projet de fin d'études.

Nous tenons à remercier particulièrement nos professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leur contribution à notre formation, le personnel du laboratoire de télédétection du CSTN pour son aide; nous citerons :

- Monsieur OUSSEDIK Azzedine
- Mademoiselle TILIKETE Malika
- Monsieur BELKACEMI Merzouk
- Monsieur LABGAA Rachid
- Monsieur HALIMI
- Monsieur HERRY
- Mademoiselle Fatiha
- Mademoiselle Bahia

Nous tenons à remercier vivement Monsieur ABDENNEBI Hamid pour sa grande contribution à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Que notre gratitude va tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

A- Introduction.	-----	1
B- Grandeurs énergétiques et Radiometrie.	-----	B
I- Nature du rayonnement.	-----	3
I.1-Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement.	-----	3
I.2-Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement.	-----	5
I.3-Radiometrie.	-----	5
II-Lois de rayonnement.	-----	7
II.a-Lois de LAMBERT.	-----	7
II.b-Corps noir.	-----	7
b-1-Définitions relatives au corps noir.	-----	8
b-1.1-Première Loi de KIRCHOFF.	-----	8
b-1.2-Deuxième Loi de KIRCHOFF.	-----	8
b-1.3-Loi de S.BOLTZMAN.	-----	8
b-1.4-Formule de PLANCK.	-----	8
b-1.5-Loi de WIEN.	-----	9
b-1.6-Formules approchées de de RAYLEIGH JEANS et WIEN.	-----	9
III-Emissivité Reflectivité.	-----	10
III.1-Emissivité.	-----	10
1-1 Définition.	-----	10
1-2 Importance de L'emissivité.	-----	10
III-2 Reflectivité?	-----	11
2-1 Reflectivité directionnelle spectrale.	-----	12
2-2 Reflectivité bidirectionnelle dans le cas diffus.	-----	12
2-3 Reflectivité directionnelle dans le cas diffus.	-----	13
2-4 Relation entre les réflectivités bidirectionnelle et directionnelle.	-----	13
C-Reflectance etALBEDO.	-----	C



C.I Reflectance.	14
I-1 Définition.	14
I-2 Divers types de reflectance.	14
I-2-1 Reflectance conique Hemispherique.	14
I-2-2 Reflectance Bihemispherique.	14
I-2-3 Reflectance Bidirectionnelle.	15
C.II ALBEDO.	17
II-1 Définition.	17
C;III Inportance de la reflectance.	19
III-1 Introduction.	19
III-2 Caractéristiques de la reflectance d'une feuille.	20
III-3 Mecanismes de la reflectance de la feuille.	20
III-4 Reflectivité des couverts vegetaux.	23
III-5 Teledetection agricole.	27
D. Méthodes de mesure des facteurs de reflectance et calibration.	D
D.I Mesure de la radiance et de l'irradiance.	30
D.II Calibration.	31
II-1 Mesure de $C_r$ (facteur de calibration).	32
II-2 Dépendance de $C_r$ de l'angle de Zenith.	32
II-3 Calcul du facteur de reflectance: $R_r$ .	35
D.III Calibration du reflecteur portatif.	35
E. OPTO-ELECTRONIQUE.	E
E-1 Dispositif opto-électronique.	37
E-II Effet photo-électrique.	37
E-III Dispositifs photo-électriques.	37
E-IV Photoémetteurs et Photorécepteurs.	38
IV-1 Principes physiques élémentaires.	38
IV-2 Photo-émetteurs à Semi-conducteur.	39
IV-2-1 Diode photo-émissive.	39



IV-2-2 Caractérisation des photo-émetteurs.-----	41
IV-3 Photo-récepteurs.-----	42
IV-3-1 Caractéristiques des photo-récepteurs.-----	42
F. Matériels utilisés.-----	F
F.I Etude de la chaîne de mesure (500-600)nm.-----	45
I-1 Emetteur.-----	46
I-1-1 Schéma général.-----	46
I-1-2 Modulateur.-----	46
I-1-2 Commande du courant de la diode.-----	47
I-2 Recepteur.-----	48
I-2-1 Schéma général.-----	48
I-2-2 Filtre passe bande.-----	48
I-2-3 Amplificateur.-----	49
F.II Etude et réalisation de la chaîne de mesure (800-1100)nm.-----	50
II-1 Description et fonctionnement de la chaîne de mesure.-----	50
II-2 Emetteur Infra-rouge.-----	52
II-2-1 Schéma général.-----	52
II-2-2 Description de l'emetteur.-----	52
II-2-3 Polarisation-Stabilisation.-----	54
II-2-4 Horloge de commande.-----	56
II-3 Recepteur Infra-rouge.-----	57
II-3-1 Schéma général.-----	57
II-3-2 Description du récepteur.-----	57
II-3-3 Préamplificateur.-----	59
II-3-4 L'amplificateur.-----	60
G. Experiences.-----	G
G.I Mise en équation du signal à la sortie du détecteur.	64
G.II Indicatrice de réflectance.-----	( 64
G.III Réalisation	
G.III Résultats des experiences.-----	72

G.IV Commentaire.-----	81
H.Problème Inverse.-----	41
I.Propriétés et définitions.-----	83
I-1 Rayonnement net.-----	83
I-2 Les flux de chaleur latente et sensible.-----	83
I-2-1 Flux de chaleur sensible:H -----	84
I-2-2 Flux de chaleur latente -- -----	84
I-3 Flux total vers le sol -----	85
Conclusion.-----	



## A- INTRODUCTION

Par télé-détection ou détection à distance, on entend un ensemble de techniques mises en oeuvre à partir d'avions, de ballons, de satellites et qui ont pour but d'étudier, soit la surface de la terre (ou d'autres planètes), soit l'atmosphère, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés. Plus généralement, ce terme peut qualifier toute technique de mesure, basée sur les propriétés énoncées ci-dessus, qui n'implique pas de contact direct entre le capteur et l'objet de la mesure.

On peut se poser la question de la pertinence de la création d'un vocable nouveau pour désigner des techniques qui, si elles ont connu récemment une expansion très nette, sont néanmoins utilisées depuis longtemps dans de nombreux domaines : astronomie, sondage des fonds sous-marins, cartographie, topographie, etc...

En fait, l'emploi du mot télé-détection se justifie si l'on considère le développement décisif qui s'est effectué sur deux plans :

1 - Extension du domaine spectral utilisable :

La création de nouveaux capteurs a permis de s'affranchir des limites étroites qu'imposait la seule utilisation de la plaque photographique.

2 - Extension des possibilités spatiales et temporelles d'observation :

C'est surtout l'utilisation du satellite qui permet d'envisager la surveillance constante de la surface de notre planète.

Ces progrès technologiques ont permis le développement, sur le plan expérimental, de méthodes d'inventaires des ressources naturelles par télé-détection. L'exploitation des images spatiales obtenues peut se faire selon deux (2) approches distinctes :

- L'une classique, basée sur les méthodes de photo interprétation des photographies aériennes et considérant l'image multispectrale comme un espace de dimension "K" dont on veut déterminer une partition vérifiant un certain critère choisi selon l'objectif de l'utilisateur.

Bien que des résultats intéressants aient été obtenus par cette approche, celle-ci demeure limitée pour au moins deux (2) raisons :

\* d'une part, il n'existe pas de méthode ou de critères "universels" applicables à chaque thème, à chaque région; il existe en fait une multitude de méthodes ayant chacune ses avantages et ses inconvénients (voir mémoire de M. Tilikete et M. Belkacemi : janvier 1982).

\* d'autre part, il n'est pas toujours aisé de préciser la nature des classes constituant la partition obtenue; un retour in situ après partitionnement et une phase d'apprentissage sont toujours nécessaires;

ce qui enlève, de fait, le caractère totalement automatique des traitements dans cette approche.

- L'autre approche, récente, a pour but d'extraire du signal enregistré par les capteurs, les propriétés physiques intrinsèques des points constituant l'image; parmi ces propriétés nous pouvons citer l'albedo (ou pouvoir de réflexion de la surface dans le visible), l'émissivité (ou pouvoir d'émission de radiations infra-rouges), l'évapotranspiration de la plante ou du sol qui nous renseigne sur l'état de santé de la plante ou le degré de sécheresse du sol.

Cette approche est encore au stade expérimental.

L'objectif de notre étude est double :

- Caractérisation des objets au sol par des mesures multispectrales relatives.

Pour cette méthode, nous nous sommes limités à deux (2) bandes spectrales : la première dans le visible et correspondant au canal 4 de LANDSAT ( la chaine de mesure utilisée a été réalisée par Harouabia et Ziani : juin 81), la seconde se situe dans la gamme ( $800 \frac{0}{0}$  1100) nm (proche infra-rouge) et correspond au canal 7 de LANDSAT; la chaine de mesure est réalisée et testée dans le cadre du présent travail.

Les résultats de notre étude devront servir à guider le traitement pour l'interprétation des images LANDSAT du satellite multispectrale.

- Contribution à l'extraction des paramètres physiques des objets au sol ç partir des données satellites combinées à des données météorologiques (étude du problème inverses).

L'interprétation des images spaciales est un vaste domaine, et demande une étude plus approfondie, mais nous espérons que cette étude soit de quelque intérêt.



--B--

GRANDEURS ENERGETIQUES ET RADIOMETRIE

- B -

★  
 B - § GRANDEURS ENERGETIQUES ET RADIOMETRIE

Avant de passer à la définition des quantités à mesurer, on va, d'abord, parler de la nature du rayonnement, expliquer la terminologie et définir les grandeurs et les unités qui permettent la mesure de la réflectance et l'albedo.

NATURE DU RAYONNEMENT :

Il s'agit de radiations électromagnétiques dont les fréquences correspondent au spectre visible (400 nm + 750 nm) et au proche infra-rouge (800 nm + 1100 nm).

I - 1. GRANDEURS RELATIVES AUX SURFACES EMETTANT UN RAYONNEMENT :

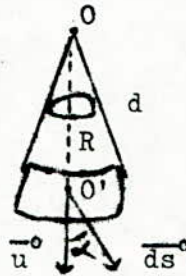
a) Flux énergétique total (ou puissance rayonnée)

C'est la puissance rayonnée par une source par unité de temps et dans toutes les directions.

Elle est notée - W - et exprimée en Watts.

b) Intensité énergétique totale :

Avant de définir l'intensité énergétique totale, définissons d'abord un angle solide :



soit un élément de surface  $\overline{ds}$  observé à partir d'un point O et R la distance du centre O' de l'élément de surface au point d'observation O.  $\overline{u}$  étant un vecteur unitaire tel que  $\overline{OO'} = R\overline{u}$

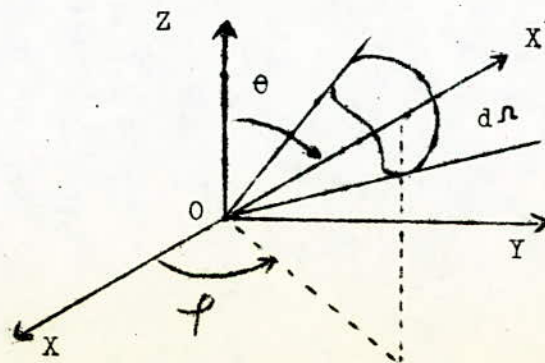
Par définition : l'élément d'angle solide d est égal  $\frac{\overline{ds} \cdot \overline{u}}{R^2}$

à :  $d\Omega = \frac{\overline{ds} \cdot \overline{u}}{R^2}$  exprimé en steradians.

Si  $\alpha$  est l'angle entre  $\overline{ds}$  et  $\overline{u}$  alors on aura

$$d\Omega = \frac{ds \cdot \cos \alpha}{R^2}$$

Ainsi on peut définir l'intensité énergétique totale



Considérons une direction OX issue de la surface d'un corps radiant placé à l'origine d'un repère OXYZ. Cette direction est repérée par les angles  $\theta$  et  $\varphi$ . Alors on définit l'intensité énergétique total comme étant la quantité d'énergie  $dW$  (ou la portion de flux) par unité d'angle solide.

$$I(\theta, \varphi) = \frac{dW}{d\Omega}$$

c) Radiance énergétique (ou luminance)

Soit  $ds$  un élément de surface d'un corps rayonnant une puissance  $dw$  dans la direction  $(\theta, \varphi)$  dans l'angle solide  $d\Omega$ . L'angle  $\theta$  est mesuré à partir de la normale à la surface  $ds$ .

Par définition : la radiance énergétique est l'intensité de cet élément de surface (donc de la source) dans la direction  $(\theta, \varphi)$  divisée par l'aire apparente  $ds'$  de celui-ci.

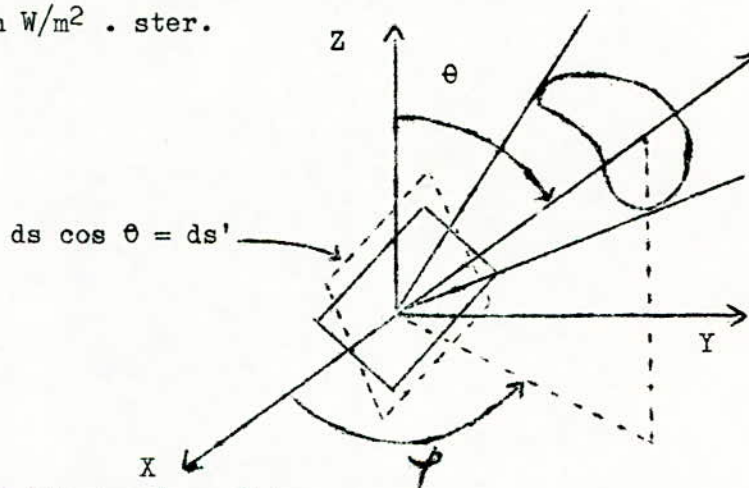
$$L(\theta, \varphi) = \frac{dI(\theta, \varphi)}{ds'}$$

comme  $ds' = ds \cos \theta$

$$I(\theta, \varphi) = \frac{dW}{d\Omega}$$

$$L(\theta, \varphi) = \frac{dI(\theta, \varphi)}{ds \cdot \cos \theta} = \frac{d^2 W}{d\Omega \cdot ds \cdot \cos \theta}$$

unité : en  $W/m^2 \cdot \text{ster}$ .



d) Émittance énergétique :

Soit une source constituée par une surface rayonnante. On définit l'émittance énergétique comme étant la puissance rayonnée dans hémisphère par unité de surface de la source

$$M = \frac{dW}{ds} \quad \text{unité : en Watt/m}^2$$

\*) Relation entre la radiance et l'émittance :

$$\frac{d^2 W}{ds} = L(\theta, \varphi) \cdot d\Omega \cdot \cos \theta$$

d'où  $\frac{dW}{ds} = M = \iint L(\theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega$

si la surface est lambertienne  $M = L(\theta, \varphi) \cdot \iint \cos \theta \cdot d\Omega = \pi L$

BN : Nous définirons plus loin la loi de LAMBERT



e) Grandeurs spectrales :

Toutes les grandeurs définies précédemment concernent le rayonnement total. On peut les définir également dans un domaine spectral étroit  $[\lambda_1 ; \lambda_2]$  de largeur  $\lambda_2 - \lambda_1$ .

i) Flux énergétique spectral

$$W_\lambda = \left( \frac{dW}{d\lambda} \right) \lambda \quad \text{unité : en Watt/m}$$

ia) de même pour toute autre grandeur totale G :

$$G_\lambda = \left( \frac{dG}{d\lambda} \right) \lambda \quad \text{où} \quad G = \int_0^\infty G_\lambda d\lambda$$

avec  $G =$  Grandeur totale

$G_\lambda =$  Grandeur spectrale

I. 2 GRANDEURS RELATIVES AUX SURFACES RECEVANT UN RAYONNEMENT :

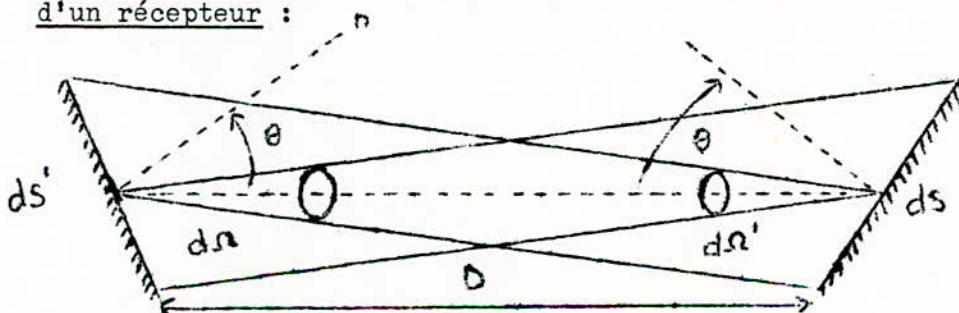
a) Eclairement E (ou Irradiance)

On signale que le flux, l'intensité et la Radiance s'appliquent aussi bien au rayonnement émis qu'au rayonnement incident, mais la notion d'émittance est remplacée par l'éclairement dans le cas d'un rayonnement incident. On définit alors l'éclairement comme étant le flux (ou la puissance) reçu par unité de surface réceptrice.

Si  $ds$  est la surface recevant le flux  $dW$

$$\text{alors : } E = \frac{dW}{ds} \quad \text{unité : en Watt/m}^2$$

\*) Relation entre la radiance d'un émetteur et l'éclairement d'un récepteur :



le flux émis (ou puissance rayonnée) par une surface  $ds$  en direction d'une surface réceptrice  $ds'$  est :

$$d^2W = L \cos \theta \cdot d\Omega \cdot ds \quad \text{comme} \quad d\Omega = \frac{ds' \cdot \cos \theta'}{D^2}$$

$$d^2W = \frac{L \cos \theta \cos \theta' ds ds'}{D^2} \quad \text{ainsi l'éclairement de } ds' \text{ sera :}$$

$$dE = \frac{L \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta' \cdot ds}{D^2}$$

$$\text{car} \quad dE = d \left( \frac{dW}{ds'} \right)$$

I.3 RADIOMETRIE

La plupart des détecteurs sont essentiellement sensibles à l'amplitude du rayonnement électromagnétique, c'est à dire à l'énergie qu'ils propagent dans la direction de propagation, suivant les différentes directions possibles de vibration et dans les diverses bandes spectrales.

Les méthodes permettant d'avoir accès à la phase, sont basés sur



les interférences entre divers faisceaux, interférences dont l'amplitude est modulée par la cohérence mutuelle de ces faisceaux.

a - Irradiance d'un radiomètre par une source

Soit un radiomètre captant tous les rayonnements arrivant sur une surface "ds" et dans un angle solide "dω", perpendiculairement à cette surface.

La surface "ds" peut être :

- soit la surface de l'antenne réceptrice (pour un radar ou un radiomètre HF)

- soit la surface de la pupille d'entrée pour un radiomètre dans le visible ou dans l'infra-rouge. En général, c'est la surface de la première lentille de l'objectif, ou du diaphragme d'entrée.

Elle s'écrit :  $ds = \pi D^2/4$

L'angle solide dω est limité par :

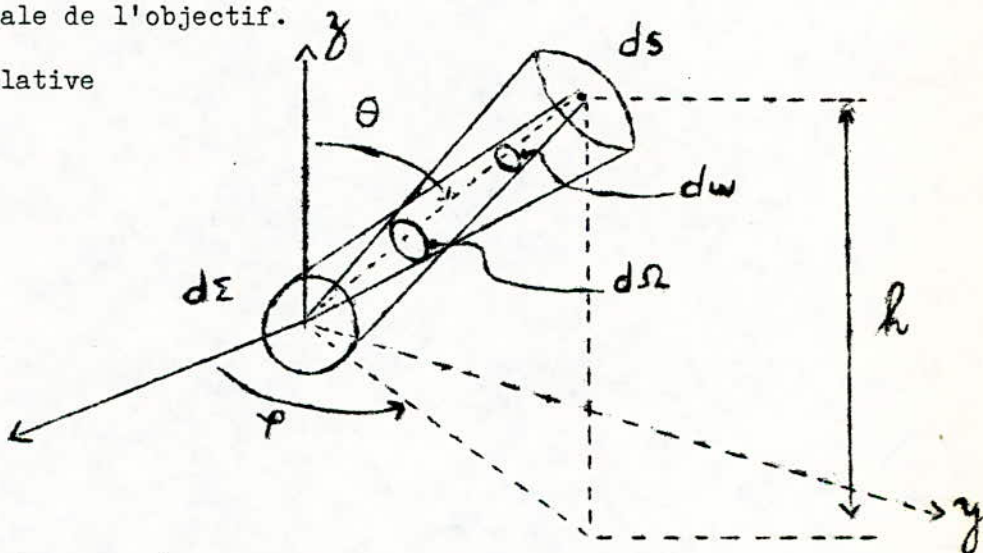
- La diffraction dans le radiomètre HF ou par le lobe principal,

- L'optique dans les radiomètres visibles ou infra-rouge.

on peut montrer que :  $d\omega = \frac{ds}{f^2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^4$

f = distance focale de l'objectif.

$\frac{D}{f}$  = ouverture relative



b - Angle instantané d'analyse - Direction d'analyse -

Tache d'analyse ou Pixel.

b.1 Angle instantané d'analyse

C'est l'angle "α" du cône (ouverture du cône) définissant l'angle solide dω  $(d\omega = \pi \cdot \alpha^2/4)$

b.2 Direction d'analyse

Supposons qu'un radiomètre, regarde une source étendue dans la direction (θ, φ), à une altitude "h". La direction (θ, φ) sera appelée : direction d'analyse.

b.3 Tache d'analyse ou Pixel

La surface dΣ de la source visée par le radiomètre s'écrit :

$$d\Sigma \cos \theta = \left(\frac{h}{\cos \theta}\right)^2 \cdot d\omega$$

Cette surface sera appelée tache d'analyse ou pixel ( de l'anglais : picture élément)

Inversement, le pixel formant la source visée par le radiomètre, voit le radiomètre sous l'angle solide  $d\Omega$  défini tel que :

$$d\Omega = ds / (h / \cos \theta)^2$$

$h / \cos \theta$  = distance du radiomètre au pixel.

Ainsi, la puissance émise par la source franchissant la surface "ds" de la pupille d'entrée du radiomètre s'écrira :

$$dW = L(\theta, \varphi) \cdot d\omega \cdot ds$$

Et si on regarde la scène pendant le temps "te" temps d'exposition, et si l'optique (ou le circuit électronique) absorbe une partie de l'énergie :

$\sqrt{1 - \tau}$ , où  $\tau$  est le facteur de transmission du système, le détecteur recevra l'énergie :

$$dE = L(\theta, \varphi) \cdot d\omega \cdot ds \cdot \tau \cdot te$$

et dans une bande spectrale  $[\lambda_1, \lambda_2]$  on aura :

$$dE = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\theta, \varphi) \cdot \tau(\lambda) \cdot te \cdot d\omega \cdot ds \cdot d\lambda$$

## II. LOIS DE RAYONNEMENT :

### a) Loi de LAMBERT :

Lorsqu'une source possède une radiance R, constante quelque soit la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$ , on dit qu'elle obéit à la loi de LAMBERT.

### b) Le corps noir :

Un corps noir est un corps qui absorbe toutes les radiations incidentes. Ceci provoque une agitation thermique des molécules, due à une accélération de fréquence, d'intensité et d'orientation variable.

Cette propriété va provoquer, à l'équilibre thermique, une émission de rayonnement égale à celui absorbé. Le spectre observé est donc très large. Le corps noir est un corps idéal. Parmi les corps noirs, on peut citer : la terre, le soleil, la lune, les nuages, ...

.) Les sources naturelles émettent un rayonnement incident, qui est : absorbé, réfléchi ou transmis suivant la loi :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

$\alpha$  = coefficient d'absorption

$\rho$  = coefficient de réflexion

$\tau$  = coefficient de transmission

$$\alpha = \frac{\text{puissance absorbée}}{\text{puissance incidente}}$$

$$\rho = \frac{\text{puissance réfléchie}}{\text{puissance incidente}} \quad \tau = \frac{\text{puissance transmise}}{\text{puissance incidente}}$$

pour les cas limites on aura :

$$\tau_\lambda = 0 \text{ pour un corps opaque}$$

$$\rho_x = 1 = \text{corps réflecteurs parfaits}$$

$$\alpha_\lambda = 1 = \text{corps noir.}$$

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



### b.1 Définitions liées au corps noir :

Deux lois fondamentales, établies par KRCHHOFF, attribuent au corps noir le rôle de référence universelle.

#### B.1.1 Première loi de Kirchhoff :

La radiance énergétique du corps noir ne dépend que de sa température.

#### b.1.2 Deuxième loi de Kirchhoff :

La radiance énergétique spectrale  $R$  d'un corps quelconque, pour une longueur d'onde donnée et une direction donnée, est égale au produit de son coefficient d'absorption  $\alpha_\lambda$ , par la radiance énergétique spectrale  $R_\lambda^{\text{cn}}$  du corps noir à la même température.

$$R_\lambda = R_\lambda^{\text{cn}} \cdot \alpha_\lambda$$

Cette relation peut se généraliser à la radiance totale d'un corps quelconque :

$$R = R^{\text{cn}} \cdot \alpha \quad \text{avec} \quad R^{\text{cn}} = \int_0^\infty R_\lambda^{\text{cn}} \cdot d\lambda$$
$$\Rightarrow R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{cn}} \cdot \alpha_\lambda \cdot d\lambda \quad \text{avec} \quad [\lambda_1, \lambda_2] \text{ bande spectrale de travail.}$$

Le coefficient d'absorption aura donc pour expression.

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{cn}} \cdot \alpha_\lambda \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{\text{cn}} \cdot d\lambda}$$

Pour un corps noir, on peut déterminer la radiance énergétique totale, par la formule de Stephan Boltzman.

#### b.1.3 Loi de Stephan Boltzman :

La radiance énergétique d'un corps noir  $R^{\text{cn}}$  est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue, soit :

$$R^{\text{cn}} = \sigma T^4$$

avec  $\sigma$  = constante de Stephan Boltzman.

$$\sigma = 5,73 \cdot 10^{-12} \cdot \text{W.Cui}^{-2} (\text{°K})^{-4}$$

Remarques : Les relations précédemment obtenues (b.1.2) sont valables aussi avec l'émittance, vu que d'après la loi de Lambert, les deux quantités : émittance et radiance, sont égales à un coefficient  $\Pi$  près.

On peut écrire :

$$M^{\text{cn}} = \Pi \cdot R^{\text{cn}} \Rightarrow R^{\text{cn}} = \frac{M^{\text{cn}}}{\Pi} = 5,73 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

#### b.1.4. Formule de Planck :

Le rayonnement du corps noir est dû aux mouvements thermiques des particules. Celles-ci se comportent comme un grand nombre d'oscillateurs élémentaires, ayant toutes les fréquences d'oscillations possible et une grande gamme d'énergie. Le calcul de la radiance spectrale consiste à déterminer

le nombre probable d'oscillateurs ainsi que leurs énergies dans un domaine élémentaire de longueur d'onde : " $d\lambda$ ".

Le postulat de Planck est basé sur le fait que l'énergie et la fréquence sont des valeurs discrètes. Cette énergie est égale à un nombre entier de fois la quantité  $hc/\lambda$ , où " $h$ " est la constante de Planck. On aura alors comme formule de Planck :

$$R^{\text{cn}} = \frac{2 h c^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp (hc/K \lambda T - 1)}$$

avec  $K = \frac{R}{N}$  où  $R$  = constante des gaz parfaits ( $8,31 \text{ J/}^\circ\text{K}$ )

et  $N$  = nombre d'avogadio ( $6,06 \cdot 10^{23}$ )

d'où :  $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ .

si l'on pose :  $\begin{cases} C_1 = 2 h c^2 = 1,19 \cdot 10^8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{u}^4 \\ C_2 = \frac{hc}{K} = 1,43 \cdot 10^4 \text{ u (}^\circ\text{K)} \end{cases}$

on aura

$$R^{\text{cn}} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp \left( \frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]}$$

#### b.1.5. Loi de Wien :

En utilisant la formule précédente, on peut calculer la longueur d'onde qui maximise la radiance pour une température donnée; il suffit de dériver l'expression de la radiance et de l'annuler. On obtient alors :

$$T \cdot \lambda = 2898 \quad \implies \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} \quad \text{qui est la loi de Wien}$$

on aura pour la radiance :

$$R_{\lambda \text{ max}}^{\text{cn}} = \frac{C_1 \cdot T^{-5}}{\exp (C_2/A) - 1} = 0,415 \cdot (T/1000)^5 \cdot (\text{W/St})$$

avec  $A = \lambda_{\text{max}} \cdot T$

pour le soleil  $T = 6000 \text{ }^\circ\text{K} \implies \lambda_{\text{max}} = 0,48 \text{ u}$

#### b.1.6 Formules approchées de RAY LEIGH JEANS et WIEN

\*) Quand  $\lambda T$  est petit, la formule précédente peut se mettre sous la forme approchée de Wien :

$$R_{\lambda}^{\text{cn}} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp (-C_2/\lambda T)$$

Cette formule est applicable dans le cas du spectre visible et devient inexacte dans le domaine infra-rouge.

Pour  $\lambda T \ll 3000 \text{ uK}$ , l'erreur commise est inférieure à 1 %.

\* Quand  $\lambda T$  est grand, on obtient la formule de Rayleigh-Jeans applicable en IR, soit :

$$R_{\lambda}^{\text{cn}} = \left( \frac{C_1}{C_2} \right) \cdot \lambda^{-4} \cdot T$$

Pour les surfaces naturelles, les formules précédentes ne sont plus, en général, valables, du fait de l'apparition du phénomène d'émission. Pour cela, on introduit alors l'émissivité de ces surfaces et celle du corps noir, à la même température.



### III EMISSIVITE ET REFLECTIVITE

#### III. 1 Emissivité

##### III. 1.1. Définitions

On a vu précédemment que le corps noir était le corps idéal et qu'il réémettait, tout le rayonnement incident. Mais, les corps que l'on trouve dans la nature n'obéissent pas vigoureusement à cette loi. On les appelle corps gris bien qu'ils soient considérés encore comme modèle idéal. Ces corps suivent la loi de Planck à un facteur près. Soit  $R_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  la radiance d'un corps dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  et soit  $R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T)$  la radiance spectrale d'un corps noir à la même température

On définit l'émissivité spectrale d'un corps comme étant le rapport de la radiance spectrale de ce corps et la radiance spectrale du corps noir à la même température soit :

$$\xi(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{\text{radiance émise par le corps dans la direction } \Delta(\theta, \varphi)}{\text{radiance émise par le corps noir à la même température}}$$

Il en résulte, d'après la définition du corps noir que :

$$0 < \xi(\lambda, \theta, \varphi, T) < 1.$$

Dans la pratique, on s'intéresse à ce qui se passe sur toute la bande. Pour cela on définit une émissivité moyenne comme suit :

$$\bar{\xi} = \xi(\Delta\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda, \theta, \varphi, T) \cdot R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T) \cdot d\lambda}$$

Remarque : pour les corps lambertiens dont l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde, on a :  $\xi = \bar{\xi}$ .

##### III. 1.2 Importance de l'émissivité :

L'émissivité et la température sont deux paramètres très importants en télédétection. Certains facteurs influent sur l'émissivité des objets; ils peuvent être liés à la nature de ces objets comme ils peuvent en être indépendants. Parmi ces facteurs, on peut citer :

- La rugosité des surfaces
- La composition chimique
- La température
- L'angle d'observation
- La longueur d'onde considérée
- La polarisation (c'est la distribution du champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation.)

En radiométrie micro onde, il est intéressant de savoir jusqu'à quelle profondeur les objets peuvent être traversés par les ondes et jusqu'où les caractéristiques du milieu influent sur la température; la profondeur dépend de la longueur d'onde considérée et des propriétés diélectriques et résistives du matériau.



Pour pouvoir comparer des enregistrements radiométriques, il est utile de connaître l'émissivité de certains objets :

- L'EAU : son émissivité dépende de sa température, de sa salinité et de la plus ou moins grande rugosité de sa surface. Une eau calme, pour une incidence normale, a une émissivité de 0,96. La présence d'autres corps sur l'eau fait changer son émissivité (changement de l'effet des vagues et de la rugosité de la surface).
- LA VEGETATION : Elle se comporte comme une surface rugueuse; son émissivité change selon l'angle d'observation; c'est un bon émetteur.
- LES SOLS : Leur émissivité est fonction des propriétés diélectriques des éléments qui les composent, entre autres l'humidité. L'émissivité diminue avec celle-ci.
- LA GLACE :  $0,92 < \xi < 0,94$
- LA NEIGE : Son émissivité est très élevée et variable suivant sa teneur en eau. (Elle est de 0,99 en général)

\*) On peut dire qu'un corps lisse a une émissivité plus faible qu'un corps rugueux car les réflexions y sont plus nombreuses.

\*) L'émissivité, l'énergie et la température, sont des grandeurs dépendantes. Pour cela, la connaissance de deux d'entre-elles nous permet de déterminer la troisième. La formule liant ces trois grandeurs s'écrit :

$$W = \xi \cdot \sigma \cdot T^4$$

W = énergie rayonnée

$\xi$  = émissivité

T = température absolue

$\sigma$  = constante de Boltzman.

En conclusion, on peut dire que, l'émissivité est un facteur très important en télédétection IR, qui nous permet d'effectuer des mesures de températures de surface par radiométrie, ce qui par la suite nous donnera la radiance.

### III. 2 Réfectivité :

La réfectivité est une propriété des plus importantes en télédétection. Pour pouvoir définir, il est nécessaire de définir les différents types de réflexions. Celles-ci interviennent dans le cas où le rayonnement traverse deux milieux de réfraction différente (atmosphère - sol). On peut avoir deux types de réflexion.

- La réflexion diffuse : C'est le cas où la puissance incidente est réémise dans toutes les directions. Elle est diffusée par la surface sur tout l'hémisphère supérieur; ceci est valable dans le cas des surfaces rugueuses.

- La réflexion spéculaire : Toute la puissance incidente est réémise dans une direction privilégiée ( $\theta, 1$ ); celle-ci est valable pour les surfaces lisses.

Pour caractériser le phénomène de réflexion, il est nécessaire d'introduire une grandeur qui est la réfectivité. Suivant le type de



de réflexion qui se présente, on aura différentes sortes de réflectivité.

### III. 2.1 Réflectivité directionnelle spectrale (spéculaire)

On la définit de la façon suivante :

$$\rho_{\lambda}(\theta) = \frac{\text{puissance spectrale réfléchie dans la longueur d'onde incidente}}{\text{puissance spectrale incidente venant de la direction } \theta_i, \text{ dans l'angle } d\Omega}$$

Les angles de réflexion et les angles solides sont définis, d'après la formule de SNELL - DESCARTES, comme suit :

$$\left. \begin{array}{l} \theta_r = \theta_i \\ \varphi_r = \varphi_i + \pi \end{array} \right\} \implies d\Omega_r = \overline{d\Omega_i}$$

$\overline{d\Omega_i}$  est l'angle solide symétrique de  $d\Omega_i$  par rapport à la normale à la surface. En introduisant les radiances spectrales produites par le milieu, le réflectivité se définit comme suit :

$$\rho_{\lambda}(\theta) = \frac{R_{r\lambda}(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot ds}{R_{i\lambda}(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot ds} = \frac{R_{r\lambda}(\theta)}{r_{i\lambda}(\theta)} = \frac{\text{radiance réfléchie}}{\text{radiance incidente}}$$

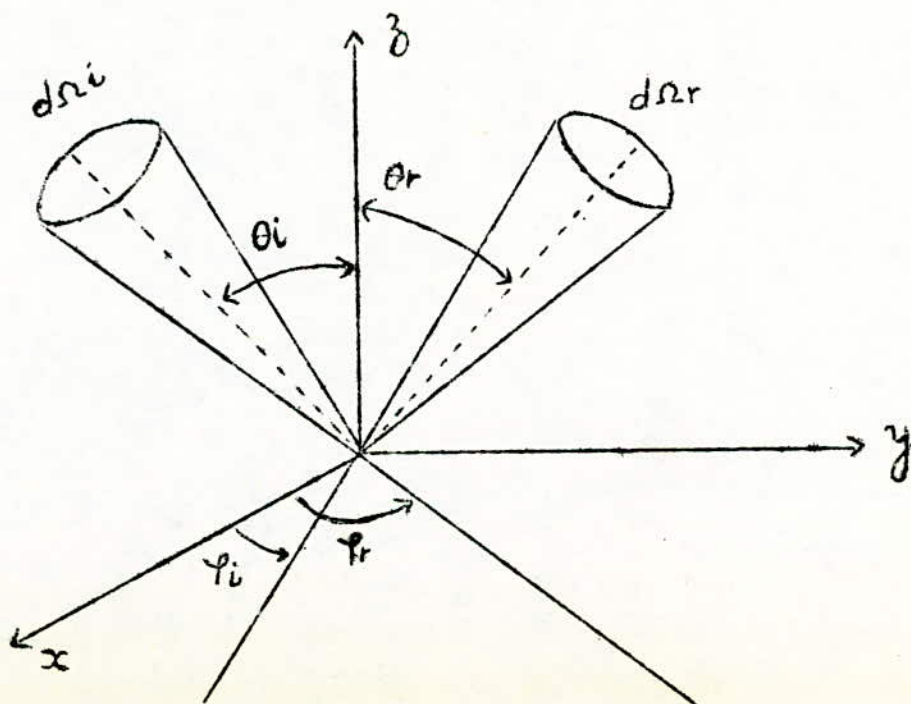
### III.2.2 Réflectivité bidirectionnelle dans le cas diffus :

Puisqu'on a un rayonnement réfléchi dans toutes les directions, la réflectivité spectrale directionnelle n'est plus valable; on est alors amené à définir une réflectivité bidirectionnelle. Soit  $R_r(\theta_r, \varphi_r)$ , la radiance de la surface quand elle est observée dans la direction  $(\theta_r, \varphi_r)$ . La réflectivité est définie comme suit :

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\text{radiance réfléchie dans la direction } (\theta_r, \varphi_r)}{\text{éclairage provenant de la source}}$$

En remplaçant l'éclairage par sa valeur, on aura

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{R_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{R_r(\theta_r, \varphi_r)}{R_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i}$$



## PROPRIETES

### - Propriétés de symétrie - théorie de Helmholtz

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

$$\varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \varphi_b(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i)$$

- Réflecteur Lambertien : C'est un réflecteur dont la réflectivité ne dépend pas des angles de réflexion  $\theta_r$  et  $\varphi_r$ ; on aura alors :  $\varphi_b = \text{constante}$ .

- Puissance réémise : La puissance réémise par un élément de surface "ds" dans l'angle solide  $d\Omega$  est :

$$dP = R_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \cdot ds$$

$$dP = R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i \cdot \varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \cdot ds$$

### III.2.3. Réflectivité directionnelle dans le cas diffus :

C'est le rapport de l'émittance à l'éclairement ou de la puissance réémise par un élément de surface du milieu à la puissance qu'il a reçu dans une longueur d'onde donnée; soit

$$\varphi_\lambda(\theta, \varphi) = \frac{M_r \lambda}{E_i \lambda} = \frac{P_r \lambda}{P_i \lambda} \quad (\text{sans dimension})$$

En remplaçant chaque grandeur par son expression, on aura :

$$M_r = \iint_{\text{hémisphère}} R_r \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r \quad \text{et} \quad R_r = R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot d\Omega_i$$

$$\text{d'où } M_r = \iint R_i \cdot \cos \theta_i \cdot \varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot d\Omega_i \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r$$

$$M_r = R_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i \cdot \iint \varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r$$

$$\text{de plus on a : } E_i \lambda = R_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$$

En tenant compte de ce qui suit, on aura finalement :

$$\varphi_\lambda(\theta, \varphi) = \iint_{\text{hémisphère}} \varphi_b(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r$$

### III. 2.4. Relation entre les réflectivités bidirectionnelles et directionnelles

Pour les deux types de réflexion, la puissance réémise s'écrit :

$$P_r = \varphi(\theta_i, \varphi_i) \cdot R_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i \cdot ds$$

Dans le cas spéculaire, on a

$$P_r = \begin{cases} R_r(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i & \text{dans la direction } \theta_r = \theta_i \text{ et } \varphi_r = \varphi_i + \pi \\ 0 & \text{dans toutes les directions} \end{cases}$$

Dans le cas diffus, on a :

$$P_r = \iint_{\text{hémisphère}} R_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r$$

En considérant les deux quantités précédentes, et la définition de la réflectivité bidirectionnelle, on peut mettre la réflectivité bidirectionnelle d'une surface spéculaire sous la forme :

$$\varphi_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \varphi_d(\theta_i, \varphi_i) \cdot \frac{\delta(\Omega_i - \Omega_r)}{\cos \theta_i}$$



-C-

REFLECTANCE ET ALBEDO

- C -

## C. REFLECTANCE ET ALBEDO

Notre objectif dans cette présente étude n'est pas d'étudier toutes les formes de réflexion, mais plutôt de présenter seulement celles qui sont utilisées en télédétection telles que la réflectance et l'albedo; ces deux paramètres qui dépendent non seulement de la structure moléculaire ou atomique des matériaux, mais aussi de leur structure macroscopique et de leur état de surface, en prenant l'exemple du matériel végétal que nous privilégions en raison de son importance quantitative à la surface des terres émergées et de ses qualités d'indicateur écologique.

### C.I. REFLECTANCE

C.I. 1 Définition : Elle est définie comme étant le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente dans une direction donnée. Elle est sans unité et on l'exprime en pourcentage.

C.I. 2 Divers types de réflectance : Nous nous intéresserons à trois types de réflectance :

- La réflectance conique hémisphérique :  $\rho^C$
- La réflectance bihémisphérique :  $\rho^H$
- La réflectance bidirectionnelle :  $\rho^B$

#### C.I.2-1 Réflectance conique hémisphérique : $\rho^C$

Elle est définie comme étant le rapport entre le flux réfléchi par une surface dans la direction de mesure (direction du champ de vue) et le flux réfléchi par la surface d'un parfait lambertien.

$$\rho^C = \frac{\int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} L_r(\Theta_r, \Phi_r) d\Omega_r}{\frac{E}{\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} d\Omega_r} \quad (1)$$

$\Theta_1, \Theta_2$  et  $\Omega_1, \Omega_2$  sont des angles de zénith et d'azimut limités de la vue du détecteur.

#### C.I.2-2 Réflectance bihémisphérique : $\rho^H$

Elle est définie comme étant le rapport de l'excitance réfléchie par une surface sur le flux arrivant à cette surface.

$$\rho^H = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_r(\Theta_r, \Phi_r) d\Omega_r}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_i(\Theta_i, \Phi_i) d\Omega_i} = \frac{M}{E} \quad (2)$$

avec :  $\Theta_r, \Phi_r$  = Angles de zénith et d'azimut des sources réfléchissantes

$\Theta_i, \Phi_i$  = Angles de zénith et d'azimut des sources incidentes.

$L_r$  et  $L_i$  sont respectivement les radiances (ou luminances) réfléchies et incidentes en fonction de  $\Theta$  et  $\Phi$ .



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

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

M = excitance réfléchie (émittance)

E = flux arrivant à la surface (éclairage).

### C.I.2-3 Réflectance bidirectionnelle : $\rho_B$

Soit la figure 1 montrant les trois angles qui nous permettent de définir le système source-cible-capteur

J.E.COLWELL (1973) définit alors la réflectance bidirectionnelle par l'expression :

$$\rho_B = \pi \frac{L}{E} \cdot 100 \quad (3)$$

où : E = éclairage énergétique

L = luminance énergétique (radiance)

On remarque que la réflectance bidirectionnelle est l'une des caractéristiques les plus importantes d'une surface et ne dépend pas du flux lumineux incident.

En fait la réflectance bidirectionnelle, pour une longueur d'onde donnée, est fonction de  $\Phi$ ,  $\theta$  et  $\Psi$ .

Il y a donc en principe une infinité de valeurs possibles; dans ces conditions, il est nécessaire de fixer des conditions expérimentales strictes si l'on veut étudier la réflectance en fonction d'un seul paramètre.

### C.I.3 Remarque :

La réflectance bidirectionnelle est définie aussi comme étant le rapport entre une partie de la luminance (radiance)  $dL_r(\theta_r, \phi_r)$  réfléchie dans la direction  $\theta_r, \phi_r$  et la luminance (radiance) totale incidente dans la direction  $\theta_i, \phi_i$  :

$$\rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i} \quad (4)$$

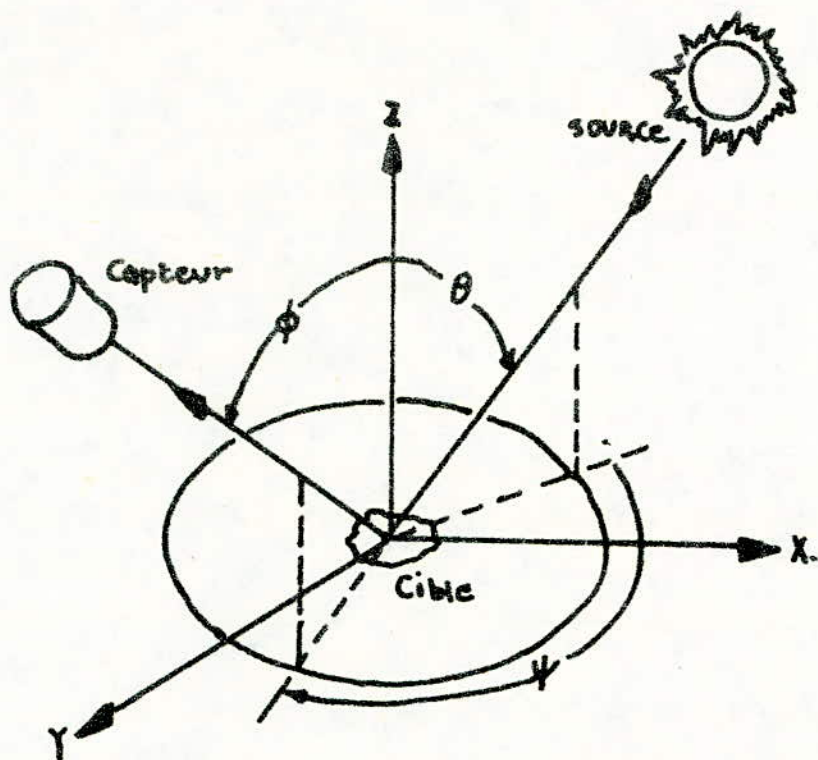
On en déduit donc :

$$(5) \quad L_r(\theta_r, \phi_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \rho_B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i$$

D'après les équations (1), (2) et (5), on voit que la réflectance conique hémisphérique ( $\rho_C$ ) et la réflectance bihémisphérique ( $\rho_H$ ) dépendent de la fonction bidirectionnelle.

Aussi, il est important de remarquer que le facteur de réflectance conique hémisphérique ( $\rho_C$ ) est un paramètre physique caractérisant une couverture générale particulière et il dépend de la distribution du flux lumineux.

Enfin, c'est la fonction réflectance bidirectionnelle ajoutée à l'information sur la distribution anisotrope du flux lumineux qui déterminent avec précision comment se comportent la réflectance conique hémisphérique ( $\rho_C$ ) et la réflectance bihémisphérique ( $\rho_H$ ) sous une variation de l'irradiation solaire.



Angle de zénith ....  $\theta$   
 Angle d'observation ...  $\phi$   
 Angle d'azimuth ....  $\psi$

Fig 1

Schéma de la configuration  
SOURCE - CIBLE - CAPTEUR -



C.II ALBEDO :

C.II.1 Définition : On appelle albedo le rapport de l'énergie globale réfléchie à l'énergie incidente.

La référence est, ici, l'énergie totale solaire (longueurs d'onde de 300 à 3000 nm).

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

L'albedo dépend, également, de la teneur en eau, de la structure du couvert : il s'ensuit des variations saisonnières (FEDERER 1968) dont on devrait tenir compte lors du choix des dates d'enregistrement.

En définitive, les valeurs moyennes souvent citées n'ont guère d'intérêt pratique sauf celui de montrer que presque toutes les valeurs d'albedo peuvent être rencontrées entre les valeurs extrêmes (0,7 à 0,9) pour la neige; (0,03 à 0,12) pour l'eau.

Si  $L_i(\lambda)$  et  $L_r(\lambda)$  sont les luminances spectrales incidentes et réfléchie, alors l'albedo  $a(\theta_i, \bar{\theta}_i)$  est donné par :

$$a(\theta_i, \bar{\theta}_i) = \frac{\int_0^\infty L_i(\lambda)(\theta_i, \bar{\theta}_i) \cos \theta_i d\Omega_i \iint_{\text{hémisphère}} \rho_B(\lambda)(\theta_i, \bar{\theta}_i, \theta_r, \bar{\theta}_r) \cos \theta_r d\Omega_r d\lambda}{\int_0^\infty L_i(\lambda)(\theta_i, \bar{\theta}_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda}$$

[a] : coefficient sans dimension.

Si la réflectance est indépendante de la longueur d'onde alors on aura une relation entre l'albedo et la réflectance qui s'écrira :

$$a(\theta_i, \bar{\theta}_i) = \rho(\theta_i, \bar{\theta}_i)$$

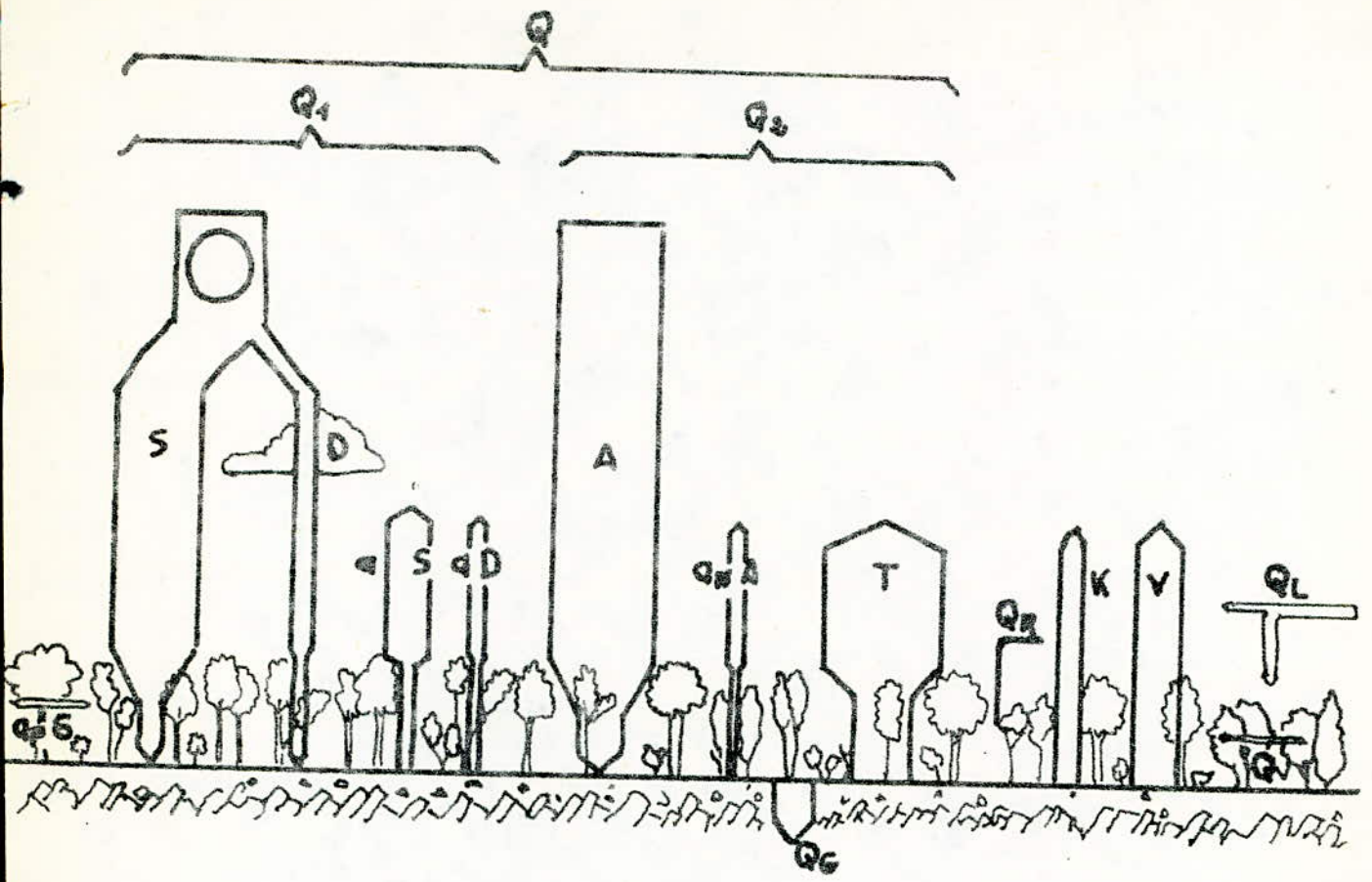
Par contre si la source est de grande étendue (hémisphère supérieur), dans ce cas la relation définissant l'albedo en fonction de la réflectance sera :

$$a = \frac{\int_0^\infty \iint_{\text{hémisphère}} L_r(\lambda)(\theta_r, \bar{\theta}_r) \cos \theta_r \iint_{\text{hémisphère}} \rho_B(\lambda)(\theta_i, \bar{\theta}_i, \theta_r, \bar{\theta}_r) \cos \theta_r d\Omega_r d\lambda}{\int_0^\infty \iint_{\text{hémisphère}} L_i(\lambda)(\theta_i, \bar{\theta}_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda}$$

On remarque donc que l'albedo désigne la réflectance totale de la surface d'où une surface sombre a un faible albedo et une surface claire a un grand albedo.

D'autre part, l'albedo étant un coefficient global, c'est lui qui intervient lorsque l'on calcule le bilan d'énergie d'un élément de la surface terrestre. D'après les notations de la figure 9 nous avons en effet :

- Bilan du rayonnement solaire.  $Q_1 = G - a(S + D)$
- Bilan du rayonnement terrestre :  $Q_2 = T + an^A - A$
- Bilan global  $Q = Q_1 + Q_2$



- Bilan d'énergie -

Rayonnement du disque solaire sur une surface horizontale .....	S	Efficiéce de conversion de la partie visible du Spectre de rayonnement .....	a
Rayonnement du ciel sur une surface horizontale .....	D	Bilan du rayonnement solaire (G-aS-aD) .....	Q1
Rayonnement global sur une surface horizontale (S+D) .....	G	Bilan du rayonnement terrestre (T+QNA-A) .....	Q2
Rayonnement thermique de la terre ...	T	Bilan du rayonnement total (Q1+Q2) .....	Q
Rayonnement thermique descendant de l'atmosphère .....	A	Flux de chaleur entrant dans le sol .....	Q6
Rayonnement du disque solaire réfléchi sur la surface .....	aS	Flux de chaleur entrant dans l'air .....	K
Rayonnement du ciel réfléchi sur la surface .....	aD	Flux de chaleur latente utilisée pour l'évapotranspiration ..	V
Rayonnement thermique descendant de l'atmosphère réfléchi sur la surface .....	QNA	Energie calorifique stockée dans la biomasse ...	Q
Albedo de la surface pour le rayonnement global ...	a	Flux de chaleur latente provenant de la rosée ...	Qr
Albedo de la surface pour le rayonnement thermique descendant de l'atmosphère .....	QNA	Energie d'advection .....	Qe

Fig: 0 - Bilan d'énergie (GALOUX 1968)



I - CARACTERISATION DES FEUILLES ET COUVERTS VEGETAUX PAR ETUDE DE LA REFLECTANCE

I-1 INTRODUCTION

La connaissance de l'interaction de la radiation solaire avec la végétation est nécessaire pour traiter et interpréter les données de télédétection concernant l'agriculture et autres ressources naturelles. Le plan d'une feuille typique a une faible réflectance dans le visible à cause de la grande absorption par les chlorophylles, relativement une haute réflectance dans le proche infra-rouge à cause de la diffusion interne de la feuille et du manque d'absorption et relativement une basse réflectance dans l'infra-rouge (au delà de 1300 nm) à cause de la forte absorption due à l'eau.

La réflectance d'un couvert végétal est similaire à celle d'une feuille typique, mais elle est modifiée par la non uniformité de la radiation solaire incidente, la structure des plantes, la surface des feuilles, les ombres et les réflectivités des plans arrières.

La détection aéroportée reçoit et intègre la vue de tous ces effets, et chaque type de végétation a tendance à avoir une signature caractéristique permettant sa discrimination.

Quand la maladie ou les contraintes physiologiques affectent directement les propriétés de réflectance des feuilles individuelles, le plus prononcé des changements, a lieu dans le visible plutôt que dans l'infra-rouge à cause de la sensibilité de la chlorophylle au désordre physiologique.

La première base pour la détection des contraintes dans une communauté de plantes, n'est pas souvent un changement dans les caractéristiques des feuilles prises individuellement, mais plutôt une réduction de la surface totale des feuilles exposées au détecteur.

Cette réduction peut se traduire par une perte directe des feuilles, un changement dans leur orientation ou bien un arrêt de leur poussée. Dans ce cas, la réflectance infra-rouge totale a tendance à décroître (plus rapidement que dans le visible) à cause de la réduction du contraste de l'infra-rouge dû à l'amointrissement des couches des feuilles et à cause de l'augmentation de l'effet du plan arrière (sol).

La télédétection de l'agriculture et des autres ressources naturelles, considère la détection de l'énergie électromagnétique qui est réfléchié ou émise à partir de l'assemblage complexe des choses biologiques, géologiques ou hydrologiques à la surface de la terre.



Les données obtenues peuvent être bien interprêtées si on a une compréhension fondamentale de l'interaction : énergie - matière de la surface - à la surface de la terre qui compte et intervient dans les variations de la quantité et la qualité de la radiation enregistrée par les détecteurs aéroportés. Cette connaissance est aussi nécessaire pour nous, afin de trouver de nouvelles applications des systèmes de télédétection existants et de concevoir de nouveaux systèmes capables de détecter et d'enregistrer des différences potentielles et prédictibles dans les données.

Le but de cette étude est de discuter les bases physiques et physiologiques pour la réflexion dans le visible et le proche infra-rouge de la radiation solaire à partir de feuilles et de couverts végétaux.

Cette discussion est particulièrement utile aux techniques de télédétection photographique dans le multispectral, pour l'obtention d'informations concernant les cultures agricoles, les forêts et les pâturages.

#### I-2 CARACTERISTIQUES DE LA REFLECTANCE D'UNE FEUILLE

Le spectre de réflectance d'une feuille de plante est donnée par la fig. 1

La courbe nous montre le pourcentage de réflectance de l'énergie incidente sur la feuille comme une fonction de la longueur d'onde de l'énergie incidente dans la bande (400  $\frac{0}{0}$  2700 nm). Dans la partie visible du spectre (400  $\frac{0}{0}$  700 nm), la réflectance de la feuille est basse (10 %) et avec un maximum aux environs de 550 nm qui est le vert. Ce maximum tient compte de la couleur verte des feuilles reçue par l'oeil humain.

Dans l'infra-rouge (700  $\frac{0}{0}$  1300 nm), la réflectance croît et atteint une valeur proche de 50 %, puis décroît graduellement jusqu'à atteindre une valeur basse aux environs de 2700 nm d'intervalle spectrale (400  $\frac{0}{0}$  2700 nm) a reçu une attention considérable de la part des chercheurs étudiant la réflectance de la plante, à cause du fait que la radiation solaire incidente a lieu spécialement à ces longueurs d'onde, et à cause de l'existence de l'instrumentation spectrophotométrique permettant la mesure de la réflectance dans cette région.

Au delà de l'intervalle montré à la fig. 1, c'est à dire dans l'ultraviolet (courtes longueurs d'onde) et dans l'infra-rouge lointain (grandes longueurs d'onde), la réflectance des plantes est assez basse et relativement uniforme (généralement moins de 50 %)

#### I-3 MECANISMES DE LA REFLECTANCE DE LA FEUILLE

Une partie seulement de l'énergie incidente est réfléchiée par la feuille et le reste est soit absorbé, soit transmis. Ces trois composantes sont liées et il faut nécessairement les considérer toutes pour pouvoir évaluer les bases physiques et physiologiques de la feuille.



La fig. 2 illustre la réflectance, l'absorption et la transmittance d'une feuille dans l'intervalle ( $400 \frac{0}{0}$  2700 nm).

- le spectre de réflectance est le même que celui de la fig 1 mais inversé
- le spectre de transmittance a la même forme que celui de la réflectance de la fig 1
- le spectre de l'absorption est l'opposé des deux autres.

#### REMARQUES

L'absorption est importante dans le visible et l'infra-rouge (au delà de 1300 nm), mais elle est presque nulle dans le proche infra-rouge ( $700 \frac{0}{0}$  1300 nm).

La forte absorption de la plante dans l'infra-rouge (au delà de 1300 nm) est due à l'eau (ALEN - RICHARDSON 1968) Le spectre de la réflectance d'une feuille déshydratée illustre effectivement ce point. Voir fig 4

L'effet de l'eau est dû aussi à des considérations théoriques : sur la base des coefficients d'absorption de l'eau PUM, ALEN et GAUSSMAN (1970) ont obtenu l'expression de l'épaisseur équivalente de l'eau (en anglais : EWT : équivalent water thickness) permettant de montrer que le spectre d'absorption d'une feuille est considérable dans l'intervalle ( $1400 \frac{0}{0}$  2500 nm).

La valeur de "EWT" calculée pour turgides (plantes grasses), les feuilles de coton et les feuilles de maïs mur était de 150 u environ et elle était en accord avec la quantité d'eau mesurée dans les feuilles.

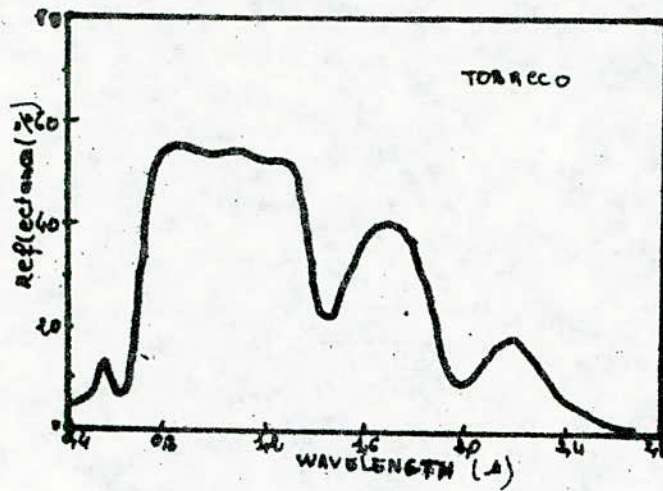
Dans le spectre visible, l'importance de l'absorption est due à la pigmentation des feuilles, particulièrement les chlorophylles bien que les xautophylles et les carotenoïdes ont aussi un effet. De nombreux spectres d'absorption publiés, concernant les pigments isolés des feuilles dans les solvants organiques, appuient cette relation; mais la plus puissante évidence est donnée par le spectre de réflexion de la partie blanche d'une feuille cannelée (manque de chlorophylle). Dans ce cas, le niveau de la réflectance visible est à peu près au même niveau de réflectance des deux parties de la feuille dans le proche infra-rouge. Comme les deux parties ont le même niveau de réflectance infra-rouge, on peut conclure que ni la présence, ni l'absence de chlorophylle n'est responsable. Fig 3

Cette remarque est d'une grande importance puisque la réflectance infra-rouge a été (quelque fois) faussement attribuée aux chlorophylles; en fait, le spectre d'absorption des chlorophylles isolées indique que les pigments sont complètement transparents à la radiation infra-rouge.

La haute réflectivité infra-rouge est due à la structure cellulaire interne des feuilles.

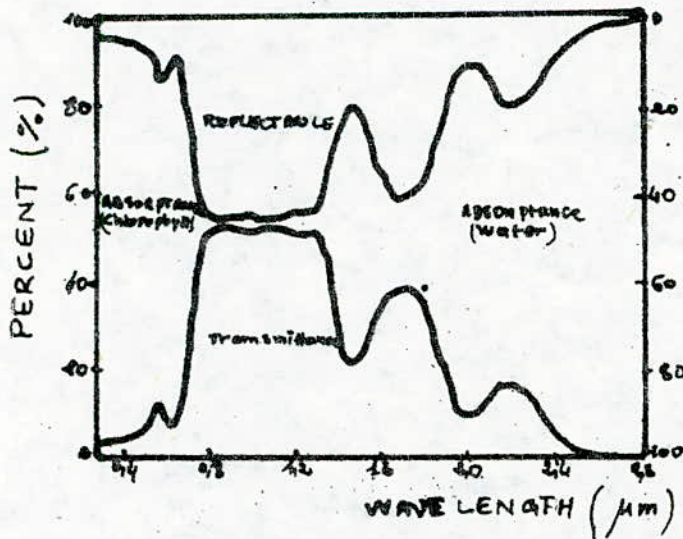
La cire cuticulaire de la feuille est presque transparente aux radiations visible et infra-rouge, ainsi, très peu d'énergie solaire incidente est réfléchié directement par la surface externe de la feuille.

FIG. 1



REFLECTANCE SPECTRUM OF A TOBACCO LEAF -

FIG. 2



REFLECTANCE, ABSORPTANCE AND TRANSMITTANCE SPECTRA OF A PLANT LEAF



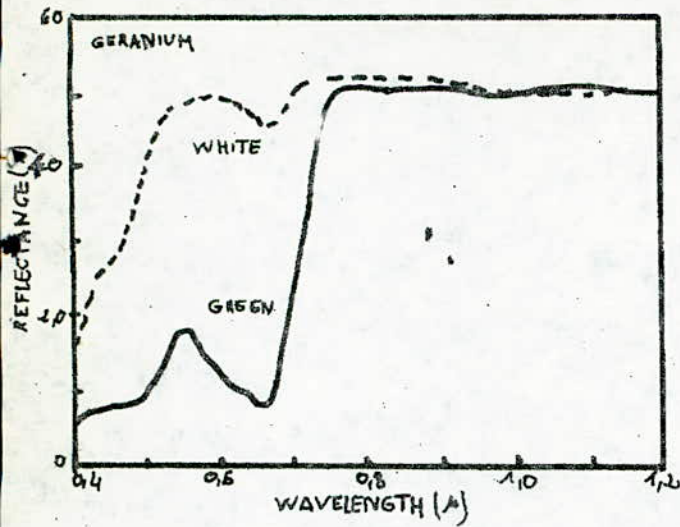


Fig 3 - REFLECTANCE SPECTRA OF the white and green portions of a variegated geranium leaf.

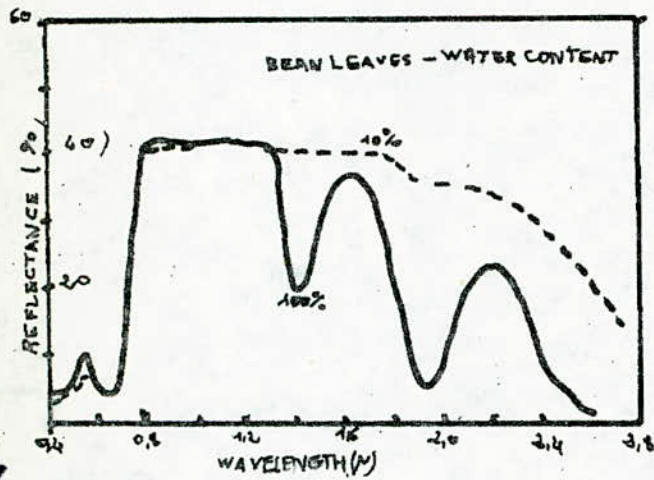


Fig 4 - The effect of a leaf dehydration on the spectral reflectance of bean leaves. The numbers on the curves, 10 and 100, refer to the water content of the leaves at the time of sampling as a percentage of their water content when fully hydrated.

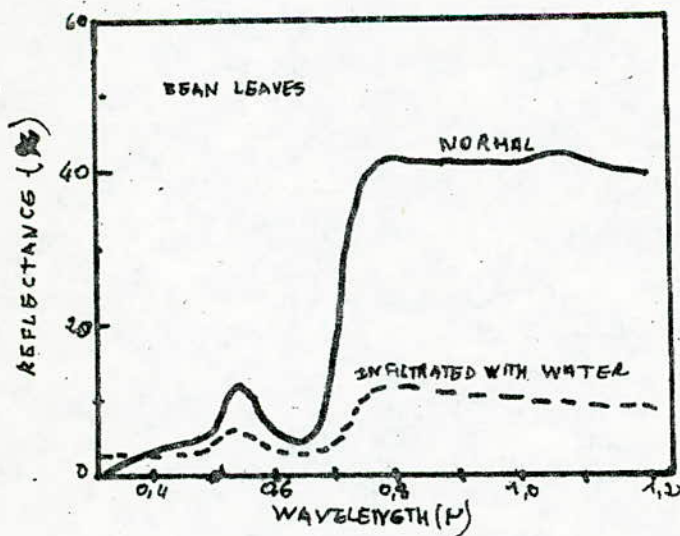


Fig 5 - The effect of water infiltration of intercellular spaces on the spectral reflectance of bean leaves.

La radiation est diffusée puis dispersée (à travers la cuticule et l'épiderme) vers les cellules mésophylles et les cavités d'air à l'intérieur de la feuille. Ici, la radiation est dispersée encore quand elle passe à travers de multiples réflexions et réfractions car il y a une différence entre l'indice de réfraction de l'air (1,0) et celui des feuilles hydratées (1,4)

Les microfibrilles qui constituent la cellule ou les tissus cellulaires sont probablement responsables de la rugosité de leur surface et de leur nature diffusante.

Très peu ou presque pas de radiations infra-rouge ( $700 \frac{0}{0}$  1300 nm) sont absorbés intérieurement et près de 50 % sont dispersées vers le haut à travers la surface d'incidence et sont appelées : radiations réfléchies; le reste est dispersé vers le bas et est appelé : radiation transmise.

Ce mécanisme de dispersion interne est en partie responsable de la similitude entre les formes des spectres de la réflectance et de la transmittance.

Les hauts niveaux de réflectance des feuilles blanches et déshydratées, dans le visible et l'infra-rouge (au delà de 1300 nm), montrent que les interactions de ces radiations (visible et infra-rouge) avec la structure de la feuille ne sont pas réellement différentes de l'interaction de l'énergie proche infra-rouge.

Toutefois, quand la chlorophylle et l'eau sont présentes, une grande partie de l'énergie est absorbée avant qu'elle ne puisse partir de la feuille. C'est pour cela que, dans les régions spectrales, les pigments et l'eau sont responsables de la faible réflectance et de la faible transmittance (relativement) de la feuille.

L'évidence de ce mécanisme de réflexion nous est donné par la réduction importante de la réflectance proche infra-rouge. voir fig. 5

Le fait que la chlorophylle et l'eau, dans une feuille non infiltrée, absorbent la plupart de l'énergie visible et infra-rouge respectivement, peut être interprété comme étant une évidence du mécanisme interne car la radiation doit pénétrer dans la feuille avant qu'elle ne soit absorbée.

WILLSTATTER et STOLL (1913) ont été les premiers à reconnaître le mécanisme de réflexion interne des feuilles. Des analyses mathématiques de modèle théorique et de photomicrographes de section transversale de feuille montrent que le paramètre important, pour déterminer le niveau de réflectance est la surface totale de l'air-mur d'interface et non le volume de l'espace aérien.

Dans ce contexte, la palissade mésophylle d'une feuille est probablement aussi importante que la mésophylle spongieuse dans la dispersion interne de la radiation.

Beaucoup de cavités d'air existent entre les palissades de cellule adjacentes, et l'espace des "murs" de cellule exposés dans cette région, est



probablement aussi large (plus large dans certains cas) que dans la mésophylle spongieuse qui, généralement, a de larges cavités d'air et moins de cellule.

L'orientation des cavités d'air de la palissade a peu d'importance, car la radiation entrant dans la feuille est largement diffusée après être passée à travers la cuticule, l'épiderme et les "murs" de palissade cellulaire.

Du point de vue de l'absorption de la chlorophylle, il semble qu'il y a un avantage physiologique pour la feuille, afin que la dispersion prenne place en premier dans la région de palissade.

L'expression "effondrement de la mésophylle" a été souvent utilisée pour prévoir et expliquer la décroissance de la réflectance infra-rouge.

Il est supposé que, quand les feuilles se fânent ou flétrissent durant la déshydratation et la sénescence, beaucoup d'interfaces réfléchives sont éliminées quand l'espace air est réduit et les tissus se rapprochent

Maintenant, on sait que la réflectance des feuilles qui se déshydratent augmente et ceci est vrai, dans beaucoup de cas, pour les stades initiaux de la sénescence des feuilles. Malgré que le volume interne des feuilles diminue, des microcavités demeurent entre les tissus et le nombre d'interfaces peut augmenter quand les cellules adjacentes se dissocient et quand le contenu des cellules vivantes se plasmolise. D'autre part, la réorientation des tissus et l'éloignement de l'eau (des tissus vers la structure microfibre) peuvent accroître leur capacité de diffusion des radiations et sont, par conséquent, partiellement responsables de l'accroissement de la réflectance de la feuille.

La réflectance infra-rouge peut essentiellement décroître dans les stades avancés de la sénescence des feuilles, et ceci est probablement causé par une cassure ou une détérioration des tissus plutôt que par un effondrement ou une réduction du volume d'air de la mésophylle spongieuse.

#### I-4 REFLECTIVITE DES COUVERTS VEGETAUX

Les propriétés de réflectance d'une feuille servent de base pour comprendre la réflectivité d'un couvert végétal dans une situation réelle; mais les données d'une feuille ne peuvent être appliquées directement sans modification. Cependant, il y a des différences qualitatives et quantitatives dans les deux types de spectre (feuille et couvert végétal).

Du point de vue pourcentage, la réflectance d'un couvert végétal est moins importante que celle d'une feuille individuelle et ce à cause de l'atténuation générale de la radiation due à des variations dans l'angle d'élimination, l'orientation des feuilles, les ombres et l'arrière plan non végétal (sol).

La réflectance visible et proche infra-rouge d'un couvert feuillé se situe respectivement aux environs de 3 à 5 % et de 35 %, alors que les valeurs correspondant à une feuille individuelle sont de l'ordre de 10 à 50 %



La faible réduction (relativement) de la réflectance infra-rouge est due à un facteur de compensation : la plupart de l'énergie infra-rouge incidente, qui est transmise à travers les feuilles du haut, est réfléchi à partir des feuilles basses et puis retransmise à travers les feuilles du haut afin d'accroître leur réflectance. Ceci a été illustré à la fois spectrophotométriquement et photographiquement par MEYERS (1966).

ALLEN et RICHARDSON (1968) ont démontré l'effet d'augmentation infra-rouge en utilisant des considérations théoriques, qui développent une description mathématique de l'atténuation de la lumière dans un milieu diffus.

Ils ont appliqué ces théories à un couvert végétal ayant une profondeur donnée et une orientation arbitraire des feuilles; ils ont montré que les spectres de réflectance et de transmittance d'un couvert végétal sont fonction de la surface du feuillage total, d'un coefficient d'absorption, d'un coefficient de dispersion et de la réflectivité de l'arrière plan. Ces coefficients sont liés à la géométrie du couvert et aux propriétés des feuilles individuelles.

Cette analyse théorique de la réflectance d'un couvert a donné plus d'informations concernant les bases physiques et les propriétés optiques des feuilles individuelles.

Une théorie similaire a été utilisée pour décrire la réflectance et la transmittance d'une feuille en termes de réflectivité et transmittivité des interfaces dans les feuilles, des coefficients d'absorption et de dispersion, des indices de réfraction et de l'ombre d'une cavité d'air - tissus.

L'augmentation de la réflectance infra-rouge par des couches multiples de la feuille dans un couvert, amplifie la différence (déjà grande) de la réflectance d'une feuille dans le visible et l'infra-rouge. Toutefois, un facteur qui doit encore être pris en considération compense partiellement l'accroissement de la différence.

Dans le but de présenter les caractéristiques de base et le mécanisme de la réflectance de la feuille, les niveaux de réflectance, discutés jusque là, ont été exprimés en pourcentage, mais ces valeurs ne représentent pas la distribution d'énergie qui est effectivement réfléchi par la feuille, car l'intensité de l'énergie solaire incidente n'est pas uniforme à travers le spectre.

Quand l'énergie incidente est exprimée par une quantité par intervalle de longueur d'onde, le sommet du spectre dans le visible se situe aux environs de 500 nm et il décroît à un niveau relativement bas dans le proche infra-rouge. Ainsi, la forme du spectre de l'énergie incidente est approximativement l'opposé du spectre de réflectance d'une feuille ou d'un couvert végétal et par conséquent, elle a tendance à compenser d'une certaine manière la large différence dans la réflectance entre les deux régions.

Toutefois, la réflectance infra-rouge exprimée en énergie est plus élevée que la réflectance visible.



L'expression du spectre de réflectance en termes d'énergie est très importante en télédétection.

En fait, il existe un grand besoin pour les mesures et les études des caractéristiques de réflectance des feuilles et des couverts végétaux, directement en termes d'énergie à partir des plateformes aériennes; ceci nécessite le développement et l'utilisation des spectromètres et des radiospectromètres mesurant l'énergie d'une manière convenable et plus rigoureuse.

Tous les détecteurs travaillent en termes d'énergie et ce sont la forme et la variation d'énergie reçues par les détecteurs qui nous informent sur l'aspect des ressources à la surface de la terre.

#### I-5 TELEDETECTION AGRICOLE

Ses deux applications principales sont l'identification des formes d'utilisation du sol et l'inventaire des types et quantités de plante ou culture.

Les différences dans la réflectivité, permettant la discrimination des espèces végétales, peuvent être retrouvées dans les caractéristiques de leur feuille et de leur couvert végétal. Les feuilles d'une espèce donnée ont tendance à avoir une surface caractéristique, une épaisseur, une structure interne et une pigmentation typiques.

D'une manière similaire, le couvert, vu horizontalement ou verticalement, a tendance à avoir une structure ou une géométrie qui est déterminée par les dimensions, la forme et l'orientation des plantes et de leurs feuilles et par les pratiques agricoles ou leurs conditions de poussée. Tous ces facteurs influent sur les propriétés optiques de la feuille et du couvert végétal et les formes de réflexion reçues par des détecteurs aéroportés représentent l'intégration de leurs effets.

La détection des maladies ou des contraintes physiologiques de poussée, est une autre application importante de la télédétection agricole; en effet, son utilité réside dans le fait qu'elle permet une action corrective et une prédiction de la récolte.

La détection des contraintes dans les plantes est basée sur le principe que la réflectivité n'est (quantitativement et qualitativement) pas la même pour les plantes en bonne santé et les plantes qui ne le sont pas. Cependant, une évidence expérimentale et des données de télédétections appuient ce point de vue, mais dans certains cas les bases physiques ou physiologiques de ces différences ont été mal interprétées; en effet, il y a eu une tendance à attribuer ces différences (différences de réflectance entre plantes en bonne santé et plantes qui ne le sont pas) à un changement dans les propriétés optiques des feuilles individuelles dans les régions non visibles du spectre.

Toutefois, des évaluations critiques, dans la photographie aérienne et dans la plupart des données expérimentales, révèlent un certain nombre de relations importantes, parmi lesquelles nous pouvons retenir une qui



nous montre que, quand les différences dans les propriétés de réflectance des feuilles individuelles ressortent des changements dans la réflectance visible, il y a immédiatement des changements dans la réflectance infra-rouge et ceci est un indicateur sensible des contraintes physiologiques. Ce point de vue est appuyé par des rapports de photo-interprètes, faisant état des différences de réflectivité de végétation apparaissant aussi bien dans les photos couleurs conventionnelles que dans les photos couleurs infra-rouge. Même quand les différences de couleur apparaissent plutôt ou distinctement dans le dernier type de photographie, elles sont souvent attribuées à l'habileté de l'émission couleur infra-rouge, à discriminer plus distinctement entre feuillage et arrière plan et à amplifier les différences de ton des changements dans le spectre visible plutôt qu'à des changements de réflectivité infra-rouge des feuilles seules. Cette analyse ne ressort pas la valeur des films infra-rouge couleurs mais aide à comprendre la raison de son utilité.

La sensibilité de la réflectivité d'une feuille dans le spectre visible aux conditions de Stress, est causée par la sensibilité de la chlorophylle au dérangement métabolique et, quand cette dernière se détériore et absorbe avec moins d'efficacité, la réflectance visible croît. Par contre, les changements de la réflectance infra-rouge sont relativement variables avec la maladie, la sénescence et les contraintes. A la limite, dans les stades avancés de la sénescence, la réflectance infra-rouge diminue.

Les évaluations des données de réflectivité des plantes sans contraintes (maladie, sécheresse, déficience nutritive, salinité) et la photographie révèlent une autre relation importante qui est le facteur prédominant pour la distinction de végétation en bonne santé; cette relation se base sur les différences dans la surface de la feuille et la densité de feuillage. Ces différences peuvent ressortir d'une perte directe de feuillage ou d'un arrêt de croissance. En plus des réductions dans la surfaces des feuilles, il y a une augmentation des ombres et des surfaces non feuillées telles que les branches et les sols qui ont généralement une réflectivité basse.

L'énergie réfléchiée par ces types de surface est généralement différente (quantitativement et qualitativement) de celle réfléchiée par une végétation solide et vigoureuse; alors que les caractéristiques de réflectance des feuilles individuelles peuvent ne pas trop différer.

Toutefois, la réflectance infra-rouge totale, du composant feuillage de la région observée, a tendance à être réduite relativement plus que la réflectance visible car les couches dans les feuilles sont moins nombreuses et l'effet contraste infra-rouge est réduit.

Dans certains cas, les différences de réflectivité des plantes sans contraintes peuvent être attribuées à des changements dans l'orientation des feuilles aussi bien qu'à un changement dans leur surface.



Un exemple important est le flétrissement provisoire des feuilles, qui a lieu souvent dans beaucoup de cultures et dans les bordures extérieures des couronnes de jeunes arbres, durant les étés secs et chauds. La quantité d'eau, perdue par les feuilles fânées, semble avoir un effet significatif dans les propriétés de leur réflectance mesurée par un spectrophotomètre.

-D-

METHODES ET MESURE DES FACTEURS DE REFLECTANCE ET CALIBRATION

- D -



## D. METHODE DE MESURE DES FACTEURS DE REFLECTANCE ET CALIBRATION

L'irradiance et la radiance sont mesurées simultanément avec deux radiomètres, il y a eu seulement besoin de déterminer une calibration relative.

### RESUME

La littérature contient des facteurs de réflectance obtenus de différentes manières mais qui ne sont pas toujours en accord.

Les sources majeures d'erreur peuvent être éliminées en utilisant une technique de mesure relativement simple dans laquelle deux radiomètres sont employés pour mesurer simultanément l'irradiance sur le sol et la radiance réfléchie par le sol. Il est essentiel que la calibration entre ces radiomètres et sa dépendance de l'angle solaire soient bien assimilées (comprises).

Ce présent chapitre traitera des mesures de réflectance et des problèmes de calibration et d'analyse.

Une importance majeure sera accordée aux mesures faites dans les bandes spectrales LANDSAT.

### INTRODUCTION

Le facteur de réflectance hémisphérique directionnel (appelé ici facteur de réflectance) pour une région donnée du spectre, est définie comme étant le rapport de la radiance réfléchie à partir d'une surface dans une direction donnée et de la radiance incidente d'une surface (irradiance)

Ce rapport peut être calculé à partir de deux quantités mesurées soit séquentiellement avec un seul radiomètre soit simultanément avec deux radiomètres intercalibrés. Ces deux derniers ont l'avantage d'éviter des erreurs dues à des variations atmosphériques qui peuvent causer des changements dans l'irradiance pendant la période de mesures successives donnant jusqu'à 10 % d'erreur, dans le calcul du facteur de réflectance.

Beaucoup de chercheurs présentent des données de réflectance obtenues par des mesures séquentielles; ceci est probablement une raison qui fait que les propriétés de la réflectance de la surface de la terre soient tellement en conflit.

Nous nous proposons dans cette étude de présenter la méthode de mesure avec plus de détails et de discuter la calibration des données.

### MESURES DE LA RADIANCE ET DE L'IRRADIANCE

Deux radiomètres sont utilisés : l'un mesure l'irradiance totale (ou globale) et l'autre la radiance réfléchie par le sol.

Les instruments peuvent être des spectro-radiomètres (soit à balayage ou non) puisque la méthode employée est la même et les deux instruments sont mis à la même bande passante pour la mesure. La disposition des radiomètres est donnée en fig. 4. Les instruments sont montés verticalement. Celui qui mesure l'irradiance est ajusté avec un récepteur à cosinus et l'autre avec un récepteur à ouverture.



. Le récepteur à cosinus mesure l'irradiance à partir de l'hémisphère du ciel, alors que le récepteur à ouverture mesure la radiance réfléchie dans un petit angle solide (pour que la radiance soit mesurée à partir d'une direction donnée). Les deux instruments sont ainsi lus en même temps; ce qui est le cas pour les radiomètres de vérité terrain, dans les quatre bandes LANDSAT, (sous balayage) où les quatre voltages de chaque instrument sont lus au même instant (DUGGIN et AL, 1975).

Certains radiomètres possèdent un système appelé "Chopper" (hachoir ou coupe-ret) leur permettant la mesure directe de la différence de voltage à partir de l'instrument pour la lumière incidente au dessus du détecteur comparée à l'absence de lumière sur le détecteur (obscurité totale).

Il existe aussi d'autres radiomètres (tel que l'Exotech 100) ne possédant pas de chopper et qui mesurent les voltages même quand le récepteur à cosinus ou à ouverture est couvert. Ce type d'appareil nous permet de calculer ce qui est appelé : le courant sombre que l'on devra soustraire du voltage mesuré. En collectionnant les données de la radiance réfléchie, qui peuvent être comparées aux données LANDSAT, il est nécessaire de pointer le radiomètre directement vers le bas afin d'éviter des variations angulaires de la radiance détectée qui seront traduites par des variations angulaires des facteurs de réflectance (DUGGIN : 1977, KIMES et AL, 1979).

Durant la calibration, il est essentiel de s'assurer que le champ de vision de l'instrument regardant vers le bas tient compte seulement d'un réflecteur standard, et qu'il n'y a aucun type de réflexion sur la plateforme de mesure (due à l'opérateur ou aux équipements). L'utilisation de la peinture noire sur des équipements qui peuvent causer des réflexions est recommandée.

Il est similairement essentiel, quand on mesure la radiance réfléchie à partir d'une cible réelle, d'éviter d'avoir des réflexions parasites (dûes aux mêmes agents cités précédemment).

. Le radiomètre regardant vers le haut, ajusté avec un récepteur à cosinus doit être parfaitement horizontal afin d'éviter d'intégrer des surfaces au dessous de l'horizon et doit être situé au dessus de l'opérateur et de son équipement pour éviter des interférences.

La plupart des instruments sont ajustés à l'aide de batteries à mercure qui présentent souvent des distorsions et qu'il faut ajuster pour éviter de la perte de donnée.

#### CALIBRATION

Afin de calculer les facteurs de réflectance "Rr" pour des bandes passantes "r", il faudra mesurer aussi le facteur de calibration "Cr".

Cr dépend beaucoup de l'angle zénithal solaire "z".

La calibration "Kr" de la plateforme de réflectance utilisée comme un standard est très importante.



#### 4) Mesure de Cr :

Pour calibrer les instruments, le radiomètre regardant vers le bas et possédant un récepteur à ouverture, doit être pointé verticalement sur un réflecteur standard blanc mat pour remplir le champ de vision.

L'autre radiomètre, ajusté à l'aide d'un récepteur à cosinus, mesure l'irradiance.

A partir de mesures simultanées avec les deux radiomètres, on obtient le voltage corrigé Cr (ici les radiomètres sont sans choppers)

$$Cr = \left[ \frac{V_{2r} - D_{2r}}{V_{1r} - D_{1r}} \right] \text{ cal.}$$

où :  $V_{1r}$  = voltage à partir du radiomètre "1" regardant vers le bas

$V_{2r}$  = voltage à partir du radiomètre "2" regardant vers le haut

$D_{1r}$  = Courant sombre du radiomètre "1"

$D_{2r}$  = Courant sombre du radiomètre "2"

Pour les radiomètres avec chopper :  $D_{1r} = D_{2r} = 0$

\* Le facteur de calibration Cr est le rapport entre la lecture de l'irradiance du radiomètre regardant vers le haut et de la radiance simultanément réfléctée par le standard et mesurée par le radiomètre regardant vers le bas.

Durant la calibration, une plateforme standard horizontale, couverte de Ba.SO<sub>4</sub> est utilisée. La réflectance de cette dernière peut être mesurée au laboratoire, et exprimée pour chaque bande passante, comme une fraction de Kr de la réflectance d'une référence optique standard de Ba.SO<sub>4</sub>, prise comme un réflecteur parfait mat.

#### 4) Dépendance de Cr de l'angle de zénith.

Comme le réflecteur standard se comporte d'une manière non lambertienne (éloignement de la loi du cosinus) et que nous avons un récepteur à cosinus, le rapport "Cr" dépend de l'irradiance et par conséquent du cosinus de l'angle zénithal solaire "z" au moment de la mesure.

. Selon des mesures faites par une paire d'Exotech GTR 100, dans les bandes spectrales correspondant au LANDSAT, la dépendance de "Cr" du "cos z" pour chaque bande passante ci dessous :

r = 1 pour MSS 4 (0,4  $\frac{0}{0}$  0,6) um

r = 2 pour MSS 5 (0,6  $\frac{0}{0}$  0,7) um

r = 3 pour MSS 6 (0,7  $\frac{0}{0}$  0,8) um

r = 4 pour MSS 7 (0,8  $\frac{0}{0}$  1,1) um

(avec MSS = de l'anglais : multispectral - scanner) est donnée par les équations de regression linéaires suivantes :

$$C_1 = 0,422 + 0,158 \cos z$$

$$R^2 = 0,787$$

$$C_2 = 0,375 + 0,122 \cos z$$

$$R^2 = 0,788$$

$$C_3 = 0,367 + 0,169 \cos z$$

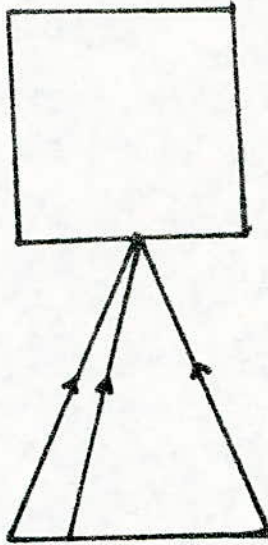
$$R^2 = 0,790$$

$$C_4 = 0,366 + 0,170 \cos z$$

$$R^2 = 0,825$$

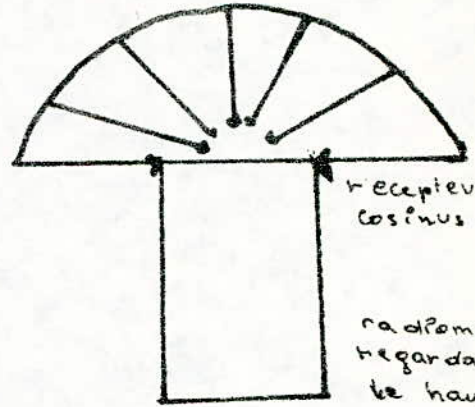
FIG. 1

radiomètre regardant vers le bas



recepteur à ouverture

radiance réfléchie dans le canal donne (Van-Dier) ou Van sans Chopper



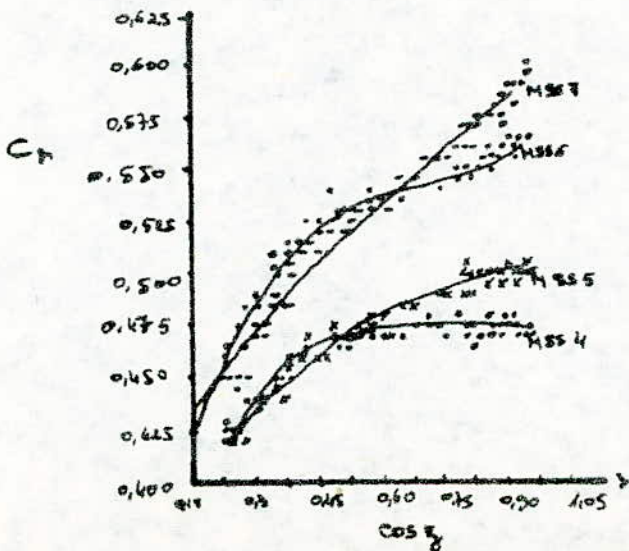
recepteur à cosinus

radiomètre regardant vers le haut.

irradiance dans le canal donne (Van-Der) ou Van sans Chopper

ARRANGEMENT DES RADIOMETRES POUR MESURES ET CALIBRATION

FIG. 2





où les deux radiomètres sont à l'échelle "1" et où  $R^2$  est la fraction de la variance appliquée par la regression. Pour le cas de chaque bande passante, le facteur de calibration Cr est largement dépendant de "cos z"; ( $P < 0,001$   $P =$  probabilité) et entre 78 à 82 % (dépendant de la bande passante), de la variation de "Cr" peut être expliquée par une régression linéaire en "cos z". On doit noter aussi que quand on fait des mesures de réflectance, on travaille à l'échelle une ("1") pour toutes les bandes passantes du radiomètre regardant vers le haut.

Pour le radiomètre regardant vers le bas, l'échelle de travail est soit x1 ou x5 pour des bandes passantes correspondant aux MSS4 et MSS5, mais x 1 pour celles correspondant aux MSS6 et MSS7.

La raison de cette répartition d'échelle est que certaines cibles (végétales) donnent des valeurs de réflectance dans les bandes MSS4 et MSS5 qui sont généralement entre 10 et 50 % de celles des bandes MSS6 et MSS7; par conséquent, une sensibilité plus grande est nécessaire pour les bandes MSS4 et MSS5.

Il est essentiel que la même échelle soit utilisée pour la calibration et pour la mesure; donc des cibles de faible réflectance en MSS4 et MSS5 (végétales) les valeurs de Cr à l'échelle X5 du radiomètre regardant vers le bas doivent être utilisées comme :

$$Cr = \frac{V2r - D2r}{V1r - D1r} = \frac{\text{voltage corrigé à partir du radiomètre regardant vers le haut et mesurant l'irradiance}}{\text{voltage corrigé à partir du radiomètre regardant vers le bas et mesurant la radiance réfléchie}}$$

REMARQUE :

Un changement : de l'échelle X1 à l'échelle X5 sur le radiomètre regardant vers le bas réduit Cr d'un facteur de 500.

Des mesures faites avec des radiomètres exotech 100 montrent bien cela avec un battement de 2 % dans les canaux MSS4 ( $r = 1$ ) et MSS5 ( $r = 2$ ). Les données ainsi obtenues prouvent une régression polynomiale du troisième degré correspondant mieux aux MSS4 et MSS6 pour le cas où tous les canaux sont à l'échelle X1.

(L'échelle X5 pour MSS4 et MSS5 a causé une saturation des amplificateurs opérationnels du radiomètre regardant vers le bas, donnant des résultats erronés).

Une approche quadratique explique mieux les données pour MSS7. La fraction de la variance  $R^2$  expliquée par les regressions a été entre 0,87 et 0,97 et dépendant du canal.

La variance ne dépend en aucun cas de la variable indépendante "cos z" mais les résiduelles apparaissent en une distribution dépendant de "cos z". Les courbes de regressions de "Cr" en fonction de "cos z" sont données dans tous les canaux en fig.

Les équations de régression ont été :

$$\begin{cases} C_1 = 0,347 + 0,465 \cos z - 0,565 \cdot \cos^2 z + 0,227 \cos^3 z \\ R^2 = 0,874 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_2 = 0,336 + 0,463 \cos z - 0,484 \cos^2 z + 0,192 \cos^3 z \\ R^2 = 0,955 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_3 = 0,306 + 0,937 \cos z - 1,297 \cos^2 z + 0,631 \cos^3 z \\ R^2 = 0,971 \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_4 = 0,393 + 0,292 \cos z - 0,089 \cos^2 z \\ R^2 = 0,958 \end{cases}$$

On voit que les valeurs de  $C_r$  sont généralement éloignées les unes des autres de 10 % pour la paire de radiomètres, quelque soit la valeur de "cos z"; et que la dépendance en "cos z" est en relation directe avec la paire de radiomètres en question. Il est donc important que les calibrations soient faites pour des radiomètres fonctionnels puisque la calibration peut varier d'une paire de radiomètres à une autre.

### 3 CALCUL DU FACTEUR DE REFLECTANCE : $R_r$

Le facteur de réflectance calibré dans une bande passante : " $r$ " pour des radiomètres sans choppers est donnée par :

$$R_r = \frac{V_{1r} - D_{1r}}{V_{2r} - D_{2r}} \cdot \hat{C}_r \cdot K_r$$

où la valeur estimée  $\hat{C}_r$  est obtenue par des équations de regression appropriées.

Comme il a été indiqué précédemment, les relations de régressions doivent être obtenues expérimentalement pour chaque paire de radiomètres. On doit noter que des changements dans " $C_r$ " dûs à des changements dans " $z$ ", jusqu'à 3 % ont été observés. Ces changements donnent des erreurs du même ordre dans  $R_r$  s'il n'y avait pas de calibration.

Ces effets sont instrumentaux et probablement dûs à la déviation de l'aiguille du récepteur à cosinus du radiomètre mesurant l'irradiance par rapport comportement du vrai cosinus, et ne sont pas liés aux variations des facteurs de réflectance du terrain avec l'angle zénithal solaire " $z$ ".

\* Remarque :  $K_r$  est la réflectance (comparée à un standard de sulfate de baryum) au laboratoire donnée par réflecteur portatif.

### CALIBRATION DU REFLECTEUR PORTATIF

Jusqu'en 1979, il a été utilisé de la peinture de sulfate de baryum (EASTMAN KODAK) comme standard de réflectance. Le réflecteur a été calibré dans un laboratoire utilisant un spectrophotomètre. Actuellement, on utilise un réflecteur portatif fait de plaques de sulfate de baryum.



Des valeurs typiques de la réflectance "Kr" du réflecteur portatif peint (DUGGIN et AL 1975) sont :

MSS4	Kr = 0,944
MSS5	Kr = 0,942
MSS6	Kr = 0,934
MSS7	Kr = 0,929

Une calibration de réflecteur standard peint avec du sulfate de baryum a été récemment faite dans le champ de mesure comme suit :

Deux radiomètres intercalibrés ont été utilisés :

- L'un a été pointé sur le champ standard portatif à calibrer
- L'autre pointé sur le réflecteur fait de plaques de sulfate de baryum blanc.

Si le réflecteur standard de ce dernier est pris comme ayant une réflectance de (1,00), le champ standard aura une réflectance de 2 à 4 % plus faible dans les canaux LANDSAT qui dévie de 3 à 4 % par rapport aux mesures de laboratoire (vu précédemment)

Si une plus grande précision est nécessaire, la calibration au laboratoire est recommandée.

#### CONCLUSION :

La mesure et l'inclusion du courant d'obscurité "Dr" (pour des radiomètres sans chopper), la dépendance de "Cr" de l'angle zénithal solaire, et la mesure de "Kr" sont vitales pour une mesure sur le champ du facteur réflectance.

De même, il est essentiel de mesurer l'irradiance et la radiance simultanément, afin d'éviter une erreur sur "Rr", qui peut être due à des variations d'irradiance liées à des fluctuations atmosphériques.

La procédure simple indiquée ici pour mesurer Rr, nécessite seulement la calibration relative de deux instruments, et est par conséquent indépendante de leur calibration absolue.

Toutefois, il est souhaitable que la calibration absolue soit corrigée périodiquement, en utilisant des sources standards de radiance et d'irradiance pour s'assurer de la stabilité instrumentale.

-E - -

OPTO-ELECTRONIQUE

-E-



## E - OPTO - ELECTRONIQUE

### I: Dispositif opto-électronique

Tout montage dans lequel une liaison électrique est remplacée par une liaison optique, ou encore dans lequel une grandeur physique (comme la chaleur ou un déplacement) ou même chimique, est transformée en un signal optique capable d'être traité par un circuit électronique, est un dispositif opto-électronique.

Ces phénomènes de transformation sont basés sur plusieurs effets tels que les effets photo-électriques et les effets "thermo-électriques".

Nous nous intéresserons particulièrement dans cette présente étude aux effets photo-électrique qui sont répartis en quatre groupes :

- Effets photo-émissifs
- Effets photo-conducteurs
- Effets photo-voltaïques
- Effets photo-magnétiques.

### II. EFFET PHOTO - ELECTRIQUE

Un barreau semi-conducteur supportant un contact ohmique à chaque extrémité forme le composant. Dans ce matériau semi-conducteur, à la température normale de fonctionnement, les électrons des atomes sont presque tous liés aux réseaux cristallins (bande de conduction vide). Les photons d'énergie  $W_p$  supérieure ou égale à  $W_{bi}$  peuvent libérer ces électrons qui contribuent à la conductivité électrique : l'augmentation de conductivité consécutive à l'absorption de lumière constitue l'effet photo-électrique - on appelle détecteurs à photo-conduction les dispositifs homogènes basés sur ce principe - Dans ces dispositifs, les électrons libérés vont se recombinaer après une certaine durée de vie - L'effet photo-conducteur ne donne donc lieu à aucune transformation d'énergie -. Pour cela, il faudrait séparer les porteurs de charges (électrons et trous) créés par les photons d'énergie suffisante - Une jonction P.N constitue un moyen simple pour obtenir cette séparation - Lorsque cette jonction est illuminée par des photons d'énergie supérieur à  $W_{bi}$ ; il y a, en plus du fonctionnement normal qui dépend de la polarisation, génération de paires électron-trou (comme dans les dispositifs homogènes). Cependant, et contrairement à ce qui se produit pour les détecteurs homogènes, la présence du champ électrique de la jonction peut permettre la diffusion des électrons vers la zone N, et des trous vers la zone P avant qu'ils ne se recombinent. Il en résulte de la diffusion des porteurs d'origine photo-électriques un photo-courant  $I_p$ , dans le sens N vers P qui s'ajoute au courant de diffusion électrique et de génération thermique.

### III. DISPOSITIFS PHOTO - ELECTRIQUES

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



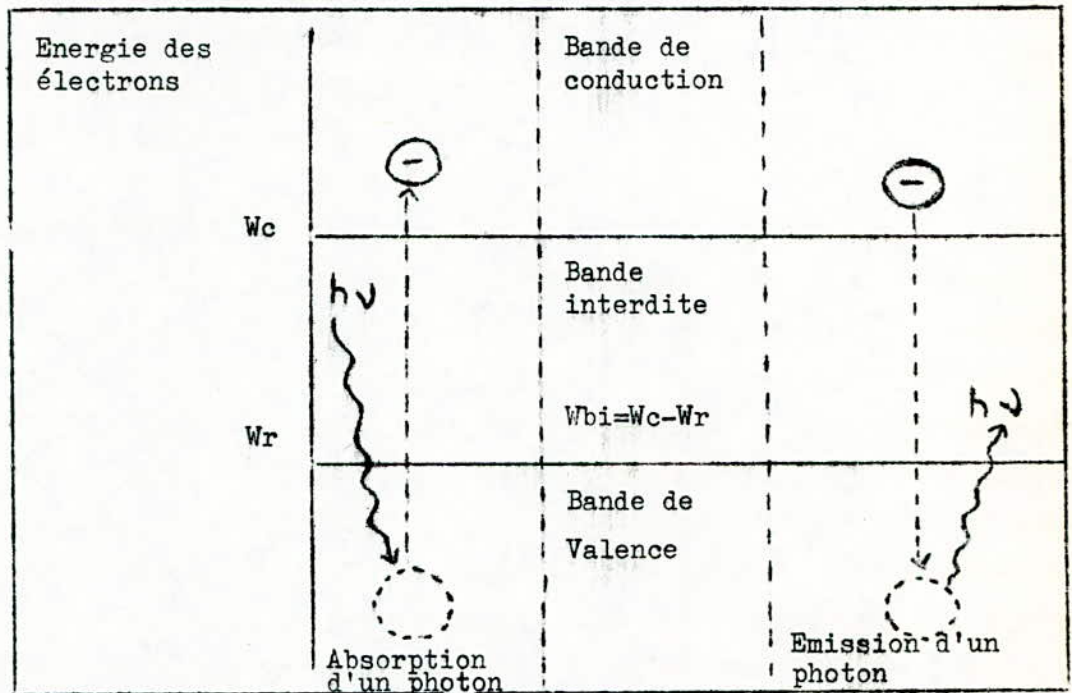
Ils se classent en quatre familles :

- Les photo - récepteurs
- Les dispositifs émetteurs de lumière
- Les photo coupleurs
- Les cellules solaires.

#### IV. PHOTO - EMETTEURS ET PHOTO - RECEPTEURS

##### IV.1 Principes physiques élémentaires :

Le diagramme d'énergie d'un solide cristallin se compose d'une succession de bandes d'énergie "permises" séparées entre elles par des régions "interdites". Les propriétés électroniques sont dues aux trois bandes indiquées sur la figure suivante :



##### - Bandes d'énergie et interaction dans un cristal parfait -

Dans le cas d'un semi conducteur pur, si aucune énergie n'est communiquée aux atomes, sous n'importe quelle forme: que ce soit température, rayonnement..., la bande de conduction est vide. Pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, il faut lui communiquer une énergie  $W_{bi}$  égale à la largeur de la bande interdite qui caractérise le cristal considéré. Les électrons de la bande de conduction et les trous qu'ils laissent dans la bande de valence permettent la conductivité électrique. Inversement, un électron de la bande de conduction (libre) peut "tomber" dans un état libre de la bande de valence (trou) en cédant une énergie  $W_{bi}$ , une telle recombinaison peut être radiative et il y a émission d'un photon.

L'énergie d'un photon est liée aux caractéristiques du rayonnement associé :

$$W_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



$c = 3.10^8$  m/s ;  $h = 6,62.10^{-34}$  J.s ;  $\nu$  en Hertz,  
 $\lambda$  en mètre et  $W_p$  en Joule.

Lors d'une interaction électron - photon on a toujours :

$$\Delta W_{e1} = W_p.$$

où  $\Delta W_{e1}$  est la variation d'énergie de l'électron et  $W_p$  énergie du photon.

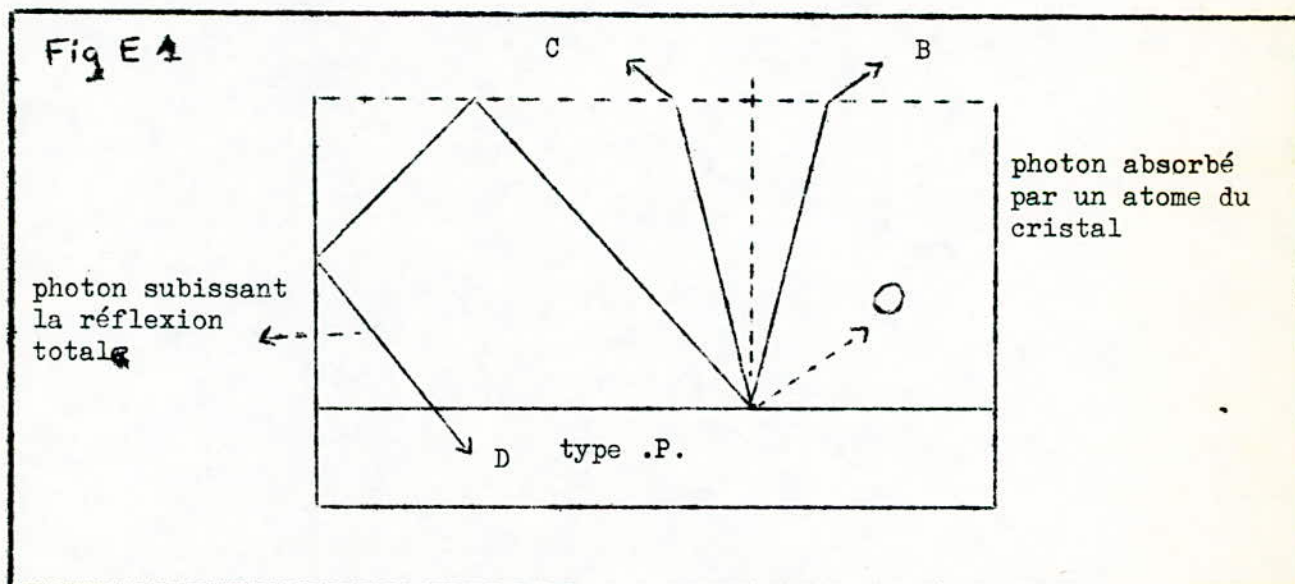
#### IV. 2 PHOTO - EMETTEURS A SEMI - CONDUCTEUR

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

##### IV.2.1 DIODE PHOTO-EMISSIVE :

Si l'on fait parcourir une diode à jonction P.N. par un courant direct, du fait de la recombinaison des porteurs de charge au niveau de la jonction, l'énergie libérée par cette recombinaison est rayonnée sous forme de photons; si un électron libre de la bande de conduction venant prendre la place laissée vacante par 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 de l'état initial et de l'état final sous la forme :  $h\nu = W_c - W_v$

Tous les électrons injectés dans une jonction ne donnent pas naissance à des photons; le rapport entre le nombre de photons émis et celui des électrons injectés dans la jonction est nommé : rendement quantique théorique de la jonction.



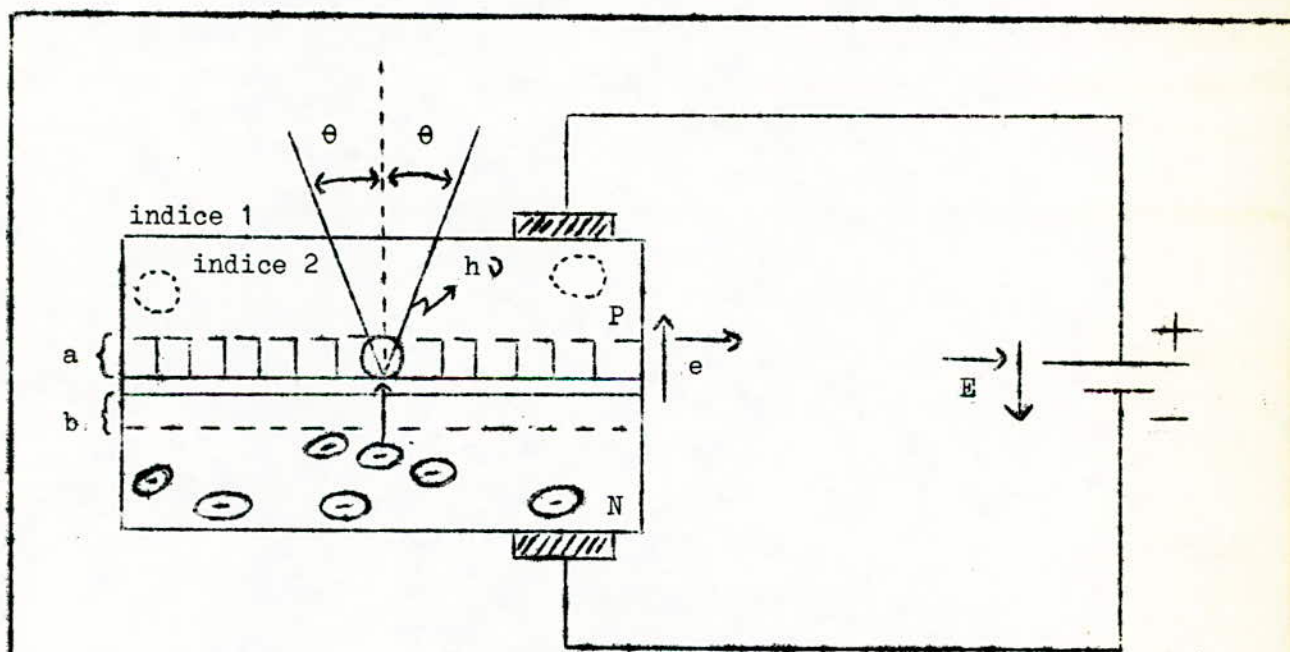
De même, tous les photons engendrés par les recombinaisons de porteurs ne sont pas rayonnés vers l'extérieur. Une grande partie de ces photons se voit absorbée par des atomes au cours de leur parcours à l'intérieur du cristal. D'autres, qui atteignent la surface de séparation entre le cristal semi-conducteur et l'air selon un angle supérieur à l'angle critique, se trouvent emprisonnés dans le cristal à cause du phénomène de réflexion, et finissent par se faire absorber

à leur tour (voire figure **E 1** )

On appelle rendement quantique externe ( $\eta$  externe) : le rapport du nombre de photons réellement émis vers l'extérieur à celui des électrons qui leur ont donné naissance. C'est en fait ce rendement qui intéresse l'utilisateur.

Mais ce dernier étant généralement peu familier avec les notions de nombre de photons et de nombre d'électrons injectés; les constructeurs expriment le nombre quantique des diodes électroluminescentes par le rapport de la puissance lumineuse émise, au courant qui lui a donné naissance : soit en watts par ampère ( $W/A$ ) ou ( $MW/A$ )

Shématiquement, la diode électroluminescente ou photoémissive est considérée, comme le montre la figure **E 2** . La partie essentielle est la "puce" du semi-conducteur constituant la jonction P.N. émettrice. Le matériau dépend de la longueur d'onde d'émission (voir tableau ). La géométrie de la puce a une incidence importante sur le rendement de sortie du rayonnement créé au niveau de la jonction. En effet, l'indice de réfraction "N" des matériaux utilisés est élevé ( $N = 3,6$  pour le Ga.s). L'angle limite  $\theta$  est petit et, dans une structure plane, une faible fraction de la lumière émise de façon isotrope parvient à s'échapper du semi conducteur.



- a : zone de recombinaison
- b : zone de déplétion
- $\vec{e}$  : champ électrique interne
- $\vec{E}$  : champ électrique externe

Fig E 2

Description schématique et fonctionnement  
de la L. E. D



TABLEAU DES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX  
ELECTROLUMINESCENTS

MATERIAUX	LONGUEUR D'ONDE (um)	COULEUR	W <sub>bi</sub> MOYEN (e.v)	RENDEMENT MAX. $\eta_q$ (%)
Ge	1,88	I.R.	0,66	très faible
Si	1,14	I.R.	1,09	non utilisé
Ga As	0,95	I.R.	1,30	20
Ga As (zn)	0,90	I.R.	1,37	5
Ga Ap As	0,68	Rouge	1,82	5
Ga As P	0,64	Rouge	1,93	1
Ga As P (N)	0,58	Jaune	2,13	1
Ga P	0,54	Vert	2,30	1
Ga N	0,48	Bleu	2,58	à l'étude

#### IV. 2.2. CARACTERISATION DES PHOTO EMETTEURS

Les transducteurs électro-optiques que constituent les photo-émetteurs peuvent être caractérisés sur trois points :

- Paramètres optiques : Ce sont les grandeurs de sortie
- Paramètres électriques : Ce sont les grandeurs d'entrée
- Paramètres de transfert.

Les grandeurs de sortie relèvent de la photométrie pour laquelle il existe deux systèmes d'unité :

- Les unités énergétiques utilisables quelque soit la longueur d'onde et où la puissance du rayonnement est mesurée en Watts.
- Les unités lumineuses qui n'ont de signification que dans le spectre visible.

Les grandeurs d'entrée sont des grandeurs électriques familières. L'un des principaux paramètres de transfert est le rendement de conversion qui peut être exprimé par :

- Le rendement énergétique :  $\eta_e = \frac{W}{P} = \frac{\text{Flux de rayonnement en watts}}{\text{Puissance électrique appliquée}}$
- Le rendement quantique :  $\eta_q = \frac{\text{photons émis}}{\text{électrons injectés}} = \frac{N}{n}$

Or chaque photon transporte une énergie  $W = h\nu$  (N est le nombre de photons émis par seconde)

D'autre part, un courant I transporte n électrons de charge "e" par seconde :  $I = n \cdot e = \frac{P}{V}$

et puisque par définition :  $\eta_q = \frac{N}{n}$

on obtient alors :  $\eta_q = \frac{\Phi}{h\nu} \cdot \frac{eV}{P} = \eta_e \frac{eV}{h\nu}$

Ces rendements ne sont généralement constants que dans des zones d'utilisation limitée. En particulier le rendement énergétique dépend de la température : Il décroît quand celle-ci augmente.

#### IV. 3 PHOTO RECEPTEURS :

Un récepteur est un détecteur de rayonnement capable de traduire l'énergie de ce rayonnement en une information, le plus souvent sous forme électrique.

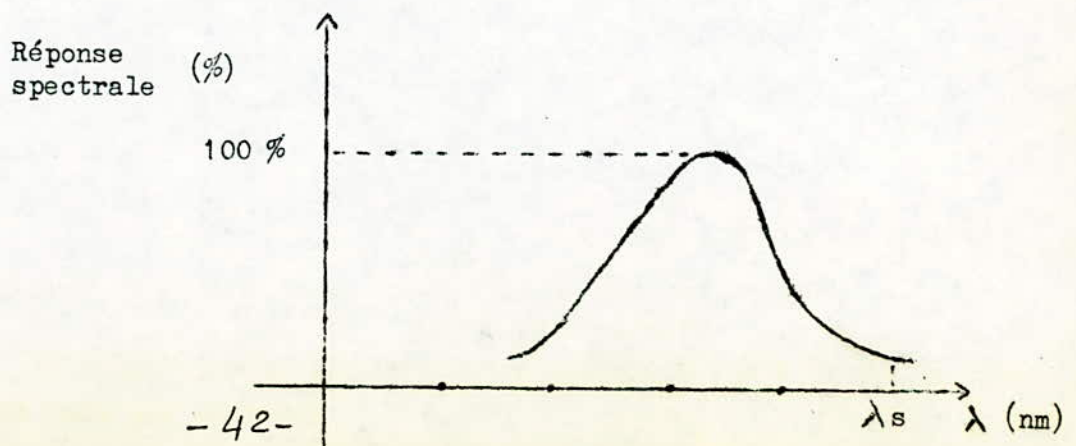
##### IV. 3.1 CARACTERISTIQUES DES PHOTORECEPTEURS

Les caractéristiques d'un photo-récepteur sont :

a) Courbe de réponse spectrale : Les éléments photo-sensibles à jonction les plus utilisés sont généralement au silicium. La courbe de réponse spectrale nous renseigne sur la sensibilité relative aux radiations de diverses longueurs d'onde, elle présente ainsi un pic situé vers 800 à 900 nm (fig E3), le reste est résumé dans le tableau suivant :

MATERIAU DE BASE	LONGUEUR D'ONDE MAX. (nm)	SEUIL DE COULEUR	RENDEMENT QUANTITE MAX. (%)
Zn S	350	U. V.	50
Si	1000	I. R.	50
Ge	1800	I. R.	50
In As	3500	I. R.	50

Exemple de courbe de réponse spectrale : Fig E3





Remarques : Il existe une longueur d'onde limite ( $\lambda_s$ ) ou de seuil au-delà de laquelle aucun effet photo-électrique n'est possible, et pour les faibles longueurs d'onde, la réponse diminue : ceci est dû au fait que le nombre d'électrons excités dans la substance photo-sensible diminue.

b) Les grandeurs d'entrée :

Les grandeurs d'entrée des transducteurs opto-électriques relèvent de la photométrie de la même manière que les grandeurs de sortie des transducteurs électro-optiques. Ces grandeurs sont le flux lumineux (en lumen) ou l'éclairement (en Lux) pour les unités lumineuses, et la puissance de rayonnement (en Watts) ou le flux de rayonnement (en Watts/m<sup>2</sup>) pour les unités énergétiques.

Il est nécessaire de connaître la surface efficace du photo-conducteur lorsque les deux types de paramètres ne sont pas donnés simultanément.

c) Les grandeurs de sortie :

Ce sont les paramètres électriques classiques des composants assurant la détection et sont spécifiques à chaque catégorie.

d) La sensibilité :

C'est un des paramètres de transfert les plus usuels et donne le rapport entre la grandeur électrique de sortie et la grandeur optique d'entrée. Ainsi pour les photo-diodes normalement polarisées en inverse, la sensibilité est exprimée en ampères par unité d'entrée (W, W/m<sup>2</sup>, Ix) si l'unité d'entrée est le flux de radiation incident en watts, la sensibilité sera :

$$S = \frac{IP}{\Phi}$$

On définit, également, un rendement quantique par un calcul analogue à celui utilisé dans le paragraphe IV.2.2.

$$\eta_q = \frac{h \cdot \nu}{e} \cdot S$$

Le courant dans la photo-diode s'exprime en fonction du flux de radiation par :

$$I_{inv} = I_0 + S \Phi$$

e) La réponse en fréquence du photo-récepteur

Elle dépend le plus souvent du circuit électrique associé. Ainsi pour les photo-diodes polarisées en inverse, elle est limitée par la constante  $R_c C_t$  (avec  $R_c$  : résistance de charge et  $C_t$  : capacité de transition de la diode)

. En utilisant une diode PIN dont la capacité de transition est très faible ( $C_t < 1\text{pF}$ ) on peut améliorer la réponse en fréquence.

Le bruit de fond limite les performances ultimes d'un photo-récepteur

Ainsi pour les photo-diodes normalement polarisées en inverse, la sensibilité

est exprimée en ampères par unité d'entrée (W, W/m<sup>2</sup>, Ix) si l'unité d'entrée est

le flux de radiation incident en watts, la sensibilité sera :

$$S = \frac{IP}{\Phi}$$

f) Le courant d'obscurité :

C'est une caractéristique propre au semi-conducteur, faible pour le silicium (quelques centaines de pA à 25°C) plus élevé pour le germanium (quelques centaines de pA). Il correspond au courant résiduel dans la jonction en absence de tout rayonnement.

g) La vitesse de rayonnement :

La vitesse de rayonnement à une impulsion lumineuse à front raide (voire figure E4) détermine la fréquence maximale d'emploi en lumière modulée et est essentiellement fonction du type de détecteur et de sa géométrie.

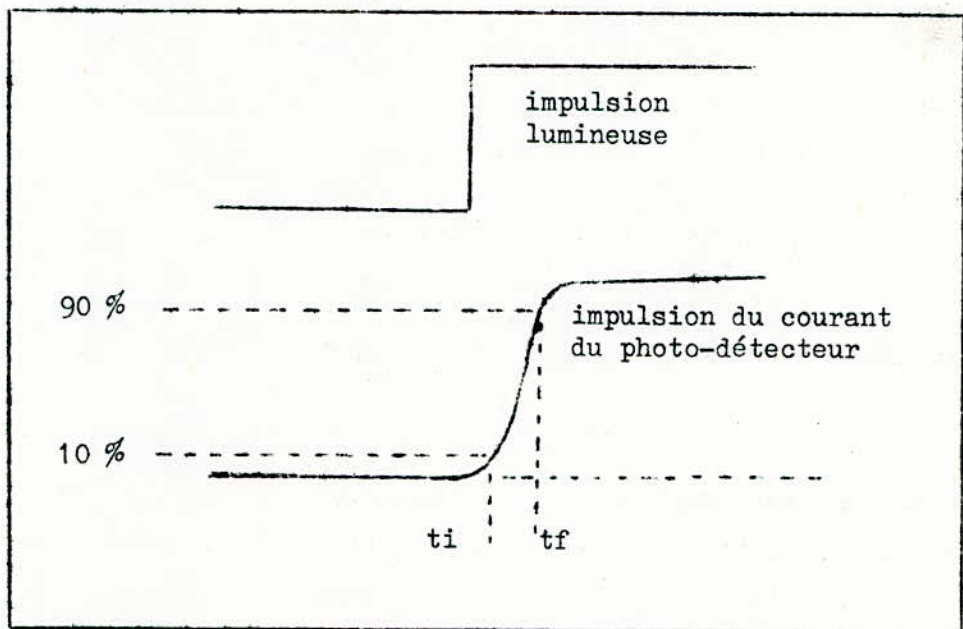


Fig E4 - La réponse d'un photo-détecteur à une impulsion à front raide n'est pas immédiate.



-F-

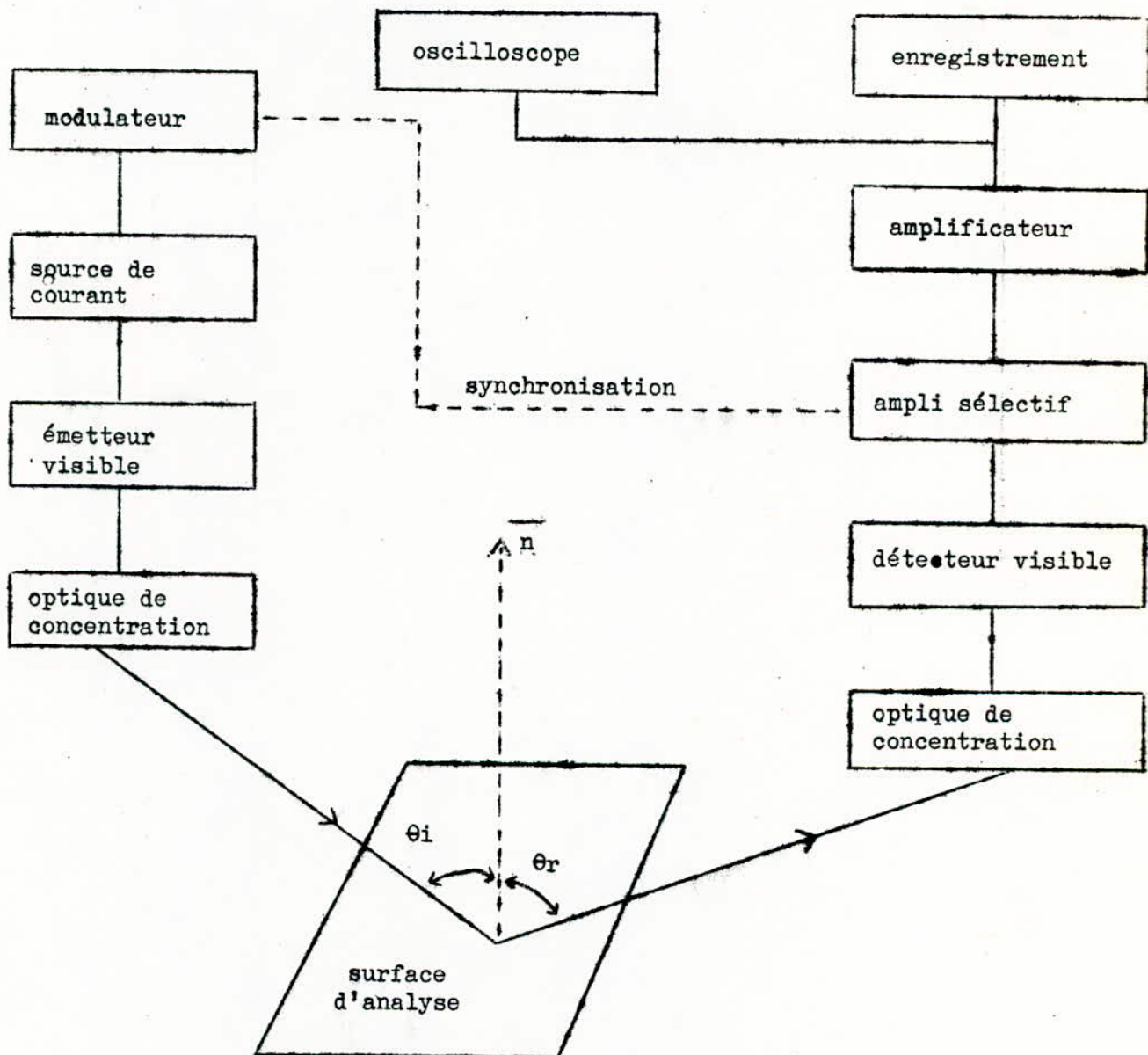
MATERIELS UTILISES

- F -

F1 ETUDE DE LA CHAÎNE DE MESURE TRAVAILLANT DANS LE  
CANAL 4 DU LANDSAT  $\left[ 500 \frac{0}{0} 600 \right]$  NM

- La chaîne de mesure  $\left[ 500 \frac{0}{0} 600 \right]$  nm se compose de :
- un émetteur visible
  - un récepteur visible.

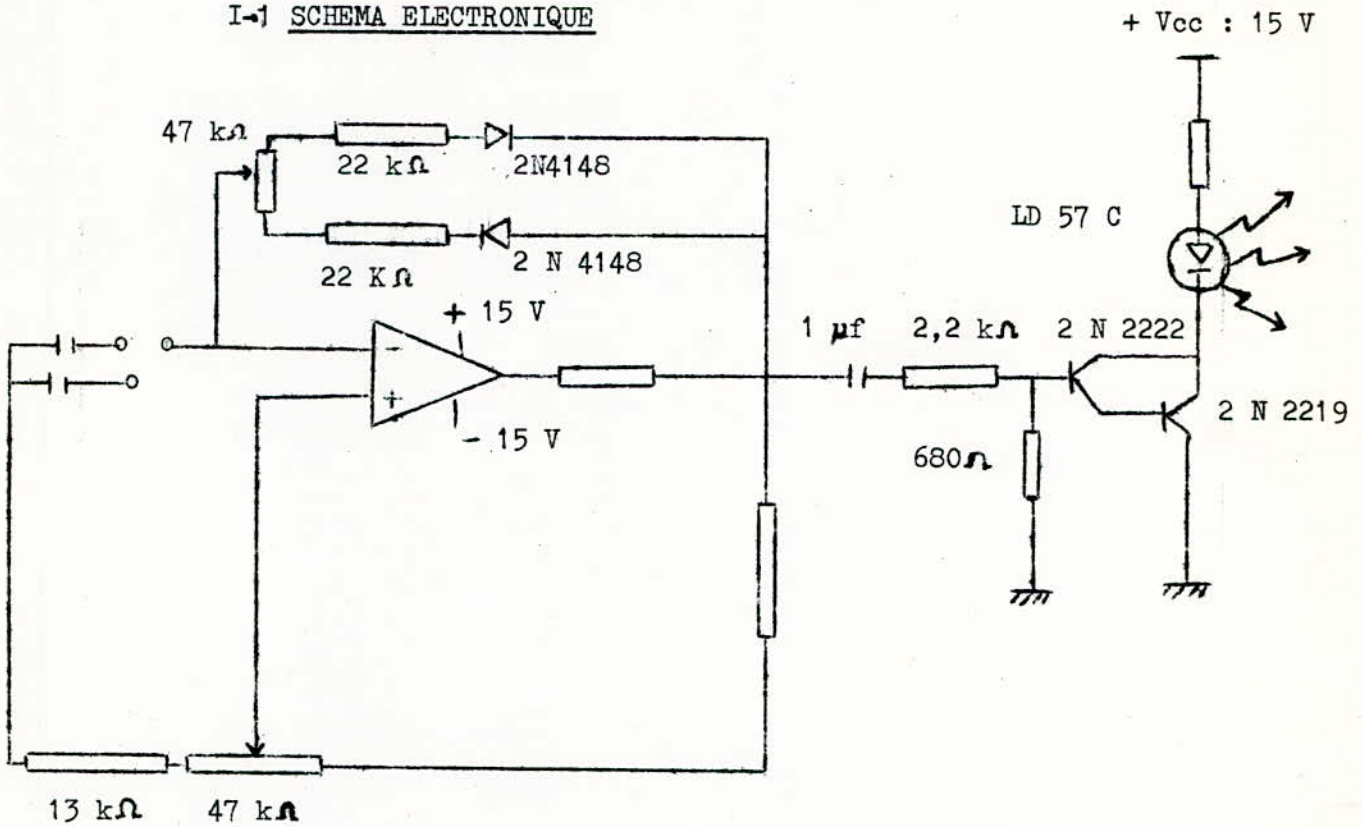
LE SCHEMA SYNOPTIQUE EST LE SUIVANT :



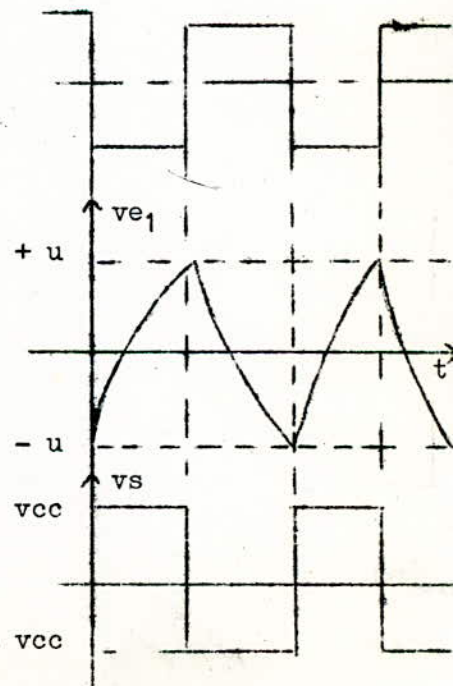
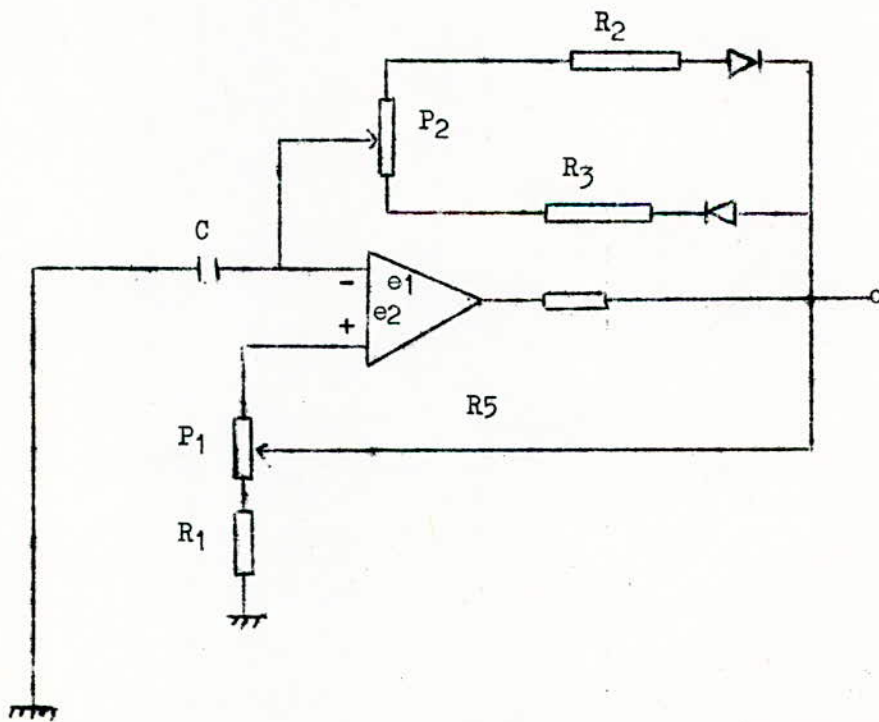


I - EMETTEUR VISIBLE :

I-1 SCHEMA ELECTRONIQUE



I.1-1 MODULATEUR



### I. 1.1.a - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

On applique une tension  $v_{e1}$  à l'entrée  $e_1$  qui sera variable dans le temps et dont les crêtes positives et négatives dépassent les seuils du trigger  $v_{e2}$ .  
 à l'instant  $t_0$  :  $v_{e1} = u$  :  $v_s$  est au niveau haut soit  $+v_{cc}$

$$u = \frac{v_{cc} \cdot R'_1}{R'_1 \cdot R'_5} \quad \text{avec} \quad R'_1 = R_1 + a \cdot P_1$$

$$R'_5 = R_5 + b \cdot P_1$$

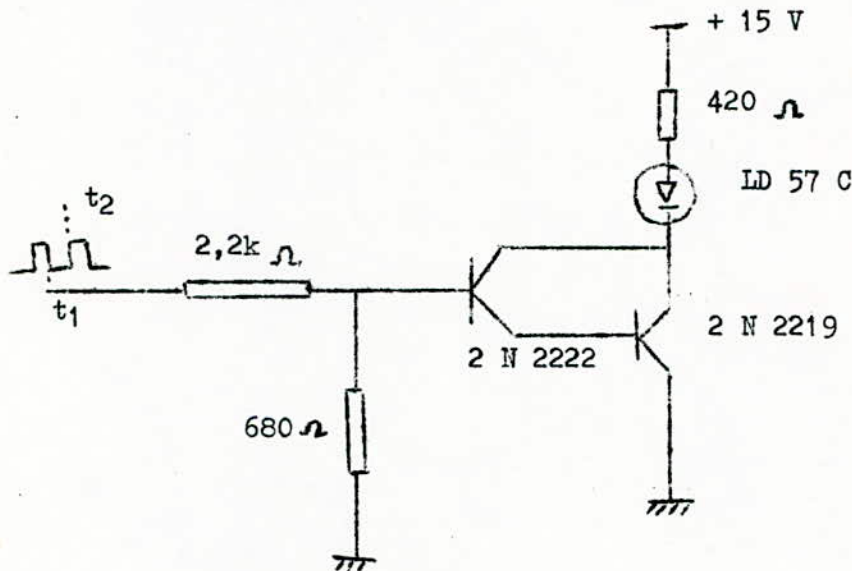
$$\text{et} \quad \begin{cases} a, b = 1 \\ a + b = 1 \end{cases}$$

Lorsque  $v_{e1}$  atteint " $+u$ " puis dépasse ce seuil, une tension différentielle positive est appliquée entre l'entrée inverseuse et non inverseuse de l'amplificateur opérationnel; la sortie  $v_s$  bascule vers " $-v_{cc}$ " : niveau bas. Ce qui entraîne à l'instant " $t_1$ " le basculement de  $v_{e1}$  vers " $-u$ "

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

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

### I. 1.1.b. COMMANDE EN COURANT DE LA DIODE LD 57 C



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

À l'instant  $t_1$ , le transistor est bloqué, le potentiel du collecteur est égal à celui de l'alimentation :  $v_{cc}$ , aucun courant ne passe à travers la diode.

À l'instant  $t_2$ , le transistor darlington est conducteur, le potentiel collecteur va diminuer et un courant circulera dans la diode montée en direct, d'où émission de lumière modulée.

- Choix de la résistance de polarisation de la diode :  $R_7$

On s'est fixé un courant d'alimentation de la diode à 30 mA d'où le choix de  $R_7$  afin de limiter ce courant, de plus la résistance  $R_7$  a un effet de compensation thermique. La "LD 57 C" présente une résistance dynamique faible; une variation



de température entraîne une variation de "v'D" (voir effets de la température sur les diodes) donc une variation considérable de  $I_D$  : instabilité du flux lumineux puisque  $V_D = R_D \cdot I_D$  ;  $I_D = \frac{V_D}{R_D}$

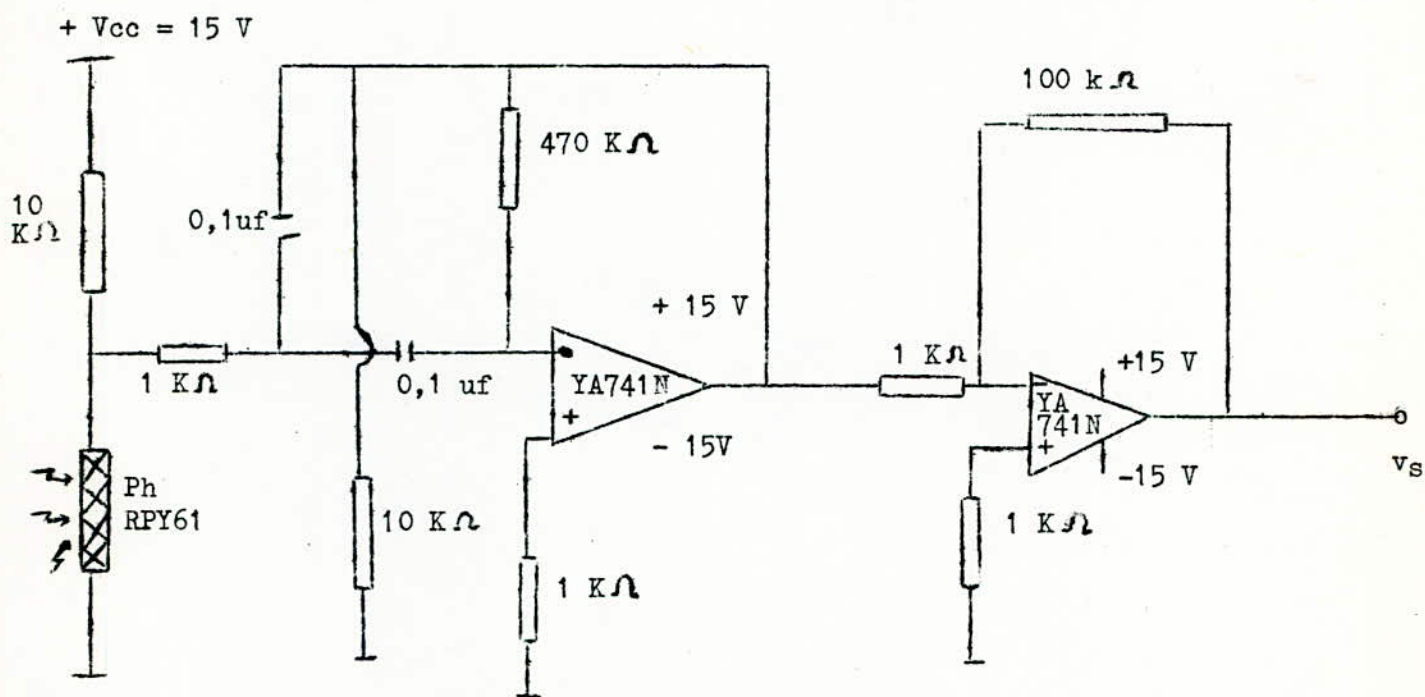
avec  $R_7$  on aura :  $I_D = \frac{V_{cc} - V_D}{R_7}$  (transistor saturé)

si  $V_D$  varie,  $I_D$  variera dans des proportions moindres que si  $R_7$  n'existait pas. Plus  $R_7$  est grand, plus  $I_D$  est petit

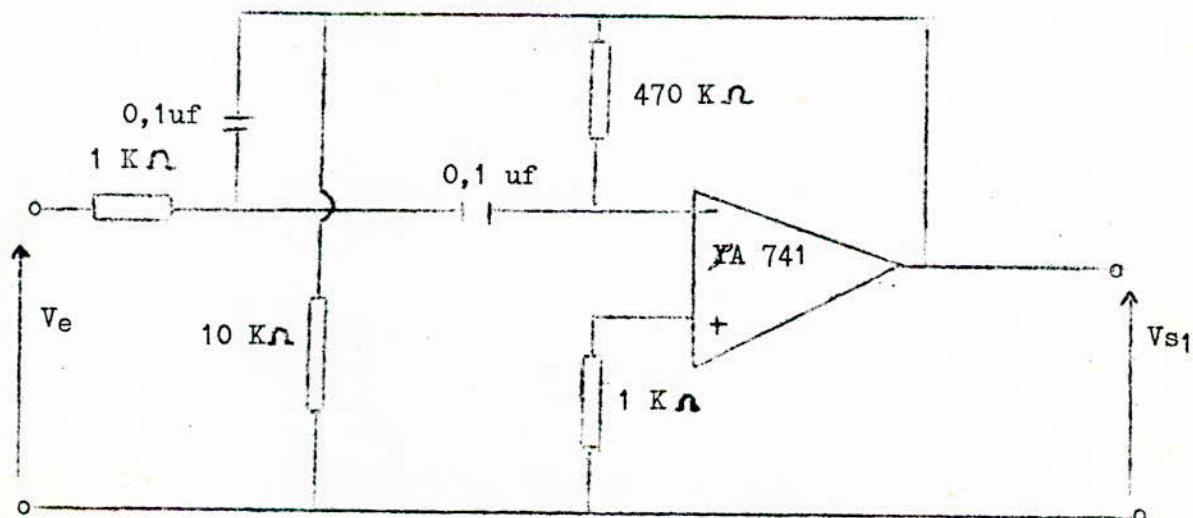
$$R_7 = \frac{V_{cc} - V_D}{I_D} \quad R_7 = 420 \Omega$$

## II. RECEPTEUR VISIBLE

### II.1. SCHEMA ELECTRONIQUE



#### II.1.1. FILTRE PASSE BANDE



$$f_0 = 75 \text{ Hz}$$

$$\text{Coefficient de qualité : } Q = 10$$

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

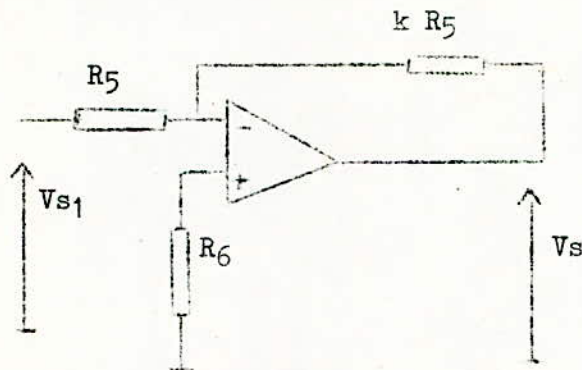
$$\text{Fréquences de coupure : } f_{e1} = 71 \text{ Hz}$$

$$f_{e2} = 79 \text{ Hz}$$

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

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

### II.1.2 AMPLIFICATION :



$$R_s = 1 \text{ K}\Omega$$

$$K = 100$$

Résistance d'entrée :  $R_5 = R_C = 1 \text{ K}\Omega$

Résistance de sortie :  $R_5 \approx 0$  : pratiquement  $R_6 = 6 \Omega$

Bande passante :

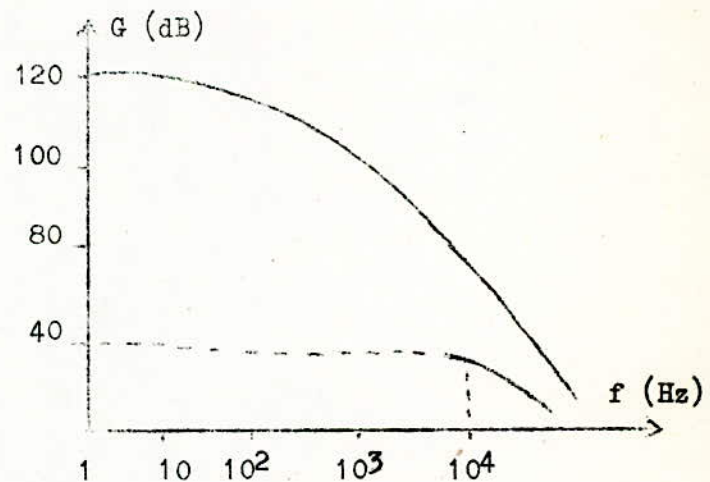
A vide on a une bande passante du  $\mu\text{A 741 N}$  de 10 KHz, mais notre ampli possède une contre réaction, la bande passante va augmenter et son gain va diminuer.

$$\text{Gain} = \frac{V_s}{V_c} = \frac{-K R_5}{R_5} = -K$$

$$|G| = K = 100$$

$$G_{dB} = 20 \log |G| = 40 \text{ dB}$$

d'où la bande passante : 10 KHz





## F II ETUDE ET REALISATION DE LA CHAÎNE DE MESURE.

D'une manière générale, les détecteurs à réflexion servent à mettre en évidence une présence à une distance donnée d'un point fixe. Cette distance peut varier de quelques centimètres à quelques mètres selon les caractéristiques de l'installation et de l'objet à détecter, entre autres :

- Puissance d'émission
- Gain des amplificateurs de réception
- Grossissement des optiques d'émission et de réception (s'il y en a).
- Couleur ou pouvoir réfléchissant de l'objet à détecter.

### I. Description et principe de fonctionnement de la chaîne de mesure :

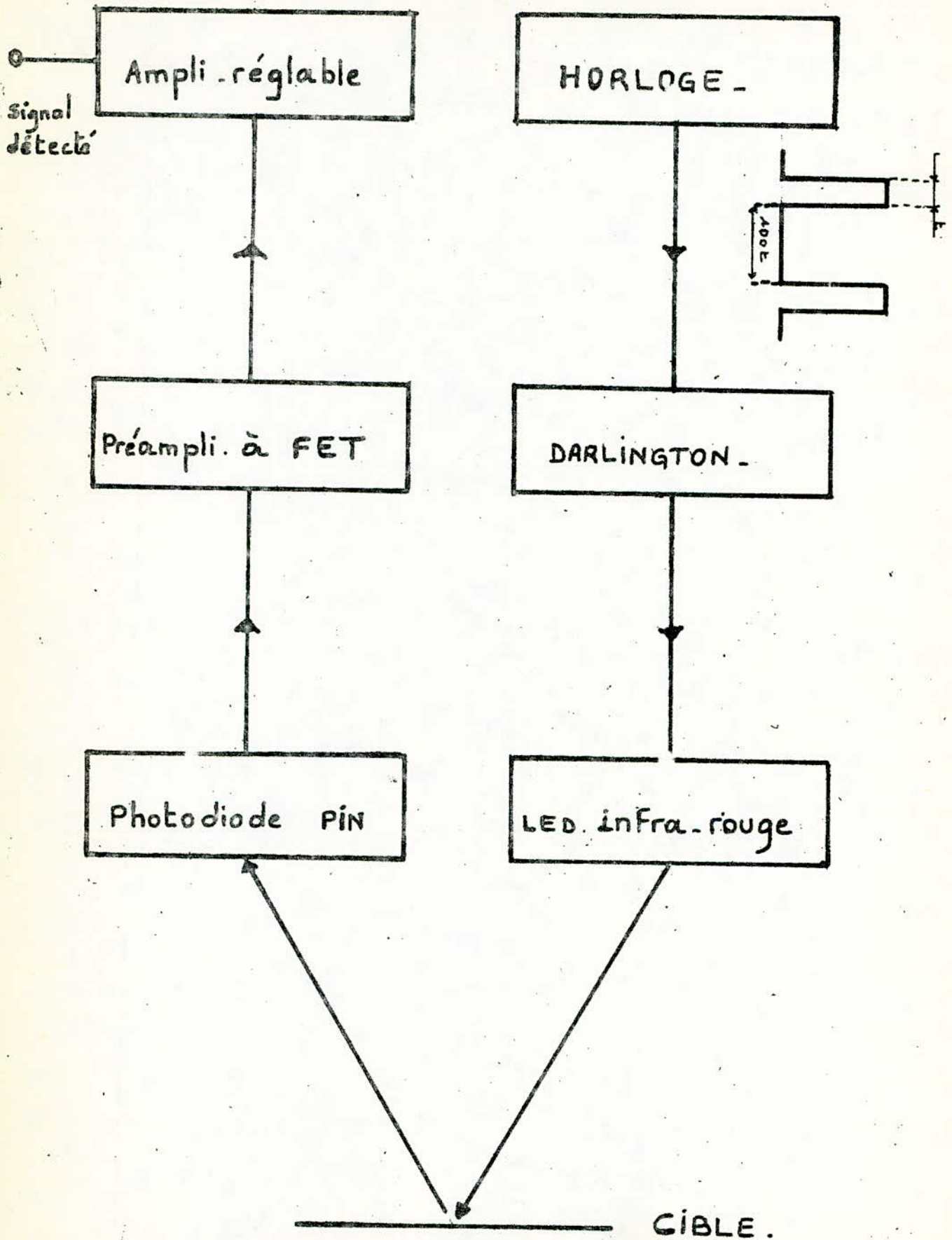
la chaîne de détection comporte essentiellement un émetteur et un récepteur d'impulsions infra-rouges.

L'émetteur délivre une énergie comprise principalement entre  $[985-40] \text{ nm}$  et  $[985+40] \text{ nm}$ , cette énergie est envoyée par un système optique sur la surface de l'objet à analyser et l'énergie réfléchie est détectée par un système de détection suivi d'un système de traitement électronique.

En effet, si un objet est placé comme cible, il se trouvera illuminé par l'émetteur et diffusera une partie de cette énergie vers le récepteur qui, à son tour, délivrera un signal à fréquence audible (environ 1 KHz). Ce signal, appliqué à un ampli de puissance, pourra être visualisé à l'oscilloscope ou mesuré directement à l'aide d'un millivoltmètre.

Le schéma synoptique de la chaîne de mesure et le cheminement du signal sont représentés sur la fig 4.

Fig 1 - Synoptique de la chaîne de mesure .





## II. Émetteur infra-rouge

II.1. Schéma général: le schéma général de l'émetteur est donné par la Fig 2.

Caractéristiques des transistors:

	P	$I_c$	$V_{ce}$	$V_{EB}$	$\beta_{min}$	$\beta_{max}$
2N 2222	500mW	800mA	30V	5V	100	300
BD 136	12W	1A	45V	5V	40	160

### II.2. Description de l'émetteur

Deux portes NAND CMOS (1/2 CD 4011) sont montées en multi-vibrateur astable servant d'horloge au système. La résistance déterminant la fréquence de fonctionnement, par le contrôle de la charge du condensateur  $C_1$ , est acindée en deux fractions différant l'une de l'autre d'un rapport 1000. Une diode permet à l'une des deux parties d'agir à la charge et l'autre à la décharge. Il résulte de ceci que le rapport cyclique du signal d'horloge vaut 1/1000. La diode d'émission étant commandée par un DARLINGTON piloté directement par ce signal d'horloge, la durée  $t$  des impulsions émises sera mille fois inférieure à leur période de répétition. Cela a pour conséquence qu'il devient possible d'émettre des impulsions de très forte puissance donc de portée notable, sans entraîner une consommation électrique importante, ni un échauffement dangereux pour la diode électroluminescente (LED) CRY 99. Le courant de pointe dans celle-ci est fourni par le condensateur  $C_2$ , qui se charge entre les impulsions à travers la résistance  $R_6$ .

la résistance  $R_5$  limite ce courant de pointe à la valeur limite supportable par la LED, ceci explique le choix de  $T_2$  (transistor de puissance) pour commander cette dernière.

- 53 -

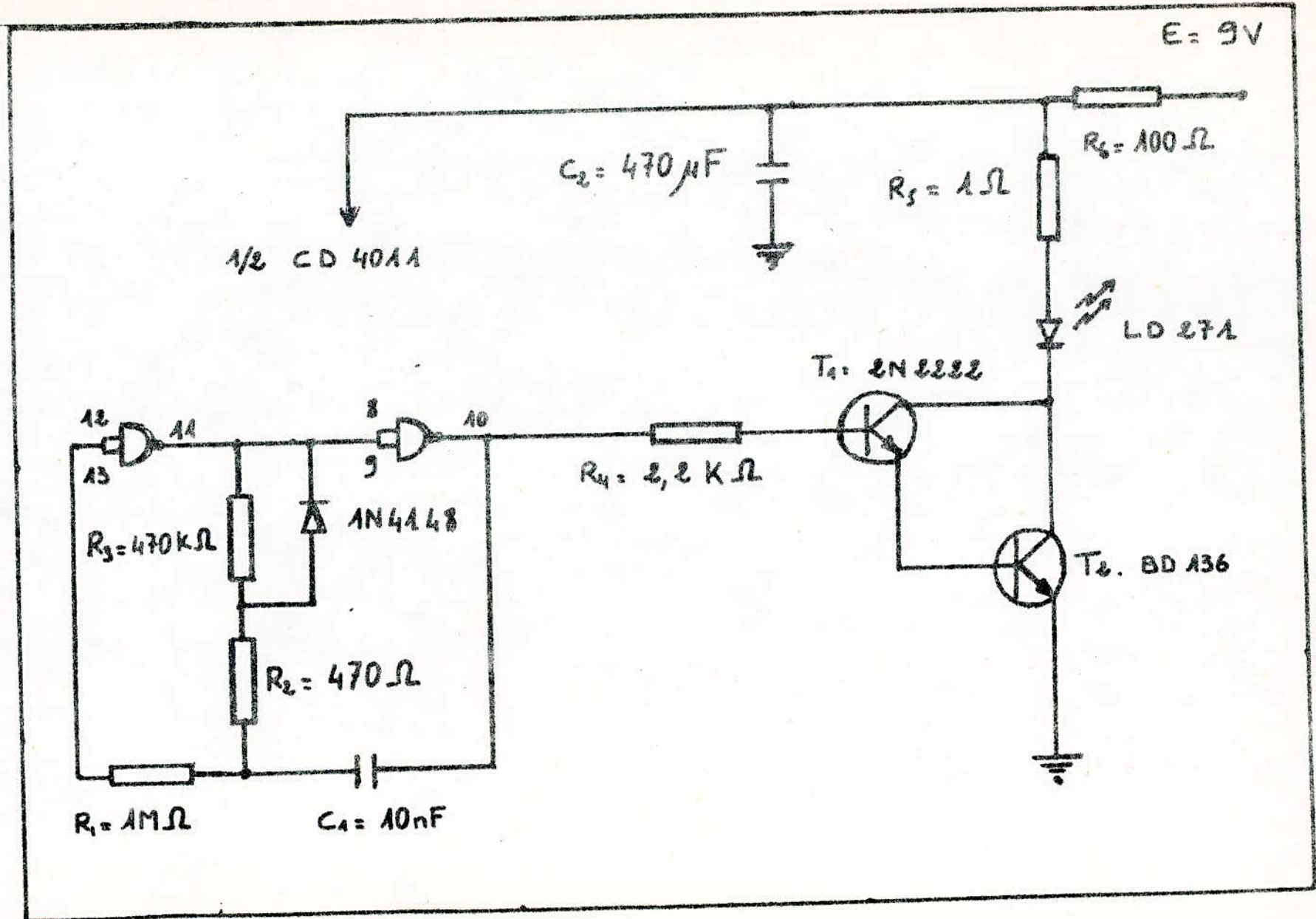


Fig 2 - Emetteur infra-rouge -



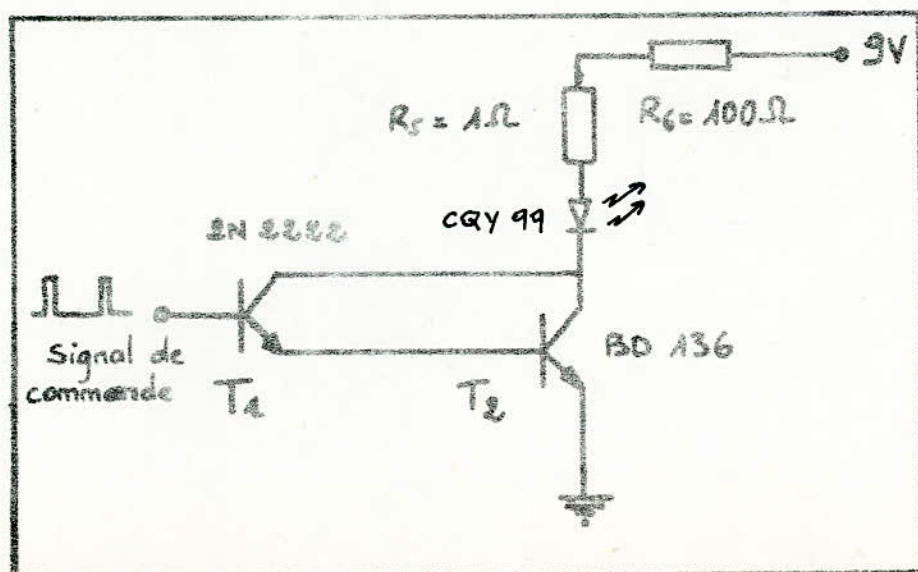
Bien que la puissance moyenne dissipée soit négligeable, le courant de pointe serait destructif pour le transistor  $T_1$  (2N 2222).

### 1.3. Polarisation - Stabilisation.

L'émetteur infra-rouge est constitué essentiellement d'une diode électroluminescente (LED) CQY 99 dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

Symbole	Signification	Valeur	Unité
$V_R$	tension de blocage	5	V
$I_F$	Courant direct	150	mA
$P_e$	Puissance dissipée	210	mW
$\lambda_{max}$	Longueur d'onde maximale	925	nm
$\Delta\lambda$	Bande spectrale	$\pm 40$	nm
$\theta$	Demi-angle	60	dégrads
$V_F$	tension statique directe ( $I_F = 100\text{mA}$ )	1,7	V
$I_e$	Intensité de rayonnement ( $I_F = 100\text{mA}$ )	7	mW/sr
$T_K$	Coefficient de variation de $V_F$ en fct de $T^\circ$	1,5	mV/°K

Cette diode est commandée en courant par un DARLINGTON comme le montre le schéma suivant :



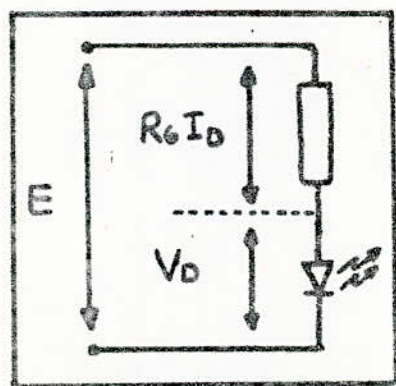
La diode émettra à partir du basculement du transistor DARLINGTON en saturé - bloqué.

Pendant le blocage, le potentiel du collecteur de  $T_2$  est égal à celui de la tension d'alimentation, ce qui fait qu'aucun courant ne passe à travers la diode; pendant la saturation le potentiel du collecteur de  $T_2$  est à la masse, ce dernier devient conducteur et le courant de son collecteur alimentera la diode d'où émission de faisceaux modulés.

Choix de la résistance  $R_6$  : si on veut que l'énergie lumineuse émise par la diode soit la plus stable possible, il est indispensable que le courant qui la traverse soit lui-même très stable, car nous savons que la LED (cay 99) présente une résistance dynamique très faible; une variation de température entraîne une variation de  $V_D$  (tension directe) donc une variation considérable de  $I_D$  (courant direct) d'où instabilité du flux lumineux.

On s'est fixé un courant d'alimentation de la diode à 80 mA, le calcul consiste donc à trouver la valeur minimale que devra prendre la résistance  $R_6$  afin de limiter celui-ci.

Pour cela, reprenons le schéma précédent sous une forme plus simple :



$$\text{Puisque } V_D = R_D I_D \quad ; \quad I_D = \frac{V_D}{R_D}$$

En tenant compte de la résistance  $R_6$

$$I_D = \frac{E - V_D}{R_6} \quad (\text{transistor saturé})$$

Plus  $R_6$  est grande, Plus  $I_D$  est petit.

$$E = 9V \quad (\text{tension d'alimentation})$$

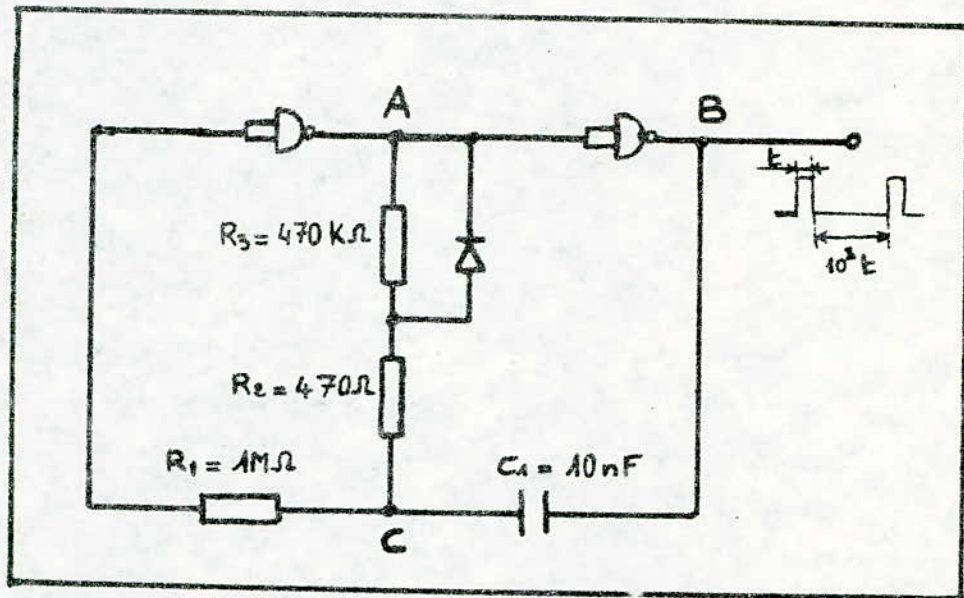
$V_D = 1,4V$  (tension directe de la diode correspondant à  $I_D = 80mA$ )

On trouve  $R_6 = 95 \Omega$  ; On prendra  $R_6 = 100 \Omega$ .



Comme la plus grande partie de l'énergie fournie par la source est dissipée sous forme de chaleur dans la résistance, il est plus rentable d'alimenter la diode à partir d'une source de courant.

#### 1.4. Horloge de commande:



Deux portes NAND CMOS sont montées en multivibrateur astable servant d'horloge au système. La résistance déterminant la fréquence de fonctionnement, par le contrôle de la charge de  $C_1$ , est scindée en deux fractions différant l'une de l'autre d'un rapport 1000. Comme on a une diode (1N4148) qui permet à l'une des deux parties d'agir à la charge et l'autre à la décharge, il en résulte que le rapport cyclique du signal d'horloge vaut  $1/1000$ . Supposons qu'on a l'état logique '0' au point A, ce qui correspond à l'état logique '1' au point B, on a alors circulation d'un courant, et le condensateur  $C_1$  se chargera à travers la résistance  $R_2$  jusqu'à ce que la tension à ses bornes sera voisine de la tension d'alimentation; ainsi on aura l'état logique '0' au point C, d'où basculement de l'état logique



du point A entraînant le basculement de l'état logique du point B : on a alors inversement de la polarité de  $C_1$  qui va se décharger à travers la résistance  $(R_2 + R_3) \# R_3$  et le cycle reprendra... On a donc une charge très brève et une décharge très lente ce qui explique la valeur du rapport cyclique de l'horloge.

$$F = \frac{1}{1,4 RC}$$

### III. Récepteur infra-rouge :

II. 1. Schéma général = le schéma général du récepteur est donné par la fig 3.

### III. 2. Description du récepteur :

Il est constitué essentiellement de trois parties :

- Une diode PIN (BPW 34)
- Un préampli à transistor à effet de champ (FET 2N3819)
- Un ampli opérationnel (TBA 221).

Caractéristiques principales de la diode BPW 34. :

Symbole	Signification	Valeur	Unité
$V_R$	tension inverse (blocage)	32	V
$\lambda_{max}$	Longueur d'onde maximale	850	nm
S	Sensibilité spectrale ( $\lambda = 850nm$ )	0,6	A/W
P	Puissance dissipée	150	mW
$(t_r, t_f)$	temps de montée ( $V_R = 10V, \lambda = 825nm$ )	50	nS
$I_R$	Courant d'obscurité ( $V_R = 10V$ )	3	nA
$C_j$	Capacité de jonction ( $f = 1MHz$ )	72	PF



-58-

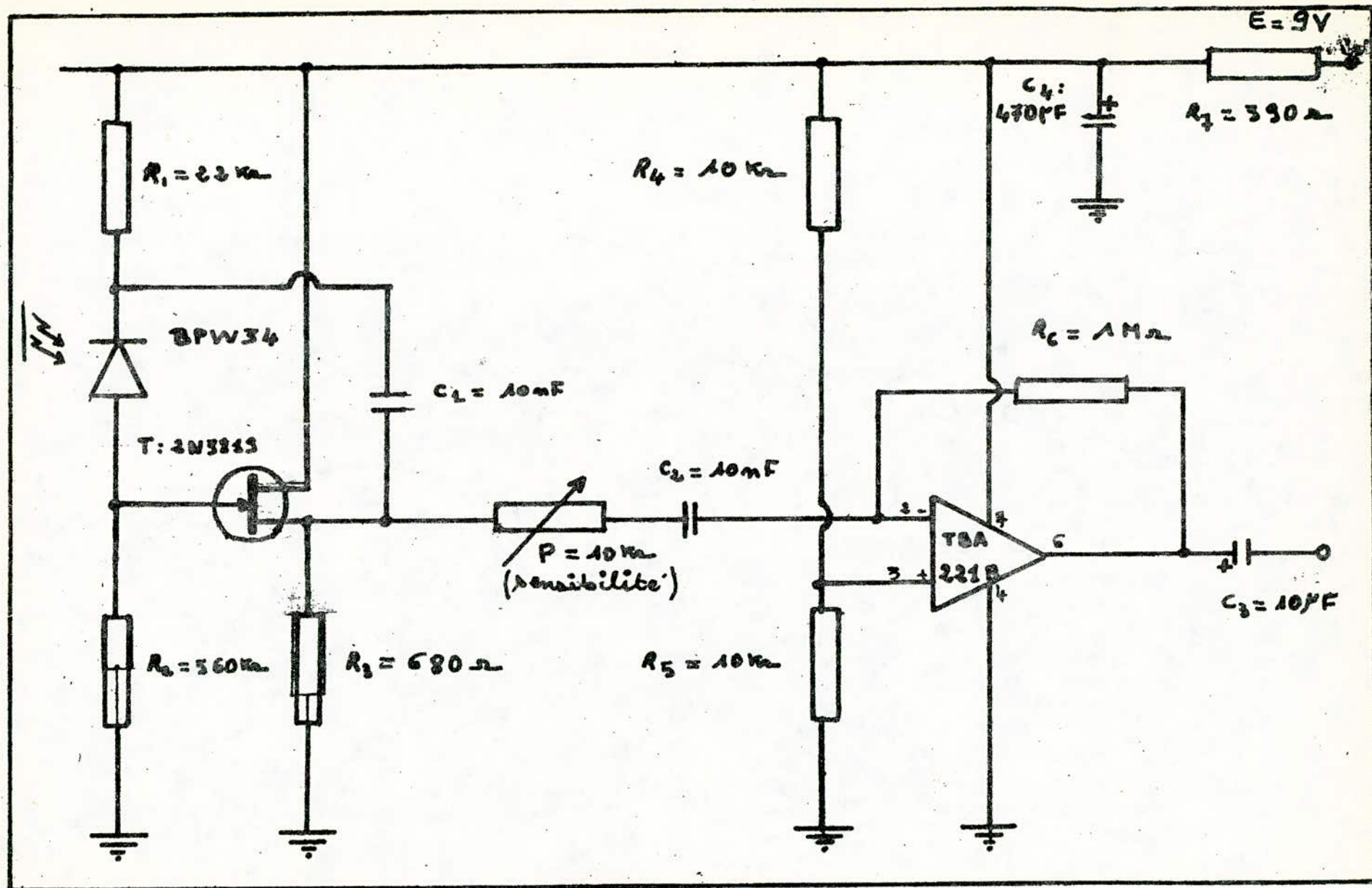
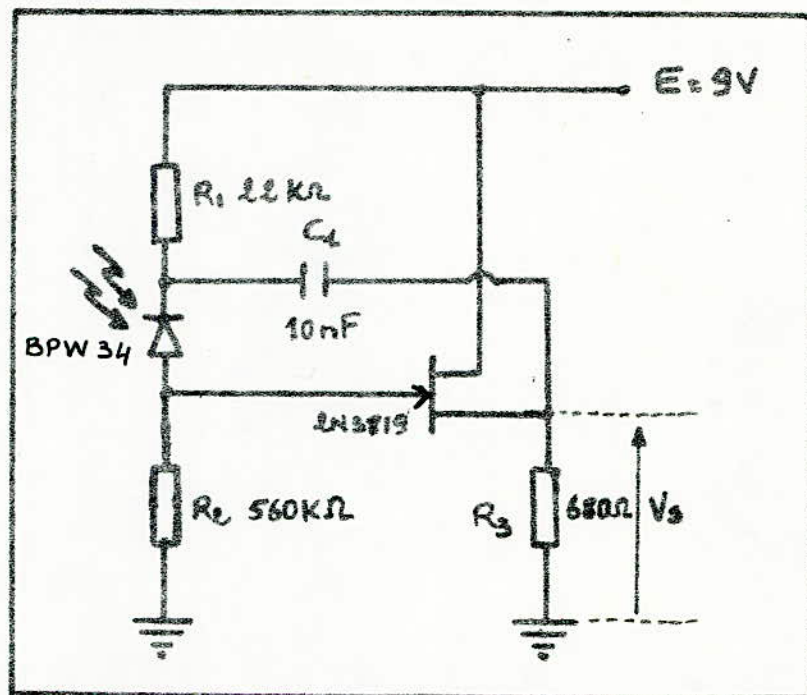


Fig 3 - Récepteur infra-rouge -

La photodiode PIN, munie d'un filtre ne laissant passer que les rayonnements infra-rouges, est montée sur la grille du transistor FET jouant le rôle de préampli à haute impédance d'entrée (montage source-dyne). L'ampli opérationnel amène le signal à un niveau de l'ordre du volt efficace facile à utiliser. Le potentiomètre ajustable de  $10K\Omega$  ( $R_4$ ) permet de régler cette amplification.

### III.3 Préamplificateur :



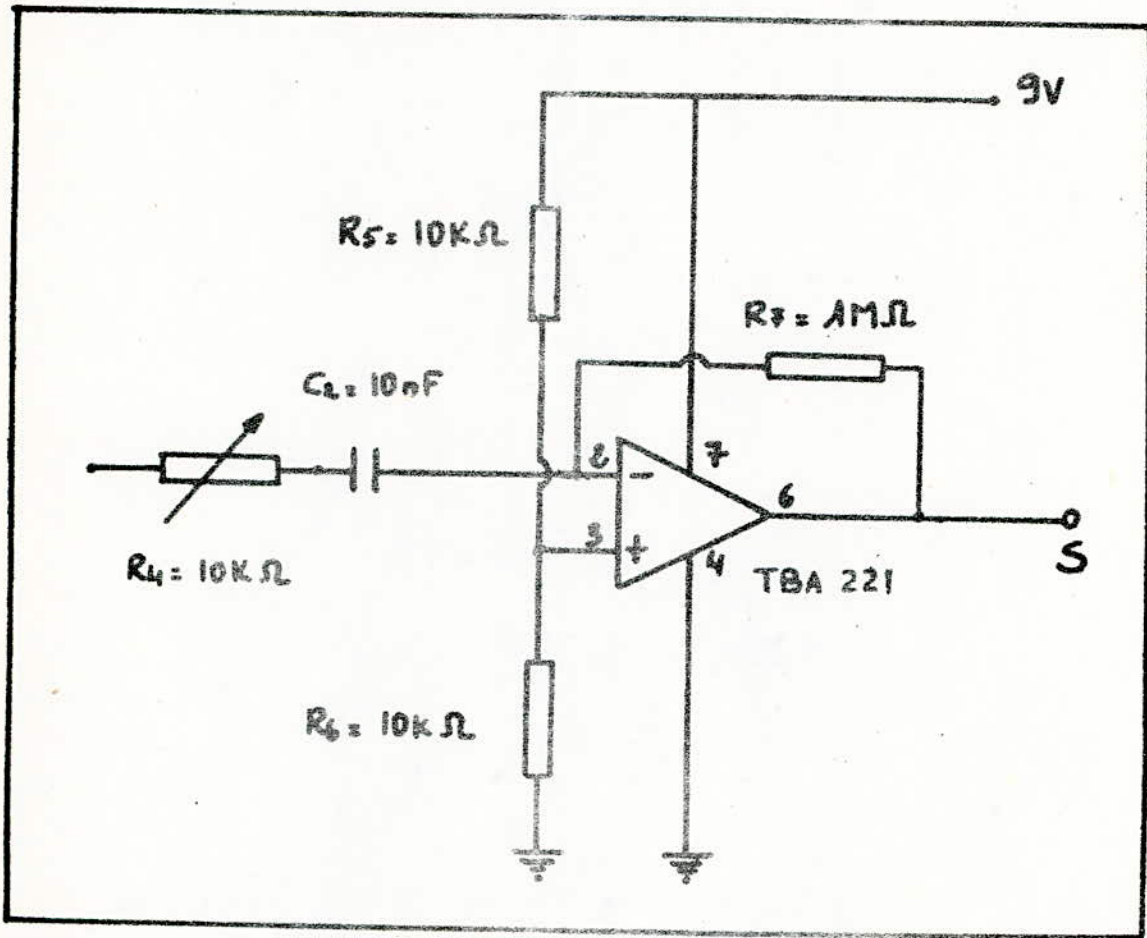
Caractéristiques du transistor FET 2N3819.

PC.	$V_{ds}$ .	$BV_{dss}$ .	$BV_{gss}$ .	$g_m$ (min).	$g_m$ (max).	
2N3819.	360mW	15V	25V.	25V.	3,5 m	6,5 m.

Le FET est monté en source-dyne (drain commun) et la diode est polarisée en inverse à partir de la résistance  $R_1$ . La fréquence de travail du préampli est fixé par la capacité  $C_1$ .



### III.4. Amplificateur =



C'est un amplificateur très courant à circuit intégré qui utilise un TBA 221 (on peut utiliser aussi un  $\mu A 741$ ).

On suppose que l'amplification est linéaire.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Gain ..... 100 .
- Impédance d'entrée .....  $Z_e = 5\text{K}\Omega$  .
- Impédance de sortie .....  $Z_s = 75\Omega$  .
- Bande passante ..... 10KHz .

- G -

EXPERIENCES

- G -



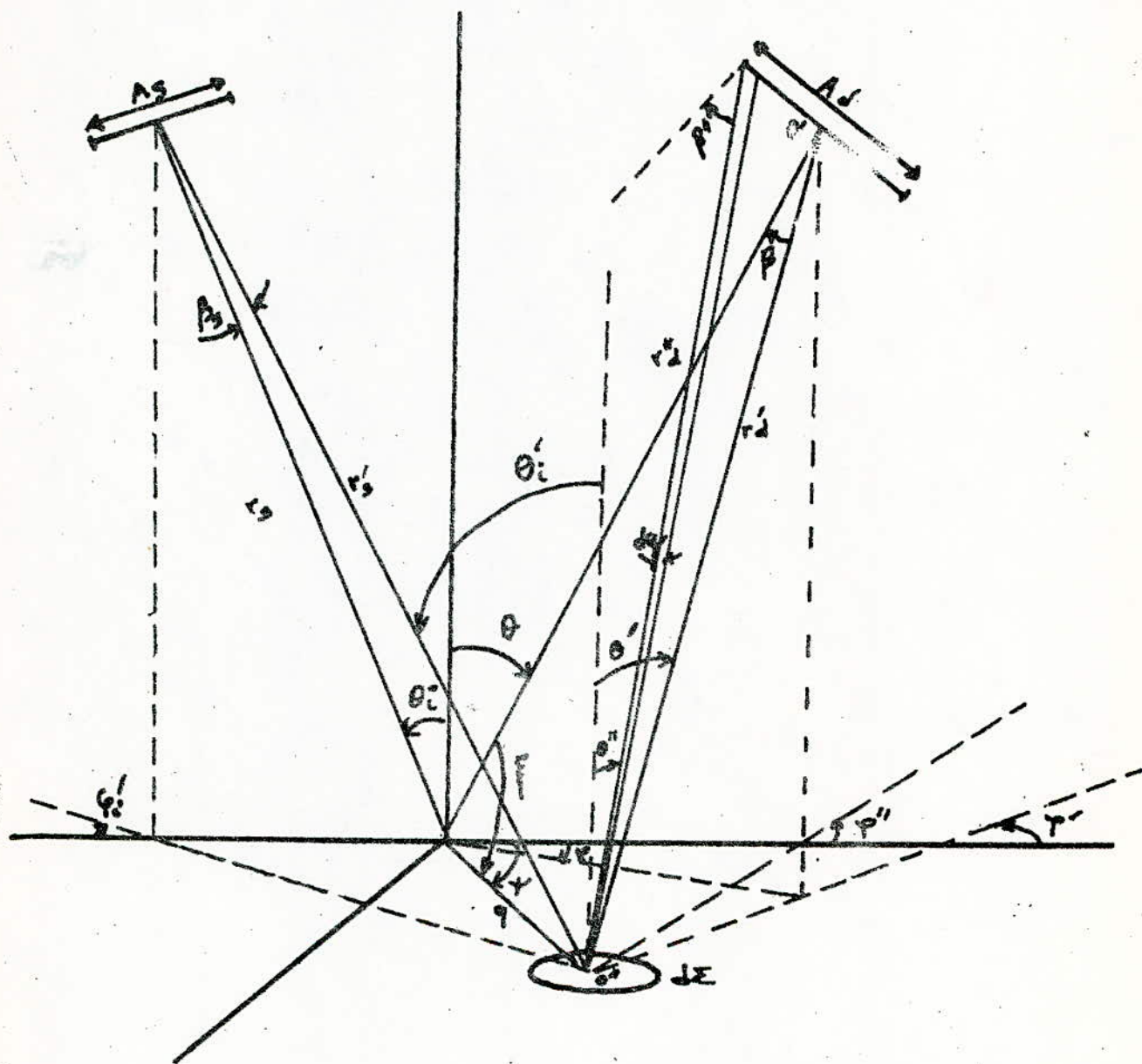
## G - PARTIE EXPERIMENTALE

Le but à atteindre est de mesurer la reflectance à partir des deux chaînes de mesures : l'une travaillant dans le visible  $[500 \div 600] \mu\text{m}$  l'autre dans le proche infra-rouge  $[800 \div 1100] \text{nm}$

La reflectance sera mesurée en fonction de  $(\theta \text{ et } \varphi)$  pour des surfaces surtout végétales, en évitant les erreurs dues à la position de la source, aux perturbations atmosphériques; c'est pour cela qu'on choisi des sources contrôlables situées à un mètre environ de la surface à étudier.

Nous présenterons donc un modèle de mesure à la figure suivante :

MODELE DE MESURE





où

$d\Sigma$  : une surface élémentaire éclairée par l'émetteur dans le champ visé

$q, \psi$  : les coordonnées polaires de  $d\Sigma$  dans le plan d'analyse

$r_d$  : la distance entre le centre de la pupille d'entrée du détecteur à celui de la surface analysée

$r'd$  : la distance entre le centre de la pupille d'entrée du détecteur et celui de  $d\Sigma$

$r''d$  : distance entre un point de la pupille d'entrée du détecteur et celui de  $d\Sigma$

$dw$  : un angle solide élémentaire issu de  $d\Sigma$  dans la direction  $r''d$

$Ad$  : l'aire de la pupille d'entrée du détecteur

$r_s$  : la distance entre le centre de la pupille de sortie de l'émetteur et celui de  $d\Sigma$

$r's$  : la distance entre le centre de la pupille de sortie de l'émetteur et celui de  $d\Sigma$

$As$  : l'aire de la pupille de sortie de l'émetteur

On choisit les vecteurs unitaires  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}, \vec{u}_s, \vec{v}_s, \vec{w}_s$  associés respectivement aux rayons  $r_d, r'd, r_s, r's, q$  et leurs coordonnées sont données par :

$$\vec{u} : (u, \theta, \varphi)$$

$$\vec{v} : (v, \theta', \varphi')$$

$$\vec{w} : (w, \theta'', \varphi'')$$

$$\vec{u}_s : (u_s, \theta_i, \varphi_i)$$

$$\vec{v}_s : (v_s, \theta'_i, \varphi'_i)$$

$$\vec{w}_s : (w_s, \theta, \varphi)$$

## I. Mise en équation du signal de sortie.

sait  $R(\rho, \psi, \theta, \varphi)$  la radiance de la surface élémentaire  $d\Sigma$  dans la direction  $(\theta, \varphi)$ , la puissance rayonnée par  $d\Sigma$  dans l'angle solide  $dw$  vaut :

$$d^3P = R(\rho, \psi, \theta'', \varphi'') \cdot \cos \theta'' \cdot dw \cdot d\Sigma$$

La réponse du détecteur n'étant pas uniforme en chaque point du champ, désignons par  $I(\beta'', \rho, \psi)$  la fonction de réponse spatiale du système détecteur, où  $\beta''$  est l'angle entre l'axe optique et un rayon courant  $r_d''$ , le signal électrique de sortie s'écrit

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

$\alpha$  étant un facteur de conversion.

Pour obtenir le signal de sortie lorsque  $d\Sigma$  est vue par l'ensemble de la surface de la pupille d'entrée, il suffit d'intégrer l'équation ci-dessus sur  $Ad$  :

$$d^3S = \int_{Ad} \alpha \cdot I(\beta'', \rho, \psi) \cdot R(\rho, \psi, \theta'', \varphi'') \cdot \cos \theta'' \cdot dw \cdot d\Sigma$$

La variation de  $\beta''$  étant petite, nous pouvons appliquer le théorème de la moyenne

$$d^3S \approx I(\beta) \cdot R(\rho, \psi, \theta', \varphi') \cdot \cos \theta' \cdot d\Sigma \cdot \Omega_w$$

avec  $\Omega_w =$  l'angle solide de la pupille d'entrée du détecteur vu par  $d\Sigma = Ad \cdot \cos \beta / (r_d')^2$

d'où :

$$d^3S = \alpha \cdot I(\beta) \cdot f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta', \varphi') \cdot E d\Sigma(\rho, \psi) \cdot \cos \theta' \cdot \Omega_w \cdot d\Sigma$$

avec  $f_b =$  réflectance bidirectionnelle

$E d\Sigma =$  Eclaircissement de la surface étudiée

En supposant connue la surface active qui envoie de l'énergie au détecteur après la réflexion on aura l'énergie totale :



$$S = \iint_{(\rho, \psi)} \alpha \cdot I(\beta) \cdot f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta', \varphi') \cdot E_{d\Sigma}(\rho, \psi) \cdot \cos \theta' \cdot d\omega \cdot d\Sigma$$

la surface éclairée étant petite par rapport à la distance surface-détecteur et si  $f_b$  n'est pas trop brusque, nous pouvons appliquer encore le théorème de la moyenne :

$$S = \alpha \cdot f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta', \varphi') \cdot \cos \theta' \cdot \iint_{(\rho, \psi)} E_{d\Sigma}(\rho, \psi) \cdot I(\beta) \cdot d\omega \cdot d\Sigma$$

pour pouvoir calculer cette intégrale, il faut connaître  $I(\beta)$  et  $E_{d\Sigma}(\rho, \psi)$

### I / a) Calcul de $I(\beta)$

La répartition lumineuse de l'émetteur et la réponse spatiale du système détecteur sont en général représentées par des fonctions Gaussiennes donc on pourra écrire :

$$I(\beta) = I(0) \cdot \exp(-\beta^2 / \beta_d^2)$$

$$q^2 = r_d^2 + r_i^2 - 2 r_d \cdot r_i \cdot \cos \beta$$

$$\text{avec } r_d^2 = q^2 + r_i^2 - 2 q r_i \cdot \cos \xi$$

$$\begin{aligned} \cos \xi &= \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi + \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi \\ &= \sin \theta \cos(\psi - \varphi) \end{aligned}$$

$$\text{d'où } \cos \beta = \frac{1 - (q/r_d) \sin \theta \cdot \cos(\psi - \varphi)}{\sqrt{1 + (q/r_d)^2 - 2(q/r_d) \sin \theta \cdot \cos(\psi - \varphi)}}$$

en pratique :  $q \ll r_d$  donc :

$$\cos \beta \approx 1 - \left(\frac{q}{r_d}\right)^2 \left[ 1 - \sin^2 \theta \cdot \cos^2(\psi - \varphi) \right]$$

$$\text{Ainsi } \beta^2 \approx \left(\frac{q}{r_d}\right)^2 \left[ 1 - \sin^2 \theta \cdot \cos^2(\psi - \varphi) \right]$$

$$\text{d'où } I(\beta) = I(0) \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{q}{r_d}\right)^2 \left[ 1 - \sin^2 \theta \cdot \cos^2(\psi - \varphi) \right] \right\}$$

$$\text{avec } q_d = r_d \cdot \beta$$

## I. b. Calcul de $E_{dZ}(q, \psi)$ :

Nous devons donc étudier la répartition spatiale de l'éclairement produit par le système émetteur.

Soit :  $A_s$  = l'aire de la pupille de sortie de l'émetteur.

$R_s(\beta_i)$  = radiance de la source dans la direction  $\beta_i$

$r_s$  = distance du centre de la cible à celui de la pupille de sortie de l'émetteur

L'éclairement en fonction de ces paramètres s'écrit :

$$E_{dZ}(q, \psi) = R_s(\beta_i) \cdot \cos \beta_i \cdot A_s \cdot \cos \theta_i / r_s^2$$

si l'angle solide dans lequel la source émet est faible

$$\text{on aura : } E_{dZ}(q, \psi) = R_s(\beta_i) A_s \cdot \cos \theta_i / r_s^2$$

La non uniformité de la répartition énergétique se

traduit en postulant que la radiance de la source respecte

la loi de Gauss, on aura :

$$R_s(\beta_i) = R_s(0) \exp(-\beta_i^2 / R_s^2)$$

Avec le même raisonnement pour le détecteur nous pouvons établir la relation suivante :

$$\beta_i^2 \approx \left(\frac{q}{r}\right)^2 [1 - \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \psi]$$

$$\text{en posant : } \beta_s = q_s / r_s$$

d'où l'expression finale du signal de sortie :

$$S = \tau \cdot f_b(\theta_i, \psi_i, \theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot \frac{A_d \cdot A_s}{(r_s \cdot r_d)^2} \cdot \cos \theta_i \cdot \iint_{(q, \psi)} R(\beta_i) \cdot I(P) \cdot dZ$$

$$= K \cdot \cos \theta \cdot f_b(\theta_i, \psi_i, \theta, \varphi) \cdot \kappa(\theta, \varphi)$$

$$\text{avec } \kappa = R_s(0) \cdot I(0) \cdot \frac{A_d \cdot A_s}{(r_s \cdot r_d)^2}$$



et  $\kappa(\theta, \varphi) = \iint_{(\theta, \varphi)} R_c(b_i) \cdot I(\theta) \cdot dZ$  qui est la fonction de correction.

on montre que

$$\kappa(\theta, \varphi) = \frac{\pi \cdot q^2 \cdot q^2}{1 + q^2} \frac{1}{\sqrt{1 - (b_1 + b_2) + b_1 \cdot b_2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

avec :  $b_1 = b_1(\theta) = \lambda \sin^2 \theta / (1 + q^2)$

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

et  $q = q_s / q_d$  paramètre de l'appareil

D'après le principe de même évoqué plus haut nous montrons toujours :

$$\frac{S(\theta, \varphi)}{S(0, 0)} = \frac{F_b(\theta; \varphi; \theta, \varphi) \cdot \kappa \cdot \cos \theta \cdot \kappa(\theta, \varphi)}{F_b(\theta; \varphi; 0, 0) \cdot \kappa \cdot \kappa(\theta, 0)}$$

Il est donc nécessaire d'introduire la fonction  $N(\theta, \varphi)$  définie par :

$$N(\theta, \varphi) = \frac{\kappa(\theta, \varphi)}{\kappa(\theta, 0)} \cdot \cos \theta$$

$$\text{d'où } \frac{S(\theta, \varphi)}{S(0, 0)} = \frac{F_b(\theta; \varphi; \theta, \varphi)}{F_b(\theta, \varphi; 0, 0)} \cdot N(\theta, \varphi)$$

et si la surface observée est lambertienne :

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

I.C. Etude du signal de sortie dans le plan  
parallèle à l'incidence

Dans le plan parallèle à l'incidence,  $\varphi = 0$  et  $\kappa(\theta, \varphi)$  s'écrit :

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

$$\text{d'où } S(\theta, \varphi) = K \cdot f_b(\theta; \varphi; \theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot \frac{\eta^2 \cdot \eta^2}{1 + \eta^2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \sin^2 \theta} \cdot \eta^2 \sin^2 \theta}{1 + \eta^2}$$

I. d. Etude du signal de sortie dans le plan perpendiculaire au plan d'incidence:  $\varphi = \pi/2$ .

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

le signal de sortie sera donc:

$$S(\theta, \pi/2) = K \cdot f_b(\theta; \frac{\pi}{2}; \theta, \frac{\pi}{2}) \cdot \cos \theta \cdot \frac{q_d^2 \cdot \eta^2}{1 + \eta^2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \cdot \frac{1 - \eta^2 \sin^2 \theta}{1 + \eta^2}$$

I. e. Discussion physique des résultats:

d'après (I. d), le seul paramètre inconnu est  $\eta$ , qui est le rapport entre  $q_s$  et  $q_d$ ;  $q_s$  et  $q_d$  sont respectivement les deux longueurs des fonctions gaussiennes.

La variation de  $N(\theta, \varphi, \eta)$  en fonction de  $\theta$  pour les valeurs de  $\eta$  entre 1 et 3 est représentée par la fig. 1 on distingue deux cas extrêmes:

$$\begin{aligned} - \text{si } \eta \rightarrow 0, N(\theta, \varphi, \eta) &\rightarrow \cos \theta \\ - \text{si } \eta \rightarrow \infty, N(\theta, \varphi, \eta) &\rightarrow N(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1 \text{ si } \theta \neq \pi/2 \\ 0 \text{ si } \theta = \pi/2 \end{cases} \end{aligned}$$

Ces deux extrêmes correspondent: l'un à la mesure d'une petite surface lambertienne, l'autre à un éclaircissement infiniment étendu.

l'équation sera dans chaque cas:



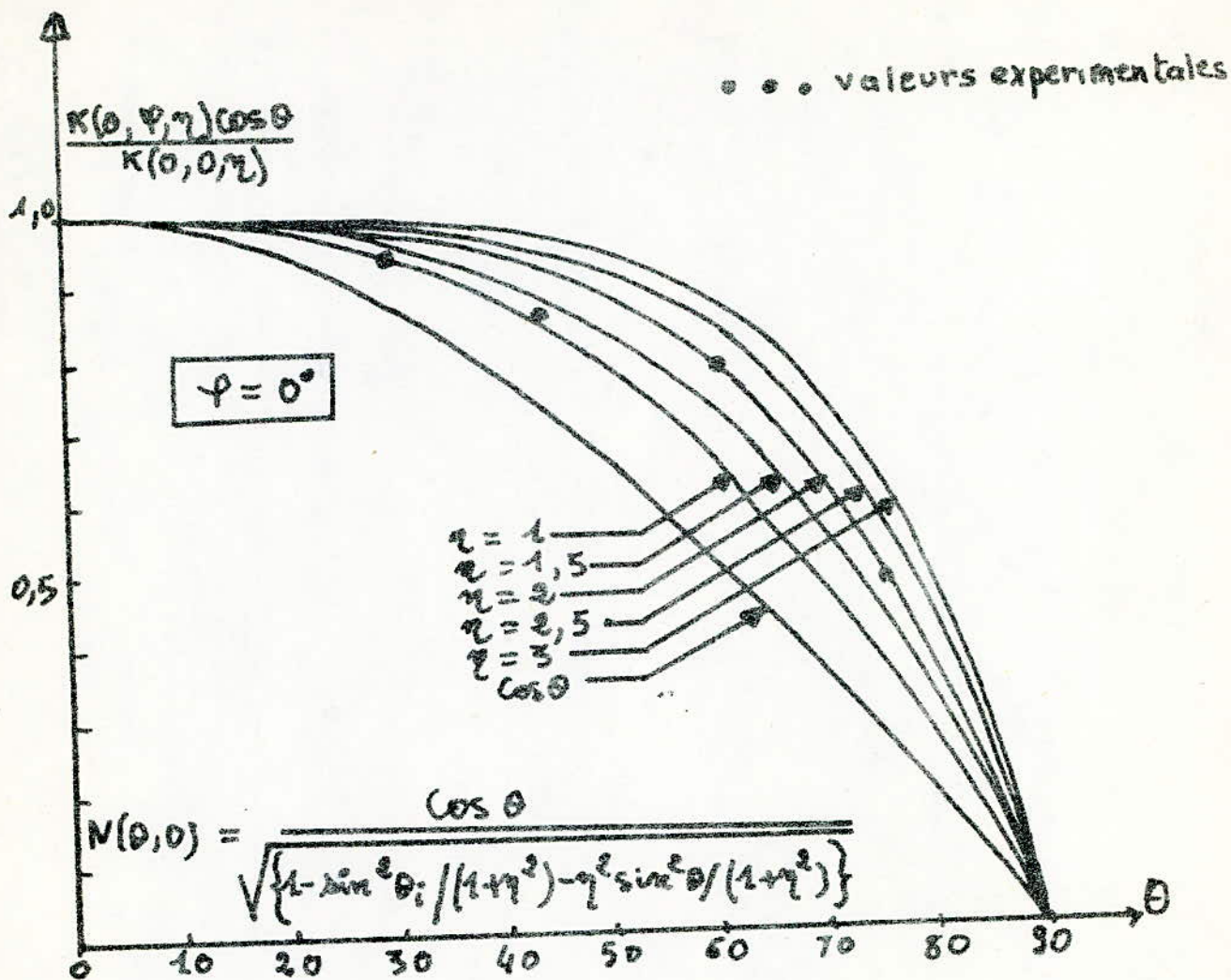


fig : 1 Etude du signal de sortie dans le plan  $\varphi = 0$   
 Valeurs theoriques calculées à partir de la  
 fonction  $N(\theta, 0)$ .

$$\begin{cases} S(\theta, \varphi) = \kappa \cdot f_0(\theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot \pi \cdot r_0^2 & \text{pour } r \rightarrow 0 \\ S(\theta, \varphi) = \kappa \cdot f_0(\theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) \cdot \pi \cdot r_0^2 & \text{pour } r \rightarrow \infty \end{cases}$$

## II. Indicatrice de reflectance :

d'indicatrice de reflectance est la representation en coordonnees polaires de la fonction  $f_0$  pour les angles  $\theta_0, \varphi_0$ , et  $\theta, \varphi$  donnees. En pratique on mesure le facteur de reflectance avec un radiometre. La methode que nous avons proposee consiste a mesurer le rapport entre l'energie capturee par le radiometre dans un angle solide  $\Omega_r$  et l'energie qui serait envoyee dans ce meme angle solide par une surface reflectissante repondant a la loi de Lambert pour une surface de grandes dimensions. Soit  $L(\theta, \varphi)$ , cette quantite, nous avons :

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

avec  $R(\theta, \varphi)$  = radiance de la surface etudiee  
 $R_0$  = radiance d'une surface repondant a la loi de LAMBERT.  $R_0$  est donc

constante quelqueroit l'angle de visée.

si le radiometre est deplace suivant une sphere centree sur une surface lambertienne, l'energie capturee est constante quelqueroit  $\theta$  et  $\varphi$ . Par ailleurs si l'angle d'ouverture du radiometre est petit, la radiance  $R(\theta, \varphi)$  de la surface visee variera peu a l'interieur de celui-ci dans cette condition  $L(\theta, \varphi) \approx \frac{R(\theta, \varphi)}{R_0}$



D'autre part, si l'éclairement  $E(\theta_i, \varphi_i)$  est uniforme, nous avons :

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

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

$f_b$  = réflectance bidirectionnelle de la surface étudiée

$f_b^0$  = réflectance bidirectionnelle de la surface lambertienne  
le facteur de réflexion est alors défini par :

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

Puisque  $f_b^0$  ne dépend pas des angles, nous avons pris comme référence la radiance de la surface mesurée en la visant verticalement c'est à dire :

$$R_0 = R(0, 0)$$

Ainsi en reportant les mesures de la radiance pour différents  $\theta$  et  $\varphi$  à la radiance mesurée à la verticale, il est possible de tracer les indicatrices renormalisées de réflectance de surface naturelle. Si la surface est lambertienne, l'indicatrice de réflectance représentée dans un plan vertical se représentera dans un demi cercle de rayon unité en coordonnées polaires.

## G II Résultats des expériences :

Nos expériences consistaient à mesurer la réflectance de différents objets présents au sol dans deux domaines spectraux différents : le premier se situe dans la partie visible du spectre (500 ÷ 600) nm et le second dans la partie proche infra-rouge (800 ÷ 1100) nm.

### II.1. Mesures dans le visible (500 ÷ 600) nm :

Désignons par :

- $S(\theta, \varphi)$  : le signal de sortie correspondant à une surface quelconque.
- $\mathcal{S}(\theta, \varphi)$  : la valeur de  $S(\theta, \varphi)$  normalisée par rapport à  $S(\theta, 0)$

Ainsi on a :  $\mathcal{S}(\theta, \varphi) = \hat{P}_b(\theta, \varphi) \cdot N(\theta, \varphi)$   
(cf calcul effectué ci-haut).

On a estimé la valeur de  $\eta$  à 1 et les mesures sont faites pour différentes positions du récepteur ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ) dans le plan :  $\varphi = \pi$  ;  $\theta_i = 45^\circ$

Les tableaux qui suivent, donnent les valeurs du signal de sortie du récepteur (correspondant aux différentes surfaces) et les valeurs corrigées à l'aide de la fonction de correction (déterminée précédemment).

#### II.1.1 Feuille d'haricot vert saine : $\varphi = \pi$ ; $\theta_i = 45^\circ$

$\theta (d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	55	40	35	15	0
$\mathcal{S}(\theta, \varphi)$	1	0,72	0,63	0,27	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,81	0,52	0
$\hat{P}_b(\theta, \varphi)$	1	0,74	0,77	0,52	0

Pour l'indicatrice de réflexion voir Fig G1.



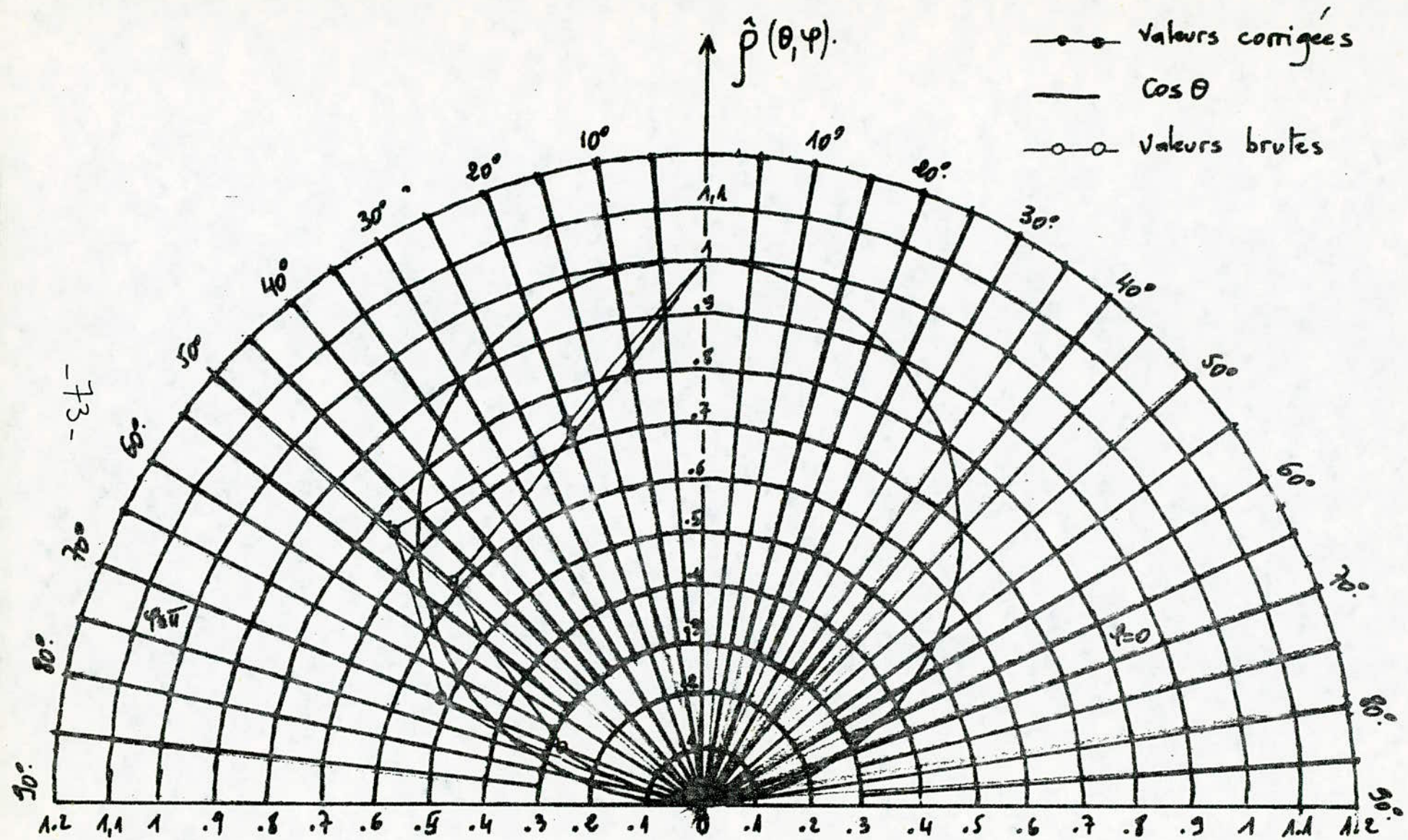


Fig 5A : Indicatrice de réflexion d'une feuille saine  
d'haricot vert



II.1.2 Feuille d'haricot vert malade:

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

$\theta(d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	30	22	18	10	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,73	0,60	0,33	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,82	0,52	0
$\hat{p}(\theta, \varphi)$	1	0,75	0,74	0,63	0

II.1.3 Couvert végétal (Gazon):

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

$\theta(d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	150	142	122	94	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,94	0,82	0,62	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,82	0,52	0
$\hat{p}(\theta, \varphi)$	1	0,98	1	1,2	0

Indicatrice de reflexion voir fig G2.

II.1.4 Couvert végétal (Gazon moins dense):

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

$\theta(d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	100	86	77	47	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,86	0,77	0,47	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,81	0,52	0
$\hat{p}(\theta, \varphi)$	1	0,90	0,95	0,95	0



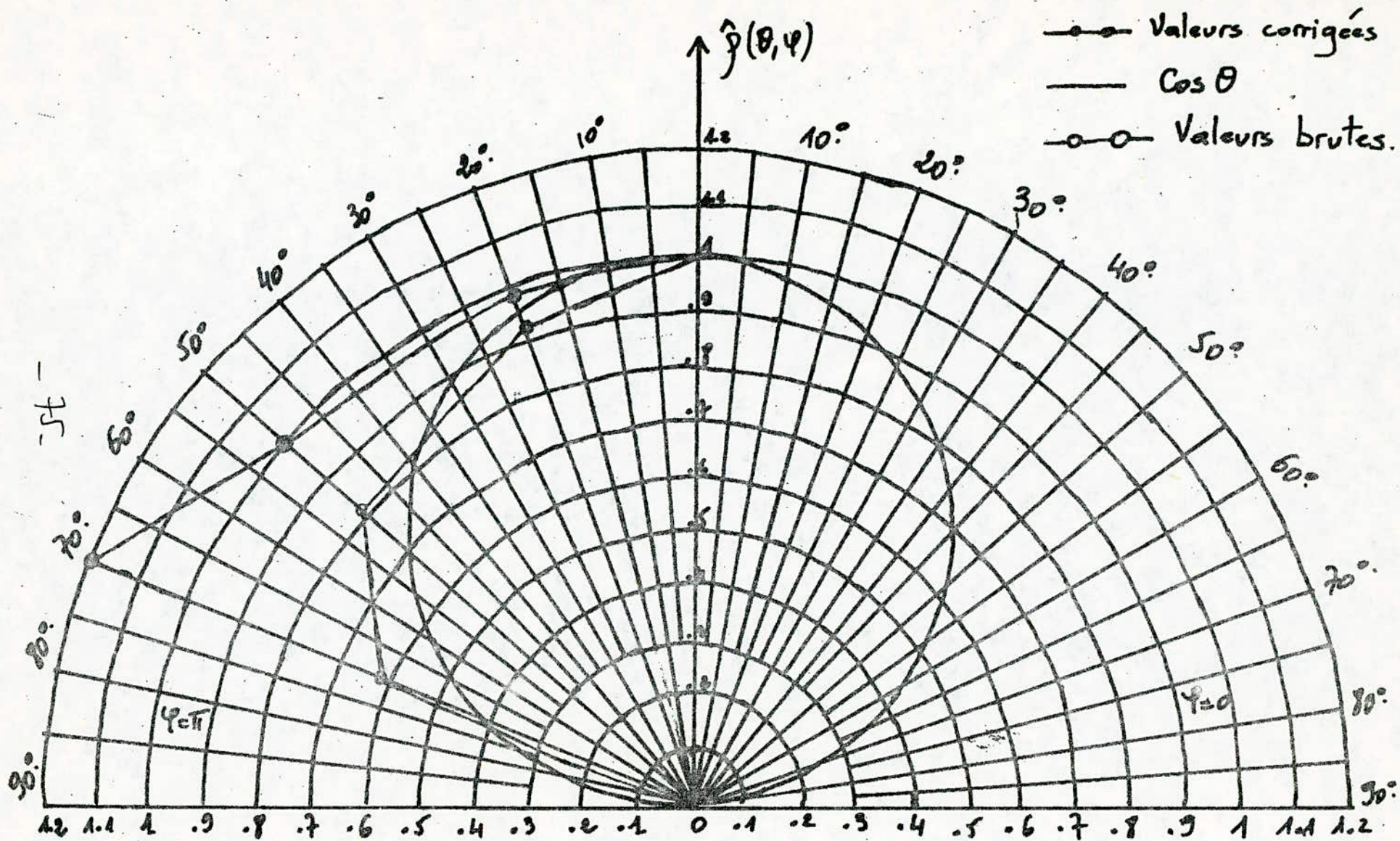


Fig. G.2 = Indicateur de réflexion d'un couvert végétal (Gazon)



II.1.5 Sable =

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

$\theta(d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	40	27	31	23	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,67	0,77	0,57	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,81	0,52	0
$\tilde{P}(\theta, \varphi)$	1	0,70	0,95	1,1	0

Indicatrice de réflexion voir fig 93.

II.1.6 Terre =

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

$\theta(d^\circ)$	0	20	50	70	90
$S(\theta, \varphi)$ mV	80	71	63	40	0
$\Delta(\theta, \varphi)$	1	0,88	0,79	0,50	0
$N(\theta, \varphi)$	1	0,96	0,81	0,52	0
$\tilde{P}(\theta, \varphi)$	1	0,92	0,98	0,96	0

Indicatrice de réflexion voir fig 94.

II.2 Mesures dans le proche infra-rouge (800 ÷ 1100) nm :

Dans cette partie, la procédure aux expériences diffère de la précédente ; en effet, l'émetteur et le récepteur utilisés sont dans le même boîtier, cependant nous étions amené à les faire varier en même temps et dans la même direction.

Toutes les mesures ont été faites dans le plan  $\varphi = \pi$ . Désignons par  $S(\theta, \varphi)$  le signal de sortie du récepteur correspondant à la surface analysée.



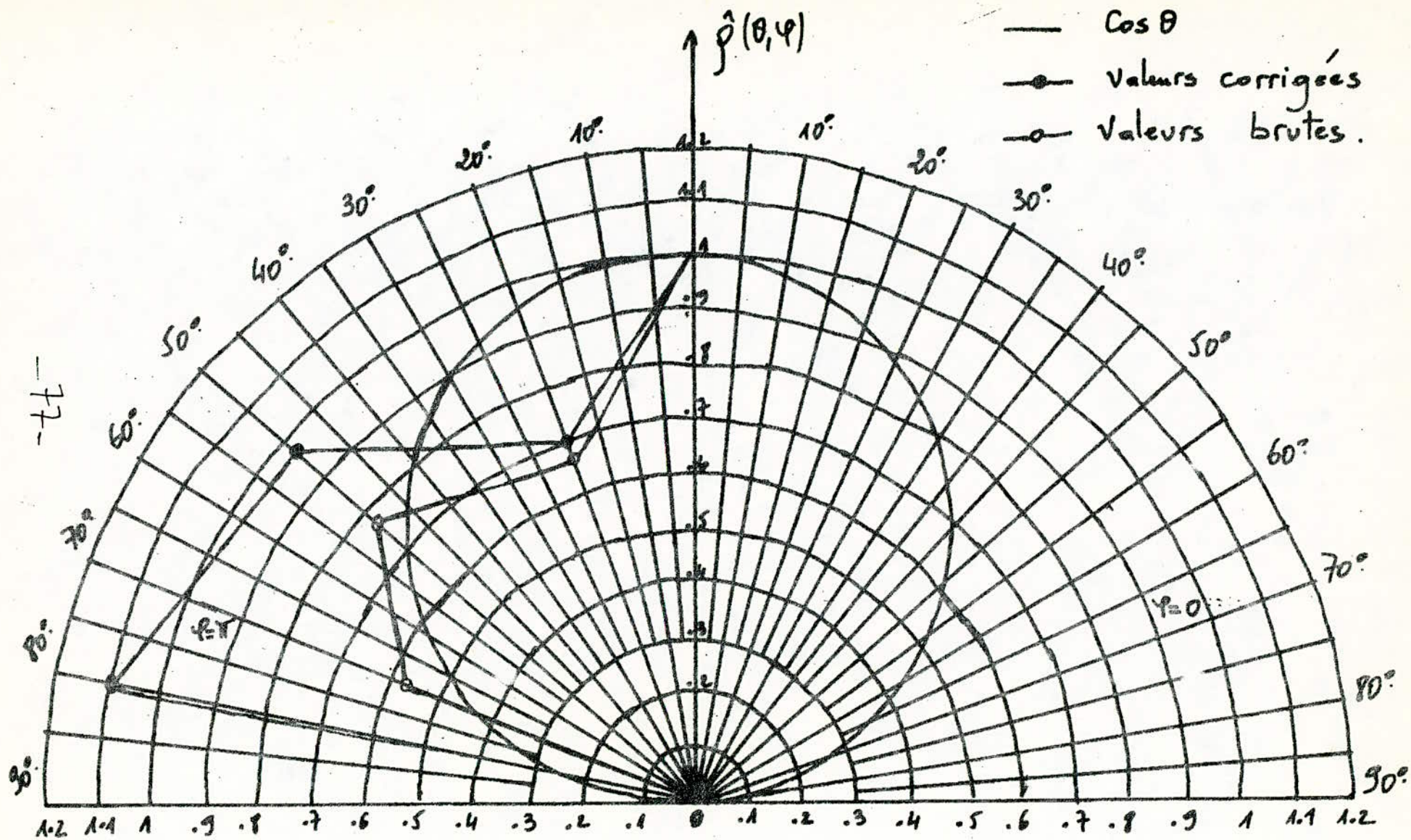


Fig G.3. : Indicatrice de réflexion du sable jaune.



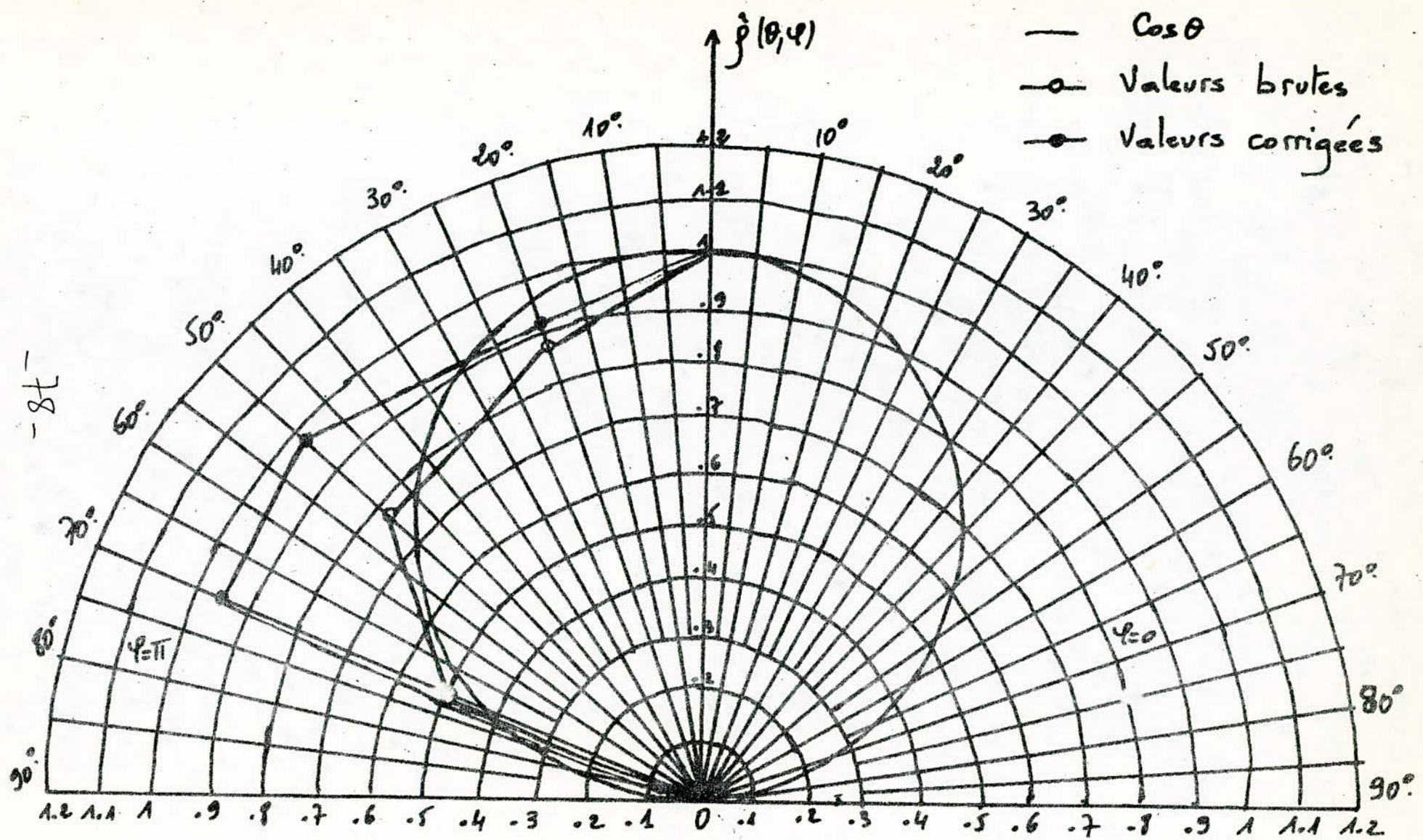


Fig 64.: Indicatrice de reflexion du sol nu (terre).



II-e.1 Feuilles d'haricot vert =

$\varphi = \pi$

\*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$

\*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta_i = -45^\circ$

\*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta = -45^\circ$

		feuille saine	feuille malade
*	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	6	8
**	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	5	7
***	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	4,5	7

II-e.2 Couverts végétaux =

$\varphi = \pi$

\*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$

\*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta_i = -45^\circ$

\*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta = -45^\circ$

		Gazon dense	Gazon moins dense
*	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	12	9
**	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	11	7
***	$S(\theta, \varphi)_{mV}$	11	8

II-e.3 Feuille individuelle, couvert végétal =

$\varphi = \pi$

Dans cette partie on comparera la réflectance d'un couvert végétal et la réflectance d'une feuille individuelle.

\*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$

\*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta_i = -45^\circ$

\*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui donne  $\theta = -45^\circ$

	Couvert (azon)	Feuille d'hémicote vert
* $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	12	6
** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	11	5
*** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	11	5

II.e.4. Sols :  $\varphi = \pi$

On mesure la réflectance de deux sols différents : terre, sable.

\*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$

\*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta_i = -45^\circ$

\*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta = -45^\circ$

	Sable	Terre
* $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	10	8,75
** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	9	8
*** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	10	8,50

II.e.5 Terre sèche, terre humide =  $\varphi = \pi$

\*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$

\*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta_i = -45^\circ$

\*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta = -45^\circ$

	Terre humide	Terre sèche
* $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	9	12,5
** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	9	12
*** $S(\theta, \varphi)_{\theta \varphi}$	9	12



II-2-6 Terre, Couvert végétal =  $\rho = \pi$

- \*  $\theta = \theta_i = 0^\circ$
- \*\*  $\theta = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta_i = -45^\circ$
- \*\*\*  $\theta_i = 45^\circ$  ce qui correspond à  $\theta = -45^\circ$

		Couvert végétal	terre
*	$3(\theta, \theta)$ WV	10	18,5
**	$5(\theta, \theta)$ WV	11	18,5
***	$5(\theta, \theta)$ WV	11	18

G III. Commentaires :

Deux objets différents peuvent avoir la même réponse dans une bande du spectre électromagnétique ; d'où l'utilité de l'analyse multispectrale.

Nos expériences consistaient à vérifier cette hypothèse en faisant une analyse bispectrale : [bandes 5 et 7 du LANDSAT]. Ceci dit, nous avons essayé de caractériser certains objets à partir de l'énergie qu'ils réfléchissent lorsqu'ils sont frappés par un rayonnement.

Le tracé des courbes  $\tilde{f}(\theta, \theta)$  des différentes surfaces étudiées montre que l'indicatrice de réflexion obtenue n'écarte du tracé de la fonction cosinus, ceci est dû au fait que les surfaces étudiées ne sont pas lambertiennes. Ainsi en comparant les différentes indicatrices de réflexion, on peut en

En conclure que ces différentes surfaces peuvent être classées selon leur rugosité. Par exemple, on remarque facilement que le sable est plus rugueux qu'une feuille d'haricot vert (cf fig G1 et G2): la courbe de réflexion du sable s'écarte beaucoup plus de la loi Cosinus que celle d'une feuille individuelle. Les résultats trouvés nous renseignent aussi sur la couleur de l'objet (cf II-e-6): le couvert a une faible réflectance dans le visible par rapport à la terre à cause de la grande absorption par la chlorophylle (couleur verte). Ainsi, on peut en conclure que le spectre visible nous renseigne sur la forme et la couleur de l'objet. Dans le proche infra-rouge: les résultats obtenus pour une feuille saine et une feuille malade sont différents: l'amoindrissement des couches dans le cas d'une feuille malade témoigne une grande réflexion de la radiation. En comparant les résultats trouvés au II-e-5 on remarque que la terre sèche a un pouvoir de réflexion supérieur à celui de la terre humide, ainsi l'absorption dans le proche infra-rouge est due aussi à l'humidité. Le proche infra-rouge nous renseigne donc sur l'état de santé de la végétation et sur le degré d'humidité.



-H-

PROBLEME INVERSE

-H-

Après avoir étudié et calculé la réflectance, l'albedo et l'émissivité, nous allons, à présent, calculer les flux de chaleur latente et sensible à partir d'un modèle mathématique tenant compte des différents paramètres (albedo, réflectance, émissivité) calculé précédemment et que l'on considérera donc dans cette partie comme connus.

Des flux de chaleur latente et sensible sont donnés par l'équation du bilan énergétique à l'interface sol-atmosphère qui s'écrit :

$$\mathcal{Q}(t, T) = R_n(t, T) + M(t, T) + LE(t, T)$$

ou  $R_n(t, T)$  = rayonnement net

$M(t, T)$  = flux de chaleur latente

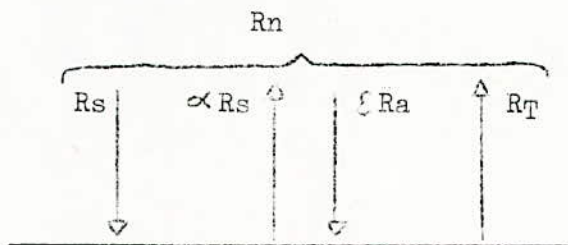
$LE(t, T)$  = flux de chaleur sensible.

$R_n(t, T)$  étant une fonction des paramètres cités précédemment, nous allons considéré donc  $R_n(t, T)$  comme connu; ainsi on pourra exprimer les différents flux en fonction de  $R_n(t, T)$ .

On considérera aussi la température "T" comme une fonction donnée.

### I PROPRIETES ET DEFINITIONS

1. Rayonnement net : c'est le bilan de tous les flux radiatifs de la surface terrestre. Il représente l'ensemble des échanges mis en jeu à la surface.



$R_s$  = rayonnement solaire global reçu au sol

$(1 - \alpha) R_s$  = partie du rayonnement global absorbé par le sol

$\xi R_a$  = fonction de rayonnement atmosphérique absorbé par le sol

$-\xi \sigma T_s^4$  = rayonnement émis par le sol. ( $T_s$  : température de surface)

### 2. LES FLUX DE CHALEUR LATENTE ET SENSIBLE

Ces flux prennent place dans le sous sol et à l'interface sol-atmosphère. Il traduisent le transfert de chaleur dans le sol et à l'interface.

#### 2.a - Le flux de chaleur sensible :

Il s'agit d'un échange de chaleur du sol avec l'atmosphère par conduction et par convection.

##### 2.a.1 - Echange de chaleur par conduction :

L'ensemble du système surface terrestre - atmosphère; les échanges de chaleur par conduction sont relativement lents et faibles. Ils peuvent



néanmoins intervenir d'une façon très sensible entre la surface et les toutes premières couches de l'atmosphère. Ceci étant dû essentiellement :

- \* aux contrastes thermiques qui y règnent entre le sol et les premières couches de l'atmosphère,
- \* a l'accélération de l'uniformisation des températures dans un fluide initialement hétérogène, lorsque celui-ci est le siège d'une agitation turbulente (vent par exemple).

#### 2.a.2 - Echange de chaleur par convection :

Ce phénomène est observé dans l'atmosphère à la suite d'un séjour ou d'un déplacement à la surface terrestre relativement chaude, les basses couches atmosphériques subissent un échauffement par la base.

Grace à ces échanges par conduction et par convection, l'atmosphère récupère une partie importante de l'énergie solaire emmagasinée par la surface terrestre. Lorsque l'atmosphère est en contact avec un sol chaud, il se crée une instabilité verticale dans les basses couches qui donne naissance à un brassage convectif. Tandis que lorsqu'elle est en contact avec un sol froid, il se crée une stabilisation de ces mêmes couches.

#### 2.a.3 - FORMULATION DU FLUX DE CHALEUR SENSIBLE H.

Le flux de chaleur sensible H est proportionnel au gradient de la température.

$$H = f(z) \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z}$$

f(z) : est une fonction de z (z : hauteur par rapport au sol)

L'intégration de cette expression sur une hauteur Za relativement grande par rapport à la rugosité aérodynamique donne :

$$H = \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{T_a - T_s}{r_a}$$

$\rho_a$  = densité de l'air

$C_p$  = chaleur spécifique de l'air

$T_a$  = température ambiante de l'air à la hauteur Za.

$T_s$  = température de surface du sol

$r_a$  = résistance de transfert de chaleur entre la surface et la hauteur Za.

#### 2.b - LE FLUX DE CHALEUR LATENTE LE

Il s'agit de chaleur absorbée ou restituée par les changements de phase de l'eau (c'est à dire à dire : soit par conduction, soit par évaporation). Ceci est dû :

- à la transpiration des plantes
- à l'évaporation directe de l'eau d'un sol non couvert, mais surtout des océans.

Ces évaporations absorbent de la chaleur, laquelle est fournie par la surface. Cette vapeur se condense toujours en libérant cette chaleur

empruntée précédemment. C'est ainsi que par un jeu de chaleur latente, d'importantes quantités de chaleurs passent de la surface terrestre à l'atmosphère.

### 2.b.1 - Formulation du flux de chaleur latente :

Le flux de chaleur latente est proportionnel au gradient de l'humidité de l'air ( $e_a$ )

$$LE = f'(z) \cdot \frac{\partial e_a}{\partial z}$$

$e_a$  = humidité spécifique de l'air

$z$  = hauteur par rapport au sol

$f'(z)$  = fonction de  $z$  dépendant des propriétés du milieu.

L'intégration de cette expression entre la surface et une hauteur  $Z_a$  donne :

$$LE = \frac{\alpha \cdot Cp}{\gamma} \frac{Pa(T_a) - Ps(T_s, s)}{r_a + r_o}$$

avec :

$Pa(T_a)$  = pression partielle de la vapeur d'eau à la température  $Z_a$

$Ps(T_s, e_s)$  = pression partielle de la vapeur à la surface du sol dépendant de  $T_s$  et de l'humidité du sol  $h_s$ .

$r_o$  : résistance de diffusion de la végétation pour la vapeur d'eau

$r_a$  = résistance de transfert de vapeur d'eau entre la surface et la  $Ps(T_s, e_s)$ .

### 3 - FLUX TOTAL VERS LE SOL $\Phi(t)$

$$\Phi(t) = R_n + H + LE$$

Il commande les variations de la température de surface  $T_s$ , et dépend de plusieurs paramètres : ce sont les paramètres du sol et de l'interface sol - atmosphère (paramètres physiques qui sont eux mêmes influencés par les paramètres thématiques et les paramètres perturbatifs au niveau de l'atmosphère et de la couche limite).

Ces divers paramètres rendent la mesure de  $\Phi(t)$  très complexe (voir même impossible actuellement par télédétection, du fait que cette dernière ne mesure que très peu de paramètres actuellement).

Les mesures actuelles sont très approximatives (plusieurs paramètres sont négligés) et basées sur des mesures faites au niveau du sol et à partir de modèles théoriques.



## II Calcul des flux de chaleur latente et sensible

### II. 1. Position du problème

équation de la chaleur :

$$c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$\text{avec } -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \phi(t, T) \quad (2)$$

$$\text{où } \phi(t, T) = R_n(t) + H(t) + LE(t) \quad (3)$$

$$\text{et } R_n(t) = (1-\alpha) k_s(t) + R_a(t) - \epsilon \sigma T^4(0, t) \quad (4)$$

$\phi(t, T)$  : bilan énergétique

$R_n(t)$  : rayonnement net

$T$  : température

$t$  : temps

$c_v$  : chaleur spécifique volumique

$k$  : conductivité thermique

$H$  : flux de chaleur sensible

$LE$  : flux de chaleur latente

$\alpha$  : Albedo

$\epsilon$  : émissivité

$\sigma$  : constante de Stephan - Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (USI)}$$

## II.2 Elaboration d'un modèle mathématique :

de bilan énergétique  $\phi(t)$  s'écrit :

$$\phi(t) = (1-\alpha) R_s + \epsilon [R_a - \sigma T_s^4] + H + LE = G(t) \quad (5)$$

où :  $R_s$  : rayonnement solaire incident

$\alpha$  : albedo (visible)

$\epsilon$  : émissivité (I.R.)

$R_a$  : rayonnement atmosphérique descendant vers le sol

$T_s$  : température de surface du sol.

$H$  : flux de chaleur sensible (essentiellement convection)

$LE$  : flux de chaleur latente

$G$  : flux de chaleur dans le sol

donc  $R_n(t, T) = (1-\alpha) R_s + \epsilon [R_a - \sigma T_s^4]$ .

\* La connaissance de :

$$\alpha = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}} = \int_{\text{visible}} \rho_\lambda d\lambda$$

où  $\rho_\lambda$  = réflectivité spectrale

•  $\epsilon$  (mesuré dans l'infrarouge)

•  $R_a$  (modèle)

•  $T_s$  : extrait à partir de la luminance I.R.

permet de calculer le rayonnement net  $R_n$ , car " $\sigma$ " est une constante égale à :  $5.67 \cdot 10^8$  (USI)

et en combinant les résultats paraissant dans la littérature spécialisée, permet d'approcher les flux de chaleur latente et sensible par :

$$H(t, T) = [a R_n(t) + b] \cdot [T_a(t) - T_s(t)]$$

$$LE(t, T) = [u \cdot R_n(t) + v] \cdot \left[ \frac{e_a(t) - e_s(t)}{\gamma} \right]$$



où  $T_a$  est la température de l'air à 2m du sol.  
 $e_a$  l'humidité de l'air à 2m du sol  
 $e_s$  l'humidité de surface  
 $T_s$  température de surface du sol.  
 $\gamma$  Constante psychrométrique égale à 66,0

But : Connaissant  $R_s, E, \alpha, R_n, T_s$  ou encore  $R_n$   
 et  $T_a, e_a, e_s$  et  $G$

on cherche à déterminer les 4 coefficients :  $a, b, u, v$   
 qui équivalent au mieux :  $G(t) = \phi(t)$

### II.2.1 première méthode

$$H(t, T) = a R_n(t) [T_a(t) - T_s(t)] + b [T_a(t) - T_s(t)] \quad (6)$$

$$LE(t, T) = u R_n(t) \left[ \frac{e_a(t) - e_s(t)}{\gamma} \right] + v \left[ \frac{e_a(t) - e_s(t)}{\gamma} \right] \quad (7)$$

posons

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(t) = R_n(t) [T_a(t) - T_s(t)] \\ f_2(t) = [T_a(t) - T_s(t)] \\ f_3(t) = R_n(t) \cdot \frac{e_a(t) - e_s(t)}{\gamma} \\ f_4(t) = \frac{e_a - e_s}{\gamma} \\ f_5(t) = G(t) - R_n(t) \end{array} \right.$$

l'équation (5) s'écrit alors à l'aide de (6) et (7)

$$a f_1(t) + b f_2(t) + u f_3(t) + v f_4(t) = f_5(t) \quad (8)$$

La méthode de calcul consiste à décomposer la  $f(t)$  en série de Fourier.

Rappels sur les séries de Fourier:

Considérons une fonction périodique  $f(t)$  qui satisfait les conditions de Dirichlet :

- $f(t)$  a des discontinuités dont le nombre doit être fini au cours d'une période
- la fonction doit contenir un nombre fini de max et min pendant une période
- la fonction doit avoir une intégrale finie sur la période soit :

$$\int^T |f(t)| \cdot dt < \infty$$

la fonction  $f(t)$  peut alors s'écrire sous forme de série de Fourier :

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \frac{a_0}{2} \\ a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega t dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega t dt \end{array} \right.$$

ce qui nous donnera pour les  $f_i(t)$  :

$$f_i(t) = A_{i0} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{in} \cos n\omega t + b_{in} \sin n\omega t) \neq$$



l'équation (9) s'écrira alors :

$$\begin{aligned}
 & a A_{10} + a \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n} \cos n\omega t + b_{2n} \sin n\omega t] \\
 & + b A_{20} + b \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n} \cos n\omega t + b_{2n} \sin n\omega t] \\
 & + u A_{30} + u \sum_{n=1}^{\infty} [a_{3n} \cos n\omega t + b_{3n} \sin n\omega t] \\
 & + v A_{40} + v \sum_{n=1}^{\infty} [a_{4n} \cos n\omega t + b_{4n} \sin n\omega t] \\
 & = A_{50} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{5n} \cos n\omega t + b_{5n} \sin n\omega t]
 \end{aligned}$$

par analogie des deux termes de cette égalité on aura :

$$\begin{cases}
 a A_{10} + b A_{20} + u A_{30} + v A_{40} = A_{50} \\
 a a_{2n} + b a_{2n} + u a_{3n} + v a_{4n} = a_{5n} \\
 a b_{2n} + b b_{2n} + u b_{3n} + v b_{4n} = b_{5n}
 \end{cases}$$

ce qui nous donne deux équations à 4 inconnues puisque la première n'est pas très significative.

Il nous faut donc 2 autres équations pour pouvoir déterminer les 4 inconnues : a, b, u, v.

Afin d'avoir 4 équations on prendra : n = 1, 2

c'est à dire qu'on tiendra compte uniquement des deux premiers harmoniques :

$$n=1 \Rightarrow \begin{cases} a \cdot a_{11} + b \cdot a_{21} + u \cdot a_{31} + v \cdot a_{41} = a_{51} \\ a \cdot b_{11} + b \cdot b_{21} + u \cdot b_{31} + v \cdot b_{41} = b_{51} \end{cases}$$

$$n=2 \Rightarrow \begin{cases} a \cdot a_{22} + b \cdot a_{32} + u \cdot a_{42} + v \cdot a_{52} = a_{62} \\ a \cdot b_{22} + b \cdot b_{32} + u \cdot b_{42} + v \cdot b_{52} = b_{62} \end{cases}$$

on a ainsi donc un système de 4 équations à 4 inconnues.

## II 2.2. Deuxième méthode :

La première méthode n'est pas très rigoureuse car on néglige les autres harmoniques qui sont en général considérables. Ceci dit, on utilisera donc une autre méthode considérant tous les harmoniques.

A partir de l'équation (8) qui s'écrit :

$$a f_1(t) + b f_2(t) + u f_3(t) + v f_4(t) = f_5(t)$$

on posera :

$$\begin{cases} a = P_1 \\ b = P_2 \\ u = P_3 \\ v = P_4 \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_1 f_1(t) + P_2 f_2(t) + P_3 f_3(t) + P_4 f_4(t) = f_5(t)$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^4 P_i f_i(t) = f_5(t) \quad (9)$$

après décomposition des  $f_i(t)$  en série de Fourier on aura :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 P_i A_{i0} + \sum_{i=1}^4 P_i \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} a_{in} \cos n\omega t + b_{in} \sin n\omega t \right\} = A_{50} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{5n} \cos n\omega t + b_{5n} \sin n\omega t) \quad (10) \end{aligned}$$

Si on appelle  $x$  le premier membre de l'équation (10) et  $y$  le second membre l'équation (10) sera équivalente à :

$$x - y = 0$$



la deuxième méthode consistera à minimiser la norme  $\|x-y\| \rightarrow 0$

par définition on a :  $\|x-y\|^2 = \int_0^T (x-y)^2 dt$

$$(x-y) = \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i A_{i0} \right) - A_{50} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i a_{in} \right) - a_{5n} \right] \cos n\omega t \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i b_{in} \right) - b_{5n} \right] \sin n\omega t.$$

$$\int_0^T (x-y)^2 dt = T \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i A_{i0} \right) - A_{50} \right]^2 + \frac{T}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i a_{in} \right) - a_{5n} \right]^2 \\ + \frac{T}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{i=1}^4 P_i b_{in} \right) - b_{5n} \right]^2 = 0 \quad (11)$$

car  $\left( \sum_{i=1}^4 P_i A_{i0} \right) - A_{50} = \text{constante}$

et  $\int_0^T \sin n\omega t \cdot \cos n\omega t \cdot dt = 0$

$$\int_0^T \sin^2 n\omega t \cdot dt = \int_0^T \cos^2 n\omega t \cdot dt = \frac{T}{2}$$

Minimiser la norme  $\|x-y\|$  revient à dire que les dérivées partielles par rapport aux  $P_i$  sont nulles.

ou alors  $\frac{\partial \|x-y\|^2}{\partial P_i} = 0 \text{ constante}$

$$\frac{\partial \|x-y\|^2}{\partial p_i} = 2T \left[ \left( \sum_{l=1}^k p_l a_{l0} \right) - a_{i0} \right] a_{i0} +$$

$$+ T \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{l=1}^k p_l a_{ln} \right) - a_{in} \right] a_{in} +$$

$$+ T \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \sum_{l=1}^k p_l b_{ln} \right) - b_{in} \right] b_{in} = 0$$

on voit que c'est de la forme  $C \vec{P} = \vec{D}$

où  $C$  et  $D$  sont des matrices et  $P$  un vecteur  
et

$$D_i = A_{i0} \cdot A_{i0} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_{in} \cdot a_{in} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_{in} \cdot b_{in}$$

$$C_i = A_{i0} \cdot A_{i0} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_{in} \cdot a_{in} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_{in} \cdot b_{in}$$

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}$$

Ainsi pour calculer les  $p_i$ , il suffit de résoudre l'équation :

$$C \vec{P} = D$$



## C O N C L U S I O N

Le but de notre étude a été de contribuer à l'interprétation des images spatiales, nous avons donc étudié le comportement de la réflectance et de l'Albédo dans les quatre bandes LANDSAT en particulier dans le domaine végétal à cause des grands problèmes qu'il pose dans notre pays (manque d'eau, sécheresse).

Nous avons, aussi, réalisé une chaîne de mesure travaillant dans le proche infra - rouge  $\left[ 850 \frac{0}{0} 950 \right]$  nm utilisable aussi bien dans le noir qu'à la lumière du jour (vu que d'autres chaînes de mesures réalisées par des collègues imposent le noir absolu pour leur utilisation)

Les photodiodes de cette chaîne de mesure imposant une limite en courant ont fait que cette dernière manque un peu de puissance. Le même inconvénient réside dans la chaîne de mesure (réalisée par nos collègues HAROUBIA et ZIANI) travaillant dans le visible  $\left[ 500 \frac{0}{0} 600 \right]$  nm.

Cet inconvénient nous a posé des problèmes lors des expériences, mais nous avons fait de notre mieux afin de trouver des résultats satisfaisants.

Lors du calcul théorique des flux de chaleur latente et sensible, nous avons projeté d'illustrer cette étude par des données LANDSAT se rapportant au territoire algérien mais le manque de temps nous en a empêché.

D'autres problèmes surtout matériels, ont été rencontrés lors de cette étude, nous espérons que notre étude n'a pas été trop altérée.

### BIBLIOGRAPHIE

- Principes physiques et mathématiques de la télédétection  
(Ecole d'été de physique spatiale.  
Strasbourg. 18 août - 15 septembre 1978. CNES)
- Earth observation from space and management of planetary resources  
ASE
- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (Journal of the  
American Society of Photogrammetry. May 1980)
- Agricultural Research Service. VSDA. FLORIDA  
EDWARD. B. KNIPLING
- Etude du problème Inverse. A. ABDELLAOUI
- OPTOELECTRONIQUE : bases théoriques et applications pratiques  
R. DANAYE
- Traitement de données multispectrales acquises par télédétection  
Thèse de DOCTEUR INGENIEUR  
BERNARD LACAZE.
- Mesure de réflectivité bidirectionnelle et de température du sol  
Projet de fin d'études. Juin 1980  
B. HARAUBIA - ZIANI