

USTHB

Département d'électronique et d'électrotechnique

2ex

## Projet de fin d'études

DIPLOME D'INGENIORAT  
OPTION ELECTRONIQUE

ETUDE ET REALISATION  
D'UNE CHAINE DE MESURE DE L'EMISSIVITE  
PAR TELEDETECTION INFRAROUGE THERMIQUE



Proposé par

A. ABDELLAOUI

Docteur en spécialité

Etudié par

BOUZOUAD ASSIA

CHERFA YAZID



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وما أوتيتم من العلم الا قليلا

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

A MON PERE ET MA MERE  
A MES FRERES ET SOEUR  
A LA MEMOIRE DE MON CHER COUSIN DRAI MOHAMMED  
A TOUTE MA FAMILLE  
A TOUS MES CAMARADES

YIFLID

A MON PERE ET MA MERE  
A MES FRERES ET SOEURS  
A MADAME JACQUELINE CABANAC  
A MA FAMILLE  
A MES AMIES ET CAMARADES

A I I I A

## 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 tout particulièrement Mr ABDELLAOUI pour nous avoir accepté dans son laboratoire, pour nous avoir initié à la télédétection et guidé tout au long de notre étude et pour tous les efforts qu'il n'a cessé de déployer pour sa réussite. Qu'il trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Nous remercions par ailleurs Mrs TEDJINI et KACIMI pour nous avoir permis d'accéder à leur division, de même que Mme BENBOUZID pour nous avoir accepté à ses cours de magister à l'USTHB.

Nous remercions aussi tout le personnel du CSTN pour leur précieux concours et leur aide matériel, en particulier le personnel de l'atelier général, le personnel des divisions 5 et 6, le personnel du service photocopie et tirage, Mrs HALIMI, ACHOUR, REDEAUD, HAKEM, MOUHOUB, GHERBAS, ABERKANE, Melles KELBIT AICHA et SEGHOUANI FATIHA.

Nous adressons nos vifs remerciements à Mrs CHERFA ALI et BOUZOUAD SAID pour leur aide morale et matérielle.

Nous n'oublions pas de remercier Mrs MEDJEBER BOUALEM, BOUGAA DJAMEL, BOUSHAKI TAHAR, SAINT LARY et Mr LIASSINE NOURREDINE pour leur aimable contribution.

Nos remerciements vont également à la section d'imprimerie de l'EEP d'EL AFFROUN, au personnel de l'unité SNTF d'Hussein Dey et à tous nos camarades en particulier FERRAT SLIMANE, BENNAB KHADOUDJA, HARAUBIA brahim, HALIMI MOHAMMED et MEGENNI DJAMAL.

Nous remercions bien Mr BOUZOUAD ABDELKRIM pour sa réalisation à la l'écriture du verset du coran.

Nous remercions enfin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de notre travail et de la réalisation, de même que ceux qui ont contribué à notre formation; qu'ils trouvent ici, l'expression de notre grande gratitude.

بسم الله الرحمن الرحيم

وبعد

بعد تقديم مبادئ نظريه للرصدية وقوانين انتشار الا موج الكهرمغناطيسيه و انعكاسها و امتصاصها و اربالها من الاشياء و السطح الارضي درسنا و انجزنا جهاز قياس الاشعه ما فوق الاحمر الحار في المجال 8 الى 14 ميكرو. ثم استعملنا هذا الجهاز لقياس اجويه بعض الاشياء ( كالماء و الطريق المعبده و الحشيش و الرمل ) للاشعه الشمسيه .

Après une présentation des principes théoriques de la télédétection et des lois de propagation des ondes électromagnétiques, leur réflexion, leur absorption et leur émission par les objets et les surfaces, on a étudié et réalisé un appareil de mesure du rayonnement infrarouge thermique dans la bande 8-14  $\mu$  . Enfin, on a mesuré avec cet appareil, les réponses de certaines surfaces (l'eau, une route goudronnée, l'herbe, le sable) au rayonnement solaire.

## II SOMMAIRE.

### II CHAPITRE I: NOTIONS DE TELEDETECTION

#### I-INTRODUCTION

#### II- PRINCIPE DE LA TELEDETECTION

##### II-1- Acquisition des données

##### II-2- Traitement

##### II-3- Interprétation

#### III- THEORIE DU RAYONNEMENT

##### III-1- Avantages du rayonnement électromagnétique en télédétection

##### III-2- Propriétés de l'infrarouge

##### III-3- Notions de photométrie

##### III-4- Lois des corps noirs

#### IV- EMISSIVITE ET REFLECTIVITE

##### IV-1- Emissivité

##### IV-2- Réflectivité

#### V- METHODE DE MESURE DE L'EMISSIVITE ET DE LA TEMPERATURE DE SURFACE

##### V-1- Mesure de l'émissivité

##### V-2- Mesure de la température de surface par radiométrie infrarouge

#### VI- PERTURBATIONS DE L'ATMOSPHERE

##### VI-1- Introduction

##### VI-2- Eléments absorbants de l'atmosphère

##### VI-3- Emission de l'atmosphère

### II CHAPITRE II: ETUDE ET REALISATION DE LA CHAINE DE MESURE

#### A- INSTRUMENTATION DE L'EMISSION

##### I- Différentes sortes de rayonnement

##### I-1- Rayonnement des atomes

##### I-2- Rayonnement des molécules

##### I-3- Radiations des solides et des liquides

##### I-4- Radiations thermiques

##### II- Sources de rayonnement

##### II-1- Sources au plasmas

##### II-2- Irasers et lasers

##### II-3- Sources thermiques

### III- Etude et réalisation de l'émetteur infrarouge

III-1- Schéma synoptique de l'émetteur

III-2- Le globar

III-3- Optique

III-4- Modulation

III-5- Ventilation

III-6- Caractéristiques de l'émetteur

### B- INSTRUMENTATION DE LA RECEPTION

I- Rappels sur la structure des semi-conducteurs

II- Différentes sortes de détecteurs

II-1- Photodétecteurs

II-2- Détecteurs thermiques

III- Paramètres des détecteurs

III-1- Responsivité

III-2- Puissance équivalente au bruit

III-3- Défectivité

III-4- Réponse spectrale

III-5- Temps de réponse

III-6- Les bruits des détecteurs

IV- Réalisation du récepteur

IV-1- Schéma synoptique du récepteur

IV-2- Optique

IV-3- Détecteur

IV-4- L'amplificateur

IV-5- Caractéristiques du récepteur infrarouge

## II CHAPITRE III : MESURES ET INTERPRETATIONS

I- INTRODUCTION

II- UTILISATION D'UNE SOURCE PASSIVE

II-1 Rayonnement solaire

II-2- Modulateur adjoint au récepteur

III- MESURES

III-1- Principes des mesures

III-2- Vérification des caractères de certaines surfaces

IV- INTERPRETATIONS DES MESURES

V- APPLICATIONS

## II CONCLUSION



CHAPITRE I

NOTION

DE

TELEDETELETON

# PLAN DU CHAPITRE I

## I - INTRODUCTION

## II - PRINCIPE DE LA TELEDETECTION

II-1- Acquisition des données

II-2- Traitement

II-3- Interprétation

## III- THEORIE DU RAYONNEMENT

III-1- Avantages du rayonnement électromagnétique en télédétection

III-2- Propriétés de l'infrarouge

III-3- Notions de photométrie

III-4- Lois des corps noirs

## IV- EMISSIVITE ET REFLECTIVITE

IV-1- Emissivité

IV-2- Réflectivité

## V- METHODE DE MESURE DE L'EMISSIVITE ET DE LA TEMPERATURE DE SURFACE

V-1- Mesure de l'émissivité

V-2- Mesure de la température de surface par radiométrie infrarouge

## VI- PERTURBATIONS DE L'ATMOSPHERE

VI-1- Introduction

VI-2- Eléments absorbants de l'atmosphère

VI-3- Emission de l'atmosphère

VI-4- Diffusion

## I- INTRODUCTION :

Détecter un objet consiste à acquérir le plus de renseignements et d'informations possible. Les yeux, les oreilles sont des agents de détection pour l'être humain; ils lui permettent de percevoir les objets et les différents bruits.

Malheureusement, leur pouvoir est limité par la taille des objets, par la longueur d'onde (visible seulement) et par les fréquences (audibles seulement).

Pour cela, l'homme a été appelé à trouver des instruments plus développés et plus performants afin d'acquérir le plus de renseignements et donc de mieux étudier le milieu dans lequel il se trouve.

Pour parer au problème de localisation, vu que son champ visuel est très restreint, l'homme a essayé de voir et de surveiller les objets du point le plus haut possible.

Ainsi, le chasseur surveillait sa cible en se mettant sur un arbre, les anciens géomètres faisaient leurs études à partir des hauteurs, de même que les vigies guidaient les bateaux en se mettant sur le sommet des mâts, etc...

Leur but à tous était d'avoir un champ de vue plus étendu. L'idée de détecter un objet à partir d'une certaine hauteur s'est développée avec le développement de l'aéronautique (ballons, avions, fusées, satellites, ...). La conquête de l'espace et l'observation du cosmos ont toujours figuré parmi les rêves de l'homme.

La photographie aérienne a été le premier moyen technique d'observation à distance; elle a été surtout utilisée à des fins militaires et a connu un grand développement pendant les deux dernières guerres.

La photographie aérienne a été un moyen efficace pour l'étude des reliefs en archéologie, en ethnologie, pour la recherche des eaux, des gisements, des puits de pétrole, etc ...

Mais elle n'est pas restée à ce stade là puisqu'elle s'est développée très rapidement avec le perfectionnement de la technologie des appareils de prise de vue. Avec ce perfectionnement, la photographie aérienne a été à l'origine de la naissance d'une science nouvelle: LA TELEDETECTION.

La télédétection est l'ensemble des techniques permettant d'acquérir des informations à distance concernant un milieu sans qu'il n'y ait contact entre celui-ci et l'instrument de mesure. Elle permet de passer de l'examen qualitatif (clichés photographiques) à une véritable mesure de l'énergie émise ou réfléchi par le milieu à étudier. Elle utilise les ondes électromagnétiques, acoustiques, réponses radar, etc...

La télédétection présente beaucoup d'avantages, c'est un domaine très riche en renseignements car il permet d'atteindre des caractéristiques intéressantes du milieu, mais aussi des phénomènes de transfert entre la terre et l'atmosphère.

La télédétection se propose de développer les outils (instruments algorithmiques de traitement, modèle d'analyse, etc...) permettant d'améliorer les méthodes de traitement de l'information.

Une étude approfondie nécessite une parfaite connaissance du milieu, à savoir:

- L'influence des phénomènes physiques qui interviennent au cours du transfert des informations vers le capteur.
- Une bonne connaissance des techniques des instruments utilisés.
- Une bonne interprétation des informations recueillies de façon à les exploiter convenablement.

Il en résulte que la télédétection est une science qui fait appel à beaucoup d'autres disciplines comme la géologie, la géographie, la topographie, la physique des solides, l'hydrologie, les sciences de la terre, l'informatique, etc...

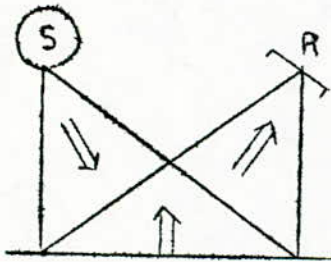
Notre travail consiste d'abord à donner une idée générale sur le principe de la télédétection et de ses propriétés; on étudiera ensuite l'importance de l'émissivité dans le domaine infrarouge thermique et enfin on donnera la méthode de mesure et la réalisation de la chaîne de mesure avec l'application à quelques exemples et l'interprétation.

## II- PRINCIPE DE LA TELEDETECTION.

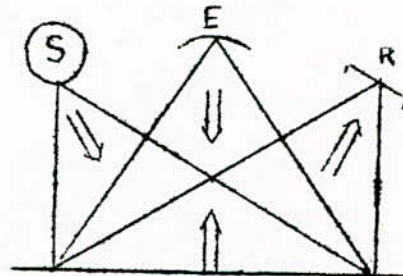
Comme énoncé précédemment, la télédétection étudie les systèmes d'acquisition de données à distance. Son principe fondamental postule la spécificité des effets pour un objet donné en fonction de ses propriétés qui sont: l'émission, la réflexion, l'absorption, la diffraction et la polarisation dépendant de la nature de la source émettrice et de l'état de l'objet étudié au moment de l'observation de la mesure.

Il existe deux types de techniques en télédétection:

- La technique passive: On se contente d'enregistrer l'énergie naturelle émise ou réfléchiée par la terre. Elle provient des sources naturelles comme le soleil, la lune, la terre. Le spectre en fréquence est continu dans ce cas (toutes les radiations du spectre sont présentes).
- La technique active: On éclaire la zone à étudier avant d'enregistrer l'énergie qu'elle renvoie vers le récepteur à l'aide d'une source artificielle comme le laser, le radar, l'infrarouge. Dans ce cas toute l'énergie se trouve concentrer dans un nombre discret de bandes.



Télédétection passive .



Télédétection active .

### II-1- ACQUISITION DES DONNEES:

Un système de télédétection comprend:

- Une zone à étudier émettant un rayonnement spécifique suivant sa structure et la nature du rayonnement d'excitation.
- Un milieu de propagation (atmosphère, eau, ...).
- Une plate-forme d'observation; son choix dépend surtout de l'objectif de l'étude.

Voyons brièvement les divers moyens d'observation utilisés:

- \* Camion : muni de bras télescopiques pour des observations à quelques mètres du sol. Il permet de faire des études de laboratoires qui nécessitent une grande précision.

- \* Ballon: Il est accessible et permet, pendant la phase ascensionnelle, de prendre des photos d'une même vue à des échelles différentes; ceci permet de connaître la perception des objets aux différentes altitudes. Cependant, une étude préalable des conditions météorologiques sera nécessaire.
  - \* Avion: Il permet de transporter un appareillage volumineux mais son altitude est limitée de même que sa durée de vol.
  - \* Satellite: C'est la plate-forme idéale d'observation globale de la terre (les images provenant du satellite LANDSAT correspondent à une surface de 185 km x 185 km, balayée en 28 secondes). La répétitivité permet de faire une étude temporelle du milieu naturel étudié.
- Un système de réception qui comprend un système de transmission et un système d'enregistrement.

Le tableau suivant montre, à titre indicatif, les grands types de porteurs utilisés pour la télédétection.

Plate-forme	Altitude	Echelle du document
Satellite non habité (cas de LANDSAT).	900 Km	1/4000.000
Vaisseau spatial habité (cas de SOYOUZ).	300 KM	1/1000.000
Ballon stratosphérique.	30-35 KM	1/400.000
Avions		
-préssurisé	10-13 KM	1/100.000
-lourd	1,5-6 KM	1/10.000 - 1/50.000
-léger	300m-1,5 KM	1/2000 - 1/5000
Ballon captif	30-200 m	1/500 - 1/1000

## II-2- TRAITEMENT:

Nous avons un système de prétraitement et de correction destiné à parer aux erreurs des moyens de réception; ensuite un système de traitement (informatique). Pour cela, il faudrait faire une calibration (bandes magnétiques, ...)

### II-2-1- Texturation:

C'est l'ensemble des éléments texturaux. Un élément textural d'une image est la plus petite zone continue et répétée dans laquelle un changement de caractère n'est pas décelable. Les caractères décelables sont: le ton, la forme, les deux dimensions du plan. Une des répartitions des objets consiste à déceler l'intensité des gris à l'aide d'un lecteur de densité optique qui fait correspondre le 0 au blanc et le 100 au noir, par exemple. Chaque photographie est quantifiée en lignes et on fait correspondre à chaque ligne une courbe donnant la succession des différentes densités optiques.

### II-2-2- Structuration:

C'est l'ensemble des éléments structuraux. Ceux-ci sont définis par les relations répétées qui existent entre les éléments texturaux. Les caractéristiques des éléments structuraux sont:

- le type de relation qui associe les éléments texturaux.
- la densité relative de chaque élément.
- la densité totale d'occupation du lieu.

### II-2-3- Modélisation:

Il s'agit de fixer un modèle théorique et de faire ensuite des extractions thématiques (on comparera le cas concret à ce modèle théorique).

## II-3- INTERPRETATION:

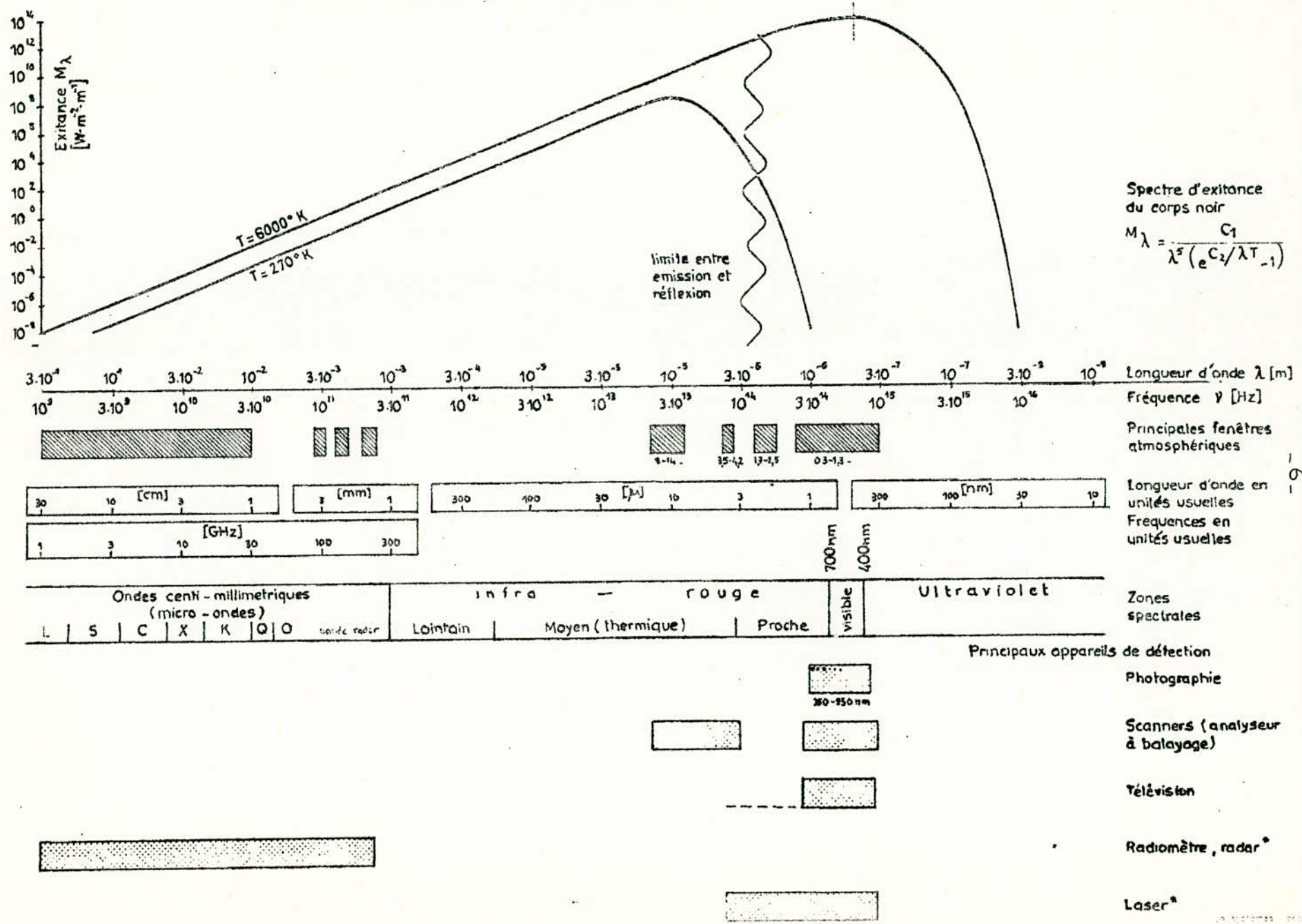
Elle consiste à donner les relations rayonnement-structure de la matière, interpréter chacune des bandes, identifier les objets, leur structure, leur forme suivant le rayonnement enregistré.

## III- THEORIE DU RAYONNEMENT:

Etant donnée que la télédétection est basée essentiellement sur la nature des rayonnements émis, absorbés, réfléchis par un corps, un rappel sur les différents types de rayonnement s'avère indispensable.

# Spectre des ondes électromagnétiques

Définition - utilisation pour la télédétection



Spectre d'exitance du corps noir

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

Principales fenêtres atmosphériques

Longueur d'onde en unités usuelles  
Fréquences en unités usuelles

Zones spectrales

Principaux appareils de détection

Photographie

Scanners (analyseur à balayage)

Télévision

Radiomètre, radar\*

Laser\*



Dans l'étude d'un milieu par télédétection, on peut utiliser divers types de rayonnements comme les rayonnements électromagnétiques, acoustique, réponse radar,...

### III-1- AVANTAGES DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE EN TELEDETECTION:

Le rayonnement électromagnétique est le plus utilisé à cause des nombreux avantages qu'il offre. Ceux-ci peuvent se résumer comme suit:

- raisons techniques: la technologie actuelle de ce rayonnement est très avancée dans ce domaine.

- il contient plus d'informations que beaucoup d'autres rayonnements.

Le spectre électromagnétique se divise suivant les longueurs d'onde en différentes bandes. Notre étude ne portera pas sur la totalité du spectre électromagnétique mais elle se fera dans le domaine infrarouge (thermique); ceci du fait que :

\* Le visible est vu par l'œil et ne nous donne que des informations de surface du corps comme la couleur; par exemple, un corps bleu absorbe toutes les radiations incidentes et rejette le bleu que nous voyons; les rayons émis ne donnent aucune information sur la structure interne du corps.

\* L'infrarouge nous donne des informations beaucoup plus profondes dépendants des propriétés physico-chimiques du corps éclairé.

### III-2- PROPRIETES DE L'INFRAROUGE :

Le domaine infrarouge fait partie du rayonnement invisible découvert en 1800 par Sir William Herschel dont l'expérience consistait à mesurer l'énergie thermique dans chaque bande de radiations. Ainsi le spectre infrarouge se divise suivant la longueur d'onde en 3 domaines:

- IR proche ( $0,75\mu$  à  $1,5\mu$ ) provoque des oscillations de translations.
- IR moyen ( $1,5\mu$  à  $10\mu$ ) provoque des oscillations de rotations.
- IR lointain ( $10\mu$  à  $1000\mu$ ) provoque des vibrations de réseaux cristallins.

Les rayons infrarouge permettent d'avoir des informations plus poussées que le visible, dépendants des propriétés physiques et chimiques du corps éclairé. Le rayon infrarouge arrivant sur un corps influe sur la température de ce corps, donc sur ses propriétés ce qui fera changer le rayon réémis par ce corps. On pourra avoir alors, en étudiant la liaison rayonnement-structure, beaucoup d'informations sur ses propriétés internes.

Les bandes délimitées précédemment dans chaque bande ne sont pas rigoureuses à cause du mouvement complexe des molécules.

~~8~~

L'étude des bandes d'absorption d'une substance, solide, liquide ou gazeuse qui, pour la plupart, se situent dans le domaine infrarouge, renseigne sur le mode de vibration et de rotation des molécules, sur les liaisons chimiques des molécules entre-elles, sur la configuration énergétique des électrons notamment dans le cas des cristaux. Réciproquement, l'absorption d'une substance inconnue révèle, avec autant de sûreté qu'une empreinte digitale, l'identité de ses composants (corps simples ou radicaux) et la structure de l'édifice moléculaire sans risquer de l'altérer ou de le détruire.

La télédétection infrarouge est généralement synonyme de détection de sources de chaleur. Tout corps dont la température est différente de la température ambiante est un émetteur d'infrarouge. La présence, la position et diverses propriétés de ce corps, entre autres sa température, peuvent être décélées par des détecteurs capable de palier l'insensibilité de l'oeil humain à ces longueurs d'onde.

L'étude de notre planète par télédétection est une conséquence de l'étude du cosmos par cette science. On a commencé d'abord par l'étude du mouvement des planètes; après le premier vol spatial et la photo souvenir des cosmonautes, on a vu que l'on pouvait avoir un très grand nombre d'informations.

### III-3- NOTIONS DE PHOTOMETRIE:

Puisque la télédétection utilise le rayonnement d'une source, il serait intéressant de parler de quelques notions qui caractérisent ce rayonnement.

#### III-3-1- Puissance rayonnée:

C'est la quantité d'énergie émise par un corps quelconque par unité de temps, dans toutes les directions, à une température  $T$ , et pour une longueur d'onde donnée. Le corps noir est un corps qui émet l'énergie maximum, comparée à celle des autres corps à la même température. Le soleil constitue la source la plus importante en télédétection; son éclaircissement correspond approximativement à celui d'un corps noir à  $5900-6600^{\circ}\text{K}$ , alors que la terre est un corps noir à  $300^{\circ}\text{K}$ . ( Voir figures ).

#### III-3-2- Flux énergétique total $\phi$ :

Le flux énergétique est la quantité d'énergie rayonnée par unité de temps par une source de nature quelconque, de petites dimensions, portée à une température  $T$  et placée dans le vide. L'unité du flux énergétique est le Watt (W) ou calorie par seconde (cal/s).

III-3-3- Intensité d'une source ponctuelle:

Soit une source ponctuelle placée à l'origine d'un référentiel. Considérons une direction donnée par les angles  $\theta$  et  $\varphi$ . On définit l'intensité de la source dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  comme étant:

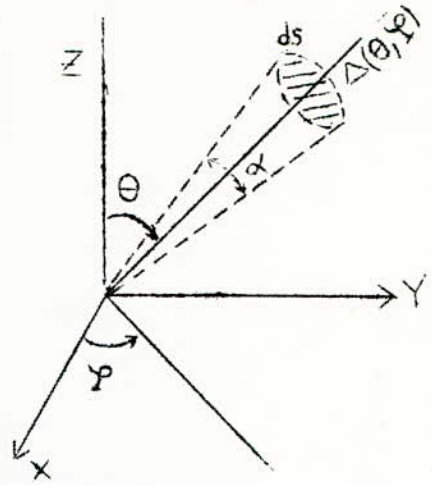
$$I(\theta, \varphi) = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

C'est la puissance rayonnée par la source dans la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$  par unité d'angle solide.

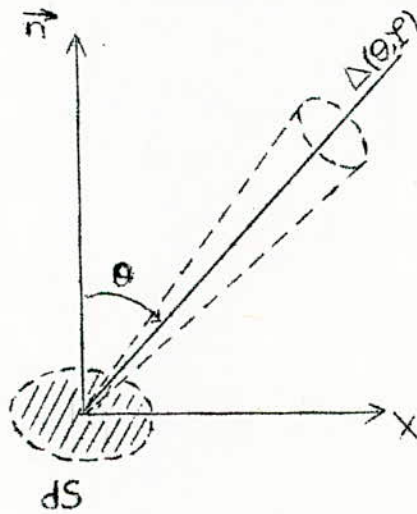
On appelle angle solide la quantité :  $d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{r^2}$

On aura finalement:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{d\phi \cdot r^2}{dS \cdot \cos \alpha}$$



III-3-4- Radiance de la mesure dans une direction donnée:



Soit un élément de surface  $dS$  de centre  $O$ , et soit  $dI$  l'intensité énergétique dans la direction  $(\theta, \varphi)$ .  $\vec{n}$  est la normale à la surface  $dS$ ; la radiance est donnée par:

$$R = \frac{dI}{dS \cdot \cos \theta}$$

Sachant que  $I = \frac{d\phi}{d\Omega} \implies \frac{dI}{dS} = \frac{d^2\phi}{dS \cdot d\Omega}$

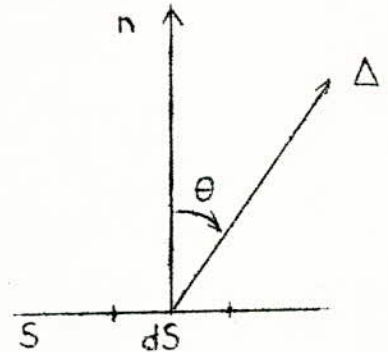
On aura alors pour la radiance:

$$R = \frac{d^2\phi}{dS \cdot d\Omega \cdot \cos \theta}$$

III-3-5- Emittance:

Soit une surface  $S$  et soit un élément de surface  $dS$ ; soit  $d\phi$  le flux énergétique rayonné dans tout le demi-espace limité par la surface de la source (soit un angle de  $2\pi$ ). L'émittance de la source au point  $O$  est définie par le quotient:

$$M = \frac{d\phi}{dS}$$



III-3-6- Eclairement :

C'est le rapport du flux reçu par l'instrument de mesure ( $d\phi_r$ ) et l'aire réceptrice ( $dA_r$ ) :

$$E = \frac{d\phi_r}{dA_r}$$

L'émittance et l'éclairement sont deux quantités équivalentes (du point de vue mathématique) mais leurs sens physique sont différents.

III-3-7- Loi de Lambert :

Lorsqu'une source possède une radiance R, constante quelle que soit la direction  $\Delta(\theta, \varphi)$ , on dit qu'elle obéit à la loi de Lambert. Pour ce genre de sources, il serait intéressant de calculer l'émittance. Pour cela, il suffit de considérer une demi-sphère de centre O et de rayon l'unité; le flux énergétique traversant chaque élément de surface  $dS'$  de cette demi-sphère est donnée par la formule:

$$d\phi = I \cdot dS' = R \cdot \cos \theta \cdot dS \cdot dS'.$$

En intégrant dans le demi-espace, sachant que R est constante, on aura:

$$\phi = \iint R \cdot dS \cdot \cos \theta \cdot dS'.$$

$\cos \theta \cdot dS'$  est l'aire de la surface  $dS'$  projetée dans le plan de S.

On a donc :

$$\iint \cos \theta \cdot dS' = \Pi.$$

$$M = \frac{d\phi}{dS} = \frac{R \cdot dS \cdot \Pi}{dS} = R \cdot \Pi$$

$$M = R \cdot \Pi$$

III-3-8- Paramètres énergétiques spectraux:

La plupart des sources émettent un rayonnement assez complexe résultant de la superposition d'ondes électromagnétiques indépendantes, de longueur d'ondes et de puissance définies. La propriété essentielle de cette superposition est l'addition des énergies respectives. L'utilisation de filtres suffisamment étroits permet la séparation des différentes zones constituantes. Les sources constituées par des corps chauds ont, en général, un spectre continu, c'est à dire que les longueurs d'ondes composantes ne possèdent pas de valeurs discrètes. Soit  $d\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , aussi petit que l'on veut, la radiance spectrale se définit comme suit:

$$R = \frac{dR}{d\lambda} \qquad R = \int_0^{\infty} R_{\nu} \cdot d\nu$$

Le flux spectral, la radiance spectrale et l'émittance spectrale peuvent être considérés comme des valeurs continues de  $\lambda$  et représentés par des courbes spectrales. La connaissance de ces courbes suffit à définir une surface rayonnante.

III-4- LOIS DES CORPS NOIRS:

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 variables. 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:

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

avec

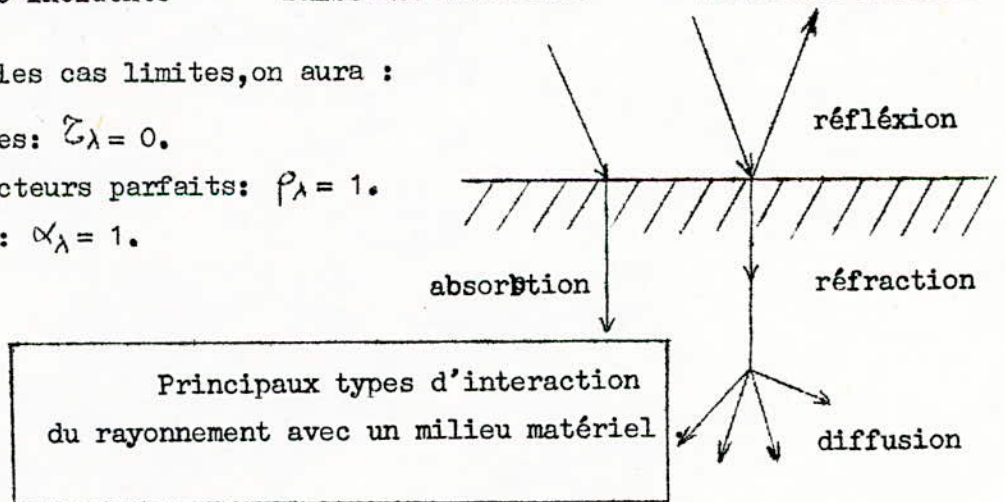
- $\alpha$  : Coefficient d'absorption.
- $\rho$  : Coefficient de réflexion.
- $\tau$  : Coefficient de transmission.

On peut définir ces coefficients de la façon suivante:

$$\alpha = \frac{\text{Puissance absorbée}}{\text{Puissance incidente}} \quad \rho = \frac{\text{Puissance réfléchi}}{\text{Puissance incidente}} \quad \tau = \frac{\text{Puissance transmise}}{\text{Puissance incidente}}$$

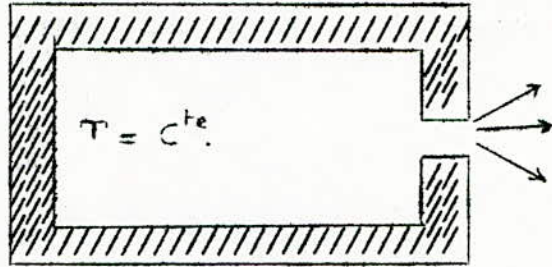
Pour les cas limites, on aura :

- Corps opaques:  $\tau_\lambda = 0$ .
- Corps réflecteurs parfaits:  $\rho_\lambda = 1$ .
- Corps noirs:  $\alpha_\lambda = 1$ .



Dans la pratique, une enceinte fermée isotherme dans laquelle on perce un petit orifice a les propriétés d'un corps noir. On suppose que les parois sont suffisamment opaques et la température constante. L'enceinte est alors en équilibre de rayonnement.

Définition  
du "corps noir".



Deux lois fondamentales, établies par G.R. KIRCHOFF, attribuent au corps noir théorique le rôle de référence universelle.

III-4-1- Première loi de KIRCHOFF :

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

III-4-2- Deuxième loi de KIRCHOFF :

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  $R_\lambda^{cn}$  du corps noir à la même température.

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

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

$$R = R^{cn} \cdot \alpha \quad \text{avec} \quad R^{cn} = \int_0^\infty R_\lambda^{cn} \cdot d\lambda.$$

Mais puisque on travaille en infrarougethermique, on peut se limiter donc à la bande de fréquence qui nous intéresse, soit :

$$R^{cn} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{cn} \cdot d\lambda \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} \lambda_1 &= 8\mu \\ \lambda_2 &= 14\mu \end{aligned}$$

La radiance s'écrira alors:

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^{cn} \cdot \alpha_\lambda \cdot d\lambda.$$

Le coefficient d'absorption aura donc pour expression:

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

Pour un corps noir, on peut déterminer la radiance énergétique totale pour la formule de Stéphan BOLTZMANN .

III-4-3- Loi de Stéphan BOLTZMANN :

La radiance énergétique d'un corps noir  $R^{cn}$  est proportionnelle à la 4<sup>ème</sup> puissance de la température absolue; soit:

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

avec  $\sigma$  : constante de S. Boltzmann.

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

Remarque:

Les relations précédemment obtenues (III-4-2) 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 donc écrire:

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

III-4-4- Formule de PLANCK :

Le rayonnement du corps noir est dû aux mouvements thermiques des particules. Celle-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:

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

avec  $k = \frac{R}{N}$  où  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $8,31 \text{ J/°K}$ ).  
 et  $N$  est le nombre d'AVOGADRO ( $6,06 \cdot 10^{23}$ ).  
 d'où  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/°K}$ .

Si l'on pose:

$$C_1 = 2 \cdot h \cdot c^2 = 1,19 \cdot 10^8 \text{ W.m}^{-2} \cdot \mu^4.$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,44 \cdot 10^4 \mu(\text{°K}).$$

On aura comme nouvelle expression de la radiance:

$$R_{\lambda}^{cn} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \text{ W/st.m}^2 \cdot \mu$$

$\mu$  en micron  
T en ° absolue.

III-4-5- 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 obtiendra alors:

$$T \cdot \lambda = 2898 \implies \lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad \text{Connue sous le nom de loi de WIEN.}$$

On aura pour la radiance:

$$R_{\lambda_{\max}}^{cn} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda) - 1} = 0,415 \cdot (T/1000)^5 \cdot (\text{W/st.}).$$

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

Pour le soleil  $T = 6000^\circ\text{K} \implies \lambda_{\max} = 0,48 \mu$ .

III-4-6- Formules approchées de RAYLEIGH JEANS et WIEN:

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

$$R_{\lambda}^{cn} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp(-c_2/\lambda T).$$

Cette formule est applicable dans le cas du spectre visible et devient inexacte dans le domaine infrarouge. Pour  $\lambda T \ll 3000 \mu\text{K}$ , l'erreur commise est inférieure à 1%.

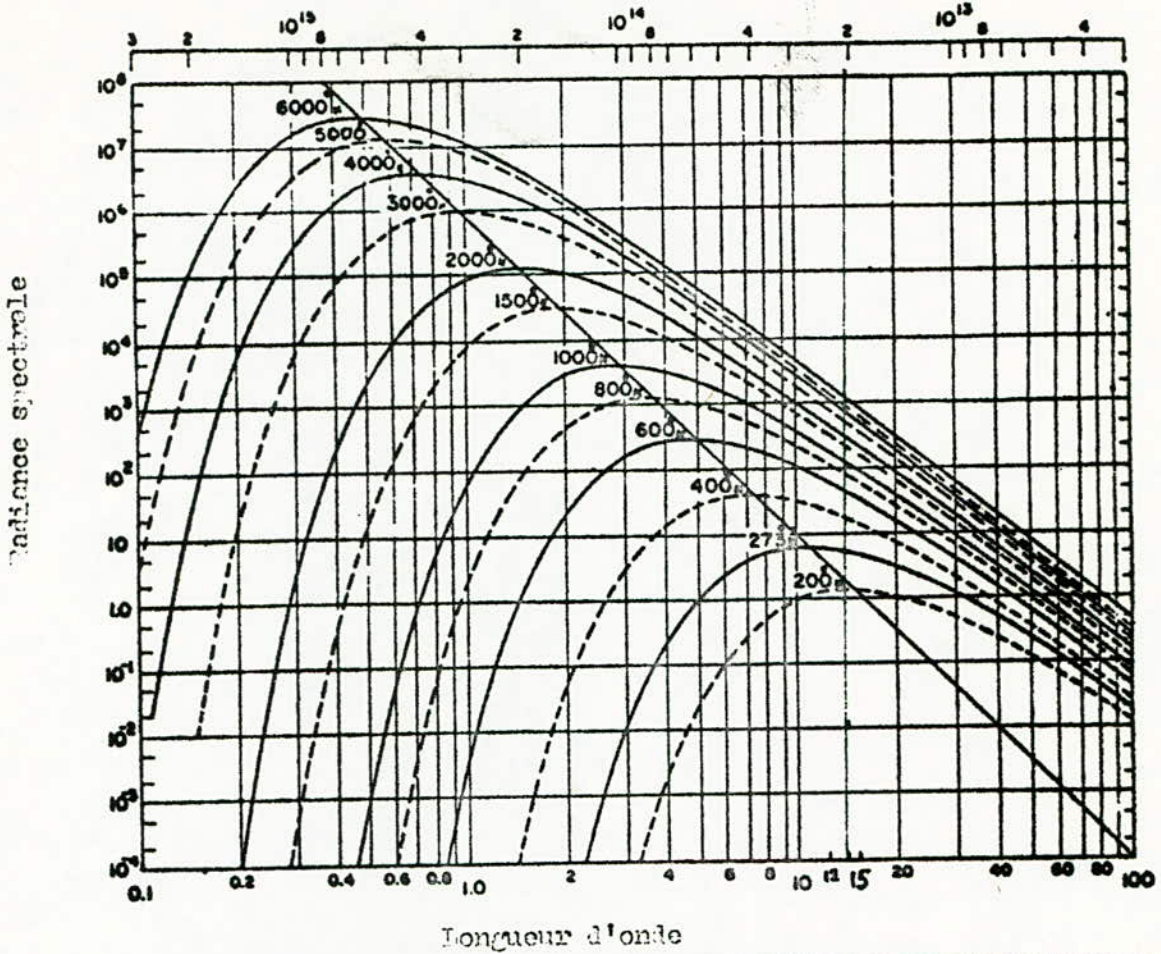
\* Quand  $\lambda T$  est grand, on obtient la formule de RAYLEIGH-JEANS applicable en infrarouge, soit:

$$R_{\lambda}^{cn} = \left(\frac{c_1}{c_2}\right) \cdot \lambda^{-4} \cdot T.$$

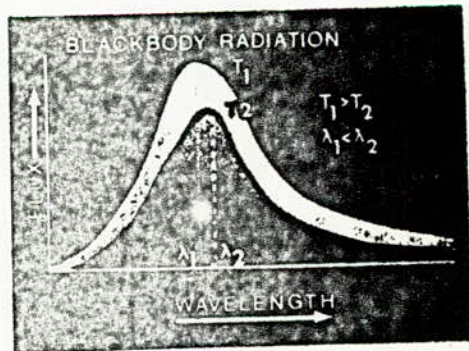
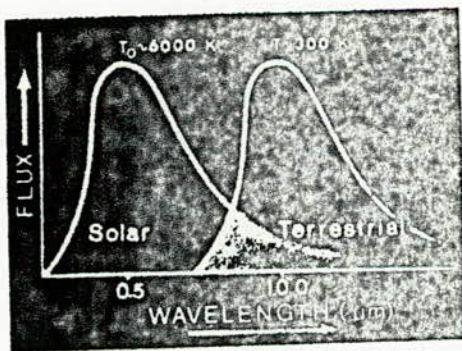
Pour les surfaces naturelles, les formules précédentes ne sont plus en général valables, du fait de l'apparition du phénomène d'émission. Pour cela, on introduit alors l'émissivité de ces surfaces qui indique la différence d'émission entre ces surfaces et celle du corps noir, à la même température.



Fréquence



Radiance spectrale du corps noir à diverses températures.  
 (la ligne droite passant par les maxima correspond à la loi de WIEN).



Rayonnement du corps noir

- à 6000°K pour le soleil.
- à 300°K pour la terre.

- pour deux températures différentes donnant deux  $\lambda_{max}$  différentes.

IV- EMISSIVITE ET REFLECTIVITE :

IV-1- EMISSIVITE :

IV-1-1- Définition:

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 rigoureusement 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 de 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:

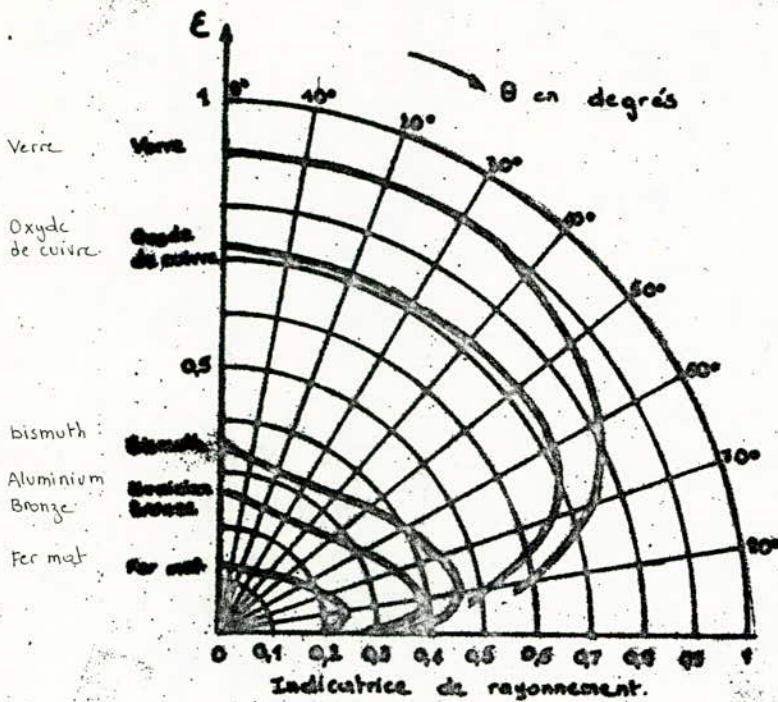
$$0 < \xi(\lambda, \theta, \varphi, T) < 1.$$

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  $\xi = \bar{\xi}$ . On peut donner la courbe de l'émissivité d'un corps en fonction de l'angle d'émission (Voir figure).

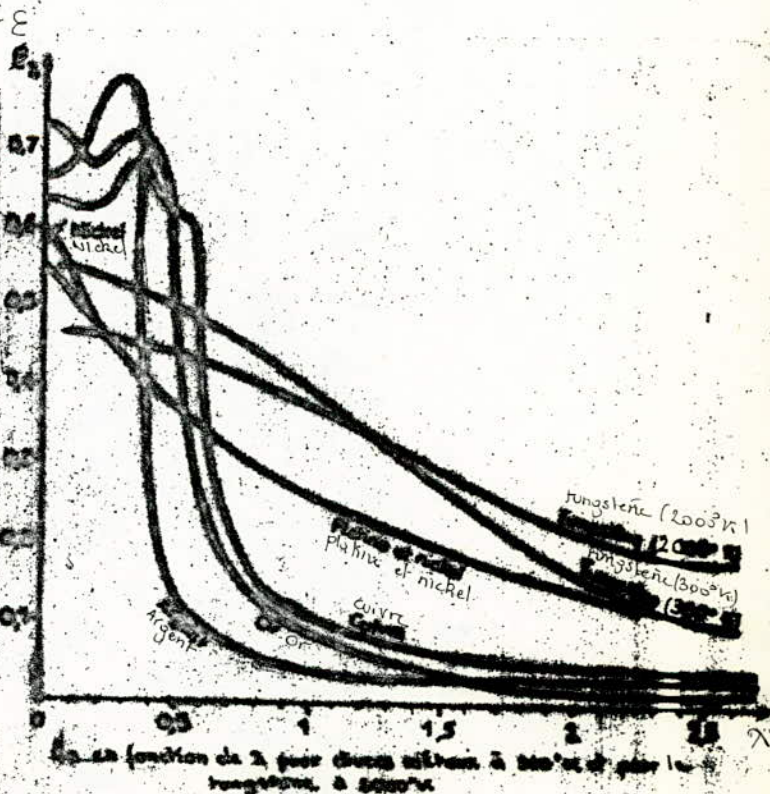


Cette figure donne les courbes de l'émissivité de certains corps, en fonction de l'angle d'émission. On voit que le verre et l'oxyde de cuivre ont une émissivité assez importante, pour des angles d'émission faibles (jusqu'à  $40^\circ$  pour le verre et  $60^\circ$  pour l'oxyde de cuivre), mais qui diminue rapidement au-delà.

Tandis que pour les autres corps, on remarque qu'ils ont une émissivité plus ou moins uniforme avec un maximum à  $\theta = 80^\circ$ .

On remarque sur cette figure que l'émissivité diminue rapidement avec la longueur d'onde; on peut en déduire que ces corps émettent faiblement dans le domaine infrarouge, et encore moins dans l'infrarouge thermique ( $\epsilon_\lambda < 0,1$ ). Pour un même corps et pour deux températures différentes, on remarque que l'émissivité augmente avec la température. d'où si on a  $T_1 > T_2$ , on aura:

$$\epsilon_1 > \epsilon_2$$



#### IV-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 de pénétration 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 dépend 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 végétation: Elle se comporte comme une surface rugueuse; son émissivité change peu 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:  $0,92 < \epsilon < 0,94$ .
- 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 est la suivante:

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4.$$

W : énergie rayonnée.

$\epsilon$  : émissivité.

T : température absolue.

$\sigma$  : constante de BOLTZMANN.

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

#### IV-2- REFLECTIVITE :

La réflectivité est une propriété des plus importantes en télédétection. Pour pouvoir la définir, il est nécessaire de définir les différents types de réflexions. Celles-ci interviennent dans le cas où le rayonnement traverse deux milieux d'indices de réfraction différents (atmosphère-sol). On peut avoir deux sortes 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 ( $\theta, \varphi$ ); celle-ci est valable pour les surfaces lisses.

Pour caractériser le phénomène de réflexion, il est nécessaire d'introduire une grandeur qui est la réflectivité. Suivant le type de réflexion qui se présente, on aura différentes sortes de réflectivité.

#### IV-2-1- Réflectivité directionnelle spectrale (spéculaire) :

On la définit de la façon suivante:

$$\rho_{\lambda}(\theta) = \frac{\text{Puissance spectrale réfléchi}^{\text{e}} \text{ dans la longueur d'onde incidente.}}{\text{Puissance spectrale incidente venant de la direction } \theta_1, \text{ dans l'angle } d\Omega_1.}$$

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

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta_i \cdot \\ \varphi_r &= \varphi_i + \Pi \end{aligned} \quad \Longrightarrow \quad d\Omega_r = d\Omega_i \cdot$$

$d\Omega_i$  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, la réflectivité se définit comme suit :

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{R_{r\lambda}(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot dS}{R_{i\lambda}(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot dS} = \frac{R_{r\lambda}(\theta)}{R_{i\lambda}(\theta)} = \frac{\text{Radiance réfléchi}}{\text{Radiance incidente}}$$

IV-2-2- Réflectivité bidirectionnelle dans le cas diffus :

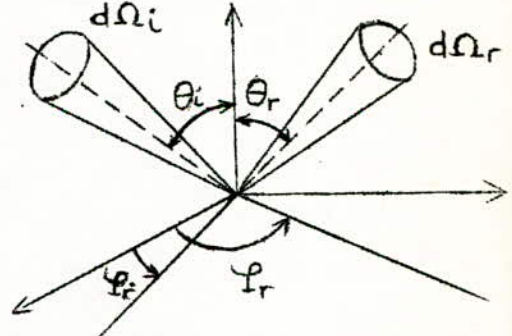
Puisqu'on a un rayonnement réfléchi dans toutes les directions, la réflectivité spectrale directionnelle n'est plus valable; on est alors amené à définir une réflectivité bidirectionnelle.

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 bidirectionnelle est définie comme suit :

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\text{Radiance réfléchi dans la direction } (\theta_r, \varphi_r)}{\text{Éclairement provenant de la source}}$$

En remplaçant l'éclairement par sa valeur, on aura :

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



Propriétés:

- Propriétés de symétrie-théorie de HELMOLTZ: En s'appuyant sur le principe du retour inverse du rayonnement électromagnétique, on comprend que l'on puisse écrire:

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho_b(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) \cdot$$

- Réflecteur Lambertien: C'est un réflecteur dont la réflectivité ne dépend pas des angles de réflexion  $\theta_r$  et  $\varphi_r$ ; on aura alors  $\rho_b = \text{constante}$ .
- Puissance réémise: La puissance réémise par un élément de surface  $dS$ , dans l'angle solide  $d\Omega$  est:

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

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

IV-2-3- Réfectivité 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:

$$\rho_{\lambda}(\theta, \varphi) = \frac{M_{r\lambda}}{E_{i\lambda}} = \frac{P_{r\lambda}}{P_{i\lambda}}, \quad (\text{Sans dimensions}).$$

En remplaçant chaque grandeur par son expression, on aura:

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

d'où

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

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

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:

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

IV-2-4- Relation entre les<sup>S</sup> réfectivités bidirectionnelle et directionnelle:

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

$$P_r = \rho(\theta_i, \varphi_i) \cdot R_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i \cdot dS.$$

- Dans le cas spéculaire, on a :

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

- 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 réfectivité bidirectionnelle, on peut mettre la réfectivité bidirectionnelle d'une surface spéculaire sous la forme:

$$\rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho_d(\theta_i, \varphi_i) \frac{\delta(\vec{\Omega}_i - \Omega_r)}{\cos \theta_i}.$$

avec:  $\delta(u - a) = \begin{cases} 0 & \text{si } u \neq a. \\ 1 & \text{si } u = a. \end{cases}$

V- METHODE DE MESURE DE L'EMISSIVITE ET DE LA TEMPERATURE DE SURFACE.

V-1- MESURE DE L'EMISSIVITE:

Le but de notre travail est de pouvoir mesurer la radiance d'un corps qui dépend de la température et de l'émissivité; il est donc nécessaire de mesurer ces deux paramètres.

V-1-1- Equation radiométrique:

Dans la mesure de l'émissivité, on aura à utiliser un appareil appelé radiomètre, qui est un instrument permettant de convertir le flux d'énergie traversant la pupille d'entrée ou encore la radiance, en une autre grandeur physique (tension par exemple). Cette grandeur de sortie dépend de la température, de l'émissivité et de la fonction de transfert de l'appareil.

Dans une direction  $\Delta(\theta, \varphi)$ , la radiance d'une surface visée par cet appareil a pour équation spectrale:

$$R_{\lambda}(\theta, \varphi) = \xi_{\lambda}(\theta, \varphi) \cdot R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T_s) + \rho_b(\theta, \varphi, \theta', \varphi') \cdot R'_{\lambda}(\theta', \varphi', T_t) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega_{\underline{t}}$$

$T_s$ : température de la surface visée.

$T_t$ : température de l'environnement.

$\rho_b$ : réflectivité bidirectionnelle.

$R'_{\lambda}$ : radiance de l'environnement.

$R_{\lambda}^{cn}$ : radiance du corps noir à la température  $T_s$ .

On remarque que si la radiance de l'environnement est constante, c'est à dire  $R'_{\lambda}(\theta, \varphi, T_t) = R'_{\lambda}(T_t) = Cste$ , l'équation précédente s'écrira alors:

$$R_{\lambda}(\theta, \varphi) = \xi_{\lambda}(\theta, \varphi) \cdot R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T_s) + \rho_d(\theta, \varphi) \cdot R'_{\lambda}(T_t).$$

$\rho_d$  est la réflectivité directionnelle et elle a pour expression:

$$\rho_d(\theta, \varphi) = \iint \rho_b(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r) \cdot \cos \theta_r \cdot d\Omega_r.$$

Comme on travaille dans la bande (8-14 $\mu$ ), on doit faire intervenir la réponse spectrale du radiomètre  $f(\lambda)$  dans cette bande (la fonction de transfert). Dans ce cas la radiance aura pour expression:

$$R(T_s, T_t) = \int_8^{14} R_{\lambda}(\theta, \varphi) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda.$$

En remplaçant  $R_{\lambda}(\theta, \varphi)$  par son expression donnée précédemment, on trouvera:

$$R(T_s, T_t) = \int_8^{14} \xi_{\lambda}(\theta, \varphi) \cdot R_{\lambda}^{cn}(\lambda, T_s) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda + \rho_d(\theta, \varphi) \cdot \int_8^{14} R'_{\lambda}(T_t) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda.$$



On considère le cas où  $\theta = 0$  car le récepteur se trouve dans la direction normale; les angles  $\theta$  sont comptés alors à partir de cette direction; on a:

$$R(T_s, T_t) = \xi_s(T_s) \cdot R^{cn}(T_s) + \rho_d(T_t) \cdot H(T_t).$$

avec

$$\rho_d(T_s) = \rho_d(0, T_s).$$

$$\xi_s(T_s) = \frac{\int_8^{14} \xi_\lambda(0, T_s) \cdot R_\lambda^{cn}(\lambda, T_s) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_8^{14} R_\lambda^{cn}(\lambda, T_s) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda}.$$

$$R^{cn}(T_s) = \int_8^{14} R_\lambda^{cn}(\lambda, T_s) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda.$$

$$H(T_t) = \int_8^{14} R'_\lambda(T_t) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda.$$

Comme on a vu précédemment, le radiomètre permet de convertir l'énergie rayonnée en un signal électrique S proportionnel à la radiance de la forme:

$$S = S(\xi, \rho, T_s, T_t) = K \cdot R(T_s, T_t).$$

$T_s$  et  $T_t$  sont deux grandeurs mesurables; de même que l'on peut avoir  $\xi$ , à partir de l'équation qui donne la radiance.

#### V-1-2- Méthode de mesure directe:

D'après IDSO et JACKSON, si l'émissivité  $\xi_s(\lambda, T)$  est indépendante de la longueur d'onde, c'est à dire  $\xi_s(\lambda, T) = \xi_s(T)$ , nous pouvons faire l'approximation suivante:

$$\rho_s(T_s) = 1 - \xi(T_s).$$

D'où, en remplaçant la réflectivité par son expression dans la formule donnant la radiance, on aura:

$$R(T_s, T_t) = \xi_s(T_s) \cdot R^{cn}(T_s) + \{1 - \xi_s(T_s)\} H(T_t).$$

Connaissant les termes  $R^{cn}(T_s)$ ;  $H(T_t)$ ;  $R(T_s, T_t)$  (c'est à dire connaissant les deux températures  $T_s$  et  $T_t$ ), on pourra évaluer l'émissivité.

Or, si  $T_s$  et  $T_t$  sont des constantes, on aura une équation linéaire entre  $\xi_s(T_s)$  et  $R(T_s, T_t)$  pour calibrer la droite.

$$R(T_s, T_t) = \xi_s(T_t) \cdot \{R^{cn}(T_s) - H(T_t)\} + H(T_t).$$

Il suffit de prendre deux surfaces d'émissivités connues.

La méthode directe n'est pas efficace car elle présente de nombreux inconvénients:

- Elle fait introduire un grand nombre de paramètres qui la rendent complexe.
- Les températures de surface ne sont jamais constantes vu la diversité des états de surface; il est donc difficile de linéariser l'équation précédente.
- Pour des surfaces de faible émissivité, la méthode de mesure directe consiste à chauffer la surface des corps pour que l'émission directe soit importante vis-à-vis du deuxième terme; mais, on peut atteindre les températures de fusion (donc le maximum de température) sans que le premier terme soit prépondérant.

V-1-3- Méthode de mesure active-passive corrélée :

Cette méthode consiste à faire deux mesures d'un même milieu; la première utilise une source passive (naturelle), la seconde introduit en plus une source active (artificielle).

Pour la première mesure, la valeur de la radiance  $R_1(\theta, \varphi, T)$  est de la forme:

$$R_1(\theta, \varphi, T) = I + I_1 + I_2 + I_3 = \{ (\theta, \varphi) \cdot R^{on}(T) + \rho(\theta_s, \varphi_s) \cdot R_s(\theta_s, \varphi_s) \cdot \cos \theta_s \cdot d\Omega_s + \iint \rho(\theta_a, \varphi_a) \cdot R_a(\theta_a, \varphi_a) \cdot \cos \theta_a \cdot d\Omega_a + \iint \rho(\theta_p, \varphi_p) \cdot R_p(\theta_p, \varphi_p) \cdot \cos \theta_p \cdot d\Omega_p \}$$

Dans le domaine infrarouge, c'est l'émissivité qui est important, donc la contribution principale est le premier terme.

Si on éclaire le milieu à l'aide d'une source délivrant une radiance  $R_i(\theta_i, \varphi_i)$  dans la même bande spectrale étudiée, le radiomètre va nous donner une autre valeur de la radiance  $R_2(\theta, \varphi, T)$ ; or, la radiance délivrée par la source n'est pas transmise intégralement au radiomètre mais seulement la partie réfléchi par la surface. La radiance reçue s'écrira alors :

$$R_2(\theta, \varphi, T) = I + I_1 + I_2 + I_3 + \rho(\theta_i, \varphi_i) \cdot R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$$

avec

$I$ : émission propre de la surface.      $I_1$ : réflexion du flux solaire direct.

$I_2$ : réflexion du flux atmosphérique.      $I_3$ : réflexion du flux de l'environnement.

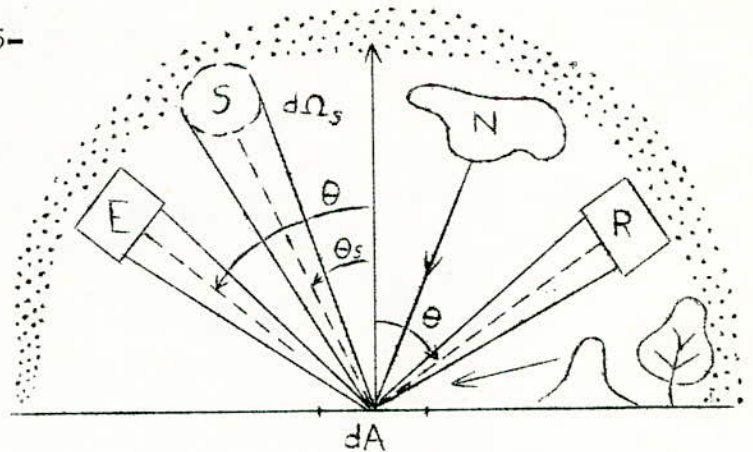
En faisant la différence des deux radiances précédentes, on trouvera :

$$D = R_2(\theta, \varphi, T) - R_1(\theta, \varphi, T) = \rho(\theta_i, \varphi_i) \cdot R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$$

Pour un angle  $\theta_i$  donné, la différence  $D$  varie linéairement avec la radiance, ce qui permet de déterminer celle-ci, puisque  $D$  est connue .

Mais, cette méthode n'est valable que si la température est constante, ce qui est le cas pour nous (mesures effectuées au laboratoire).

- S : soleil.
- N : nuage.
- E : source extérieure.
- R : radiomètre.
- ⋮ : atmosphère.
- V : végétation.



SCENE DE TELEDETECTION

Considérons un milieu irradié par une source; la direction d'incidence est repérée par  $(\theta_i, \varphi_i)$  par rapport à la normale à la surface. La puissance délivrée par la source dans l'angle solide  $d\Omega_i$  est donnée par:

$$dP = R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i.$$

Après interaction avec la surface, une partie de l'énergie est réfléchie dans la direction  $(\theta, \varphi)$ , tandis que l'autre est absorbée. On peut donc écrire:

$$dP = \iint_{\text{hémisphère}} \rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \cdot R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i + \alpha(\theta_i, \varphi_i) \cdot R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i.$$

Si la surface est en équilibre thermique, d'après la loi de KIRCHOFF, on peut écrire:

$$\alpha(\theta_i, \varphi_i) = \xi(\theta_i, \varphi_i).$$

$\xi$  et  $\alpha$  sont des valeurs moyennes dans la bande  $(8-14) \mu$ .

En simplifiant par  $R_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i$ , on obtiendra comme relation:

$$\xi(\theta_i, \varphi_i) = 1 - \iint \rho_b(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \cdot \cos \theta \cdot d\Omega = 1 - \rho_d(\theta_i, \varphi_i).$$

Cette méthode permet de mesurer l'émissivité sans passer par la température.

Remarque: Si  $\rho_b$  est constante, c'est à dire que la surface est Lambertienne, on aura:

$$\xi(\theta_i, \varphi_i) = 1 - \rho_b \iint \cos \theta \cdot d\Omega = 1 - \rho_b \Pi.$$

V-2- MESURE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE PAR RADIOMETRIE INFRAROUGE :

La meilleure méthode pour déterminer une température de surface consiste à utiliser les propriétés émissives du corps qui sont toutes fonction de la température. Comme les mesures se font à distance, les capteurs doivent présenter une très bonne sensibilité.

V-2-1- Principe:

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont les propriétés dépendent uniquement de la température, si ce corps est un corps noir.

L'énergie émise peut s'écrire:

$$W_e = \sigma \cdot T_s^4.$$

La mesure de cette énergie par le radiomètre nous permet d'obtenir simplement  $T_s$ .

Mais, dans le cas général, les corps dont on cherche à déterminer la température de surface ne sont pas des corps noirs, mais des corps gris dont l'émissivité n'est qu'une fraction de celle des corps noirs. Une partie du rayonnement incident sera renvoyée par réflexion, l'autre partie par diffusion.

L'énergie reçue par le radiomètre peut s'écrire alors:

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o .$$

$\phi_o$  : Energie reçue par la surface.  
 $\epsilon$  : Emissivité de la surface.

Cette méthode de mesure est d'autant plus efficace que les longueurs d'onde considérées pour l'analyse de  $\phi_o$  sont plus élevées (IR) et situées dans une gamme  $\Delta \lambda$  plus étroite.

V-2-2- Méthode de mesure:

Le radiomètre délivre à sa sortie une grandeur S fonction de l'énergie reçue par le détecteur ( $S = k \cdot R(\theta, \varphi)$ ). En première approximation, on peut dire que le flux énergétique reçu par le détecteur est proportionnel au flux d'énergie provenant de la surface à analyser.

Il est donc possible de relier S à l'énergie radiative de la forme  $\sigma \cdot T^4$  où T est appelée température radiative apparente et que l'on considère en première approximation comme la température de surface  $T_s$ . A l'aide de ce procédé, on peut tracer la courbe S(T) qui représente la courbe d'étalonnage instrumentale.

La mesure de la température apparente  $T_r$  consiste à assimiler à un corps noir, la surface dont on veut connaître la température. En utilisant la grandeur  $S$  mesurée et la courbe d'étalonnage, on en déduira simplement la température  $T_r$ .

L'approximation de  $T_r$  avec  $T_s$  introduit une erreur relative, que l'on peut calculer en utilisant le fait que les énergies théorique et mesurée sont égales.

L'énergie théorique s'écrit:  $W_t = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o$ .

L'énergie mesurée s'écrit :  $W_m = \sigma \cdot T_s^4$ .

On aura alors:  $\sigma \cdot T_r^4 = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o$ .

En exprimant  $T_r$  en fonction de  $T_s$ , on aura:

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o}{\sigma}}$$

L'erreur relative introduite sera alors:

$$\begin{aligned} \frac{T_s - T_r}{T_s} &= 1 - \frac{T_r}{T_s} = 1 - \frac{\sqrt[4]{\frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o}{\sigma}}}{T_s} \\ &= 1 - \sqrt[4]{\frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 + (1 - \epsilon) \cdot \phi_o}{\sigma \cdot T_s^4}} \end{aligned}$$

d'où :

$$\frac{T_s - T_r}{T_s} = 1 - \sqrt[4]{\epsilon + \frac{(1 - \epsilon) \cdot \phi_o}{\sigma \cdot T_s^4}}$$

On remarque que l'erreur commise sur la température dépend de l'énergie reçue par la surface  $\phi_o$ . En étudiant cette erreur en fonction de  $\phi_o$ , on pourra connaître la précision avec laquelle on donne  $T_s$ .

Le tableau suivant indique, en fonction de la précision souhaitée pour la mesure de  $T_s$ , faite à partir de  $T_r$ , la gamme acceptable du rapport  $\phi_o / \sigma \cdot T_s^4$ , dans le cas d'une émissivité de surface voisine de 0,95.

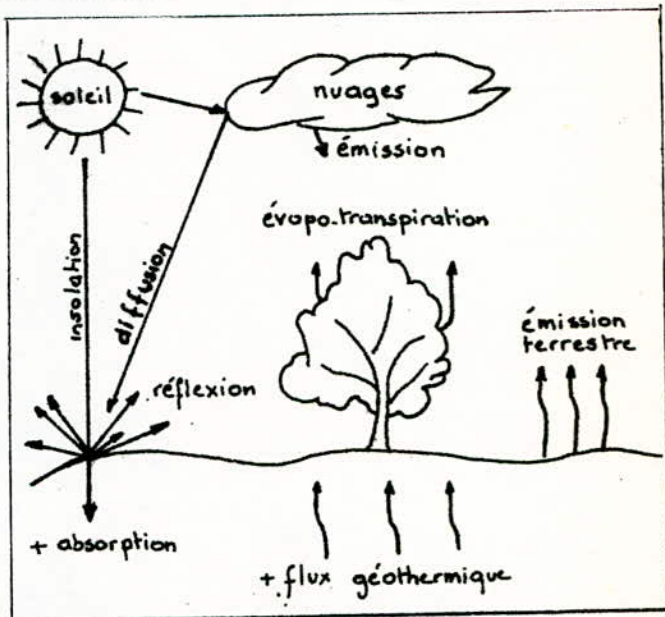
Précision	± 0,2°C	± 0,5°C	± 1,0°C	± 1,5°C
$\phi_o / \sigma \cdot T_s^4$	0,95 à 1,05	0,85 à 1,15	0,70 à 1,30	0,60 à 1,40

Ainsi, dans beaucoup de cas (ciel couvert, laboratoire, intérieur du couvert végétal), la température radiative peut représenter à  $\pm 1^\circ\text{C}$  près la température de surface. Suivant que  $\theta_0$  se trouve à l'extérieur de la plage  $(0,7-1,3)\sigma.T_s^4$ , l'erreur augmentera assez vite et pourra atteindre plusieurs degrés.

- PERTURBATION DE L'ATMOSPHERE :

-1- INTRODUCTION :

On a supposé auparavant que l'énergie captée par le radiomètre correspondait à l'émission propre de la terre. Malheureusement, la terre n'est pas seule à rayonner; l'échange thermique entre elle et le soleil se fait d'une façon continue. L'énergie rayonnée par le soleil parcourt une distance moyenne de l'ordre de  $1,5 \times 10^8$  km, avec une vitesse de  $3 \times 10^8$  m/s. Le flux qui arrive est de l'ordre de  $0,14 \text{ W/cm}^2$ . Cette énergie se répartie dans le spectre électromagnétique entier. La proportion de cette énergie qui est réfléchi par la terre est de 5% à 10%. Le taux d'absorption dépend de la structure.



Bilan d'énergie aux surfaces terrestres

-2- LES ELEMENTS ABSORBANTS DE L'ATMOSPHERE :

Une partie de l'énergie émise par la terre est absorbée par l'atmosphère. Cette absorption est due à plusieurs éléments.

- 2 - 1 - Le gaz carbonique  $\text{CO}_2$  :

C'est un élément très important pour l'absorption. Sa concentration dans l'atmosphère est constante (0,03% en volume). Les maximums d'absorption se localisent à  $2,7 \mu$ ;  $4,3 \mu$  et  $15 \mu$ .

- 2 - 2 - La vapeur d'eau :

Sa concentration dans l'atmosphère varie avec la température et les conditions météorologiques. Elle dépend de l'altitude mais elle devient négligable à partir de 10 km. Les bandes d'absorption maximales se situent à  $1,4 \mu$ ;  $1,9 \mu$ ;  $2,7 \mu$ ;  $6,3 \mu$ ; et à partir de  $25 \mu$ .

### VI - 2 - 3 - L'ozone $O_3$ :

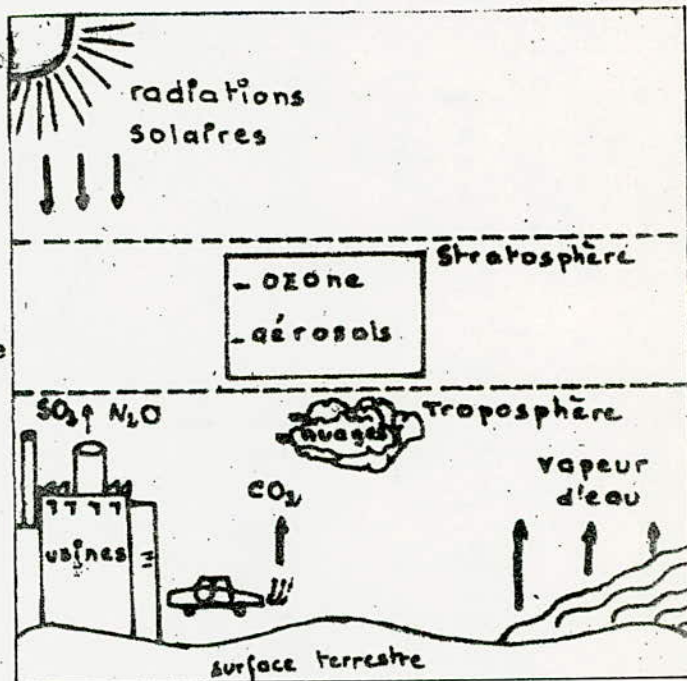
Sa présence n'est sensible qu'à des altitudes comprises entre 10 et 40km. L'absorption de cette couche est constante et est uniquement fonction de l'inclinaison du trajet par rapport à la verticale. La bande principale d'absorption est centrée sur  $9,6 \mu$ . Ces bandes définissent ce qu'on appelle "fenêtres de transparence". Ce sont des zones où l'influence de l'atmosphère est minimum donc où la transparence est maximum (voir figure page suivante).

### VI - 2 - 4 - Les particules liquides et solides :

Elles se composent de brouillard, de brumes et de nuages pour les liquides, et de nuages pour les solides. L'atténuation du rayonnement infrarouge par ces particules se superpose à l'absorption atmosphérique due aux éléments gazeux que nous venons de citer.

L'atténuation ici correspond à une absorption qui modifie la direction de propagation et à une diffusion qui influe sur la netteté des images.

La figure ci-contre représente les différents éléments de l'atmosphère et les divers gaz provenant de la surface terrestre qui interviennent dans l'absorption.



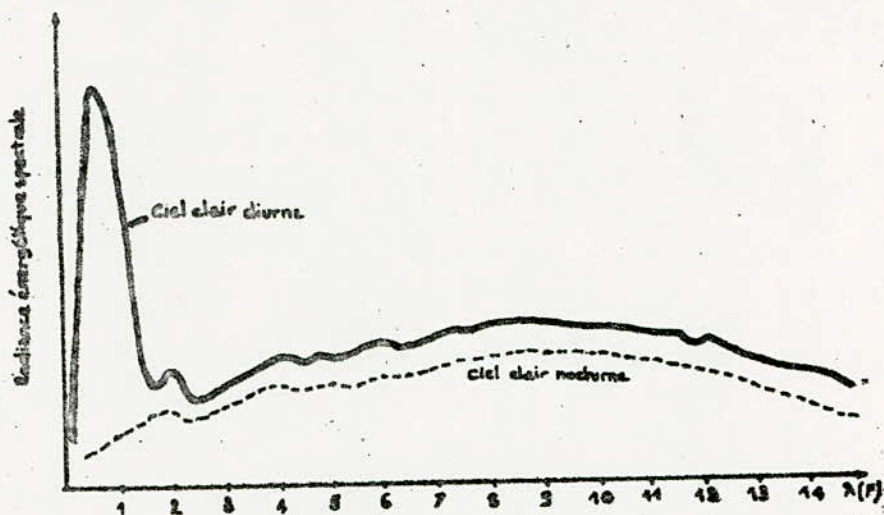
### VI-3- EMISSION DE L'ATMOSPHERE :

#### VI-3-1- Influence de l'atmosphère:

L'atmosphère peut être considérée comme un corps noir; toutes les propriétés de ce dernier sont donc applicables.

Pour pouvoir étudier convenablement l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement, on doit d'abord avoir une idée sur l'émission de celle-ci à différentes longueurs d'onde.

La figure suivante représente les courbes d'émission verticale.



Entre 0 et  $1,8 \mu$ , la courbe présente un maximum à  $0,45 \mu$  qui correspond à une émission très importante de l'atmosphère. Ceci est dû à la diffusion par les molécules d'air de la lumière solaire. Il est évident que cette grande émission va introduire des perturbations sur l'émission terrestre. Il sera donc nécessaire de l'éliminer quand on travaillera dans cette zone.

Dans notre cas, on travaille dans la bande  $8-14 \mu$  et l'influence de l'atmosphère peut être négligée.

#### VI-3-2- Réflexion des nuages:

Les nuages sont des réflecteurs puissants d'énergie solaire. Leur présence est très défavorable car la réflexion est maximum dans les fenêtres de transparence et minimum dans les zones interdites.

#### VI- DIFFUSION :

Elle est due aux aérosols (fumée, éléments de l'atmosphère, particules en suspension) de l'atmosphère. Selon la taille des particules par rapport à la longueur, on fait intervenir deux sortes de diffusion:

##### VI-4-1- Diffusion de RAYLEIGH :

Pour les longueurs d'onde plus grandes que les particules ( $\lambda > 10 R$ , avec  $R$ : rayon des particules). Elle consiste en une absorption du rayonnement incident par les molécules et en une ré-émission de ce dernier à la même fréquence, dans toutes les directions.



La puissance de l'onde diffusée s'écrit :

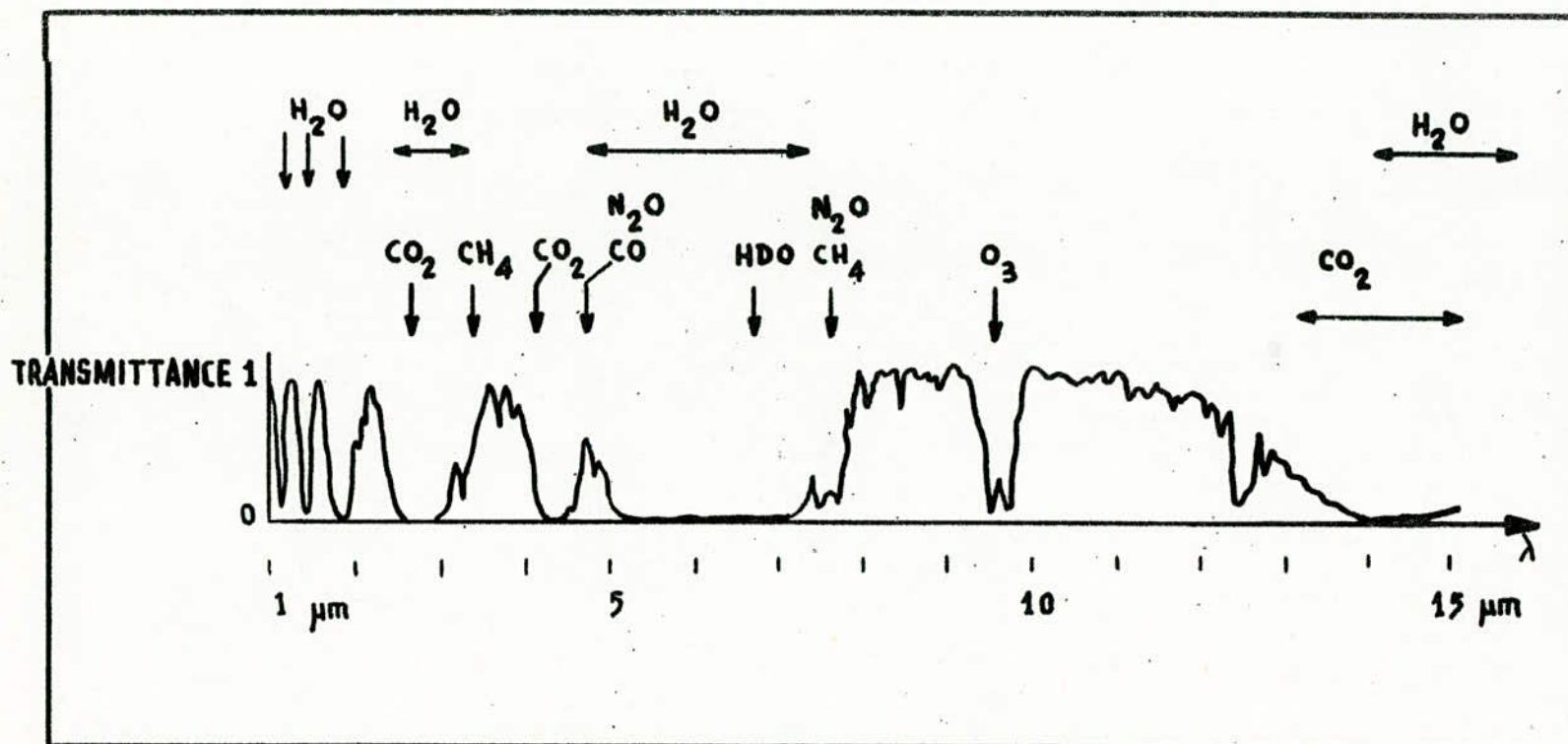
$$P = k \cdot \lambda^{-4} \cdot (1 + \cos^2 \theta). \quad \text{Loi de RAYLEIGH-CABANNES.}$$

$\theta$  : (rayon incident, rayon réfléchi).

Cette loi permet d'expliquer la couleur bleu du ciel et la couleur rouge du soleil. La couleur bleu ( $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ ) est beaucoup plus diffusée que la couleur rouge ( $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$ ). Au coucher, le nombre de molécules traversées augmente, donc le ciel devient plus bleu et le rayonnement incident contient une part plus importante de couleur rouge.

#### VI-4-2- Diffusion de MIE :

Pour les longueurs d'onde plus petites que les particules. La théorie de RAYLEIGH ne s'applique plus ici car l'énergie diffusée est indépendante de la longueur d'onde  $\lambda$ .



TRANSMITTANCE DE L'ATMOSPHERE (HAND BOOK OF GEOPHYSICS)

CHAPITRE II

ETUDE ET REALISATION

DE LA

CHAÎNE DE MESURE

## PLAN DU CHAPITRE II.

### A - INSTRUMENTATION DE L'EMISSION.

#### I- Différentes sortes de rayonnement.

I-1- Rayonnement des atomes

I-2- Rayonnement des molécules

I-3- Radiations des solides et des liquides

I-4- Radiations **thermiques**

#### II- Sources de rayonnement.

II-1- Sources au plasmas

II-2- Irasers et lasers

II-3- Sources thermiques

#### III- Etude et réalisation de l'émetteur infrarouge.

III-1- Schéma synoptique de l'émetteur

III-2- Le global

III-3- Optique

III-4- Modulation

III-5- Ventilation

III-6- Caractéristiques de l'émetteur

### B - INSTRUMENTATION DE LA RECEPTION.

#### I- Rappels sur la structure des semi-conducteurs.

#### II- Différentes sortes de détecteurs.

II-1- Photodétecteurs

II-2- Détecteurs thermiques

#### III- Paramètres des détecteurs.

III-1- Responsivité

III-2- Puissance équivalente au bruit

III-3- Détectivité

III-4- Réponse spectrale

III-5- Temps de réponse

III-6- Les bruits des détecteurs

IV- Réalisation du récepteur.

IV-1- Schéma synoptique du récepteur

IV-2- Optique

IV-3- Détecteur

IV-4- L'amplificateur

IV-5- Caractéristiques du récepteur infrarouge

En télédétection, on utilise souvent des sources naturelles comme le soleil, la terre, la lune, ect... Mais, ces sources ont l'inconvénient de ne pas être cohérentes; il a donc fallu concevoir des instruments dont le but est d'émettre des rayonnements, d'intensité et de longueur d'onde déterminées, et d'enregistrer l'énergie émise par la surface à étudier. Le but de notre étude consiste à réaliser une chaîne de mesure constituée d'un émetteur infrarouge et d'un récepteur, travaillant dans la bande (8-14)  $\mu$ , et utilisés à 3m du sol.

Une étude détaillée de chaque instrument s'avère donc nécessaire.

.....  
A- INSTRUMENTATION DE L'EMISSION.  
.....

L'opération de télédétection consiste à capter le rayonnement réfléchi par le milieu à étudier, éclairé préalablement par une source naturelle ou artificielle.

Voyons rapidement quelques sortes de rayonnements importants en télédétection, avant de voir plus en détails le rayonnement d'origine thermique, principalement utilisé dans les domaines de l'infrarouge et des micro-ondes.

I- DIFFERENTES SORTES DE RAYONNEMENT.

Le rayonnement électromagnétique est causé par une variation, au cours du temps, du champ électrique ou magnétique. Il existe diverses sortes de rayonnement.

I-1- Rayonnement des atomes:

Les changements d'orbites conduisent à des variations brusques des champs électrique et magnétique; il y a alors émission d'ondes électromagnétiques. Du fait que les orbites électroniques sont en nombre fini, les variations d'énergie sont quantifiées, d'où émission de rayonnements de fréquences déterminées.

La quantité d'énergie émise peut se mettre sous la forme:

$$Q = h \cdot \nu \cdot$$

avec  $\nu$ : fréquence du rayonnement émis.

### I-2- Rayonnement des molécules:

Suivant le mode de liaison entre les atomes constituant les molécules, on peut définir plusieurs sortes d'émissions.

- La liaison électronique est constituée par la mise en commun d'électrons ayant des orbites différentes de celles qu'elles occupent dans l'atome isolé. Les niveaux d'énergie leur correspondant sont fonction des caractéristiques de la molécule; par conséquent, les transitions électroniques conduisent pour chaque molécule à des émissions de fréquences bien précises.
- Dans la liaison chimique, les atomes peuvent vibrer les uns par rapport aux autres; les transitions de vibrations qui en découlent provoquent l'émission de rayonnements de fréquences données (proche infrarouge et visible).
- Les atomes sont animés d'un mouvement de rotation dont la vitesse est quantifiée; ainsi, les transitions de rotation nous donnent un troisième moyen d'émission de rayonnements (infrarouge, ondes radioélectriques).

### II-3- Radiations des solides et des liquides:

Dans les solides et les liquides, les orbites électroniques des atomes et des molécules sont déformées par les champs de forces dus à la présence d'atomes ou de molécules voisins; ce qui provoque une variation des possibilités de vibrations ou de rotations. On obtient un spectre continu dont les pics sont caractéristique du solide ou du liquide étudié.

### I-4- Radiations thermiques:

L'énergie thermique est l'énergie cinétique due aux mouvements aléatoires des particules d'un corps, qui ne peuvent se faire sans collisions. Celles-ci provoquent des modifications d'orbites électroniques, de vitesses de vibrations ou de rotations. Les transitions électroniques sont à l'origine d'émissions électromagnétiques. Ce genre de radiations sont principalement utilisées dans les domaines de l'infrarouge et des micro-ondes.

## II- SOURCES DE RAYONNEMENT.

On appelle source de rayonnement tout corps qui émet des radiations sous certaines conditions. Ce phénomène est dû à un changement de structure du corps excité. Suivant la nature de l'excitation, on distingue plusieurs sortes de sources.

## II-1- Sources au plasma.

Les plasma sont des gaz ionisés. Ils sont considérés comme sources de rayonnement émettant de la même façon que les corps noirs dans le spectre infrarouge. Parmi les sources appartenants à cette catégorie, on peut citer l'arc à mercure.

## II-2- Irasers et lasers.

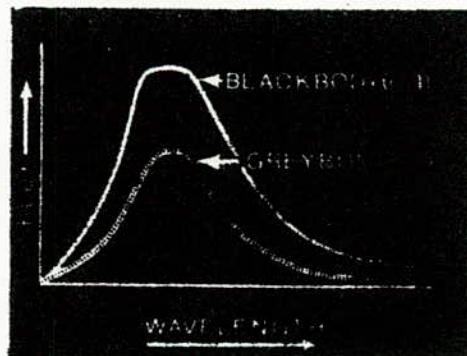
Ce sont des sources d'infrarouge émettant un rayonnement intense (des sources thermiques de 18000°K seraient nécessaires pour réaliser des intensités comparables), très directionnel (à 1/10 de degré près), concentré dans un intervalle spectral étroit et ayant un haut degré de cohérence.

Elles utilisent communément le principe du maser, lequel est un appareil constituant simultanément un amplificateur et un émetteur de radiations cohérentes (issues de sources actives).

Dans le domaine visible, on l'appelle laser (light amplification by stimulated emission of radiation), tandis que dans l'infrarouge, on l'appelle iraser (infrared amplification by stimulated emission of radiation).

## II-3- Sources thermiques.

Celles-ci émettent des radiations thermiques dues à l'augmentation de l'agitation des molécules. La source thermique idéale est le corps noir. On définit alors les corps gris comme étant des corps suivant la loi de PLANCK à un facteur près les caractérisant: c'est l'émissivité  $\epsilon$ , dépendant de la température de fonctionnement. Les sources thermiques les plus utilisées sont les métaux chauffés, les gaz chauffés, le global, le Nerst Glower, l'arc à carbone. La figure ci-contre représente les courbes du flux en fonction de la longueur d'onde du corps noir (corps idéal, donc  $\epsilon = 1$ ), et du corps gris ( $\epsilon < 1$ ).



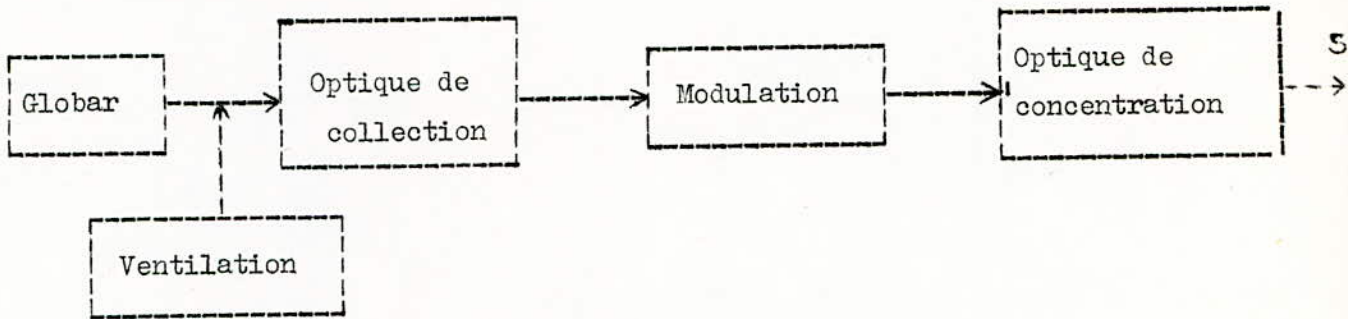
Puisqu'on travaille en infrarouge thermique, l'utilisation d'une source thermique s'avère indispensable. On utilisera alors le global qui servira de source de rayonnement.

Les caractéristiques de cet élément seront données par la suite.



III- ETUDE ET REALISATION DE L'EMETTEUR INFRAROUGE.

III-1- Schéma synoptique de l'émetteur:

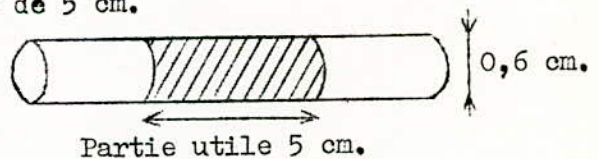


III-2- Le globar:

III-2-1- Généralités:

Le globar est la source la plus utilisée en infrarouge thermique. C'est un cylindre de carbure de silicium de  $10^{\text{cm}}$  de longueur et de 0,6 cm de diamètre. Il est caractérisé par sa très grande stabilité et sa faible sélectivité, ce qui permet de l'utiliser pour des mesures absolues à hautes températures.

Il est considéré comme un corps gris dont l'émissivité moyenne est de l'ordre de 0,85 dans la bande ( 2-40 )  $\mu\text{m}$ . Celle-ci diminue faiblement quand la longueur d'onde augmente. La puissance dissipée varie entre 90W et 200W; tandis que sa température de fonctionnement s'échelonne entre 1000°K et 1800°K. La partie utile rayonnante a une longueur de 5 cm.

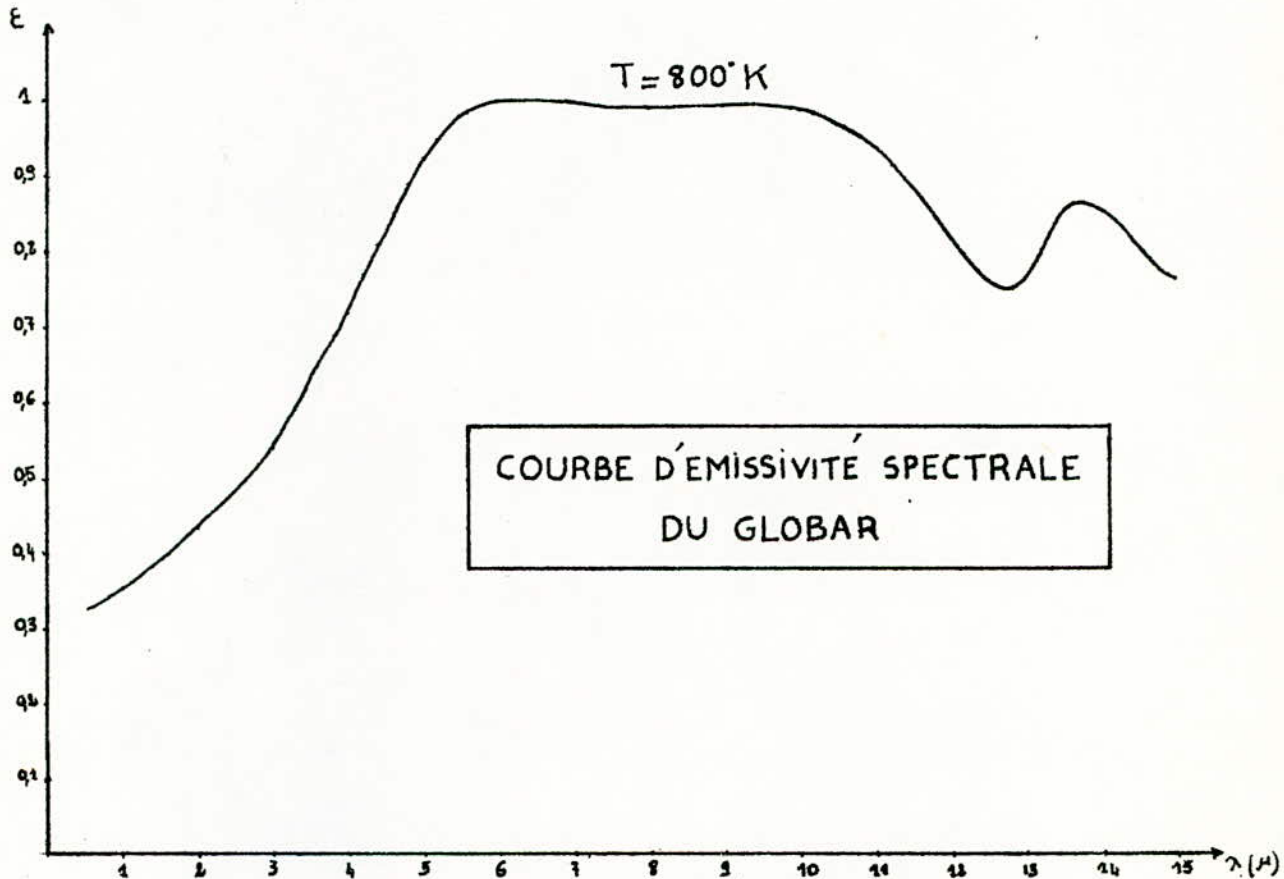


Caractéristiques du globar utilisé:

Puissance maximale	120W.
Température de fonctionnement	1000°K.
Alimentation	11v - 12A.
Domaine spectrale	2 - 20 $\mu$ .

III-2-2- Calcul de l'émissivité moyenne dans la bande (8-14) $\mu$  :

On a vu précédemment que le domaine spectral du global s'étendait de 2 $\mu$  à 20 $\mu$ . La figure suivante représente l'émissivité spectrale du global sur toute cette bande.



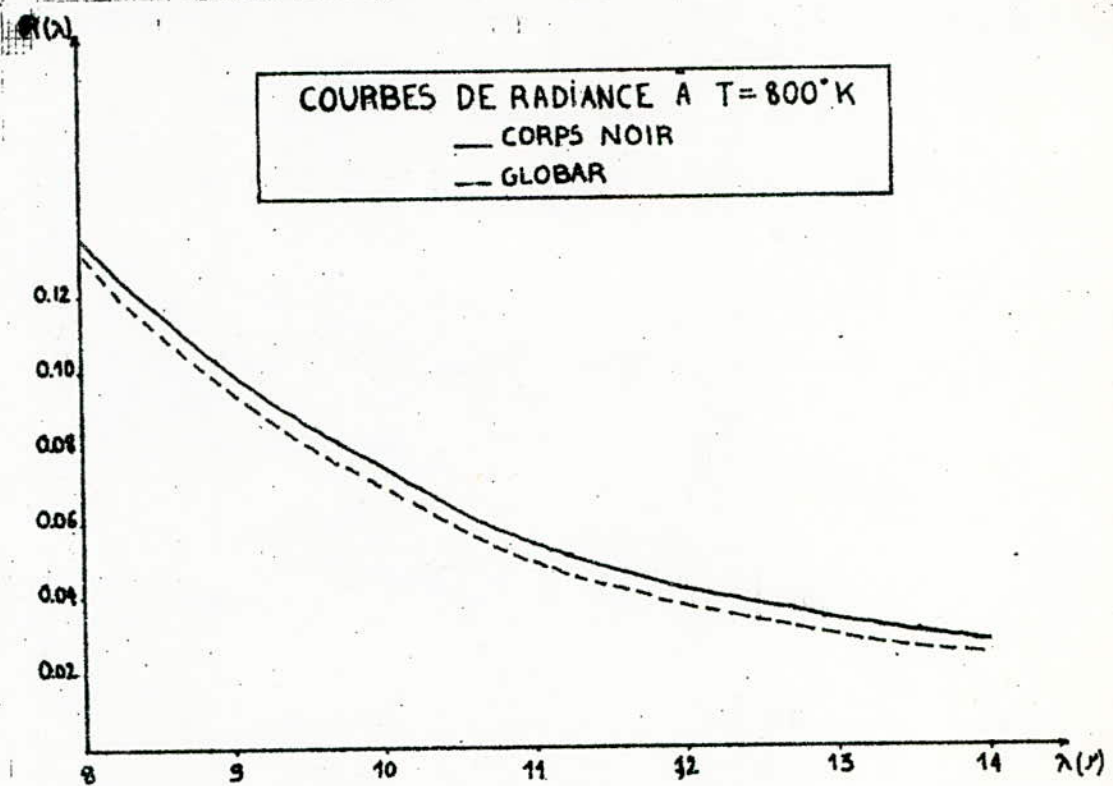
L'émissivité moyenne du global est 0,85 dans la bande (2-40) $\mu$ ; mais, puisqu'on travaille en infrarouge thermique, il serait intéressant de calculer cette grandeur dans le domaine (8-14) $\mu$ .

Pour cela, on doit utiliser la définition de l'émissivité moyenne dans la bande (8-14) $\mu$ , soit:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_8^{14} \epsilon_{gl}(\lambda) \cdot R^{cn}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_8^{14} R^{cn}(\lambda) \cdot d\lambda} = \epsilon(8-14) \mu.$$

D'après la formule, on voit que la connaissance de la radiance du global et celle du corps noir à la même température et sur toute la bande, est nécessaire; d'où l'emploi des courbes de ces deux corps.

La figure suivante les courbes de radiance du global et du corps noir à 800°K, dans la bande (8-14) $\mu$ .



Dans cette bande, la courbe de rayonnement du corps noir et celle du global sont très proches; on pourra donc considérer ce dernier comme tel par la suite.

Pour le calcul de l'émissivité moyenne, on a choisi la méthode programmable. Le programme de calcul se fait comme suit.

```

1          DIMENSION Y(20),Z(20)
2          READ 90,H,N
3          0018  READ 100(Y(I),I=1,N)
4          0040  CALL QSF(H,Y,Z,N)
5          0044  PRINT 200,(Z(I),I=1,N)
6          006C  STOP
7          005E  90  FORMAT(F4.2,I2)
8          006E  100 FORMAT(13F6.4)
9          006E  200 FORMAT(1X,13(1X,E10.4))
10         006E  END

```

```
11      C
12      C *****
13      C
14      C      SUBROUTINE QSF
15      C
16      C      PURPOSE
17      C      TD COMPUTE THE VECTOR OF INTEGRAL VALUES FOR A
18      C      GIVEN EQUIDISTANT TABLE OF FUNCTION VALUES.
19      C
20      C
21      C      DESCRIPTION OF PARAMETRES
22      C      H   THE INCREMENT OF ARGUMENT VALUES
23      C      Y   THE INPUT VECTOR OF FUNCTION VALUES
24      C      Z   THE RESULTING VECTOR OF INTEGRAL VALUES.
25      C      Z MAY BE IDENTICAL WITH Y
26      C      NDIM  THE DIMENSION OF VECTORS Y AND Z.
27      C
28      C      REMARKS
29      C      NO ACTION IN CASE NDIM LESS THAN 3.
```

Le programme complet de la résolution du calcul de l'émissivité moyenne est donné dans la page suivante.

7  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100  
101  
102  
103  
104  
105  
106  
107  
108  
109  
110  
111  
112  
113  
114  
115  
116  
117  
118  
119  
120  
121  
122  
123  
124

```

C      SUBROUTINE QSF(H,Y,Z,NDIM)
C
C      DIMENSION Y(1),Z(1)
C      HT=.3333333*H
C      IF(NDIM-5)7,8,1
C
C      NDIM IS GRETER THAN 5. PREPARATIONS OF INTEGRATION OF LOOP
1      SUM1=Y(2)+Y(2)
      SUM1=SUM1+SUM1
      SUM1=HT*(Y(1)+SUM1+Y(3))
      AUX1=Y(4)+Y(4)
      AUX1=AUX1+AUX1
      AUX1=SUM1+HT*(Y(3)+AUX1+Y(5))
      AUX2=HT*(Y(1)+3.875*(Y(2)+Y(5))+2.625*(Y(3)+Y(4))+Y(6))
      SUM2=Y(5)+Y(5)
      SUM2=SUM2+SUM2
      SUM2=AUX2-HT*(Y(4)+SUM2+Y(6))
      Z(1)=0.
      AUX=Y(3)+Y(3)
      AUX=AUX+AUX
      Z(2)=SUM2-HT*(Y(2)+AUX+Y(4))
      Z(3)=SUM1
      Z(4)=SUM2
      IF(NDIM-6)5,5,2
C
C      INTEGRATION LOOP
C      2
      DO 4 I=7,NDIM,2
      SUM1=AUX1
      SUM2=AUX2
      AUX1=Y(I-1)*Y(I-1)
      AUX1=AUX1+AUX1
      AUX1=SUM1+HT*(Y(I-2)+AUX1+Y(I))
      Z(I-2)=SUM1
      IF(I-NDIM)3,6,6
      AUX2=Y(I)+Y(I)
      AUX2=AUX2+AUX2
      AUX2=SUM2+HT*(Y(I-1)+AUX2+Y(I+1))
      Z(I-1)=SUM2
      Z(NDIM-1)=AUX1
      Z(NDIM)=AUX2
      RETURN
      Z(NDIM-1)=SUM2
      Z(NDIM)=AUX1
      RETURN
C      END OF INTEGRATTON LOOP
C
C      IF(NDIM-3)12,11,8
C
C      NDIM IS EQUAL TO 4 OR 5
C      8
      SUM2=1.125*HT*(Y(1))+Y(2)+Y(2)+Y(3)+Y(3)+Y(3)+Y(4)
      SUM1=Y(2)+Y(2)
      SUM1=SUM1+SUM1
      SUM1=HT*(Y(1)+SUM1+Y(3))
      Z(1)=0.
      AUX1=Y(3)+Y(3)
      AUX1=AUX1+AUX1
      Z(2)=SUM2-HT*(Y(2)+AUX1+Y(4))
      IF(NDIM-5)10,9,9
      AUX1=Y(4)+Y(4)
      AUX1=AUX1+AUX1
      Z(5)=SUM1+HT*(Y(3)+AUX1+Y(5))
      Z(3)=SUM1
      Z(4)=SUM2
      RETURN
C
C      NDIM IS EQUAL TO 3
C      11
      SUM1=HT*(1.25*Y(1)+Y(2)+Y(2)-.25*Y(3))
      SUM2=Y(2)+Y(2)
      SUM2=SUM2+SUM2
      Z(3)=HT*(Y(1)+SUM2+Y(3))
      Z(1)=0.
      Z(2)=SUM1
      RETURN
C      12
      END

```

Le programme établi précédemment nous permet de calculer l'aire limitée par l'axe des ordonnées, l'axe des abscisses, la courbe de radiance considérée, et la droite du point en abscisse choisie.

En choisissant comme pas 0,5, le programme permet de calculer l'aire limitée par les droites d'abscisse 8 et 8,5, ensuite l'aire limitée par les droites d'abscisse 8 et 9, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de l'aire limitée par les droites d'abscisses 8 et 14.

En utilisant successivement la courbe de radiance du global, ensuite celle du corps noir à 800°K, on peut calculer aisément les deux intégrales:

$$I_1 = \int_8^{14} R_{\lambda}^{cn}(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{et} \quad \int_8^{14} \epsilon_g \cdot R_{\lambda}^{cn}(\lambda) \cdot d\lambda = I_2.$$

Pour arriver à ce résultat, on prendra des points équidistants sur la courbe considérée.

Le tableau suivant nous donne les radiances des deux corps aux différentes longueur d'onde.

Longueur d'onde	Radiance du corps noir $R_{\lambda}^{cn}$	$\epsilon_g$ du global	Radiance du global $R = \epsilon \cdot R_{\lambda}^{cn}$
8	0,1370	0,99	0,1356
8,5	0,1180	0,99	0,1170
9	0,0990	0,99	0,0980
9,5	0,0860	0,985	0,0847
10	0,0740	0,98	0,0725
10,5	0,0630	0,96	0,0605
11	0,0540	0,92	0,0497
11,5	0,0470	0,88	0,0414
12	0,0410	0,82	0,0336
12,5	0,0380	0,75	0,0285
13	0,0340	0,78	0,0265
13,5	0,0300	0,87	0,0261
14	0,0300	0,85	0,0229

Les résultats obtenus par la méthode programmable sont les suivants:

$$I_1 = 1,517$$

$$I_2 = 1,401$$

$$\text{d'où} \quad \bar{\epsilon} = \frac{1,401}{1,517} = 0,924$$

$$\bar{\epsilon} = 0,924$$

III-2-3- Estimation de la puissance rayonnée par le globalar:

La partie utile du globalar, c'est à dire celle qui émet, a une surface S:

$$S = 2 \pi \cdot r \cdot d. \quad \text{avec } r : \text{ rayon du globalar.}$$
$$d : \text{ longueur de la partie utile.}$$

$$S = 2 \pi \cdot 0,35$$

$$S = 9,425 \text{ cm}^2.$$

La loi de STEPHAN nous permet de déterminer la radiance du corps noir à 1000°K, soit:

$$R_0 = \sigma \cdot T^4 = 5,6687 \text{ W/cm}^2.$$

Dans la bande (8-14) $\mu$ , la radiance énergétique du globalar est donnée par:

$$R(\Delta\lambda) = \xi \cdot \left( \int_8^{14} R^{cn}(\lambda, T) \cdot d\lambda \right) \cdot R^{cn}.$$

La valeur de l'intégrale a été calculée précédemment dans le programme.

$\bar{\xi}$  : émissivité moyenne du globalar dans la bande (8-14) $\mu$  = 0,924.

d'où

$$R(\Delta\lambda) = 0,7945 \text{ W/cm}^2.$$

L'énergie rayonnée par le globalar est donc:

$$E = R(\Delta\lambda) \cdot S = 0,7945 \times 9,425 = 7,489 \text{ W.}$$

$E = 7,489 \text{ W.}$
------------------------

III-3- Optique :

III-3-1- Optique de collection:

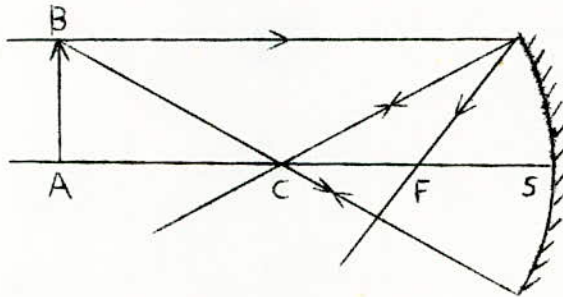
Du fait de la multidirectionnalité du rayonnement du globalar, et pour avoir un bon rendement, l'utilisation d'un réflecteur est nécessaire. Celui-ci a pour but de collecter le rayonnement émanant du globalar puis de le réfléchir de façon à le concentrer dans une direction bien déterminée. Ce réflecteur doit être caractérisé par sa grande réflectivité; de plus, il doit être protégé contre les hautes températures dues à l'échauffement du globalar. On utilise pour cela un miroir dont la concavité permet de capter le plus de rayonnement issu du globalar, de façon à l'envoyer dans une direction privilégiée.

On sait que tout miroir est caractérisé par son axe principal, son centre et son foyer (ou point focal).

On utilisera pour la construction géométrique du rayon optique, les propriétés suivantes:

- Le rayon incident parallèle à l'axe optique se réfléchit en passant par le foyer.
- Le rayon incident passant par le foyer se réfléchit parallèlement à l'axe optique.
- Le rayon incident passant par le centre se réfléchit sur lui-même.

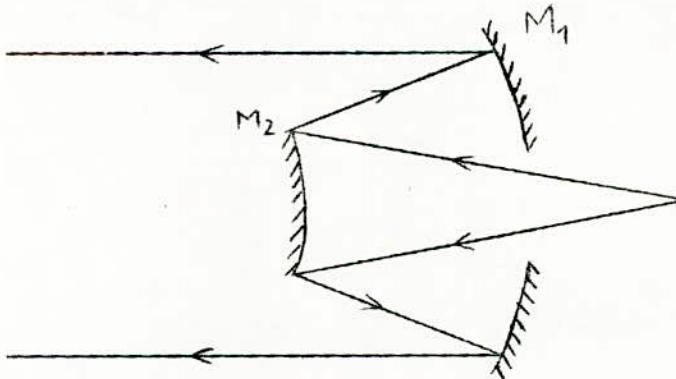
Le schéma suivant regroupe toutes ces propriétés.



Soit S le point d'intersection de l'axe optique avec le miroir. Si F est le foyer du miroir et C son centre, on aura par hypothèse  $\overline{CF} = \overline{FS} \Leftrightarrow \overline{CS} = 2\overline{FS} \rightarrow F$  est le milieu de CS.

### III-3-2- Optique de concentration:

Sa fonction principale est d'envoyer l'énergie rayonnée par le globe sur la surface à étudier sous forme de faisceaux parallèles. Pour cela, on utilise un système optique appelé "Cassegrain", constitué de deux miroirs comme le montre la figure suivante.

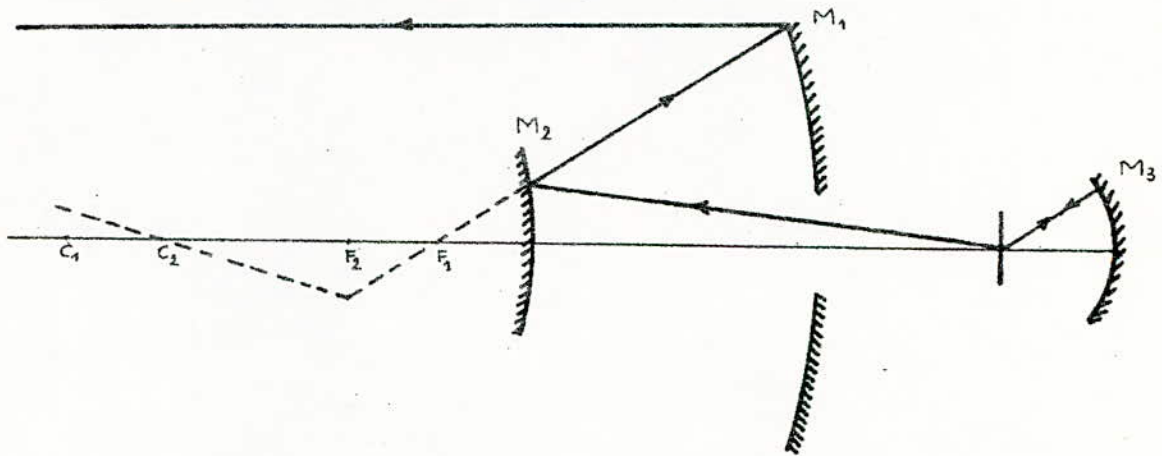


$M_1$  est un miroir concave qui a la propriété de laisser passer les rayons dans la région centrale, sans déviation.

$M_2$  est un miroir convexe dont les dimensions seront données plus loin.



### III-3-3- Fonctionnement du système optique :



Le global est placé sur le centre du miroir  $M_3$ , de façon à ce que tous les rayons incidents soient réfléchis sur eux-mêmes. On aura donc deux sources formées par le global et son image (ce qui augmente le rendement). Pour que les rayons sortant de l'émetteur soient parallèles, il faut que ceux provenant du centre de  $M_3$  aient une certaine incidence. D'après la figure, on voit que cet angle d'incidence dépend de la position du global, elle-même liée à la distance séparant les deux miroirs. On doit donc faire un compromis entre ces deux quantités pour satisfaire à la condition de parallélisme des rayons.

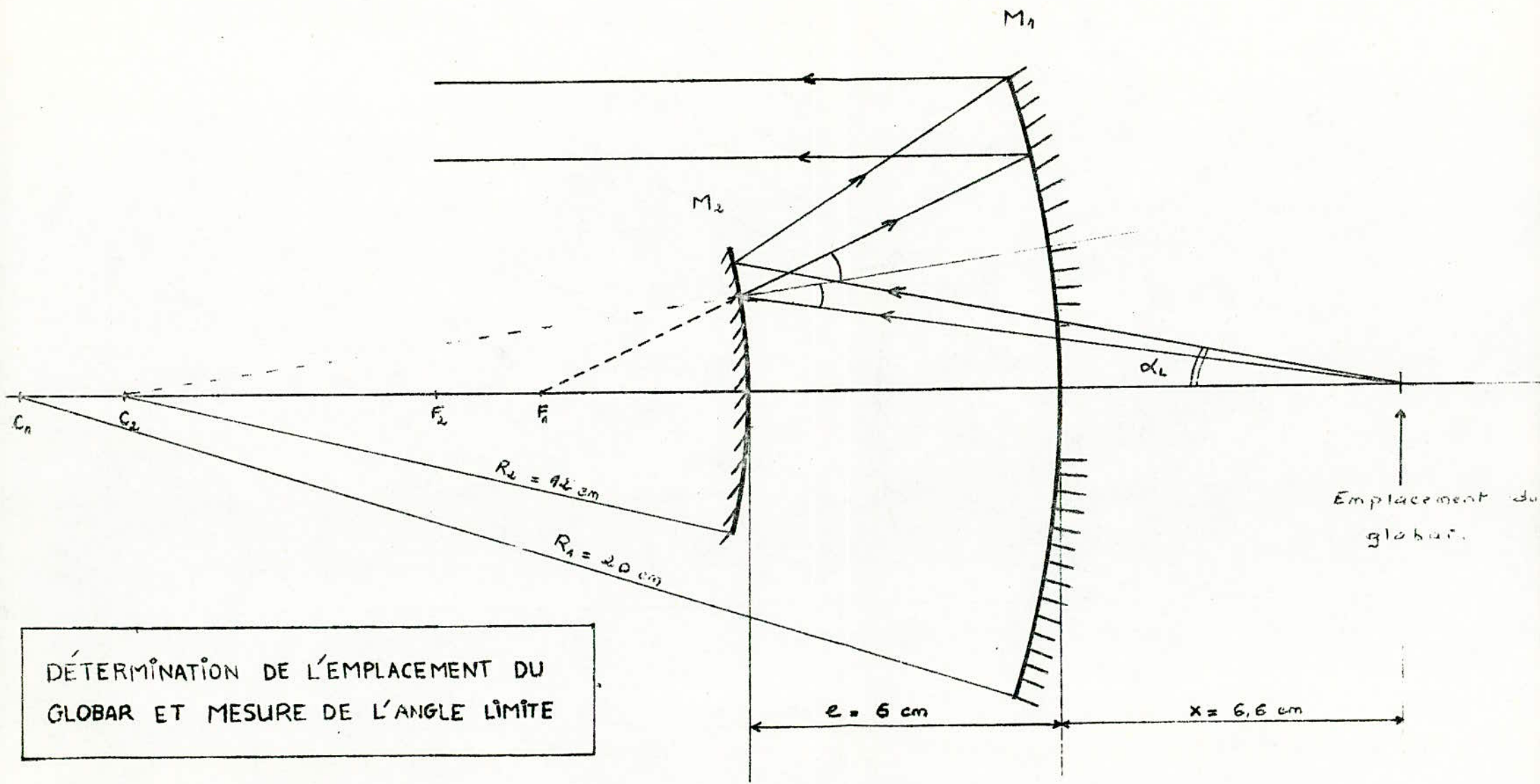
Ce compromis tiendra compte des dimensions de tout le système et de la protection du miroir  $M_1$  contre les hautes températures du global.

Une construction géométrique à l'échelle, nous donnera, comme le montre la figure de la page suivante, pour une distance entre les deux miroirs  $e = 6$  cm, une position du global à  $x = 6,6$  cm; pour avoir des rayons parallèles, l'angle limite est  $\alpha_L = 11^\circ$ .

### III-4- Modulation:

On verra par la suite que le détecteur n'est sensible qu'à des signaux pulsés. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un modulateur ayant pour but de chopper le signal émis par le global. D'autre part la modulation permet de réduire le bruit, ce qui augmente le rapport S/B à la sortie de l'amplificateur.

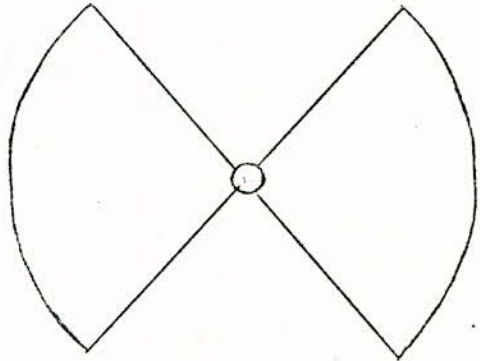
Les modulations électroniques et mécaniques sont les plus couramment utilisées. La première n'étant pas possible à réaliser vu que le courant débité par l'alimentation est trop important; on est amené alors à faire une modulation mécanique.



DÉTERMINATION DE L'EMPLACEMENT DU GLOBAL ET MESURE DE L'ANGLE LIMITE

Le modulateur est constitué ~~essentiellement d'un moteur entraînant une~~  
~~pôle de faible émissivité, pour ne pas perturber le rayonnement du global; pour~~  
 cela, on prendra une pôle en inox poli. La forme des signaux obtenus est en relation  
 directe avec celle de la pôle. Pour obtenir des signaux pulsés, il nous faut utiliser  
 une pôle de forme adéquate (Voir figure).

La fréquence de rotation du modulateur  
 peut varier entre 1 et 100 Hz. Elle doit  
 être choisie de façon à ce que chaque  
 impulsion puisse être perçue par le  
 détecteur. De même et dans le but de  
 maximiser le chopping, il faudrait placer  
 le modulateur dans une position telle que  
 tout le faisceau soit affecté. On mettra  
 donc celui-ci à proximité de la partie  
 centrale du miroir  $M_1$ .

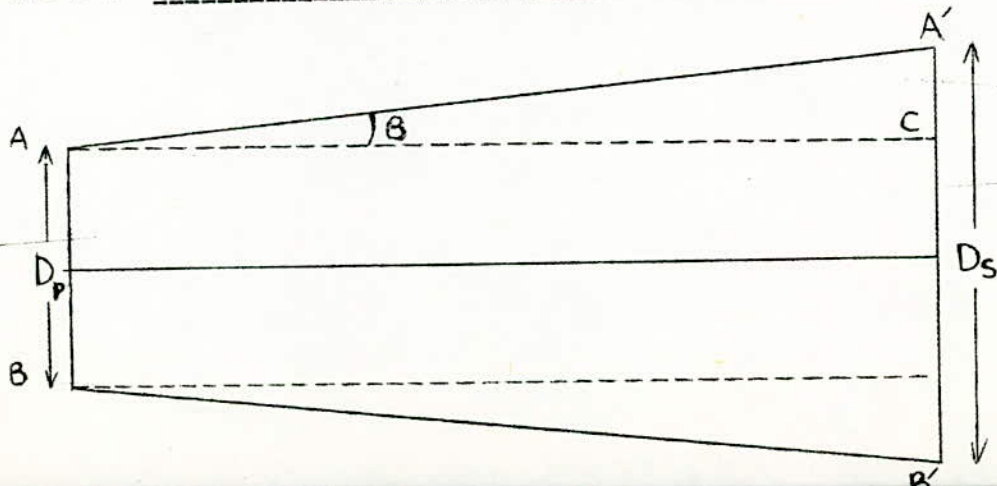


III-5- Ventilation:

Etant donné que la température de fonctionnement du global peut atteindre  
 1000°K, il s'avère nécessaire d'introduire un système de ventilation. Celui-ci est  
 constitué d'un moteur entraînant une hélice qui permet d'évacuer l'air chaud par  
 les trous d'aération. Il est placé de manière à éviter l'échauffement des éléments  
 de tout le système.

III-6- Caractéristiques de l'émetteur:

III-6-1- Calcul de l'angle d'ouverture de l'émetteur:



AB : pupille de sortie de l'émetteur de diamètre  $D_p$ .

A'B' : surface éclairée par l'émetteur, de diamètre  $D_s$ .

$\beta$  : angle d'ouverture.

D'après la figure précédente, l'angle d'ouverture est donné par la relation:

$$\beta = \arctg \frac{A'C}{A C} = \arctg \left( \frac{D_s - D_p}{2D} \right)$$

d'où, l'ouverture angulaire, qui s'exprime en unité d'angle solide, est donnée par:

$$\Omega = 2 \cdot \Pi (1 - \cos \beta).$$

En prenant  $D_p = 11\text{cm}$ ,  $D_s = 25\text{cm}$  (que l'on précisera par la suite),  $D = 300\text{cm}$ ,

ON aura

$$\Omega = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{str.}$$

### III-6-2- Récapitulatif des caractéristiques de l'émetteur:

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| * Domaine spectral              | 2 - 20 $\mu$  |
| * Température de la source      | 1000°K (max)  |
| * Ouverture angulaire           | $1,7 \cdot 10^{-3}$ str.  |
| * Puissance électrique dissipée | 120W (max).   |
| * Fréquence de modulation       | 10Hz à 100Hz.   |
| * Configuration optique         |   |
| - Cassegrain                    | $M_1$ : $\phi = 12\text{cm}$ , foc = 10cm (pyrex aluminisée).                                       |
|                                 | $M_2$ : $\phi = 5,5\text{cm}$ , foc = 6cm ( " " " ).  |
| - Collection                    | $M_3$ : $\phi = 6\text{cm}$ , foc = 2,5cm ( " " " ,<br>protégée contre les<br>hautes températures). |

B- INSTRUMENTATION DE LA RECEPTION.

En télédétection, les récepteurs ou capteurs sont des instruments qui reçoivent et enregistrent l'énergie émise par la surface à étudier. Ils sont caractérisés par

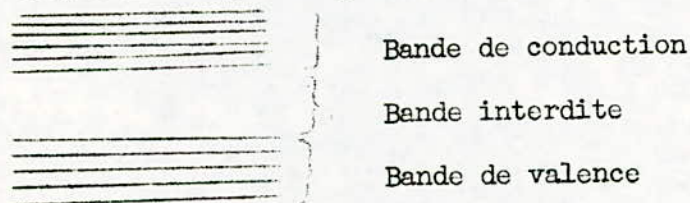
- Leur bande spectrale.
- Leur pouvoir d'analyse spatiale.
- Leur sensibilité (NEP).
- Leur fidélité.
- Leur précision (très importante en haute altitude).

L'élément essentiel du capteur est le détecteur. Il est basé sur le mode d'interaction existant entre le rayonnement incident et le semi-conducteur. Pour expliquer l'effet de cette interaction, on doit faire un rappel sur les propriétés des semi-conducteurs.

I- RAPPELS SUR LA STRUCTURE DES SEMI-CONDUCTEURS.

On sait que les électrons dans les atomes ne peuvent pas acquérir n'importe quelle énergie; il en est de même pour un électron dans un cristal, où les électrons peuvent avoir certaines énergies et non d'autres, ce qui s'explique par la théorie de la mécanique quantique. Le principe d'exclusion de PAULI énonce que deux électrons seulement peuvent occuper un même niveau d'énergie en ayant des spins opposés.

Les niveaux d'énergie occupés par les électrons du cristal sont très rapprochés; on dit qu'ils forment une bande. Les bandes d'énergie permises intervenant dans les phénomènes de conduction électronique sont les bandes de valence et de conduction séparées par la bande interdite.



Les électrons de la bande de valence peuvent passer à la bande de conduction s'ils reçoivent une énergie suffisante, c'est à dire supérieure au gap, caractéristique à chaque type de semi-conducteur.

## II- DIFFERENTES SORTES DE DETECTEURS INFRAROUGES.

Les détecteurs infrarouges transforment l'énergie thermique provenant des radiations électromagnétiques incidentes en d'autres formes d'énergies, dans la plupart des cas électrique.

Il existe deux types de détecteurs, suivant l'interaction qui a lieu entre la radiation incidente et l'élément sensible du détecteur, les photodétecteurs et les détecteurs thermiques.

### II-1- Photodétecteurs.

Ce sont des détecteurs basés sur l'effet photo. Il existe 4 formes d'effet photo, comme suit.

#### II-1-1- Effet photoconductif:

Il est basé sur le changement de la conductivité, dû à l'addition des porteurs. La conductivité dans un semi-conducteur est donnée par la relation:

$$\sigma = e (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p).$$

avec

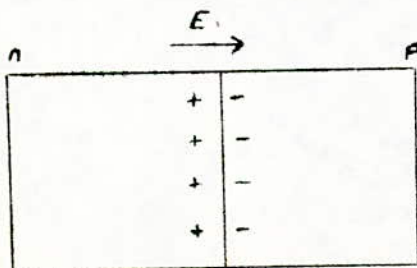
- $n$  : nombre d'électron par unité de volume.
- $p$  : densité des trous par unité de volume.
- $\mu_n$  : mobilité des électrons.
- $\mu_p$  : mobilité des trous.

#### II-1-2- Effet photoémissif:

Il est basé sur l'émission d'un électron qui s'échappe de la surface du matériau, après absorption d'un photon d'énergie  $h\nu$ ; il sera donc capable de franchir la barrière de potentiel  $V_0$ . Ceci se traduit par la relation:

$$W = h \cdot \nu \geq eV_0.$$

#### II-1-3- Effet photo voltaïque:



Il y a apparition d'une différence de potentiel due à l'illumination d'une jonction par le rayonnement incident. Cette ddp est due au champ interne créé au niveau de la jonction. son expression est:

$$V_d = \frac{KT}{e} \text{Log} \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}.$$

avec

- $N_a$  : concentration des majoritaires dans le type P.
- $N_b$  : concentration des majoritaires dans le type N.
- $n_i$  : concentration intrinsèque.

#### II-1-4- Effet photoélectromagnétique:

Il est basé sur l'éclairement d'un semi-conducteur intrinsèque placé dans un champ électromagnétique externe, perpendiculairement à la surface, ce qui provoque la déviation des électrons libres et des trous, d'où création d'une différence de potentiel.

#### II-2- Détecteurs thermiques.

L'effet thermique se caractérise par l'interaction des radiations incidentes avec le semi-conducteur, produisant ainsi son échauffement. Comme détecteurs thermiques, on peut citer les bolomètres, les thermopiles, les thermocouples, les détecteurs pneumatiques et les détecteurs pyroélectriques.

##### II-2-1- Les bolomètres:

Ce sont des détecteurs thermiques dans lesquels le signal est engendré par les variations de conductance de l'élément sensible, dues à son élévation de température. L'élément sensible est composé soit d'un fil métallique de nickel ou de platine (bolomètres métalliques), soit d'un semi-conducteur (thermistances). Il est en général placé dans l'une des branches d'un pont de Wheastone. Les variations de conductance déséquilibrent le pont, ce qui provoque un courant.

##### II-2-2- Les thermocouples (ou thermopiles):

Ce furent les premiers détecteurs d'infrarouge, après l'expérience de Herschel. Il est constitué de deux métaux différents, soudés à leur extrémités, ce qui donne une soudure chaude et une soudure froide. Le rayonnement incident va faire chauffer l'une des soudures, l'autre restant à température constante. Le circuit ainsi obtenu est le siège d'une f.e.m.

Les couples de métaux les plus utilisés dans les thermocouples sont (fer-bismuth); (antimoine-bismuth); (argent-bismuth); (argent-tellure); (cuivre-constantan); (manganèse-constantan).

Le facteur essentiel d'un thermocouple est son coefficient thermoélectrique

$\beta$ , définit par:

$$\beta = \frac{S}{T} \text{ exprimé en } V/^{\circ}K.$$

II-2-3- Détecteurs pneumatiques:

C'est un thermomètre à gaz dans lequel l'énergie incidente est transformée en une élévation de température d'un volume de gaz, puis en un signal électrique. Il est constitué d'une chambre à gaz munie d'une fenêtre transparente et comportant une surface absorbante; le fond de cette chambre est composé d'un mince diaphragme métallique formant l'une des armatures d'un condensateur dont les variations de capacité, correspondant aux déformations de la membrane, sont mesurées au moyen d'un pont.

II-2-4- Détecteurs pyroélectriques:

Certains matériaux possèdent un axe unique le long duquel existent des moments dipolaires électriques permanents, neutralisés par les charges libres. Si la température du matériau change, il y a altération de ces moments; on parle alors d'effet pyroélectrique.

Un changement de température  $\Delta T$  génère une variation de tension  $\Delta V$ , telle que:

$$\Delta V = \frac{4 \cdot \Pi \cdot d}{\epsilon} \left( \frac{dP}{dT} \right) \cdot \Delta T.$$

avec

d : épaisseur de l'élément sensible.

$\epsilon$  : constante diélectrique.

$\frac{dP}{dT}$  : coefficient pyroélectrique en  $^{\circ}C \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$  (changement instantané de polarisation en fonction du changement de température).

On aura donc, pour la valeur du courant créé, l'expression:

$$i = \frac{dv}{dt} = A \cdot \left( \frac{dP}{dT} \right) \cdot \frac{dT}{dt}.$$

III- PARAMETRES DU DETECTEUR.

III-1- Responsivité:

En général, on voit apparaître la proportionnalité du signal de sortie S et de la puissance incidente P. Si l'on suppose que P(t) est une fonction périodique du temps, de fréquence f, on peut définir un coefficient de proportionnalité appelé facteur de sensibilité ou responsivité, de la manière suivante:

$$R(T, f) = \frac{S}{P} = \frac{S}{H \cdot A_d}.$$



avec

S : valeur quadratique moyenne du signal enregistré.

P : valeur quadratique moyenne de la puissance incidente.

H : irradiance.

A<sub>d</sub> : aire du détecteur.

III-2- Puissance équivalente au bruit ou NEP(noise equivalent power):

C'est la puissance du rayonnement incident, modulé sinusoidalement, pour laquelle la valeur efficace du signal à la sortie, est égale à la valeur efficace du bruit engendré dans le détecteur. On peut le formuler par:

$$NEP(T, f, \Delta f) = H \cdot A_d \cdot \left(\frac{B}{S}\right) \cdot \frac{1}{(\Delta f)^{\frac{1}{2}}} = P_n$$

avec

B : tension de bruit.

Δf : bande passante de l'amplificateur (devant être très étroite).

Le NEP est exprimé en W.Hz<sup>-1/2</sup>.

III-3- Détectivité:

On définit la détectivité comme l'inverse du NEP.

$$D = \frac{1}{NEP} \text{ en } W^{-1} \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$$

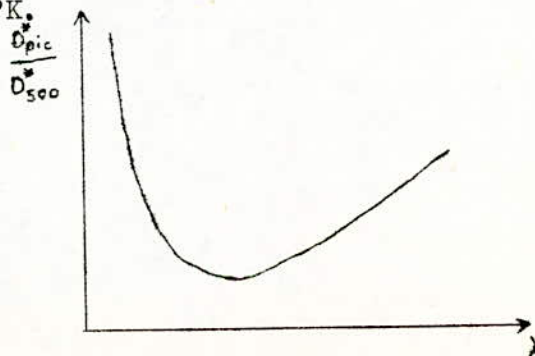
Plus la détectivité est importante et plus le détecteur est performant. Elle sert donc à faire le choix entre les détecteurs. Pour faciliter la comparaison, indépendamment de l'aire de l'élément sensible, on définit la quantité D\* par:

$$D^* = D \cdot A_d^{\frac{1}{2}} \text{ en } W^{-1} \cdot cm \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$$

III-4- Réponse spectrale:

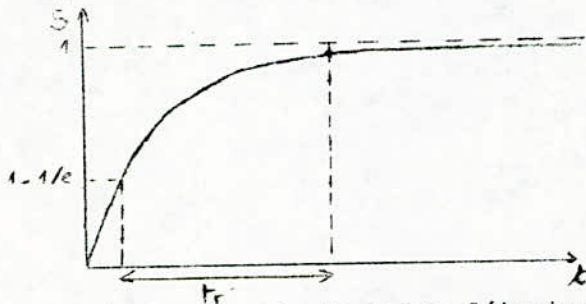
Souvent, on définit la réponse spectrale relative; c'est le rapport de la détectivité maximale d'une radiation de longueur d'onde λ donnée sur la détectivité du corps noir, à la température de 500°K.

La figure suivante représente la réponse spectrale d'un corps en fonction de la longueur d'onde.



### III-5- Temps de réponse:

Le détecteur ne répond pas instantanément à un signal; il doit passer inéluctablement par un régime transitoire. Sa réponse est exponentielle lorsqu'il est exposé à des radiations pulsées. On définit alors le temps de réponse comme le temps que met le signal pour passer de la valeur  $1 - 1/e$  à la valeur asymptotique. Ceci peut se représenter de la façon suivante sur la figure:



### III-6- Les bruits dans les détecteurs:

Comme tout système électronique, le détecteur délivre outre le signal de sortie utile  $S$ , un bruit  $B$  fonction aléatoire du temps, qui ne s'annule pas même si le rayonnement reçu s'annule.

Examinons les différents bruits qui peuvent être engendrés dans le système détecteur.

- Bruits de rayonnement: Ils sont dus aux fluctuations du flux de rayonnement indépendamment de la technologie du détecteur et de son circuit électronique. C'est le seul auquel il soit impossible de porter remède.

- Bruits internes: Ils sont dus essentiellement aux fluctuations de la température et électriques. Le circuit électrique du détecteur est le siège d'un f.e.m de bruit que l'on appelle bruit de Nyquist-Johnson.

La tension du bruit thermique a pour expression:

$$v_t = (4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}}$$

avec

$R$  : résistance interne.

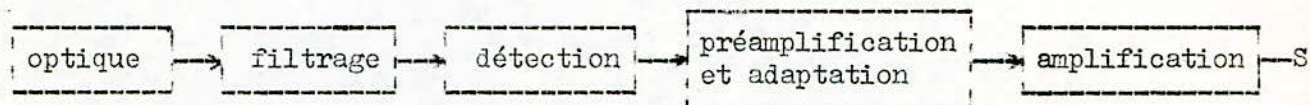
$k$  : constante de Boltzmann.

$T$  : température en °K.

- Bruits externes: Comme le détecteur est suivi d'un amplificateur, ce dernier introduit un bruit dû aux différents composants (résistances à carbone, ampli opérationnel, condensateurs, ...).

IV- REALISATION DU RECEPTEUR.

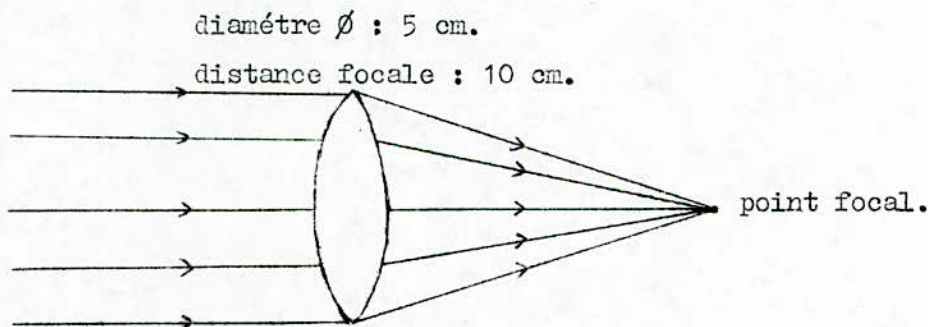
IV-1- Schéma synoptique du récepteur:



IV-2- Optique:

On utilise une lentille de collection convexe, qui fait converger le rayonnement incident sur l'élément sensible du détecteur.

La lentille a les propriétés suivantes:



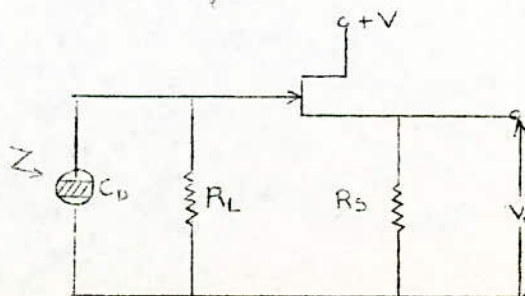
IV-3- Détecteur:

Le détecteur que l'on utilise est le PPC 522, basé sur l'effet pyroélectrique, étudié précédemment. L'élément sensible est constitué d'une couche de matériau pyroélectrique (Plomb-Zirconate-Céramique) dont les deux faces opposées sont recouvertes d'un métal conducteur, sur lesquelles sont fixées les électrodes.

Le PPC 522 est muni d'un filtre optique  $(8-14)\mu$ , d'un JFET pour la préamplification et l'adaptation.

IV-3-1- Schéma électrique:

Schéma électrique  
du PPC 522.



On peut rappeler qu'un changement de température  $\Delta T$ , dû à un changement de la puissance incidente  $dP$ , crée une différence de potentiel  $\Delta V$ , dont l'expression s'écrit:

$$\Delta V = \frac{4\pi I d}{\epsilon} \cdot \frac{dP}{dT} \cdot \Delta T.$$

Cette variation de la polarisation électrique est détectée comme un signal alternatif par le JFET, et est ensuite amplifié. Du fait de la nature robuste du matériau et de la haute température de Curie ( $230^\circ$ ), le PPC 522 peut capter de grandes puissances incidentes. De plus, ce dispositif a une bonne détectivité surtout aux basses fréquences. Sa réponse spectrale s'étend dans le domaine ( $0,2\mu - 35\mu$ ).

#### IV-3-2- Filtre:

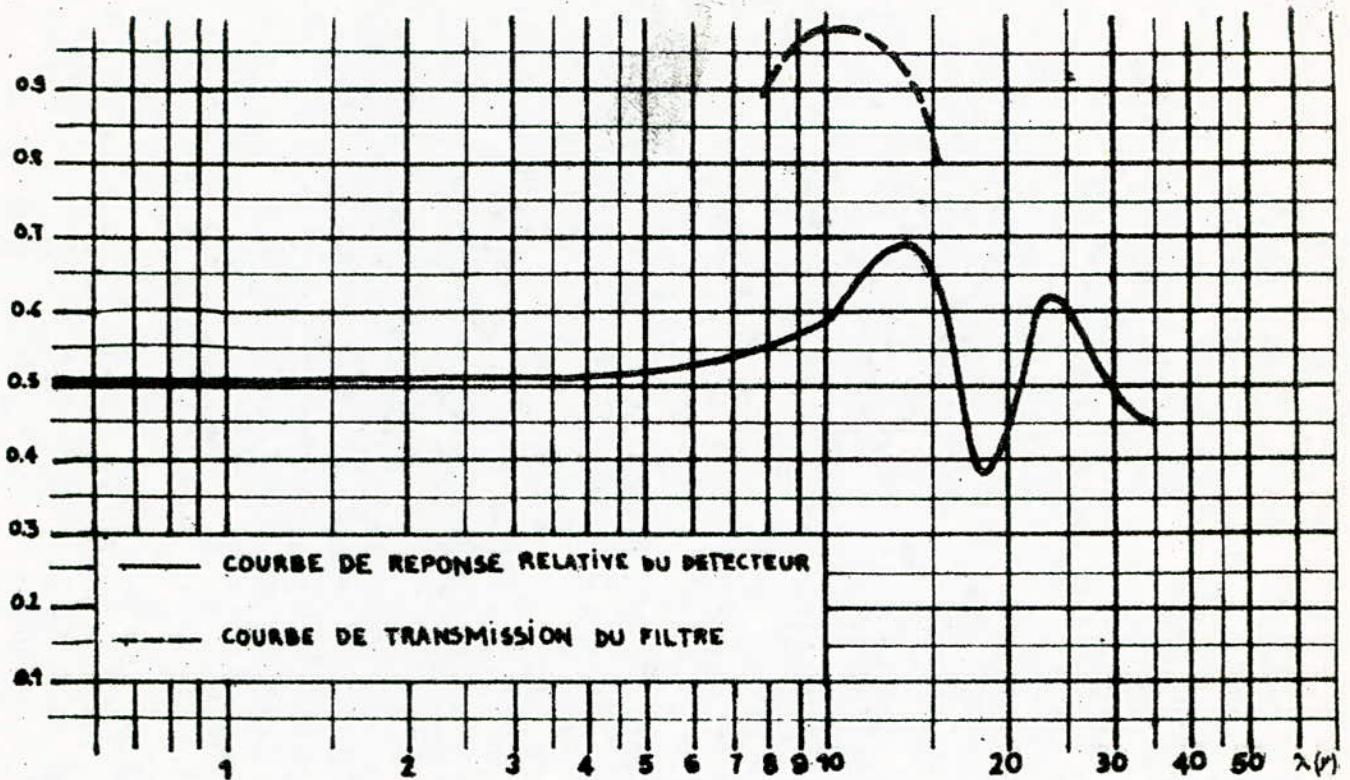
La réponse spectrale du détecteur s'étend de l'ultra violet à l'infrarouge. Pour pouvoir étudier le rayonnement dans différentes bandes, l'emploi de filtres adaptés est nécessaire. Suivant la bande spectrale voulue, on peut utiliser différentes sortes de filtres. Le tableau suivant représente les divers composants des filtres, suivant le domaine dans lequel ils sont utilisés:

Silice	(0,2 - 2) $\mu$
Quartz	(0,2 - 4) $\mu$
Saphire	(0,8 - 5) $\mu$
Calcium fluoride	(0,1 - 10) $\mu$
KRS 5	(0,6 - 35) $\mu$
Silicium	( 1 - 8) $\mu$ et au delà de 20 $\mu$ .
Germanium	( 2 - 15) $\mu$

Notre étude consiste à faire un récepteur travaillant en infrarouge thermique. Pour cela, le PPC 522 utilise un filtre au germanium qui ne laisse passer que les longueurs d'onde comprise entre 8 $\mu$  et 14 $\mu$ .

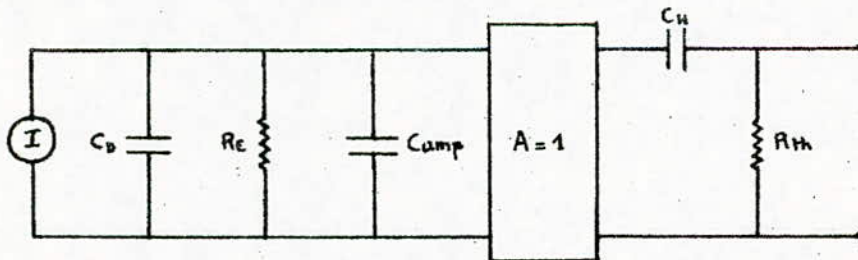
La transmission du filtre et la réponse relative du détecteur doivent être de la même forme pour qu'il n'y ait pas de pertes de transmission.

Ceci est apparent dans la figure suivante, qui représente les deux courbes sur un même diagramme.



IV-3-3- Préamplification et adaptation:

Ces deux fonctions sont assurées par le JFET du PPC 522, branché comme source suiveur (figure ci-dessous).



avec

- $C_d$  : capacité de l'élément (F).
- $R_e$  : résistance de charge ( $\Omega$ ).
- $C_{amp}$  : capacité de l'amplificateur (F).
- $C_h$  : capacité calorifique (J/°C).
- $R_{th}$  : résistance thermique (W/°C).
- $I$  : générateur de courant (A).

L'impédance de sortie de l'élément sensible étant très élevée, un étage

L'impédance de sortie de l'élément sensible étant très élevée, un étage d'adaptation est nécessaire. On utilise pour cela un transistor à effet de champ branché comme source suiveur donnant un gain égale à l'unité et une impédance de sortie de 3,6 ohms.

Pour une excitation du type échelon, la température de la partie sensible tend à augmenter; cette augmentation est ensuite annulée par une décharge thermique, caractérisée par la capacité calorifique  $C_h$  et la résistance thermique du cristal  $R_{th}$ , représentées sur la figure précédente.

#### IV-3-4- Polarisation du détecteur:

D'après le constructeur, le PPC 522 doit être polarisé avec une tension comprise entre 5v et 8v. Si l'on fixe la tension d'alimentation à 9v, la tension de polarisation représentera les 2/3 de celle-ci, soit 6v.

Si on appelle  $R_t$  la résistance totale entre la masse et la tension positive (9v), on aura alors, pour les deux résistances de polarisation  $R_1'$  et  $R_2'$  :

$$R_t = R_1' + R_2'$$

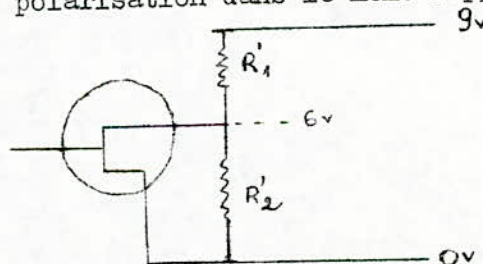
$$\text{et } R_1' = 1/3 R_t$$

$$R_2' = 2/3 R_t$$

On choisira alors des résistances de polarisation dans le même rapport que celui des tensions correspondantes.

On prendra  
et

$R_1' = 1 \text{ k}\Omega$ $R_2' = 2 \text{ k}\Omega$
--



#### IV-3-5- Caractéristiques et performances du PPC 522 :

Responsivité (500K, 10Hz)

70 V/W (spectre entier).

Aire de l'élément sensible

20 V/W (bande 8-14μ).

Délectivité  $D^*$  (500K, 10Hz, 1Hz)

$2 \times 2 \text{ mm}^2$

$D^*$  (500K, 1000Hz, 1Hz)

$1.10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{W}^{-1}$

NEP (500K, 10Hz, 1Hz)

$1.10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{W}^{-1}$

Ouverture angulaire totale

$2.10^{-9} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$

Réponse spectrale

50°.

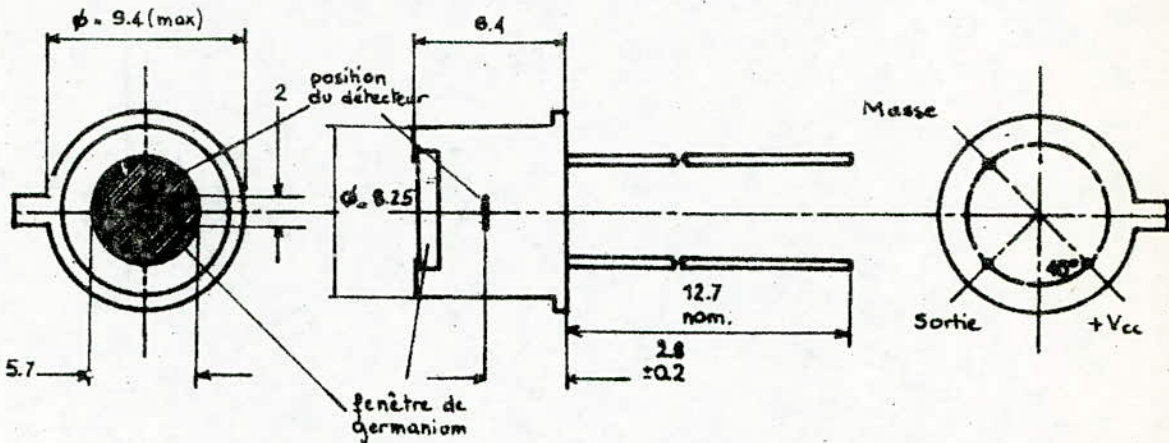
Fréquence d'opération

0,2 + 35 μ.

0,01Hz + 1KHz.

Gamme de température	- 20°C à 50°C.
Alimentation	5v à 9v.
Courant de polarisation (à V=6v)	50 $\mu$ A.
Repport maximal de changement de température	0,25°C/min.
Impédance de charge minimum	20 K $\Omega$
Constante de temps électrique	15s.
Constante de temps thermique	0,2s.

Voici ci-dessous le schéma de brochage du PPC 522.

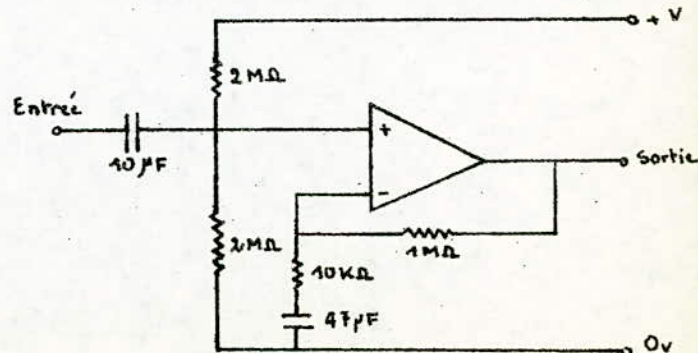


#### IV- L'amplificateur:

L'amplification est assurée essentiellement par un amplificateur opérationnel caractérisé par:

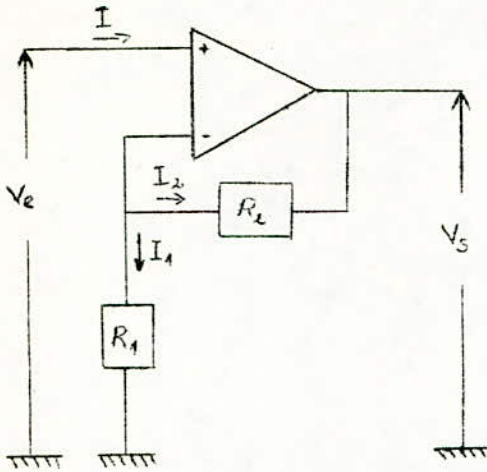
- Son gain en tension très élevé.
- Sa grande impédance d'entrée.
- Sa bonne linéarité.
- Sa compensation intégrée en fréquence.

Pour cela, nous avons choisis le  $\mu$ A 741, utilisé en ampli non inverseur, comme le montre la figure suivante.



IV-4-1- Gain de l'amplificateur:

Considérons le montage amplificateur utilisé:



La loi des noeuds appliquée au point A donne l'expression suivante (en supposant l'amplificateur idéal):

$$\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_e - V_s}{R_2} = 0.$$

$$V_e \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V_s}{R_2}.$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \leftarrow \frac{R_2}{R_1}.$$

D'après les valeurs des résistances choisies auparavant, on aura comme application numérique:

$$G_V = \frac{1 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} = 100.$$

$$G_V = 100.$$

IV-4-2- Calcul de l'impédance d'entrée:

La loi des noeuds appliquée au point A donne:

$$\frac{V_e - Z_d I}{R_1} + \frac{V_e - Z_d I - V_s}{R_2} - I = 0.$$

comme  $V_s = A_o \cdot Z_d \cdot I$  ( $A_o$  gain en boucle ouverte).

on a alors :

$$\frac{V_e - Z_d I}{R_1} + \frac{V_e - Z_d I - A_o Z_d I}{R_2} - I = 0.$$

$$V_e \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - I \left( \frac{Z_d}{R_1} + \frac{Z_d}{R_2} (A_o + 1) + 1 \right) = 0.$$

d'où

$$Z_e = \frac{V_e}{I} = \frac{\frac{Z_d}{R_1} + \frac{Z_d}{R_2} (A_o + 1) + 1}{1/R_1 + 1/R_2}$$

AN:  $Z_d = 2M\Omega$ ;  $R_1 = 10K\Omega$ ;  $R_2 = 1M\Omega$ ;  $A_o = 40.000$ .

on aura  $Z_e = 800M\Omega$ .

L'impédance d'entrée totale s'écrit donc:

$$Z_{et} = Z_e // R_1 // R_2.$$

$$Z_{et} = 1 M\Omega.$$



IV-4-3- Calcul de la capacité de liaison:

Cette capacité doit être considérée comme un court-circuit vis à vis de l'alternatif. Si  $Z_s$  est l'impédance de sortie du détecteur, et  $Z_{et}$  l'impédance d'entrée de l'amplificateur.

La capacité de liaison doit vérifier l'inégalité suivante:

$$\frac{1}{C_1 \cdot \omega} \ll Z_{et} + Z_s$$

or  $Z_s \ll Z_{et}$ , nous pouvons négliger  $Z_s$  devant  $Z_{et}$ .

On aura alors: 
$$C_1 \gg \frac{1}{\omega(Z_{et} + Z_s)} = \frac{1}{Z_{et} \cdot \omega}$$

AN:  $f = 1\text{Hz}$ .

$$Z_{et} = 1,6 \text{ M}\Omega.$$

$$C_1 \gg 0,15 \mu\text{F}.$$

On prendra alors pour notre montage:

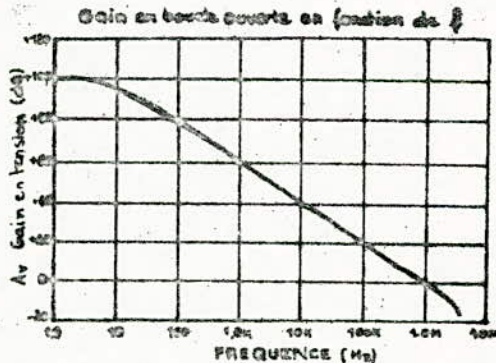
$C_1 = 10 \mu\text{F}.$

IV-4-4- Calcul de la bande passante de l'amplificateur:

Nous savons que le gain et la bande passante sont liés par la relation suivante:

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

Donc, connaissant le gain et la bande passante en boucle ouverte, on peut calculer aisément la bande passante en boucle fermée.



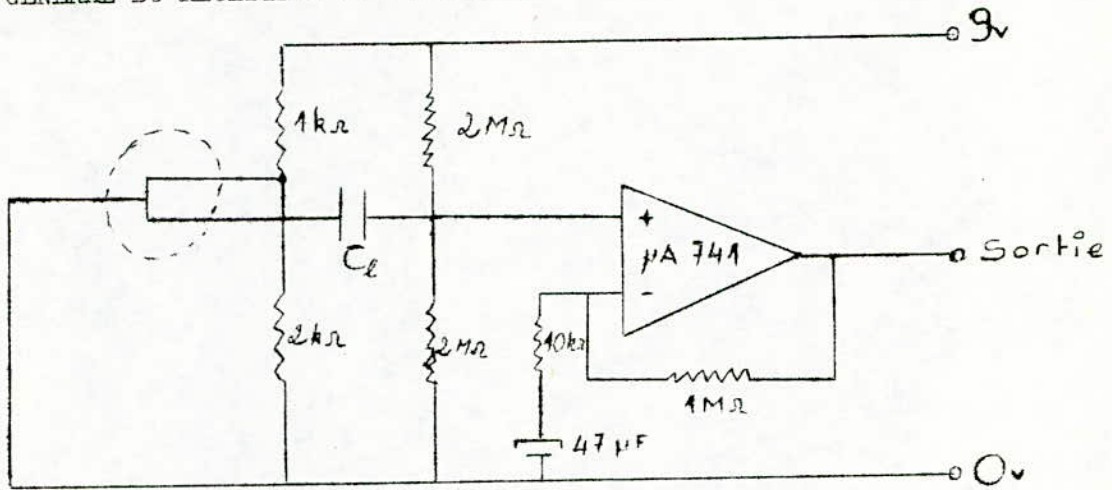
On sait que le gain en boucle fermée est  $G_1 = 100$ . D'après la courbe précédente, on prendra un point correspondant à  $G_0 = 1000$  et  $B_0 = 1000$ ; ce qui donnera alors:

$$G_0 \times B_0 = G_1 \times B_1 \implies B_1 = \frac{G_0 \times B_0}{G_1} = 10000.$$

La bande passante de l'amplificateur est donc:

$B_2 = 10^4 \text{ Hz}.$

SCHEMA GENERAL DU RECEPTEUR INFRAROUGE.



IV-5- Caractéristiques du récepteur infrarouge:

IV-5-1- Calcul de l'angle d'ouverture du récepteur et de la transmission du filtre:

On sait que l'angle d'ouverture  $\Omega$  s'écrit:

$$\Omega = 2 \cdot \Pi \cdot (1 - \cos\theta) = \Pi \cdot \theta^2 = \frac{a}{f^2} \left( \frac{\text{aire du détecteur}}{\text{distance focale}} \right).$$

$a = 0,04 \text{ cm}^2.$       $f = 10 \text{ cm.}$      donc      $\Omega = \frac{0,04}{10^2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ st.}$

On sait que l'expression de la transmission du filtre est:

$$\zeta = 1 - \frac{e^2}{R^2} = 1 - \frac{(0,6)^2}{(2,4)^2} = 0,93.$$

avec  $e$  : dimension de la partie utile du détecteur.

$R$  : rayon de la partie utile de la pupille.

IV-5-2- Evaluation du rapport S/B :

On a vu que le système détecteur délivrait à sa sortie un signal électrique  $S$  mais aussi un bruit  $B$ , dépendant de plusieurs paramètres. Pour caractériser le détecteur, on doit évaluer le rapport  $S/B$ .

Si la surface visée par le détecteur a une radiance  $R(\lambda, T)$ , le signal de sortie a pour expression:

$$S = A_s \cdot \Omega \cdot \zeta \cdot R(\lambda, T).$$

avec

$A_s$  : Aire de la pupille d'entrée.

$\tau$  : Facteur de transmission.

$\Omega$  : Ouverture angulaire du système détecteur.

En utilisant les résultats précédemment calculés, on trouve pour le signal de sortie:

$$S = 19,6 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,93 \cdot R(\lambda, T).$$

$$S = 72,91 \cdot 10^{-8} \cdot R(\lambda, T).$$

Si le signal provient d'un corps noir à 300°K (la terre), la radiance a pour valeur:

$$R(8-14\mu, 300^\circ K) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{st}$$

Le signal recueilli à la sortie est :

$$S = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ W.}$$

Calculons maintenant le NEP, qui représente le bruit B:

$$B = (A_d \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} / D.$$

où D est la détectivité

$A_d$  est l'aire utile de l'élément sensible.

f est la largeur de bande de l'information.

$$A_d = 0,04 \text{ cm}^2. \quad f = 100 \text{ Hz.} \quad D(300K, 10, 1) = 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{W}^{-1}.$$

donc 
$$B = 2 \cdot 10^{-8} \text{ W.}$$

Le rapport S/B s'écrit alors:

$$\frac{S}{B} = 725.$$

Calculons à présent la radiance équivalente au bruit (NER), c.a.d. la valeur de  $R(\lambda, T)$  pour laquelle le rapport S/B = 1 :

$$S = A_s \cdot \tau \cdot \Omega \cdot R(\lambda, T) = B.$$

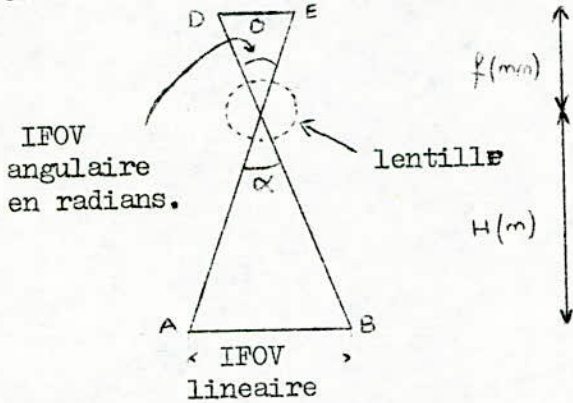
$$R(\lambda, T) = \frac{B}{A_s \cdot \tau \cdot \Omega} = \frac{2,6 \cdot 10^{-4} \text{ W/st.cm}^2}{A_s \cdot \tau \cdot \Omega}$$

#### IV-5-3- Calcul de l'IFOV :

L'IFOV (instantaneous field of view) en télédétection est une grandeur relative à la plus petite aire d'un échantillon d'un milieu irradié pendant un certain temps. Cette valeur est déterminée par construction géométrique sans tenir compte du système de formation de l'image et des effets d'aberration et de diffraction.

L'IFOV peut être donné sous deux formes, la forme linéaire et la forme angulaire, ayant la même signification.

Pour le calcul des deux formes, on se basera sur le schéma suivant, et ce, en tenant compte des définitions de chacune.



D : dimensions du détecteur (diamètre).  
f : distance focale de la lentille utilisée.

L'IFOV linéaire se définit par :

$$\text{IFOV}_{\text{lin}} = \frac{HD}{f} \text{ mètres.}$$

En considérant les triangles semblables ABC et CDE et le fait que l'angle  $\alpha$  est très faible, on aura :

$$\text{tg } \alpha = \frac{AB}{2H} = \frac{\text{IFOV}_{\text{lin}}}{2H} = \frac{HD}{f \cdot 2H} = \frac{D}{2f} = \alpha .$$

$\alpha$  est l'IFOV angulaire défini par :

$$\text{IFOV}_{\text{ang}} = \frac{D}{f} \text{ radians.}$$

Pour le calcul, on trouve :

$$\begin{aligned} \text{IFOV}_{\text{lin}} &= 24,75 \text{ cm.} \\ \text{IFOV}_{\text{ang}} &= 41,25 \text{ rds.} \end{aligned}$$

Dans la pratique, on prendra  $\text{IFOV}_{\text{lin}} = D_s = 25 \text{ cm}$  (que l'on a déjà utilisé dans le calcul de l'ouverture angulaire de l'émetteur).

#### IV-5-4- Récapitulatif des caractéristiques du récepteur:

- \* Domaine spectral
- \* Optique

8 - 14  $\mu$

lentille convergente  $\phi = 5 \text{ cm.}$

foc = 10 cm.

- \* Détecteur

pyroélectrique (PPC 522).

- \* Aire du détecteur

0,04 cm<sup>2</sup>.

- \* Filtre

germanium.

- \* Coefficient de transmission

0,93.

* Ouverture angulaire	$4 \cdot 10^{-4}$ st.
* IFOV	24,75 cm.
* Amplificateur	$\mu$ A 741.
* Rapport S/B (300°K)	725.
* NEP (300°K)	$2 \cdot 10^{-8}$ W.

CHAPTER III

MEASURE

ET

INTERPRETATION

## PLAN DU CHAPITRE III.

### I- INTRODUCTION

### II- UTILISATION D'UNE SOURCE PASSIVE

II-1- Rayonnement solaire

II-2- Modulateur adjoint au récepteur

### III- MESURES

III-1- Principes des mesures

III-2- Vérification des caractères de certaines surfaces

III-2-1- Caractéristiques du signal de sortie

III-2-2- Présentation du site

III-2-3- Différentes surfaces étudiées

### IV- INTERPRETATIONS DES MESURES

### V- APPLICATIONS

## I-INTRODUCTION :

Le but de notre étude était de réaliser la chaîne de mesure. Ce but étant atteint, il serait intéressant de vérifier quelques paramètres importants en télédétection, afin de cerner les contraintes d'utilisation et les performances de notre appareillage.

On aura à mesurer le rayonnement émis par la surface à étudier quand celle-ci est éclairée par une source passive, en faisant varier chaque fois certains paramètres. On interprétera ensuite les résultats obtenus, en les comparant aux résultats théoriques. On terminera ce chapitre par l'énumération des applications de la télédétection.

## II- UTILISATION D'UNE SOURCE PASSIVE :

Notre travail consistait à réaliser une chaîne de mesure constituée d'un émetteur et d'un récepteur d'infrarouge thermique (8-14)  $\mu$ . Nous avons vu, lors de l'étude des sources de rayonnement, que dans ce domaine, on utilisait des sources de très hautes températures (1000°K à 1800°K). Pour notre part, on dispose d'un globe travaillant à 1000°K. Ceci nécessite un appareillage (boîtier, optique modulateur), protégé contre les hautes températures, dont le coût est trop important, et dont les délais d'envoi ne nous auraient pas permis de terminer notre travail; ce qui a rendu impossible la réalisation de cet émetteur.

De ce fait, l'utilisation d'une source passive s'avère obligatoire pour une bonne utilisation de cette chaîne.

On utilisera comme source passive le soleil, pour sa gratuité, sa grande intensité (comparable à un corps noir à 6000°K), pour sa disponibilité et pour son spectre très vaste et comprenant en particulier la bande (8-14 $\mu$ ).

### II-1- Rayonnement solaire.

Le spectre du rayonnement solaire n'est pas parfaitement continu; il présente des lignes de Fraunhofer, qui sont des lacunes correspondant aux fréquences absorbées par l'atmosphère solaire, au cours du trajet du rayonnement mais on peut faire l'hypothèse que le soleil rayonne comme un corps noir à 6000°K, dans le spectre complet et en particulier dans la bande (8-14 $\mu$ ). On utilisera cette propriété pour employer le soleil comme source passive dans notre étude (voir figure suivante).

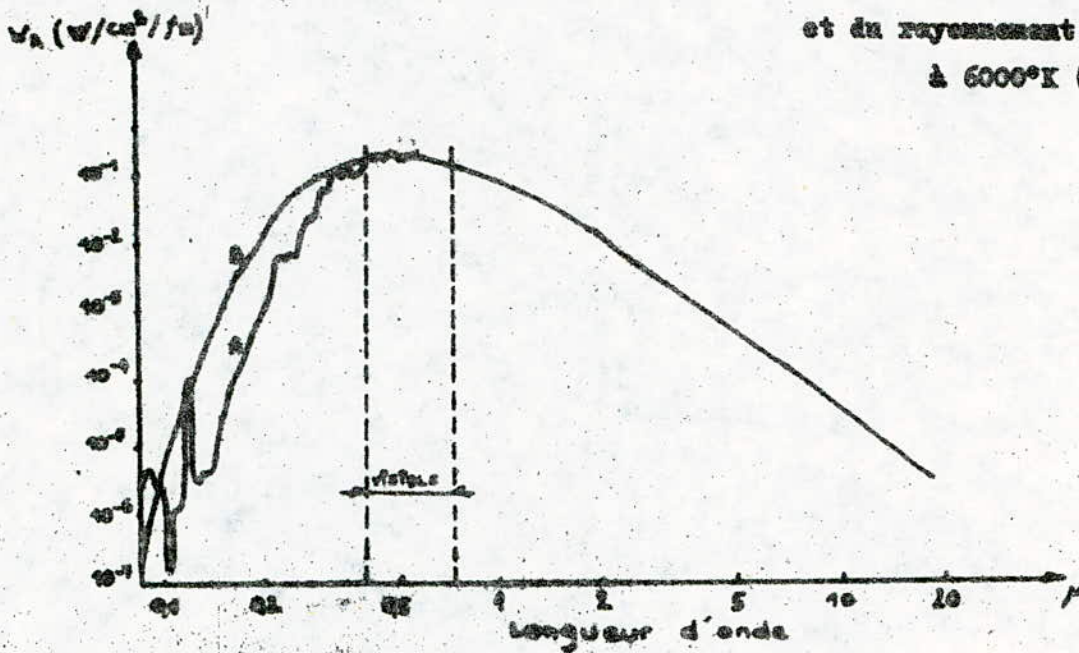


Spectre du rayonnement solaire

(A)

et du rayonnement du corps noir

à 6000°K (B)



Le seul inconvénient à cet emploi est le fait que le soleil émet d'une façon incohérente (dans impossibilité de connaître la puissance rayonnée), et que variations du rayonnement sont imperceptibles.

## II-2- Modulateur adjoit au récepteur .

Comme on a vu précédemment, le détecteur utilisé (PFC 522) n'est sensible qu'à des variations de températures. Pour cela, on a adjoit à l'entrée de notre détecteur (ou plus précisément du récepteur), un modulateur dont le rôle est de "hacher" le rayonnement continu émanant de la surface à étudier, préalablement éclairée par le soleil.

Ce modulateur est constitué, comme on l'a vu dans le paragraphe III-4 de la partie instrumentation de l'émission, d'un moteur entraînant une pôle de faible émissivité (aluminium), et de forme adéquate. Ainsi, le récepteur pourra percevoir les variations du signal d'entrée en fonction des paramètres considérés.

## III- MESURES .

### III-1- Principe des mesures.

Avec la chaîne de mesure décrite précédemment, on doit vérifier certains caractères des surfaces. Pour plus de commodité, le récepteur sera placé à 1 mètre du sol, sur un pivot pouvant décrire l'hémisphère supérieur.

Le récepteur sera placé de telle façon qu'il vise convenablement la surface à étudier ( $\text{IFOV}_{\text{lin}} = 25 \text{ cm}$ ); on mettra la base du pivot à ras du sol. Pour simplifier les mesures, on considérera des positions telles que l'angle  $\varphi = 0$ .

De cette façon, le système récepteur pourra décrire un plan autour de l'axe de rotation; on pourra faire varier l'angle d'émission de la surface et enregistrer le signal de sortie du récepteur.

### III-2- Vérification des caractères de certaines surfaces.

#### III-2-1- Caractéristiques du signal de sortie:

On a vu dans le paragraphe V-2-2- de la partie instrumentation de l'émission, que le signal de sortie est proportionnel à la radiance, donc de la forme:

$$S = k \cdot R \quad \text{avec} \quad R = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4.$$

La grandeur R qui est la radiance dépend de:

- L'état et la nature du milieu étudié.
- L'angle d'émission de la surface.
- La longueur d'onde ou le domaine spectral utilisé.
- La température.
- L'émissivité.

On remarque que le signal enregistré est proportionnel à l'émissivité.

En analysant le signal enregistré, en fonction de ces paramètres, on pourra connaître leur influence sur le milieu étudié. Comme le facteur de proportionnalité k n'est pas connu, du fait de l'indisponibilité de corps noirs calibrés pour l'étalonnage de l'appareil, on sera amené à normaliser les résultats obtenus.

#### III-2-2- Présentation du site :

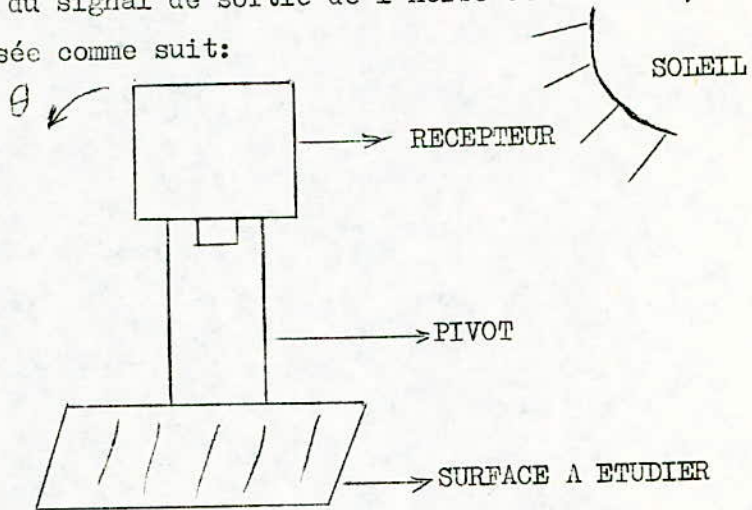
Dans nos mesures, la position du soleil est très importante. Suivant l'angle d'incidence du rayonnement, la température du milieu change, ce qui provoque un changement de ces caractéristiques d'où modification de la forme du signal de sortie.

Malheureusement, suivant le milieu à étudier, il nous a fallu changer, pour nos mesures, plusieurs fois de position pour être dans des conditions

plus ou moins idéales de mesures.

Pour ces mesures, on utilisera l'herbe, le sable, une route goudronnée, du gazon et l'eau.

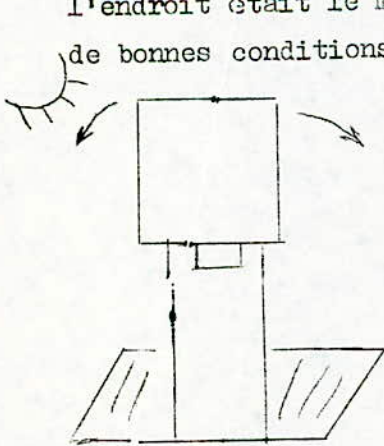
Pour la mesure du signal de sortie de l'herbe et du sable, on a pris la même position, schématisée comme suit:



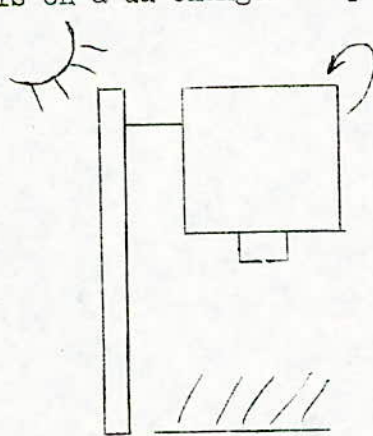
Entre le début et la fin des mesures, la position du soleil a changé (passant d'un angle d'incidence faible à l'incidence verticale et à l'incidence symétrique à la première.

Le milieu n'était pas parfaitement horizontale, de même que la végétation et le sable n'étaient pas tellement uniforme.

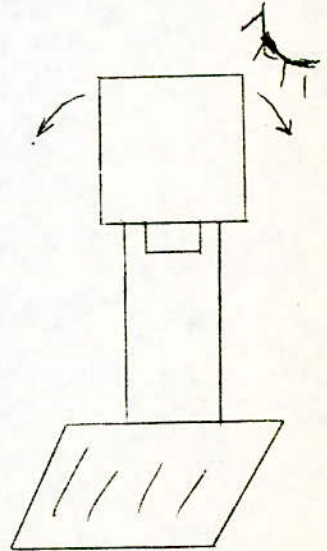
Pour les mesures du signal de sortie du gazon, de l'eau et du goudron, l'endroit était le même, mais on a dû changer de position le détecteur pour avoir de bonnes conditions.



GAZON ENSOLEILLE  
ET EAU



GAZON OMBRAGE



ROUTE GOUDRONNEE

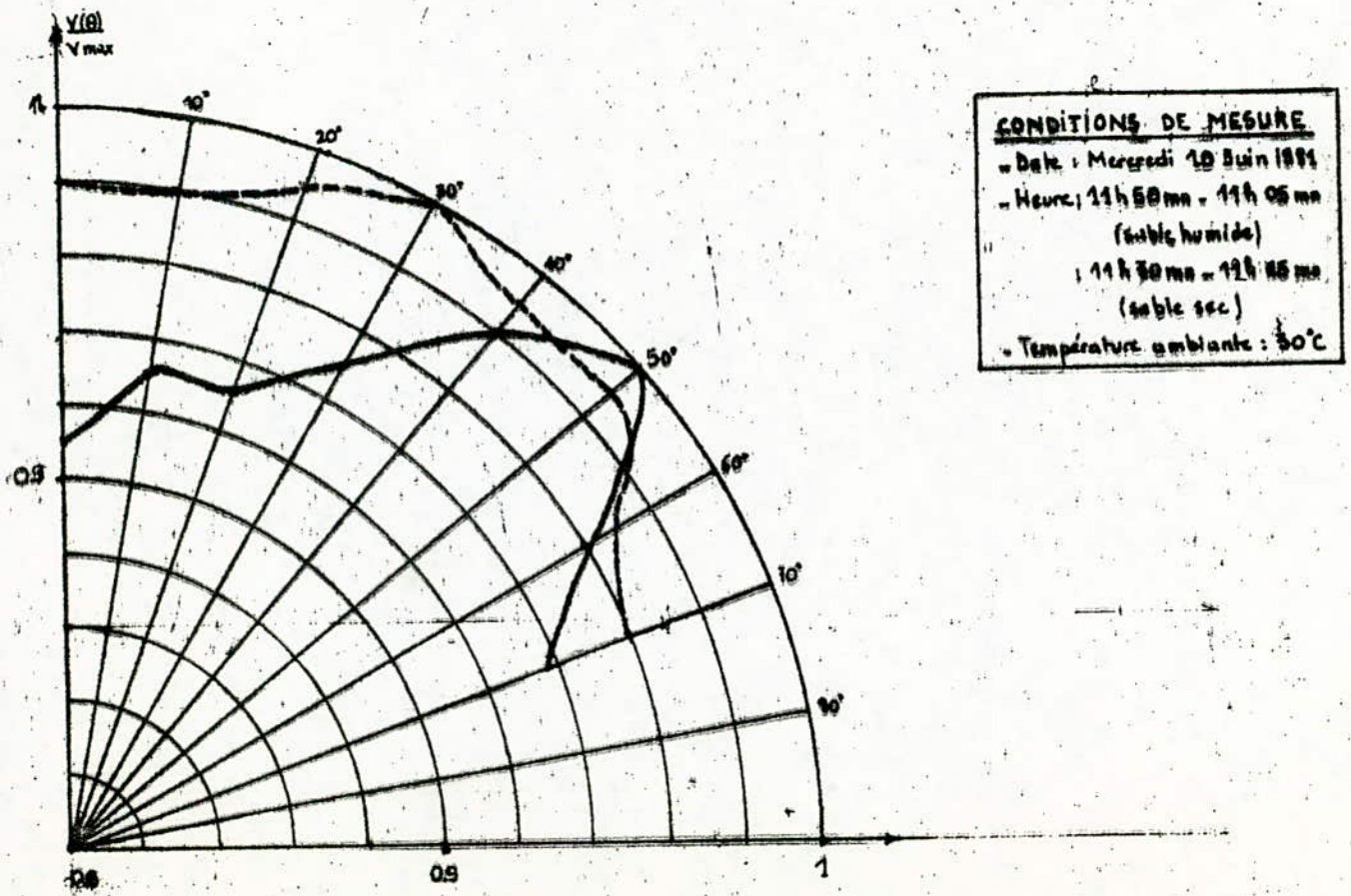
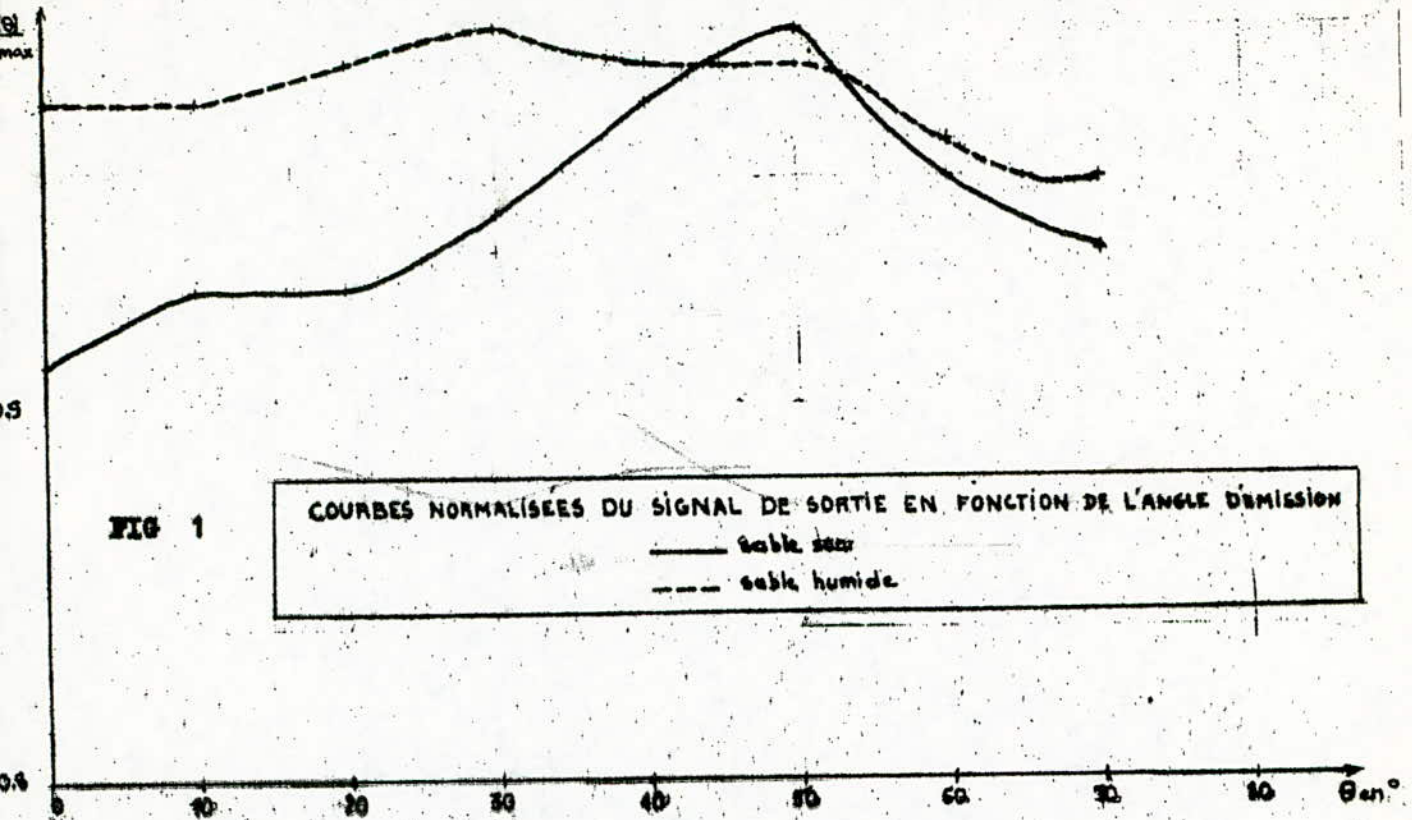
III-2-3- Différentes surfaces étudiées:

On utilise pour cela la surface à étudier, éclairée par le soleil; on place le récepteur en face de la surface visée et on mesure le signal de sortie S en fonction de l'angle d'émission de la surface.

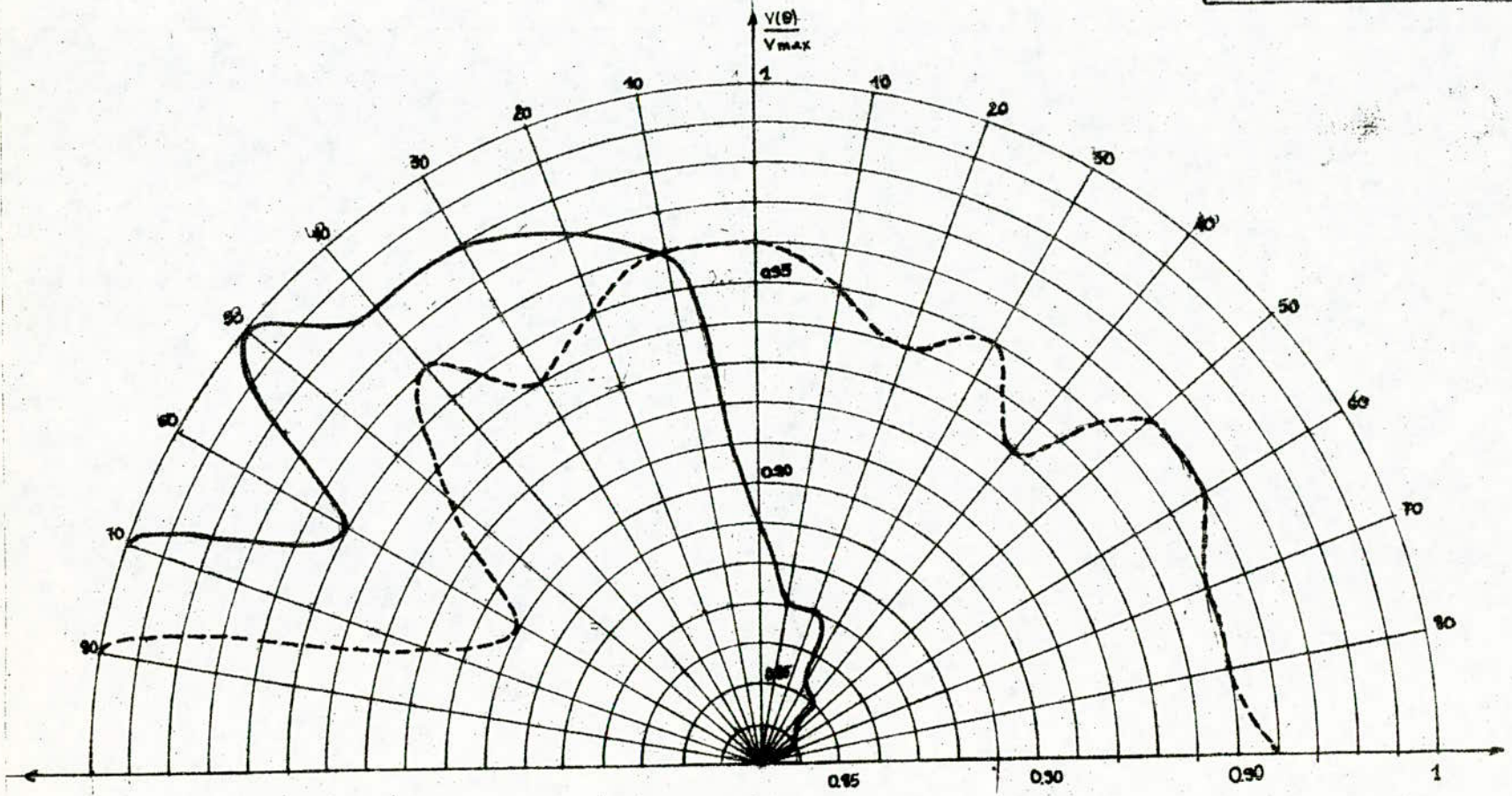
Comme on l'a souligné plus haut, on utilise plusieurs surfaces dont:

- l'herbe
- la route goudronnée
- le gazon ombragé et le gazon ensoleillé
- l'eau
- le sable humide et sec

Les conditions de la mesure et ses résultats sont représentés dans les courbes qui suivent.



**CONDITIONS DE LA MESURE**  
 - Date : Jeudi 11 Juin 1981  
 - Heure : 11h10mn - 11h20mn  
 - Température ambiante : 32°C  
 - Hauteur du gazon : 5 cm.

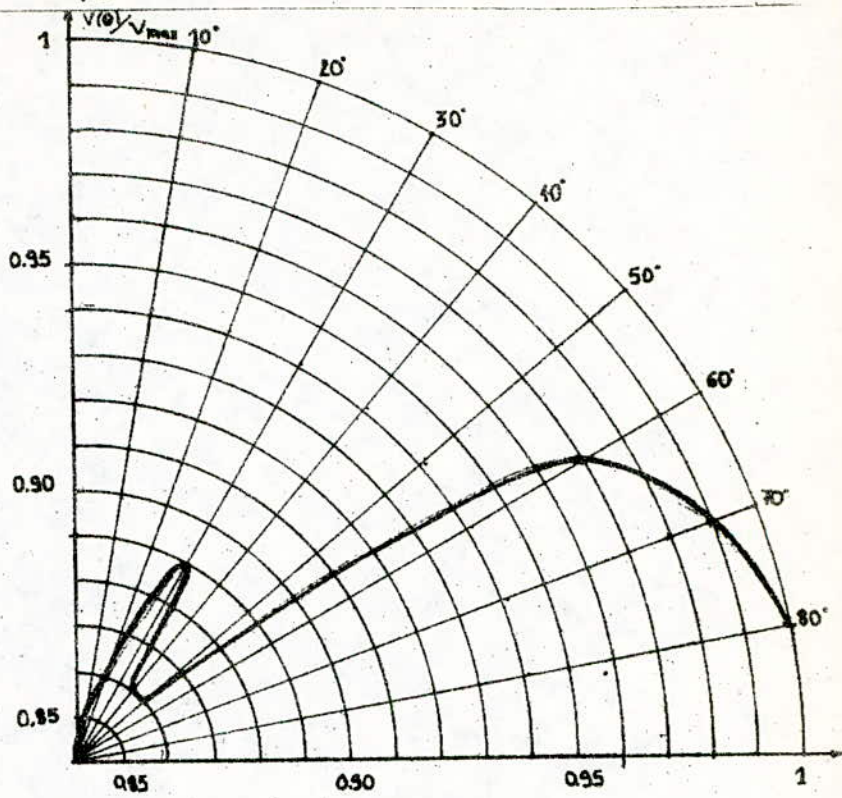


**COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE D'ÉMISSION**  
 — gazon ensoleillé  
 - - - gazon ombragé

**FIG 2**

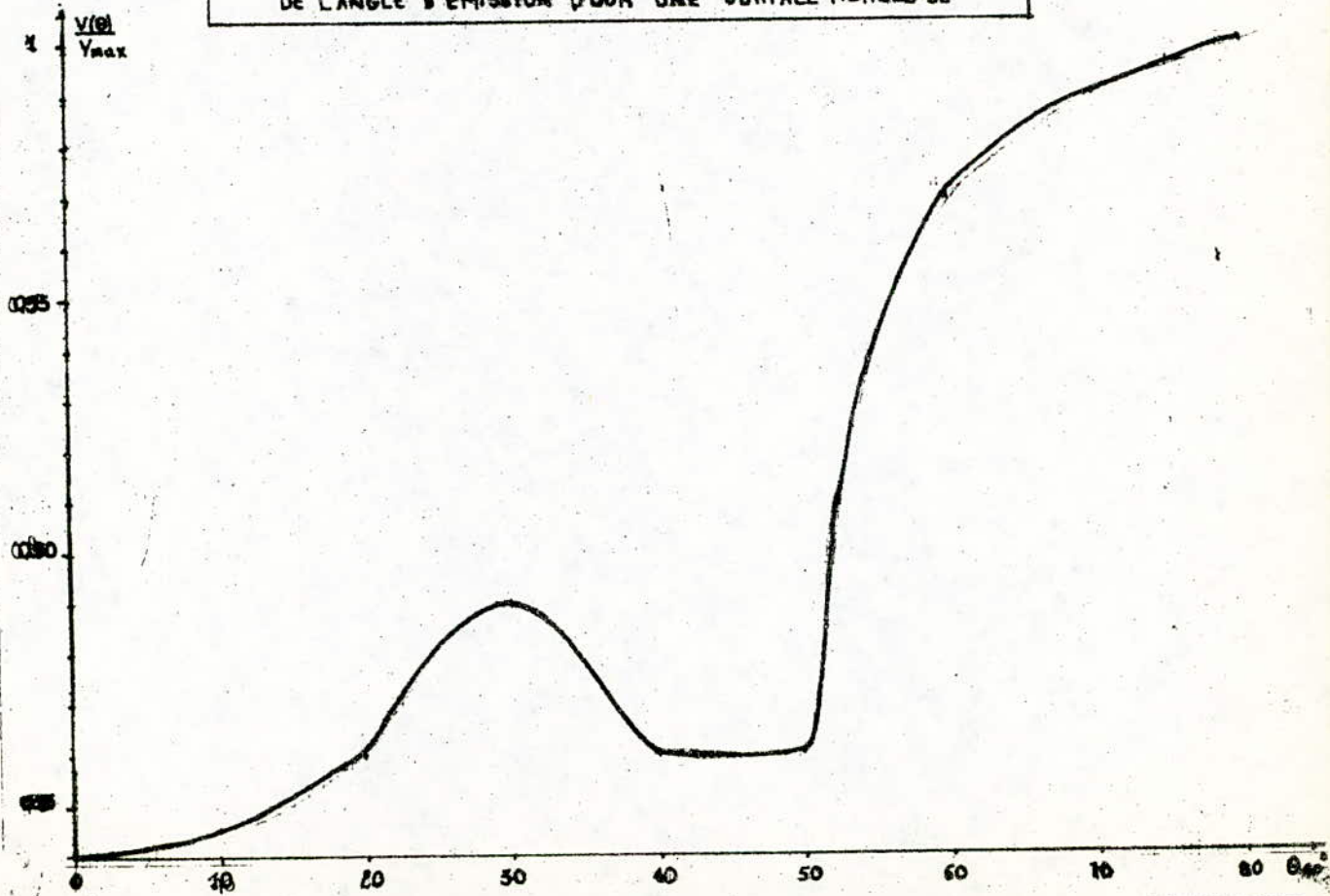
71

**CONDITIONS DE MESURE**  
- Date : Mercredi 10 Juin 1991  
- Heure : 11h30mn - 11h45mn  
- Température ambiante : 30°C  
- Hauteur de l'herbe : 9cm.



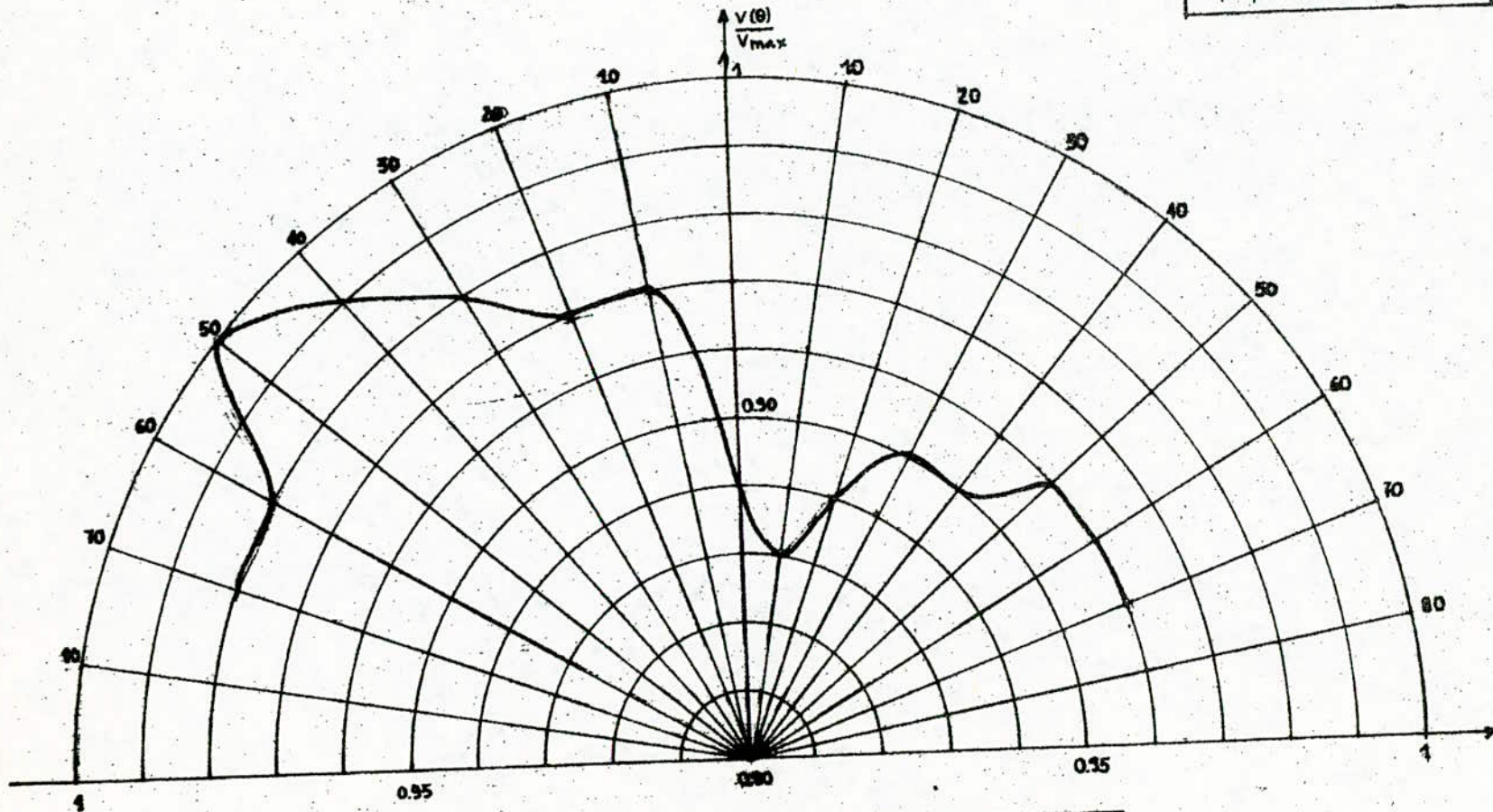
**FIG 3**

**COUBRES NORMALISÉES D'UN SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE D'ÉMISSION POUR UNE SURFACE HERBEUSE**



**CONDITIONS DE MESURE**

- Date : Jeudi 11 Juin 1971
- Heure : 12h - 12h 15mn
- Température ambiante : 52°C
- profondeur de l'eau : 12cm



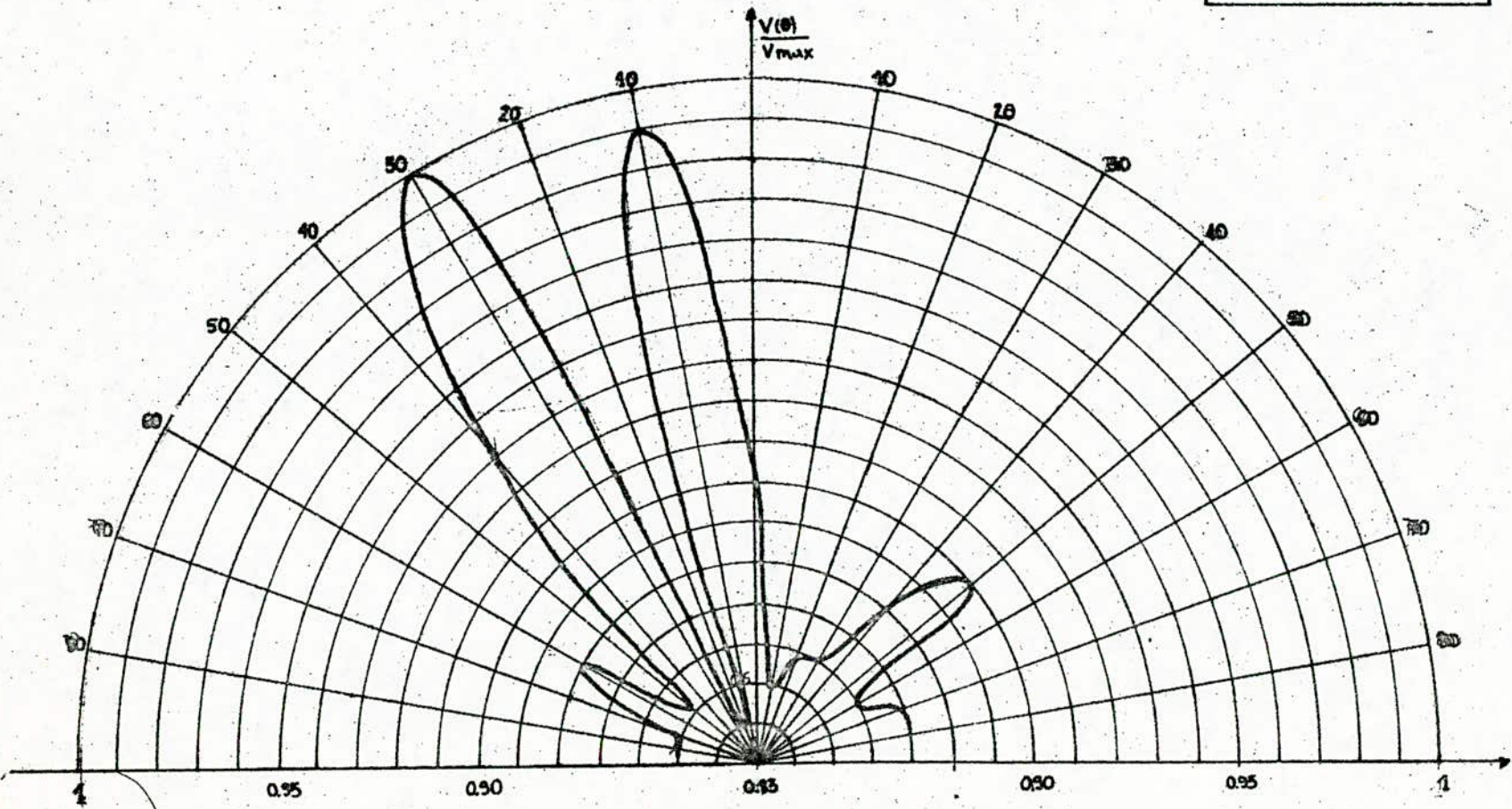
**FIG 4**

COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION  
DE L'ANGLE D'ÉMISSION, POUR L'EAU

75



**CONDITIONS DE MESURE**  
 - Date : Jeudi 11 Juin 1981  
 - Heure : 12h50mn - 12h45mn  
 - Température ambiante : 33°C



**FIG 5**

**COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE D'ÉMISSION POUR UNE ROUTE**

#### IV- INTERPRETATIONS DES RESULTATS.

##### - Sable sec et humide ( Fig 1 ):

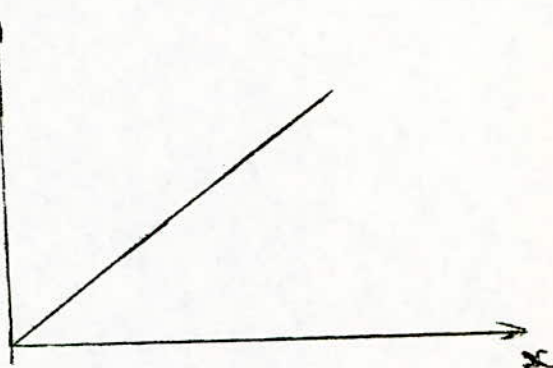
La courbe en trait fort représente la réponse du sable sec; après addition d'une certaine quantité d'eau, on obtient la courbe en pointillé.

On remarque que le sable humide donne un signal plus important que le sable sec entre 0 et 60°. On peut expliquer cela par le fait que l'émissivité de l'eau s'ajoute à celle du sable et fait croître l'émissivité totale.

Comme l'eau est une surface spéculaire, donc émettant dans une direction privilégiée, on remarque qu'au delà de 60°, il y a nette diminution de l'émissivité de l'eau, d'où coïncidence des deux signaux.

En considérant chaque courbe à part, on remarque que le signal normalisé est compris entre 0,9 et 1, donc plus ou moins uniforme, d'où vérification du caractère Lambertien du sable.  $\epsilon(8-13)$

La courbe ci-contre représente la variation de l'émissivité de certains sables en fonction de l'humidité volumique.



##### - Gazon ensoleillé et ombragé (Fig 2 ):

La courbe en trait fort représente la réponse du gazon ensoleillé tandis que celle en pointillé représente la réponse du gazon ombragé.

En prenant chaque courbe à part, on remarque nettement que les deux surfaces ne sont pas Lambertiennes (courbes non uniformes). Dans le deuxième quadrant, on vérifie aisément que le gazon sous soleil émet plus que le gazon sous l'ombre. Dans le premier quadrant, on observe une anomalie due aux changements de positions du soleil (décalage horaire entre les deux mesures) et des perturbations atmosphériques (vent pendant les mesures).

##### - L'herbe (Fig 3 ):

Cette courbe représente nettement le caractère spéculaire de l'herbe. L'émission est très directive et est maximum à 80°. Le pic observé à 30° est dû à l'irrégularité de la surface herbeuse. Il peut représenter le rayonnement d'une crevasse ou d'un corps étranger à l'herbe (terre nue, caillou).

- L'eau (Fig 4 ):

Du fait de l'absence d'émetteur et du fait que le rayonnement incident n'arrive pas sous un angle solide faible, le caractère spéculaire de l'eau n'est pas bien vérifié bien que le signal normalisé s'échelonne entre 0,93 et 1; néanmoins on peut la considérer comme telle.

- La route goudronnée (Fig 5 ):

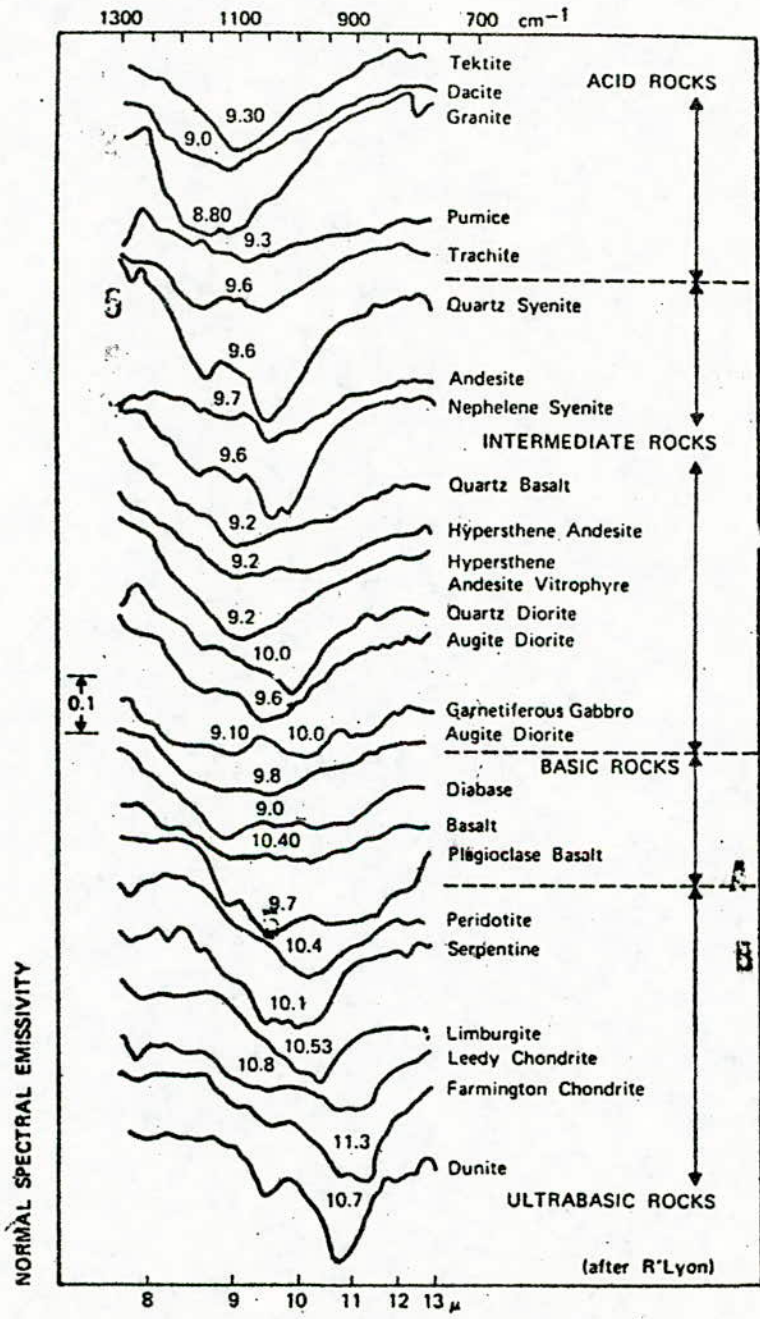
Cette courbe présente de nombreux pics qui reflètent aisément les irrégularités de la route (goudron non lisse et présence de gravier). Le signal n'étant pas régulier, on ne peut rien dire sur le caractère de la surface.

V- APPLICATIONS:

Comme on vient de voir, la télédétection sert d'outil à la reconnaissance à distance des objets et des milieux. C'est une science très récente qui connaît actuellement un grand essor vu le large éventail d'applications qu'elle nous offre. On peut citer:

- La géologie et la prospection des ressources minérales où on a pu vérifier grâce à notre étude, la différence des réponses des différents types de surfaces. (Voir figure de l'émissivité de certaines roches).
- L'étude de la végétation et des ressources agricoles et forestières.
- L'hydrologie et l'étude des ressources en eau.
- L'océanographie.
- Le contrôle des pollutions.
- La cartographie et l'aménagement du territoire.
- Surveillance des calamités naturelles (essaims de criquets).
- L'ethnologie.
- L'archéologie.
- L'observation du cosmos.
- La recherche des gisements (pétrole ou minerais).
- La thermographie (études sous-marines).
- L'étude des volcans.

La figure de la page suivante regroupe les quelques applications citées.



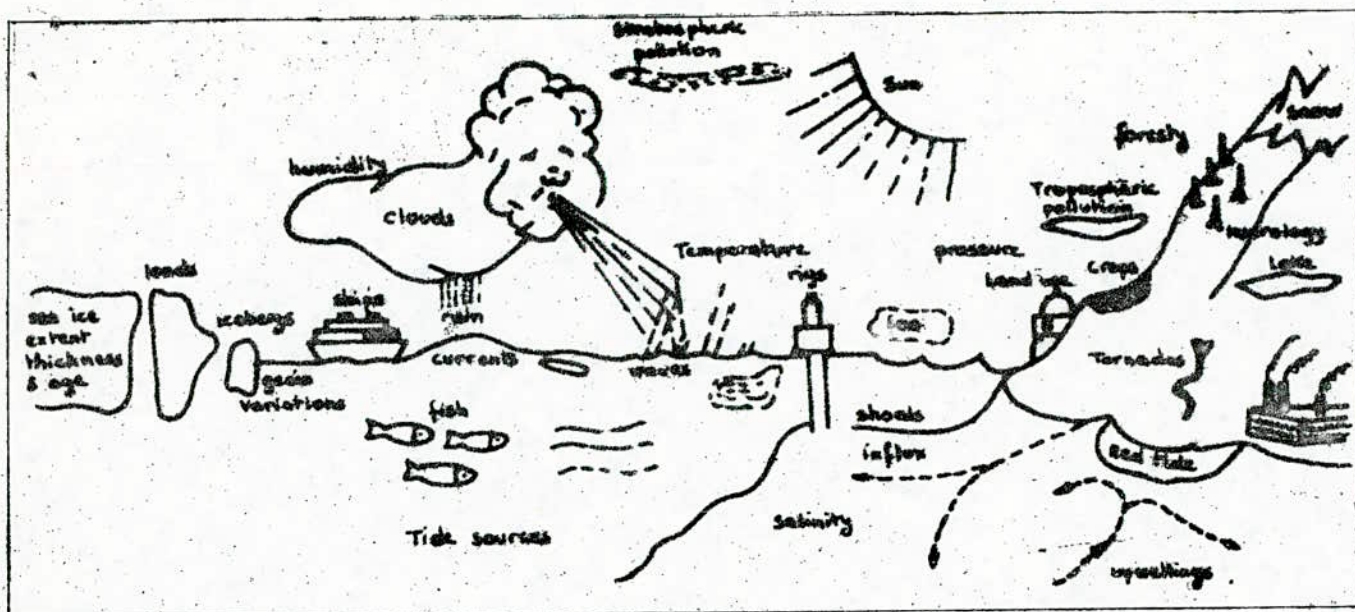


Figure regroupant les divers types d'applications de la télédétection ainsi que quelques éléments intervenant dans les perturbations de l'atmosphère.

II CONCLUSION :

Le sujet de notre thèse consistait au début à étudier et à réaliser une chaîne de mesure de l'émissivité en infrarouge thermique, en télédétection.

Mais, en l'absence de connaissances antérieures dans cette science, il nous a fallu faire un travail de recherche bibliographique et de documentation pour pouvoir cerner les notions de base de la télédétection. Ce qui nous a permis de toucher à beaucoup de disciplines telles que l'étude du rayonnement électromagnétique, la théorie des semi-conducteurs, l'optique, l'électronique générale et bien sur une initiation à la télédétection.

Notre étude s'est faite en 3 grandes phases:

- La première phase a consisté à avoir de plus amples renseignements sur la télédétection, sur les lois qui la régissent, sur les phénomènes qui interviennent. Ensuite, dans notre domaine spectral, on a décrit deux méthodes de mesure de l'émissivité et de la température de surface, que nous n'avons, hélas, pas eu la possibilité d'appliquer, faute de temps et de matériel (corps noirs pour l'étalonnage). Enfin, on a cité les différentes perturbations en télédétection.

- Pendant la seconde phase, nous nous sommes préoccupés de l'étude de la chaîne de mesure utilisée en infrarouge thermique comprenant un émetteur et un récepteur. A cause du coût et des délais de livraison, l'émetteur infrarouge n'a pas pu être réalisé. On a donc réalisé le récepteur infrarouge que l'on a d'ailleurs complété (par un modulateur mécanique), pour pouvoir l'utiliser en passif.

- Pendant la troisième et dernière phase, nous avons pu tester l'appareil réalisé et vérifier quelques caractéristiques de certaines surfaces. Ceci a permis de détecter les conditions d'utilisation de l'appareillage, qui ont permis de déceler ses limites, du fait de l'utilisation de composants non appropriés (résistances et capacités introduisant des bruits), et de la difficulté à faire un bon alignement optique. Néanmoins, aux erreurs d'expériences près, on a pu obtenir des courbes plus ou moins conformes aux résultats théoriques connus.

En conclusion, on pourra dire qu'avec des corps noirs calibrés, on aurait pu étalonner l'appareil et augmenter par la même ses performances. Ceci aurait permis la mesure directe de la radiance, donc de l'émissivité.

De même qu'avec un émetteur étalonné, on aurait pu mesurer la température de surface du milieu étudié.

Ce travail permet d'envisager quelques applications telles que:

- La mesure du signal de sortie en fonction de l'angle d'émission.
- La vérification des caractères de certaines surfaces.
- L'influence de l'état de la surface sur le signal de sortie.

Nous souhaitons que ce modeste travail puisse contribuer à la résolution de certains problèmes rencontrés en télédétection.

IBLIOGRAPHIE

- A.ABDELLAOUI - ALGER 77 - Synthèse du séminaire de télédétection  
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES : Principes physiques et mathématiques de  
la télédétection - Cours d'été 78 -
- M.CHEVREL - APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION - TOULOUSE 76 -
- A.DAUGUET - DETECTION DES RADIATIONS INFRAROUGES ET SES APPLICATIONS - 64 -  
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE - BASES PHYSIQUES DE LA TD - 77 -  
ELEMENTS OF INFRARED TECHNOLOGIE - PAUL W.KRUSE, LAWRENCE Mc GLAUCHLIN and  
RICHMOND B.Mc QUISTEN - 75 -
- EXTRAIT DU BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS N° 630.
- D.BLANC, A.DEGEITH et J.FONTAU - OPTIQUE -
- M.F.KIMMIT - FAR INFRARED TECHNIQUES - 70 -
- PHILIP N STATER - 80 -
- MADANI NAIDJATE - THESE DE FIN D'ETUDES - CHAINE DE MESURE DE LA REFLECTIVITE  
EN PROCHE INFRAROUGE - FEVRIER 81 -
- SPECIAL ISSUE ON INFRARED TECHNOLOGIE FOR REMOTE SENSING - THE INSTITUTE  
OF ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERS - 75 -
- WING HING NGAI - THESE DE DOCTORAT 3<sup>eme</sup> CYCLE EN INSTRUMENTATION -  
TELEDETECTION INFRAROUGE THERMIQUE - STRASBOURG JANVIER 80 -