

27/8.2

U. S. T. H. B.

E. N. P. A.

Departement d'Electronique
et Electrotechnique

2ex

Diplôme d'Ingénieur Electronique

Projet De Fin d'Etudes

Etude et Réalisation d'un
Radiometre à Balayage
de Laboratoire

C. S. T. N.

LABORATOIRE DE TELEDETECTION



PROPOSE PAR :

A. ABDELLAOUI

D^r. de Specialite

ETUDIE PAR :

A. ELMOHRI

N. KAHOUL

PROMOTION JANVIER 1982

Biblio

Dédicaces

- À mes parents
- À mes amis
- Et à tous ceux qui font honnêtement leur travail

Nadhir

- À mon cher père qui, le premier me montra le chemin qui mène à la mosquée .
- À ma chère mère , pour son courage , et son grand cœur illuminé par la foi rayonnante .
- À mes frères et sœurs , avec toute mon affection .
- À mes amis , ceux auprès desquels , je ressens le meilleur bonheur , en particulier à : B. Mohamed ; Z. Mahfoud ; K. Mohamed ; B. Belkacem ; Z. Mohamed et N. Madani ainsi que D. Mohamed
- L'amour de dieu est le plus grand -

Abderrezak

~ Remerciements ~

Ce travail a été effectué au Centre des Sciences et de la Technologie Nucléaire, dans le laboratoire de "Télétection", sous la direction de Monsieur Abdelkader Abdellaoui, directeur de recherches en télétection d'Alger; qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de gratitude et nos sincères remerciements pour son aide et ses conseils, ainsi d'avoir dirigé ce travail avec bienveillance.

- Nos remerciements vont également à nos collègues, et nos amis pour leurs aides pratique et morale.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة وإنتاج
مقوم أشعة ماسخ للقياس البعدي قرب
« تحت الحمراء »

بعد تقديم موجز لمبادئ القياس البعدي
والوسائل المستعملة، أعطينا وصفاً
عاماً لمقوم أشعة ماسخ.
كما أضعنا بعض أصناف مقومات الأشعة
الماسحة حالياً (مميزات، بطاقات فنية).
دراسة تصميم مقوم الأشعة الماسحة يعمل
قرب تحت - الحمراء (م 1,1 - 0,8) يتوج عملنا
هَذَا.

وأخيراً قسنا بواسطة هذا الملتقط الإجابات للأشعة
الشمسية لمساحات مختلفة (عشب، طريق مزفت
أرض جرداء) في أوقات مختلفة من النهار.

6

TABLE

Page

<u>I N T R O D U C T I O N</u>	1
Chapitre 1 : Généralités sur la télédétection	3
1.1. Présentation de la télédétection	3
1.2. Moyens utilisés en télédétection	3
1.2.1. Les rayonnements	3
1.2.2. Les vecteurs :	4
Chapitre 2 : Radiomètre a Balayage :	8
2.1. Description générale :	8
2.2. Système de balayage :	8
2.2.1. Principe du balayage :	8
2.2.2. Qualités requises pour un système de balayage mécanique :	11
2.2.3. Les types de balayages :	12
2.3. Optique de collection :	13
2.4. Séparation spectrale et filtrage spectral	13
2.4.1. Filtrés interférentiels :	13
2.4.2. Systèmes dispersifs conventionnels	15
2.5. Les Détecteurs :	15
2.6. L'électronique d'amplification	17
2.7. Traitement et codage du signal	18
Chapitre 3. Radiomètres à balayage utilisés en télédétection !	19
3.1. Le Radiomètre MSS de LANDSAT 1,2 et 3!	19
3.1.1. Description et mode opératoire	19
3.1.2. Caractéristiques techniques du MSS de LANDSAT	22
3.2. Le Radiomètre géostationnaire de METEOSAT !	26
3.2.1. Description de l'instrument	26
3.2.1.1. Système optique	28
3.2.1.2. Mécanismes !	30
3.2.1.3. L'électronique des chaînes image!	31
3.2.2. Caractéristiques techniques du radiomètre d e METEOSAT	31
3.3. Le Radiomètre à balayage ARIES	33
3.3.1 Description du matériel embarqué	33
3.3.1.1. Principe du balayage	33
3.3.1.2. Tête d'analyse	33
3.3.1.3. Dispositifs annexes	35
3.3.2. Caractéristiques techniques du Radiomètre ARIES	36

- 3.4. Radiomètre HRV de SPOT
 - 3.4.1. Système SPOT
 - 3.4.1.1. Plate Forme
 - 3.4.1.2. Chage utile
 - 3.4.2. L'Instrument HRV.
 - 3.4.3. La visée verticale
 - 3.4.4. La visée latérale
 - 3.4.5. Caractéristiques techniques de l'instrument HRV de SPOT

Chapitre 4: Conception d'un radiomètre à balayage

ETUDE THEORIQUE

- 4.1. Constitution et présentation du radiomètre
- 4.2. Limitation de la largeur de bande
 - 4.2.1. Première méthode
 - 4.2.2. Deuxième méthode
- 4.3. Influence des paramètres vitesses de translation et rotation
- 4.4. Optique d'entrée et optique de collection
 - 4.4.1. Optique de collection
 - 4.4.2. Optique d'entrée
- 4.5. La Réflexion vitreuse
- 4.6. Choix du miroir
- 4.7. Détecteurs-Amplification-Echantillonnage :
 - 4.7.1. Les détecteurs
 - 4.7.2. Amplification
 - 4.7.3. L'Echantillonnage

Chapitre 5 : Réalisation du Radiomètre à balayage :

- 5.1. Schéma synoptique du radiomètre à balayage
- 5.2. Optique d'entrée
- 5.3. Le système de balayage
- 5.4. Optique de collection
- 5.5. Le détecteur
- 5.6. Chaîne électronique d'amplification et échantillonnage .
 - 5.6.1. Le préamplificateur
 - 5.6.2. L'Amplificateur
 - 5.6.3. Circuit d'échantillonnage
- 5.7. Bruits des détecteurs de rayonnement
- 5.8. Evaluation du signal sur bruit

Chapitre 6 ! Mesures et Interprétations	80
6.1 ! Utilisation d'une source passive à l'émission	80
6.1.1! Rayonnement solaire	80
6.1.2! Bilan énergétique;! Sol Atmosphère	81
6.2! Mesure de la réflectivité des surfaces naturelles	82
6.2.1! Réflectivité des surfaces naturelles	82
6.3! Mesures!	84
6.3.1! Vérification des caractéristiques de certaines surfaces	84
a/ Caractère du signal de sortie	84
b/ Surfaces à étudier	85
c/ Présentation du Site	85
6.3.2! Interprétation des résultats	86
6.4! Applications!	86

- C O N C L U S I O N .

1. The first part of the document is a list of names.

2. The second part is a list of addresses.

3. The third part is a list of phone numbers.

4. The fourth part is a list of email addresses.

5. The fifth part is a list of social media handles.

6. The sixth part is a list of websites.

7. The seventh part is a list of social media profiles.

8. The eighth part is a list of social media posts.

9. The ninth part is a list of social media comments.

10. The tenth part is a list of social media shares.

11. The eleventh part is a list of social media likes.

12. The twelfth part is a list of social media retweets.

I N T R O D U C T I O N

Une vision synoptique et globale est d'abord une vision à distance: l'homme avait senti depuis longtemps la nécessité de l'idée, aussi bien pour connaître son milieu environnant que pour se défendre pendant les moments critiques...

La photographie aérienne, a été le premier moyen technique d'observation à distance. Elle a été mise en œuvre par la découverte du principe de la photographie, la construction des ballons et des avions de reconnaissance par la suite. Elle a connu son développement surtout pendant les deux dernières guerres mondiales.

La télédétection est une nouvelle technique d'observation à distance de la terre.

La connaissance de la terre, et surtout la gestion de ses ressources et son aménagement nécessitent l'utilisation d'outils performants de détection, d'évaluation, voire de prévisions: tels sont les buts que se fixe la télédétection. Qu'elle utilise des avions ou des satellites, des capteurs photographiques, thermographiques, ou des radars, la télédétection permet aussi bien des inventaires (par exemple, ressource en eau, en forêt, en agriculture, en zone urbaines, etc...) sur des larges surfaces, que des diagnostics ou des prospections en des points précis, avec des niveaux de synthèse variables et d'une répétitivité devenant chaque jour plus nécessaire.

De plus, la télédétection aéroportée, extention des techniques de photographie aérienne complète l'observation de la terre à haute résolution depuis l'espace pour l'accomplissement des missions à la demande sur des sites localisés de plus faible surface.

L'objet de notre travail repose sur le principe de la conception d'un système d'acquisition d'informations utilisé en télédétection: radiomètre à balayage monospectral.

The first part of the paper discusses the general theory of the subject. It is shown that the theory is based on the principle of least action. The action is defined as the integral of the Lagrangian over time. The Lagrangian is a function of the coordinates and velocities. The equations of motion are derived from the principle of least action. It is shown that the equations of motion are equivalent to the Euler-Lagrange equations. The second part of the paper discusses the application of the theory to the case of a particle in a potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the potential energy function. The energy of the particle is conserved. The third part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential. The energy of the particle is conserved.

The fourth part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved. The fifth part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved. The sixth part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved.

The seventh part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved. The eighth part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved. The ninth part of the paper discusses the case of a particle in a magnetic field and a scalar potential. It is shown that the motion of the particle is determined by the vector potential and the scalar potential. The energy of the particle is conserved.

Pour cela, nous nous sommes proposés le plan suivant:

- une présentation de la télédétection,
- une description générale d'un radiomètre à balayage, ainsi qu'une présentation de quelques radiomètres, avec leurs fiches techniques, utilisés en télédétection;
- l'étude et la réalisation d'un radiomètre à balayage de laboratoire pour la télédétection proche-infrarouge.
- mesures et interprétations.

CH I- GENERALITES SUR LA TELEDETECTION

I.1- PRESENTATION DE LA TELEDETECTION :

La télédétection est l'ensemble des techniques permettant d'acquérir des informations à distance concernant un milieu sans qu'il y ait contact entre celui-ci et le capteur (instrument de mesure) .

Un exemple très simple permet de ^{mieux} comprendre le principe de la télédétection qui fonctionne selon le même processus que celui de notre propre vision .

Quand nous regardons un objet, sa forme, sa couleur, sa brillance sont autant d'informations qui nous sont transmises par l'intermédiaire de la lumière réfléchiée par cet objet .

Nous captions ces informations aux moyens de nos yeux qui les acheminent à notre cerveau où elles sont immédiatement traitées c'est à dire identifiées, comparées à ce que nous avons déjà vu enfin interprétées en fonction de notre connaissance et notre logique .

Le schéma de la figure I nous illustre un système de télédétection .

I.2- MOYENS UTILES EN TELEDETECTION :

Parmi les moyens mis en oeuvre par la télédétection, on peut citer : les rayonnements et les vecteurs .

I.2.1- LES RAYONNEMENTS :

Chaque objet terrestre émet ou réfléchit un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles sont classées suivant leur longueur d'onde (dans la figure 12) .

En principe, tout le spectre électromagnétique pourrait être utilisé pour l'exploration à distance, de l'ultraviolet aux ondes radios. Mais en l'état actuel de la technique, il n'existe de détecteur que pour certaines régions du spectre .

D'autre part l'atmosphère terrestre joue un rôle perturbateur dans la propagation de ces rayonnements et seules quelques "fenêtres" peu affectées par l'absorption ou par la diffusion restent utilisables . Ce sont essentiellement :

CH I- GENERALITES SUR LA TELEDETECTION

I.1- PRESENTATION DE LA TELEDETECTION :

La télédétection est l'ensemble des techniques permettant d'acquérir des informations à distance concernant un milieu sans qu'il y ait contact entre celui-ci et le capteur (instrument de mesure) .

Un exemple très simple permet de ^{mieux} comprendre le principe de la télédétection qui fonctionne selon le même processus que celui de notre propre vision .

Quand nous regardons un objet, sa forme, sa couleur, sa brillance sont autant d'informations qui nous sont transmises par l'intermédiaire de la lumière réfléchiée par cet objet .

Nous captions ces informations aux moyens de nos yeux qui les acheminent à notre cerveau où elles sont immédiatement traitées c'est à dire identifiées, comparées à ce que nous avons déjà vu enfin interprétées en fonction de notre connaissance et notre logique .

Le schéma de la figure I nous illustre un système de télédétection .

I.2- MOYENS UTILES EN TELEDETECTION :

Parmi les moyens mis en oeuvre par la télédétection, on peut citer : les rayonnements et les vecteurs .

I.2.1- LES RAYONNEMENTS :

Chaque objet terrestre émet ou réfléchit un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles sont classées suivant leur longueur d'onde ~~dans~~ la figure 12).

En principe, tout le spectre électromagnétique pourrait être utilisé pour l'exploration à distance, de l'ultraviolet aux ondes radios. Mais en l'état actuel de la technique, il n'existe de détecteur que pour certaines régions du spectre .

D'autre part l'atmosphère terrestre joue un rôle perturbateur dans la propagation de ces rayonnements et seules quelques "fenêtres" peu affectées par l'absorption ou par la diffusion restent utilisables . Ce sont essentiellement :

- le visible et le proche infrarouge de 0,4 μm à 4,1 μm utilisés pour l'enregistrement des rayonnements solaires réfléchis par les objets terrestres. C'est le domaine de la photographie aérienne classique et plus particulièrement des appareils à balayages multispectraux .
- deux bandes situées dans l'infrarouge moyen: 3 à 5 μm , 8 à 14 μm . Dans ces deux bandes, on reçoit l'énergie électromagnétique émise par les corps terrestres, qui est fonction de leur température et de leur émissivité, c'est à dire le rapport de l'énergie émise réellement par le corps à celle qu'émettrait un corps parfait appelé "corps noir". Pour un tel corps, l'énergie W émise à une longueur d'onde donnée ne dépend que de la température T (loi de Stéphan: $W = kT^4$).

L'émissivité est égale à un pour le corps noir.

Le rayonnement recueilli nous renseigne donc essentiellement sur la température propre des objets observés, à condition toutefois d'éliminer l'énergie solaire réfléchie par ces objets.

- les bandes millimétriques et centimétriques (hyperfréquences) sont utilisables, soit avec des capteurs actifs possédant leur propre source d'illumination, les radars, soit avec les radiomètres passifs recueillant l'énergie -très faible- émise par les corps terrestres dans ces longueurs d'onde .

Le principal intérêt des hyperfréquences est de pouvoir traverser la couverture nuageuse .

I.2.2- LES VECTEURS:

Les vecteurs sont les véhicules ou les "platesformes" d'observation, permettant de transporter en altitude les capteurs.

Les vecteurs peuvent être des avions, des ballons, des satellites. Les mesures enregistrées sont, soit transmises en temps réel à une station de réception, soit stockées pour une transmission ultérieure (lors de l'atterrissage pour un avion ou le passage en vue d'une station de réception pour un satellite) .(voir tableau I pour les différents vecteurs.)

- le visible et le proche infrarouge de 0,4 μm à 1,1 μm utilisés pour l'enregistrement des rayonnements solaires réfléchis par les objets terrestres. C'est le domaine de la photographie aérienne classique et plus particulièrement des appareils à balayages multispectraux .
- deux bandes situées dans l'infrarouge moyen: 3 à 5 μm , 8 à 14 μm . Dans ces deux bandes, on reçoit l'énergie électromagnétique émise par les corps terrestres, qui est fonction de leur température et de leur émissivité, c'est à dire le rapport de l'énergie émise réellement par le corps à celle qu'émettrait un corps parfait appelé "corps noir". Pour un tel corps, l'énergie W émise à une longueur d'onde donnée ne dépend que de la température T (loi de Stéphan: $W = kT^4$).

L'émissivité est égale à un pour le corps noir.

Le rayonnement recueilli nous renseigne donc essentiellement sur la température propre des objets observés, à condition toutefois d'éliminer l'énergie solaire réfléchie par ces objets.

- les bandes millimétriques et centimétriques (hyperfréquences) sont utilisables, soit avec des capteurs actifs possédant leur propre source d'illumination, les radars, soit avec les radiomètres passifs recueillant l'énergie -très faible- émise par les corps terrestres dans ces longueurs d'onde .

Le principal intérêt des hyperfréquences est de pouvoir traverser la couverture nuageuse .

I.2.2- LES VECTEURS:

Les vecteurs sont les véhicules ou les "platesformes" d'observation, permettant de transporter en altitude les capteurs.

Les vecteurs peuvent être des avions, des ballons, des satellites. Les mesures enregistrées sont, soit transmises en temps réel à une station de réception, soit stockées pour une transmission ultérieure (lors de l'atterrissage pour un avion ou le passage en vue d'une station de réception pour un satellite) .(voir tableau I pour les différents vecteurs.)

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.

- 5 -

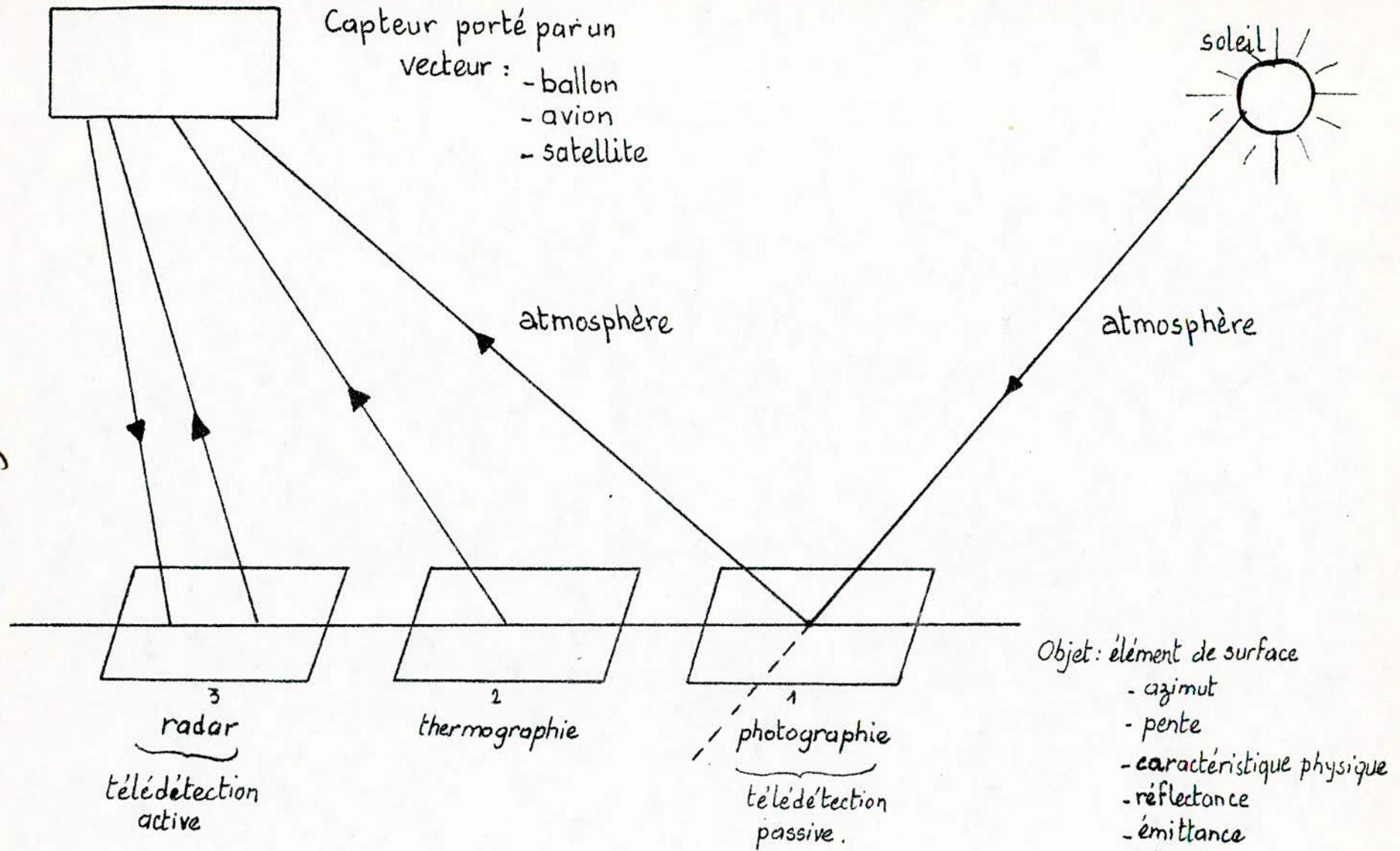


FIG1 : Principe général de la télédétection .

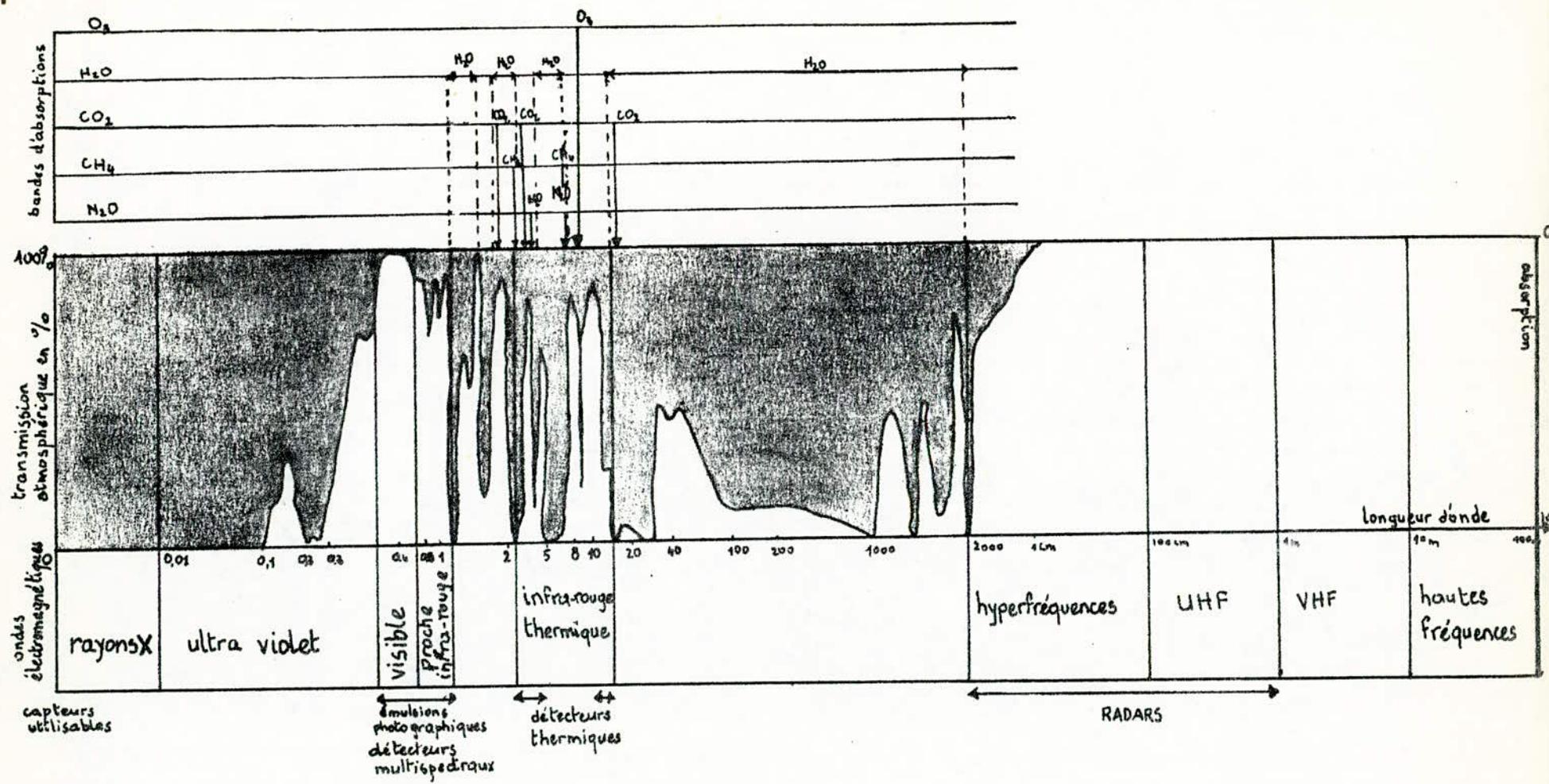


FIG 2 : Le spectre électromagnétique et son absorption par l'atmosphère : celle-ci n'intervient plus aux longueurs d'onde supérieures à 5mm (domaine des hyperfréquences et hautes fréquences utilisées avec les radars, en radio, etc.). Aux longueurs d'onde inférieures, on voit que les seuls "créneaux" non absorbés par l'atmosphère se situent dans le domaine du visible, du proche infra-rouge et de l'infra-rouge thermique.

VECTEUR	ALTITUDE	ECHELLE DU DOCUMENT
satellite géostationnaire "MÉTÉOSAT"	36 000 Km	
satellite non habité (cas de "LANDSAT").	900 Km.	$\frac{1}{4000\ 000}$
Vaisseau spatial habité (cas de "SOYOUZ")	300 Km.	$\frac{1}{1000\ 000}$
ballon stratosphérique	30 - 35 Km	$\frac{1}{400\ 000}$
Avions		
- pressurisé	10 - 13 Km	$\frac{1}{100\ 000}$
- lourd	1,5 - 6 Km	$\frac{1}{10\ 000}$ - $\frac{1}{50\ 000}$
- léger	300 m - 1,5 Km	$\frac{1}{2000}$ - $\frac{1}{5000}$
ballon captif	30 - 200 m.	$\frac{1}{500}$ - $\frac{1}{1000}$

Tableau I

CH I- GENERALITES SUR LA TELEDETECTION

I.1- PRESENTATION DE LA TELEDETECTION :

La télédétection est l'ensemble des techniques permettant d'acquérir des informations à distance concernant un milieu sans qu'il y ait contact entre celui-ci et le capteur (instrument de mesure) .

Un exemple très simple permet de comprendre le principe de la télédétection qui fonctionne selon le même processus que celui de notre propre vision .

Quand nous regardons un objet, sa forme, sa couleur, sa brillance sont autant d'informations qui nous sont transmises par l'intermédiaire de la lumière réfléchiée par cet objet .

Nous captions ces informations aux moyens de nos yeux qui les acheminent à notre cerveau où elles sont immédiatement traitées c'est à dire identifiées, comparées à ce que nous avons déjà vu enfin interprétées en fonction de notre connaissance et notre logique .

Le schéma de la figure I nous illustre un système de télédétection .

I.2- MOYENS UTILES EN TELEDETECTION :

Parmi les moyens mis en oeuvre par la télédétection, on peut citer : les rayonnements et les vecteurs .

I.2.1- LES RAYONNEMENTS :

Chaque objet terrestre émet ou réfléchit un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles sont classées suivant leur "longueur d'onde" (voir la figure (2)).

En principe, tout le spectre électromagnétique pourrait être utilisé pour l'exploration à distance, de l'ultraviolet aux ondes radios. Mais en l'état actuel de la technique, il n'existe de détecteur que pour certaines régions du spectre .

D'autre part l'atmosphère terrestre joue un rôle perturbateur dans la propagation de ces rayonnements et seules quelques "fenêtres" peu affectées par l'absorption ou par la diffusion restent utilisables . Ce sont essentiellement :

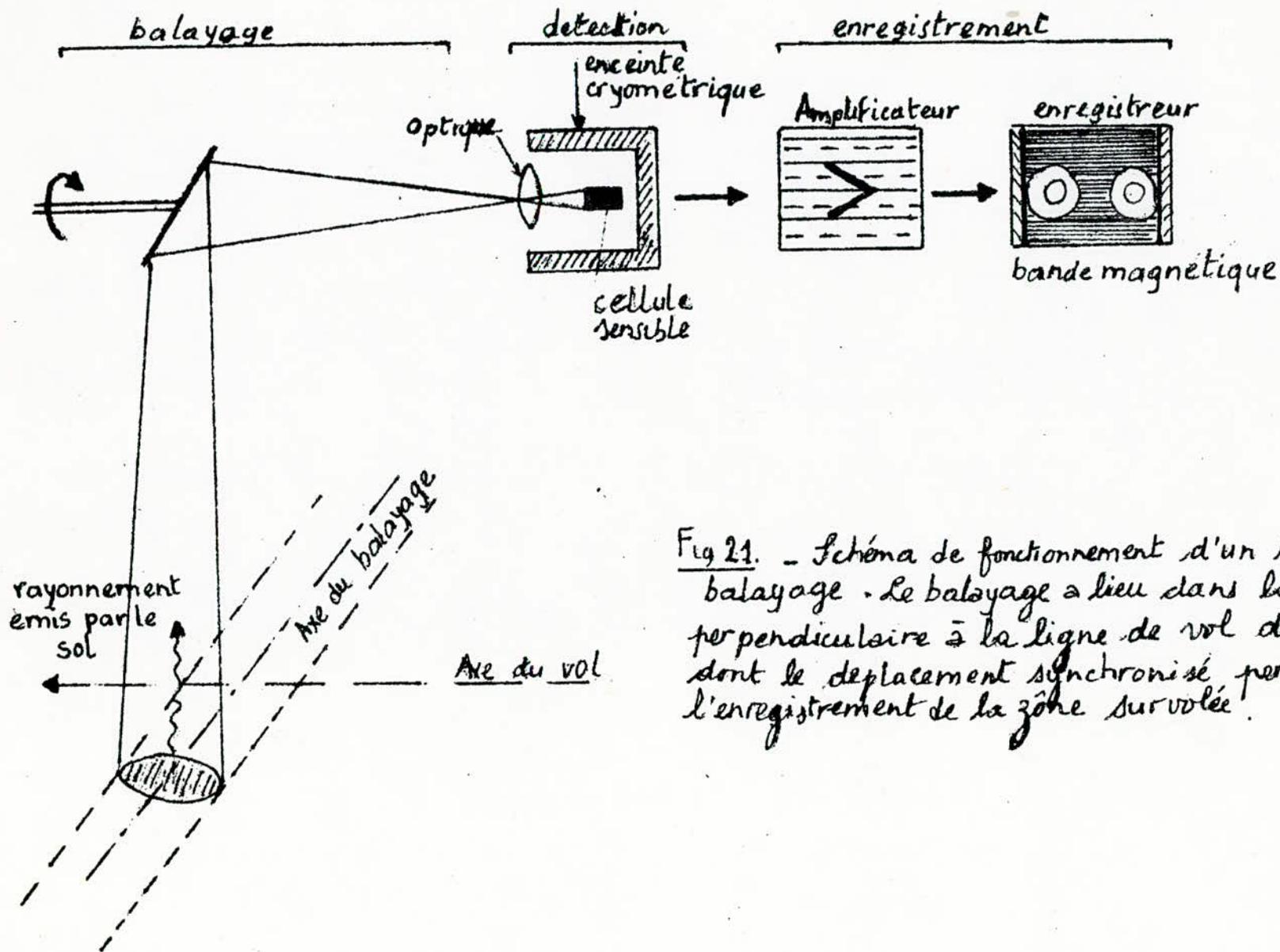


Fig 21. - Schéma de fonctionnement d'un radiomètre à balayage. Le balayage a lieu dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol de l'avion, dont le déplacement synchronisé permet ainsi l'enregistrement de la zone survolée.

de la combinaison de deux opérations:

- la formation des lignes;
- la succession des lignes .

La formation des lignes est assurée par le basculement piloté du miroir qui présente à chaque rotation de nouvelle tranche terrestre au radiomètre.

La succession des lignes est assurée par le déplacement du vecteur à vitesse constante .

Une ligne balayée correspond à une bande de terrain plus ou moins étroite, constituée par une succession d'éléments de surface de dimensions raisonnablement petites.

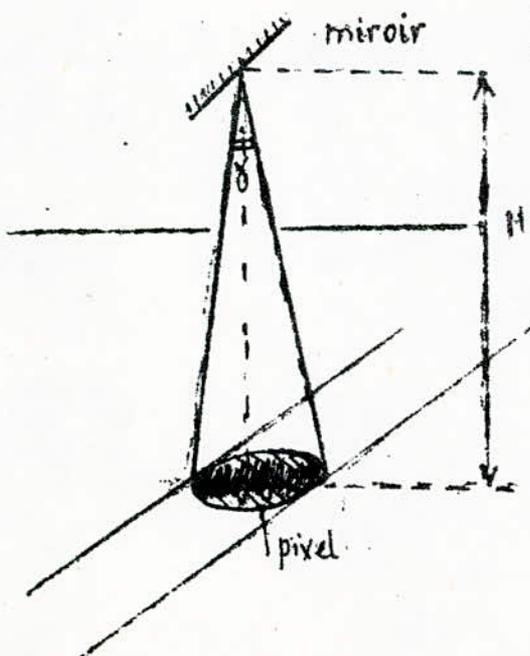
Chacun de ces éléments de surface est appelée "pixel" . On définit ainsi le pixel, par la plus petite aire instantannée d'un échantillon d'un milieu irradié vue sous un certain angle solide, d'angle au sommet assez petit, appelé IFOV et noté par γ (IFOV: instantaneous field of view).

L'IFOV est désigné aussi par l'angle instantané d'analyse .

La taille d'un pixel pourra être déterminée par la largeur de la bande vue au sol (ligne); cette dernière est liée d'une part aux dimensions de l'instrument, et d'autre part à l'altitude. D'où d'ouverture angulaire donnée, la largeur du champ au sol est obtenue par la relation:

$$d = 2H \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}$$

- H: altitude.
- γ : angle d'ouverture;
- d: largeur du champs au sol.



2.2.3- LES TYPES DE BALAYAGES :

On peut distinguer deux types de balayage, selon que le mécanisme de balayage se trouve placé en avant ou en arrière du télescope (système optique d'entrée) .

Les deux types de balayages sont:

- balayage dans l'espace objet, (fig 2.2.3(a))
- balayage dans l'espace image. (fig 2.2.3(b))

On définit l'espace objet et l'espace image comme dans la figure qui suit .

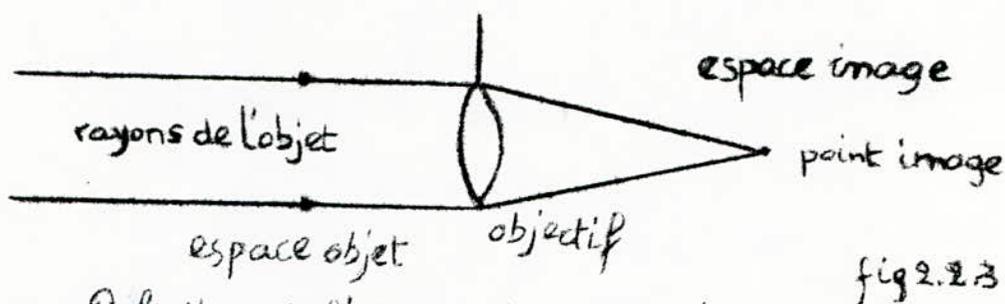


fig 2.2.3

- Definition de l'espace objet et de l'espace image

Exemples de balayages dans l'espace objet et dans l'espace image:

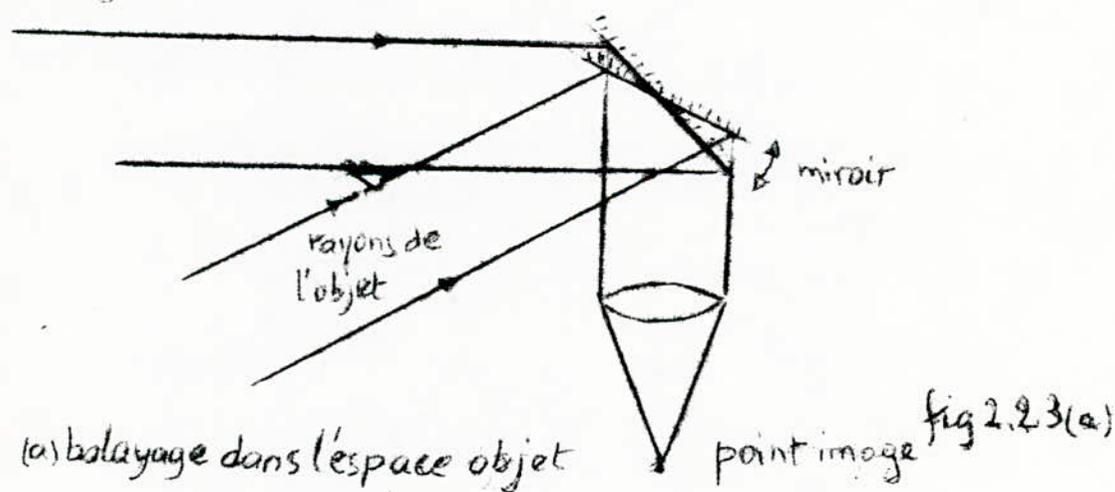
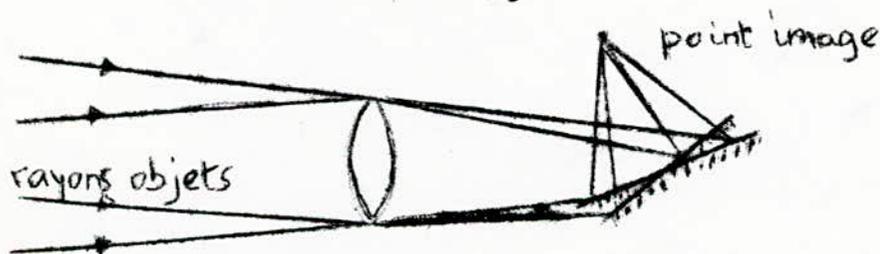


fig 2.2.3(a)

(a) balayage dans l'espace objet



point image

(b) balayage dans l'espace image fig 2.2.3(b)

Exemples de balayages dans l'espace objet et dans l'espace image

2.3- OPTIQUE COLLECTRICE :

Elle permet de collecter le flux d'énergie rayonnée vers le satellite et de la focaliser dans son plan focal vers le détecteur. Pour l'observateur d'infrarouge, l'optique d'entrée est constituée d'un télescope à miroirs, et l'optique secondaire de lentilles.

Les optiques à miroirs présentent l'avantage de ne pas avoir de chromatisme, ceci permet donc à des observations simultanées sur une large gamme de longueur d'onde, ainsi devient facile la protection contre la lumière parasite .

En fait, la focale est directement liée à la taille du détecteur pour une résolution souhaitée donnée. Le bruit de détection peut être réduit, et cela du fait que les détecteurs sont très petits, de quelques dizaines à quelques centaines de microns mètres, d'où des focales courtes et des instruments spatiaux assez compacts.

Par ailleurs on cherche toujours à collecter le maximum de flux, ce qui conduit à des optiques très ouvertes qui sont difficilement réalisables.

2.4- SEPARATION SPECTRALE ET FILTRAGE SPECTRAL :

Un radiomètre multispectral à éléments photoconducteurs est conçu de façon que les longueurs d'onde retenues du spectre continu de la scène observée, dépendent du domaine principal d'utilisation. une séparation spectrale judicieuse est utile, par l'intérêt qui permet d'observer dans des fenêtres spectrales dont le nombre, les emplacements et les largeurs sont choisis de façon à assurer un bon contraste entre les différents points de la scène et bonne caractérisation de chacun d'eux.

Les différents systèmes de séparation peuvent se ramener à deux types:

2.4.1- FILTRES INTERFERENTIELS :

Le filtrage peut être assuré par des filtres interférentiels placés devant les détecteurs; la séparation spectrale peut être assurée de trois façons:

- une séparation dans le temps, au moyen d'une roue à filtres que l'on fait défiler devant un détecteur unique .

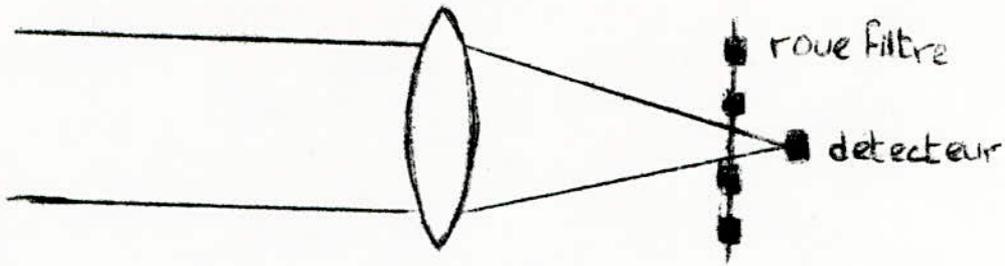


fig 2.4-1 (a)

- une séparation dans le champ: à un instant donné, les détecteurs des diverses bandes spectrales observent des points différents du paysage. Un même point est observé dans les diverses bandes à des instants légèrement décalés. Les recalages se font soit à bord soit au sol.

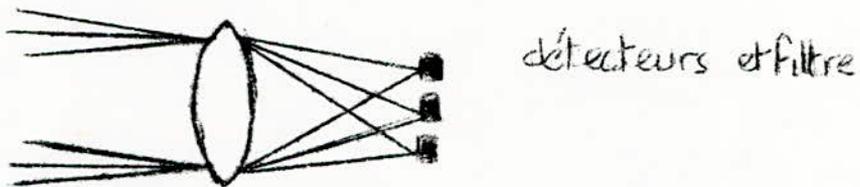
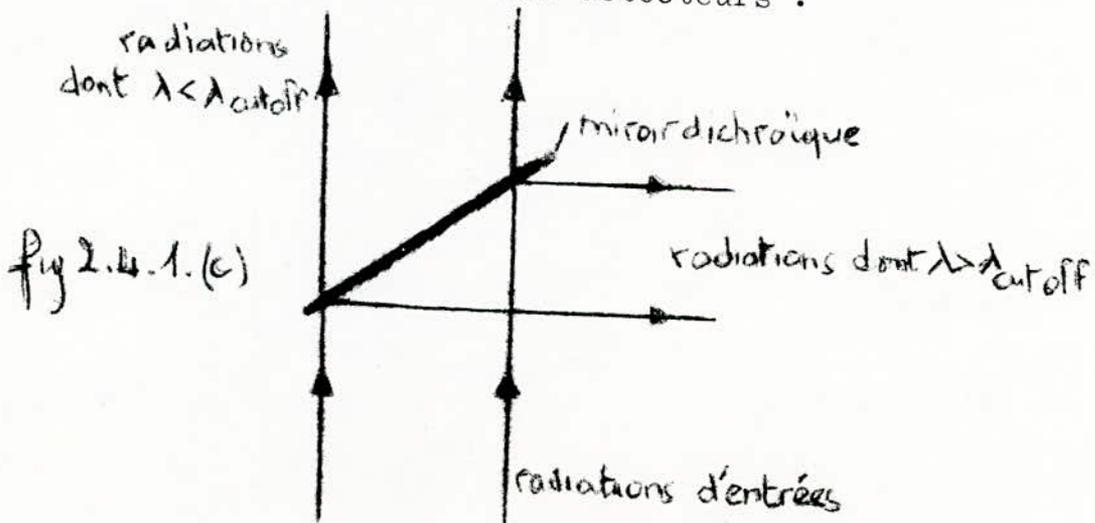


fig 2.4.1 (b)

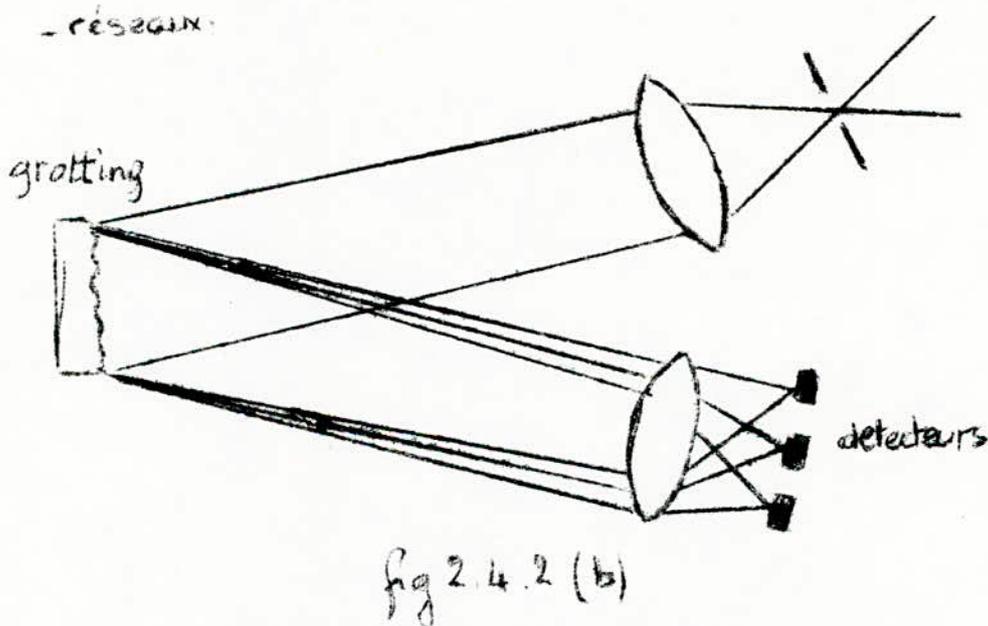
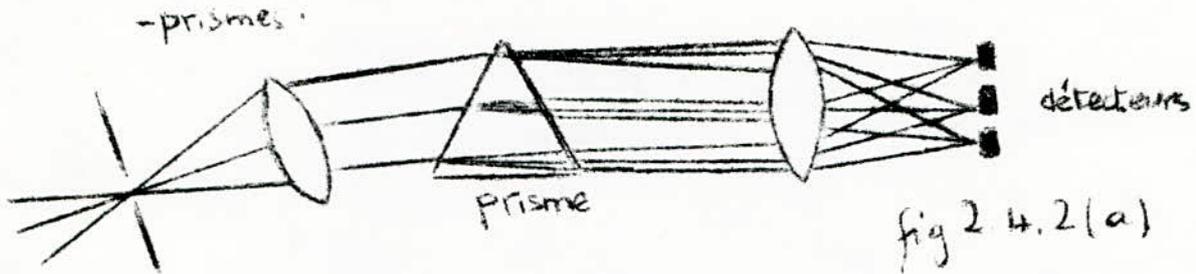
- une séparation par lames dichroïques: une lame dichroïque est un miroir qui a la propriété de réfléchir une partie du spectre et de transmettre son complémentaire. La séparation par lame dichroïde permet d'observer simultanément les points dans les différentes longueurs d'onde moyennant un positionnement convenable des détecteurs.



2.4.2- SYSTEMES DISPERSIFS CONVENTIONNELS :

Le rayonnement décomposé tombe sur les détecteurs convenablement placés pour recevoir l'énergie dans les bandes spectrales choisies.

- Les systèmes dispersifs sont: - les prismes;
- les réseaux (par transmission ou par réflexion) .



2.5- LES DETECTEURS :

Un détecteur de rayonnement a pour fonction de traduire, l'énergie reçue de ce rayonnement en une information qui est la plus souvent électrique.

Un détecteur est réalisé de dimension relativement petite et constitue le cœur de l'instrument de mesure. Quand la technologie propose plusieurs types de détecteurs possibles, il faut choisir celui qui doit être retenu le mieux en fonction des objectifs de mission et des incidences sur la conception de l'instrument.

Pour les instruments spatiaux (multispectral et à balayage) certains problèmes peuvent se poser:

- un problème photométrique: est de faire en chaque point de la scène à analyser une mesure aussi précise que possible de l'énergie reçue. Ce là revient à trouver un détecteur qui soit sensible dans le domaine de longueur d'onde où l'on suppose qu'il y a quelque chose d'intéressant à observer. Il faut ainsi viser les fenêtres atmosphériques.
- un problème géométrique: c'est de respecter au mieux la disposition géographique des points par rapport aux autres, au moins localement
- le problème de pouvoir retrouver les différentes informations spectrales correspondant à un même point au sol que l'on peut ainsi localiser par une "signature spectrale".

La coïncidence des informations spectrales suppose une similarité géométrique des distortions d'images et des irrégularités du balayage.

Seule une liaison mécanique rigide entre détecteur observant un même point au sol dans les différentes bandes spectrales au même moment et un prélèvement simultané des informations assurent en toute rigueur cette coïncidence.

Pratiquement, suivant les concepts instrumentaux, on s'éloie plus ou moins de cet idéal.

Les types de détecteurs les plus utilisés:

Tous les détecteurs performants cherchent à compter le nombre de photons incidents: ce sont des détecteurs quantiques.

Détecteurs sensibles dans le visible et le proche infrarouge:

Parmi ces détecteurs, on peut citer:

- les photomultiplicateurs,
- les photodiodes,
- les dissecteurs et smoothing dissector.

Les détecteurs ponctuels n'ont pas de mémoire. Leur temps de réponse est très court. On s'intéresse au déplacement d'électrons qui en se déplaçant créent un courant qu'on mesure. Le niveau du signal est indépendant du temps passé à observer chaque point. C'est le cas des photomultiplicateurs et des photodiodes et du dissecteur d'image qui n'est rien qu'un photomultiplicateur défectible d'assurer le balayage.

Le smoothing dissector est un détecteur un peut particulier c'est un dissecteur d'image couplé à un intensificateur d'ima-ge dont le phosphore assure la fonction mémoire grâce à sa rémanance.

Détecteur sensible dans l'infrarouge:

- Dans l'infrarouge moyen, les détecteurs les plus utilisés sont:
- des photodiodes au Ge, sensible jusqu'à vers 1,7 μm .
 - des photodiodes In As 'sensible jusqu'à vers 3,5 μm .
 - des photodiodes In Sb ,sensible jusqu'à vers 5,5 μm .
 - Le Pb S parfois utilisé (jusqu'à 3 μm) a une constante de temps élevée voisine de 1 mS .

Dans l'infrarouge thermique, on utilise surtout les détec-teurs Hg Cd Te refroidis vers 100°K .

D'une façon générale, les performances des détecteurs quan-tiques dans l'infrarouge sont très sensiblement améliorées en les refroidissant pour réduire leurcourant d'obscurité.

2.5- L'ELECTRONIQUE D'AMPLIFICATION :

La chaine d'amplification électronique associée au détec+ teur, nécessite un choix judicieux de l'étage d'entrée (préam-plificateur), qui permet de ne pas accroitre sensiblement la puissance de bruit.

Dans ce cas, les qualités radiométriques de l'ensemble sont entièrement déterminées par la puissance du signal et le bruit propre du détecteur. Le rapport signal sur bruit et en fin de compte , la précision radiométrique est alors fonction de :

= La detectivité D^* (elle même fonction de la température du détecteur) elle est donnée par la relation .

$$D^* = \frac{V_{\text{sig}} \cdot \sqrt{A}}{W_{\text{obscurité}}}$$

Δf = fréquence d'intégration pour chaque mesure
 A = Aire du détecteur
 W = Energie sous obscurité assurtite

- Temps d'intégration pour chaque mesure Δt ;
- diamètre du détecteur; ℓ
- diamètre du diaphragme d'entrée D et focale equivalente F DE l'instrument ,ou simplement ouverture numérique $N = F/D$
- Taux de transmission τ
- luminence de la scène L .

La puissance du signal est proportionnelle à la surface du collecteur et est donnée par la relation:

$$S = \sigma L \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{l}{F} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \sigma \cdot L \cdot \frac{l^2}{N^2}$$

et le bruit est donné par la relation:

$$B = \frac{l}{D \sqrt{\Delta t}}$$

D'où signal / bruit :

$$S/B = \sigma L \frac{l D \sqrt{\Delta t}}{N^2}$$

2.7- TRAITEMENT ET CODAGE DU SIGNAL:

Le détecteur utilisé délivre un signal électrique continu , la bande passante de l'électronique est ajustée en fonction de la résolution spatiale désirée.

Si Ω est la vitesse angulaire de balayage du paysage en (rd/s), les fréquences électriques f sont liées aux fréquences spatiales ν par la relation/:

$$f \text{ (hertz)} = \Omega \text{ (rd/s)} \times \nu \text{ (cycles/rd)}$$

La fréquence de coupure électronique à 3 dB, f_c , correspond en général à la fréquence spatiale:

$$\nu = \frac{1}{2 \Delta x}$$

Δx = champ de vue instantané du détecteur

La fréquence d'échantillonnage est déterminée de façon à suivre à peu près les conditions du théorème de Shannon.

L'intervalle de temps entre échantillons est voisin de

$$\Delta t = 1 / 2 f_c$$

De plus en plus ^{fréquemment} ν , le signal analogique est échantillonné et codé numériquement .

CH 3. RADIOMETRES A BALAYAGE UTILISES

EN TELEDETECTION

On donnera dans ce qui suit quelques exemples typiques de radiomètres à balayage emportés par des satellites ayant déjà volé ou devant voler dans les années à venir.

3.1- le **RADIOMETRE** MSS DE LANDSAT 1,2 et 3

Le radiomètre MSS (multispectral scanner) a été embarqué sur les trois premiers satellites américains d'observation de la terre: LANDSAT 1, 2, 3 placés à une altitude de 914 Km sur une orbite circulaire.

Le radiomètre permet d'observer dans quatre bandes visibles.

Pour LANDSAT 3, l'instrument a été doté d'un cinquième canal dans l'infrarouge thermique.

3.1.1- Description et mode opératoire:

L'instrument comprend un miroir plan de balayage incliné à 45° par rapport à l'axe optique. Une rotation de $\pm 2,9^\circ$ de ce miroir suivant un axe parallèle au vecteur vitesse du satellite permet de balayer une bande étroite au sol longue de 185 Km , perpendiculairement à l'axe du satellite.

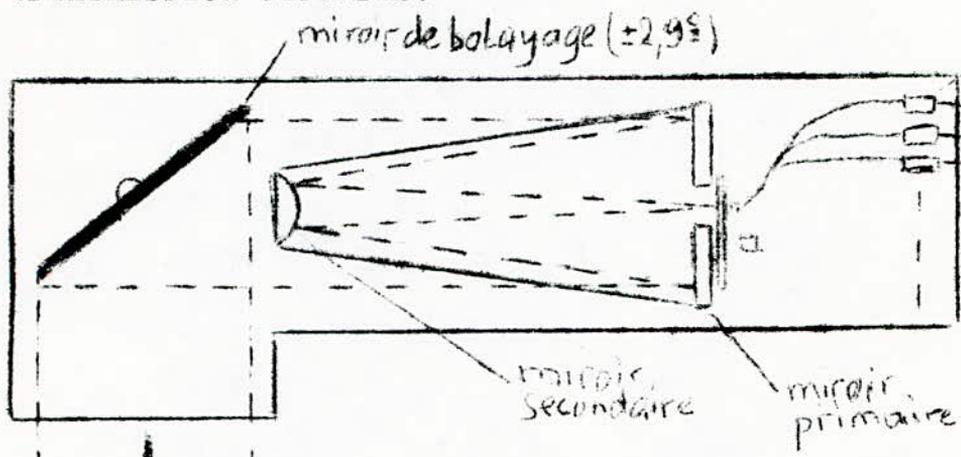
Pour chaque canal spectral, six détecteurs observent en parallèle: la bande étroite de paysage obtenue à chaque balayage.

Le champ de vue est donc constitué de six lignes adjacentes et à pour longueur $6 \times 79 = 474$ mètres . La vitesse sur l'orbite est telle que le satellite avance six fois le champ de vue élémentaire, pendant le temps nécessaire au miroir pour réaliser un balayage transversal de 185 Km et revenir à son point de départ; les bandes de terrain obtenues au cours de balayages successifs sont donc adjacentes.

Dans le plan focal du télescope, se trouve placée une matrice de fibres optiques de 6×4 (6 détecteurs \times 4 bandes spectrales) (voir fig: 3.1.1).

Chaque fibre amène la lumière à travers un filtre interférentiel qui définit la bande spectrale, sur un détecteur. L'image au sol de la section d'une fibre définit le champ de vue élémentaire de 79 mètres.

Les signaux électriques en sortie des 24 détecteurs passent dans un multiplexeur qui les échantillonne ^{séquentiellement} et les code. Ces informations sont soit transmises directement au sol en temps réel, soit stocké sur l'enregistrement de bord en vue d'une transmission différée.



↓
l'angle de vue au sol

fig 31 (a)
- Schéma de l'instrument MSS.

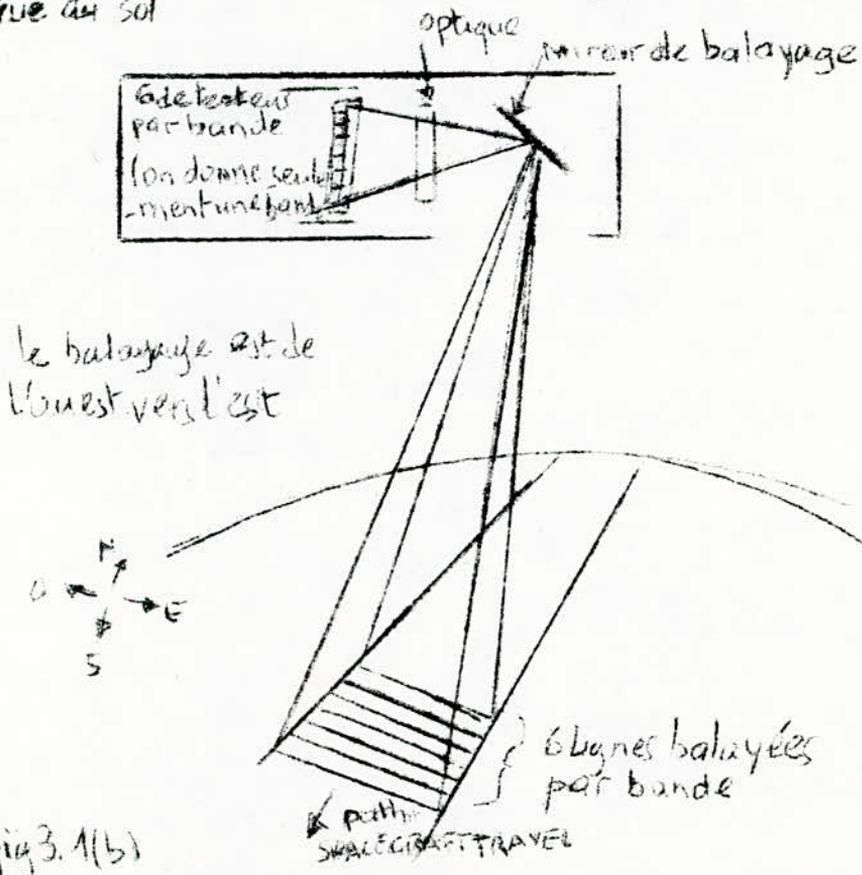


fig 3.1 (b)

MODE DE BALAYAGE DE LA SURFACE TERRESTRE PAR L'INSTRUMENT MSS -

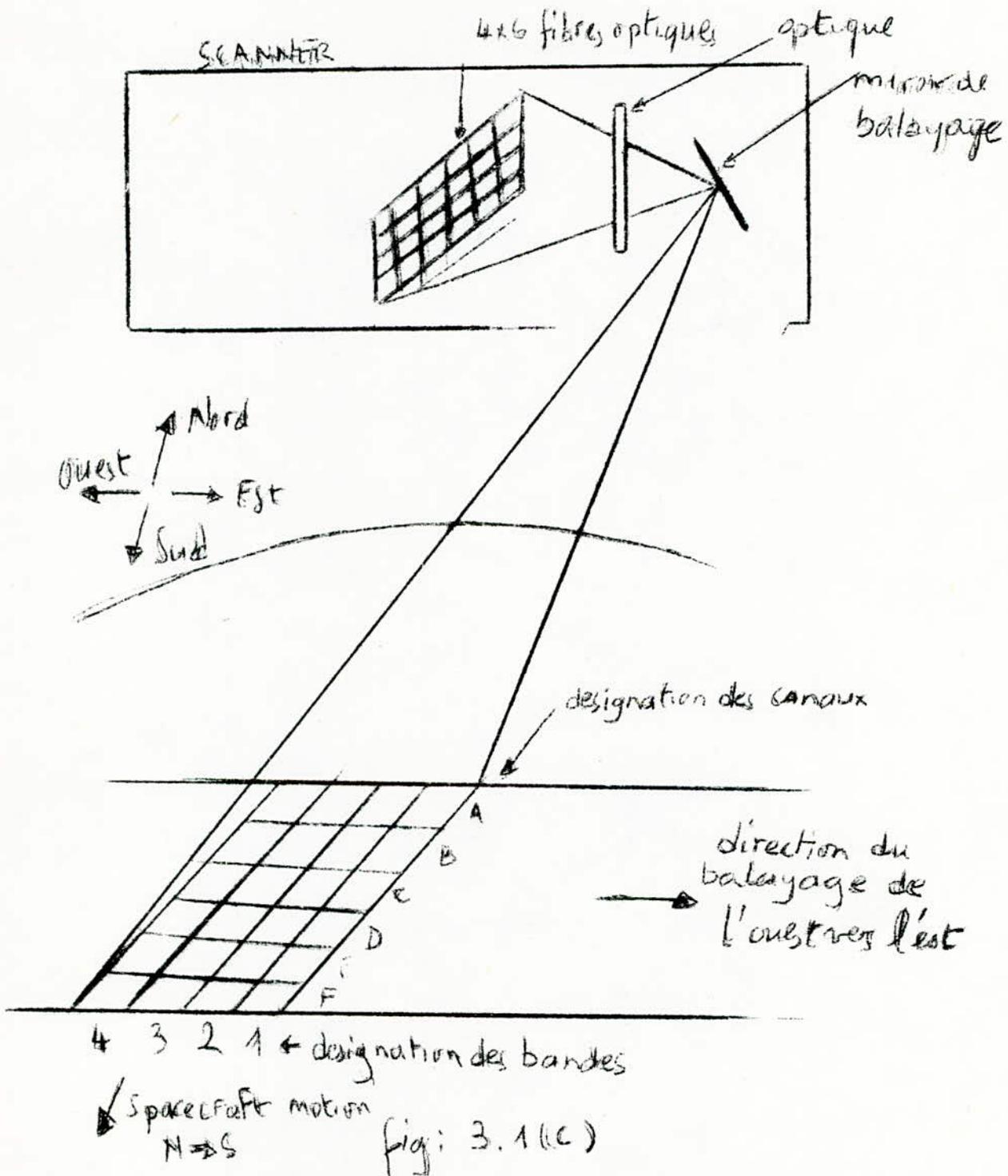
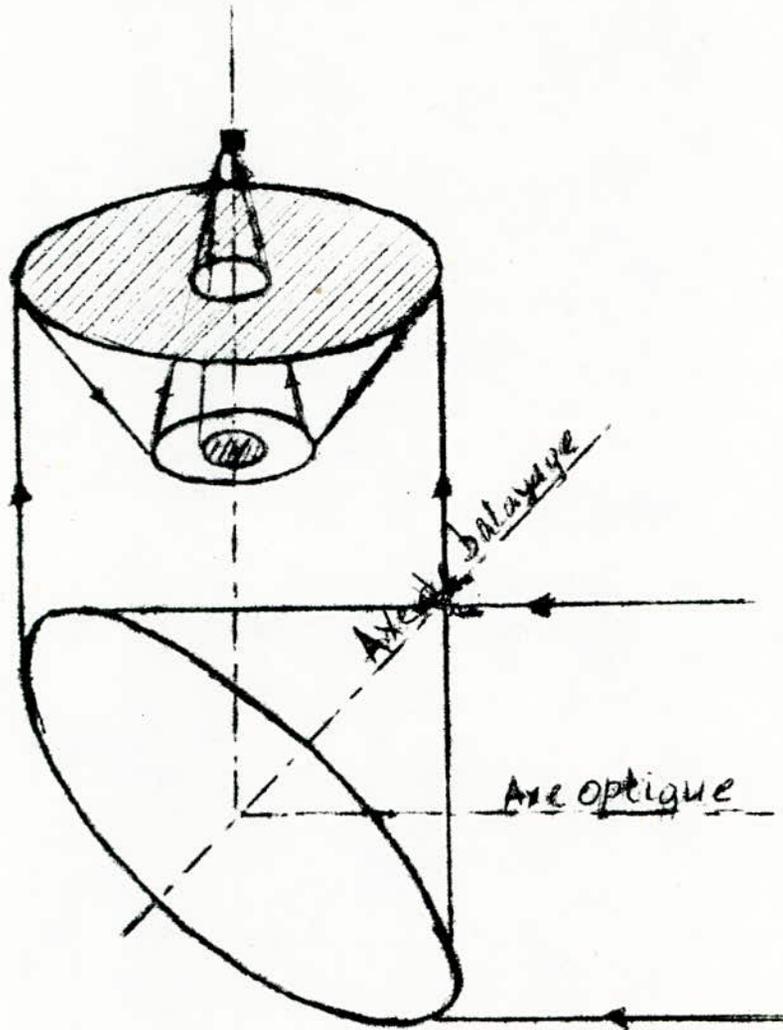


IMAGE DES DÉTECTEURS À LA SURFACE DE LA TERRE À UN INSTANT DONNÉ

3.I.2- Caractéristiques techniques du MSS de LANDSAT:

Altitude:	900 Km	
Balayage:	mécanique	
	miroir oscillant(24x23 cm) dans l'espace objet	
	Amplitude des oscillations $\pm 2,9^\circ$	
	Fréquence 13,6 Hz	
	Efficacité du balayage 45 %	
Optique	Optique à miroir	
	Télescope du type Ritchey chrétien	
	miroir primaire, diamètre 230 mm	
	miroir secondaire, diamètre 90 mm	
	focale: f= 825 mm	
	ouverture: f/3,6 .	
Canal	Bande spectrale	Détecteurs
4	0,5 - 0,6 μ m	6 photomultiplicateurs
5	0,6 - 0,7 μ m	6 P.M./
6	0,7 - 0,8 μ m	6 P.M.
7	0,8 - 1,1 μ m	6 photodiodes au Si.
Type de séparation spectrale:	Séparation dans le champ par filtres optiques, filtre interférentiel devant chaque détecteur.	
Champ de vue instantané	86 yrad	
Taille du pixel au sol	79 m	
Nombre de lignes balayées à chaque balayage:	6	
Pas d'échantillonnage	56 m	
Interligne	79 m	
Méthode de calibration:	Lampe incandescente tungstène interne Lumière du soleil.	
Précision de superposition des informations spectrales:	meilleure que 15 mètres	
Précision du balayage ligne à ligne:	meilleure que 6 mètres	

L'instrument MSS du LANDSAT 3 comprend une bande spectrale supplémentaire dans l'infrarouge thermique avec une résolution spatiale trois fois moindre que des quatre canaux visibles .



Telescope Ritchey-Chretien fixe, d'axe parallèle à l'axe de rotation du satellite, associé à un miroir plan mobile à 45° oscillant sur quelques degrés.

Caractéristiques techniques supplémentaires du radiomètre
MSS de LANDSAT 3 :

Bande spectrale	Détecteurs	Domaine de mesure	Ne T
10,4 - 12,6 μ m	2 détecteurs HgCdTe refroidis	260 + 340 μ K	I + 300 μ K
Type de séparation spectrale: Séparation dans le champ.			
Champ de vue instantannée au sol:	273 mètres		
Nombre de lignes balayées en parallèle:	2		
Pas d'échantillonnage dans la direction du balayage.	168 mètres		
Interligne	237 mètres		
Calibration/: sur corps noir		
Refroidissement des détecteurs:	100 μ , radiateur passif à 2 étages tourné vers l'espace froid.		

LE RADIOMETRE " THEMATIC MAPPER ":

Un radiomètre de deuxième génération, est prévu d'être embarquer sur le satellite LANDSAT-D c'est le "THEMATIC MAPPER" dont le lancement est prévu pour la fin 1981.

L'instrument du Thematic-Mapper est une extrapolation de l'instrument MSS avec des améliorations importantes pour le choix des bandes spectrales et pour la résolution spatiale qui passe à 185 Km.

L'instrument comprend sept bandes spectrales:

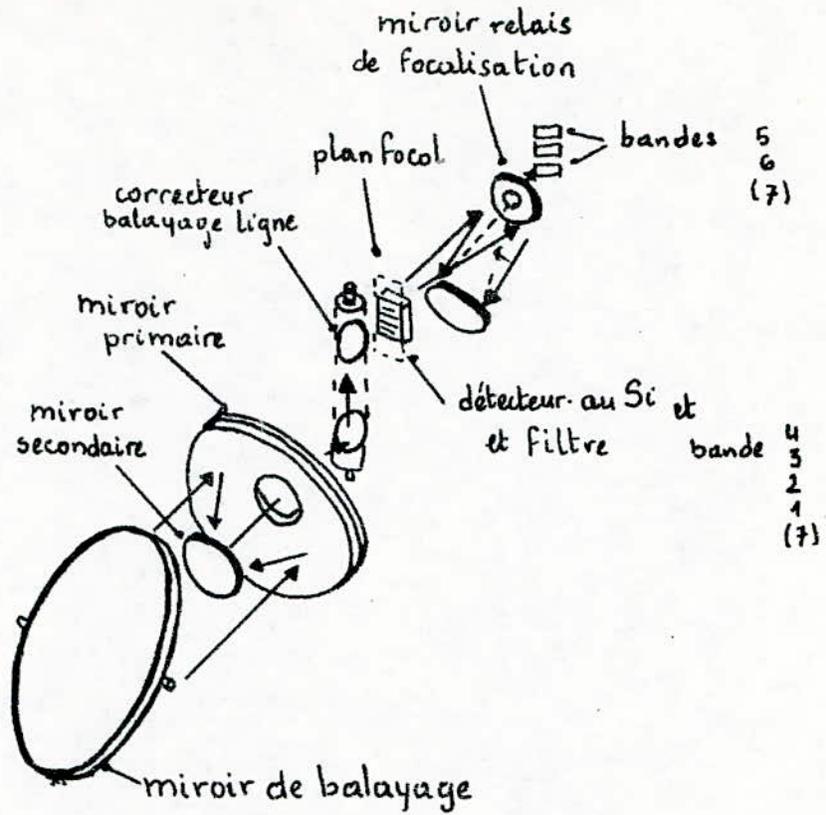
- Six bandes dans le visible et dans l'infrarouge solaire avec une résolution spatiale au sol de 30 mètres.

Bandes spectrales	Détecteur
0,45 - 0,52 μ m	photodiodes au Si
0,52 - 0,60 μ m	" " "
0,63 - 0,69 μ m	" " "
0,76 - 0,90 μ m	" " "
1,55 - 1,75 μ m	" " "
2,08 - 2,35 μ m	" " "

- Une bande dans l'infrarouge thermique avec une résolution de 120 m. La bande spectrale est : 10,4 - 12,5 μ m; le détecteur utilisé est: HgCdTe

L'instrument comprend 16 détecteurs par bande pour les six premières bandes spectrales et quatre détecteurs pour la bande infrarouge thermique. La séparation spectrale est une séparation dans le champ. Des filtres interférentiels définissent de façon précise les bandes spectrales. Le principe du balayage est le même que celui du MSS. Le télescope est aussi du type Ritchey-Chrétien. Les détecteurs infrarouges sont refroidis à une température inférieure à 95 °K par un radiateur passif tourné vers l'espace froid.

- 25-bis -



- Système optique du THÉMATIc MAPPER.

3.2- LE RADIOMETRE GEOSTATIONNAIRE DE METEOSAT:

Le radiomètre multicanaux du satellite METEOSAT assure la prise de vue à haute résolution du disque terrestre dans trois domaines spectraux: visible, infrarouge et bande d'absorption de la vapeur d'eau. La cadence de prise de vue est de deux images par heure avec une résolution spatiale de 5 Km dans l'infrarouge et de 2,5 Km dans le visible.

Le troisième canal qui est centré sur la bande d'absorption de la vapeur d'eau à 6,3 μm constitue une originalité du radiomètre METEOSAT, facilite la détection des nuages de haute altitude, et fournit des informations sur la distribution globale de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

3.2.1- Description de l'instrument:

Le radiomètre est monté dans un satellite géostationnaire stabilisé par rotation autour d'un axe normal au plan de l'orbite équatoriale. La rotation du satellite génère le balayage ligne à ligne de l'image; à chaque tour, l'axe optique est décalé d'un incrément angulaire correspondant à l'élément de résolution: l'image complète du disque terrestre est obtenue en 25 mn auxquelles succèdent 2,5 minutes pour le mouvement de retour et 2,5 mn utilisées pour la calibration des canaux infrarouge, et l'amortissement de mutation du satellite. En mode normal, la totalité de l'image est analysée en 2500 lignes (canaux infrarouge) et 5000 lignes (visible). Des modes de fonctionnement particulier sont également possibles:

- image d'une zone réduite en altitude;
- analyse répétée de la même ligne.

La sélection de ces modes est effectuée à partir du centre opérationnel par télécommande.

Le canal infra-rouge thermique (10,5 μm - 12,5 μm) permet la mesure des radiances avec une erreur équivalente au bruit inférieur à 0,4 °K pour une scène à 300 °K , ou de 1,2 °K à 200 °K correspondant au sommet des nuages les plus élevés. Ceci permet de localiser l'altitude des nuages avec une grande précision.

Le radiomètre est constitué de trois sous-ensembles:

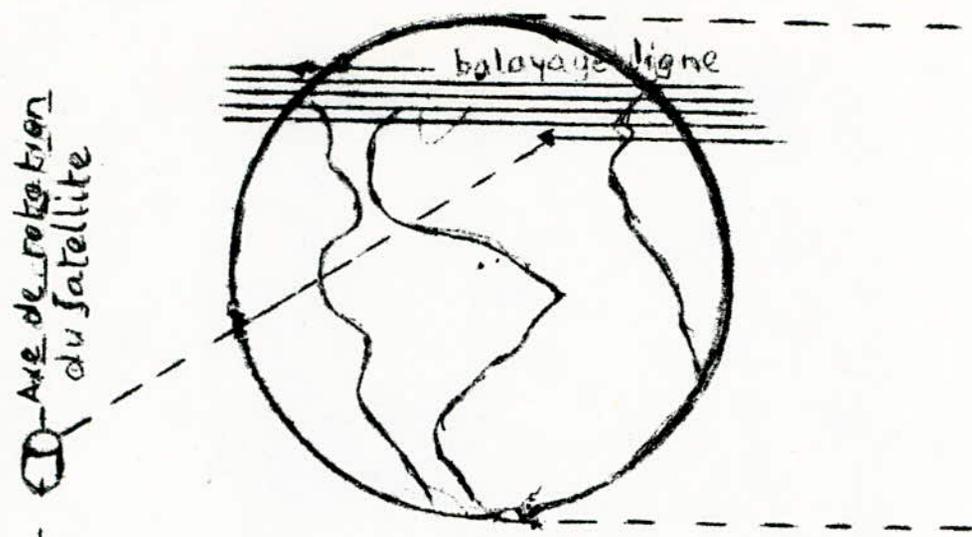


fig 3 2 (a)

Principe du balayage du disque terrestre par un radiomètre à haute résolution du 'METEOSAT'

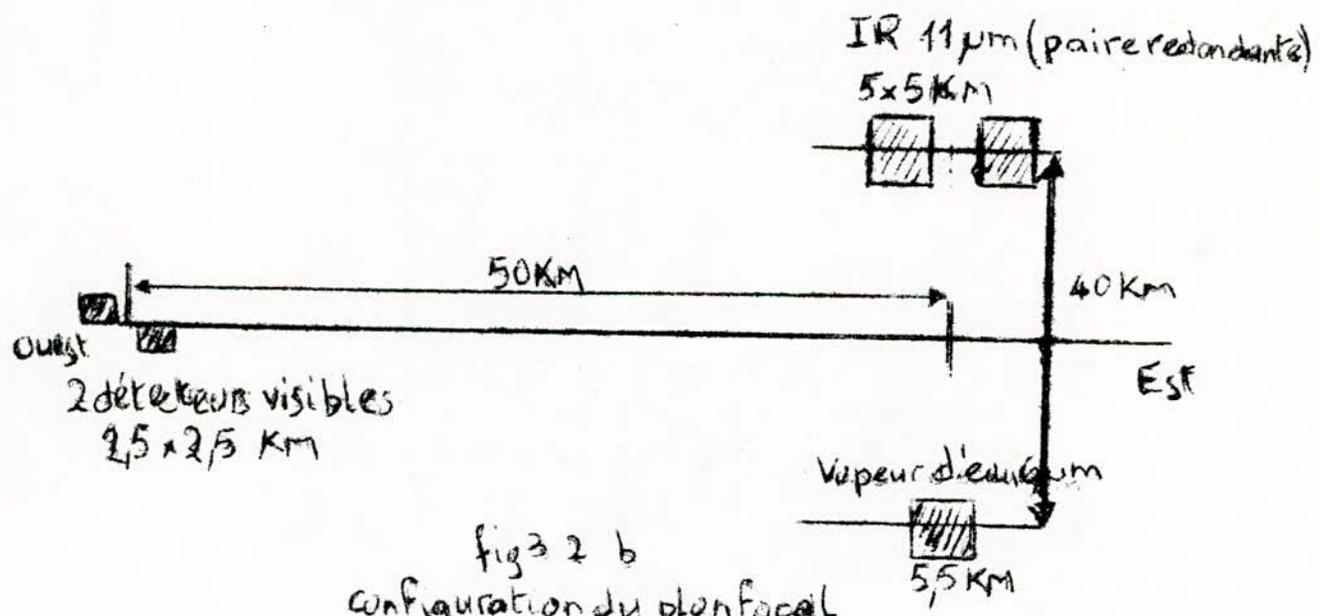


fig 3 2 b configuration du plan focal

- L'instrument optique (scanner) qui regroupe l'ensemble des éléments optiques, les mécanismes, le radiateur passif, les détecteurs et leurs préamplificateurs associés;
- L'électronique haut niveau des chaînes visibles et du canal vapeur d'eau;
- Le boîtier électronique fonctionnelle.

Ces trois sous-ensembles sont livrés et intégrés séparément sur le satellite.

3.2.1.1- Système optique :

Le système optique comprend un télescope de 400 mm d'ouverture, un jeu de miroir plan de renvois et une optique secondaire qui reforme l'image du champ sur le détecteur. Le télescope est constitué d'un objectif à 4 miroirs (primaire et secondaire) sphériques du type Ritchey-Chrétien et d'un miroir plan orienté à 45° par rapport à l'axe optique de sorte que le faisceau émergent soit parallèle à l'axe des palliers du télescope. Pour assurer un positionnement relatif très stable des miroirs et une qualité optique invariable sur une large plage de température , le télescope est réalisé en matériaux à très faible **coefficient** de dilatation: les miroirs sont en zéro-dure et la structure en invar.

Le faisceau lumineux émergent du télescope est coudé par un jeu de miroirs plans: deux de ces miroirs forment un dièdre ce qui permet d'ajuster la position du foyer; en fait, grâce à la grande stabilité thermique du radiomètre, cette opération est commandée à partir du sol.

Un petit miroir placé au voisinage du plan focal du télescope assure la séparation des canaux infra-rouge et visible.

Le faisceau de lumière visible est coudé, et l'image est formée directement sur les photodiodes au silicium; le faisceau infra-rouge est repris par une optique relais ayant une ouverture de valeur équivalente à $f / 1,35$. Cette optique formée d'éléments dioptriques en germanium est constituée d'un doublet et d'une lentille de champ. Le détecteur infra-rouge contient trois éléments sensibles en tellure de cadmium-mercure (C.M.T.), deux pour l'infra-rouge thermique (configuration redondante) et un pour le canal à 6,3 μm .

Il est possible de calibrer les chaînes de détection infra-

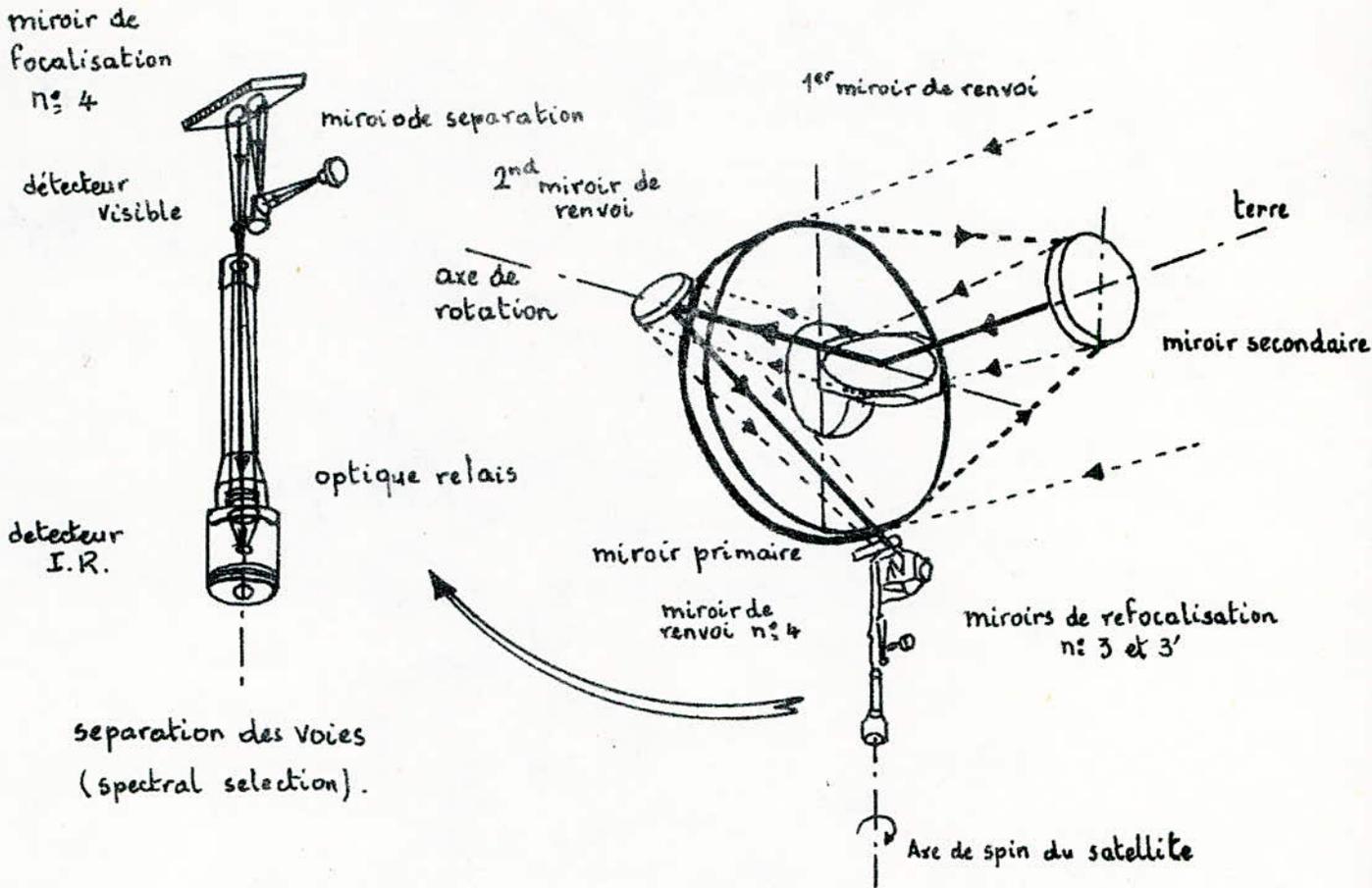


Schéma optique du radiomètre
de "MÉTÉOSAT"

rouge à l'aide d'un dispositif interne; la source de référence habituelle est un corps noir, mais il est également possible d'utiliser le soleil ou la lune selon les éphémérides. La séquence automatique de calibration prend place pendant l'intervalle de cinq minutes qui sépare deux prises de vue consécutives. Sur le canal visible, une diode électroluminescente fournit un stimulus optique sur ordre de télécommande.

3.2.1.2- Mécanismes:

Le radiomètre contient trois dispositifs électromécaniques qui assurent respectivement le balayage ligne à ligne de l'image le réglage de position du foyer et la commutation des sources de calibration.

- le premier de ces mécanismes assure le déplacement de l'axe optique sur $\pm 9^\circ$ par pas élémentaire de $1,256 \cdot 10^{-4}$ radian.

IL est constitué d'une vis de précision entraînée par moteur pas à pas à 200 pas par tour, par l'intermédiaire d'un train réducteur.

- La refocalisation est obtenue par déplacement d'un réflecteur dièdre. Le mécanisme comprend un moteur pas à pas, un réducteur et un ensemble vis-écrou guidé par palliers lisses. Un défaut de mise au point, détecté au sol par analyse de la qualité de l'image est corrigé par télécommande, le réflecteur dièdre étant déplacé par pas de 75 microns.

- Le dispositif de calibration est constitué essentiellement d'un moteur couplé à trois position, et d'un électro-aimant; l'axe du moteur porte deux petit miroirs sphériques M_1 et M_2 ; en mode de prise de vue, le moteur est au repos en position centrale; le début du mouvement de retour du balayage déclenche automatiquement l'alimentation du moteur qui place le miroir M_1 sur le faisceau; ce miroir étant centré sur l'image du détecteur infra-rouge, un niveau de référence est ainsi généré, par ailleurs, un orifice de faible diamètre percé dans le miroir permet la calibration sur le soleil tout en conservant la dynamique des signaux. A la fin du mouvement de retour du balayage, le moteur est commuté sur la position opposée de telle sorte que les détecteurs infra-rouges soient conjugués du corps noir par par l'in-

termédiaire du miroir M₂ ; après 50 mS, l'alimentation du moteur est coupée, et c'est l'électro-aimant qui maintient le rotor en position.

3.2.1.3- L'électronique des chaines images:

A chacun des détecteurs est associée une chaine électronique qui délivre un signal haut niveau. Une chaine électronique infra-rouge est constituée de cinq sous ensembles fonctionnels:

- l'étage de préamplificateur avec le circuit correcteur de dérive;
- le circuit de polarisation des détecteurs photoconducteurs;
- les circuits de changement de gain;
- filtre passe bande;
- L'étage de sortie avec restitution de la composante continue .

Le préamplificateur a un excellent facteur de bruit de manière à ne pas dégrader significativement les performances des détecteurs: la densité spectrale de bruit ramenée à l'entrée est plus faible que 1,5 nV/√Hz. Le gain de la chaine est ajustable par télécommande, de manière à corriger une éventuelle variation en orbite de la sensibilité des détecteurs .

3.2.2 - Caractéristiques techniques du radiomètre METEOSAT:

Altitude.....	36000 km	
Balayage.....	Mécanique	
	Amplitude du pas de balayage: 1,25 . 10 ⁻⁴ radian.	
	Précision des pas spécifiée ± 10 %	
	Cadence de prise de vue: image/30 mn	
Optique.....	Optique à miroir;	
	Télescope type Ritchey-Chrétien	
	miroir primaire:diamètre 400 mm	
	miroir secondaire:diamètre 140 mm	
	focale : 3650 mm	
	miroir plan orienté à 45 °	
Canaux	Bandes spectrales.....	Détecteurs
2 simultanés dans la voie visible	0,5 - 1 ym	photodiodes au Si
1 + 1 redondant dans la voie infra-rouge	10,5 - 12,5 ym	2CMT (HgCdTe) à 85°K
1 se substituant à l'une des voies visibles	5,7 - 7,1 ym	1 CMT (HgCdTe) à 85°K

Type de séparation spectrale.....	Miroir de séparation Filtre interférentiel.
Champ géométrique.....	Voie visible.....0,065 mrd Voie infra-rouge.....0,14 mrd Voie I.R.additionnelle..0,14 mrd
Taille du nixel au sol.....	Visible.....2,5x2,5 Km I.R.....5 x 5 Km I.R.add.....5 x 5 Km
Nombre de lignes par image....	Visible.....5000 I.R.....2500 I.R.add.....2500
Etalonnage en orbite.....	Pour l'infra-rouge: soleil et corps noir.
Performances radiométriques:	
- visible: $S/B > 200$ pour un albédo de 25 %	
- I.R.....: $NE \Delta T < 0,4 \text{ } ^\circ K$ à $290 \text{ } ^\circ K$	
- I.R.add: $NE \Delta T < 1 \text{ } ^\circ K$ à $290 \text{ } ^\circ K$.	

Conclusion/:

Un satellite géostationnaire constitue un observatoire privilégié pour suivre sans interruption, l'évolution des phénomènes météorologiques sur la terre, et même déterminer les mouvements de l'atmosphère en observant le déplacement relatif et les déformations des nuages. Cependant le disque de la terre vue d'une position géostationnaire n'est pas constamment illuminée par le soleil; en fait, on ne voit le disque complètement éclairé que pendant 2 heures environ et le reste du temps le disque est partiellement ou totalement obscur. Par conséquent, l'observation des nuages en lumière visible ne satisfait pas le souci des météorologistes; il faut donc faire appel au rayonnement thermique propre de la terre et des nuages dans l'infra-rouge moyen pour obtenir réellement une surveillance permanente.

3.3- RADIOMETRE A BALAYAGE : ARIES.

Le système ARIES est composé de matériel embarqué en avion, auquel s'ajoute le matériel de prétraitement au sol. La description de ce matériel est donnée ci-après, en insistant sur les points de conception ou de technologie qui sont particuliers à ARIES.

3.3.1- DESCRIPTION DU MATERIEL EMBARQUE:

3.3.1.1- Principe du balayage (voir fig: 334).

Dans un radiomètre à balayage (scanner), l'analyse de la scène s'opère de la manière suivante:

Le balayage trame est produit par le déplacement de l'avion, parallèlement à l'axe du scanner; le balayage ligne est produit par la déflexion optique de la direction de visée du radiomètre perpendiculairement à l'axe du scanner.

ARIES utilise pour ce balayage la rotation d'un miroir à 45° sur l'axe du scanner, tournant autour de cet axe et réfléchissant sur ces deux faces. Cette disposition produit un multiplexage temporel des deux canaux gauche et droit qui sont parfaitement symétriques.

Des miroirs dichroïques séparent sur chaque canal les voies visible et infra-rouge

Dans le plan décrit par la direction de visée du radiomètre se trouvent deux corps noirs permettant d'enregistrer deux points de calibration à chaque tour de balayage.

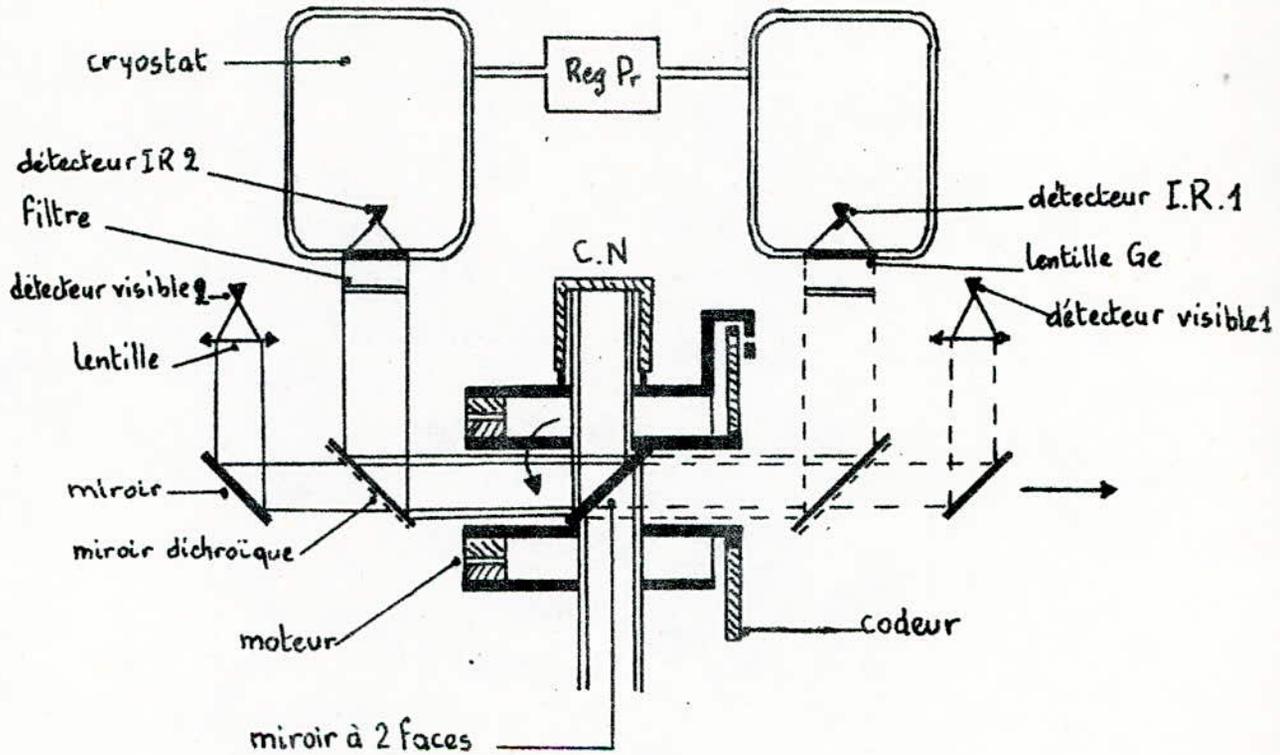
3.3.1.2- Tête d'analyse :

Elle est constituée d'une platine principale dans la masse, donc très rigide, sur laquelle viennent se fixer le bloc de balayage et les quatre blocs de détection.

Le bloc de balayage est constitué d'un stator ayant la forme d'un cylindre creux. Dans ce stator tourne un rotor tubulaire portant le miroir de balayage, constitué par une lame de verre argentée sur ces deux faces.

Ce rotor, porté par deux paliers à billes, est actionné par un moteur couple annulaire fixé à une extrémité, l'autre extrémité étant occupée par un codeur optique également annulaire.

Le codeur comporte autant de traits qu'il y a d'éléments de lignes analysés sur un tour, soit 3600.



- Principe du balayage du radiomètre ARIES -

Son utilité est double:

- assurer l'asservissement de la rotation de l'ensemble à un quartz.
- synchroniser l'échantillonnage du profil de température avec la position instantanée du miroir de balayage (en quelque sorte, savoir à tout instant où regarde le scanner).

D'autre part le stator comporte deux emplacements pour recevoir les corps noirs de calibration.

Les blocs optiques gauche et droit qui portent les lames dichroïques sont usinés pour recevoir et positionner les blocs de détection infra-rouge. Ces blocs de détection sont conçus pour être "enfichables" dans la structure du radiomètre sans aucun réglage.

L'utilisateur peut ainsi disposer d'un jeu de canaux pour lesquels l'adaptation entre détecteur, préamplificateur, objectif et filtre interférentiel, aura été optimisée, et parmi lesquels il choisira ceux qui équiperont ARIES pour une mission déterminée.

Les détecteurs infra-rouge sont dans le cas présent des photoconducteurs HgCdTe. Ils sont refroidis par l'azote liquide contenu dans les cryostatés des blocs de détection.

Les blocs de détection visible sont fixes, mais la longueur d'onde de travail est déterminée par les filtres montés sur glissière et facilement amovibles. Les détecteurs visibles sont des photodiodes au silicium.

La conception de la tête d'analyse est donc essentiellement modulaire, et cette modularité se retrouve dans le reste du système, permettant ainsi, à partir d'une même infrastructure, de passer d'un scanner monocanal qualitatif, à enregistrement analogique, à un radiomètre à quatre canaux quantitatifs, et à enregistrement numérique (avec toute les solutions intermédiaires possibles).

3.3.1.3- Dispositifs annexes :

Au scanner proprement dit sont associées différents disposi-

Une telle régulation ne peut fonctionner que si la température ambiante est inférieure à la température de consigne.

En ce qui concerne la navigation, le repérage géographique et la correction de la distortion géométrique, deux dispositifs ont été prévus. Un appareil photographique, dont le champ est sensiblement égal à l'angle de balayage du scanner, est commandé en synchronisme avec le balayage. On prendra par exemple une photographie toutes les 128, 256, 512 lignes. Cette dernière est utile pour reconstituer la route de l'avion qui porte le scanner.

Un gyroscope de verticale permet en outre d'enregistrer le roulis et le tangage de l'avion, et de corriger au sol (pré traitement) la distortion géométrique qui en résulte.

Enfin, un pupitre centralise les commandes et contrôles nécessaires en opération. Les principales commandes sont ainsi :

- la vitesse de rotation du miroir de balayage;
- la température de consigne des corps noirs chaud et froid;
- les réglages de gain, de niveau de référence de chaque canal;
- la télécommande de l'enregistreur magnétique.

Un oscilloscope qui visualise le profil ligne permet de s'assurer que le signal utile est bien dans la dynamique de la chaîne.

De plus, comme l'enregistrement est numérique, les données vidéo ainsi que tous les paramètres opérationnels et de contrôle, sont disposés suivant un certain format. Il est inclus dans le pupitre un décommutateur et une visualisation décimale qui permet à l'opérateur, en temps réel, en affichant l'adresse de tel paramètre ou tel point vidéo, de contrôler sa valeur numérique. On trouve encore sur le pupitre l'affichage de la date et de l'heure, qui sont enregistrés en même temps que les données, ainsi qu'un indicatif qui est attribué à chaque canal et à chaque configuration des blocs de détection.

3.3.2- CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU RADIOMETRE ARIES:

Altitude.....	3500 mètres
---------------	-------------

Balavage:.....	Mécanique
	Angle de balayage 90 °
	Miroir incliné à 45 ° réfléchissant sur ses deux faces.
	4 vitesses de balayages:
	4,55 ; 9,10 ; 18,2 ; 36,4 tours/sec.
Optique.....	..optique à miroir.
Canaux.....	Bandes spectrales.....Détecteurs
2 visibles	0,5 - 1 ym photodiode Si
2 infra-rouges	3 - 15 ym Hg-Cd-Te
Type de séparation spectrale:...	Miroir dichroïque pour la séparation des voies visible et infra-rouge.
	Filtres: pour présélection de deux longueurs d'onde de travail par canal visible.
Angle instantané d'analyse.....	$2,8 \cdot 10^{-3}$ rd.
Nombre de points par ligne....	900 points enregistrés par ligne.
Calibration.....	2 corps noirs de calibration de -20 à +60 °C.
7 entrées de paramètres analogiques externes,	échantionnées 2 fois par tour de balayage.
2 canaux principaux (enregistrement numérique	256 niveaux par point d'image.
2 canaux auxiliaires (enregistrement FM, avec	commande automatique de gain.).
Repérage des enregistrements par la date,	l'heure et numérotation des lignes de l'image.
Performances radiométriques:	
	NE T : $4 \cdot 10^{-2}$ °C à 4,55 tours/sec. pour le détecteur infra-rouge entre 10,5 et 12,5 ym .

APPLICATION:

Depuis sa mise en service en février 1975, ARIES a été utilisé dans de nombreuses missions se reportant à des disciplines très variées . On peut citer notamment, en physique de l'atmosphère: l'étude de la transmission atmosphérique et du rayonnement émis par les nuages, en océanographie: la thermographie superficielles de zones frontales et de zones côtières en hydrologie, l'étude des échanges entre eau marine et eau fluviale .

3.4- RADIOMETRE HRV DE SPOT :

3.4.I- Systeme spot:

[SPOT: système probable d'observation de la terre].

Le système spot conçu par le CNES est réalisé par la France en association avec des partenaires européens (Belgique-Suède).

Il comprend un satellite d'observation de la terre et des stations terrestres de réception des données.

Le premier satellite qui sera lancé en 1984, permettra d'observer dans trois bandes couleur du spectre visible et infra-rouge avec une résolution au sol de l'ordre de 20 mètres, ainsi que des images panchromatiques en noir et blanc avec une résolution au sol de l'ordre de 10 mètres.

La capacité particulière de visée latérale lui permettra d'assurer l'observation d'une région quelconque de la terre avec une périodicité variant de un à quelques jours, rendant ainsi possible le suivi des phénomènes localisés à évolution relativement rapide.

La durée prévue pour le premier satellite est de deux ans. Un satellite de rechange est prévu. Les satellites suivants qui assureront la continuité de la fourniture des données sont à l'étude.

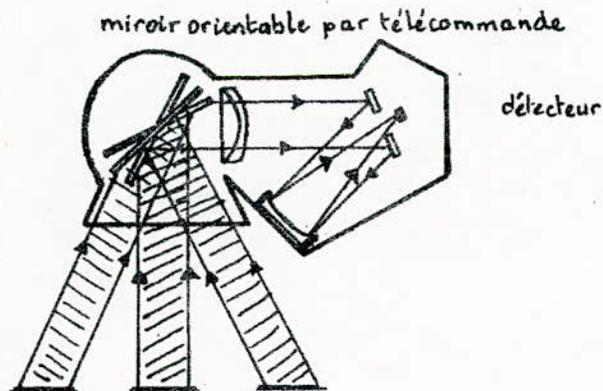
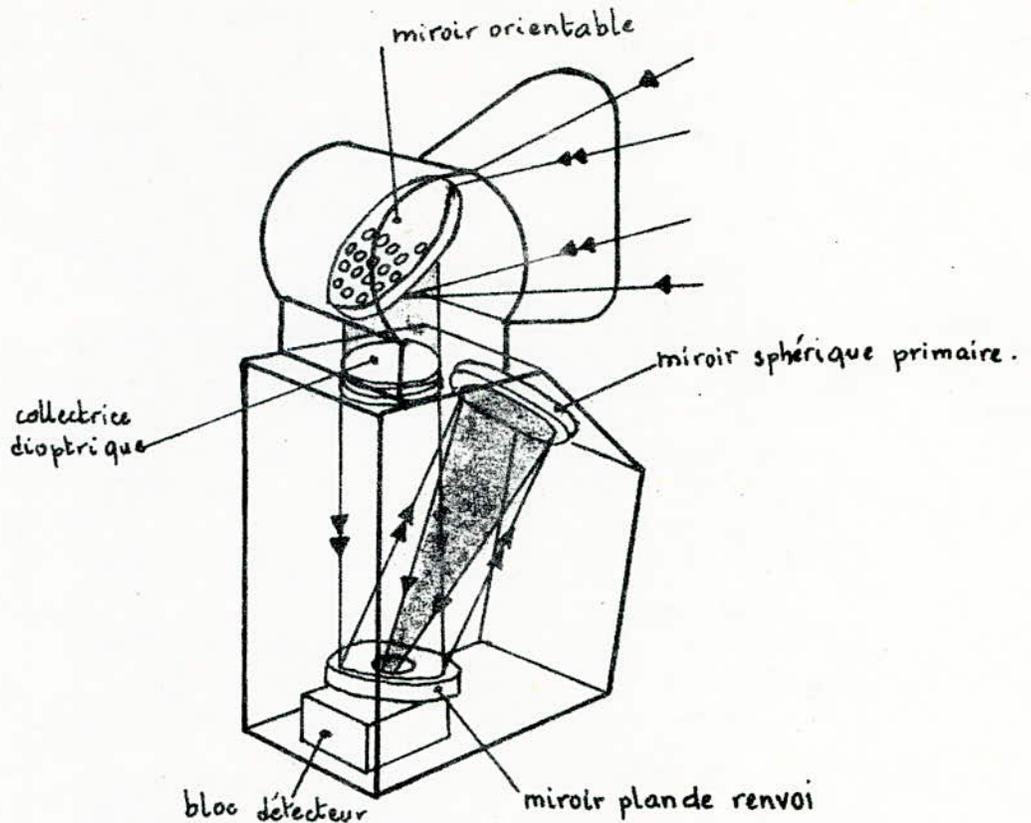
Le satellite est composé de deux parties: une plate forme standard multimission et une charge utile.

3.4.I.I- Plate forme :

Elle assure l'ensemble des servitudes nécessaires à l'accomplissement de la mission:

- Maintien précis de l'orbite,
- Stabilisation sur 3 axes,
- Alimentation électrique,
- Télémessure de maintenance,
- Télécommande.

La conception de cette plateforme, apte à recevoir des charges utiles diverses destinées à l'observation de la terre, permet de prévoir d'autres missions du même type sans avoir à supporter le coût de développement d'un nouveau véhicule spatial.



L'INSTRUMENT H.R.V.

Les détecteurs sont du type CCD (dispositif à transfert de charge). Les 6000 éléments sensibles intégrés sur des barrettes monostables permettent d'analyser d'un seul coup la totalité d'une ligne du paysage perpendiculaire à la trace du satellite sans avoir besoin de recourir à un dispositif à balayage mécanique.

3.4.1.2- Charge utile: (fig 3.4.1.2 (a) et (b))

Fixée sur un plateau latérale de la plate forme, elle comporte les instruments d'observation de la terre et la télémé-
sure de la mission.

La charge utile du premier satellite est constituée de deux instruments identiques HRV (haute résolution visible) et d'un ensemble d'enregistrement des données sur bande magnétique et de transmission vers le sol.

3.4.2- L'INSTRUMENT HRV :

Le HRV est un instrument destiné à la prise de vue à très haute résolution dans le visible et le proche infra-rouge.

Il possède deux modes de fonctionnement dans le domaine spectral:

- un mode "panchromatique" (noir et blanc) qui correspond à une observation dans une bande spectrale large.
- un mode "multibande" (couleur) qui correspond à une observation dans trois bandes spectrales plus étroites.

Le pas d'échantillonnage choisi pour l'instrument correspond à un élément observé au niveau du sol (ou pixel) de 10 m dans le premier cas et de 20 m dans le second cas en visée verticale.

Un miroir plan orientable par télécommande est placé à l'entrée de l'instrument. Il permet de déplacer l'axe de visée dans un plan perpendiculaire à l'orbite. Ce déplacement possible dans un angle de $\pm 27^\circ$ autour de la position verticale en 45 pas de $0,6^\circ$, permet d'observer des points situés à l'intérieur d'une zone de ± 475 Km de part et d'autre de la trace au sol du satellite.

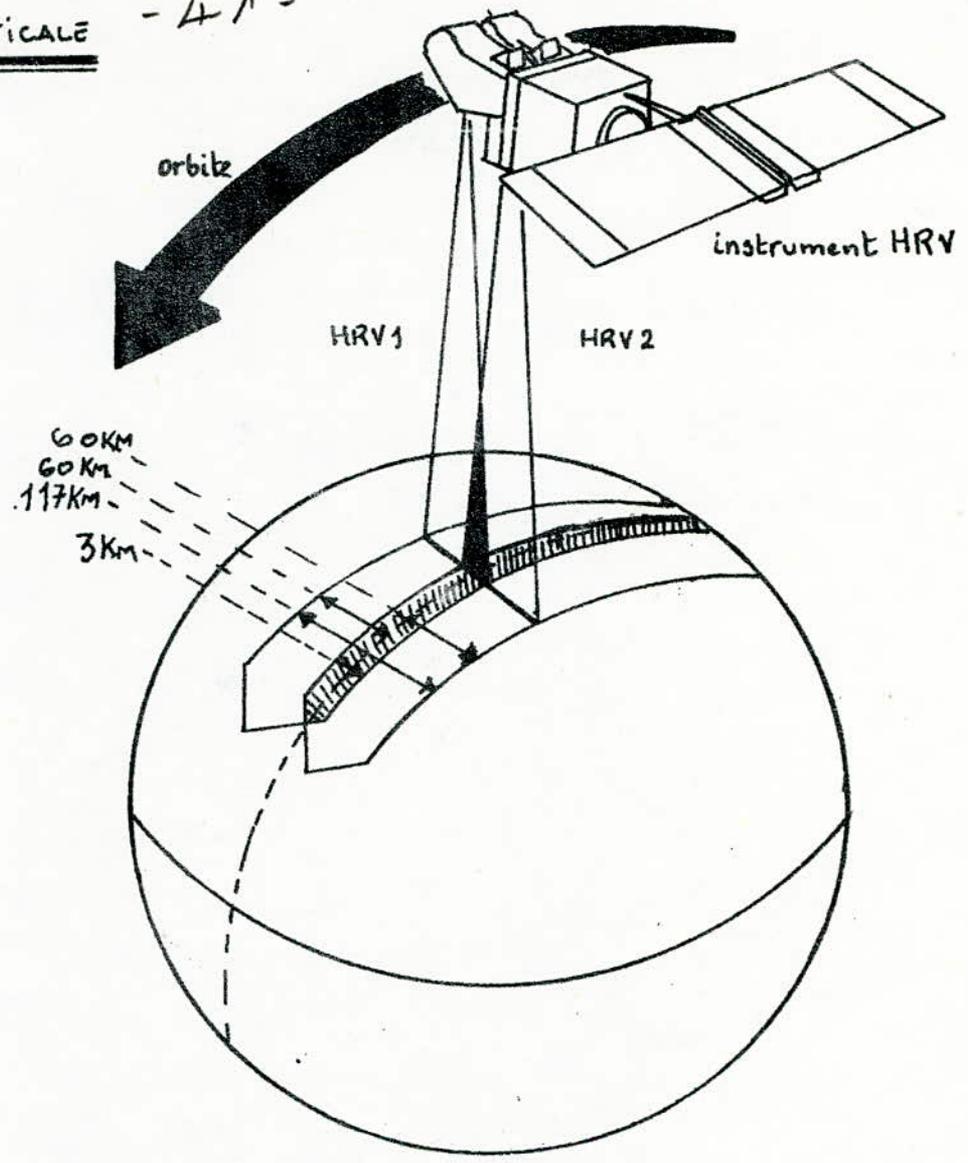
L'angle d'incidence maximum au sol atteint 33° par la suite de la rotondité de la terre.

Ces possibilités de visées latérales qui constituent avec sa résolution, l'originalité du satellite

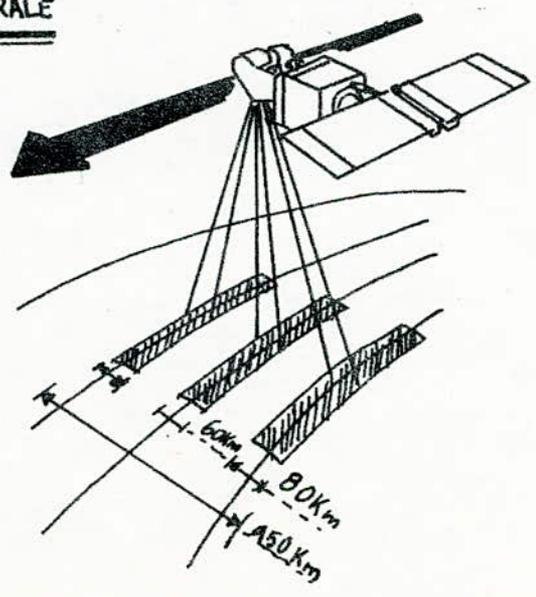
3.4.3 - LA VISEE VERTICALE : (fig 3.4.3)

Les deux instruments HRV du satellite sont disposés de telle manière qu'en leur commandant des angles de visée $+ 1,8^\circ$ et $- 1,8^\circ$, on peut observer à la verticale du satellite une bande de terrain de 117 Km de largeur avec un recouvrement des deux images de 3 Km.

- VISÉE VERTICALE - - 41 -



- VISÉE LATÉRALE



Cette disposition permet de réaliser une couverture complète du globe terrestre puisque la distance entre deux traces adjacentes du satellite est au maximum de 108 Km.

3.4.4- LA VISEE LATERALE : (fig 3.4.4)

Avec une rotation convenable du miroir d'entrée de l'instrument, fixée par télécommande, il est possible d'observer des régions intéressantes qui ne sont pas nécessairement à la verticale du satellite. Elles doivent cependant être situées dans un colloir de 950 Km de Large entourant la trace au sol du satellite. La largeur de la bande effectivement observée varie entre 60 Km à la verticale du satellite et 80 km en visée latérale extrême.

L'exécution des observations est commandée par le calculateur de bord du satellite. Une séquence de prise de vue peut comprendre une succession de modes panchromatique ou multibande et des changements de direction de visée pour chacun des instruments du satellite.

3.4.5- CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'INSTRUMENT HRV DE SPOT:

Altitude.....	823 Km
Balayage	Electronique: "push broom", technique dite du rateau. Une optique de grand champ forme l'image simultanée de la totalité de la ligne sur un réseau linéaire de détection.
Optique.....	optique à miroir Miroir de changement de visée: 750 x 400 mm Télescope: type catadioptrique à correction sphérique avant: focale.... f = 1082 mm Diamètre de la pupille d'entrée: 330 mm Ouverture à f/ 3,5 .
Bandes spectrales..... Détecteurs	
Mode multicanal:	0,50- 0,54 μ m 0,61 - 0,68 μ m 0,79 - 0,89 μ m
Mode panchromatique:	0,51 - 0,73 μ m
	CCD: barrettes linéaires de 1728 points au pas de 13 μ m

Séparation spectrale: Séparation dans le champ de la voie panchromatique et des voies couleur
séparation de voies couleur par éclair spectral à filtres dichroïques
type caméra TV trichrome.

Champ de l'instrument:....Mode multicanal:4,13 °
Mode panchromatique: 4,13 degrés.
Mode MultibandeMode ranchro.

Dimension du pixel
en visée verticale.....20 x 20 m10 x 10 m

Nombre de pixel
par ligne10006000

Longueur d'une ligne
balayée au sol en visée
Verticale.....60 km60 km

Résolution au sol.....20 m10 m

Capacité de visée oblique: $\pm 26^\circ$ $\pm 26^\circ$

Résolution radiométrique:.....NE 0,5 %

Durée d'accès:.....1 à 2 jours aux latitudes moyennes.

APPLICATIONS: Le système SPOT permettra notamment d'effectuer:

- Des études sur l'utilisation du sol et l'évolution de l'environnement;
- Une évaluation des ressources naturelles renouvelables (agriculture, forêt.....);
- Une contribution à l'exploration des ressources minérales;
- Des travaux cartographiques dans la gamme des moyennes échelles telles que le 1 / 100 000 ,l'établissement des cartes du types nouveaux et la révision fréquente des cartes aux échelles de l'ordre de 1 / 50 000.

CH4. CONCEPTION D'UN RADIOMETRE A BALAYAGE
 ETUDE THEORIQUE

4.1- CONSTITUTION ET PRESENTATION DU RADIOMETRE :

Le schéma de la figure 4.1 représente un radiomètre à balayage utilisant un seul détecteur.

Compte tenu de ses exigences, la chaîne de mesure qu'est le radiomètre à balayage, est constituée:

- d'un petit moteur qui assure le mouvement de rotation au miroir (c'est le balayage ligne);
- d'un miroir plan qui fait un angle de 45° avec l'axe de rotation;
- d'une lentille (L) qui constitue l'optique d'entrée;
- d'une lentille (l), (optique de collection), qui focalisera dans son plan focal l'énergie réfléchie par le miroir;
- d'un détecteur placé dans le plan focal de la lentille de l'optique de collection. Il traduit l'énergie lumineuse en un signal électrique;
- d'un circuit électronique d'amplification et d'échantillonnage.

Le radiomètre est porté par une plate forme (ou vecteur) à une vitesse constante ce qui permet (l'exploration) la succession des lignes.

Le balayage d'une ligne se fait à l'aide du miroir, point par point d'une façon continue.

On considère point, la surface au sol dont l'énergie réfléchie (lumineuse) est reçue par le détecteur à travers l'optique d'entrée, le miroir, l'optique de collection.

Chaque point sera appelé pixel; on attribue une forme rectangulaire dont "a" et "b" sont respectivement la longueur et la largeur au pixel de base ^{qui} peut être défini en fonction des angles , son centre se trouve dans le prolongement de l'axe optique de l'optique d'entrée.

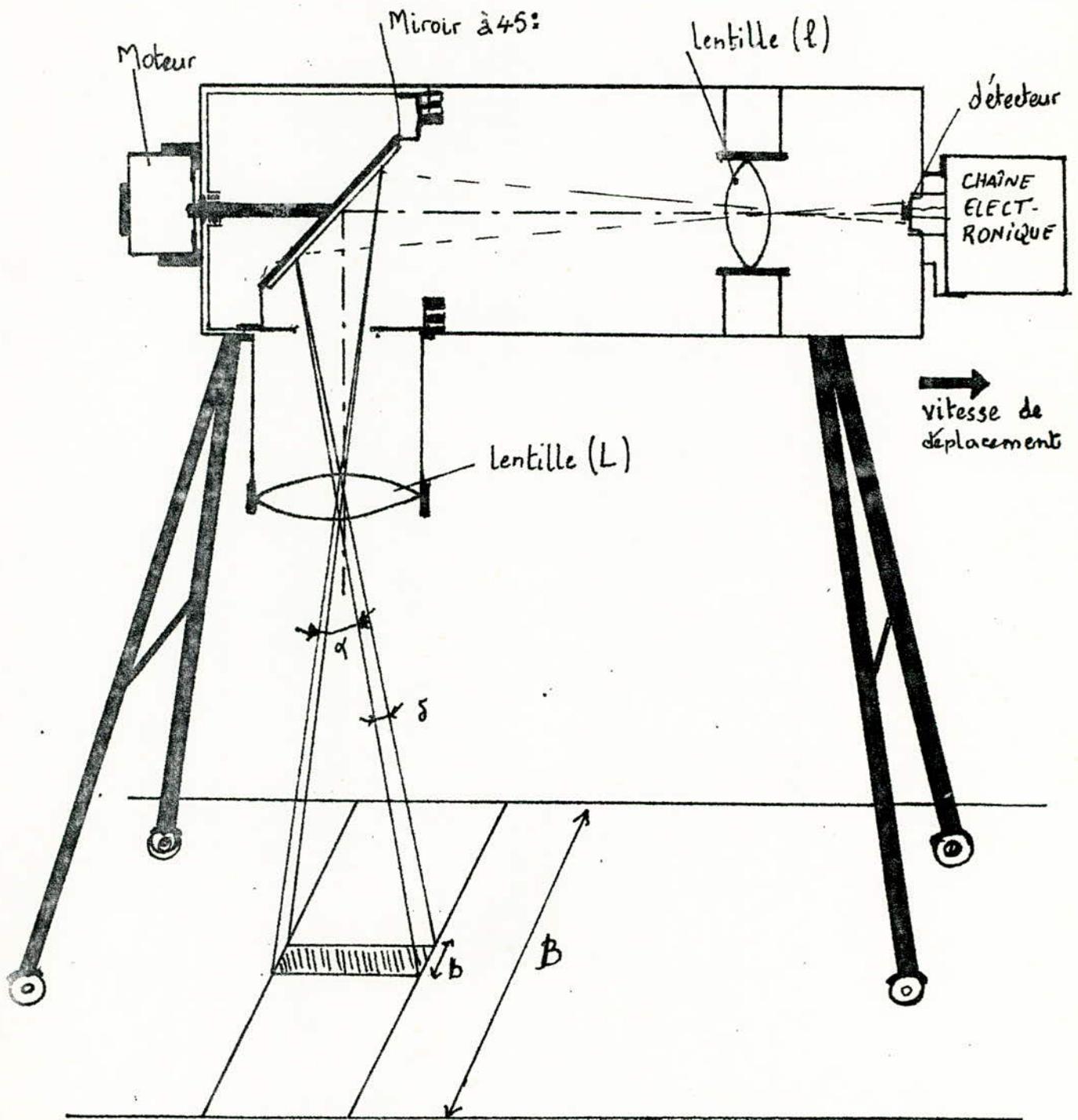


Fig 4.1

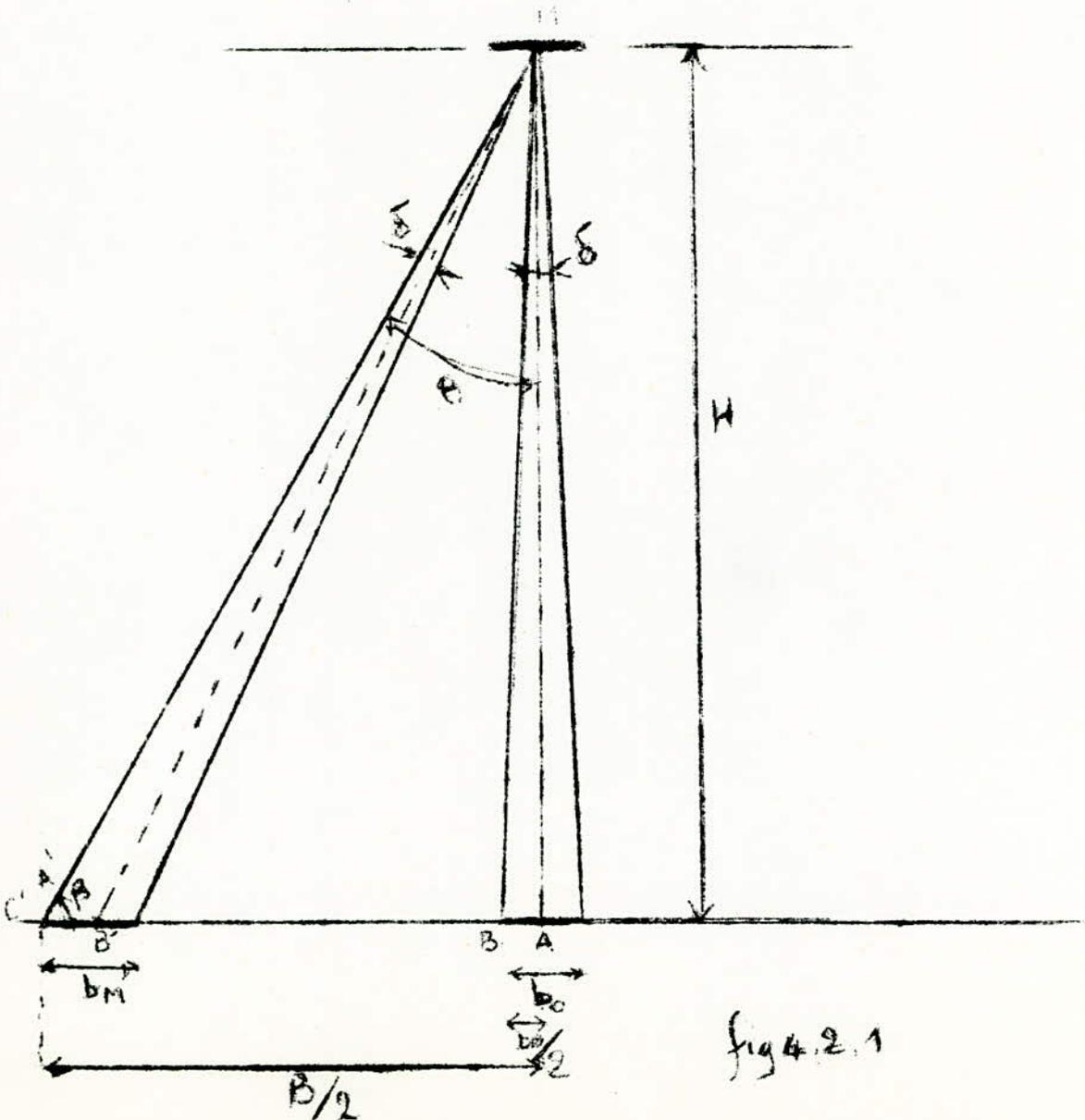
4.2- LIMITATION DE LA LARGEUR DE LA TRAME:

On notera par B la largeur de la trame. Cette dernière ne peut avoir une dimension quelconque car elle est limitée par la déformation des pixels qui se trouvent de part et d'autre de la ligne balayée. Ainsi l'angle maximum de balayage sera limité.

Pour calculer l'angle maximum de balayage et en déduire la longueur d'une ligne, on donne deux méthodes.

4.2.1- Première méthode:

Les pixels au sol sont vus sous un angle δ . On note par " b " la trace du pixel de base. La figure 4.2.1 représente les différents pixels qui constituent une ligne.



Pour déterminer la longueur d'une ligne, on calcule l'angle maximum de balayage. Pour cela on compare la moitié de la trace du pixel de base $b_0/2$ à la moitié de la trace du pixel extrême, soit b_M . On a donc: $b_M > b_0/2$.

On impose par hypothèse la déformation telle que: $b_M = kb_0$.
 Le problème est donc connaissant b_0 , l'altitude H , l'angle β , et la constante de déformation k , on doit déterminer l'angle β .
 On compare les triangles MAB et $M'B'A'$ qui sont semblables. En effet ils sont semblables et ont un angle égale à $\beta/2$.

$$MAB \text{ semblable à } M'A'B' \Rightarrow \frac{MA}{M'A'} = \frac{MB}{M'B'} = \frac{AB}{A'B'} \quad , \quad \frac{MA}{M'A'} = \frac{AB}{A'B'}$$

et avec $MA = H$
 $AB = b_0/2$
 $A'B' = k \frac{b_0}{2} \sin \beta$

$$\Rightarrow \text{on a } \frac{H}{M'A'} = \frac{1}{k \sin \beta} \quad (1)$$

$$B'A' = b_M \sin \beta = k \frac{b_0}{2} \sin \beta, \quad \sin \beta = \frac{MA}{M'A' + A'B'} = \frac{H}{M'A' + k \frac{b_0}{2} \sin \beta}$$

$$\text{d'où } M'A' = \frac{H - k \frac{b_0}{2} \cos \beta \sin \beta}{\sin \beta} \quad (2)$$

(1) et (2) donnent

$$\frac{H}{M'A'} = \frac{H \sin \beta}{H - k \frac{b_0}{2} \cos \beta \sin \beta} = \frac{1}{k \sin \beta}$$

$$\Rightarrow k \frac{b_0}{2} \cos \beta \sin \beta = H - k \frac{b_0}{2} \cos \beta \sin \beta \quad (3)$$

Dans l'équation 3, on remarque que l'angle β est fonction de H, k, b_0 . La résolution de l'équation 3 nous donne la valeur de l'angle β qui nous permet de déduire l'angle $\theta_{max} = \frac{\pi}{2} - \beta$.
 Le nombre de pixels adjacents est donné par:

$$N = \left[\frac{2 \theta_{max}}{\epsilon} \right] \quad \text{Où } N \text{ est la partie entière.}$$

On peut donc en déduire aussi:

La longueur d'une ligne (ou bien la largeur de la trame) est obtenue par la relation: $B = 2H \tan \theta$

L'angle de balayage utile est donc égale à:

$$2\theta = N \epsilon$$

4.2.2. Deuxième méthode : par cette méthode on définit un certain algorithme

On raisonne sur la figure 4.2.1

On a :

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \delta = \frac{1}{2} \frac{b_0}{H} \Rightarrow b_0 = 2H \operatorname{tg} \frac{1}{2} \delta$$

Le pixel qui suit indiqué par 1, a pour largeur b_1 :

$$\operatorname{tg} \frac{3\delta}{2} = \frac{b_1 + b_0/2}{H} \quad b_1 = H \operatorname{tg} \frac{3\delta}{2} - \frac{b_0}{2}$$

Le pixel d'indice 2 sera défini par b_2 tel que :

$$\operatorname{tg} \frac{5\delta}{2} = \frac{b_2 + b_1 + b_0/2}{H} \Rightarrow b_2 = H \operatorname{tg} \frac{5\delta}{2} - b_1 - \frac{b_0}{2}$$

Pour le pixel d'indice n , on a : b_n tel que : $\operatorname{tg} (2n+1) \frac{\delta}{2} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i + b_0/2}{H}$

$$b_n = H \operatorname{tg} (2n+1) \frac{\delta}{2} - \sum_{j=1}^n b_j - b_0/2$$

soit K_n facteur limite de déformations d'un pixel situé sur l'une des extrémités d'une ligne balayée.

On compare b_n à b_0 tel qu'on doit avoir : $b_n = K_n b_0$

Le nombre de pixels sera donné par : $N = 2n + 1$

L'angle de balayage utile sera : $N \delta = (2n + 1) \delta$

La longueur de la ligne est donnée par :

$B = 2H \operatorname{tg} (n + \frac{1}{2}) \delta$ qui est donnée par la résolution de l'algorithme précédent ayant comme "donnée" K_n , δ et H .

4.3 - INFLUENCE DES PARAMETRES VITESSES DE TRANSLATION ET ROTATION

Soit Ω (tours/minutes) la vitesse de rotation du miroir.

Soit V_T (Km/heures) la vitesse de translation du radiomètre.

L'angle utile de balayage a été précédemment déterminé par

$\theta_U (2n+1) \frac{\delta}{2}$ qui correspond à N pixels.

A Ω (tours/minutes) correspond : Ω (degrés/sec) = $\frac{\Omega (\text{tr/min.})}{360 \times 60}$

Notons par T_R le temps mis par le miroir pour faire une rotation

complète : $T_R = \frac{360^\circ}{\Omega (\text{degré/sec})}$

Le temps mis pour faire une rotation d'un angle utile de θ_U

sera : $T_U (\text{sec}) = \frac{\theta_U (\text{degré})}{\Omega (\text{degré/sec})}$

Le temps durant lequel le miroir se trouve dans une zone d'ombre

(où il ne balaye pas), le temps mort, sera :

$$T_0 (s) = T_R (\text{sec}) - T_U (\text{sec})$$

A ces différents temps correspond un déplacement du radiomètre à la vitesse V_T (Km/h)

Lorsque le miroir fait un tour, durant $T_R(S)$, le radiomètre aura parcouru une distance $X_R(m)$ donnée par:

$$X_R(m) = V_T(m/s) \cdot T_R(sec)$$

Au temps utile $T_U(S)$ correspond un déplacement de la plateforme de $X_U(m)$:

$$X_U(m) = V_T(m/s) \cdot T_U(s)$$

La représentation graphique des différents angles de rotation du miroir (en ordonnées) correspondant aux différents déplacements nous donne la figure 4.3.

On a pris comme origine des angles le début du balayage utile qui correspond à un pixel extrême.

La longueur maximale a_{max} apparait comme fonction de la vitesse de translation et de la vitesse de rotation. On a:

$$\begin{aligned} a_{max}(m) &= X_R(m) - X_U(m) = V_T(m/s) \cdot T_R(s) - V_T(m/s) \cdot T_U(s) \\ &= V_T(m/s) [T_R(s) - T_U(s)] = V_T \left[\frac{360^\circ - \theta_u}{\Omega \text{ (degre/sec)}} \right] \end{aligned}$$

$$a_{max}(m) = \frac{V_T(m/s)}{\Omega \text{ (degre/sec)}} \times 360^\circ - \theta_u$$

Entre deux rotations, persistera un intervalle qui ne sera pas soumis au balayage. On le notera par X_N .

$$X_N = X_R - a_{max}$$

$$X_N(\text{Min}) = X_U \quad \text{ou} \quad X_N(\text{min}) = X_R - (X_R - X_U)$$

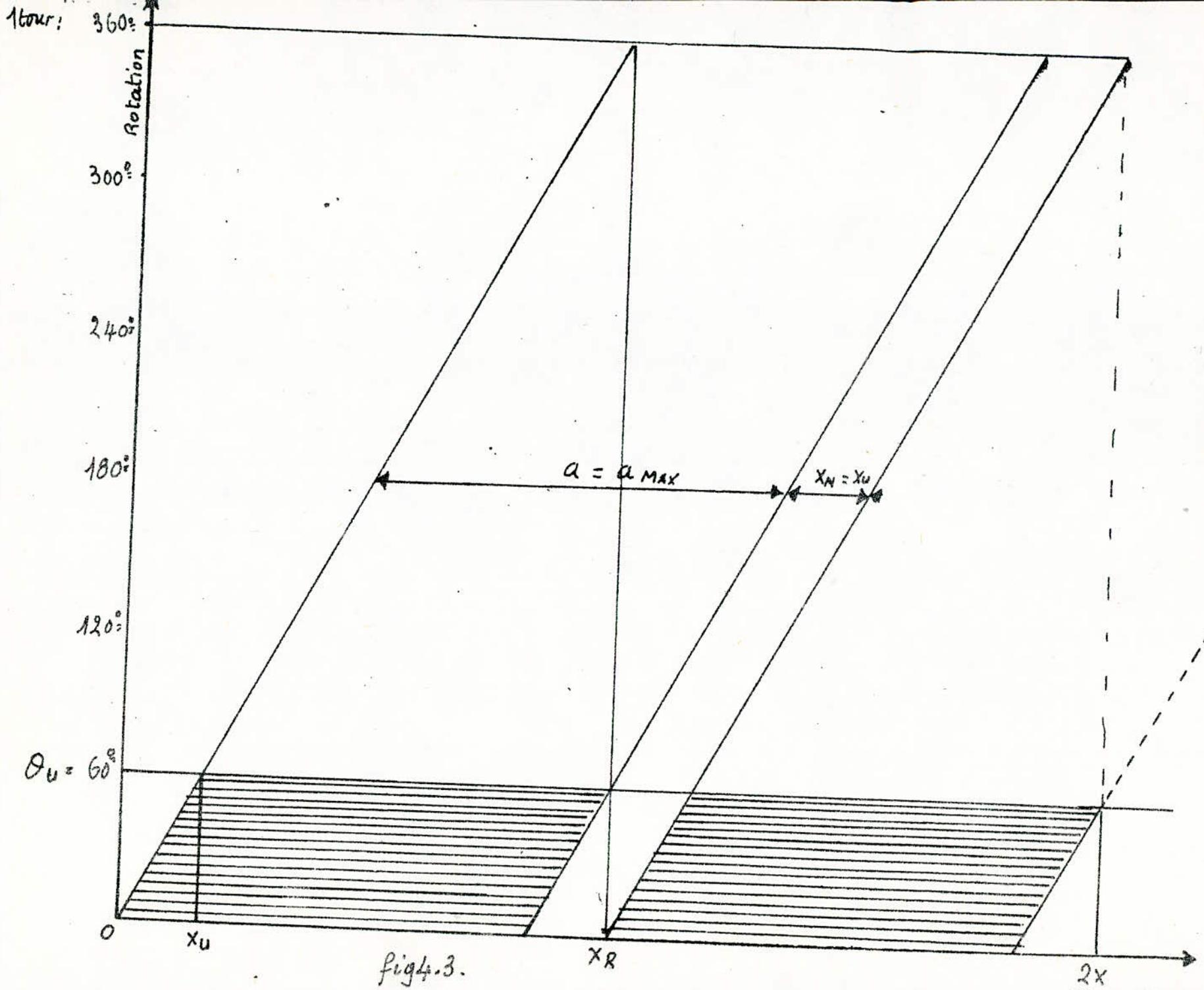
Si on choisit $a < a_{max}$, l'intervalle non balayé augmentera et deviendra alors:

$$X_N = X_R - a$$

La longueur d'un pixel "a" désirée imposera donc le choix de l'angle α .

Pour que les pixels soient des carrés, il faut prendre $a = b_0$.

On peut alors agir sur la vitesse de rotation puisque puisque la vitesse de la plateforme est imposée; c'est la vitesse de l'avion, celle du ballon ou celle du satellite.



4.4- OPTIQUE D'ENTREE ET OPTIQUE DE COLLECTION:

Lerayonnement issu d'une certaine surface de la terre (par réflexion ou par emission) doit être focalisé sur la partie sensible du détecteur.

On a donc le schéma de la figure 4.4,

- L: lentille circulaire, de diamètre D.
- F: distance focale de L
- H: distance lentille L surface à balayer.
- l: lentille de focalisation, circulaire, de diamètre d.
- f: distance focale de l.

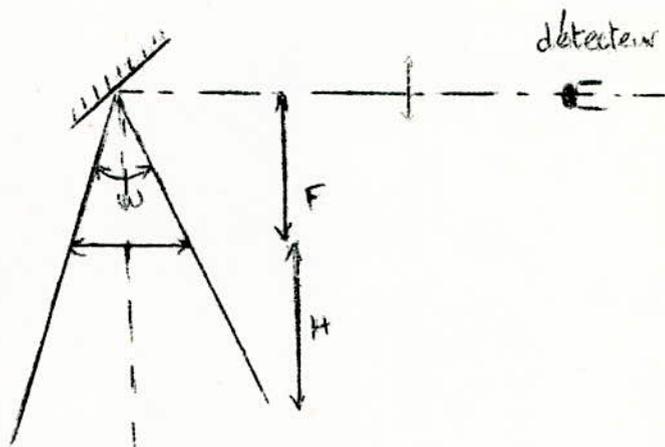


fig 4.4

L'optique d'entrée doit permettre d'observer une ^{surface} circulaire de rayon $R = (a^2 + B^2)^{\frac{1}{2}}$ où: a définit le pixel.

B définit la longueur de la ligne.

4.4.I- Optique de collection:

On considère la figure 4.4.1 qui représente le détecteur de rayon r, la lentille l, et le miroir à 45°.

Soit x_1 la distance entre la lentille l et le point M (M est l'intersection de l'axe optique avec le miroir).

Soit x_2 la distance entre la lentille l et le détecteur. En considérant, f, la focale de l, on applique la formule de Gauss pour cette lentille mince :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}$$

f et x_1 sont positifs.

x_2 est négatif.

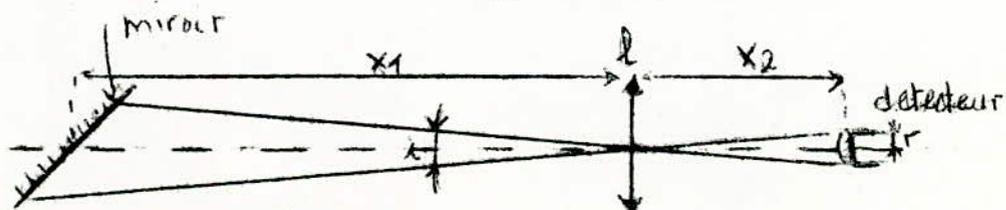


fig 4.4.1

Si on impose x_I , on peut en déduire x_2 :

$$x_2 = \frac{f \cdot x_I}{f - x_I}$$

L'angle i est donné par:

$$\operatorname{tg} \frac{i}{2} = \frac{r}{x_2} \Rightarrow i = 2 \operatorname{Arctg} \frac{r}{x_2} \quad \text{avec } r = \text{rayon du détecteur.}$$

A travers l'angle i , on observe une ellipse:

- son petit axe est égale à: $(2 \cdot x_I \operatorname{tg}(i/2))$
- son grand axe est égale à: $(2 / \cos 45) (x_I \operatorname{tg}(i/2)) \sqrt{1 - (\operatorname{tg}(i/2))^2}$

On exprime la tangente par son expression:

$$p_a = 2 \cdot x_I \cdot r / x_2$$

$$G_a = 2 \sqrt{1 - \frac{x_I \cdot x_2 \cdot r}{x_2^2 - r^2}}$$

4.4.2- Optique d'entrée:

On considère la figure 4. qui représente l'optique d'entrée. La distance entre le point M et la lentille L est égale à la distance focale F de la lentille L (car H est très grande devant la focale F).

Sous l'angle solide I, on doit nécessairement pouvoir observer une surface circulaire de rayon R, définit ci-dessus.

L'angle est déterminé par:

$$\operatorname{tg}(I/2) = \frac{p_a}{F}$$

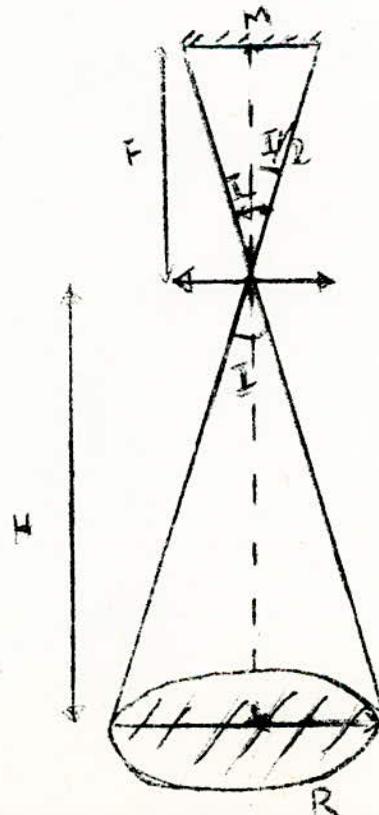
On peut alors en déduire I

$$I = 2 \operatorname{Arctg} \frac{p_a}{F}$$

Le rayon R est donné par:

$$R = 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg}(I/2)$$

fig 4.5



4.5- LA RÉFLEXION VITREUSE/:

Un rayon lumineux se propageant dans un milieu transparent et tombant sur la surface de séparation de ce milieu et d'un autre milieu subit toujours une réflexion plus ou moins importante:

- si le second milieu est peu absorbant, c'est à dire si l'absorption est faible pour une épaisseur de la longueur d'onde, on dit que la réflexion est vitreuse.
- si le second milieu est très absorbant on dit que la réflexion est métallique.

En désignant par n l'indice de réfraction du premier milieu et par n' l'indice du second milieu, Fresnel a montré que sous l'incidence normale, le facteur de réflexion a pour expression

$$R_0 = \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2$$

Les réflexions sur les surfaces séparants les différents milieux constituent une perte d'énergie lumineuse dans un instrument d'optique.

Supposons négligeable l'absorption, au flux incident Φ_0 correspond le flux réfléchi: $\Phi = R_0 \Phi_0$ de l'ordre de 5% et le flux transmis sera: $\Phi' = \Phi_0 - \Phi = \Phi_0 (1 - R_0) = T \Phi_0$ de l'ordre de 95%.

T: facteur de transmission.

S'il y a p lentilles non collées dans un instrument; il y a $2p$ surfaces air-verre et le flux transmis sera de: $\Phi_T = \Phi_0 T^{2p}$

On a supposé négligeable l'absorption due au verre traversé et les pertes par diffusion. La quantité $t = T^{2p}$ est en première approximation le facteur de transmission de l'instrument.

En réalité, le facteur de transmission qui est utilisé sera:

$$t = T^{2p} \cdot 10^{-k \Sigma_i}$$

k : de l'ordre de 1/200.

Σ_i désigne l'épaisseur totale des verres en cm.

Sous incidence oblique, le facteur de réflexion dépend de l'état de polarisation de la lumière incidente.

Si la lumière est polarisée dans le plan d'incidence, le facteur de réflexion sera:

$$R_1 = \left[\frac{\sin(i-r)}{\cos(i+r)} \right]^2$$

Si la lumière est polarisée dans le plan perpendiculaire au

plan d'incidence, le facteur de réflexion sera: $R_2 = \left[\frac{t_2(i-r)}{t_2(i+r)} \right]^2$

Pour étudier une lumière polarisée dans un plan quelconque, on la décompose pour la ramener aux cas précédents. La lumière naturelle est traitée de la même manière. Ses deux composantes dans le plan d'incidence et perpendiculairement à ce plan, sont égales mais subissent des réflexions d'intensités différentes. Après réflexion, la lumière naturelle est partiellement polarisée dans le plan d'incidence, (puisque $R_2 < R_1$), puisque l'incidence est oblique.

La figure 4.5 indique la variation des facteurs de réflexion R_1 et R_2 en fonction de l'angle d'incidence et permet de préciser les propriétés de la réflexion de la lumière naturelle sous incidence oblique. R_2 s'annule pour: $i + r = \frac{\pi}{2}$.

Soit: $\sin i = n \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - i)$ ou $t_2 i = n$.

Le rayon réfléchi est alors perpendiculaire au rayon réfracté (loi de Brewster). Pour l'incidence de Brewster, un faisceau de rayons parallèles en lumière naturelle est après réflexion constitué par de la lumière dans le plan d'incidence, le facteur de réflexion étant nul pour la composante de la lumière incidente dont le plan de polarisation est perpendiculaire au plan d'incidence.

Considérons une ordonnée quelconque de la figure 4.5. Soit l'angle a . Elle coupe les courbes R_1 et R_2 aux points f_1 et f_2 d'ordonnée a et a . Le facteur de réflexion en lumière naturelle a pour valeur: $f_a = \frac{f_1 a + f_2 a}{2}$

Lorsque a varie, le point f décrit la courbe R qui représente les variations de ce facteur en fonction de l'incidence. Jusqu'à 50° à 60° , le facteur de réflexion reste faible. Considérons le flux d'un rayonnement de lumière naturelle constitué par des rayons parallèles se réfléchissant sous l'incidence a .

Le flux de lumière réfléchie polarisée perpendiculairement au plan d'incidence sera: $\frac{\Phi}{2} f_2 a$; tandis que celui polarisé dans le plan d'incidence est supérieur et égal à: $\Phi f_1 a$.

Il en résulte qu'il y aura un flux de lumière naturelle:

$$\Phi f_1 f_2 a = \Phi f_2 a$$

et un flux de lumière polarisée dans le plan d'incidence:

$$\frac{\Phi}{2} (f_1 a - f_2 a) = \frac{\Phi}{2} f_1 f_2$$

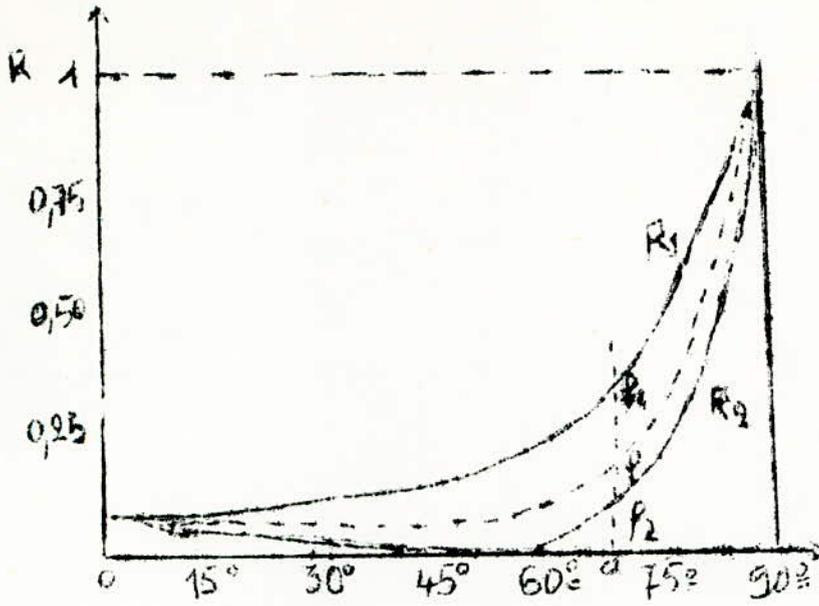


fig 4.5

La proportion de lumière polarisée après réflexion est donc :

$$p_1 p_2 / (p_1 + p_2)$$

tandis que la proportion de lumière :

(nulle pour l'incidence de Brewster: $p_2 = 0$).

Si le milieu d'incidence est plus réfringent que le milieu d'émergence, lorsque l'angle d'incidence atteint la valeur l de l'angle limite, il y a réflexion totale et la courbe $R=f(i)$ sera donnée en figure 4.5'.

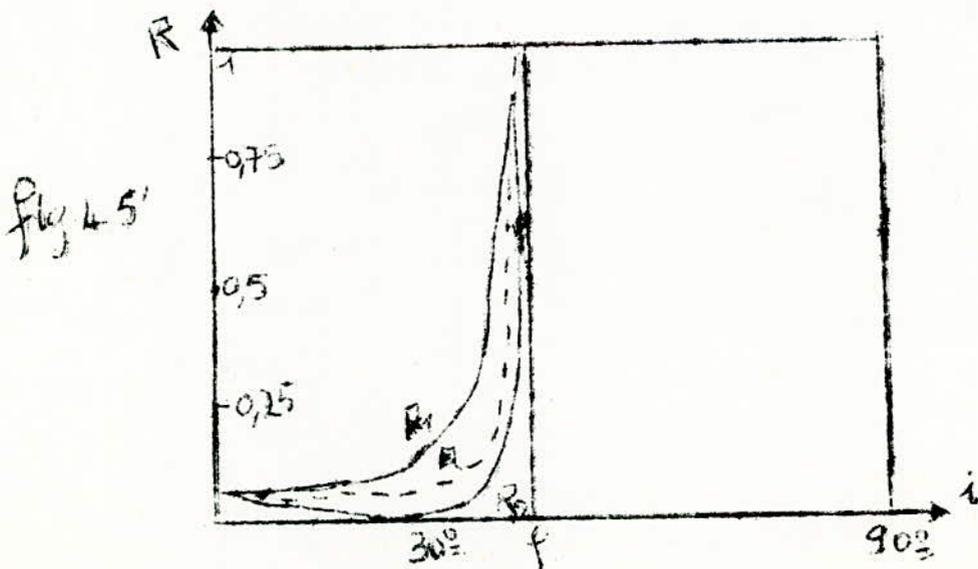


fig 4.5'

4.6- CHOIX DU MIROIR:

Le pouvoir réflecteur élevé des métaux est utilisé pour la confection des miroirs.

On fabrique des miroirs:

- en métal poli: mais il a été abandonné pour les grands miroirs en raison de ses déformations;
- en verre recouvert d'une couche de métal sur sa face antérieure;
- en verre recouvert d'une couche de métal sur sa face postérieure qui a l'inconvénient d'une seconde réflexion sur la face de séparation air-verre. On provoque le dépôt métallique, soit par un procédé chimique, soit par projection cathodique, soit par évaporation dans le vide.

Le pouvoir réflecteur des métaux par rapport à l'air sous incidence normale a pour expression: $R_0 = \frac{(n-1)^2 + n^2 k^2}{(n+1)^2 + n^2 k^2}$

n peut être inférieur à 1 pour l'argent (0,18) ou le sodium (0,005), mais il peut être supérieur à 1 comme pour le fer (2,49).

λ : indice d'absorption ou d'extinction de l'ordre de 2 à 5.

Les miroirs en verre recouverts d'une couche de métal les plus intéressants font appel à l'aluminium ou au rhodium.

L'aluminium donne un pouvoir réflecteur élevé mais est assez fragile et s'oxyde facilement.

Les miroirs semi-réfléchissants et semi-transparentes sont obtenus de la même façon et comportent une couche de l'ordre du centième du micron. Ils sont également obtenus par dépôt sur le verre sous un vide extrêmement poussé. La couche sera d'épaisseur e telle que le chemin optique satisfait la relation:

Le facteur de transmission régulière et le facteur de réflexion régulière sont respectivement, en négligeant les pertes par absorption:

$$T_0 = \frac{4n_2^2 n_1 n_3}{(n_2^2 + n_1 n_3)^2} \quad \text{et} \quad R_0 = \frac{(n_2^2 - n_1 n_3)^2}{(n_2^2 + n_1 n_3)^2}$$

n_1 : indice de l'air

n_2 : indice du corps semi-réfléchissant.

n_3 : indice du verre.

λ : longueur d'onde efficace du rayonnement.

L'idéal est d'obtenir: $R_0 = T_0 = 50\%$

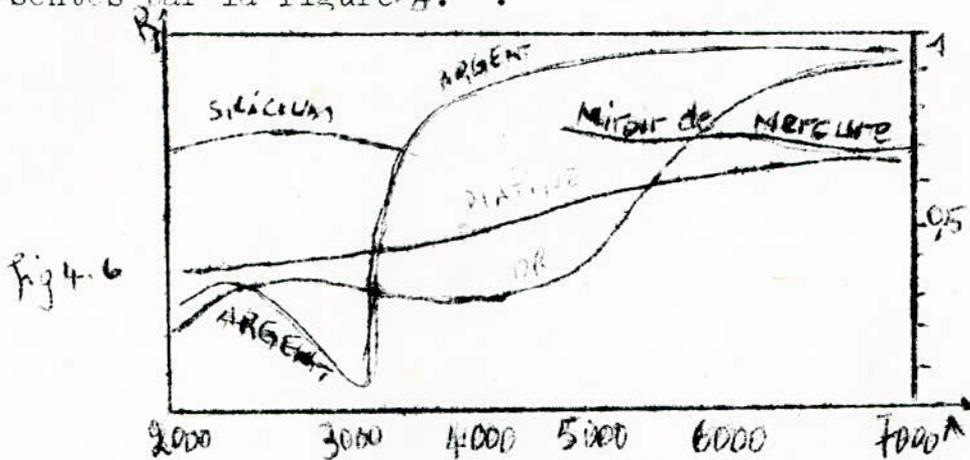
L'oxyde de titane donne avec un verre d'indice $n_3 = 1,52$

$$R_0 = 35\% \quad \text{et} \quad T_0 = 65\%$$

La sulfure d'antimoine permet d'égaliser les deux facteurs:

$$R_0 = T_0 = 46\%$$

Le facteur de réflexion sous incidence normale, beaucoup plus élevé que pour les corps transparents, varie avec le métal et pour un même métal, avec le poli et la propriété du métal et la longueur d'onde de la lumière incidente. Divers résultats sont représentés par la figure 4.6.



La réflexion régulière obéit à la loi de Descartes.

Pour une surface de séparation qui n'est pas parfaitement polie et si ses irrégularités ne sont pas très petites par rapport à la longueur d'onde, il y aura une réflexion diffuse.

Ainsi le choix du miroir qui sera utilisé dans un radiomètre à balayage va dépendre du canal ou des canaux du spectre dans lesquels va travailler la chaîne de mesure.

Les dimensions du miroir sont étroitement liés au détecteur et à l'optique de collection.

Pour notre cas, le miroir peut avoir les dimensions de l'ellipse dont on a calculée le petit axe p_a et le grand axe G_a dans l'optique de collection. On peut prendre un miroir rectangulaire dont les dimensions sont les petit et grand axes.

4.7- DETECTEURS-AMPLIFICATION - ECHANTILLONNAGE:

4.7.1- Les détecteurs:

La lumière peut être considérée sous deux aspects physiques : ondulatoire et corpusculaire. Dans ce dernier cas, elle se compose de photons, particules qui se déplacent à une vitesse $C = 3 \cdot 10^8$ m/S. Chaque photon transporte une énergie qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement associé.

Cette énergie a pour expression: $W = h \cdot \nu$.

h : constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.S.

ν : la fréquence du rayonnement. en hz.

Les substances (ou dispositifs) capables de détecter les fréquences optiques sont multiples dans leurs principes, comme dans leurs possibilités.

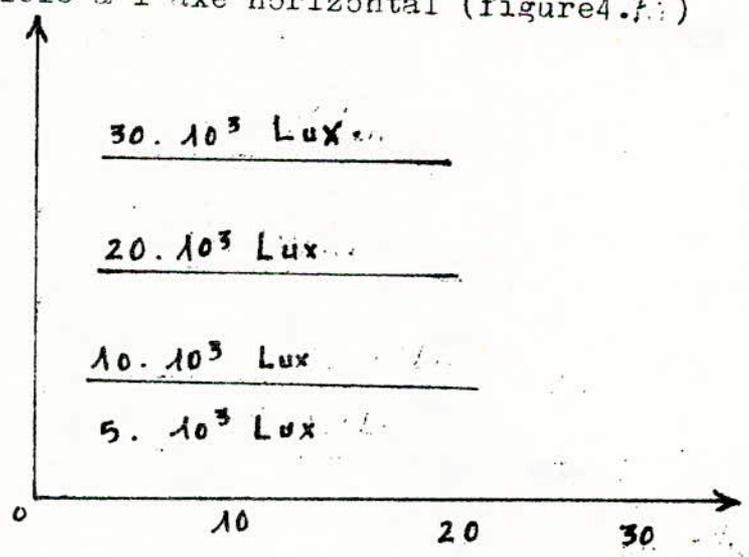
L'effet photo-électrique dans une jonction PN est basé sur le principe suivant: la géométrie de la diode est étudiée de telle manière que la zone de charge d'espace soit égale ou supérieure à la profondeur de pénétration des photons, chacun de ceux-ci dont l'énergie sera suffisante pour faire passer un des électrons périphériques des atomes du cristal de la bande de valence à la bande de conduction donnera naissance à une paire électron-trou qui étant donnée la faible épaisseur de la zone de charge d'espace sera rapidement collectée par la jonction.

Une telle diode polarisée en inverse sera donc apte à transformer une partie de l'énergie lumineuse en un courant proportionnel à l'intensité lumineuse incidente et à la surface de la région photo-sensible.

La cause principale du courant qui traverse la diode étant l'éclairement, le courant de fuite (courant d'obscurité) de la diode étant négligeable, la courbe $I_n = f(V_{inverse})$ pour un éclairement donné est pratiquement parallèle à l'axe horizontal (figure 4.7.1)

le courant photo-électrique est pratiquement indépendant de la tension inverse à ses bornes. pour une photodiode.

Fig: 47 1



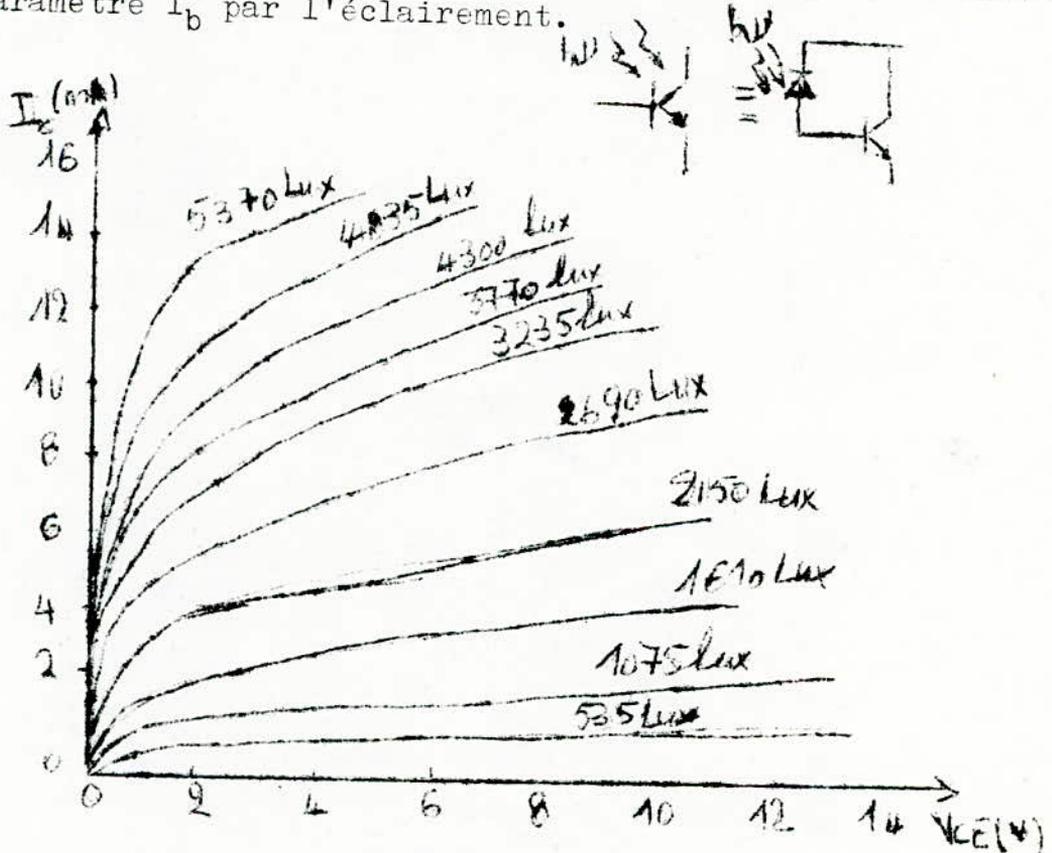
On peut définir la sensibilité S d'une photodiode par le rapport du courant inverse I_K à l'éclairement E sur la jonction:

L'ordre de grandeur est voisin de quelques centaines de nanomètres par lux. Cette sensibilité dépend de la longueur d'onde.

D'une photodiode, on peut passer à la structure phototransistor.

On a la succession de trois zones P.N.P. Quand la partie centrale P est éclairée, la création de paires électron-trou se ramène à l'injection d'un courant de base I_b , qui est amplifié par l'effet transistor du dispositif.

Les courbes caractéristiques des phototransistors ressemblent étrangement à celles de transistors "normaux" en remplaçant simplement le paramètre I_b par l'éclairement.



Un phototransistor peut être considéré comme un transistor normal, auquel une photodiode fournit le courant de base.

La sensibilité s'exprime en mA par unité d'éclairement:

Il convient de préciser le point de fonctionnement choisi, puisque la sensibilité dépend du courant I_C . La sensibilité doit être spécifiée pour la valeur de l'éclairement E et le courant choisi.

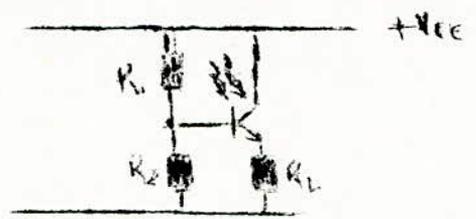
Le courant de fuite est nommé courant d'obscurité.

Les temps de réponse sont de la plus haute importance:

- temps de montée (rise time): t_r
- temps de descente (fall time): t_f
- temps de retard (delay time): t_d
- temps de saturation (saturation time): t_s

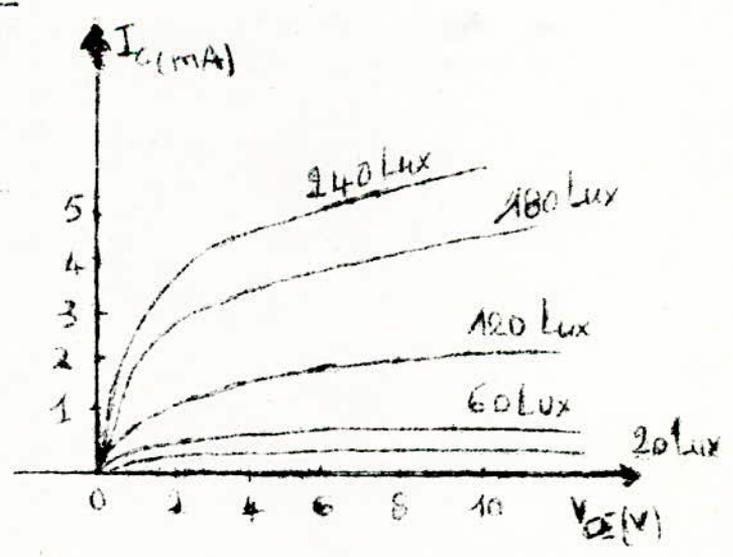
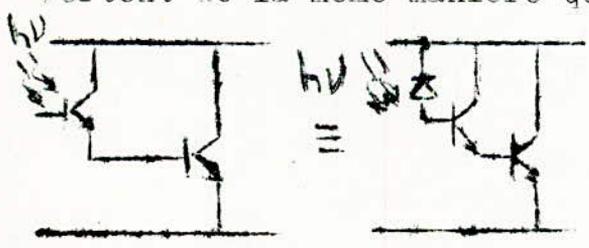
Ces temps sont à spécifier pour un courant I_C , une tension V_{CE} et une charge R_L . Si la charge est fixe, les temps t_d , t_r , t_f diminuent lorsque l'éclairement E augmente. Le temps t_s augmente avec I_C pour V_{CE} stable. et t_d , t_r ; t_f augmente avec R_L .

Pour avoir des temps de réponse plus faibles, on adopte le montage ci-dessous où la base est polarisée par les résistances R_1 et R_2 . le phototransistor est en collecteur commun.



Afin d'augmenter encore la sensibilité, les constructeurs ont intégré sur un même substrat un phototransistor couplé en montage darlington à un second transistor amplificateur.

Du point de vue des caractéristiques, ces photo-darlington se comportent de la même manière que des transistors simples à fort β .



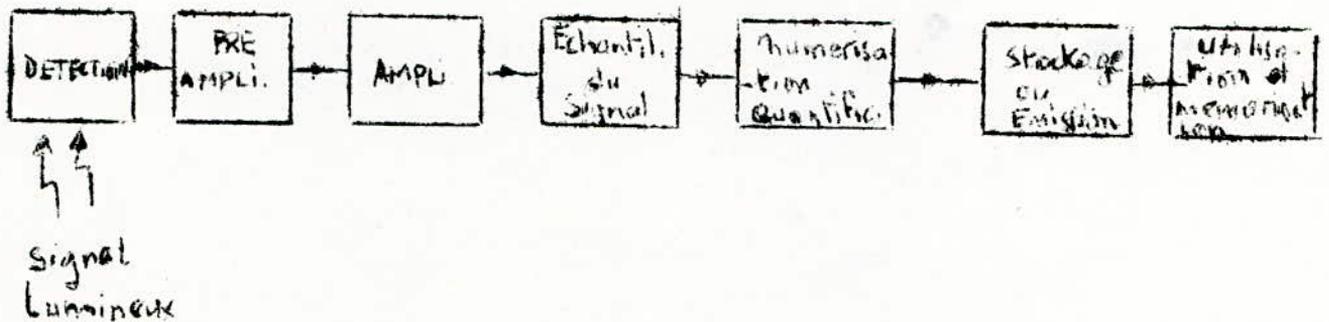
4.7.2- Amplification:

Le détecteur (photodiode ou phototransistor) n'est autre qu'un convertisseur du signal lumineux en un signal électrique le plus souvent très faible et surtout dans le cas d'un radiomètre à grande distance. Pour cela une chaîne d'amplification est indispensable pour recueillir en sortie un signal exploitable.

Plusieurs schémas synoptiques peuvent être proposés pour recueillir et acheminer le signal, pour traitement, qui représente l'éclairement reçu sur le détecteur.

a) C'est la tension qui varie en fonction de l'éclairement.

On a le schéma synoptique suivant:

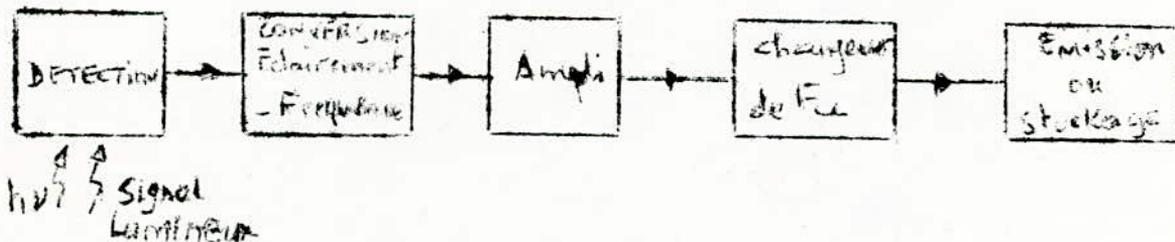


Pour ce schéma, on a la tension aux bornes du préamplificateur qui varie en fonction de l'éclairement E que subit le détecteur et qui varie en fonction du temps.

A la sortie de l'amplificateur, le signal peut être traité...:

ON peut l'échantillonner, le numériser, le stocker, ou l'émettre vers une station de réémission ou bien de réception.

b) C'est la fréquence du signal qui varie en fonction de l'éclairement. On a le schéma synoptique suivant:



A l'entrée de l'amplificateur, on a un signal électrique dont la fréquence varie avec l'éclairement (et avec le temps puisque l'éclairement varie avec le temps).

Un changement de fréquence serait nécessaire en cas d'émission.

La fréquence d'un multivibrateur ou d'un oscillateur peut être modulé par la lumière.

4.7.3- L'échantillonnage:

Le signal, à la sortie de l'amplificateur, a une tension qui varie en fonction du temps (balayage) et de l'éclairement.

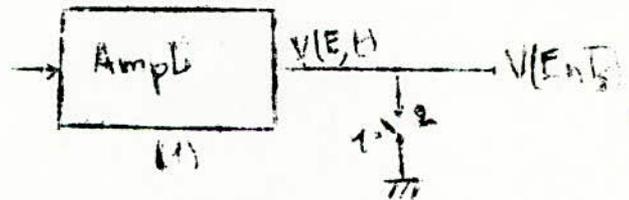
Aussi il ne faut pas perdre de vue le fait qu'à chaque tension correspond l'émission d'un pixel bien défini dans l'espace objet.

Le temps de balayage d'un pixel est une référence importante pour le choix de la période d'échantillonnage.

On peut choisir la période d'échantillonnage T_e telle qu'elle soit un sous-multiple du temps que met le miroir pour parcourir l'angle, correspondant à un pixel. Cela permet lors du traitement de reconstituer les tensions correspondant aux pixels adjacents, on peut faire une comparaison entre l'émissivité de zones différentes.

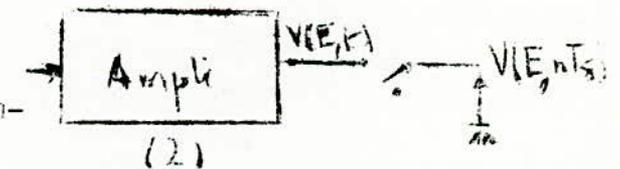
Le schéma synoptique d'un circuit d'échantillonnage est représenté ci-dessous.

Un interrupteur électronique peut réaliser l'échantillonnage



Lorsque l'interrupteur est ouvert,

dans le cas d'un interrupteur en parallèle, la tension de sortie est égale à la tension délivrée par l'amplificateur.

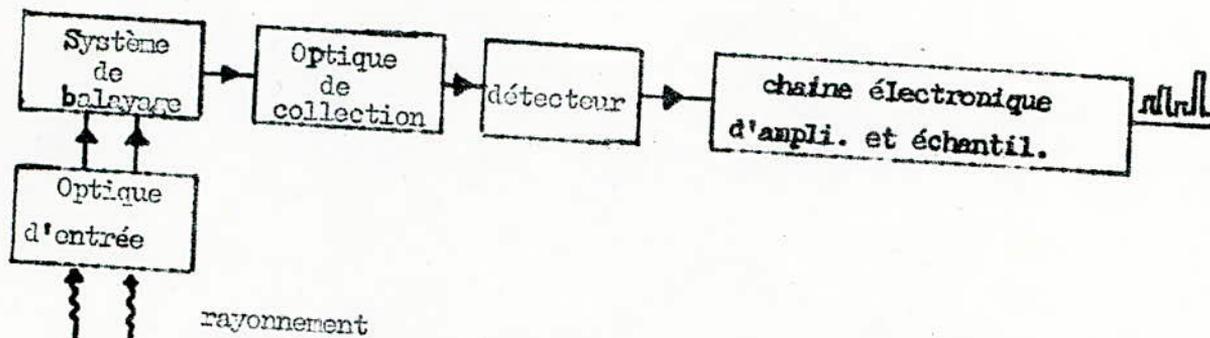


Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension est court-circuitée, et la sortie est nulle

Tandis que pour un interrupteur en série avec la sortie, la tension de sortie est nulle lorsque l'interrupteur est ouvert. Quand l'interrupteur est fermé, la tension de sortie est égale à la tension délivré par l'amplificateur qui précède l'interrupteur.

Réalisation du radiomètre à balayage

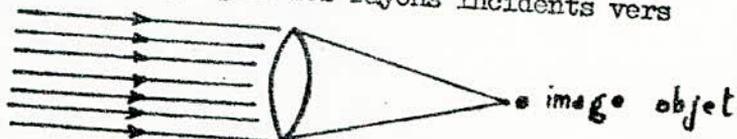
5.1. Schéma synoptique du radiomètre à balayage



5.2. Optique d'entrée :

Sa fonction principale est de recueillir l'énergie rayonnée sous forme de faisceau parallèles par la surface à étudier vers le système de balayage.

Le radiomètre est placé à une certaine altitude de la scène à analyser, de façon que l'on peut considérer d'après les lois de l'optique: les rayons incidents vers l'optique d'entrée sont parallèles.



D'où l'image d'un objet situé à l'infini vient se former sur un miroir de balayage situé dans le plan focal.

L'optique d'entrée est constituée d'une lentille convergente :

- de diamètre : 5 cm .
- de focale : 12 cm .

5.3. Le système de balayage :

Il se caractérise par la manière d'analyser la surface terrestre.

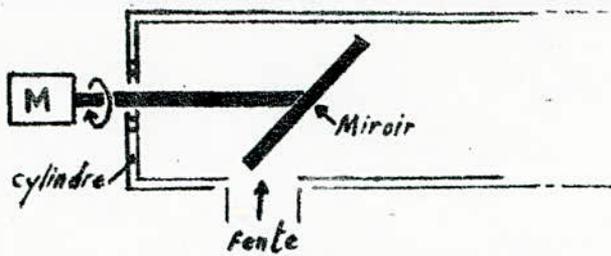
L'instrument est constitué d'un miroir plan de balayage incliné à 45° par rapport à l'axe optique .

La rotation de ce miroir est suivant un axe parallèle au vecteur vitesse de la "plate forme" et permet de balayer une bande au sol perpendiculairement à la direction de déplacement.

La balayage adopté pour notre radiomètre est : un "balayage dans l'espace image".

Il est généré par la rotation de l'arbre d'un petit moteur entraînant un cylindre creux dans lequel est fixé un miroir plan, incliné à 45° par rapport à l'axe de rotation.

La cylindre est percé d'une petite fente rectangulaire, de dimensions données, placées juste dans la projection de la face centrale du miroir, est solidaire à la rotation du miroir. Ainsi est réalisé le système de balayage.



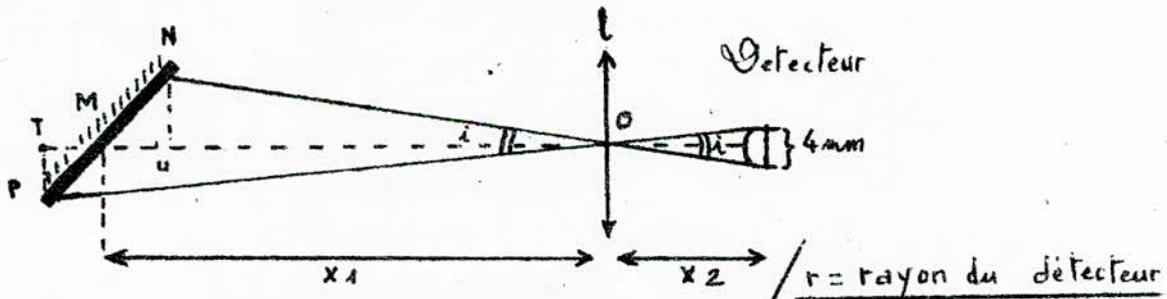
Le miroir reçoit alors en parties l'énergie captée à travers l'optique d'entrée. La fente nous permet de découper la largeur de la surface à étudier en différentes aires instantanées et égale lors du balayage d'une ligne. La nécessité de ce découpage est de présenter au détecteur, une petite aire donnée à un temps donné, ainsi de suite jusqu'à ce qu'on aura balayé un ensemble de petite aire constituant une image.

Après traitement et décodage, s'il y aura des corrections éventuelles sur l'image, on saura facilement de quelle petite aire s'agit-il ?

Les dimensions de la fente permettent de déterminer la résolution spatiale (angle de vue instantané "IFOV"), et en connaissant l'altitude du radiomètre on pourra déduire facilement la résolution du sol (taille du pixel- largeur de la bande balayée, et le nombre de pixel sur une ligne).

La fente est de forme rectangulaire de dimensions : 2 cm de longueur et 4 mm de largeur. Elle est positionnée à 5cm du centre du miroir, et à 7cm de l'optique d'entrée (lentille "L").

En passant par les dimensions du détecteur et l'optique de collection, on peut retrouver les résolutions spatiales.



La loi de Gauss nous permet de fixer x_1 et x_2 en connaissant la focale $F(4cm)$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \quad \text{en prenant } x_1 = 20 \text{ cm, on aura } x_2 = 5 \text{ cm}$$

$$\hat{i} = 2 \arctg \frac{r}{x_2}$$

Application numérique $\hat{i} = 2 \arctg \frac{0,2}{5} = 2,3^\circ$

Sous l'angle solide d'angle au sommet i , on peut voir un cercle transformé en ellipse sur un miroir incliné à 45° ;

- le petit axe de l'ellipse est donné par $P_a = 2x_1 \cdot \text{tg } \frac{i}{2}$

$$\text{A.N. } P_a = 2 \times 20 \cdot \frac{0,2}{5} \Rightarrow P_a = 1,6 \text{ cm.}$$

- On peut aussi calculer son grand axe :

$$\text{on a : } \frac{PT}{OT} = \operatorname{tg} i/2 = \frac{PT}{\alpha_1 + TM}$$

$$TM = PT \implies PT = \frac{\alpha_1 \operatorname{tg} i/2}{1 - \operatorname{tg} i/2}$$

$$\frac{PT}{PM} = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} \implies PM = \sqrt{2} \alpha_1 \frac{\operatorname{tg} i/2}{1 - \operatorname{tg} i/2}$$

$$\text{Ainsi : } Nu = \frac{\alpha_1 \operatorname{tg} i/2}{1 + \operatorname{tg} i/2} \quad \text{et} \quad Mu = \sqrt{2} \alpha_1 \frac{\operatorname{tg} i/2}{1 + \operatorname{tg} i/2}$$

le grand axe est alors :

$$G_d = PM + MN = \sqrt{2} \alpha_1 \operatorname{tg} i/2 \left[\frac{1}{1 - \operatorname{tg} i/2} + \frac{1}{1 + \operatorname{tg} i/2} \right]$$

$$r \ll \alpha_2 \implies 1 \gg \operatorname{tg} i/2$$

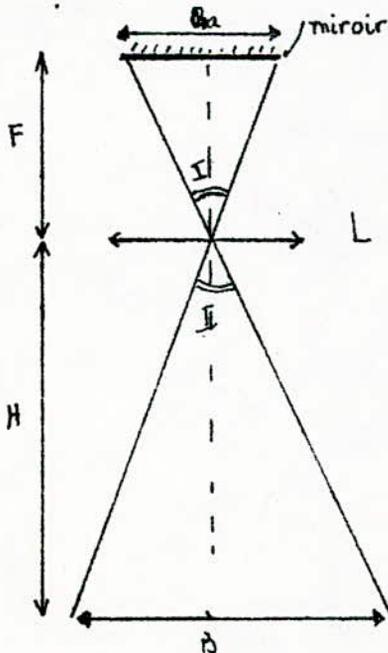
$$G_d \approx \sqrt{2} \alpha_1 \operatorname{tg} i/2 \times 2$$

A.N.

$$G_d = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 20 \cdot \frac{0,2}{5} = 2,26 \text{ cm}$$

$$\underline{\underline{G_d = 2,26 \text{ cm}}}$$

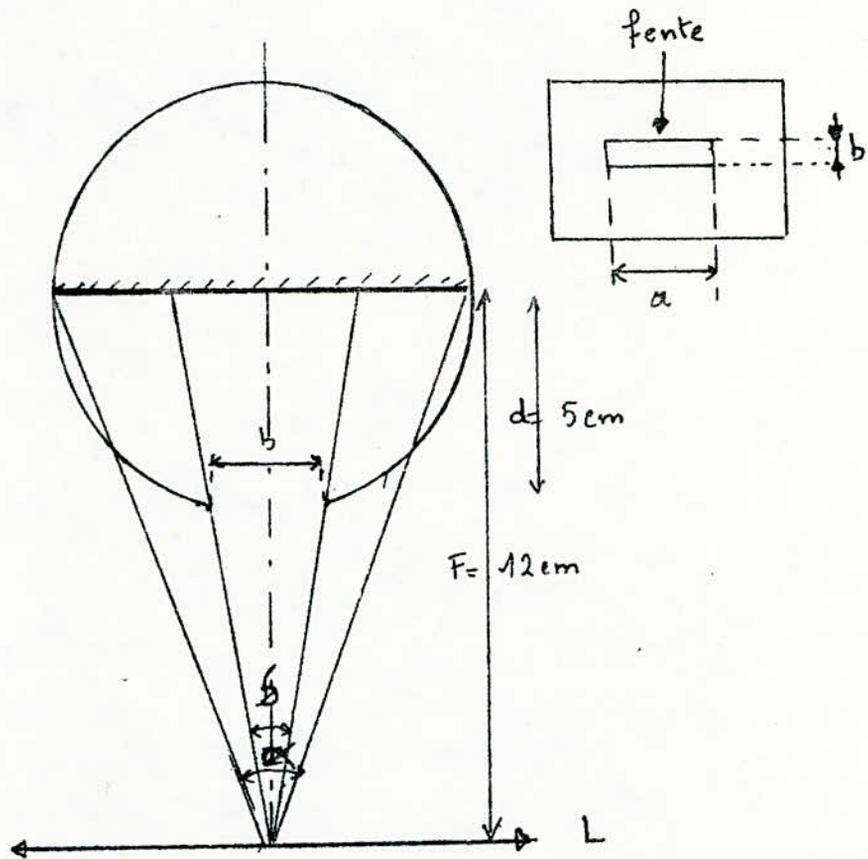
le champ de vue total à balayer par notre système sera déterminé par l'optique d'entrée :



$$\operatorname{tg} i/2 = \frac{G_d}{2F} \quad I = \operatorname{Arctg} \frac{G_d}{2F}$$

$$I \approx 15^\circ$$

Le balayage dans le plan image, est effectué par la fente comme l'indique la figure suivante.



L'angle instantané δ détermine les dimensions d'un pixel

$$\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \frac{b/2}{F-d}$$

$$\delta = 2 \operatorname{arctg} \frac{b/2}{F-d}$$

A.N.: $\delta = 3,2^\circ$

L'angle α est déterminé par l'ouverture a ;

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{a/2}{F-d}$$

$$\alpha = 2 \operatorname{Arctg} \frac{a/2}{F-d}$$

A.N.: $\alpha = 16,26^\circ$

D'après la résolution spatiale :

α : angle du champ de vue

δ : angle de vue instantané

on peut en déduire le nombre de pixel vu au sol, on désigne par N le nombre de pixel :

$$N = \frac{\alpha}{\delta}$$

A.N. : $N = 5$

Dimension d'un pixel et largeur de bande au sol.

- largeur de bande au sol :

$$B = 2(H+F) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 60,57 \text{ cm}$$

- largeur d'un pixel .

$$l = 2(H+F) \operatorname{tg} \delta/2 = 11,8 \text{ cm}$$

- surface d'un pixel .

$$s = B.l$$

A.N. : $S = 714,72 \text{ cm}^2$

Détermination de la fréquence de balayage :

La fréquence de balayage d'un pixel doit être en relation avec le temps de réponse du détecteur, c'est à dire que le temps de balayage d'un pixel (t_{pix}) doit être très grand devant le temps de réponse (t_r) du détecteur .

Si on prend $t_{pix} \approx 100 t_r$ avec $t_r = 2,8 \mu \text{ sec}$.

le temps de balayage d'une ligne doit être alors $t_l \approx 5 t_{pix} = 500 t_r$.

Le temps pour faire un tour complet du système de balayage sera :

$$t_{s.b} = \frac{500 t_r \times 360}{16,26}$$

A.N. $t_{s.b} \approx 31000 \mu \text{ sec} = 31 \text{ m. sec}$.

d'où la vitesse angulaire de balayage doit être :

$$\Omega < 2.\pi. \frac{1}{t_{s.b}}$$

A.N. $\Omega \leq 200 \text{ rd/sec}$.

d'où $\Omega \ll 1900 \text{ tours/min}$.

D'après ces résultats on peut déterminer les fréquences d'échantillonnages.

Ω étant la vitesse angulaire de balayage (rd/sec); les fréquences électriques sont liées aux fréquences spatiales par la relation :

$$f = \Omega \times D \rightarrow (\text{cycle / rd})$$

Hertz \uparrow rd/sec \uparrow

La fréquence de coupure électronique à 3 dB, f_c , correspond à la fréquence spatiale .

La fréquence de coupure électronique à 3 dB, f_c , correspond à la fréquence spatiale :

$$v = \frac{1}{2 \times \delta}$$

$$\delta = 3,2^\circ$$

$$\text{A.N. } v = \frac{1}{2,3,2} \times \frac{360}{2\pi} = 8,9 \text{ (cycle par radian.)}$$

δ : champ de vue instantané du détecteur .

La fréquence d'échantillonnage est obtenue par les conditions du théorème de Shannon, f_c correspondant à v et $f = 1780 \text{ Hz}$

d'où l'intervalle de temps entre échantillons voisins est :

$$\Delta t = \frac{1}{2f_c} \implies \text{A.N. } \Delta t = 280 \mu\text{sec.}$$

5.4. Optique de collection :

Elle a pour fonction de focaliser les rayonnements issus du sol et coudé par le miroir de balayage, sur le détecteur sensible à la bande des longueurs d'ondes choisies .

L'optique de collection de notre instrument a été réalisée par une lentille de type convergente (loupe en verre) de petite dimension, et ayant les propriétés suivantes :

- focale : 4 cm
- diamètre : 2 cm .

Pour positionner au mieux les distances entre : miroir - lentille (1) et lentille (2) détecteur, nous nous basons sur l'expression de Gauss qui donne la focale :

$$1/f = \frac{1}{X_1} - \frac{1}{X_2}$$

Pour cela, on a $f = 4\text{cm}$; $X_1 = 20\text{cm}$ et $X_2 = 5\text{cm}$.

Le détecteur sera donc placé à 5cm de l'optique collectrice .

5.5. Le détecteur :

Le détecteur utilisé dans notre réalisation est un composant actif, basé sur l'effet photoélectrique . Sa fonction est de traduire l'énergie du rayonnement reçu en une information électrique .

Notre détecteur est un phototransistor "FPT 100 " Si PIN en technique planar épitaxiale, il est constitué d'un boîtier avec une lentille frontale .

- Polarisation du Phototransistor :

Pour réaliser des temps de montée très faible, on a choisi le montage de la figure 5.4. où la base est polarisée par diviseur R_1-R_2 .

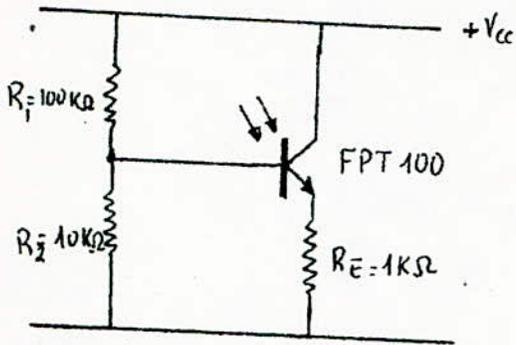


Fig. 5.4.

Dans ce montage on utilise comme élément sensible la photodiode base-collecteur, le transistor ne servant que d'adaptateur d'impédance

- Principales Caractéristiques du FPT 100.

- Tension de blocage V_{CE} : $V_{CE} = 30V$
- courant collecteur de saturation : $I_C = 25mA$.
- Courant Max. d'obscurité à $25^{\circ}C$: $I_D = 100nA$
à $V_{CE} = 5V$.
- courant Max quand toute la surface est éclairée : $I_L = 200\mu A$
- Longueur d'onde de pic : $\lambda_p = 800 \text{ nm}$.
- temps de réponse : $T_r = 2,8 \mu\text{sec}$.

- condition test :

• Eclaircement

$$E_e = 5 \text{ mW/cm}^2$$

• Tension (collecteur. Emetteur)

$$V_{CE} = 5V.$$

- Condition de saturation

$$V_{CE \text{ sat}} = 300 \text{ mV}$$

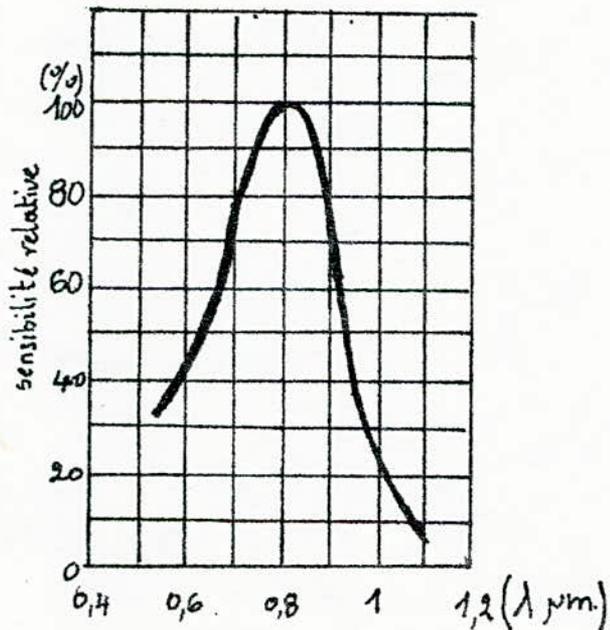
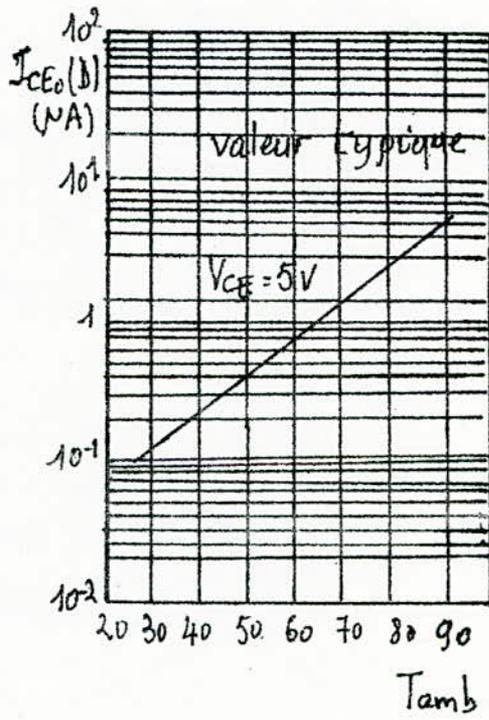
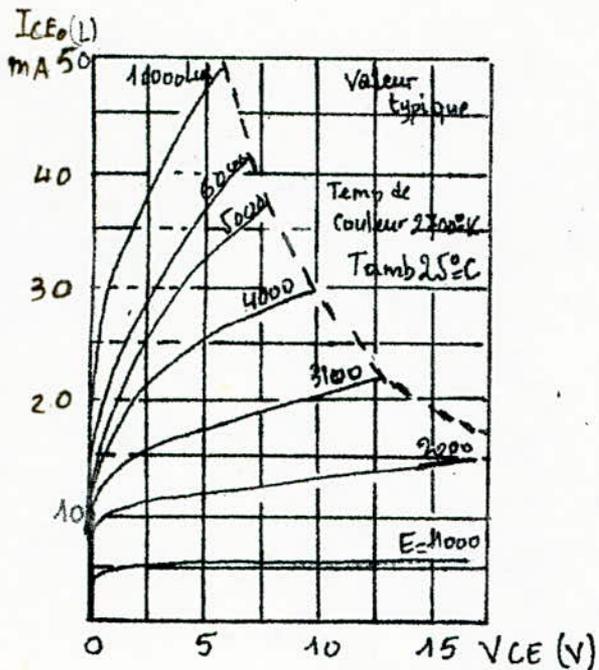
$$I_C = 500 \mu A$$

$$E_e = 20 \text{ mW/cm}^2$$

λ_p : Longueur d'onde de pic pour laquelle l'intensité de la radiance spectrale est maximale.

E_e : rapport du flux sur l'Aire illuminée.

Caractéristiques du phototransistor FPT 100



5.6. Chaîne électronique d'amplification et échantillonnage :

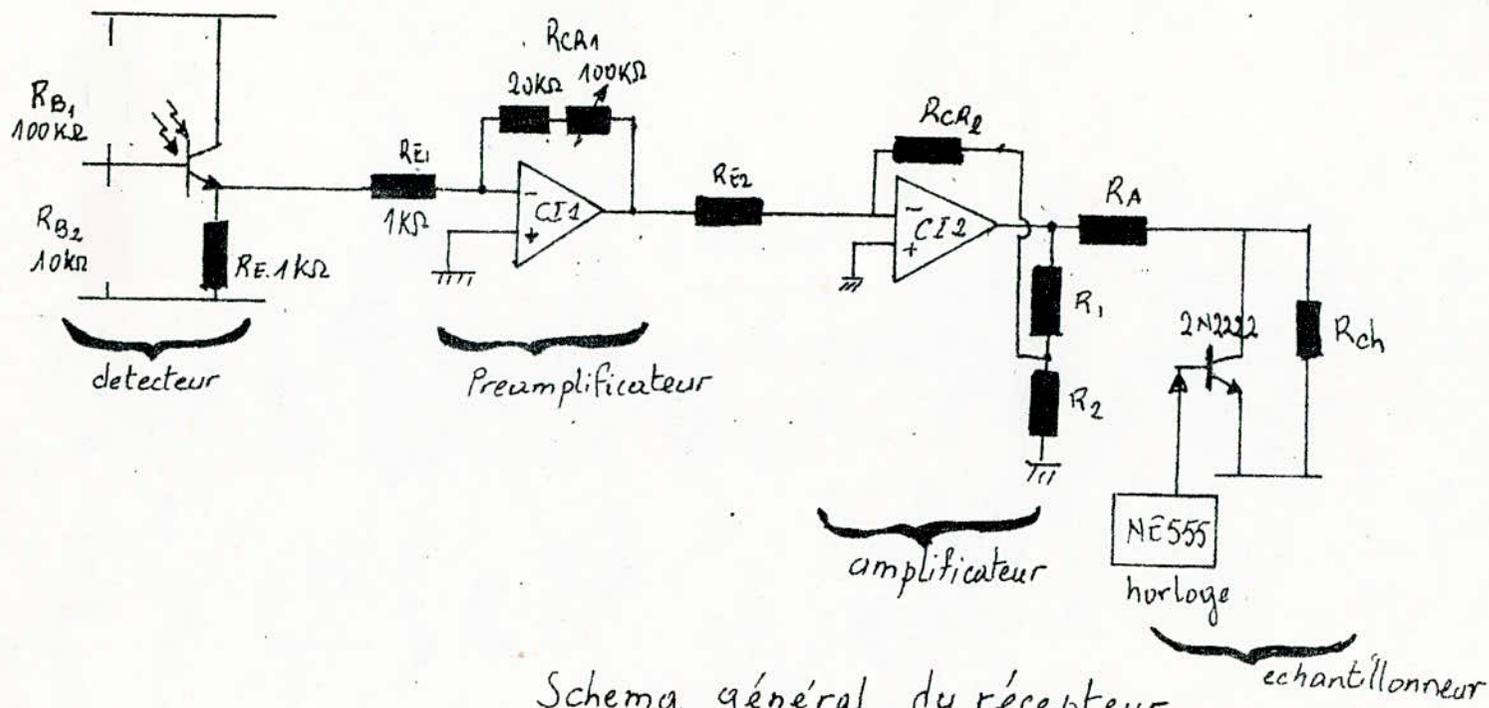
voir fig 5.5

-La chaîne électronique est constitué essentiellement :

- d'un détecteur : phototransistor F.P.T. 100.
- d'un préamplificateur.
- d'un amplificateur .
- et d'un échantillonneur .

5.6.1 Le préamplificateur .

Le signal électrique détecté étant faible, il faut donc l'amplifier pour l'amener à un niveau suffisant et le protéger des parasites extérieurs. On a donc besoin d'un préamplificateur permettant de coupler le capteur optoélectronique (phototransistor) à un amplificateur quelconque .



Schema général du récepteur

(fig 5.5.1)

Le montage du préamplificateur utilisant un amplificateur opérationnel (circuit intégré $\mu A 741$) caractérisé par :

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

Afin de faciliter l'installation du préamplificateur, on a relié le capteur à l'entrée inverseuse du circuit intégré par une résistance R_{E_1} de $1K\Omega$

Le $\mu A 741$ est monté en amplificateur inverseur avec une contre-réaction entre la sortie et l'entrée inverseuse .

La contre-réaction étant effectuée avec une résistance $R_{C R_1}$ de $20k\Omega$ en série avec un potentiomètre de $100K\Omega$

Le gain en tension du préamplificateur sera :

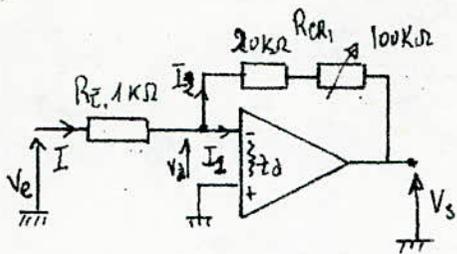
$$G_{V_1} = \frac{R_{C R_1}}{R_{E_1}}$$

Si la valeur de ce gain est très élevée, le préamplificateur peut aussi amplifier des bruits du milieu dans lequel il se trouve .

Dans ce cas, on doit réduire le gain en agissant sur $R_{C R_1}$

G_{V_1} est compris donc entre 20 et 120 .

- Calcul de l'impédance d'entrée



$$I = I_2 - I_1$$

$$(1) V_e - R_{E1}I_1 + Z_d I_1 = 0 \quad I_1 = \frac{R_{E1}I - V_e}{Z_d}$$

$$(2) V_e - R_{E1}I - R_{CR1}I_2 - V_s = 0$$

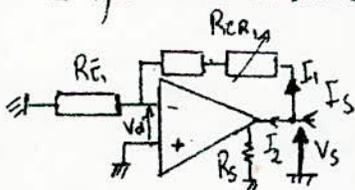
$$V_s = A_0 Z_d I_1$$

$$I_2 = \frac{V_e}{R_{CR1}} (1 - A_0) - \frac{R_{E1}}{R_{CR1}} I (1 - A_0)$$

$$I = \frac{V_e \left(\frac{1}{Z_d} + \frac{A_0 + 1}{R_{CR1}} \right)}{\frac{R_{E1}}{Z_d} + \frac{R_{E1}}{R_{CR1}} (A_0 + 1) - 1} \Rightarrow Z_e = \frac{V_e}{I} = \frac{\frac{R_{E1}}{Z_d} + \frac{R_{E1}}{R_{CR1}} (A_0 + 1) - 1}{\frac{1}{Z_d} + \frac{A_0 + 1}{R_{CR1}}}$$

avec $R_{E1} = 1k\Omega$
 $20k\Omega \leq R_{CR1} \leq 120k\Omega$
 $A_0 = 1000$
 $Z_d = 2M\Omega$ } $\Rightarrow Z_e \approx R_{E1} = 1k\Omega$

- Impédance de sortie :



$$I_s = I_1 + I_2$$

$$R_s I_2 = A_0 V_d (1)$$

$$V_s - V_d = R_{CR1} I_1 (2)$$

$$V_s = (R_{CR1} + R_{E1}) I_1$$

(1) et (2) donne $A_0 (V_s - R_{CR1} I_1) = R_s I_2$

$$I_2 = \frac{A_0 V_d}{R_s} = \frac{A_0}{R_s} (V_s - R_{CR1} I_1) = \frac{A_0}{R_s} V_s \left(1 - \frac{R_{CR1}}{R_{CR1} + R_{E1}} \right)$$

$$I_2 = A_0 \frac{V_s}{R_s} \left(\frac{R_{E1}}{R_{CR1} + R_{E1}} \right) ; I_1 = \frac{V_s}{R_{CR1} + R_{E1}}$$

$$\text{D'où } I_s = I_1 + I_2 = \frac{V_s}{R_C R_1 + R_{E1}} \left(\frac{A_0 R_{E1}}{R_s} + 1 \right) \approx \frac{V_s}{R_C R_1 + R_{E1}} A_0 \frac{R_{E1}}{R_s}$$

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{(R_C R_1 + R_{E1}) R_s}{A_0 \cdot R_{E1}} \approx G_{V1} \cdot \frac{R_s}{A_0} \quad G_{V1} = \frac{1}{\beta}$$

$$\boxed{Z_s = \frac{R_s}{\beta \cdot A_0}}$$

avec β = facteur de réaction
 A_0 gain de l'ampli en boucle ouverte.

avec $R_s \approx 1 \text{ k}\Omega \implies Z_s$ est comprise entre 20 et 120 Ω

5.6.2. L'amplificateur

L'amplificateur est réalisé par un amplificateur opérationnel (circuit intégré $\mu\text{A}741$) monté en amplificateur inverseur

$$\text{de gain : } G_{V2} = \frac{R_C R_2}{R_{E2}} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad G_{V2} \approx 150$$

- impédance d'entrée :

$$Z'_E \approx R_{E2} \quad Z'_E \approx 40 \text{ k}\Omega$$

- Impédance de sortie :

$$Z'_s = \frac{R_s G_{V2}}{A_0} \quad Z'_s \approx 700 \Omega$$

5.6.3 Circuit d'échantillonnage :

L'échantillonnage consiste à ne prendre en compte que de l'amplitude instantanée d'une grandeur analogique qu'à certains instants bien précis, répétés à une fréquence appelée "fréquence d'échantillonnage". Entre deux instants d'échantillonnage, on admet que la grandeur varie suffisamment peu pour qu'elle puisse être considérée comme constante. Les travaux de Shannon ont démontré que l'opération peut s'effectuer sans perte significative d'information dès lors que la fréquence d'échantillonnage est du moins égale à deux fois la fréquence la plus élevée contenue dans la grandeur à échantillonner.

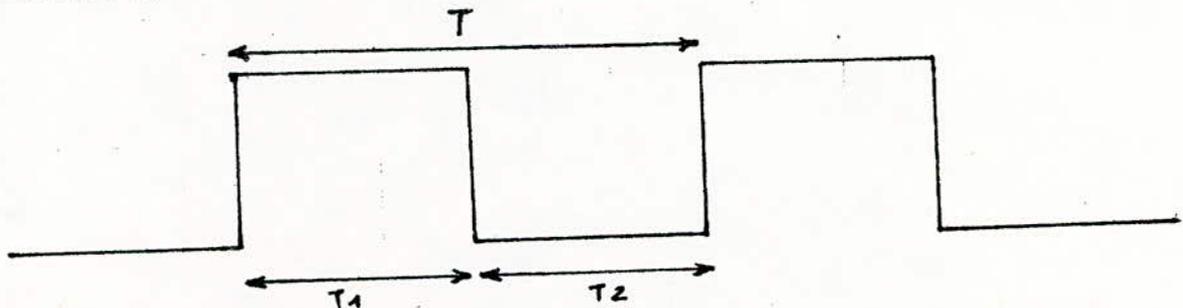
Le montage du circuit d'échantillonnage est composé d'un circuit intégré NE 55.5 utilisé comme horloge (fonctionnant en multivibrateur astable), et d'un transistor 2N2222 travaillant en commutation (régime bloqué = saturé).

Le schéma synoptique du NE 55.5 (voir fig 5.5.3) permet de comprendre son fonctionnement, il est doté de deux comparateurs dont le niveau de référence est respectivement égal aux tiers et aux deux tiers de la tension d'alimentation. Quand la tension sur la broche 2, c'est à dire l'entrée du deuxième comparateur est inférieure au tiers de la tension d'alimentation, le flip-flop fonctionne de telle sorte qu'à la sortie on enregistre un niveau "haut", dans cette situation le TR 1 est bloqué et il en est de même que pour l'ensemble du circuit. Lorsque la tension sur la broche 6 atteint la valeur de seuil, qui est généralement égale au deux tiers de la tension d'alimentation, le flip-flop change d'état et la sortie se trouve au niveau "bas" simultanément TR1 passe à l'état de saturation et le condensateur connecté à la borne 7 se décharge rapidement vers la masse.

Pour faire fonctionner le multivibrateur astable, le condensateur sera connecté entre la broche 2 et la masse, les broches 2 et 6 reliées ensemble, et entre 6 et 7 sera inséré une autre résistance R_A ; au début le condensateur est déchargé et ainsi, le circuit s'amorce, quand ensuite la tension aux bornes du condensateur atteint la valeur de seuil, le mécanisme de décharge se déclenche jusqu'à ce que la tension aux bornes du condensateur devienne inférieure à la valeur d'amorçage. A cet instant, le cycle se recommence à la sortie on dispose d'un signal carré. La broche 4 sert de "R E S E T".

La fréquence des impulsions est déterminée par les temps de charge et de décharge du condensateur C, c'est à dire par la constante du circuit RC constitué par: R_A ; R_B et C -

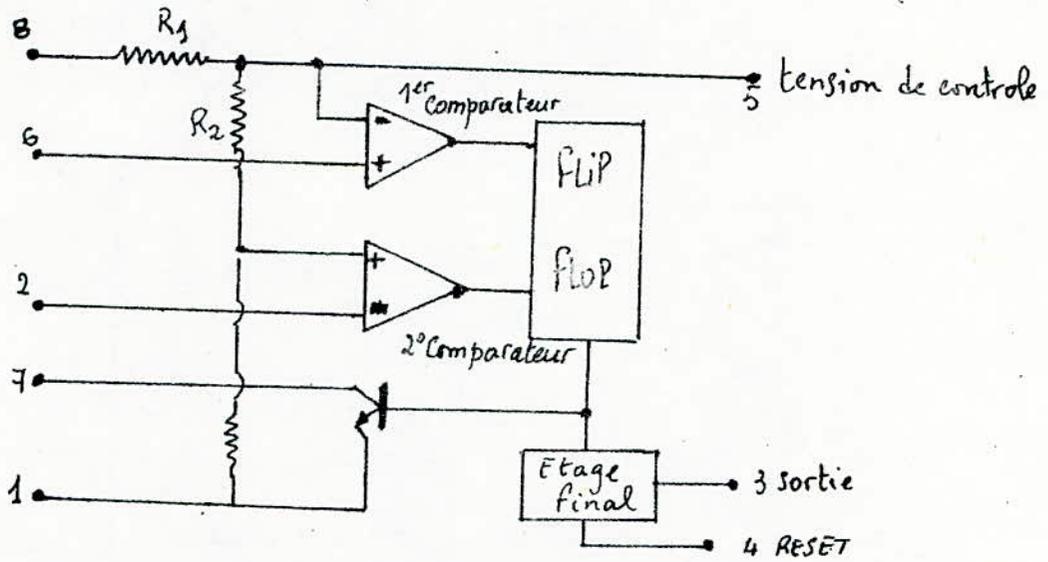
D'où à la sortie du circuit intégré (broche 3), le signal est de la forme suivante :



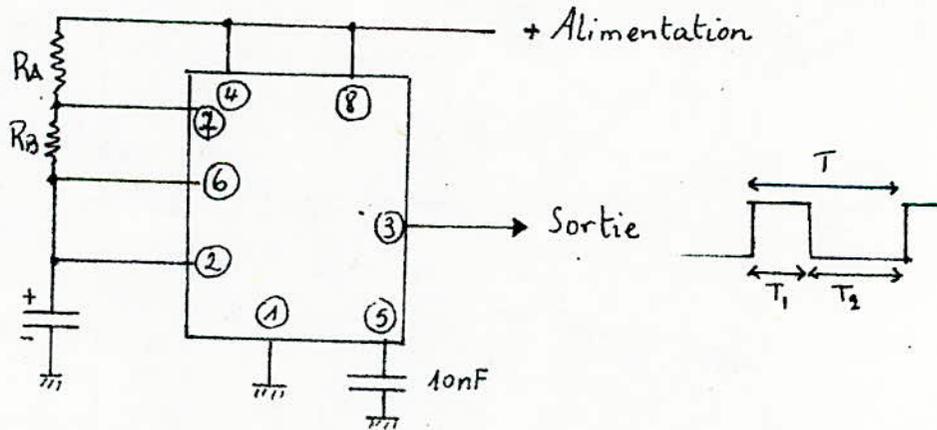
avec: $T_1 = 1,1 R_A C$

et $T = T_1 + T_2 = 0,693 (R_A + R_B) C.$

Schema Synoptique du NE 555



Brochage du NE 555



$$T_1 = 1.1 R_A C$$

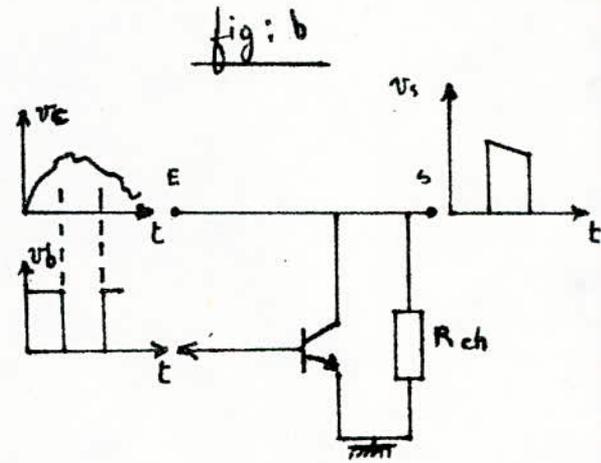
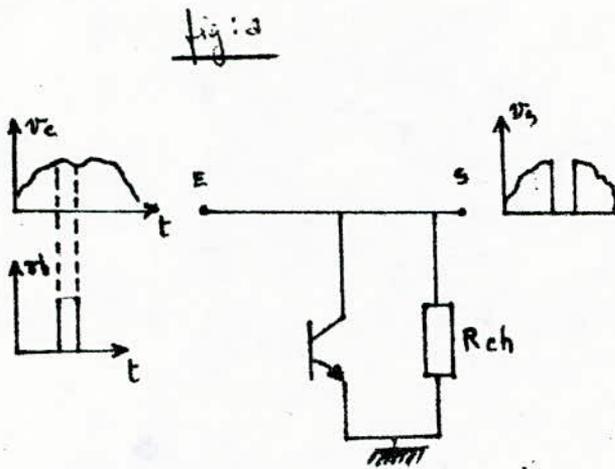
$$T_2 = 0.693 (R_A + R_B) C$$

Dans notre montage, le signal de sortie du NE 555 est appliqué à la base d'un transistor 2N2222 travaillant en commutation, et le signal de sortie de l'amplificateur est appliqué au collecteur du transistor.

Pendant le temps T_1 , le courant de base du transistor est maximum, ainsi que le courant collecteur ($I_{c \text{ sat}}$), alors le transistor est saturé, d'où la tension collecteur-émetteur est pratiquement nulle donc le signal appliqué au collecteur est court circuité à la masse; on est alors au niveau zéro (tension de sortie du récepteur) fig a.

Pendant le temps T_2 le courant de base est nul, le transistor est alors bloqué la tension collecteur-émetteur est égale à la tension de sortie de l'amplificateur (fig b)...

ainsi le signal est échantillonné



Les temps T_1 et T_2 sont déterminés par les fréquences d'échantillonnage en se limitant au théorème de Shannon.

En choisissant : $T_1 = T_2 = \frac{T}{2}$

avec $T = \Delta t = 280 \mu\text{sec}$ (voir § 5.3)

$$T = 0,693 (R_A + R_B) C$$

$$\frac{T}{2} = 1,1 R_A C$$

d'où : $R_B = 2,1 R_A$

avec $C = 1 \mu\text{F}$ $\implies R_A = 127 \Omega$ et $R_B \approx 260 \Omega$

5.7. Bruits des détecteurs de rayonnement

Le circuit de sortie délivre, outre le signal utile S, un bruit B, fonction aléatoire du temps lequel ne s'annule pas en générale lorsque le rayonnement à détecter s'annule .

Parmi ces bruits on peut citer :

- bruit de rayonnement : c'est le seul auquel il est théoriquement impossible de porter remède, il est dû aux fluctuations érratiques, image du rythme aléatoire d'arrivée des photons sur la surface sensible .

- bruit interne qui n'est d'autre que la f.e.m. de bruit présente dans le circuit de toute résistance, et due à l'agitation thermique des électrons de conduction .

- bruit de porteurs : appelé aussi le bruit de génération -recombinaison, il a pour origine des fluctuations du nombre de porteurs (électrons et trous) dans un semi-conducteur, et leur durée de vie .

5.8. Evaluation du signal sur bruit.

La résolution du système détecteur est caractérisée par le bruit ramené à son équivalent en énergie exprimée en NEP qui est lié à la qualité du détecteur et de l'électronique associé .

On suppose que la surface visée par le détecteur ait une radiance $R(\lambda, T) \text{ W/cm}^2\text{-sr}$, le signal de sortie est : $s = A_s \cdot \Omega \cdot \tau \cdot R(\lambda, T)$

avec A_s : Aire de la pupille d'entrée

τ : Facteur de transmission

Ω : ouverture angulaire du détecteur

- ouverture angulaire

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta) = \pi\theta^2 = \frac{d}{f^2} = \frac{\text{aire du détecteur}}{\text{distance focal.}}$$

$$d = 0,04 \text{ cm}^2 \quad \Omega = \frac{0,04}{25} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

$$f = 5 \text{ cm}$$

- Aire de la pupille

$$A_s = 0,125 \text{ cm}^2 \quad (\text{avec diamètre de la pupille } 0,4 \text{ cm}).$$

- Facteur de transmission : $\tau \approx 0,9$

$$\text{d'où : } s = 0,125 \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot R[\lambda, T]$$

$$s = 1,86 \times 10^{-4} \cdot R(\lambda, T)$$

Si l'on considère la source comme un corps noir, parcouru par un courant de 100 mA. ayant donc une température de 340° K, d'après la loi de Stéphan, la radiance est :

$$R = \sigma T^4 = 5,73 \cdot 10^{-12} [340]^2 \approx 66,3 \cdot 10^{-8} \text{ W/ster. cm}^2$$

En remplaçant R par sa valeur dans $\epsilon = 1,6 \cdot 10^{-4} R(\lambda, T)$

$$\text{il vient } S = 0,106 \cdot 10^{-8} \text{ W}$$

La puissance équivalente au bruit s'écrit :

$$NEP = B = \sqrt{A_d \cdot \Delta f} / D^*$$

A_d : Aire utile de l'élément sensible .

$$A_d = 42,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

D^* : détectivité spécifique

$$D^* = 6,3 \cdot 10^{12} \frac{\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$$

$$\Delta f = 10^4 \text{ Hz}$$

$$NEP = 3,28 \cdot 10^{-12}$$

d'où le rapport signal / Bruit

$$S/B = \frac{0,186 \cdot 10^{-8}}{3,28 \cdot 10^{-12}}$$

$$S/B = 567.$$

CHAPITRE 6 :

MESURES ET INTERPRETATIONS.

INTRODUCTION :

Notre étude avait pour but de "concevoir un radiomètre à balayage de laboratoire " pour la télédétection proche infrarouge, afin de mener au bout la phase d'acquisition d'information à distance d'une surface à étudier .

Ce radiomètre devant disposer d'un système de balayage mécanique, faute de moyens utiles (moteur convenable, roulements...) et du délai d'envoi, la réalisation de système n'a pu être concrétisé jusqu'à sa fin . Pour notre part, on a réalisé une chaîne de mesure pour la réflectivité travaillant dans la bande $0,8 - 1,1 \mu m$.

De ce fait, l'utilisation d'une source passive s'est avérée nécessaire pour une bonne utilisation de cette chaîne .

6.1. UTILISATION D'UNE SOURCE PASSIVE A L'EMISSION :

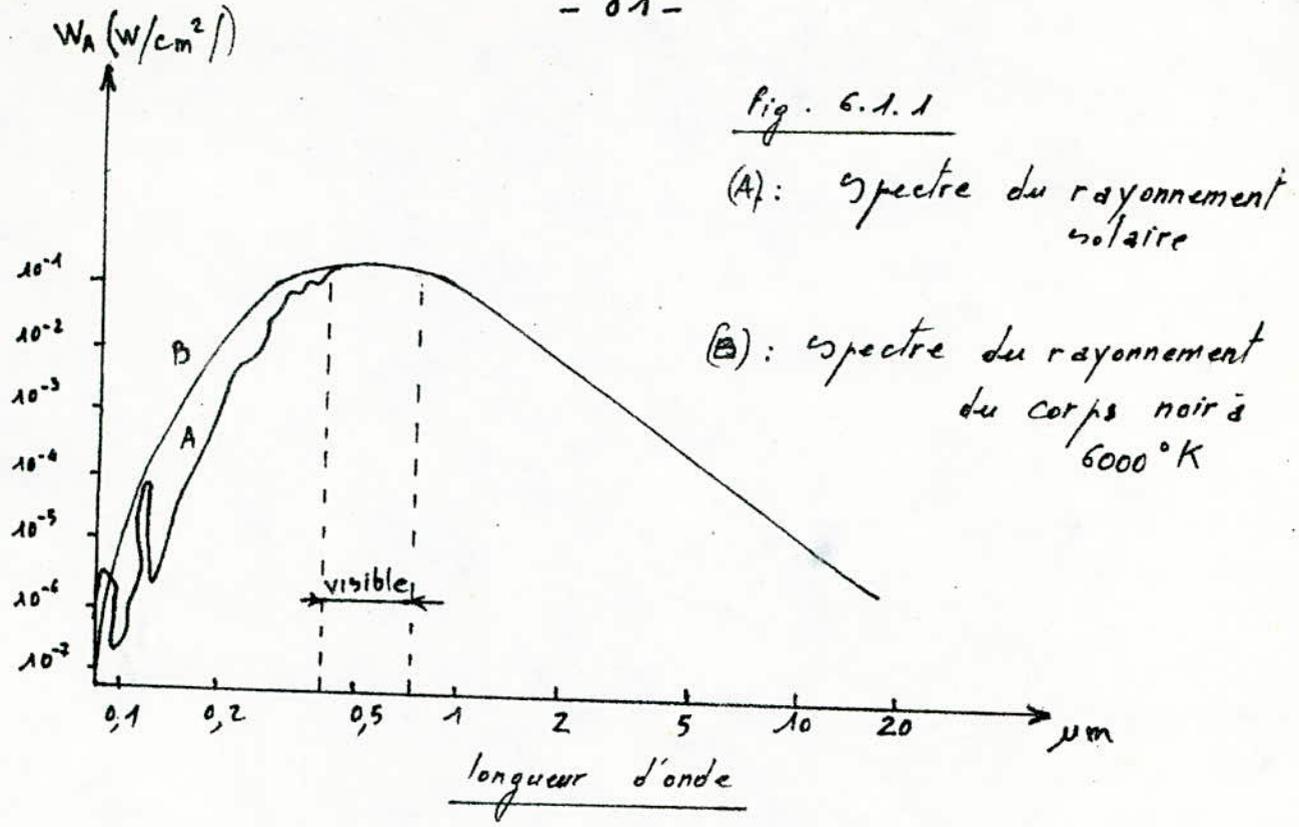
L'opération de télédétection consiste à capter le rayonnement réfléchi par le milieu à étudier, éclairé au préalable par une source naturelle (passive) ou artificielle (active).

Nous avons à utiliser dans notre cas, comme source passive le soleil, aussi bien pour sa gratuité, sa grande intensité (comparable à un corps noir à $6000^{\circ} K$), que pour sa disponibilité et son spectre très vaste...

6.1.1. 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 (voir fig 6.1.1.) mais on peut faire l'hypothèse que le soleil rayonne comme un corps noir à $6000^{\circ} K$, dans le spectre complet.

On utilisera cette propriété pour employer le soleil comme source passive dans notre étude.



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

6.1.2. BILAN ENERGETIQUE SOL ATMOSPHERE :

L'énergie rayonnée par le soleil parcourt une distance de $1,5 \cdot 10^8$ Km avec une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s. Le flux arrivant au sol est de 0,14 W par cm². Cette énergie est répartie dans le spectre électromagnétique entier, la moitié dans le visible. La terre elle même n'est pas réfléchissante, et la proportion d'énergie moyenne réfléchi est entre 5% et 10%. Le taux d'absorption dépend de la structure.

Il est à noter que le signal enregistré par le capteur ne correspond pas à l'énergie émise, car l'atmosphère absorbe et émet des rayonnements infrarouges.

Les bandes qui permettent de définir les "fenêtres de transparence" ou "fenêtres atmosphériques" figurent dans la figure 1.2 du CH.1. Parmi ces "fenêtres de transparence" nous citons :

- Vapeur d'eau [H₂O] : les maxinas d'absorption se localisent à 1,4 μm; 1,9 μm 2,7 μm; 6,3 μm et à partir de 25 μm.
- gaz carbonique [CO₂] : les maxinas d'absorption se situent à 4,3 μm et 15 μm
- Ozone [O₃] : en dehors de l'ultraviolet; la bande principale d'absorption et centrée sur 9,6 μm.

6.2. MESURE DE LA REFLECTIVITE DES SURFACES NATURELLES :

Notre chaîne de mesure dispose d'un récepteur pour le proche infrarouge (0,8 μm - 1,4 μm). Cette gamme est utilisée pour l'enregistrement de la réflectivité des objets terrestres.

Il est nullement inutile de rappeler la définition de la réflectivité.

6.2.1. REFLECTIVITE DES SURFACES NATURELLES .

- Reflectivité :

Pour définir la réflectivité, on doit passer par les différents types de réflexions de surface .

- Deux sortes de réflexions :

.réflexion spéculaire (directionnelle): toute la puissance incidente est réémise dans une direction privilégiée (θ, φ) (surface lisse) .

.réflexion diffuse (bidirectionnelle) : toute la puissance incidente est réémise dans toutes les directions . Elle est diffusée sur tout l'hémisphère supérieur, (surfaces rugueuses).

.Reflectivité directionnelle :

Elle est définie par :

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

Si L_{λ} est la luminance spectrale produite par la scène

On a :

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

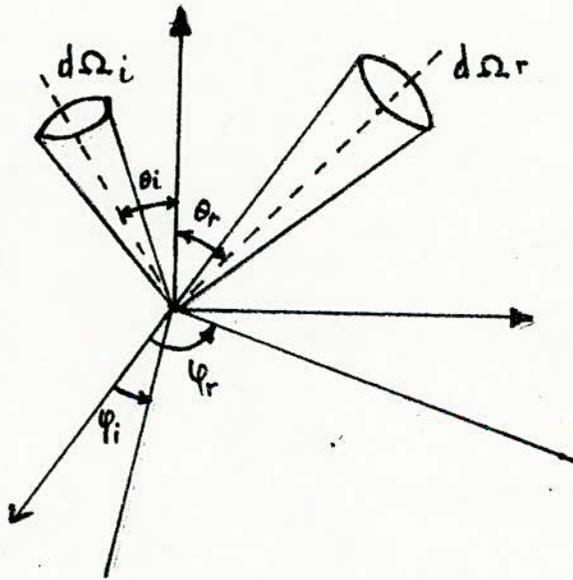
- Réflectivité bidirectionnelle :

Soit $L_r(\theta_r; \varphi_r)$: La luminance de la surface réfléchie lorsqu'elle est observée dans la direction (θ_r, φ_r) sous l'angle solide $d\Omega$ et $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ l'éclairement provenant de la source dans la direction (θ_i, φ_i) sous l'angle solide $d\Omega_i$

La réflectivité bidirectionnelle est définie par :

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

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



- . L'indicatrice de réflexion

On rappelle que l'indicatrice de réflexion est la représentation en coordonnées polaires de la fonction r_b pour les angles θ_i, φ_i et φ données . En pratique on mesure le facteur de réflectivité avec un radiomètre .

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

6.3 - MESURES .

Pour mettre en application ^{le} radiomètre (récepteur), on doit vérifier le caractère réflectivité de certaines surfaces éclairées par une source passive (soleil).

Nos mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

le radiomètre sera placé à 1,10 mètre du sol sur un pivot pouvant décrire l'hémisphère supérieure et dont la base est au ras du sol, le radiomètre est ainsi placé de telle façon qu'il vise d'une façon convenable la surface à étudier.

Pour simplifier les mesures, nous considérons des positions telles que l'angle azimutal $\psi = 0$, de cette façon, le système radiomètre pourra décrire l'axe de rotation; et nous pouvons faire varier l'angle de réflectivité de la surface et enregistrer le signal de sortie du récepteur .

6.3.1. Vérification des caractères de certaines surfaces .

a/ Caractère du signal de sortie .

D'après le principe de la conservation d'énergie en radiométrie , on a la relation :

$$\rho_{\lambda}(\theta, \varphi) + \tau_{\lambda}(\theta, \varphi) + \epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) = 1$$

ρ = facteur de puissance réfléchi
 τ = facteur de puissance de transmission
 ϵ = facteur de puissance d'émissivité

Nous supposons dans notre cas que les surfaces à étudier sont des corps opaques :

$$\tau = 0 \quad \rho + \epsilon = 1 .$$

Le signal à la sortie est proportionnel à la radiance :

donc de la forme : $S = K R$ avec $R = \sigma \epsilon T^4$
 $\epsilon = 1 - \rho \Rightarrow S = K \sigma (1 - \rho) T^4$

La grandeur R qui est la radiance dépend de :

- l'angle de réflectivité de la surface
- l'état de la nature du milieu étudié
- longueur d'onde ou le domaine spectral utilisé
- température
- réflectivité (émissivité)

On remarque que le signal enregistré est proportionnel à la réflectivité. L'analyse du signal enregistré en fonction de ces paramètres, nous permet de connaître leur influence sur le milieu étudié. Comme le facteur de proportionnalité K n'est pas connu, du fait de l'indisponibilité des corps noirs calibrés pour l'étalonnage de l'appareil, nous serons amenés à normaliser les résultats obtenus.

b/ Surfaces à étudier

Nous avons utilisé comme surface à étudier :

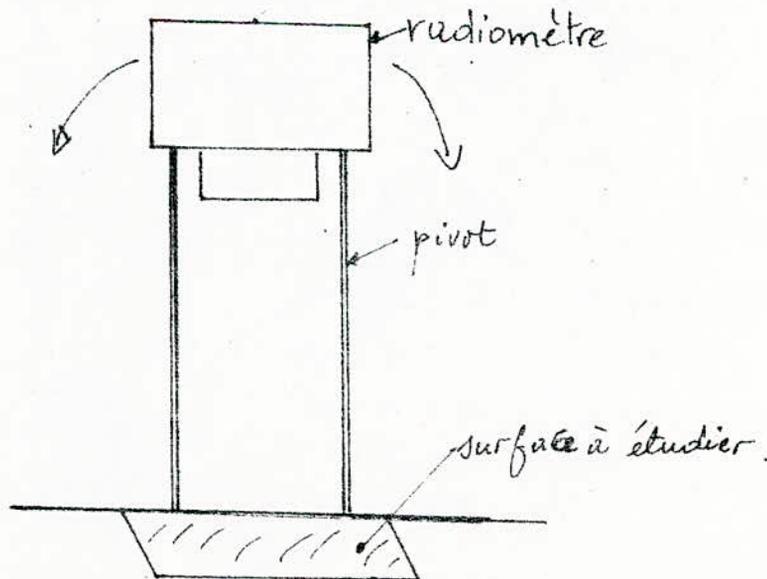
- la route goudronnée
- le gazon ombragé et le gazon ensoleillé.
- la terre sèche (Able)

Ces surfaces sont éclairées par le soleil, on place le radiomètre en face de la surface visée et on mesure le signal de sortie S en fonction de l'angle de réflexion de la surface.

Nous avons effectué des mesures pour chacune des surfaces pendant différentes heures de la journée.

c/ Présentation du site

La position du soleil est importante dans nos mesures, nous avons effectué des mesures en plaçant chaque fois le radiomètre dans le plan d'incidence du soleil; pour cela on est amené à chaque fois de changer de position pour être dans des conditions de mesures plus ou moins idéal.



Dans les courbes qui suivent nous indiquons les conditions de la mesure et l'heure.

6.3.2 - Interprétation des résultats

- Route goudronnée : fig = 6.3.(a) et fig : 6.3.(b)

Les courbes de la figure 6.3.(a) ont été tracé pendant différentes heures de la même journée, et celle de la figure 6.3.(b) elle a été tracé pendant une journée différente.

Ces courbes présentent de nombreux pics qui reflètent les irrégularités de la route (goudron non lisse et présence du gravier). Ainsi, le signal n'étant pas régulier, on ne peut rien dire sur le caractère de la surface. Mais les seuls remarques qu'on peut faire, c'est que d'un moment à l'autre le signal change de forme cela est dû d'une part à la position du soleil au ciel et d'autre part au variation de la température pendant les différents moments de la journée, ainsi que des perturbations atmosphériques (vent pendant les mesures) .

La différences entre les courbes de la figure 6.3 (a) et 6.3 (b) sont aux variations de la température qui a chuté pendant la deuxième journée (fig 6.3.(b), de même que le ciel est plus nuageux, et intensité du vent plus élevée...

- Gazon ensoleillé et ombragé .fig 6.3 (c) et fig 6.3 (d).

De même que pour la route goudronnée, les mesures ont été effectuées pendant deux journées différentes .

La courbe en trait fort représente la réponse du gazon ensoleillé et celles en tiret et en pointillée représentent la réponse du gazon ombragé (fig 6.3 (c).

On remarque dans ces deux cas que les courbes sont non uniformes (les surfaces ne sont pas lambertiennes).

Les différences entre les courbes sont aussi dues au décalage horaire et des perturbations atmosphériques (vent, variations de températures...).

- La terre (sable) : fig 6.3 (e) et fig 6.3 (f)

De même que précédemment, les mesures ont été effectuées pendant deux journées différentes .

En considérant chaque courbe à part, on remarque que le signal normalisé est compris entre 0,8 et 1, donc plus ou moins uniforme, d'où vérification du caractère lambertien de la terre (sable).

Certaines anomalies apparaissent dans la fig 6.3 (f), elle sont dues au décalage horaire et aux perturbations atmosphériques (vent, variations de température...).

6.4. Applications :

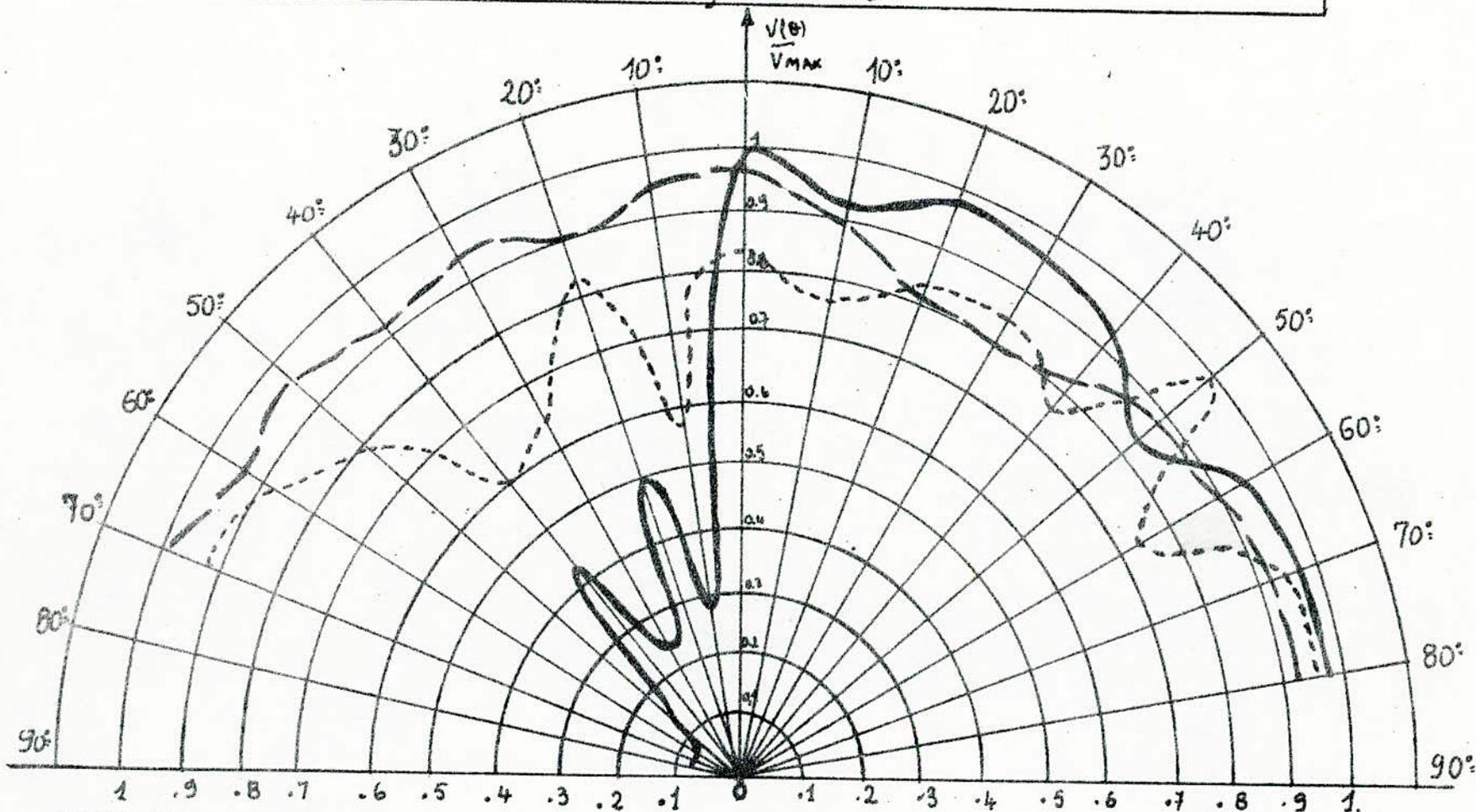
Vu son domaine étendu d'applications, la télédétection sert d'outil à la reconnaissance à distance des objets et des milieux, d'où elle connaît un grand essor.

Parmi ces applications on peut citer :

- La géologie et la prospection des ressources minérales (d'où on peut vérifier des réponses des différents types de surface),
- l'hydrologie,
- l'océanographie,
- la cartographie,
- l'observation du cosmos,
- la thermographie, etc...



FIG. 6.3(a). COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE DE RÉFLECTION
route goudronnée.



conditions de la mesure

Date : Dim. 10.01.82

— heure : 11^h45' - 12^h
température : 20°C
ciel ensoleillé

conditions de la mesure

Date Dim : 10.01.82

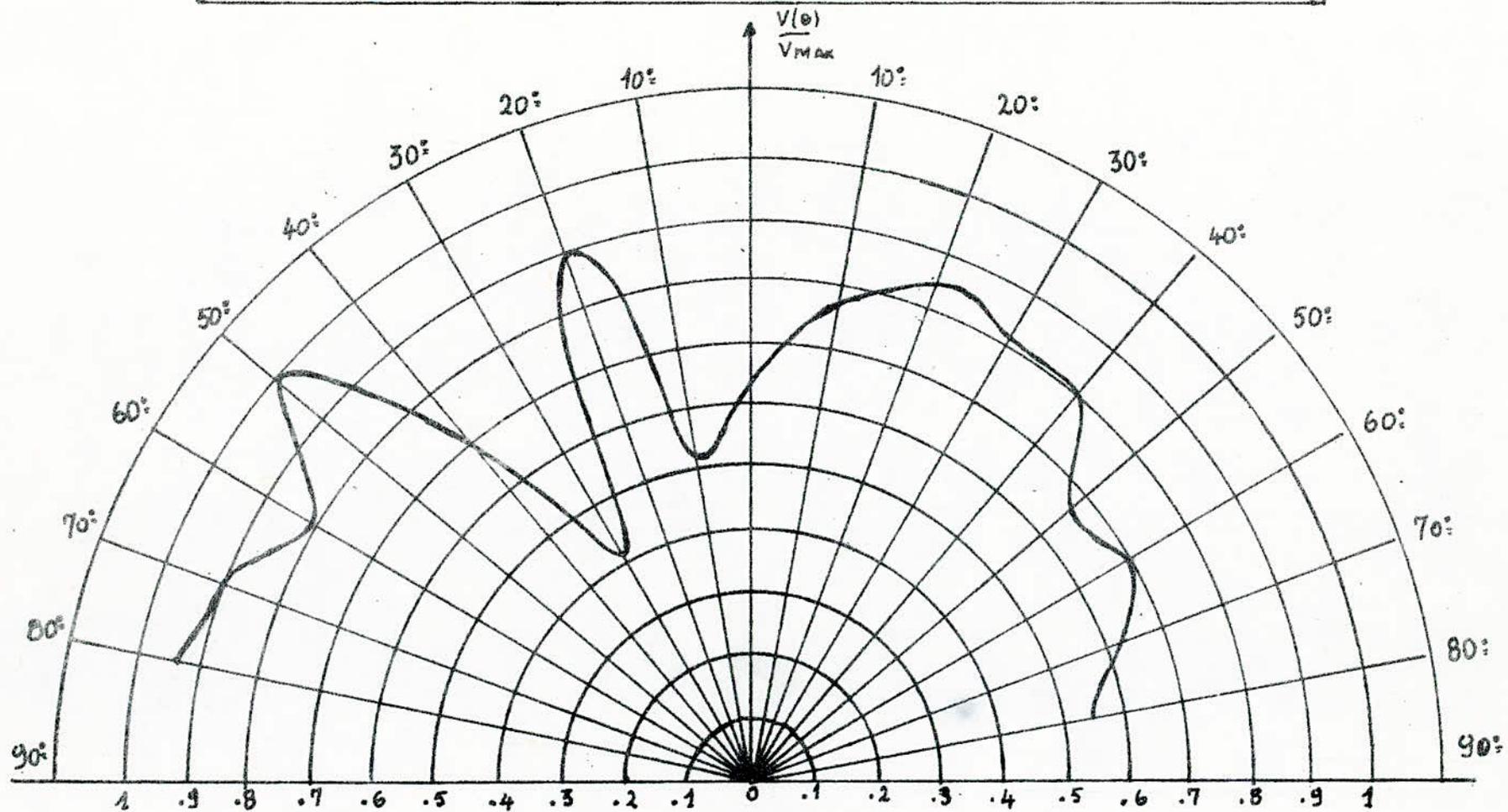
— heure : 14^h - 14^h15'
température : 18°C
ciel peu couvert
vent faible

conditions de la mesure

Date Dim : 10.01.82

--- heure : 16^h - 16^h15'
température < 18°C
ciel couvert
vent faible.

FIG: 6.3 (b) : COURBE NORMALISÉE DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE DE REFLEXION
Route goudronnée



conditions de la mesure

Date: Lundi 11.01.82

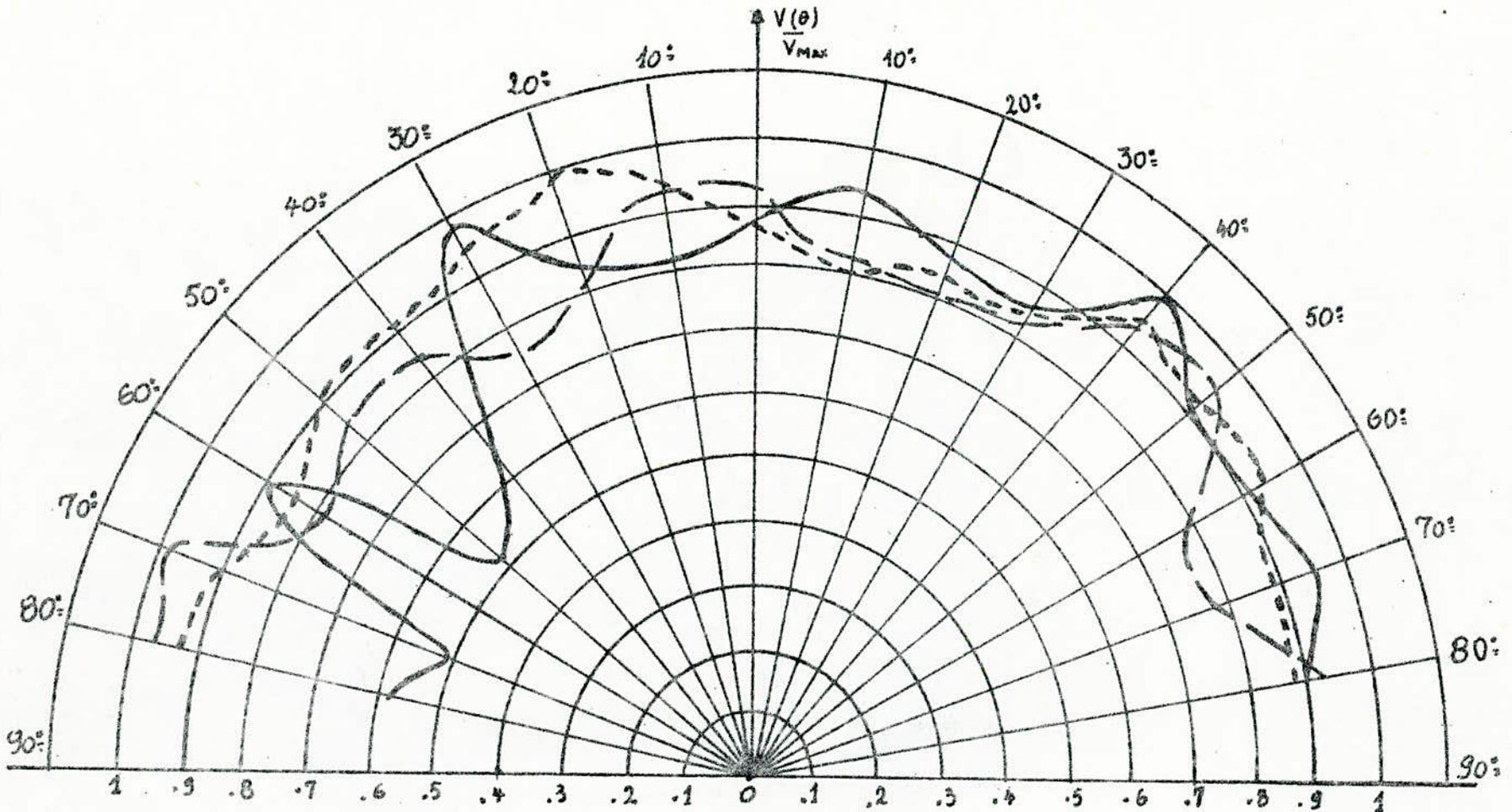
heure : 9^h30 - 9^h45

température : 15° C

ciel couvert

VENT FAIBLE

FIG. 3 (C) : COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE DE REFLEXION, gazon ensoleillé - gazon ombragé.

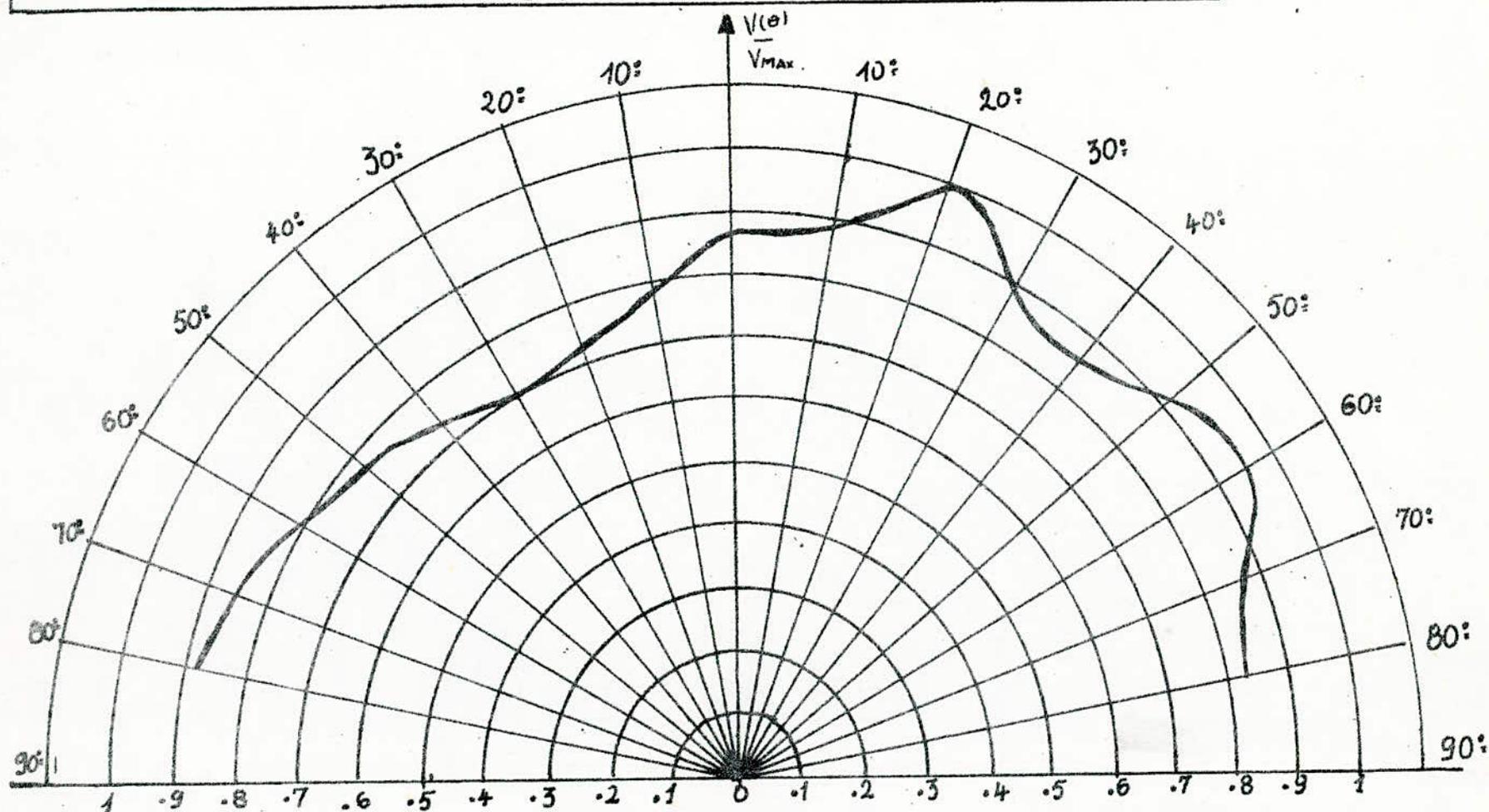


condition de la mesure :
 (gazon ensoleillé)
 Date : Dim. 10.04.82
 ——— heure : 12^h 12^h15
 hauteur du gazon : 6cm.
 température : 20°C
 ciel ensoleillé

conditions de la mesure
 (gazon ombragé)
 Date : Dim. 10.01.82
 ——— heure 14^h15' - 14^h30'
 température : 18°C
 ciel peu couvert
 vent faible

conditions de la mesure
 (gazon ombragé)
 Date : Dim. 10.01.82
 - - - - - heure : 16^h20 - 16^h35
 température < 18°C
 ciel couvert
 vent faible.

Fig: 6.3(d) Courbe normalisée du signal de sortie en fonction de l'angle de reflexion gazon.



conditions de la mesure

Date : lundi 11.01.82

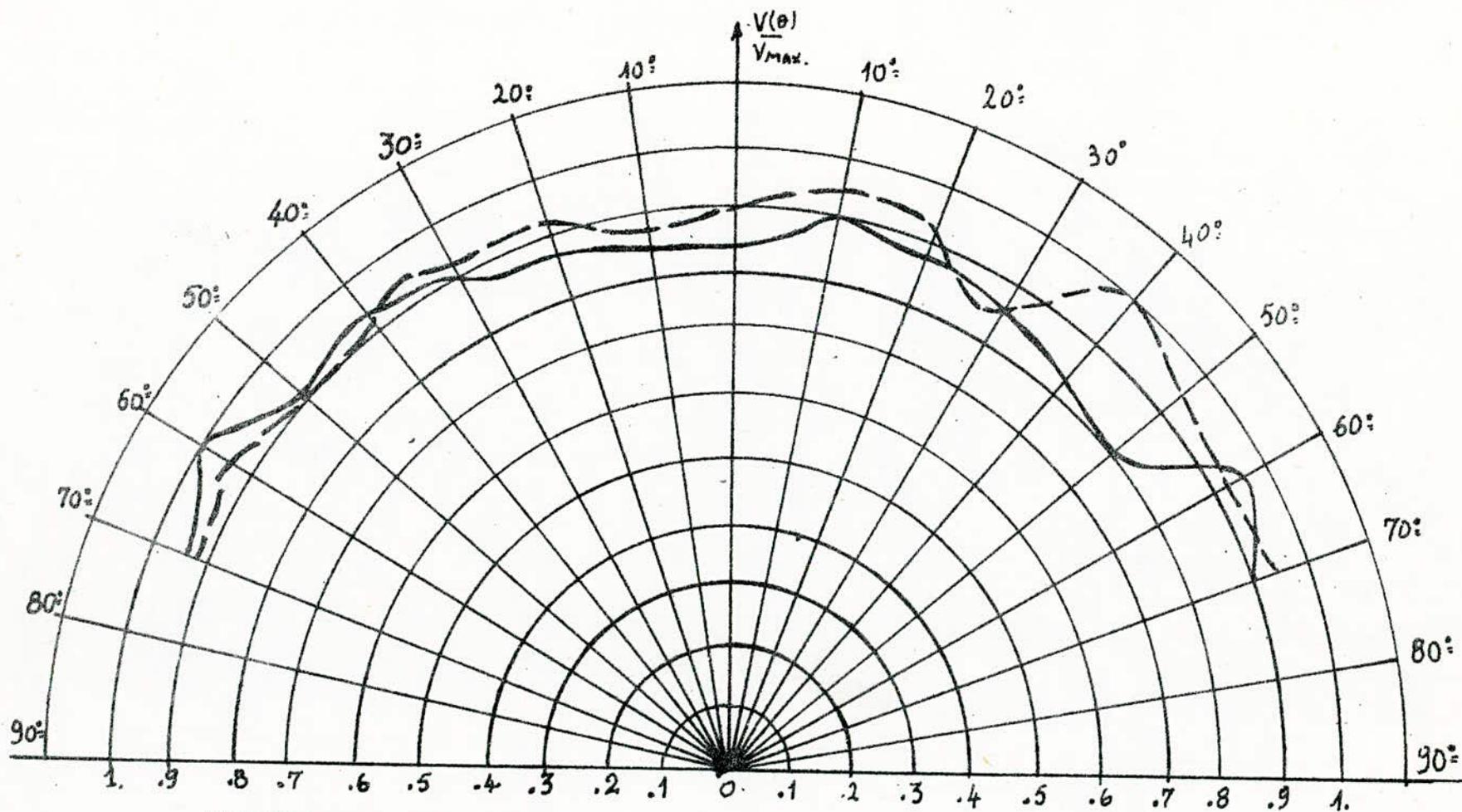
heure : 9^h50 - 10^h05

température : 15°C

ciel couvert

vent faible.

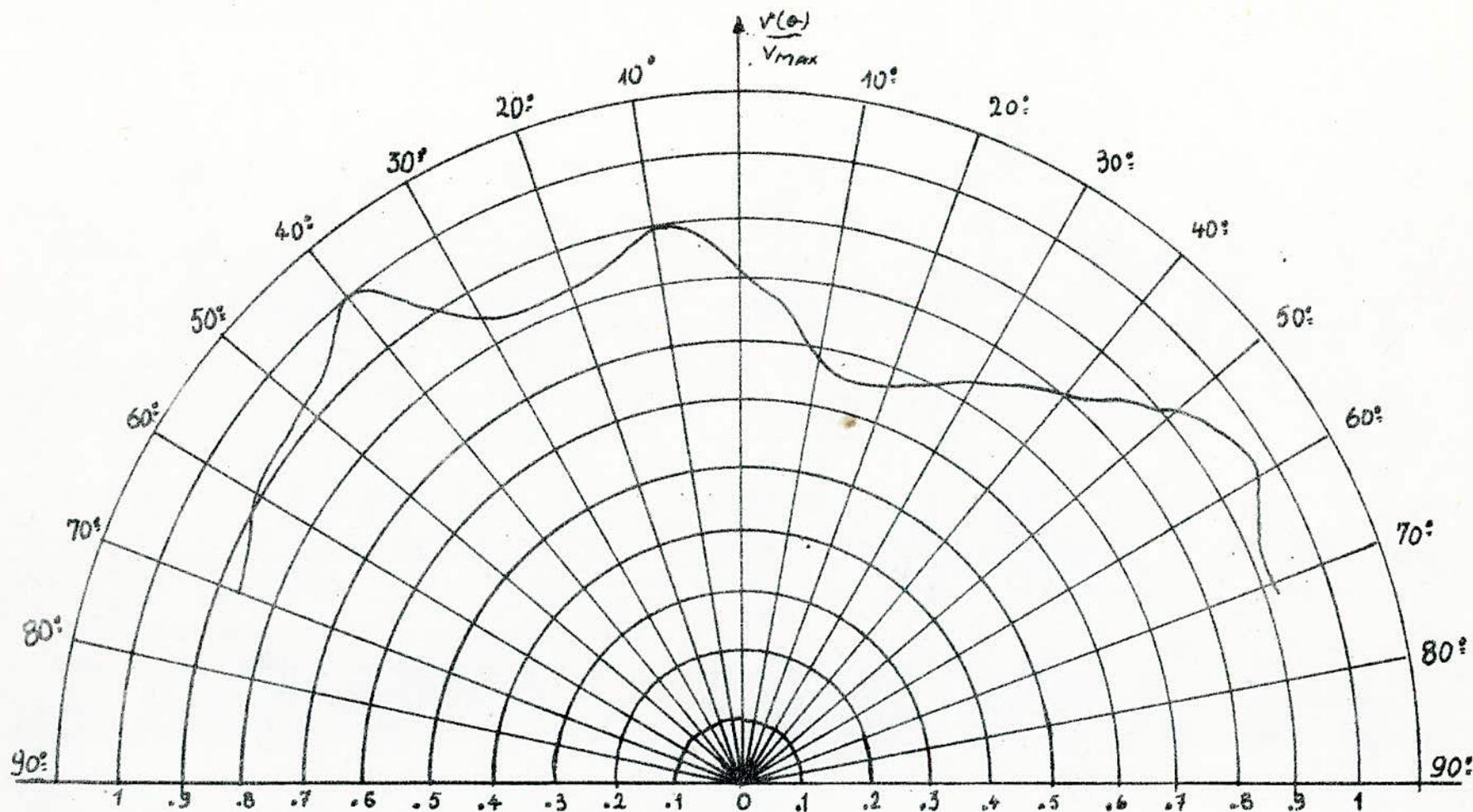
FIG. 6.3.(e) COURBES NORMALISÉES DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION DE L'ANGLE DE REFLEXION
TERRE (SABLE)



conditions de la mesure
 Date: Dim. 10.01.82
 — heures: 12^h30 - 13^h45
 température: 20°C
 ciel ensoleillé

conditions de la mesure
 Date, Dim 10.01.82
 — heure: 14^h35 - 14^h50'
 température 18°C
 ciel peu couvert
 vent faible.

FIG. 6.3(f). COURBE NORMALISÉE DU SIGNAL DE SORTIE EN FONCTION de l'angle de réflexion
TERRE (Sable)



Conditions de la mesure

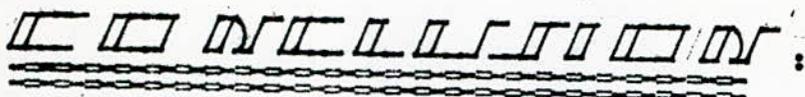
Date lundi: 11.01.82

heure: 10^h15' - 10^h30'

température 15°C

ciel couvert

vent faible.



Le but de notre travail était l'étude et la réalisation d'un radiomètre à balayage de laboratoire pour la télédétection proche infra-rouge.

Cela nous a fallu de toucher à plusieurs disciplines, telles que, la radiométrie et quelques types de radiomètres, l'étude du rayonnement électromagnétique, l'optique, l'électronique générale, ainsi que certaines notions de base pour la télédétection.

Par ce travail on a pu mettre au point, les différents problèmes qui se posent pour la réalisation d'un radiomètre à balayage mécanique, qu'on pourra l'améliorer au mieux en utilisant deux détecteurs disposés d'une façon symétrique par rapport à un miroir de balayage réfléchissant sur ses deux faces !!!!!

Faute de moyen et de délai d'envoi notre voeu de réalisation n'a pu être concrétisé à fin.

Pendant, nous avons utilisé seulement notre récepteur pour mesurer la réflectivité des différentes surfaces pendant des heures différentes de la journée.

En comparant les indicatrices de réflexion, il apparaît des différences entre les tracés. Ces différences sont dues aux décallages horaires, aux variations de températures, ainsi que des perturbations atmosphériques.

Ces résultats nous permettent alors d'établir un dictionnaire d'indicatrices de réflexions pour un classement zonal selon l'état de surface des régions analysées.

= BIBLIOGRAPHIE =

- ARMAND HADNI - Elément d'optique, optique géométrique. 1971.
- Agence Spatiale Européenne, European Space Agency (E S A)
Introduction to METEOSAT SYSTEM. Décembre 1978.
- CNES (Centre National d'études spatiales)
SPOT - Système de télédétection par satellite .
- CNES - ING - cartographie Spatiale de la terre - cours de technologie spatiale . 1979 .
- J.L.Monge - L.PON TIER - F.SIROU. Le radiomètre ARIES. Octobre 1978
- A. MARECHAL - G. COURTE - SPACE OPTIMS. Optique spatiale. 1974.
- MATRA - Instrumentation et observation de la terre.
- MADANI NAIDJAF —Thèse de fin d'études . Chaine de mesure de la réflectivité pour la télédétection infra-rouge; FEV 81.