

T H E S E

PRÉSENTÉE A L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS - GRIGNON

pour l'obtention du Doctorat de 3ème Cycle

"PÉDOLOGIE ET AMÉNAGEMENT DES SOLS"

CONTRIBUTION A L'UTILISATION DES MICRO - ONDES
DANS
L'ÉTUDE DES SOLS

par

Madame Christine ROUX épouse KING

Ingénieur Agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

Soutenue le 23 Mars 1979 devant la Commission d'examen

MM. BOCQUIER, Président

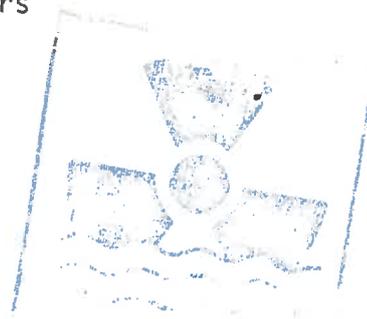
BOULAIN

PEYRE

GIRARD

WEILL

} Examineurs



AVANT - PROPOS

Qu'il me soit permis de remercier ici tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leur présence, leur compétence, leur soutien, leurs conseils :

- M. BOCQUIER, Maître de Conférences au laboratoire de Pédologie de l'Université de Paris VII, qui a bien voulu s'intéresser à mon travail et m'a fait le grand honneur d'accepter de patronner cette thèse.

- M. BOULAINÉ, Professeur de Pédologie à l'Institut National Agronomique, qui m'a accueillie dans son laboratoire et m'a encouragée dans cette voie de recherches.

- M. WEILL, qui nous a demandé d'assurer la première expérimentation systématique sur le prototype RAMSES : scattéromètre multifréquences et grâce à qui nous avons pu bénéficier de la confiance et de l'aide du Centre National d'Etudes Spatiales.

- M. GIRARD, Maître-Assistant au laboratoire de Pédologie de l'I.N.A., à qui ce travail doit d'avoir vu le jour et qui ne m'a pas ménagé son soutien et son expérience.

- M. PEYRE, Maître de Conférences au laboratoire de Pédologie de l'I.N.A., qui a suivi l'expérimentation de Grignon depuis sa mise en place.

- Mme GIRARD, Maître-Assistant au laboratoire de Botanique de l'I.N.A., avec qui j'ai partagé les nombreuses difficultés de cette mise en place de prototype.

- M. GOILLOT et Mme CHABREUIL, qui ont largement contribué à me fournir les documents bibliographiques pour la contribution de la première phase de cette étude.

- MM. LANNELONGUE, LOPEZ, CHAPUIS et LEGRAND, du Centre Spatial de Toulouse, qui m'ont initiée avec beaucoup de patience à la compréhension du RAMSES et M. PAUSADER, du Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements, avec qui j'ai réalisé l'acquisition des données durant toute la campagne de mesures.

- M. BORDES, de l'Ecole Nationale d'Horticulture, M. CARIQU, du C.E.T.E. des Ponts et Chaussées de Rouen, et M. VERBRUGGHE, du S.T.E.F.C.E. de l'I.N.R.A. d'Avignon, qui ont confié les appareil et m'ont prodigué leurs conseils.

- M. STAUB, de la ferme expérimentale, MM. AUBINEAU, BRANCHY et LESTRADE de la chaire de Machinisme Agricole, M. BOURGEOIS, de la chaire de Sciences du Sol, MM. RECAMIER, FOURBET, TROIZIER, du S.E.I., M. BACK et Mme JEAN du service Informatique de l'I.N.A., M. NORMAND et tout le personnel de l'atelier, qui ont pris une part active au bon fonctionnement matériel de l'expérimentation.

- Enfin toute l'équipe du laboratoire de Pédologie : M. GUILLORE, Mmes PLEVEN, LUCET, JEZEQUEL pour leur soutien amical et leur collaboration technique, et Mme ELIE qui a assuré la frappe de ce mémoire.

- Et surtout, je remercie mon collaborateur et inspirateur préféré, Dominique KING, mon époux, pour tous les week-ends "bleausards" sacrifiés.

*

* *

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : ETAT DES CONNAISSANCES DANS L'UTILISATION DES MICRO-ONDES EN PEDOLOGIE (ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE)	4
I.- PHENOMENES PHYSIQUES ET METHODES	4
1 - ELEMENTS DU SOL DECELABLES	4
2 - METHODES PASSIVES	7
3 - METHODES ACTIVES	9
II.- ETAT DES CONNAISSANCES POUR LES APPLICATIONS EN PEDOLOGIE	15
1 - METHODES PASSIVES	15
2 - METHODES ACTIVES	17
3 - CONCLUSION	20
DEUXIEME PARTIE : LA METHODE D'ETUDE	23
Chapitre 1 : CONDITIONS DE L'EXPERIMENTATION	25
I.- CONDITIONS NATURELLES : LA ZONE - TEST	25
1 - SITUATION DE LA ZONE - TEST	25
2 - DESCRIPTION DE LA ZONE - TEST	26
3 - CONTRAINTES TECHNIQUES	29
II.- TECHNOLOGIE DU RAMSES	30
1 - DESCRIPTION	30
2 - PRINCIPE	31
3 - CONTRAINTES	34
4 - CONCLUSION	40
Chapitre 2 : ACQUISITION DES DONNEES DE TERRAIN	42
I.- TEMPERATURE DU SOL ET COMPOSANTES CLIMATIQUES	44
1 - METHODES D'ACQUISITION	44
2 - EVOLUTION DE CES PARAMETRES AU COURS DE LA CAMPAGNE	44

	Page
II.- HUMIDITE DU SOL	45
1 - CHOIX DES METHODES DE MESURES	45
2 - EVOLUTION DES CONDITIONS D'HUMIDITE DURANT LA CAMPAGNE	48
3 - CONCLUSION	50
III.- RUGOSITE DU SOL	50
1 - METHODES	50
2 - TEST DE LA METHODE CHOISIE	52
3 - EVOLUTION DE LA RUGOSITE DURANT LA CAMPAGNE	68
4 - CONCLUSION	75
IV.- CONCLUSION	76
TROISIEME PARTIE : DEPOUILLEMENT DES RESULTATS DE SCATTEROMETRIE	79
I.- QUALITE DES MESURES DE SCATTEROMETRIE	80
1 - HOMOGENEITE ET REPRESENTATIVITE DES - SEQUENCES DE MESURES	80
2 - FIDELITE DU SCATTEROMETRE RAMSES	82
3 - PRECISION DES MESURES DE PUISSANCE RECUES	82
II.- INTERPRETATION DES RESULTATS	85
1 - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE SIGNAL RETRODIFFUSE	86
2 - SENSIBILITE DU SIGNAL RETRODIFFUSE A LA RUGOSITE	86
3 - SENSIBILITE DU SIGNAL RETRODIFFUSE A L'HUMIDITE DE SURFACE	93
4 - ETUDE DE CAS PARTICULIERS	101
5 - CONCLUSION	105
CONCLUSIONS GENERALES	107
BIBLIOGRAPHIE	112
TABLE DES FIGURES	120

INTRODUCTION

Les méthodes aérospatiales, pour l'exploration de la couverture pédologique, se développent de plus en plus. Certaines d'entre elles, utilisées depuis déjà longtemps, ont fait leurs preuves. Mais quelques capteurs, comme les radars, sont encore peu utilisés pour ce type d'applications et demandent des études préliminaires attentives. Pour interpréter correctement les données recueillies par des radars embarqués à bord d'avions ou de satellites, il faut explorer préalablement les possibilités de ces capteurs dans des conditions plus précises, en particulier à une altitude très basse, et en connaissant parfaitement le sol observé. Notre travail est situé à ce niveau de recherche. Il a pu être réalisé grâce au Centre National d'Etudes Spatiales qui nous a permis, avec le Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements, d'engager l'expérimentation d'un prototype : le scattéromètre RAMSES.

Pour les agronomes, il est intéressant de mettre au point des méthodes rapides et synthétiques permettant d'évaluer certaines caractéristiques des sols en place. C'est le cas de l'humidité. Les méthodes classiques sont basées sur une approche analytique, par analyses d'échantillons prélevés sur le terrain. Dans la majorité des cas, elles ne respectent pas le fait fondamental que le sol est un volume de dimensions non finies et elles sont toutes perturbatrices du sol. L'appréciation de ces caractéristiques est déjà abordée par les techniques de télédétection (images satellites et photographies aériennes dans le visible et l'infrarouge). Les possibilités spécifiques des micro-ondes sont par contre assez peu explorées, bien qu'elles aient des particularités intéressantes comme leur faible sensibilité aux conditions atmosphériques.

Notre travail est basé sur l'utilisation de micro-ondes de longueur d'onde 3 cm à 20 cm. Il a pour but de tester une méthode d'étude à distance, en précisant la nature de la signature spectrale du sol dans

cette longueur d'onde, et en évaluant les limites de son utilisation. Comme l'information résultante est en réalité une moyenne obtenue à partir de plusieurs mesures, cela confère à la méthode une valeur de synthèse au niveau des surfaces d'observation. Si cette méthode est reconnue utilisable, elle permettrait une étude du sol rapide et sans perturbation.

Dans nos expériences, la perception de la couche superficielle du sol est limitée à un champ d'observation de quelques centaines de mètres carrés. Elle a lieu au moyen du scattéromètre installé à poste fixe à 11,50 mètres de haut.

Plusieurs travaux de recherche ont déjà défini la nature des paramètres propres au terrain qui ont une influence sur les modifications du signal micro-ondes : ce sont les caractéristiques géométriques de l'état de surface observé -ou rugosité- et ses propriétés diélectriques. La rugosité est un paramètre encore mal connu par les spécialistes de l'étude des sols. Nous lui avons consacré une attention particulière. Quant aux propriétés diélectriques, elles sont principalement liées à la teneur en eau et à la densité du matériau. Du point de vue des applications, c'est l'humidité qui a un intérêt majeur en agronomie. Des méthodes de quantification de ces paramètres ont été testées et mises en oeuvre pour les sols d'une zone témoin et leurs relations avec les données radar ont été étudiées. La parcelle choisie pour cette expérimentation est la parcelle de "la Côte des Divisions" du domaine de Grignon, à l'Institut National Agronomique, qui fait, par ailleurs, l'objet d'études pluridisciplinaires, notamment en agronomie et pédologie.

Cette campagne de mesures a un aspect transitoire qu'il ne faut pas oublier. Elle ne représente qu'une étape dans la compréhension des interactions entre les sols et le rayonnement micro-ondes. Elle pourrait servir de base à l'ajustement de modèles physiques théoriques que le Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements a accepté de tester. L'évaluation de l'humidité des sols, et ultérieurement, l'identification et l'appréciation de divers types de cultures constituent la préoccupation majeure des agronomes dans l'utilisation de ces techniques. Mais l'objectif essentiel est l'interprétation de données fournies par des radars latéraux embarqués à bord d'avions ou de satellites.

PREMIERE PARTIE

ETAT DES CONNAISSANCES DANS L'UTILISATION DES

MICRO-ONDES EN PEDOLOGIE

(ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE)

I.- PHENOMENES PHYSIQUES ET METHODES

Depuis une dizaine d'années, un certain nombre de chercheurs s'intéressent au comportement des objets terrestres vis-à-vis des micro-ondes. Les études pratiques utilisent la gamme de longueur d'onde 3 mm (100 GHz) à 30 cm (1 GHz).

Les études de télédétection sont, dans ces longueurs d'onde, divisées en deux groupes : les *méthodes passives* et les *méthodes actives*. Les méthodes passives correspondent à celles où l'on mesure le rayonnement naturel des objets à la surface de la terre. Le rayonnement est soit émis par ces objets, soit réfléchi à partir de l'énergie solaire. Les méthodes actives (scattérométrie, SLAR, SAR) correspondent à celles où l'on émet un signal dont on mesure l'écho revenant au récepteur.

1 - ELEMENTS DU SOL DECELABLES

A la surface de la terre, les objets réfléchissent ou émettent une certaine énergie dans les longueurs d'onde 3 mm - 30 cm. Cette énergie mesurée est fonction des caractéristiques des objets qui constituent les paramètres de terrain : leur influence sur le rayonnement mesuré est plus ou moins importante. Il existe d'autres caractéristiques modifiant le signal, elles sont propres au système de télédétection utilisé.

Nous rappelons ici les paramètres propres au terrain.

1.1. Paramètres de description de surface

a) La rugosité d'un sol

Elle peut être approchée par la taille, la forme et l'arrangement des éléments qui constituent le micro-relief de la surface du sol. Les théories développées jusqu'ici (réf. 52, 72)* ont seulement utilisé des descriptions statistiques de surfaces relativement simples. Or, les surfaces naturelles peuvent être très complexes. Un certain nombre de recherches sont consacrées à ce problème (réf. 6, 60, 62).

b) La géométrie d'un couvert végétal

La hauteur et la répartition de la végétation, l'orientation et les dimensions des feuilles, l'alignement des cultures, sont autant d'aspects souvent difficiles à appréhender...

Avec les techniques actives, tous les paramètres géométriques des objets n'interviennent sur le signal mesuré que si leurs dimensions sont comparables aux longueurs d'ondes utilisées. La réflexion d'une surface se comporte différemment en fonction de son aspect, et de la longueur d'onde du rayonnement émis (fig. 1) :

- une surface lisse vis-à-vis de la longueur d'onde utilisée réfléchit de manière spéculaire l'onde plane incidente ;
- sur une surface plus ou moins rugueuse, les propriétés de réflexion passent progressivement d'une réflexion spéculaire à une réflexion diffuse.

1.2. Propriétés diélectriques complexes

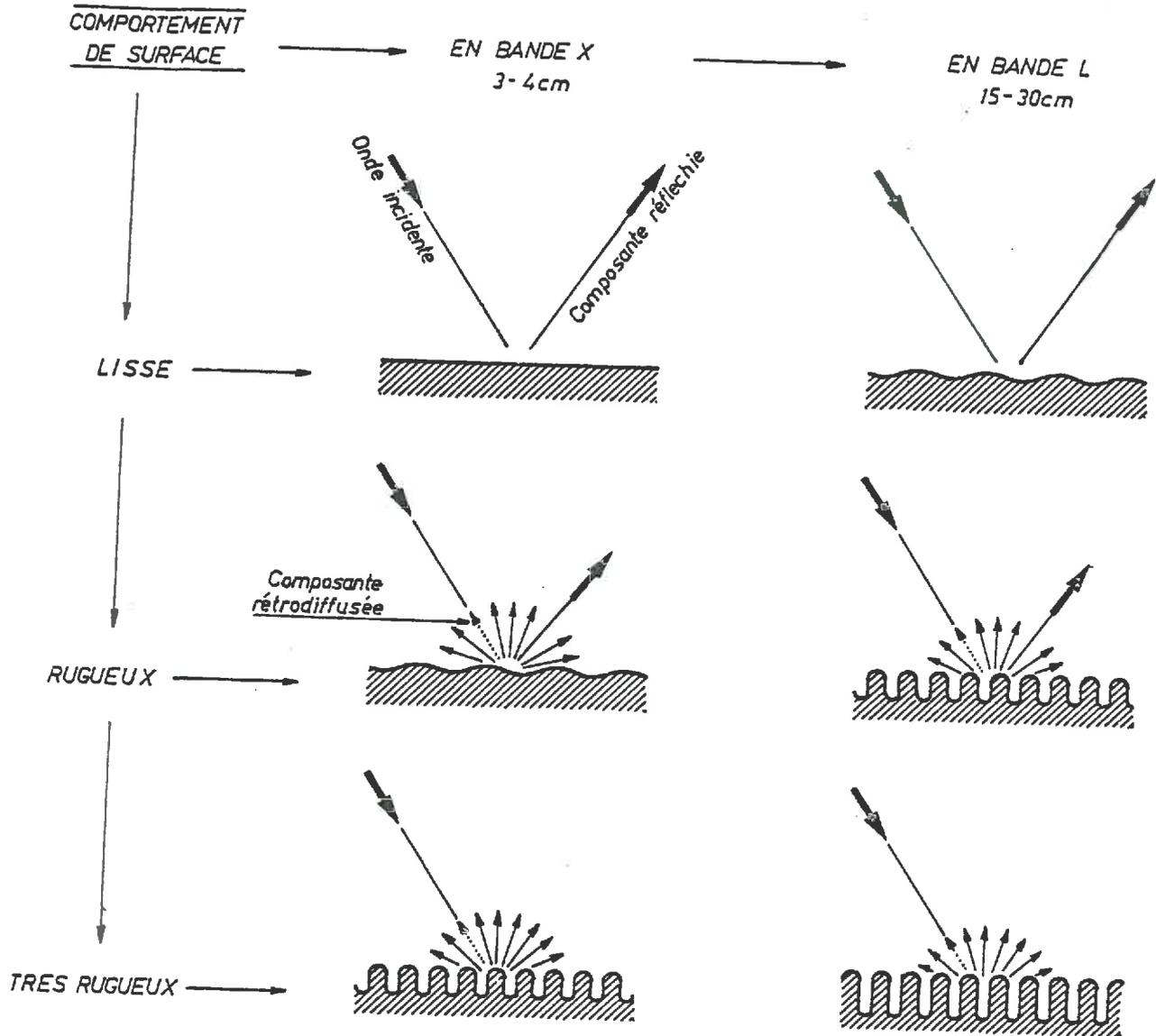
La constante diélectrique et la conductivité sont les deux composantes relatives des propriétés diélectriques d'un matériau.

Elles influencent l'émissivité** ou la réflectance des objets dont le signal est mesuré. Elles sont liées à la teneur en eau libre du sol ou du diélectrique plus complexe représenté soit par l'ensemble "air-sol", soit par l'ensemble "végétation - air - sol".

Elles ont une valeur qui est fonction de la longueur d'onde utilisée (réf. 47, 76). Les propriétés minéralogiques et chimiques des objets observés ont aussi une influence, mais elle est masquée par le rôle prédominant de la teneur en eau.

* Pour l'identification des références, se reporter page 112 à la liste bibliographique établie.

** Pour la signification de certains termes, se reporter au lexique p. 1. en annexe 1.



g. 1 Comportement reflexif de surface en fonction de la longueur d'onde (d'après SHUCHMAN et LOWRY - 1977).

Dans le cas des méthodes passives, l'effet atmosphérique n'est pas négligeable : le rayonnement, traversant l'atmosphère, est atténué par absorption et par diffusion. De plus, l'émission des constituants atmosphériques s'ajoute au rayonnement de l'objet à la surface de la terre.

1.3. Température

Ce paramètre peut avoir une influence sur l'émission de la surface de la terre, même en micro-ondes.

2 - METHODES PASSIVES

PRINCIPE :

Tous les objets ayant une température supérieure au zéro absolu émettent une énergie électromagnétique due à l'agitation thermique des molécules (fig. 2). L'intensité, la polarisation* et la distribution du spectre de rayonnement, dépendent des différents paramètres caractérisant l'objet.

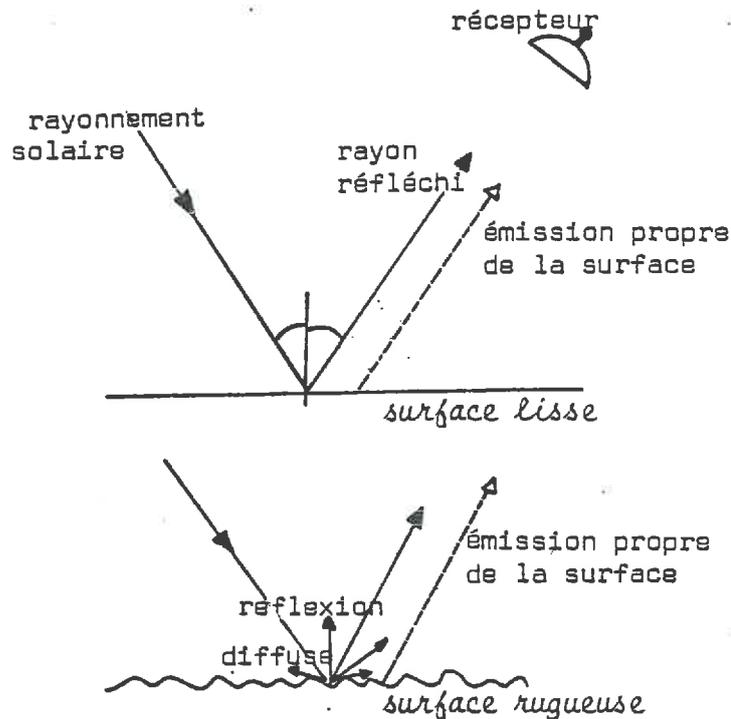


fig.2 Reflexion à partir de différentes surfaces (Méthodes passives)

Dans les micro-ondes, c'est aussi à l'aide de radiomètres que l'on mesure ce rayonnement, appelé "brillance"*.

Les avantages du radiomètre se résument ainsi :

- Principe et technologie simplifiés : cet appareil a été l'un des premiers capteurs micro-ondes mis au point.
- Exploration de l'atmosphère : c'est une des possibilités principales de ces méthodes, outre la détection des objets à la surface de la terre. Elle permet d'évaluer les profils de températures et la teneur en eau liquide de l'atmosphère, par exemple.

* Se reporter au lexique en annexe 1, p. 1.

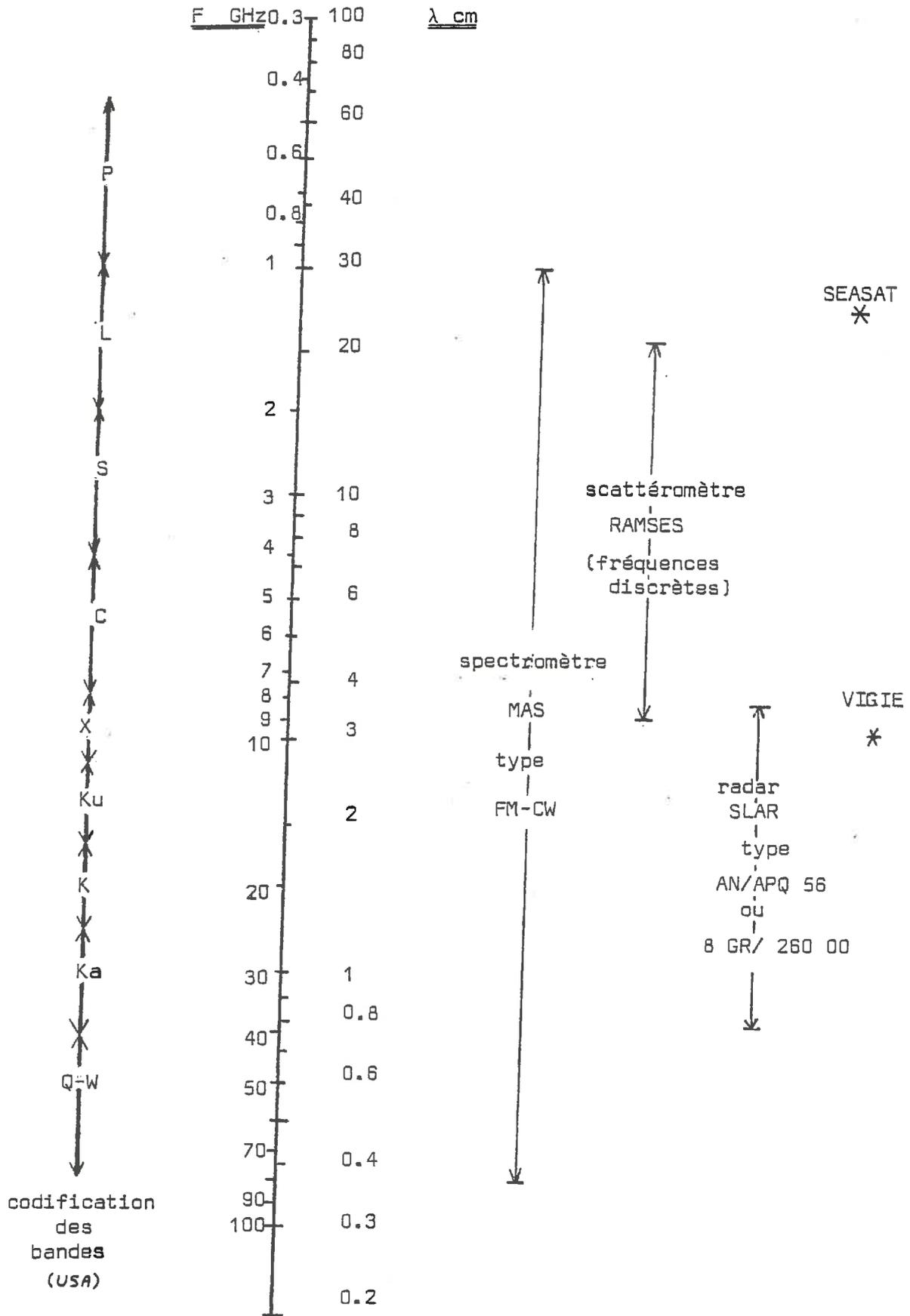


fig. 3

Bandes de fréquences utilisées

Mais il reste des inconvénients majeurs :

- Sensibilité aux conditions météorologiques : le couvert nuageux, la couche atmosphérique et les sources émettrices (soleil, stations radar) gênent considérablement son utilisation dans l'exploration des surfaces terrestres.
- Niveau de puissance reçue : il est faible.
- Résolution spatiale : elle est mauvaise.

3 - METHODES ACTIVES

Les principales bandes de fréquences utilisées dans ces techniques sont représentées sur la figure 3.

3.1. Principe

Ces méthodes permettent d'émettre et de recevoir un signal avec différentes polarisations et en utilisant plusieurs fréquences. En général, récepteur et émetteur sont au même endroit. Le radar émet un signal. Celui-ci atteint l'objet observé et est diffusé dans toutes les directions de l'espace. Le radar ne mesure qu'une partie du signal, celle qui est ré-émise dans sa direction : c'est le *signal rétrodiffusé* (cf. fig. 4).

3.2. Le scattéromètre

Il correspond à la technique la plus simple dont on vient de donner le principe. Le scattéromètre n'a pas de dynamique lui permettant de couvrir de grandes surfaces. Pour une configuration d'angle donnée, il éclaire toujours la même aire au sol. Il ne permet pas d'en distinguer les éléments constitutifs individuels ; mais il intègre la somme des signaux rétrodiffusés à partir de chaque élément. Il effectue donc une mesure globale du signal rétrodiffusé pour une surface donnée.

Le processus de diffusion est caractérisé par un coefficient γ :

$$\gamma = \frac{\text{énergie réfléchie en mode diffus}}{\text{énergie totale réfléchie}}$$

Ce coefficient varie en fonction de l'angle d'incidence du faisceau d'illumination, de la nature des objets éclairés, des longueurs d'onde et des différentes polarisations. Ce sont les relations entre ces paramètres qui constituent la base de la scattérométrie.

Si S est la surface éclairée par le faisceau et α l'angle d'incidence, la section efficace de rétrodiffusion σ peut s'écrire :

$$\sigma = S \cdot \sin \alpha \cdot \gamma$$

On appelle σ_0 le pouvoir réflecteur par unité de surface éclairée qui s'exprime sous la forme :

$$\sigma_0 = \sin \alpha \cdot \gamma$$

La mesure faite par le scattéromètre permet une évaluation du coefficient σ_0 qui décrit les propriétés moyennes de la surface considérée.

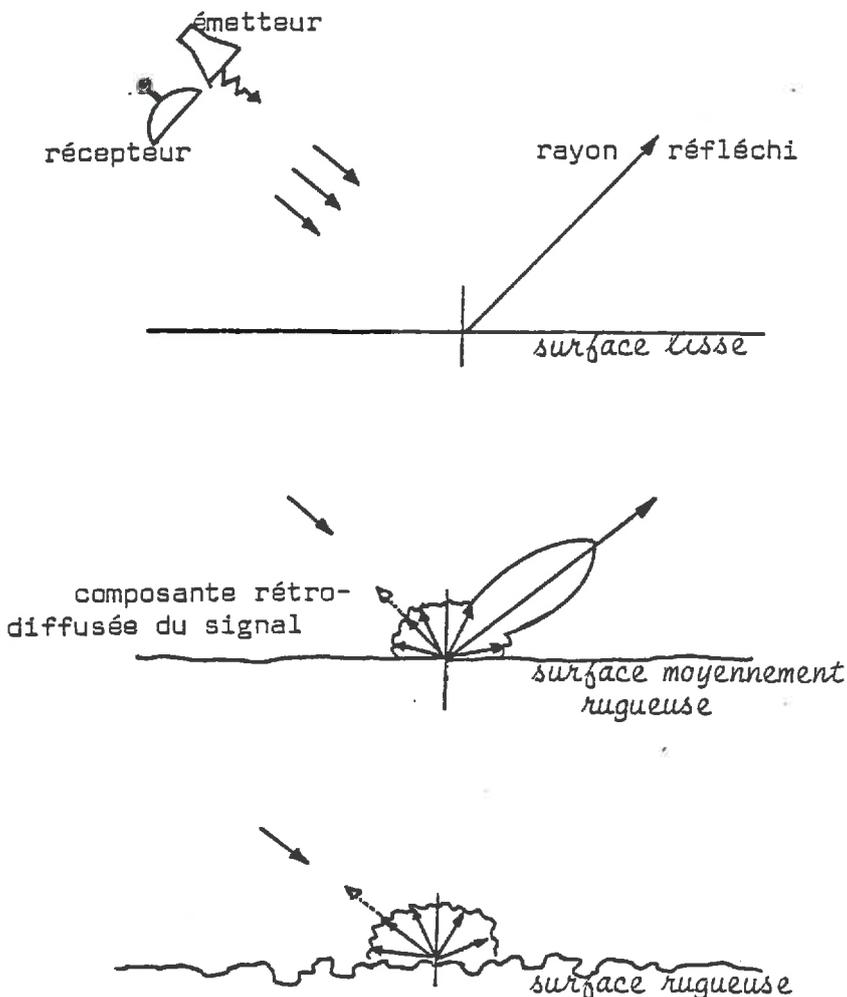


fig.4 Reflexion à partir de différentes surfaces (Méthodes actives)

Cet appareil présente les avantages suivants :

- Technologie simplifiée : elle impose une étude à grande échelle.
- Vaste gamme de fréquences d'exploration : elle assure un maximum d'informations.
- Possibilité de pénétration : elles sont analogues à celles du système SLAR (voir paragraphe suivant).

Son usage est essentiellement limité par des contraintes technologiques :

- Taille de l'élément observé : elle dépend de l'ouverture du faisceau et de la distance d'observation. La surface exacte de la cible est très mal connue. Ses dimensions (de l'ordre de quelques mètres carrés) sont variables suivant les fréquences utilisées et son évaluation se fait à partir de la géométrie du faisceau d'émission. Cette géométrie est très difficile à connaître parfaitement, car tous les paramètres d'antenne interviennent.
- Difficultés d'observation : elles sont nombreuses, notamment aux incidences rasantes.

3.3. Les systèmes aéroportés

a) Le radar latéral à ouverture réelle (S.L.A.R.)

Basé sur le même principe que le scattéromètre, le radar latéral est un système aéroporté. Il opère en émettant un signal connu et reçoit la fraction rétrodiffusée par les objets au sol. Le déplacement de l'avion vecteur permet d'obtenir un balayage et ainsi, de visualiser l'écho reçu sur de grandes surfaces (fig. 5).

L'énergie rétrodiffusée est convertie en une tache de lumière sur un écran cathodique. Celle-ci impressionne plus ou moins un film sensible noir et blanc.

L'intensité de la tache lumineuse est fonction de la puissance du signal reçu. Cette visualisation sur film photographique (image) est totalement différente quant à son principe de la photographie traditionnelle : les différents grisés correspondent à diverses intensités de rétrodiffusion de la cible et les zones noires à une absence d'information.

b) Les systèmes à ouverture synthétique (S.A.R.)

Dans les systèmes à ouverture réelle, la résolution dans le sens transversal (balayage latéral, cf. fig. 5) est bien meilleure que celle obtenue dans le sens longitudinal (déplacement de l'appareil). Cette dernière est limitée par la largeur du faisceau d'antenne réelle. Elle peut être améliorée en augmentant la taille de l'antenne. Mais le transport par avion de cette antenne limite l'augmentation de ses dimensions.

Par contre, le mouvement d'avancement propre à l'avion peut être utilisé pour engendrer une antenne "synthétique". Les échos radar reçus sur plusieurs secondes de temps de vol sont enregistrés et intégrés. On obtient ainsi l'équivalent d'une antenne de plusieurs dizaines de mètres de long. Un système SAR peut être défini comme un radar :

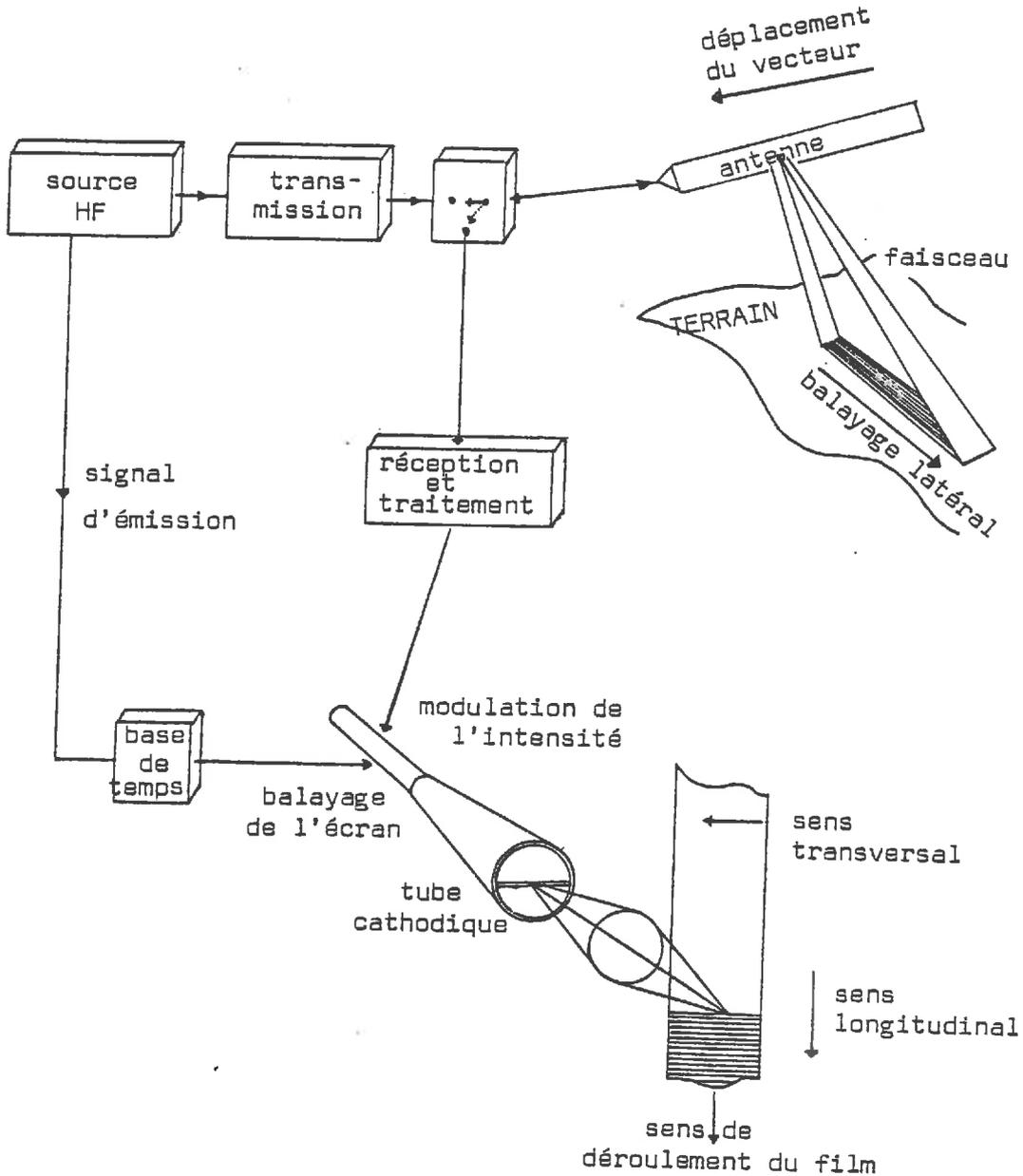


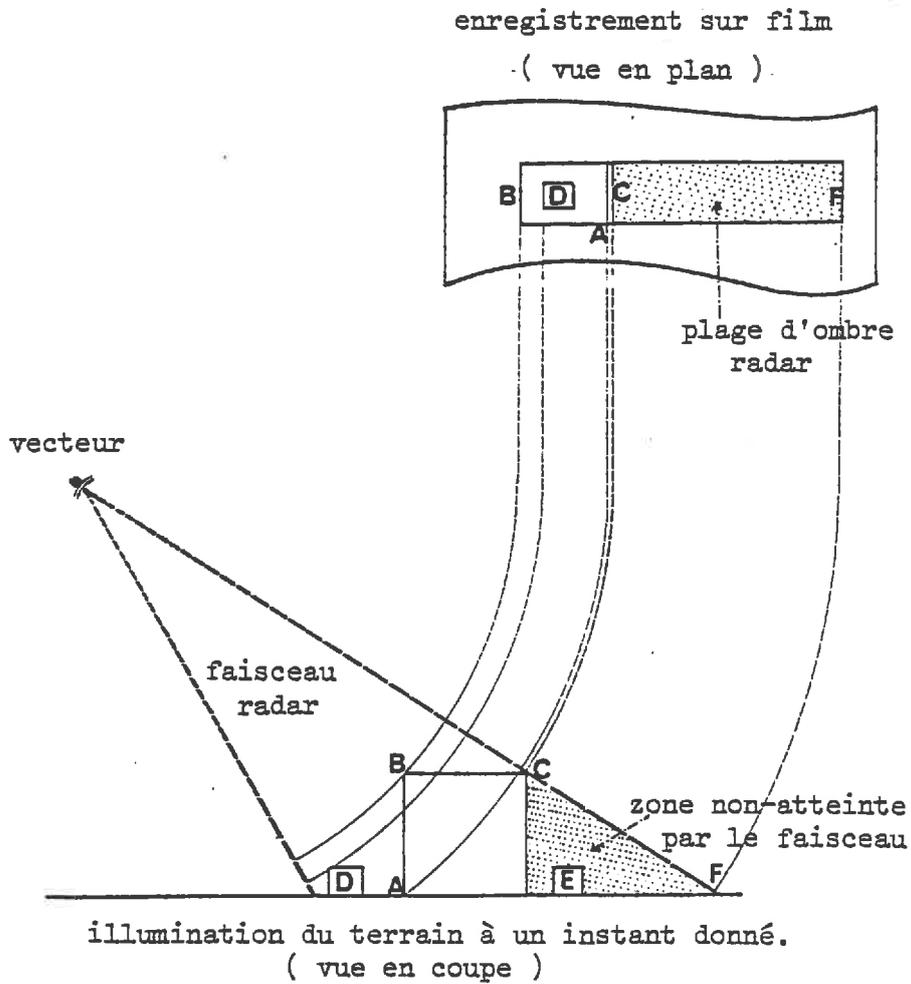
fig.5 Eléments de base d'un système SLAR

- qui utilise une antenne réelle pour "voir" le terrain de manière "normale" ;
- qui enregistre sur le film à la fois l'amplitude du signal écho et sa phase par utilisation de l'effet DOPPLER.

Le traitement de ce film permet d'obtenir une meilleure résolution longitudinale.

c) Propriétés de ces systèmes

Outre leur possibilité de travailler même en mauvaises conditions météorologiques, ces deux systèmes aéroportés présentent un certain nombre d'avantages :



- Le sommet B de l'immeuble est "vu" avant la maison D: distorsion de la position des objets les uns par rapport aux autres.
- La maison E est "cachée" derrière l'immeuble: absence d'informations dans les plages noires.

fig.5 Distortions d'images radar.

- Profondeur de pénétration : la mesure standard théorique de la pénétration est la profondeur à laquelle l'amplitude de l'onde est réduite de 37 % de sa valeur en surface (mesure réalisable en laboratoire). Il y a peu de corrélation entre la profondeur de pénétration et la texture du sol (réf. 76) ; mais cette corrélation est bonne avec la teneur en eau des sols (réf. 80). Les ondes radar peuvent donc pénétrer à travers la végétation et la surface du sol : cela peut fournir une information sur les conditions d'humidité de la surface aussi bien que de la subsurface du sol. Mais les interprétations sont délicates.

D'autre part, suivant les auteurs, l'ordre de grandeur de cette pénétration est très variable : ainsi, pour M. LUNDIEN (réf. 76), seules les données obtenues avec la bande P ($\lambda = 50$ cm) peuvent permettre de déterminer la profondeur de pénétration : elle est de 20 à 60 cm suivant la sécheresse, pour des tests faits en laboratoire.

Pour MM. CIHLAR et ULABY (réf. 51), cette profondeur est de l'ordre du centimètre à 10 GHz ($\lambda = 3$ cm) et va jusqu'à la dizaine de mètres à 1,3 GHz ($\lambda = 23$ cm) pour des textures de sols variées et différentes humidités. Dans un couvert végétal tel que le blé, M. ULABY (réf. 60) indique une profondeur de pénétration de l'ordre du décimètre à 4 GHz ($\lambda = 7$ cm).

- Vue synoptique : de grandes surfaces peuvent être exploitées au cours d'un vol.
- Résolution spatiale moyenne : elle est de l'ordre de 10 à 15 mètres. Pour un SAR, elle permet donc d'obtenir 1 000 points - réponses par 10 hectares. Cette résolution est un peu moins bonne pour un SLAR (25 à 30 m).

Mais ces méthodes ont aussi quelques inconvénients :

- Distorsions d'images : la forme des objets peut être modifiée sur le document d'enregistrement. De même, la position des objets les uns par rapport aux autres peut être intervertie, en fonction de la taille respective des objets (fig. 6).
- Présence de plages noires : elles sont dûes aux "effets d'ombrage" du relief. Sur toute leur surface, aucune information n'est obtenue. Certains auteurs ont proposé d'en tirer une information de relief relatif liée à l'étendue de l'ombre (réf. 4, 38).

II.- ETAT DES CONNAISSANCES POUR LES APPLICATIONS EN PEDOLOGIE

1 - METHODES PASSIVES

La radiométrie micro-ondes intéresse plusieurs équipes de recherche : celles de MM. SHANDA et HOFER de l'Université de Berne (Suisse), de M. BASHARINOV en Russie, de M. VOGEL (Institut für Flugfunk mit Mikrowellen) à Oberpfaffenhofen en Allemagne Fédérale, de M. ROUSE à l'Université du Texas (U.S.A.) et de M. EDGERTON en Californie (U.S.A.), sont les plus connues.

Les appareils les plus couramment utilisés sont :

- des radiomètres de type Dick en 36 ou 94 GHz (Berne, I.F.M.) ;
- des radiomètres multifréquentiels à double polarisation (Californie, Texas).

Ils peuvent être améliorés par des systèmes de visualisation en temps réel.

1.1. Qualité de l'information reçue

- Elle est appréciée différemment selon les auteurs. Le radiomètre, malgré une mauvaise résolution, offre l'avantage, par rapport aux radars actifs, de s'accommoder de n'importe quelle altitude.

Pour M. VOGEL (réf. 68), la relation entre la température radiométrique mesurée et les paramètres des objets, de l'environnement et du radiomètre, est très ambiguë. L'information obtenue est, par conséquent, fort limitée. La combinaison des méthodes actives et passives lui semble préférable.

- La difficulté de séparer les effets des divers paramètres de l'environnement est souvent signalée. Une méthode couramment employée (réf. 27, 52), consiste à comparer les valeurs mesurées aux valeurs prévues par les modèles théoriques les plus appropriés. Lorsque l'élaboration de ces modèles est convenable, on observe une bonne correspondance entre mesures et prévisions pour des cibles grandes, lisses et homogènes. La sensibilité, aux effets d'humidité notamment, diminue pour des cibles d'une taille voisine de la résolution du système.
- Un facteur d'importance dans la qualité du signal est la contribution atmosphérique à la température radiométrique. Elle intervient de plusieurs façons :
 - .atténuation directe du signal utile le long de la trajectoire,
 - .réflexion plus ou moins diffuse de l'objet détecté,
 - .détérioration de l'image thermique par l'émission de bruit du ciel (réf. 53, 57).

Des recherches ont été menées pour tenter d'éliminer cette contribution.

1.2. Interprétation de la température radiométrique*

Les recherches s'orientent vers l'établissement d'une relation entre les émissions dans les micro-ondes, la teneur en eau et la rugosité du sol.

a) Humidité du sol

C'est dans ce domaine que les mesures par radiométrie ont le plus d'intérêt et ont été les plus nombreuses.

Il est établi (réf. 3, 15, 27, 45) que la température radiométrique diminue lorsque la teneur en eau du sol augmente. Cette relation n'est pas linéaire. Elle est attribuée aux changements des propriétés diélectriques complexes du système "sol/eau" en fonction de l'humidité.

L'humidité des sols varie en surface et en profondeur ; aussi, peut-on envisager la possibilité de déterminer la distribution verticale et horizontale de l'humidité du sol. C'est ce que propose M. EDGERTON (réf. 16) en utilisant des radiomètres multifréquences.

M. MUSY (réf. 45) s'intéresse aux composantes du bilan hydrique d'un sol, aussi tente-t-il d'utiliser les micro-ondes en système passif pour déterminer l'une de ces composantes : l'infiltration de l'eau dans le sol.

b) Rugosité de surface

De même qu'avec les méthodes actives, l'effet de rugosité de la surface est plus difficile à évaluer que celle de l'humidité.

M. ROUSE et son équipe (réf. 52) n'ont pas établi de relation simple entre la rugosité observée à grande échelle (échelle de la parcelle) et la température radiométrique en bande X ($\lambda = 3$ cm). En bande L ($\lambda = 30$ cm), ils ont noté une augmentation régulière de cette température avec la rugosité.

c) Discontinuités de la sub-surface

Leur identification (vides, pores, etc...) a suscité également des recherches. MM. HRUBY et EDGERTON (réf. 24) pensaient que la présence de discontinuités modifierait le modèle de drainage et de distribution d'humidité, et qu'elle pourrait, par ce biais, être identifiable. Aucune corrélation entre l'émission micro-ondes et la position des vides en subsurface n'a pu être notée.

Les vols aérospatiaux sont peu employés en radiométrie micro-ondes. Le projet RADSCAT (réf. 43), utilisant un appareil mixte scattéromètre - radiomètre, permet des comparaisons entre température radiométrique et signal rétrodiffusé.

* Se reporter au lexique en annexe 1, p.1.

Le système à image MICRAD (35 et 94 GHz), (réf. 6, 16) a été proposé pour l'analyse de terrains urbains et ruraux. La distinction entre parcelles de sols nus de rugosité variable n'est pas possible. Seules, les parcelles irriguées peuvent être différenciées, car les caractéristiques des tons d'image varient considérablement en fonction de l'humidité du sol.

Seul M. BASHARINOV (réf. 3) a pu établir, à partir de vols aériens, une approximation linéaire entre la température de brillance et la teneur en eau.

Ainsi, les systèmes passifs aéroportés semblent avoir peu d'avenir, hormis leur utilisation à des fins de prévisions météorologiques, notamment par satellites.

2 - METHODES ACTIVES

Plusieurs équipes travaillent actuellement sur ce sujet. On peut citer celle de M. ULABY à l'Université de KANSAS (USA), qui utilise fréquemment un radar de type FM-CW multifréquences à double polarisation ; celle de MM. de BOER et de LOOR en Hollande, qui utilisent un radar simple (9,3 GHz) à multipolarisation ; celle de M. SHANDA à l'Université de Berne (Suisse), qui utilise un scattéromètre multifréquences...*

La liste des travaux consultés, concernant des études sur sols nus, se trouve en annexe I, p. 3.

2.1. Etudes in-situ

L'interprétation du signal rétrodiffusé d'un sol nu nécessite différentes étapes pour comprendre les relations entre le signal et les paramètres de terrain.

1°) Il faut tout d'abord déterminer les facteurs du système qui permettront un maximum d'informations. Ainsi, M. ULABY et son équipe (réf. 51) ont déterminé le domaine d'angles d'incidence tel que la réponse radar soit le moins possible affectée par la rugosité, ceci dans une grande gamme d'humidité. Ce domaine se situe entre 15° et 25° à 4 GHz, et entre 8° et 15° entre 2 et 4 GHz. L'interprétation du signal rétrodiffusé est encore améliorée par l'utilisation simultanée de plusieurs configurations géométriques optimales (fig. 7), (angles de site et de gisement).

*Pour les types d'appareils utilisés, se reporter à l'annexe 1, p. 2 :
exemples de spécifications d'appareils utilisés.

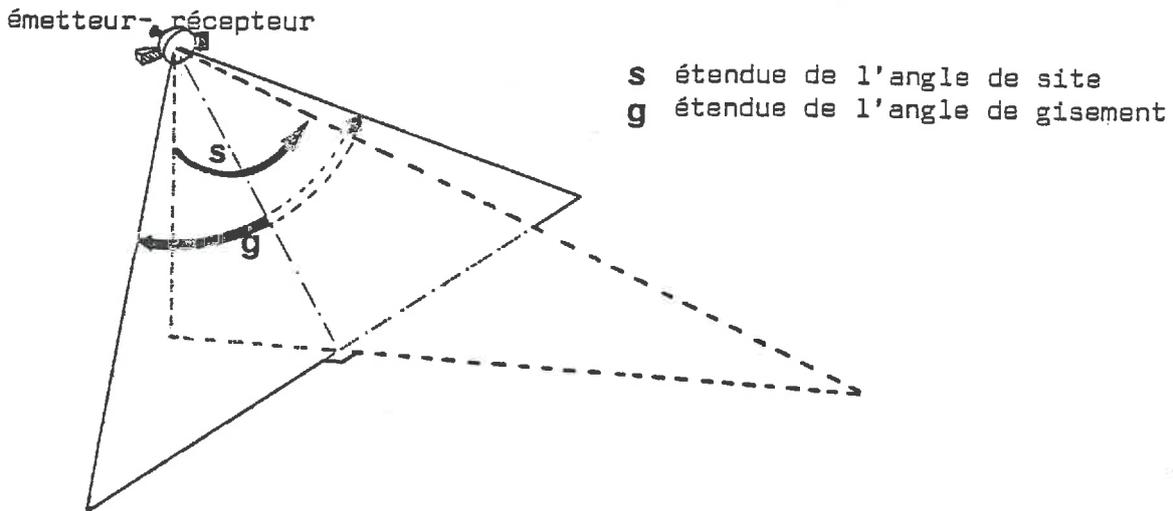


fig.7 Configuration géométrique du système

2°) Il est nécessaire de caractériser précisément la zone test. Cela concerne :

- la quantification de la rugosité, par d'autres méthodes que des modèles statistiques théoriques (réf. 72, 81) ;
- la corrélation entre des mesures physiques telles que permittivité et résistivité et le comportement réel du sol ;
- la juste connaissance des conditions hydriques de la surface (réf. 14, 47, 50, 60) et de la couche superficielle du sol. Ce sont autant de problèmes ardues que chacun résoud sur le terrain à l'aide de méthodes plus ou moins grossières, souvent peu explicitées dans la littérature.

3°) La difficulté de l'échantillonnage est souvent signalée (réf. 7, 26, 40). La valeur et la précision de la mesure du signal rétro-diffusé sont liées au nombre d'échantillons indépendants sur lesquels la mesure a été faite. Ce nombre est fonction de la valeur de la résolution, de l'angle d'incidence, de l'étendue de la cible et surtout, des paramètres propres à l'instrument d'analyse.

4°) Les paramètres du système étant déterminés, et le terrain étant connu, la recherche s'oriente vers l'isolement d'un seul paramètre du terrain, en minimisant les effets des autres paramètres.

Du fait de son intérêt en agronomie, l'humidité est souvent étudiée de manière plus approfondie (réf. 26, 34, 46, 59, 61, 65, 66). Ainsi, M. ULABY (réf. 5, 60), a minimisé les effets du type de sol et de la rugosité (qu'il a supposée constante) pour n'étudier que les modifications dues à une gamme d'humidité aussi grande que possible.

Il a tenté de définir ainsi la sensibilité du scattéromètre à l'humidité (réf. 51, 64).

Les relations entre la rugosité du sol et la longueur d'onde émise ont suscité également des recherches (réf. 46). Les relations établies sont souvent des prévisions basées sur la théorie. En pratique, l'identification de la rugosité de surface est beaucoup moins précise à cause de l'influence variable de la teneur en eau et du couvert végétal.

5°) Toutes ces recherches tendent vers la compréhension et la prévision des interactions entre le signal émis et le terrain.

2.2. Etudes à partir d'avions ou de satellites

Les systèmes SLAR ou SAR sont utilisés de préférence aux scattéromètres, à bord d'avions ou de satellites, rarement dans le but d'études limitées aux sols nus. Aussi, y a-t-il peu de résultats en ce domaine.

Utilisés à quelques mètres du sol, les systèmes SLAR fournissent des résultats intéressants, mais ceux-ci ne sont évidemment pas transposables intégralement à la détection par avion ou satellite (réf. 54).

Les mesures aéroportées sont toujours difficiles à corrélérer avec des contrôles de terrain. Ces derniers sont le plus souvent insuffisants.

Les études confirment que les angles d'incidence proches de la verticale sont les meilleurs pour détecter des différences dans l'humidité des sols et pour distinguer, dans la mesure du possible, différents types de sols. Cette distinction se base sur la rugosité de surface (réf. 46).

MM. SCHWARTZ et CASPALL (réf. 54) ont utilisé un radar de type SLAR en bande K ($\lambda = 1$ cm) au-dessus de sols nus. Ils ont pu obtenir deux grands types de rugosité de surface. Mais après des études statistiques de corrélation entre les paramètres mesurés, leurs résultats ont permis de conclure qu'aucun paramètre simple n'a de relation constante et significative avec le signal rétrodiffusé.

Plus récemment, l'équipe de MM. MOORE et ULABY a mis au point un appareil mixte : le radiomètre - scattéromètre RADSCAT (réf. 11, 42, 63). Les résultats ont été prometteurs au-dessus de zones désertiques ayant de grandes variétés de conditions d'humidité (le Grand Lac Salé). Ils ont confirmé la corrélation entre la température apparente mesurée par le radiomètre et la rétrodiffusion mesurée par le scattéromètre ; ces deux mesures varient inversement en fonction de l'humidité du sol. A bord du satellite Skylab (réf. 14, 43, 44), RADSCAT a permis d'étudier l'influence de l'humidité du sol sur le signal retour. A l'échelle utilisée (zone test de 300 km de longueur), le degré d'erreur dans la prise de données au sol, peut être assez grand. Néanmoins, M. EAGLEMAN (réf. 14) a trouvé des résultats intéressants : ils montrent que l'appareil répond à une grande gamme d'humidité.

Ils donnent une information sur la profondeur effective atteinte par le signal radar. Elle est obtenue par comparaison de l'information d'humidité fournie par le signal et des prélèvements au sol (en chaque point d'observation de terrain, 6 prélèvements ont été faits, tous les 2,5 cm, soit au total une profondeur d'exploration de 15 cm).

Ainsi, la contribution principale des radars de type SLAR serait de fournir une connaissance des distributions de l'humidité des sols à l'échelle d'une région.

Ces différences se traduisent sur les visualisations par des grisés d'intensité variable. Seuls, les contrastes importants ont une signification et peuvent être interprétés.

3 - CONCLUSION

L'évaluation des caractéristiques du sol qui influencent les modifications du signal rétrodiffusé est un des problèmes soulevés par l'utilisation de ces techniques micro-ondes.

La rugosité d'un sol est en général difficile à apprécier. A une date donnée, elle est la conséquence de plusieurs facteurs (climatiques, pédologiques, anthropiques). Pour la décrire, on tend actuellement à établir un certain nombre de modèles statistiques ou géométriques. Mais, comme fréquemment en modélisation agronomique, ceux-ci ont leurs limites. Ils peuvent constituer un outil pour mieux comprendre un phénomène, mais ils traduisent rarement une réalité agronomique.

La difficulté de l'évaluation des propriétés diélectriques réside dans la multiplicité des facteurs qui peuvent intervenir sur la valeur de la mesure. De plus, son interprétation au sens pédologique est délicate.

La séparation des effets des divers paramètres est une première étape, loin d'être achevée. La seconde étape sera constituée par l'interprétation et l'exploitation du document enregistré.

Si les recherches entreprises permettent de dissocier la part de chaque paramètre dans la modification du signal rétrodiffusé, les possibilités originales des techniques hyperfréquences peuvent être d'un grand intérêt : elles permettraient d'appréhender le sol comme un volume. En cela, elles constitueraient un complément à l'approche photo-pédologique dans laquelle la part des éléments non directement décelés est grande.

DEUXIEME PARTIE

LA METHODE D'ETUDE

Durant la campagne d'expérimentation du système actif RAMSES, la préoccupation majeure a été d'approfondir la compréhension des interactions du rayonnement électromagnétique et des éléments constitutifs de la couche superficielle du sol.

Une phase importante de l'étude est l'élaboration d'une méthode dont dépendent les observations nécessaires à l'appréhension des phénomènes.

Au cours de cette élaboration, plusieurs facteurs ont conduit à prendre des options dans la manière d'observer les caractères propres à la zone test.

- la sensibilité du système RAMSES aux variations des paramètres terrain nous est inconnue. Il ne s'agit donc pas de chercher la précision absolue dans l'évaluation de ces paramètres, mais de situer cette sensibilité dans une certaine marge.
- la durée de manipulation imposée par la technologie de RAMSES nécessite l'utilisation de méthodes de terrain rapides et maniables.

A partir de ces éléments, il est possible de rechercher des relations spécifiques entre certains caractères de surface (humidité, rugosité...) et la mesure multispectrale d'un paramètre radiométrique.

Afin de limiter la multiplicité des conditions de terrain, cette campagne s'applique plus particulièrement à l'étude "in situ" des sols nus.

La collecte simultanée des données de terrain et des signaux radar ne peut être menée avec cohérence que lorsqu'on dispose au préalable :

- d'une bonne connaissance de la zone-test et des conditions technologiques de l'expérience à mener,
- d'une mise au point précise des paramètres à étudier.

Chapitre I

LES CONDITIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

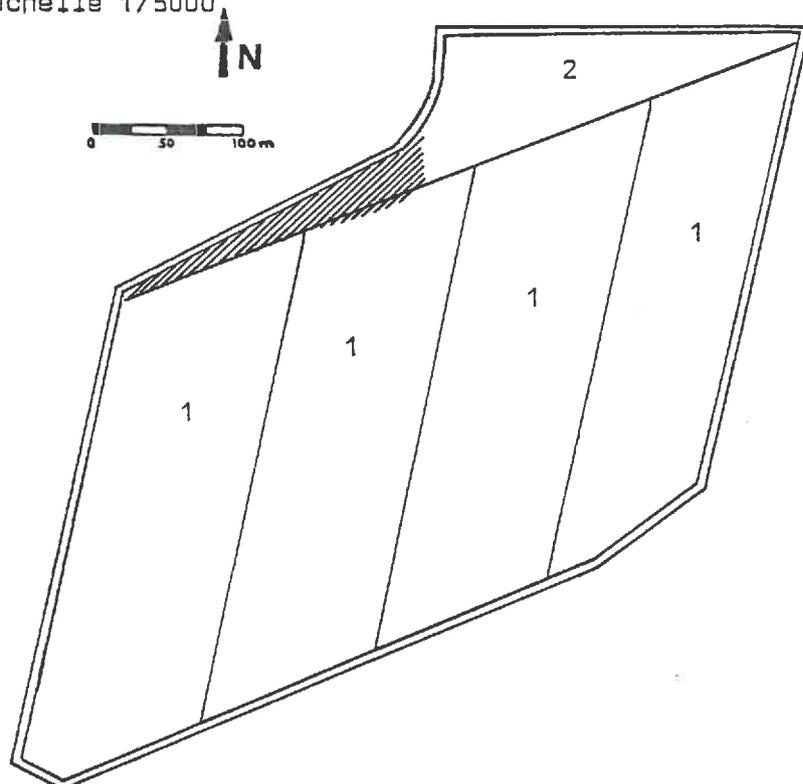
I.- CONDITIONS NATURELLES : LA ZONE - TEST

1 - SITUATION DE LA ZONE-TEST

La parcelle de la "Côte des Divisions" a été choisie pour l'expérimentation.

Elle est actuellement le siège d'une expérience menée depuis quatre ans par la Chaire de Machinisme Agricole. Cette expérience a pour but de comparer l'effet de différents travaux culturaux sur le rendement d'une récolte. Pour ce faire, elle utilise quatre zones, de surface équivalente sur la parcelle (fig. 8).

échelle 1/5000



- 1- parcelles d'expériences (travaux culturaux différents)
- 2- parcelle hors expérience (travaux culturaux habituels)
- /// zone test, implantation du scattéromètre

fig.8

Parcelle des Divisions.

La zone disponible pour l'implantation du scattéromètre RAMSES est la pointe Nord-Ouest, dont l'emplacement est signalé sur la figure 8.

Cette parcelle a déjà fait l'objet de plusieurs études concernant :

- .l'érosion et le ruissellement (G. N'GOU, 1976 - N. KOFFI, 1977) ;
- .la levée d'une carte topographique au 1/2 000ème par l'I.G.N. en 1977 ;
- .la modélisation pédologique et la cartographie automatique à l'échelle du 1/5 000ème (D. KING, 1976 - Réf. 83).

Dans le travail de D. KING sont rassemblés tous les documents concernant l'historique, la topographie, la géomorphologie et la géologie de cette parcelle. Une prospection pédologique systématique a permis d'établir une carte pédologique de la parcelle, toutes les cartes thématiques la concernant peuvent être obtenues par sorties automatiques : par exemple, les taux d'argile, de limon ou de sable de chacun des horizons, la charge en cailloux de surface, la nature de la roche-mère ou la morphologie de la parcelle.

2 - DESCRIPTION DE LA ZONE - TEST

2.1. Les observations

Sur le secteur disponible pour l'expérimentation du système RAMSES, quatre fosses pédologiques et cinq sondages à la tarière sont représentatifs des types de sols explorés. Le sol y a été décrit et des échantillons analysés. La localisation de ces observations est signalée sur la figure 9.

La description sommaire et synthétique des quatre profils, faite par B. FOURNIER, est donnée ci-dessous.

PROFIL : 1 ETUDE : 2

AGRICULTURE.

PROFIL CALCIMORPHE : A, C ; A MULL ; A DRAINAGE NORMAL. SUBSTRAT : CALCAIRE.
NATURE DE L'OBSTACLE : ROCHE CALCAIRE ; PROFONDEUR : 105CM.
PROFONDEUR EXPLOITEE PAR LES RACINES : 140CM. PROFIL DIFFERENCIE PAR :
-LA COULEUR : BRUN-ROUGE MOYEN SUR GRIS MOYEN ;
-LA CHARGE : A CHARGE GROSSIERE SUR A CHARGE TRES GROSSIERE ;
PROFIL : TEXTURE LIMONEUSE ; STRUCTURE NETTE ; MEUBLE ; PERMEABLE ;
NOMBREUSES RACINES DISTRIBUEES IRREGULIEREMENT ; PH BASIQUE.

PROFIL : 4 ETUDE : 2

AGRICULTURE.

PROFIL CALCIMORPHE : A, C ; A MULL ; A DRAINAGE NORMAL. SUBSTRAT : CALCAIRE MARNEUX.
NATURE DE L'OBSTACLE : INDETERMINE ; PROFONDEUR : 55CM.
PROFONDEUR EXPLOITEE PAR LES RACINES : 110CM. PROFIL OBSERVE JUSQU'A : 120CM.
PROFIL DIFFERENCIE PAR :
-LA COULEUR : BRUN MOYEN SUR ROUGE MOYEN ;
-LA CHARGE : SANS CHARGE SUR A CHARGE GROSSIERE ;
PROFIL : TEXTURE LIMONEUSE ; STRUCTURE NETTE ; MEUBLE ; PERMEABLE ;
NOMBREUSES RACINES DISTRIBUEES IRREGULIEREMENT ; PH BASIQUE.

PROFIL : 5 ETUDE : 2
AGRICULTURE.
PROFIL CALCIMORPHE : A, B, C ; A MULL ; A DRAINAGE TRS PAUVRE. SUBSTRAT : ARGILITE.
NATURE DE L'OBSTACLE : ROCHE CALCAIRE ; PROFONDEUR : 20CM.
PROFONDEUR EXPLOITEE PAR LES RACINES : 50CM. PROFIL OBSERVE JUSQU'A : 100CM.
PROFIL DIFFERENCIE PAR :
-LA CHARGE : A CHARGE GROSSIERE SUR A CHARGE TRES GROSSIERE ;
-LA TEXTURE : LIMONEUSE SUR ARGILEUSE ;
-LA COULEUR : BRUN SOMBRE SUR GRIS SOMBRE ;
PROFIL : STRUCTURE TRES NETTE ; MEUBLE ; PEU PERMEABLE ; PEU DE RACINES ; PH BASIQUE.

PROFIL : 7 ETUDE : 2
AGRICULTURE.
PROFIL CALCIMORPHE : A, B, C ; A MULL ; A DRAINAGE NORMAL. SUBSTRAT : SABLE.
NATURE DE L'OBSTACLE : INDETERMINE ; PROFONDEUR : 75CM.
PROFONDEUR EXPLOITEE PAR LES RACINES : 75CM. PROFIL DIFFERENCIE PAR :
-LA TEXTURE : LIMONEUSE SUR SABLEUSE ;
-LA CHARGE : A CHARGE GROSSIERE SUR SANS CHARGE ;
PROFIL : BRUN MOYEN ; STRUCTURE PEU NETTE ; MEUBLE ; PERMEABLE ; NOMBREUSES RACINES DISTRIBUEES IRREGULIEREMENT ; PH BASIQUE.

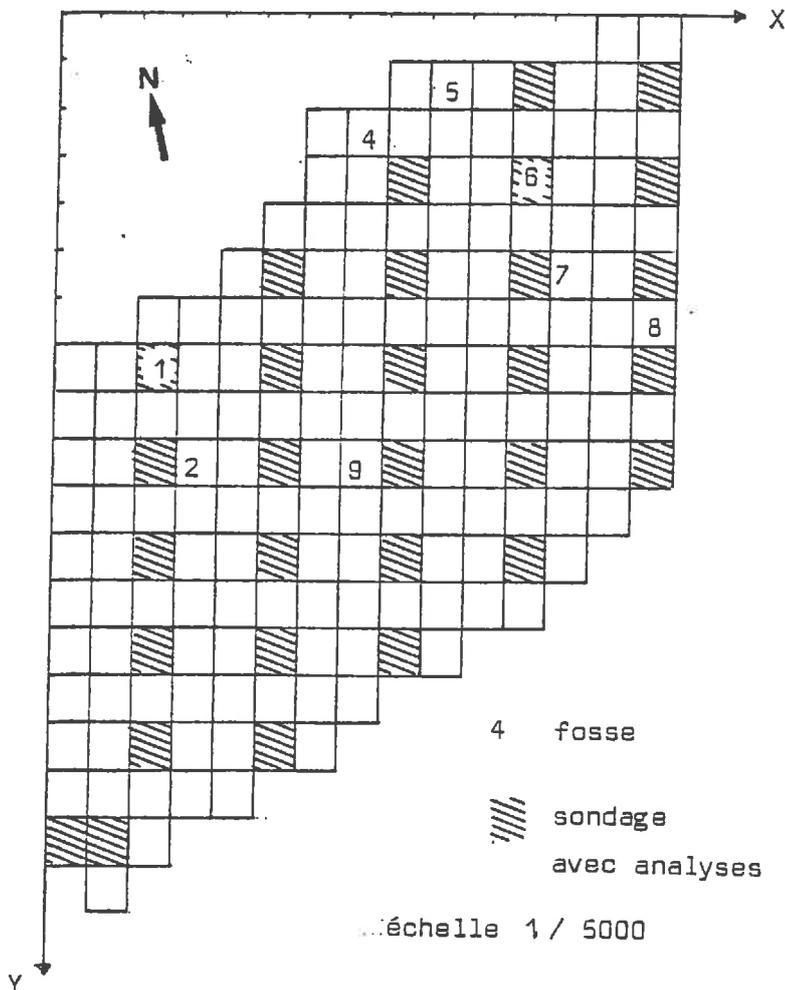


fig.9 Localisation des observations.

Les analyses des échantillons ont porté sur la texture, l'humidité, le pH, le calcaire total et le calcaire actif, la matière organique et le carbone, l'azote, la granulométrie. Tous ces résultats sont consignés en annexe 2, page 4. Pour compléter ces informations obtenues par D. KING, nous avons réalisé des analyses de densité réelle sur 9 échantillons prélevés sur le secteur d'étude.

2.2. La carte pédologique

L'étude des profils des dix premières fosses creusées sur l'ensemble de la parcelle a montré que les horizons de surface étaient très homogènes. Les analyses en composantes principales sur 187 observations à la tarière ont confirmé cette homogénéité, sur l'ensemble de la parcelle. Cette homogénéité, due à la culture, se traduit notamment au niveau :

.de la texture de l'horizon de surface qui est équilibrée :

Argile : 23 %
Limon : 24 %
Sable : 53 %.

.du taux de matière organique qui est voisin de 4,3 % dans l'horizon de surface.

En outre, certaines caractéristiques de la zone-test peuvent être signalées :

- .la charge en cailloux de surface est assez variable (annexe 2, p. 5). Le secteur de la zone-test appartient à la classe 1 : charge très faible en cailloux.
- .la pente de cette zone appartient à la classe 2 : pente faible.
- .la carte des roches-mères (annexe 2, p. 8). traduit une hétérogénéité importante en profondeur. Sur le secteur d'étude, on trouve des sables glauconieux, de la craie, et des colluvions sablo-limoneuses.

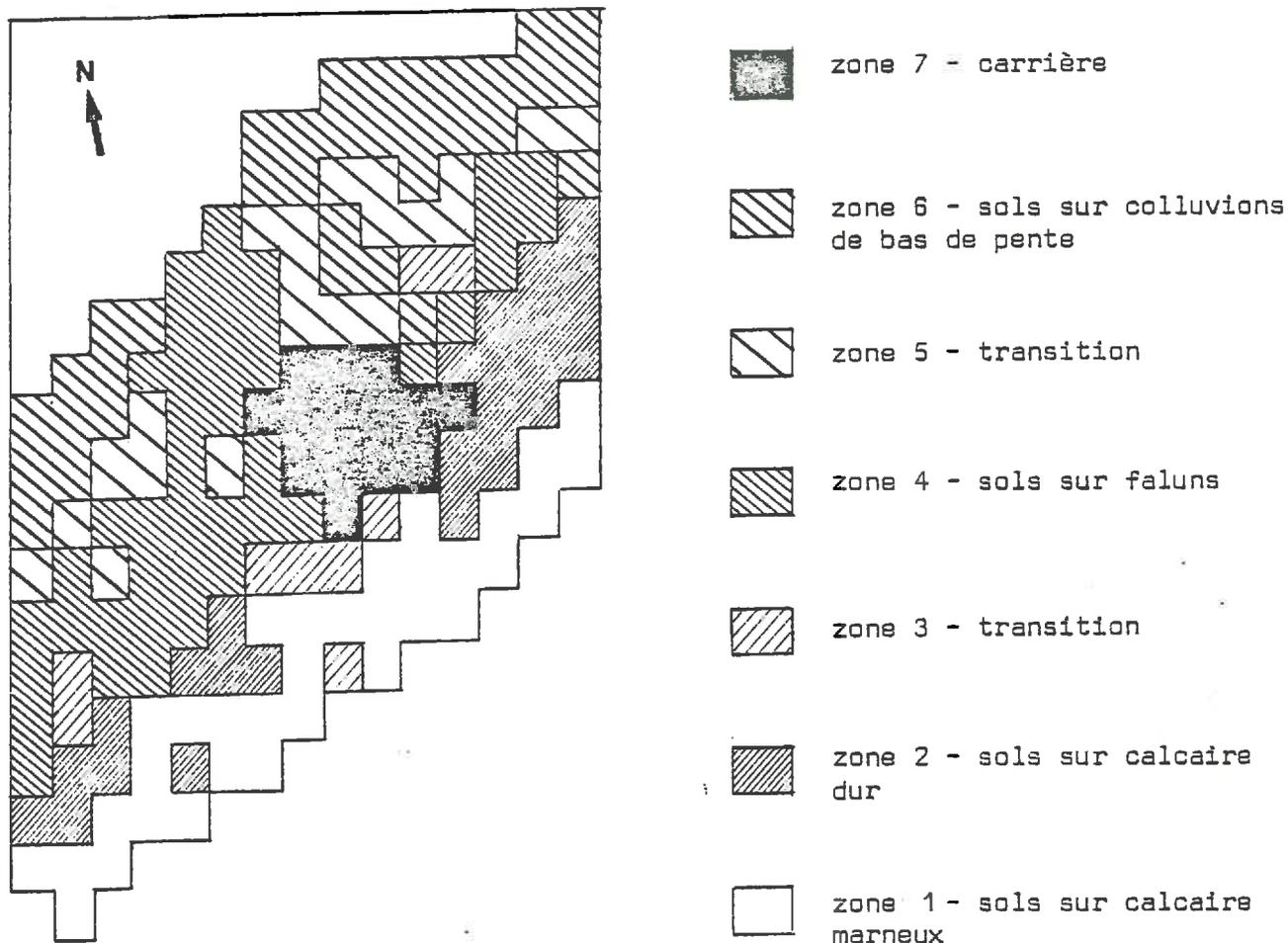
La carte pédologique dressée en 1976 nous permet de caractériser les deux sols qui sont représentés sur la zone-test (fig. 10).

- Zone 6 : Sols à profil calcaire différencié (A, (B), C), bien drainés, épais, développés sur des colluvions sablo-limoneuses de bas de pente, avec une profondeur explorable par les racines de 1,10 m. Sous ces colluvions se trouve la craie. Les horizons de surface ont une texture équilibrée et une teneur en calcaire peu élevée, les horizons (B) sont décarbonatés et enrichis en argiles.
- Zone 4 : Sols à profil peu différencié (A, AC, C), sur pentes assez fortes, bien drainés, développés sur sables calcaires (faluns). La profondeur explorable par les racines est de 60 cm. Les horizons de surface sont très carbonatés.

fig. 10

Carte pédologique de la parcelle de
La Côte des Divisions.

(échelle 1/5000)



Durant cette première campagne avec le scattéromètre RAMSES, les expériences sont donc menées sur une zone homogène d'au moins 30 cm d'épaisseur (horizon cultural). Les hétérogénéités, dues essentiellement à la nature et la proximité de la roche-mère ou du substrat n'apparaissent qu'en profondeur.

3 - CONTRAINTES TECHNIQUES

La situation de la zone-test permet de résoudre un certain nombre de problèmes :

- la proximité du laboratoire d'analyses de sols du Centre de Grignon permet des mesures rapides sans transport ni difficultés. Cette proximité facilite également la collaboration avec la Chaire de Machinisme Agricole et la ferme expérimentale, notamment en ce qui concerne la réalisation des travaux culturaux.

- la zone -test jouxte le chemin d'accès. Par là sont acheminés tous les matériels d'installation du système de scattérométrie. Les poteaux de support des câbles d'alimentation longent la parcelle, évitant une implantation à travers champ et simplifiant la pratique des travaux culturaux en cours.

II.- TECHNOLOGIE DE RAMSES

1 - DESCRIPTION *

Le scattéromètre RAMSES est constitué :

- d'une part, d'un ensemble mécanique : la plate-forme d'antenne et son système d'orientation. Cette partie est fixée à la tour.

- d'autre part, d'un laboratoire de traitement où sont centralisées les informations de télémessures et de télécommandes, ainsi que les servitudes (alimentation et contrôle). Les deux parties sont reliées par des câbles électriques qui assurent le transport des différents signaux (fig. 11).

La plate-forme porte-antenne comprend :

- plusieurs antennes :
 - .1 cornet d'émission, polarisation Horizontale ;
 - .1 cornet d'émission, polarisation Verticale ;
 - .1 parabole de réception : polarisation H et V, de diamètre 1,10 m ;
 - .2 paraboles de réception : polarisation H ou V, de diamètre 0,35 m.
- une partie mécanique :
 - .1 support orientable en site et en gisement ;
 - .2 moteurs de positionnement.
- un coffret électronique concernant l'émission-réception.
- un caméra TV solidaire de l'antenne de réception.

Le laboratoire de traitement est constitué par un abri métallique d'une surface de 10 m², où sont rassemblées les baies de télémessures, de télécommandes et les moyens de contrôle. Les équipements se complètent enfin par un matériel d'étalonnage mobile (sphère, trièdre fixe et trièdre mobile, lentilles de Luneberg, mât de fixation).

* (extrait de la note de présentation de RAMSES)

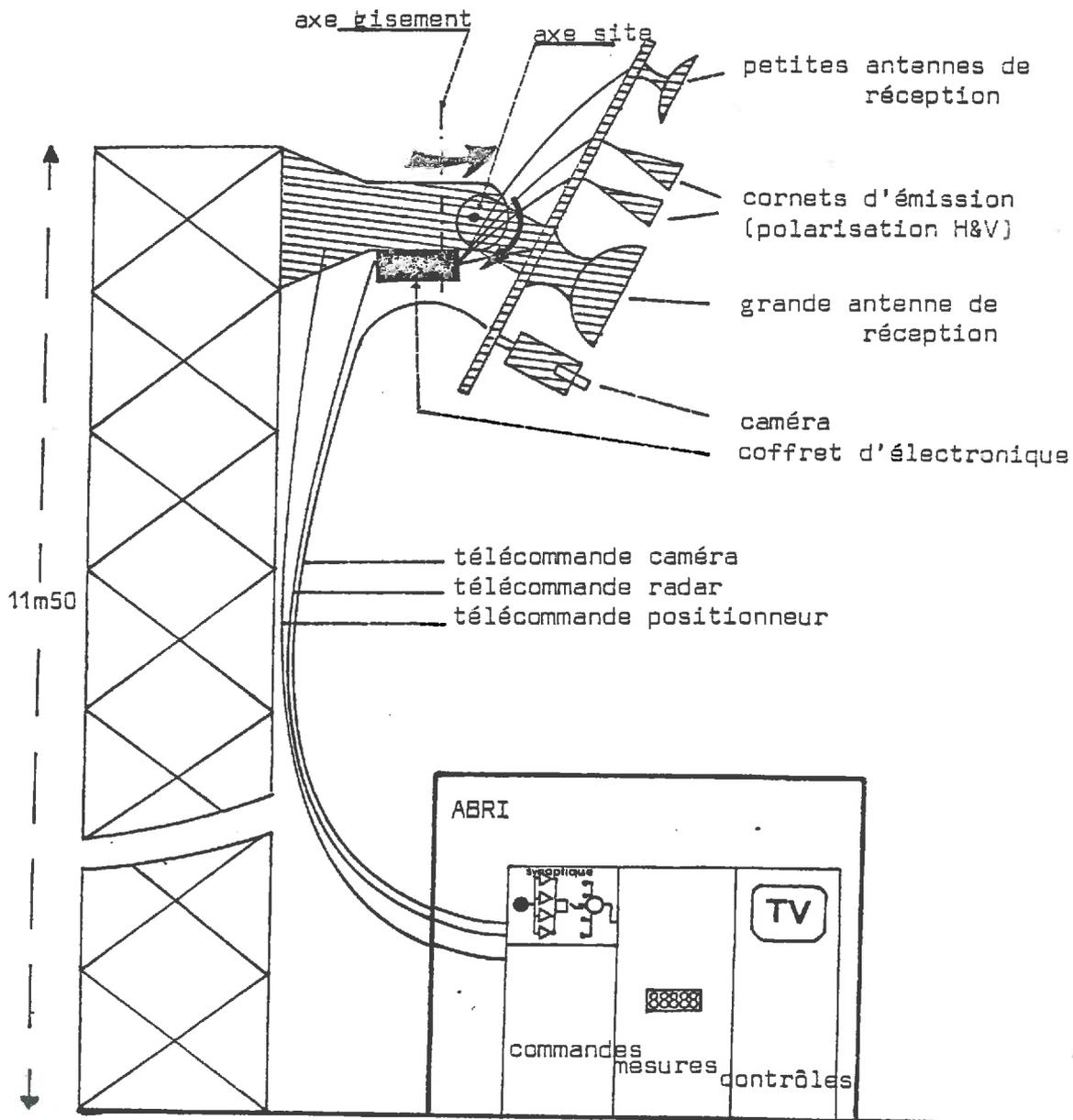


fig.11 Configuration du syst'eme RAMSES.

2 - PRINCIPE

2.1. Rep'erage

Dans tout syst'eme actif, le probl'eme est d' avoir un moyen de comparer le signal 'emis par rapport 'a celui qui revient (r'etrodiffus'e). Il faut 'evaluer la distance parcourue par le signal 'echo dans le temps.

Pour observer des cibles 'a grande distance, on peut utiliser des variations dans le temps de l' amplitude du signal 'a l' exemple des radars 'a impulsions avec 'emission d' une impulsion toutes les micro-secondes (fig.12).

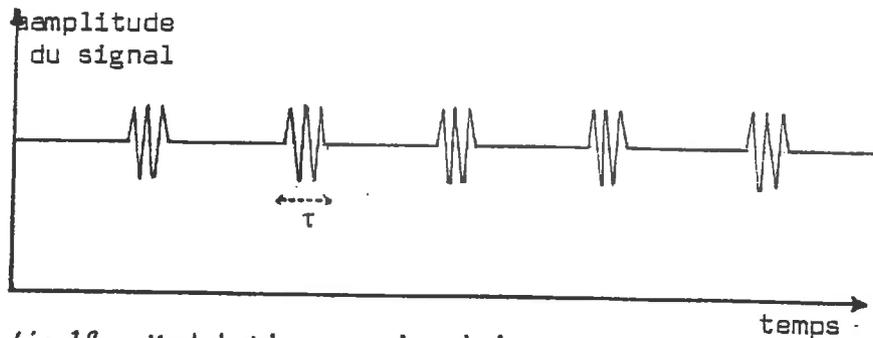


fig.12 Modulation par impulsion

Dans cette expérience-ci, les observations se font à faible distance (de 0 à 200 m). En utilisant les impulsions, le décalage entre le signal émis et l'écho serait trop bref pour être mesurable. On utilise alors un autre système de repérage appelé modulation de fréquence ; la puissance d'émission est constante et la fréquence varie d'un cycle à l'autre (fig. 13).

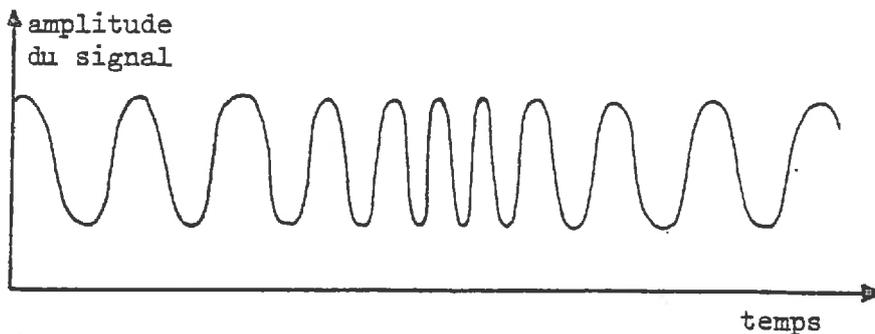


fig.13 Modulation de fréquence

La variation de la fréquence dans le temps se fait en dent de scie (fig. 14).

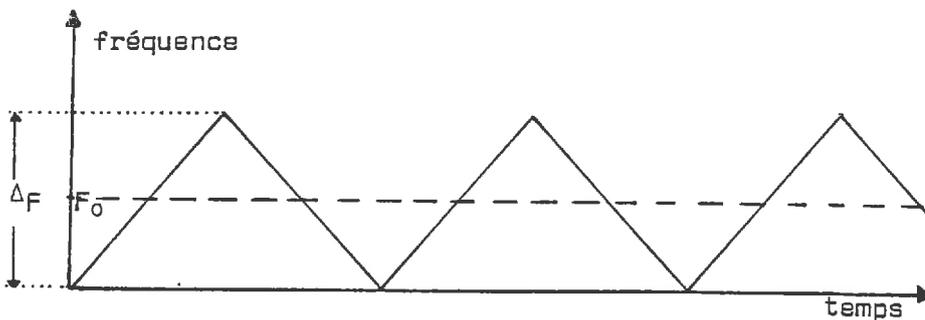


fig. 14 Modulation triangulaire

Le signal d'émission se caractérise par :

- sa fréquence d'émission F_0 (1,5 GHz - 3 GHz - 4,5 GHz ou 9 GHz), ou fréquence centrale ;
- l'excursion en fréquence ΔF , c'est-à-dire la façon dont la fréquence centrale est modulée : 20 ou 40 MHz (aspect de la courbe de la figure 14).

2.2. Polarisation

Le signal d'émission se caractérise aussi par sa polarisation, c'est-à-dire la direction du vecteur champ électrique \vec{E} .

C'est le cornet d'émission qui impose cette direction.

- .cornet horizontal : polarisation d'émission Verticale,
- .cornet vertical : polarisation d'émission Horizontale.

2.3. Trajet du signal

Le trajet du signal dans le système d'émission-réception peut être schématisé de la façon suivante (fig. 15) :

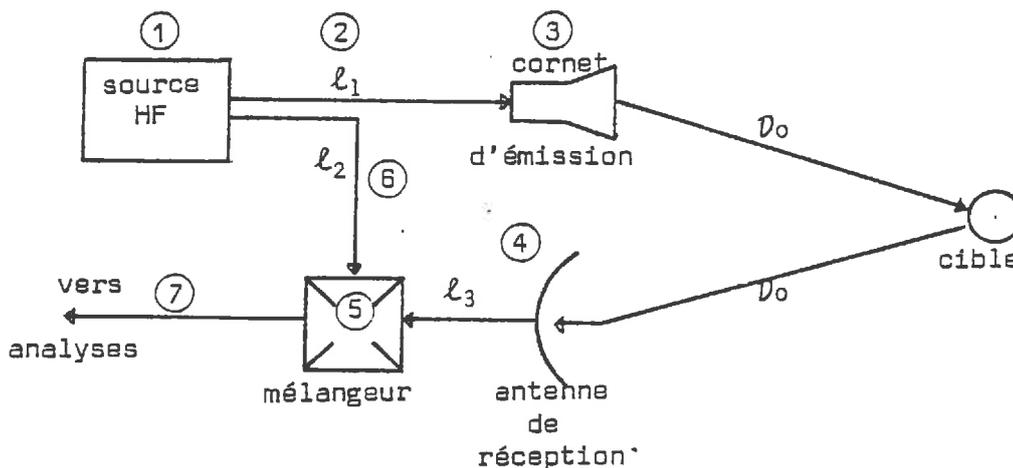


fig. 15 Trajet du signal

Principe :

Le signal micro-ondes est créé au niveau d'une source (1). Par une série d'amplificateurs et de multiplicateurs (2), il est ajusté à la fréquence de travail choisie : 1,5 GHz, 3,5 GHz, 4,5 GHz ou 9 GHz. Une fraction du signal émis (6) est envoyée directement vers le mélangeur et constitue l'oscillateur local. L'autre partie du signal est envoyée dans le système d'émission (3) avec une polarisation donnée. L'antenne d'émission illumine la zone-test. Une portion de ce signal est rétrodiffusée en direction du système de réception (4) et s'ajoute, dans le mélangeur à la fraction (6) du signal non émis. Ce signal de mélange est envoyé vers l'analyse (7). Il y a 4 configurations de polarisation possibles du système émission-réception :

Emission	Réception
H	H
H	V
V	H
V	V

En représentant le battement des signaux non émis (6), (appelé oscillateur local) et écho (4), on observe un décalage correspondant au temps t_0 , mis par le signal pour parcourir $(2 D_0 + l_2 + l_3 - l_1)$, écart de distance parcourue entre le signal émis et le signal écho. Dans le mélangeur, on obtient un signal dont la fréquence correspond à ce décalage :

La fréquence de battement F_b est fonction du temps t_0 (fig. 16).

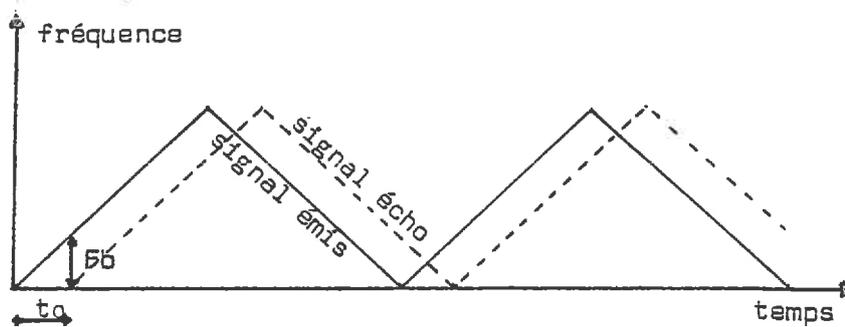


fig. 16 Obtention de la fréquence de battement (F_b)

2.4. Mesure du signal

La surface du sol a un comportement spécifique vis-à-vis de la rétrodiffusion : celui-ci s'évalue par le coefficient de rétrodiffusion σ_0 , ou *pouvoir réflecteur par unité de surface éclairée*, dans des conditions précises d'incidence de visée, de fréquence, de polarisation.

$$\sigma_0 = \frac{K \cdot D^4 \cdot Pr}{Sr}$$

K : coefficient d'étalonnage
D : distance cible-antenne (m)
Pr : puissance reçue (dB)
Sr : aire de la cible (m^2).

La mesure s'effectue par la lecture, au voltmètre, du niveau de la puissance reçue Pr (en dB) du signal écho.

3 - CONTRAINTES

3.1. Contraintes de visées

a) Antenne

L'antenne émettrice émet l'énergie dans un faisceau de 60° au-dessus de la zone-test. L'antenne réceptrice prend en compte l'énergie qui est issue des éléments rayonnants situés dans le parcellaire effectivement observé par le lobe principal de cette antenne (fig. 17).

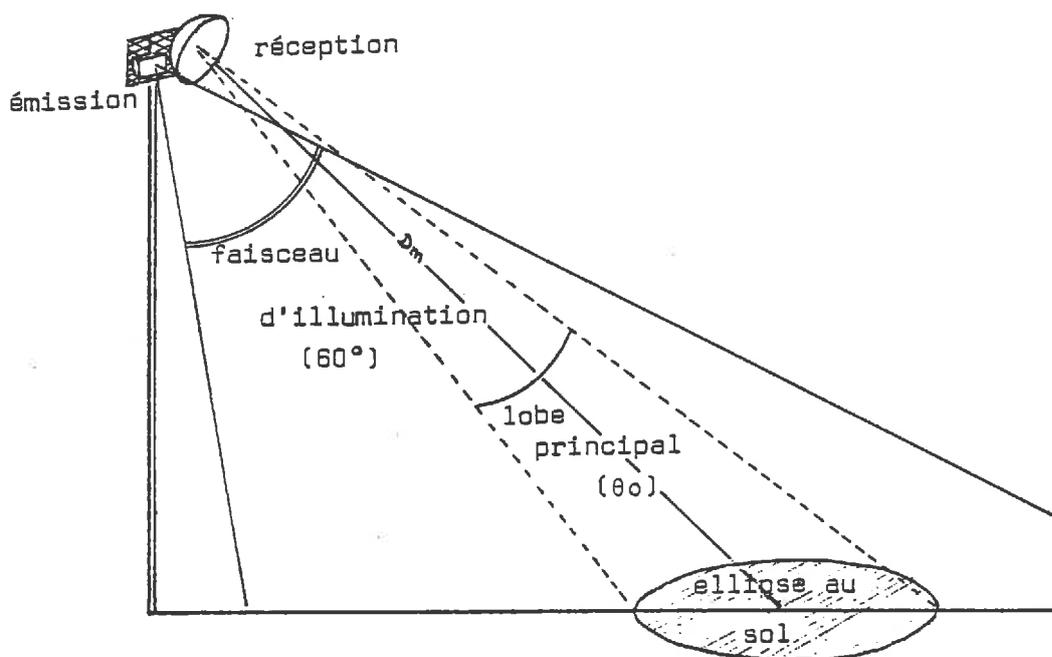


fig. 17 Contraintes d'antennes.

L'antenne est caractérisée par l'angle solide du lobe principal : ouverture θ_0 . Suivant la fréquence et l'antenne utilisées, cette ouverture est plus ou moins grande, et la distance minimale d'observation (liée à la formation du lobe principal) est variable.

	Fréquence GHz	θ_0°	Dm
Grande antenne	1,5	12°	12
	3	6°	24
	4,5	4,4°	36
	9	2,2°	72
Petite antenne	3	15°	12
	4,5	10°	12
	9	5°	12

Dm = distance minimale d'observation, en mètre, entre l'antenne et la cible.

b) Echantillons indépendants

Suivant l'angle d'incidence, le faisceau du lobe principal intercepte le sol selon une ellipse de surface variable S_r . Cette ellipse englobe un certain nombre de surfaces élémentaires appelées les échantillons indépendants. Ils se comportent de manière indépendante vis-à-vis de la rétrodiffusion du signal. Sur un sol nu, facteur invariant dans le temps, ces échantillons sont décorrélés de manière spatiale. Plus la taille de l'ellipse est grande et plus ce nombre d'échantillons est important. La taille d'un échantillon est liée au pouvoir de résolution radiale du système dans une configuration donnée d'antenne et de fréquence (annexe 2, p. 9). Pour une incidence et une fréquence donnée, la valeur de σ_0 aura d'autant plus de signification et de précision que le nombre d'échantillons indépendants sera élevé.

Nous essaierons donc d'obtenir, pour une incidence donnée, un maximum de visées sur des ellipses contiguës afin d'améliorer la précision.

3.2. Contraintes de poste fixe

L'installation du RAMSES en haut d'une tour de 11m50 limite les possibilités de configurations géométriques de visées (annexe 2, p. 10, schéma d'un exemple à 1,5 GHz).

Cette limitation joue autant en incidence qu'en gisement :

- .en incidence : il n'est pas possible de faire des visées avec un angle inférieur à 12° , sinon l'embase de la tour (béton et poutres métalliques) intervient dans la rétrodiffusion.
- .en gisement : le débattement maximum est de 90° , limitant considérablement le nombre de visées indépendantes surtout à faible incidence. De plus, le contour irrégulier de la zone-test ne permet pas d'utiliser le débattement de 90° à toutes les incidences (fig. 18).

3.3. Contraintes d'utilisation

a) Étalonnage externe

L'étalonnage du système s'obtient par la mesure de la puissance reçue à partir d'une cible étalon dont la "surface apparente radar" σ est connue et invariante dans le temps : c'est le cas d'une sphère métallique, ou d'une lentille de Luneberg, dont les surfaces σ sont calculables de manière absolue, ou de trièdres réflecteurs à angles droits dont la surface σ est évaluée de manière moins précise.

Cet étalonnage est une nécessité pratique, évitant de vérifier des grandeurs absolues instantanées propres au système d'émission-réception. Ces grandeurs sont sujettes à des variations imprévisibles avec le temps et très longues à mesurer :

- .la puissance d'émission
- .le gain d'émission
- .le gain de réception
- .le gain de la fréquence intermédiaire
- .les pertes.

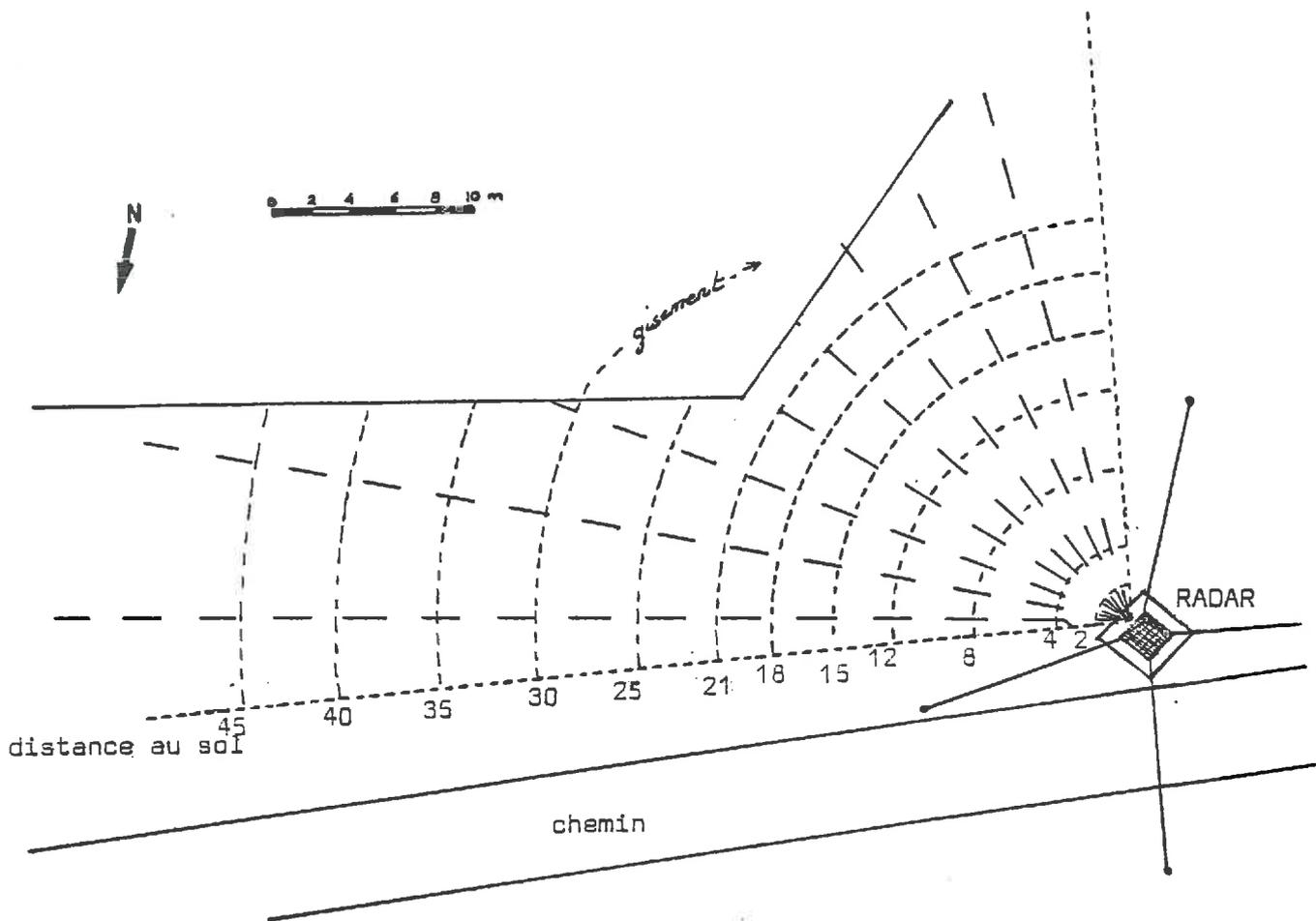


fig. 18

Zone des visées sur la parcelle des Divisions.

Cet étalonnage permet de calculer chaque jour la valeur du coefficient K qui intervient dans les formules du coefficient de rétrodiffusion.

b) Temps de manipulation

Lors d'une séquence de travail, on obtient les mesures de la puissance du signal rétrodiffusé en balayant la zone-test en incidence. A chaque incidence de visée, on essaiera d'obtenir un maximum de pointages distincts en gisement. La moyenne de toutes les puissances ainsi reçues permettra de calculer la valeur du coefficient σ_0 pour l'incidence considérée. Toutes ces mesures se feront à une fréquence donnée, sur une antenne de réception donnée et dans les 4 configurations de polarisation. Une séquence complète comprendra toutes ces visées et s'effectuera dans des conditions naturelles (humidité, rugosité) invariantes dans la mesure du possible. Les différentes possibilités de visées peuvent être schématisées ainsi :

incidence	10°	12°	14°	17°	19°	21°	23°	27°	35°	41°	52°	61°	72°	79°
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
							X	X	X	X	X	X	X	X
									X	X	X			
									X	X	X			
												X		

Nombre de pointages possibles en gisements (en 1,5 GHz grande antenne).

X = 1 pointage.

Cette définition d'une séquence de travail permet d'explorer de manière systématique les différentes conditions de visées (fréquence, polarisation, incidence). Elle répond à un désir du C.N.E.S. de tester l'appareil dans toutes les configurations possibles.

Le faible nombre d'échantillons indépendants pris en compte par les visées aux incidences faibles est compensé par des visées plus nombreuses. Il sera ainsi possible d'effectuer des moyennes sur les mesures faites à incidences très voisines, ce qui améliorera un peu la précision des résultats.

La durée de réalisation d'une séquence de travail dépend de trois facteurs :

1. le temps de lecture de la puissance reçue (environ 3 à 4 minutes pour un pointage donné).
2. la vitesse de rotation du support d'antennes, liée à la vitesse respective des moteurs de site et de gisement.
Il faut, pour parcourir son débattement, compter 4 minutes au moteur de site et 7 minutes et demie au moteur de gisement.
3. l'ouverture d'antenne: plus l'angle solide du faisceau du lobe principal est étroit, plus le nombre de pointages décorrélés, à une incidence donnée, est important. Le temps de mesures en est d'autant plus long.

Les séquences à 1,5 GHz nécessitent ainsi à peu près 2 h, celles à 3 et 4,5 GHz nécessitent 2h30 à 3h, et celles à 9 GHz nécessitent plus de 3 h.

Avec les étalonnages nécessaires avant chaque séquence, il n'a jamais été possible de faire plus de 2 séquences par jour lorsque les conditions météorologiques étaient favorables.

Ces contraintes sont un facteur important dans le nombre total de séquences utilisables pour la phase d'interprétation des résultats.

- La visée à un gisement donné est obtenue par chronométrage, la vitesse de rotation du moteur de gisement ayant été étalonnée au début de la campagne.

Un protocole de relevé de mesures au cours d'une séquence a été établi (se reporter à la fiche d'expérience ci-après). Il permet d'avoir, pour chaque visée, tous les éléments nécessaires :

- .Pour le calcul du σ_0 (K, D, Sr, Pr, i)
- .Pour l'appréciation des bonnes performances du système (Fb, atténuation).

c) Risques de panne

Comme le RAMSES est un prototype, bon nombre de pannes, tant mécaniques qu'électroniques, se sont produites. L'absence de poste de maintenance à proximité directe de l'expérimentation a réduit la durée d'utilisation.

4 - CONCLUSION

Le prototype RAMSES possède une technologie complexe. Le déroulement de notre campagne d'expérience est très lié à la nature des contraintes et avantages imposés par ce système :

- .un grand nombre de mesures est nécessaire pour compenser leur imprécision (problème des échantillons indépendants) ;
- .le temps de manipulation est long pour réaliser une seule expérience ;
- .le grand nombre de possibilités techniques limite l'approfondissement de chacune d'entre elles ;
- .la manipulation pratique est relativement simple.

Chapitre II

L'ACQUISITION DES DONNÉES DE TERRAIN

La caractérisation de la zone-test doit être réalisée grâce à des méthodes permettant d'accéder à des données à la fois *représentatives, objectives*, et de *signification concrète*. Pour limiter la durée des mesures quotidiennes réalisées en liaison avec les séquences de travail de RAMSES, il est nécessaire d'utiliser des méthodes *simples, maniables, répétitives*. Enfin, pour étudier des mesures de paramètres terrain en corrélation avec les mesures de scattérométrie, il est indispensable que les méthodes employées soient indépendantes des micro-ondes (c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas les micro-ondes comme moyen d'accéder à une mesure d'un paramètre-terrain).

L'étude bibliographique préalable à cette campagne d'expérimentation a permis de mettre en évidence les paramètres-terrain à prendre en compte :

- les propriétés diélectriques, qui sont appréhendées plus directement, et principalement par l'humidité des sols.
- la rugosité de surface.

D'autres facteurs, ayant une influence plus ou moins directe sur l'état du sol, y ont été adjoints :

- la température du sol,
- la pluviométrie,
- l'évaporation.

Pour tous ces paramètres, nous avons procédé :

1. à l'inventaire des méthodes de mesures existantes,
2. à l'examen des avantages respectifs de chacune,
3. au choix des méthodes à utiliser,
4. éventuellement, au test des méthodes choisies, préalablement à la campagne de mesures.

L'évolution de ces paramètres au cours de la campagne a permis de dégager les éléments essentiels à l'interprétation des résultats obtenus par le scattéromètre RAMSES.

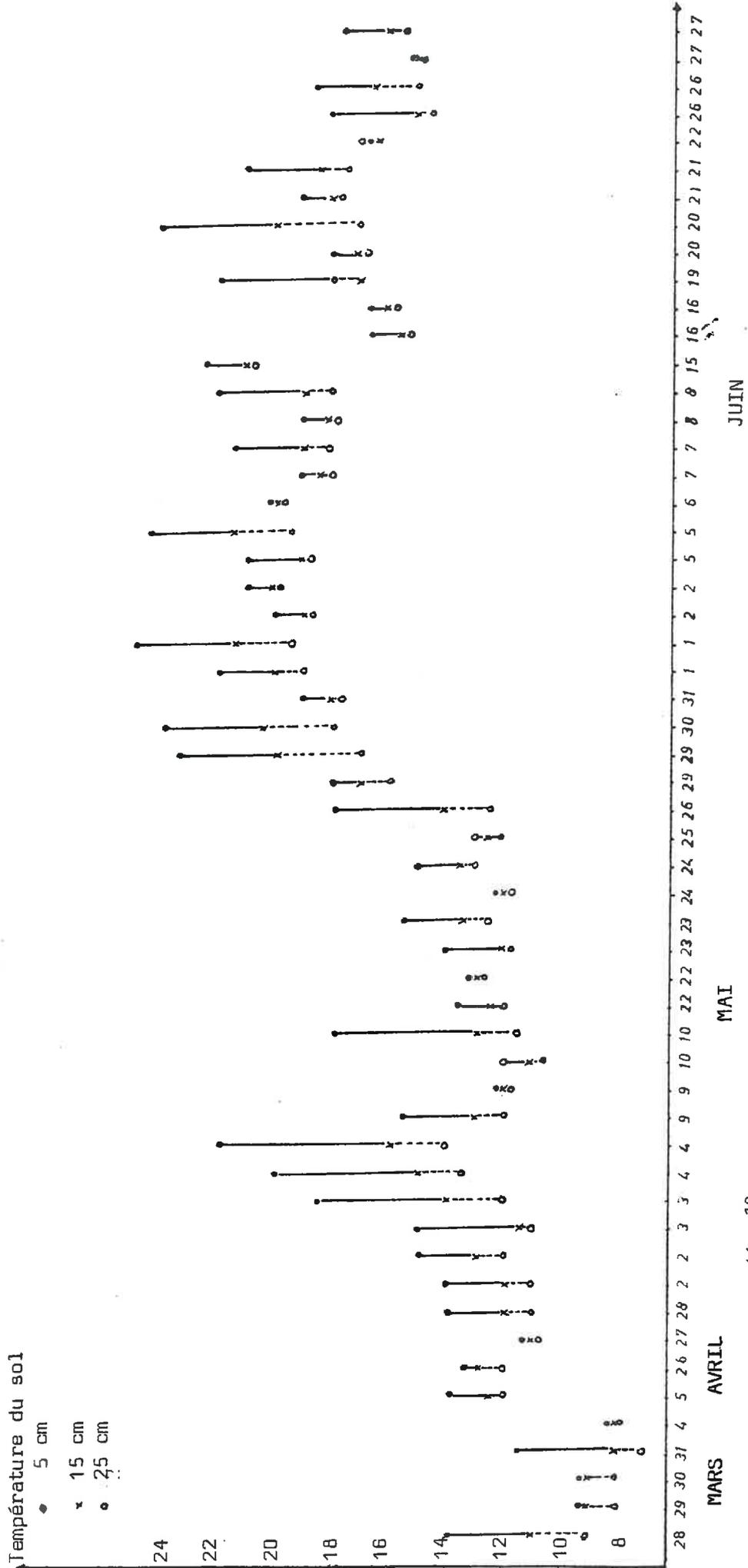


Fig. 19 Evolution des conditions de températures du sol (températures moyennes relevées au cours de la réalisation de chaque séquence.)

I.- TEMPERATURE DU SOL ET COMPOSANTES CLIMATIQUES

1 - METHODES D'ACQUISITION

Des procédés classiques de mesures ont été choisis pour l'étude de ces paramètres qualifiés de secondaires dans une étude micro-ondes en système actif.

- La température du sol a été relevée en continue d'une part grâce à des thermocouples installés en batterie et reliés à un enregistreur 16 pistes (aimablement prêtés par M. BORDES de l'Ecole Nationale Supérieure d'Horticulture). Pour cette installation, les profondeurs d'observation étaient de 5 cm, 15 cm et 25 cm. Des sondes thermiques en platine, reliées à une station d'enregistrement magnétique, permettaient également le suivi temporel des conditions thermiques du sol.

- Les composantes climatiques ont été enregistrées automatiquement par la station mise au point par le Service d'Etudes Climatiques (STEFCE) d'Avignon et installée par MM. VERBRUGGHE et ANTONIOLETTI. Ainsi ont été mesurées, outre la température du sol :

- .l'état d'humidité de l'air et l'évaporation,
- .la pluviométrie.

L'enregistrement automatique (d'une autonomie de 33 jours) a permis une liberté beaucoup plus grande que les thermocouples qui nécessitent l'emploi de glace fondante en permanence.

Le prêt de cette station s'est étendu de février à la mi-avril. Malheureusement, le déroulement difficile de la campagne de terrain n'a permis son utilisation que sur une durée limitée (du 9 mars au 11 avril).

2 - EVOLUTION DE CES PARAMETRES DURANT LA CAMPAGNE

2.1. Température

Elles ont été suivies essentiellement grâce aux thermocouples en batterie.

Les températures moyennes observées durant les séquences de mesures ont augmenté progressivement de 5° à 20° tout au long de la campagne. Les différences classiques d'évolution de température entre la surface du sol et la profondeur ont été régulièrement observées (fig. 19).

2.2. Composantes climatiques

Les relevés sont donnés en annexe 3, p. 11 et 12. Il faut signaler que le printemps 1978 a été particulièrement pluvieux.

II.- HUMIDITE DU SOL

1 - CHOIX DES METHODES DE MESURES

1.1. Les méthodes

Les méthodes de mesures pour déterminer la quantité d'eau contenue dans un sol procèdent soit par extraction d'un échantillon, soit par mesure directe à l'aide d'un capteur approprié.

- La méthode de référence, dite de HENIN consiste à prélever un échantillon de terre, à le chauffer à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant. C'est une méthode très précise, mais lente et qui nécessite un prélèvement et un transport d'échantillons.

- Les méthodes procédant par lecture directe ont souvent un aspect séduisant par leur rapidité de mesure. Elles utilisent en général des propriétés particulières de l'eau.

- la résistivité : telle la méthode de BOUYOUCOS, qui utilise des blocs de gypse ou de plâtre, en continuité hydrique avec le sol. La mesure de la résistivité du bloc permet une évaluation de la teneur en eau du sol, mais la précision n'est pas parfaite car le contact bloc-sol peut être interrompu, par exemple dans le cas d'une dessiccation importante.
- la capacité calorifique de l'eau : la méthode de POUYAUD et CHARTIER (réf. 85) utilise la théorie de la progression d'une perturbation thermique en milieu isotrope et homogène. C'est une méthode rapide, fine et fidèle. Malheureusement, elle est peu connue et il est difficile de se procurer la sonde de mesure appropriée.
- la réflectance de la surface du sol : la méthode de SKIDMORE et coll. (réf. 86) utilise la propriété de l'eau d'absorber certaines longueurs d'onde ($\lambda = 1,95\mu\text{m}$) dans le proche infra-rouge. Elle permet d'apprécier la teneur en eau dans la couche très superficielle du sol, mais elle nécessite l'emploi d'un réflectomètre, matériel très sophistiqué et peu courant en Europe.
- le ralentissement des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène : c'est le principe des méthodes de mesures utilisant les sondes à neutrons. Les appareils correspondants, maintenant très utilisés, sont mobiles, mais ils ne peuvent travailler à moins d'une certaine profondeur du sol (40 cm environ) pour que la sphère d'influence n'intercepte pas une partie de l'atmosphère. Il n'est pas possible d'apprécier l'humidité de surface avec ce type de sonde.

Par contre, il existe des appareils, également à source de neutrons rapides, conçus pour ne travailler qu'à la surface du matériau : les humidimètres à pointe (expérimentés par MM. BELIN et CARRIOU, réf. 81).

Dans les deux cas, l'imprécision de la méthode tient à la présence dans le sol d'atomes d'hydrogène autres que ceux de l'eau. Il est donc indispensable, dans un sol donné, d'étalonner l'appareil.

- les propriétés diélectriques : elles sont utilisées dans la méthode de TRAN NGOC LAN et coll. (réf. 87) pour évaluer la teneur en eau. Mais l'effet des variations de la densité du sol est relativement important.

Cet inventaire de méthodes n'est pas exhaustif. Il nous donne un aperçu des différentes approches de l'humidité du sol.

1.2. Choix et test des méthodes de mesures de l'humidité du sol

La conservation de l'état de surface, durant une certaine période d'étude, impose d'évaluer les paramètres-terrain avec des méthodes peu perturbantes. De telles méthodes présentent un certain nombre d'inconvénients de précision, d'étalonnage ou de technologie.

Aussi, a-t-on choisi d'utiliser simultanément la méthode de HENIN, qui servira de référence et permettra de comparer les mesures avec celles d'autres chercheurs, et une méthode de mesures en place, l'humidimètre à pointe.

a) La méthode de HENIN

Notre ignorance quant à la sensibilité du RAMSES à l'humidité et les capacités de pénétration des ondes émises, a conduit au choix des niveaux de prélèvement d'échantillons : de 0 à 40 cm ; tous les 10 cm, soit plus profondément que l'épaisseur de l'horizon cultural.

Pour éviter de perturber de manière trop importante la zone test par l'ouverture de fosses nombreuses et rapprochées, nous avons procédé par des prélèvements faits à la tarière.

La validité de ce type de prélèvement a été testée en comparant les valeurs d'humidité obtenues sur fosse et à la tarière, sur 50 couples de comparaison (fig. 20).

La droite de régression (en pointillé sur la figure) correspondant à cet ensemble de points à une pente de 0,8. Le coefficient de corrélation r est égal à 0,75, avec une probabilité P inférieure à 0,01 d'être dépassé en valeur absolue.

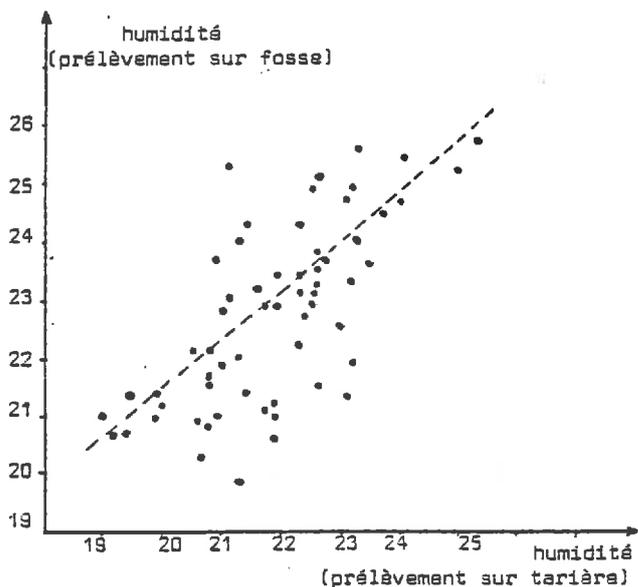


fig. 20 Comparaison des prélèvements à la tarière et sur fosse.

Les variables "taux d'humidité du prélèvement fait par tarière" et "taux d'humidité du prélèvement fait par fosse" sont donc corrélées de manière très significative.

Ce type de prélèvements à la tarière, retenu pour l'expérimentation, permet un gain de temps précieux lors du déroulement de la manipulation.

La nécessité d'un échantillonnage, suffisamment important pour avoir une signification statistique, se heurte aux contraintes de disponibilité du laboratoire.

Lors de chaque journée d'expérience sans pluie, une série de prélèvements a été faite en milieu de journée ; cette série de prélèvements comprend 5 groupes d'échantillons, de 0 à 40 cm, prélevés systématiquement le long de la zone-test.

Ce procédé d'échantillonnage présente deux aspects critiques :

- le nombre d'échantillons est très limité (5) : la signification de la valeur moyenne de l'humidité a été testée durant la campagne de mesures. La dispersion des groupes de 5 mesures a été évaluée par le calcul de leur écart-type. Sur l'ensemble de l'expérimentation, la valeur moyenne des dispersions est :

- .pour les échantillons de surface et à 10 cm de 1,7 % ;
- .pour les échantillons de profondeur de 2,2 % à 20 cm, et 0,5 % à 30 et 40 cm.

- la dessiccation de la couche très superficielle entre le début et la fin de l'expérience ne pourra pas être évaluée. On verra que cet aspect a une importance limitée, de par la sensibilité du système RAMSES à l'humidité.

b) La méthode de mesures par lecture directe

L'objectif porte surtout sur l'appréciation de l'humidité de la couche superficielle du sol.

Par l'intermédiaire du laboratoire des Ponts et Chaussées de Rouen, on a pu disposer d'un humidimètre à pointe du C.E.T.E. de Grand Quevilly par MM. BELIN et CARRIOU.

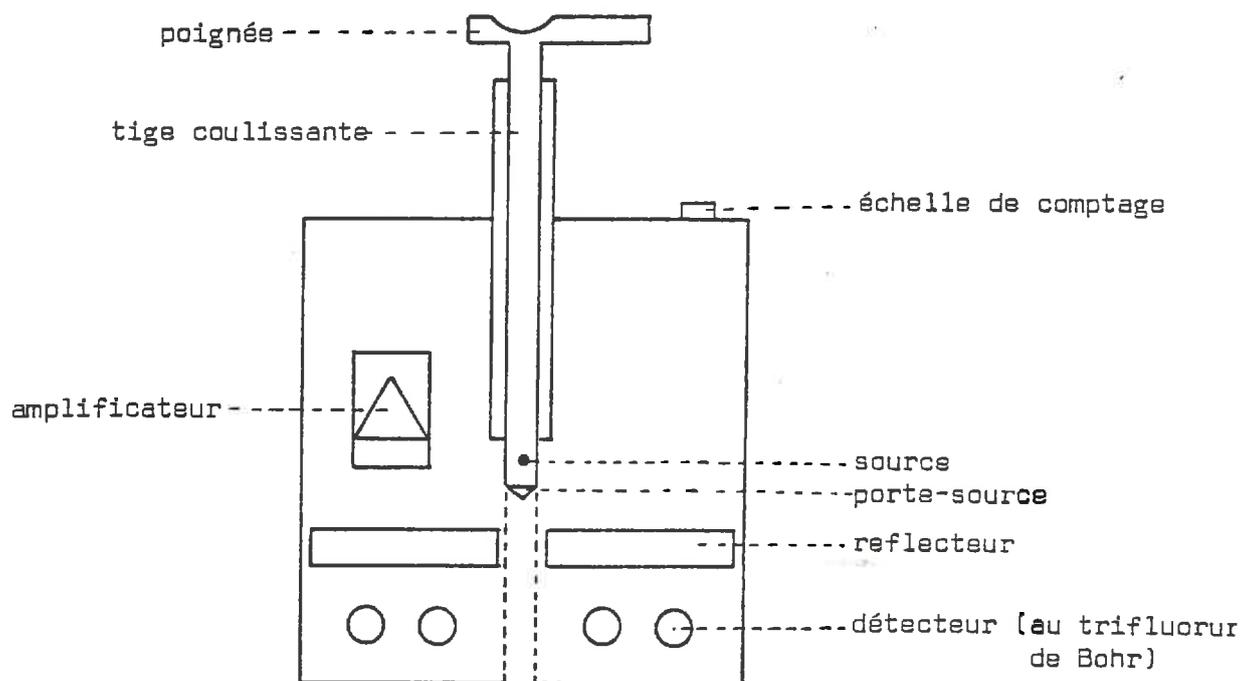


fig.21 Schéma de l'humidimètre à pointe (CETE Rouen)

Le principe de l'appareil est le suivant : une source de neutrons rapides est introduite dans le matériau d'étude à une profondeur donnée. Les neutrons rapides sont ralentis par collision avec les noyaux d'atomes jusqu'à une limite correspondante à l'énergie thermique du milieu. Ces "neutrons thermiques" sont diffusés et absorbés par le matériau. L'hydrogène est l'élément qui a le plus d'influence sur le ralentissement et la diffusion des neutrons, ceci permet de relier la teneur en eau volumique à la mesure de la densité de neutrons thermiques à la surface du matériau.

L'humidimètre comprend :

- .une source de rayonnement,
- .un ensemble mécanique,
- .une partie électronique (échelle de comptage des neutrons thermiques).

Cet appareil nécessite un étalonnage préalable à son utilisation directe. La méthode d'étalonnage la plus simple est une méthode expérimentale : elle consiste à prélever de manière systématique un échantillon de terre de volume connu là où le comptage de neutrons a été effectué. Sur cet échantillon seront mesurées l'humidité volumique et la densité apparente. Le volume de sol exploré par l'humidimètre est de 4 dm^3 . Il convient donc de prélever un échantillon d'une taille de même ordre. (Utilisation de 2 cylindres de $0,5 \text{ dm}^3$ par point de mesure). Une bonne précision dans l'étalonnage nécessite des conditions d'humidité assez variées et environ une centaine de mesures.

Remarque : Cet appareil présente quelques difficultés d'utilisation (poids élevé, forte sensibilité de l'échelle de comptage aux conditions d'humidité ambiante). L'étalonnage a été considérablement ralenti par des conditions climatiques très défavorables. Il s'est poursuivi en même temps que l'expérimentation du RAMSES. La manipulation étant très longue (10 mn par mesure), le nombre de points d'étalonnage n'a pu être très important (60).

2 - EVOLUTION DES CONDITIONS D'HUMIDITE DURANT LA CAMPAGNE

Les relevés d'humidité obtenus grâce à l'humidimètre à pointe et aux prélèvements simultanés d'échantillons de sols dans des cylindres ne se sont pas montrés satisfaisants : l'interprétation de la corrélation entre le comptage neutronique et l'humidité volumique est rendu difficile par :

- .le nombre de points de mesure assez faible (60),
- .la dispersion importante des valeurs de comptage.

Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

1. L'humidité volumique a été systématiquement sous-évaluée, et cela d'autant plus que la teneur en eau réelle est importante : cela suppose que le temps de dessiccation du prélèvement (48 h) n'a pas été suffisant pour un dessèchement complet des échantillons (occupant un volume de $0,5 \text{ dm}^3$).

2. L'humidimètre à pointe a été gêné dans son fonctionnement par des conditions d'humidité ambiante trop élevées.

Comme les comptages obtenus ont permis de retrouver une courbe voisine de la sensibilité connue de l'appareil, la première hypothèse est la plus satisfaisante.

Les relevés d'humidité pondérale (par rapport au poids de terre sèche de l'échantillon), ont été faits systématiquement au cours de la campagne (le nombre total d'analyses réalisées est de 1 250). Elles permettent un suivi beaucoup plus régulier des conditions de terrain (fig. 22).

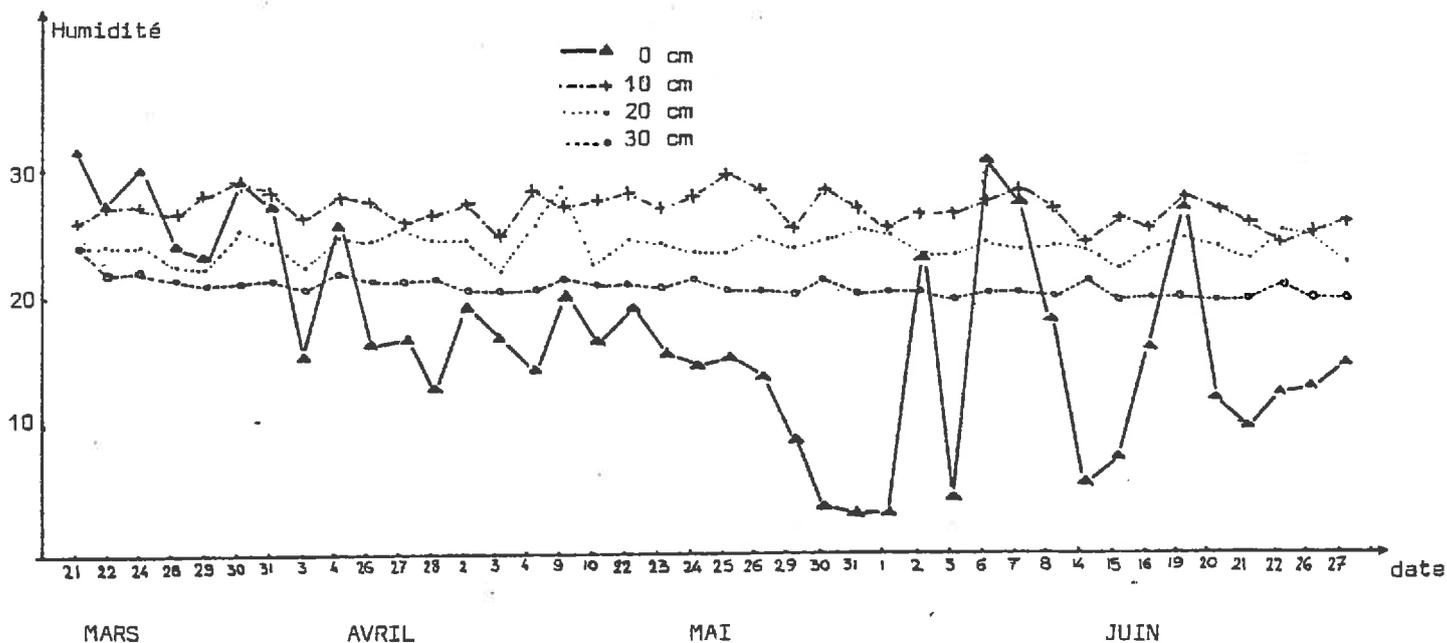


fig.22 Humidité du sol (en % TS) durant les séquences de scattérométrie

- .l'humidité de surface connaît les plus grandes variations au cours du temps et sur une vaste gamme de valeurs : de 3 % à 31 % ;
- .à 10 cm et 20 cm, l'humidité oscille légèrement : de 25 % à 28 % à 10 cm, et de 22 % à 25,5 % à 20 cm ;
- .aux profondeurs de 30 et 40 cm, les valeurs d'humidité sont très proches et quasiment constantes au cours du temps : de 20 % à 22 %.

3 - CONCLUSION

Malgré les quelques variations observées en profondeur, l'amplitude des écarts d'humidité relevées est prédominante. En surface, lors du dépouillement des résultats, on ne prendra en compte que cette valeur d'humidité de surface.

Chacune de ces valeurs est en réalité la moyenne des mesures obtenues à partir des 5 échantillons de surface. Sur l'ensemble de l'expérimentation, la valeur moyenne des dispersions des échantillons de surface est de l'ordre de 1,7 %. Cette évaluation est importante dans la détermination des conditions d'expérimentation identiques ou distinctes, qui aura lieu dans la dernière partie.

La constance relative de l'humidité en profondeur ne permettra pas d'évaluer son influence propre sur le signal rétrodiffusé. Si cette influence existe, elle sera liée aux capacités de pénétration de l'onde incidente. Cette influence restera quasiment identique au cours du temps, et aura tendance à "amortir" les comportements du signal rétrodiffusé lors des modifications de l'humidité de surface.

III.- RUGOSITE DU SOL

La caractérisation de l'état de surface d'un sol nu pose un problème de définition et de quantification de la rugosité.

Un certain nombre de facteurs (pédologiques, anthropiques, climatiques...), interviennent plus ou moins directement sur la rugosité du sol. L'influence relative de ces facteurs et l'évolution dans le temps de la surface du sol ont fait l'objet d'études approfondies de la part des agronomes (réf. 82).

Pour cette étude, la rugosité d'un sol nu a été abordée plus particulièrement par la recherche d'une caractérisation de l'état propre des surfaces observées.

1 - LES METHODES

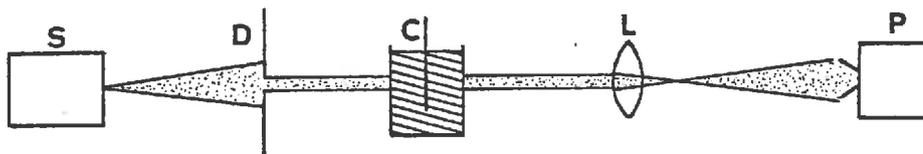
1.1. Restitution en 3 dimensions

La réalisation de moulage d'états de surface a été tentée, pour disposer d'éléments de référence pour une quantification ultérieure de la rugosité. La technique de durcissage du sol par infiltration de résine, -utilisée par Mr. GUILLORE au laboratoire de Pédologie pour la fabrication de lames minces, s'est avérée difficile à appliquer dans le cas de sols en place, humides et délicats à prélever. Ces difficultés nous ont poussées à utiliser d'autres procédés.

1.2. Recherche de directions privilégiées sur un état de surface

Cette recherche s'est effectuée grâce à l'utilisation des spectres de diffraction obtenus par un faisceau LASER illuminant des documents photographiques (rendue possible grâce à Mme LEGENDRE de l'Institut Français du Pétrole).

Le principe de la technique est schématisé sur la figure 23. Si le film photographique présente des directions privilégiées répétées de manière périodique, ces directions se traduiront sur le spectre par des points. Si ces directions privilégiées constituent un phénomène répétitif, mais non périodique, le spectre présente des directions de diffraction.



S: source laser

D: diaphragme

C: cuve de décaline où baigne
le film photographique

L: lentille convergente

P: appareil photographique, situé à
la distance précise où le spectre
se forme de manière nette.

fig.23 Schéma d'obtention d'un spectre de diffraction.

Sur les documents photographiques testés (labour frais sur sol limoneux sec), les spectres obtenus traduisent, par leurs directions de diffraction, l'alignement du labour observé à l'oeil nu, et cela seulement lorsque la fréquence du labour est basse par rapport à l'échelle du document.

Ces spectres ne donnent pas des directions de diffraction traduisant l'existence de directions secondaires.

De tels documents paraissent donc difficilement exploitables pour une quantification de la rugosité.

1.3. Relevé des "altitudes" sur une surface échantillonnée

a) Utilisation de la stéréographie

Cette technique nécessite l'emploi de 2 appareils photographiques couplés sur un pied. La prise de vue doit être verticale. Le dépouillement des photographies se fait manuellement à l'aide d'un stéréoscope muni d'un palpeur d'altitude (au laboratoire de télédétection de M. GOILLOT au C.N.R.A.). C'est une opération très longue.

La complexité de la prise de vue et la durée du dépouillement ont conduit à l'abandon de cette méthode.

b) Utilisation de la photogrammétrie

La collaboration de l'Institut Géographique National a été envisagée pour la réalisation de relevés photogrammétriques sur différents états de surface d'un sol nu. Malheureusement, le coût très élevé (10 000 F) d'un seul relevé nous a conduit à chercher des méthodes moins onéreuses pour cette première étape de définition et de quantification de la rugosité, sans pour autant rejeter définitivement cette solution.

c) Utilisation d'un conformateur (ou aspérimètre)

Ce genre d'appareil (peigne à dents mobiles), déjà utilisé en Agronomie (Réf. 82), permet de faire des relevés de dénivellés en alignement sur la surface considérée, sans perturber celle-ci. MM. BOIFFIN et SEBILLOTE ont estimé la rugosité d'une surface à l'aide d'un appareil de ce type, et d'observations visuelles complémentaires. Par le relevé des cotes de chaque point de la surface le long d'une ligne droite, ils ont défini un indice d'aspérité comme "la longueur de la ligne brisée obtenue en joignant sur un graphique les points correspondants à chacune des cotes". Au cours du temps, l'évolution de cet indice (toujours calculé sur la même ligne de terrain) a permis de suivre la dégradation de la surface sur une année. D'autres critères d'observations ont également été pris en compte (pluies cumulées, indice de perforation, indice de dépôts, hauteur moyenne de la surface, stabilité structurale).

Selon ce principe, un appareil a été réalisé grâce à la collaboration de M. BRANCHY, de la chaire de Machinisme Agricole. Notre objectif essentiel est la caractérisation quantifiée d'une surface rugueuse.

Cet appareil offre l'avantage d'une grande simplicité de principe et d'une bonne maniabilité. Il permet de réaliser des relevés d'altitudes d'une manière assez rapide.

Il a été nécessaire de réaliser une première investigation des possibilités de cette méthode au cours d'une période préliminaire à la campagne du RAMSES.

Cette investigation comporte :

- .une phase de collecte des données,
- .une phase de traitement numérique assistée par ordinateur (KING C. et KING D., réf. 84).

2 - TEST DE LA METHODE CHOISIE

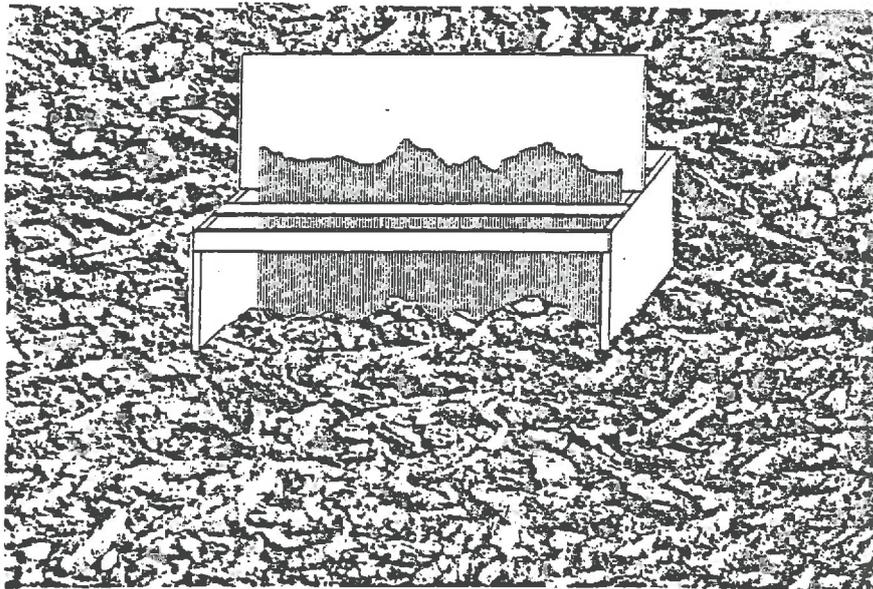
2.1. Collecte des données de terrain

Dans la méthode choisie pour caractériser un état de surface, on relève l'altitude de plusieurs points de cette surface. L'échantillonnage de ces relevés se fait suivant des transects parallèles à l'aide du système CLEMENTINA.

a) Principe de CLEMENTINA

(Construction Légère de Mesures d'Eléments Naturels sur le Terrain, I.N.A.).

C'est une structure légère (1 m x 0,50 m) dont la partie mobile est constituée par 108 baguettes justaposées sur un mètre de long (fig. 24). L'ensemble déposé à la surface du sol, permet aux baguettes de se disposer suivant le dénivelé réel, reproduisant ainsi le transect des altitudes de la surface, avec un pas d'échantillonnage de 1 cm.



- fig.24 Système CLEMENTINA

b) Choix de la taille du relevé

Ce choix constitue un point délicat et important pour la suite de l'étude.

Un certain nombre de contraintes ont déterminé la taille, sinon optimale, du moins opérationnelle du relevé :

- la dimension des surfaces interceptées par le scattéromètre (annexe 2, p. 9).
- la nécessité d'une signification statistique des données,
- les disponibilités de mémoires de l'ordinateur MITRA 15, (10 000 nombres entiers),
- la direction du travail cultural étudié,
- le temps nécessaire à la collecte des données d'un seul relevé.

Les relevés s'effectuent dans un rectangle de 6 m², suivant de transects de 3 mètres de long, répétés tous les 10 centimètres : soit 20 transects, ou un total de 300 x 20 = 6 000 données par relevé.

Pour relever l'ensemble d'un transect, on réalise une translation longitudinale de la structure complète le long des rails. Ainsi, 5 transects juxtaposés se font par bloc de 1 m, répétés 3 fois. Une zone de recouvrement est prélevée 2 fois, pour vérifier la bonne continuité des transects. Cette séquence se reproduit 4 fois pour obtenir la surface de 2 x 3 m. La collecte des données proprement dite s'effectue par prises de vues photographiques de la disposition des baguettes en une position donnée. Un relevé complet représente 60 photographies (fig. 25).

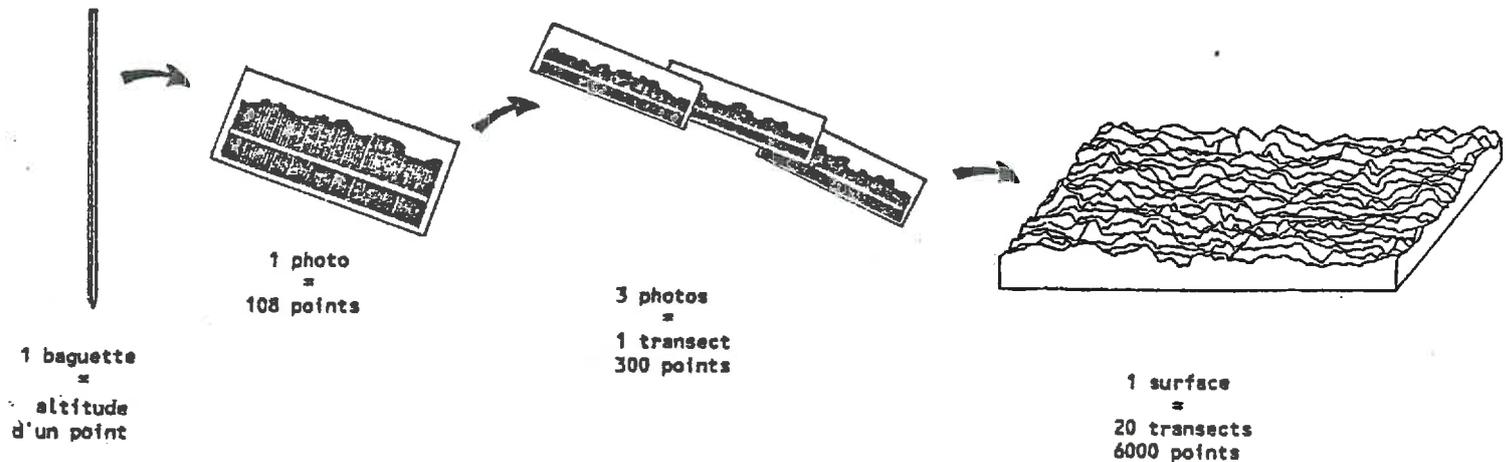


fig.25

Principe d'acquisition des données de rugosité

c) Conversion des données photographiques en données digitales

1. Transcription sur bande magnétique :

Cette conversion s'opère par numérisation des données photographiques grâce au système D.M.A.C. installé au département géomatique de l'Institut Géographique National. Ce système dispose d'une tête de lecture reliée à une table normée automatiquement sur deux axes (X et Y) et à un bloc d'enregistrement. L'enregistrement est fait avec la précision du 1/10^e de millimètre.

Les données sont directement transcrites sur bande magnétique : on dispose ainsi d'un fichier de données brutes, représentant des enregistrements codés pris photographie par photographie, avec des altitudes liées à l'échelle du document photographique.

2. Construction d'un fichier cohérent :

Il s'agit d'établir un fichier où les données auront une valeur égale aux cotes réelles des points échantillonnés, et où les transects seront continus sur 300 points, et non en trois enregistrements séparés. Un programme de lecture a donc été établi. Il tient compte de plusieurs problèmes : la recherche d'erreurs dans l'enregistrement, la recherche du niveau de base, la conversion des données à l'échelle réelle, le raccordement cohérent des enregistrements et le codage de chaque transect.

On dispose ainsi, sur la bande magnétique, de données représentant les altitudes de 6 000 points pour chaque surface relevée.

d) Critique de la méthode

- La définition d'une altitude de référence est un point délicat si l'on veut définir une référence absolue. Une pente légère ou des modulations de grande amplitude, sur le terrain observé, pourraient influencer les dénivellés propres au travail cultural. C'est pourquoi ont été tentées des méthodes de traitement indépendantes du niveau de base. Avec d'autres méthodes, on a montré que la tendance (droite de régression) des transects est confondue avec leur plan moyen.

- L'évaluation du temps global de prise des données est importante. Elle va déterminer en partie le nombre de surfaces de prélèvements qu'on peut réaliser sur chaque type de rugosité d'un sol nu :

1. Relevé photographique du dispositif sur toute la surface choisie	2 h
2. Tirage sur papier photographique* des 60 clichés de cette surface	1 h
3. Numérisation des 60 clichés sur le système DMAC	<u>3 h</u>
Temps nécessaire à l'acquisition digitale des données d'une surface de prélèvements	6 h

e) Etablissement d'un fichier de base

C'est une phase préliminaire. Elle permet de tester les possibilités des traitements qu'on peut effectuer à partir de ces données. Dans un fichier figurent :

- .des types de travaux culturaux considérés comme "rugueux" à priori (cas des surfaces labourées) ;
- .des travaux culturaux d'âges différents, sur des sols de même type ;
- .des relevés correspondant à des transects parallèles et perpendiculaires à la direction du travail cultural.
- .des relevés effectués à la même date sur la même parcelle, dans deux directions pour évaluer la représentativité de l'échantillonnage.

*Référence Kodabrom, II RC.N2, très peu sensible aux variations de température.

Date	Labour	Sens du prélèvement	N° du relevé
10 Oct.	ancien	parallèle	1 a
11 Oct.	ancien	perpendiculaire	3 a
12 Oct.	ancien	parallèle	2 a
12 Oct.	ancien	perpendiculaire	4 a
26 Oct.	ancien	perpendiculaire	1 b
27 Oct.	frais	perpendiculaire	2 b
28 Oct.	frais	parallèle	3 b
29 Oct.	frais	parallèle	4 b

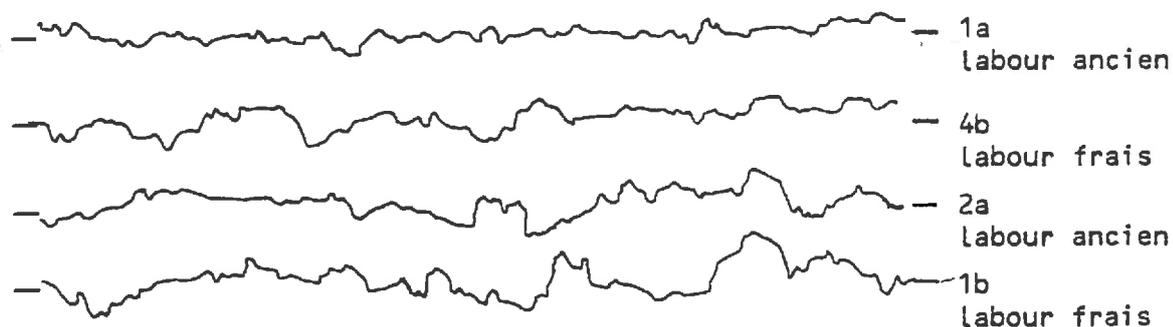
2.2. Recherche d'une caractérisation de l'état de surface

(traitements numériques assistés par ordinateur)

Cette étude doit permettre d'élaborer une caractérisation quantifiée de l'état de surface d'un sol nu, permettant de distinguer des rugosités différentes :
.sur des transects,
.sur l'ensemble d'un relevé de surface.

Les traitements mathématiques ont été effectués transect par transect, ce qui a permis de les comparer les uns aux autres (fig. 26).

fig.26 Exemples de transects (longueur 3 mètres)



Le fichier ayant été établi à partir de surfaces labourées, la recherche des phénomènes périodiques d'un tel état de surface a constitué une première étape.

a) Recherche de phénomènes périodiques

.1. Fonction d'autocorrélation :

La fonction d'autocorrélation permet d'étudier des couples de cotes X_i et $X_{i+\tau}$, τ étant le pas d'échantillonnage. Le coefficient d'autocorrélation est :

$$\rho = \frac{\text{cov}(X_i, X_{i+\tau})}{\text{VAR}(X_i)} \quad \text{avec} \quad -1 \leq \rho \leq +1$$

Il est nul si les variables sont indépendantes, il est égal à -1 ou +1 si les variables sont corrélées.

Le programme utilisé est détaillé, p.14 en annexe 3 : il concerne le programme principal "AUTO CORRELATIONS" et les sous-programmes "LISS", "IMPRI", "CORB", "NUAG", "CVIA".

Les résultats obtenus sur ce fichier de labour posent certains problèmes d'interprétation autant en mathématiques que dans la compréhension de la réalité correspondante. La valeur du seuil, à partir duquel le coefficient ρ est significatif d'une corrélation à un pas d'échantillonnage donné, n'est pas nettement défini suivant les tables. Les résultats ne sont pas du tout reproductibles d'un transect à l'autre, enfin, ils ne concordent pas du tout avec la réalité observée sur les relevés.

.2. Analyse spectrale :

Ce premier type de programme informatique (disponible au Service Informatique de l'I.N.A. Paris) s'appuie sur la méthode de la transformée de FOURIER ; celle-ci permet de décomposer une série en une somme de termes harmoniques de la forme :

$$X_t = \sum_{j=1}^q A_j \cos. (\omega_j t + \phi) + B_j \sin. (\omega_j t + \phi)$$

où chaque terme de la somme a une fréquence de $\frac{2\pi}{\omega_j}$

Les séries temporelles que l'on rencontre dans la réalité ne sont pas forcément représentables par une somme de termes harmoniques. Il faut chercher à les approcher au mieux. Chacune des fréquences $\frac{2\pi}{\omega_j}$ de la série de Fourier est explorée. La variance de cette fréquence $\frac{2\pi}{\omega_j}$ est comparée à celle de la série réelle. Cette comparaison permet de définir la *densité spectrale* :

rapport des variances de la fréquence $\frac{2\pi}{\omega_j}$ et de la fréquence de la série réelle. Une densité élevée, à j donné, $\frac{2\pi}{\omega_j}$ traduit l'existence d'un phénomène périodique de fréquence $\frac{2\pi}{\omega_j}$ dans la série réelle.

Le type de résultat obtenu est loin de ce qui pouvait être attendu. Les pics de densité élevée sont observés proches de l'axe des ordonnées. Ils ne peuvent s'expliquer que par l'existence d'un phénomène de grande

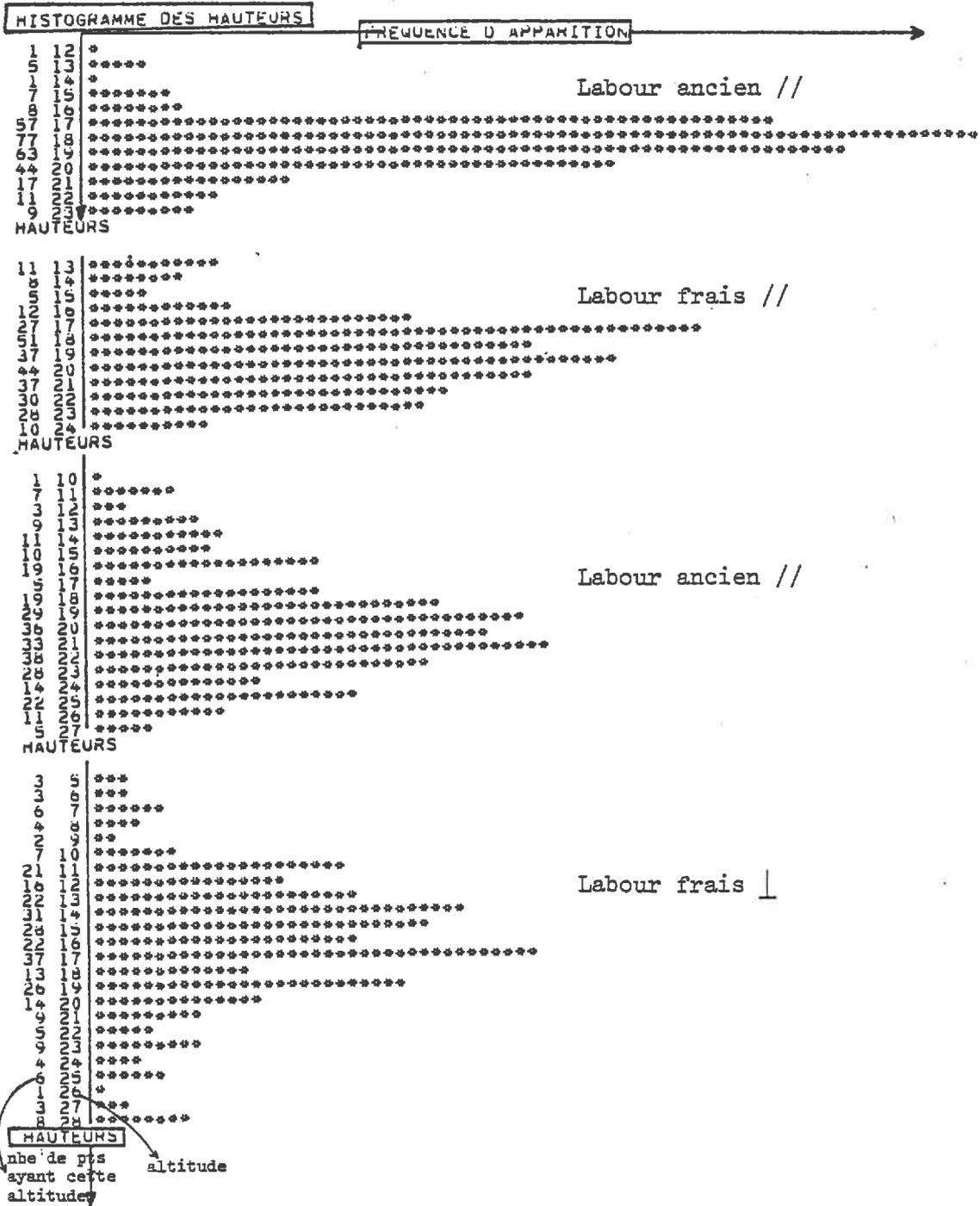


fig. 27 Histogrammes des altitudes
(exemple de 4 transects)

amplitude par rapport à la taille de l'échantillonnage ou par la présence d'une pente générale des transects. L'observation des représentations des transects ne permet pas de mieux préciser ces résultats.

.3. Conclusion :

Ces méthodes n'ont pas permis de mettre clairement en évidence des phénomènes périodiques soit que ceux-ci n'existent pas, soit que la surface échantillonnée soit trop petite par rapport à la période des phénomènes, (on verra que ces méthodes sont plus significatives sur d'autres types de travaux culturaux).

De plus, les difficultés mathématiques d'interprétation ont poussé à chercher des méthodes d'appréhension de la rugosité où la réalité des phénomènes est mieux dominée.

b) Distribution des altitudes d'un transect

Des classes d'altitudes ont été définies tous les centimètres. La fréquence d'apparition d'une classe est représentée en fonction de la taille des classes. Les histogrammes de la figure 27 correspondent aux transects de la figure 26. Ils ne constituent que des exemples particuliers par rapport à l'ensemble des résultats. Ces histogrammes peuvent donner une information sur la rugosité par la largeur de leur base et l'importance de leur pic : ainsi, un pic important et une base étroite correspondraient à une courbe peu rugueuse.

L'écart-type S de la distribution des hauteurs peut rendre compte de la rugosité (fig. 28). Sur cette figure ont été représentés les 20 valeurs de chaque relevé de 6 m².

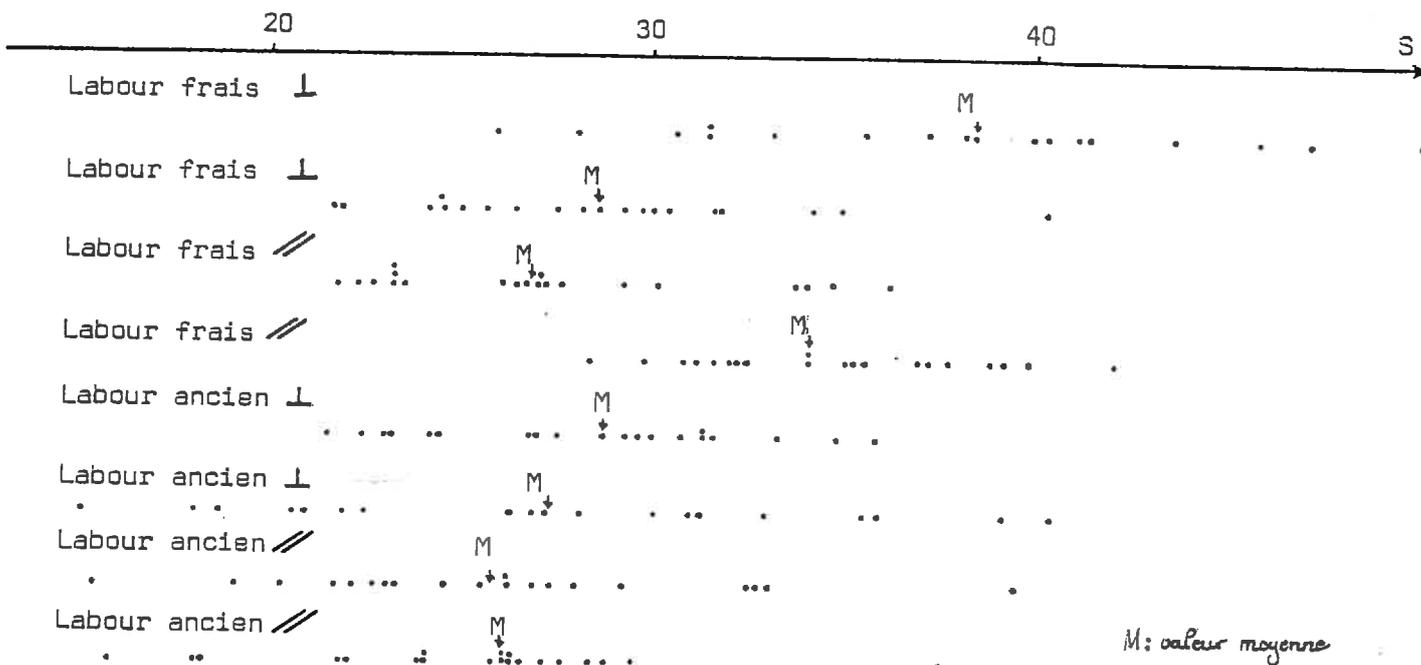


fig.28 Distribution des écarts-types S obtenus sur le fichier de base

Les valeurs obtenues sur les prélèvements constituant le fichier de base ne se regroupent pas de manière significative suivant les états de surface, qui sont tous des labours. De plus, certains problèmes d'interprétation se sont posés :

- des histogrammes très différents appartiennent à un même relevé ;
- deux transects différents peuvent correspondre au même type d'histogramme.

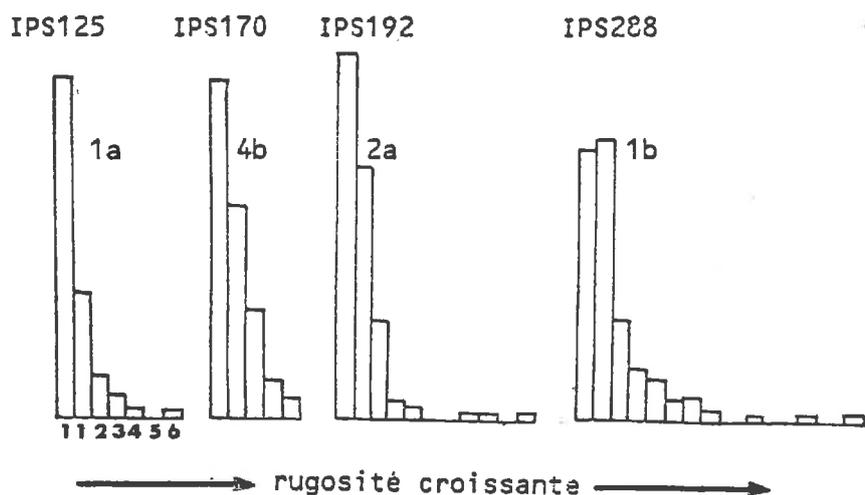
Ce second problème met en évidence l'importance non de la cote d'un point, mais de sa position par rapport aux points voisins. Or, par cette méthode, aucune information n'est fournie sur la distribution des points les uns par rapport aux autres dans un transect. Cette distribution peut se définir à partir de la pente entre deux points successifs, ou encore, de la différence d'altitude entre ces deux points.

c) Distribution des pentes d'un transect

.1. Histogrammes :

Les classes de pente ont été établies à partir du dénivelé en centimètre entre deux points. (Une classe de pente 3 correspond à un dénivelé de 3 cm entre deux points). Un exemple de ces histogrammes est donné dans la figure 29. Ils correspondent aussi aux transects de la figure 26.

fig.29 Histogrammes des pentes



On constate une certaine progression dans le développement de ces histogrammes : plus un transect a un aspect irrégulier ou contourné, plus l'histogramme présente une base large. Nous avons cherché à établir un critère quantifié qui puisse traduire la distribution des pentes d'un transect, et ainsi distinguer des transects de rugosité différente.

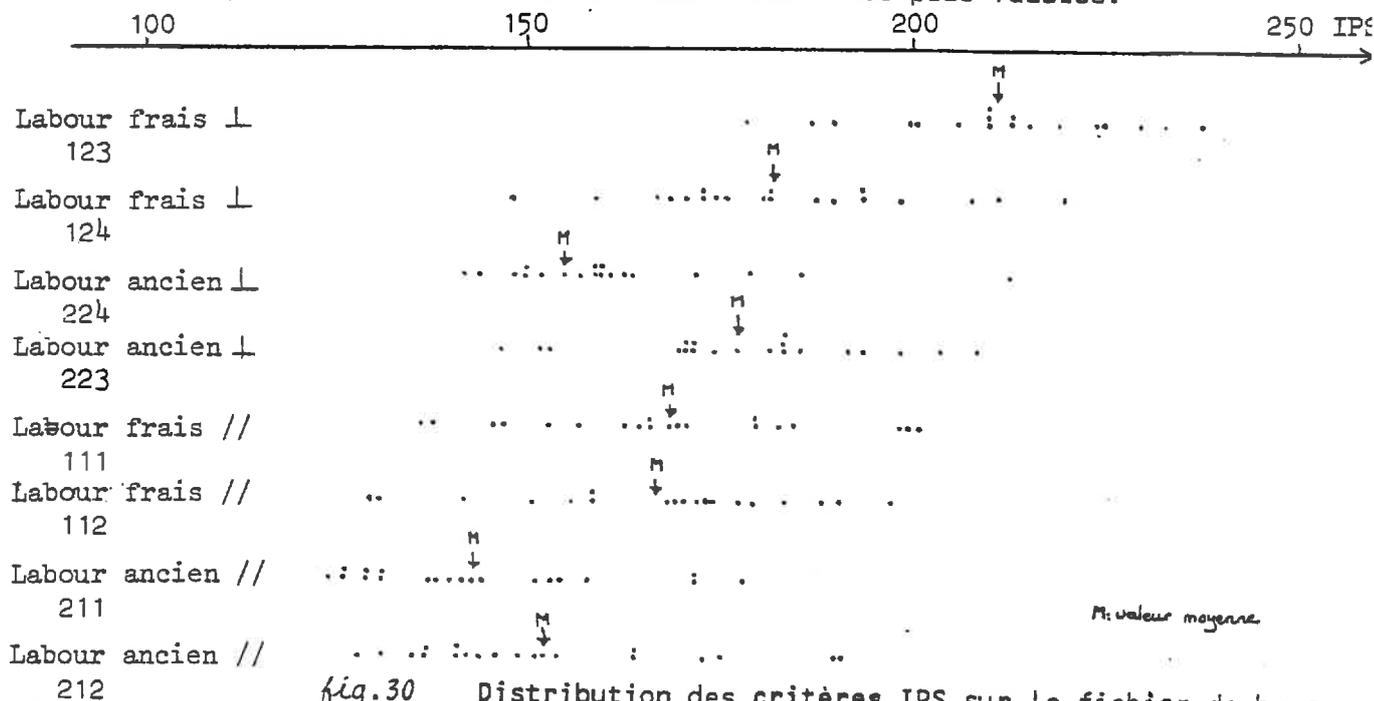
.2. Construction de coefficients :

Dans ce but, un certain nombre de paramètres, intégrant les éléments de ces histogrammes ont été étudiés et comparés :

- .moyenne des hauteurs : \bar{h}
- .somme des écarts à la moyenne : $\Sigma (h_i - \bar{h})$
- .somme des pentes : $ISP = \Sigma |h_i - h_{i-1}|$
- .longueur réelle de la ligne du transect : $RPP = \Sigma \sqrt{1 + h_i^2}$ (indice d'aspérité déjà utilisé par M. BOIFFIN).

Les variations de tous ces coefficients sont représentées p.19 à 21, en annexe 3.

Un critère a retenu plus particulièrement l'attention : il indique les mêmes variations que les histogrammes obtenus et se regroupe de façon assez différente suivant chacun des relevés de 6 m². C'est le critère IPS. Sur la figure 30 ont été représentées les 20 valeurs de chaque relevé. La surface à priori la plus rugueuse (labour frais perpendiculaire) se dégage dans les valeurs supérieures et celle à priori la moins rugueuse (labour ancien parallèle) se trouve dans les valeurs les plus faibles.



Le programme utilisé, "CRITERES IPS et AUTRES", figures p.17 et 18 en annexe 3.

.3. Conclusion :

Bien que le critère IPS permette une traduction intéressante de la rugosité, un problème identique à celui de la distribution des hauteurs se pose : deux transects dont les histogrammes de pente sont identiques peuvent avoir un aspect tout différent du simple fait que leurs pentes respectives ne seront pas distribuées de manière identique. La disposition des pentes les unes par rapport aux autres n'est pas du tout intégrée dans le critère IPS.

Ce raisonnement par récurrence aurait pu être repris pour étudier cette distribution. Mais la complexité du problème nous fait perdre le sens de la réalité.

C'est par une autre méthode que cette étude a été réalisée.

d) Distribution des "mottes"

.1. Principe :

Chaque transect est "éclairé" par un faisceau de lumière parallèle sous une incidence donnée (voir fig. 31). Cette illumination produit des plages "éclairées" et des plages à "l'ombre" de taille variable suivant l'état de rugosité du transect. La recherche de l'incidence d'éclaircissement optimale a permis d'assimiler chaque plage ombrée à la pente du terrain.

incidence de
l'éclaircissement



fig.31 Principe de l'"ombrage" d'un transect.

Une bonne classification des plages ombrées nécessite des conditions d'incidence telles que le nombre de classes obtenues soit maximal (le choix initial des classes de taille a été fixé tous les centimètres) et telles que l'incidence soit le moins rasante possible : ainsi, une motte ombrée aura une étendue influençant le moins possible son environnement immédiat (fig. 32).

incidence du faisceau théorique

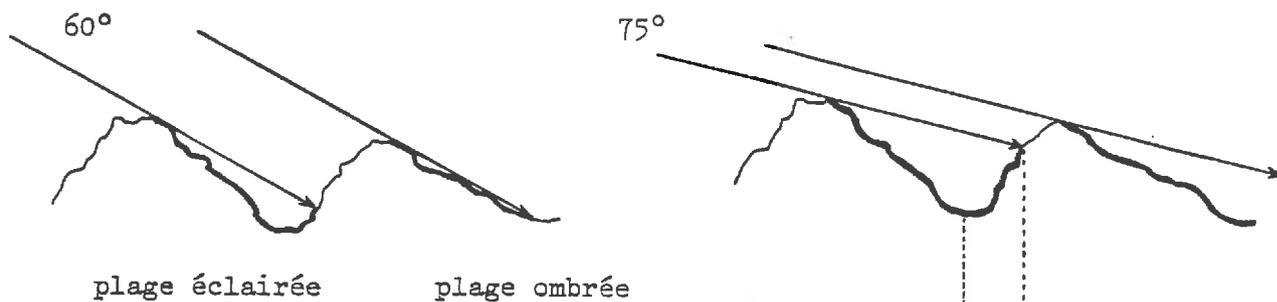


fig.32 Choix de l'incidence pour l'évaluation de la taille d'une motte par la longueur de sa plage ombrée.

influence de l'ombre
sur la motte suivante

Le choix s'est ainsi porté, après plusieurs essais, sur une incidence de 50°.

L'établissement des classes de taille des mottes a été déterminé après une première classification de ces plages comptabilisées tous les centimètres.

Les programmes utilisés figurent p. 14 et 22 à 24, en annexe 3. Il s'agit du programme principal "OMBRE" et des sous-programmes "LISS", "MOTTE", "IMPRI", et "CVIA".

.2. Résultats :

Sur le tableau de la figure 33, chaque point représente une plage ombrée avec en abscisse la taille de cette plage, en centimètres, et en ordonnées, le transect de la surface échantillonnée auquel appartient cette plage. Des relevés différents peuvent ainsi être comparés, par exemple un labour frais prélevé perpendiculairement au sens du travail et un labour ancien prélevé parallèlement au sens du travail.

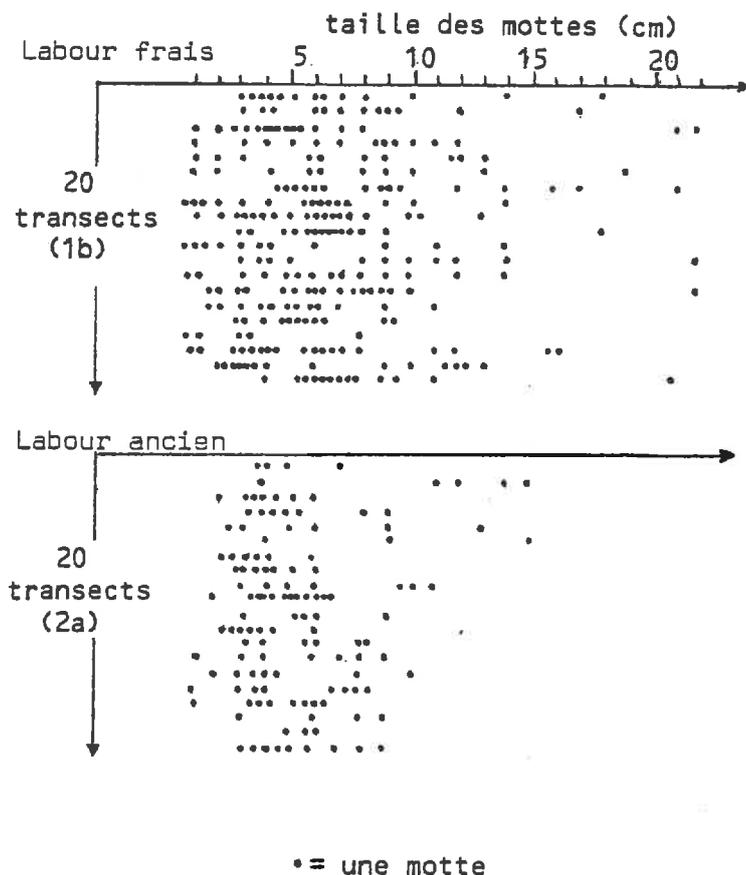


fig.33 Comptage de mottes. (fichier de base)

Nous verrons ultérieurement l'utilisation de cette distribution des "mottes" de différents relevés et la classification des mottes qui a pu être établie.

.3. Critiques :

Cette méthode de comptage ne permet pas de distinguer l'aspect -hauteur ou pente- de la motte qui prime dans la taille de la plage ombrée. De plus, il faut faire intervenir dans le comptage le sens de l'éclairément par rapport au transect : les mottes ne sont pas régulières et symétriques. Chaque transect est "éclairé" dans les deux sens et les comparaisons entre relevés se font à partir de la moyenne des deux comptages de mottes obtenus.

Pour compléter cette étude, il faudrait comptabiliser les plages "éclairées" en les pondérant par leur pente. En extrapolant des vingt transects à la surface totale du relevé, on pourrait évaluer la surface réelle qui intervient lors de l'illumination par un faisceau radar avec une possibilité de décompter tous les types de facettes de la surface du sol intervenant dans la rétrodiffusion.

e) Intégration de paramètres liés au signal d'émission

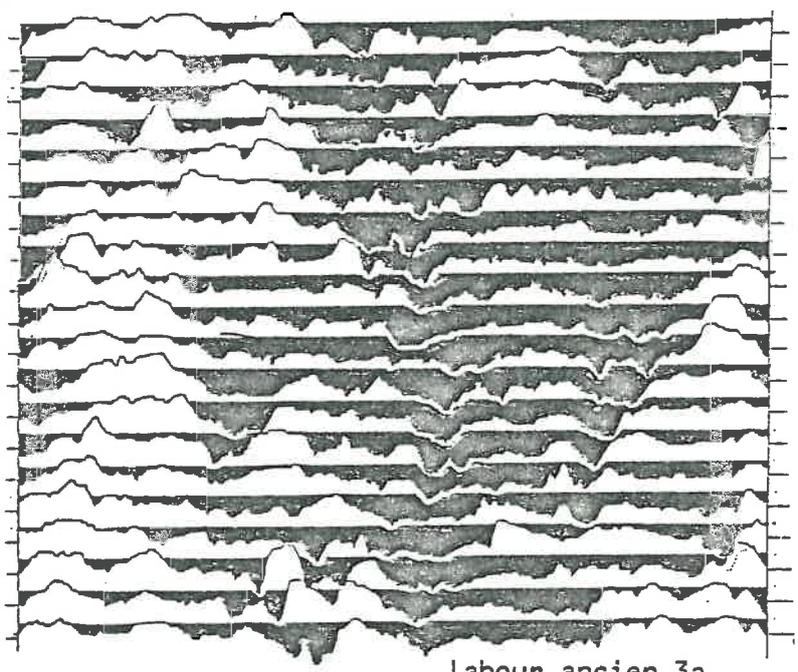
L'intégration de la longueur d'onde dans l'évaluation de la rugosité a été faite de manière empirique. Elle ne sera justifiée que dans l'étude des corrélations entre le signal rétrodiffusé et l'indice de rugosité ainsi établi. L'étude bibliographique a permis de préciser que les paramètres géométriques des objets n'interviennent sur le signal mesuré que si leurs dimensions sont comparables aux longueurs d'onde utilisées.

Deux possibilités d'intégration de la longueur d'onde ont été élaborées :

- 1.- par comptage, sur la bande échantillonnée, des "mottes" dont les dimensions sont voisines de la longueur d'onde. Le voisinage est limité à la taille de la longueur d'onde plus ou moins sa moitié (ex.: pour 1,5 GHz $\lambda = 20$ cm ; taille des mottes comptées : $20 \text{ cm} \pm 10 \text{ cm}$).
- 2.- par utilisation de la longueur d'onde comme unité de base d'un pas de lissage (proposition de M. LANNELONGUE). Chaque transect est lissé avec deux pas différents, proportionnels à la longueur d'onde (coefficient de proportionnalité K) : un pas de $K \cdot \lambda$ et un pas de λ / K .

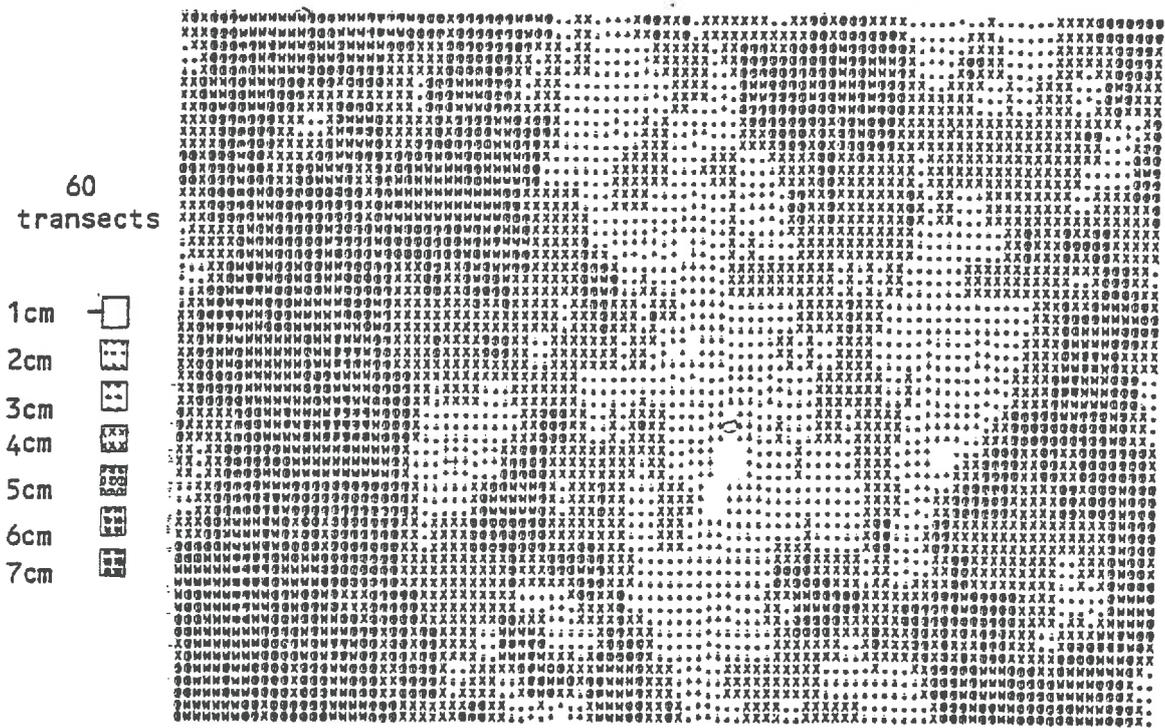
Les lissages permettent de supprimer des éléments rugueux d'une taille inférieure au pas d'échantillonnage. La comparaison de ces deux types de lissage permet de ne prendre en compte que les irrégularités dont la taille est comprise entre $K \cdot \lambda$ et λ / K . Cette comparaison est réalisée à l'aide d'un indice empirique : σ^2 / λ^2 , où σ^2 est la variance des écarts entre les altitudes correspondantes des points d'un transect lissé avec un pas et l'autre.

Les programmes utilisés figurent p.25, en annexe 3 : ils concernent le programme "INDICE DE RUGOSITE DE LANNELONGUE" et les sous-programmes "LANN" et "IMPRA".



Labour ancien 3a

fig. 34 Visualisation graphique par noircissement.



Labour ancien 3a

fig. 35 Cartographie automatique: hypsométrie

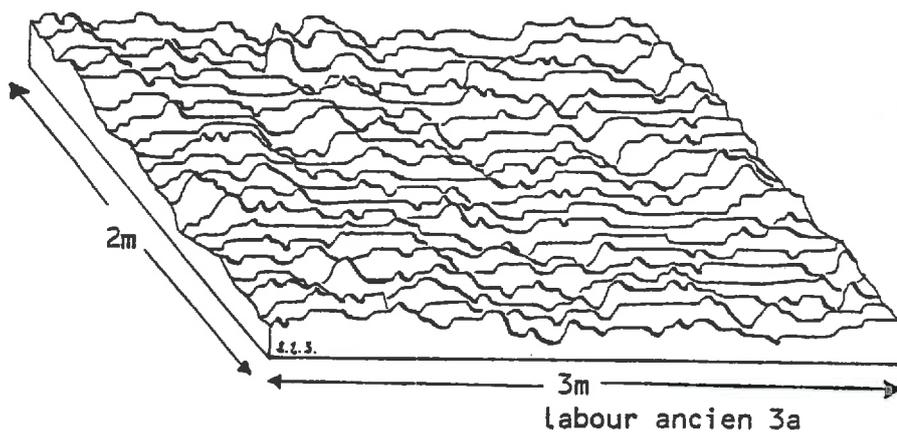
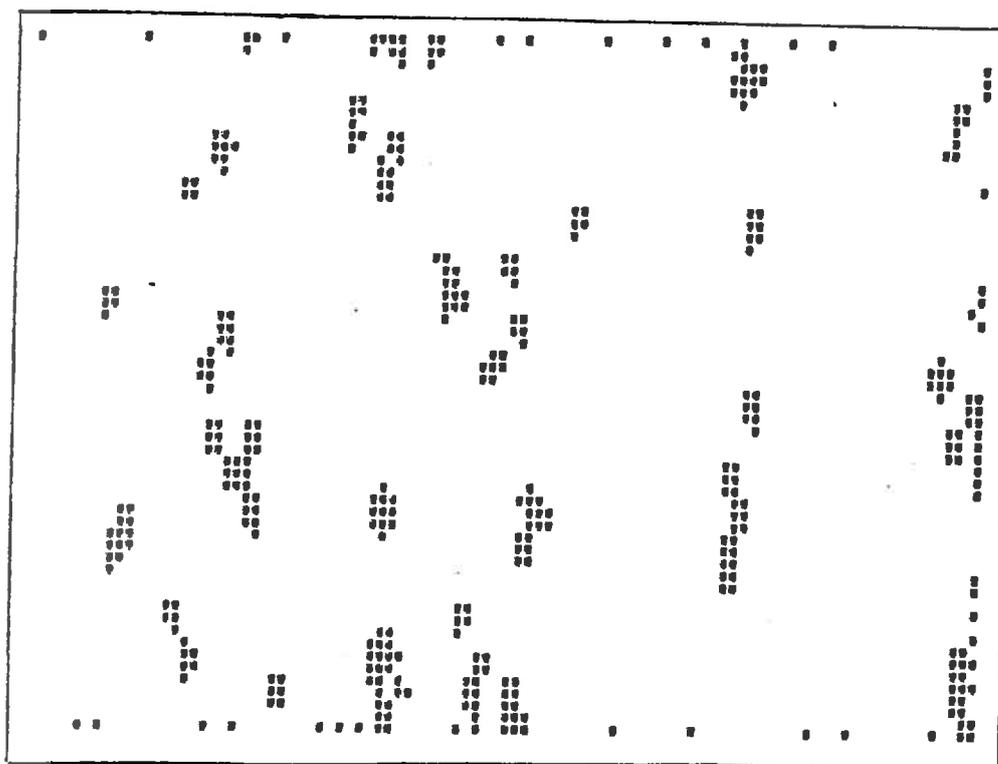


fig.36 Bloc-diagramme "ombré".
Impression automatique.



labour ancien 3a

fig.37 Cartographie automatique: position des mottes

f) Etude des surfaces relevées

L'approche linéaire de la rugosité, avec des traitements de transects nous a semblé insuffisante. On a tenté une approche "spatiale" du phénomène, mais le passage de vingt transects à une surface est un problème complexe. Sa réalisation permettrait d'appréhender davantage la réalité des conditions de terrain pour définir des critères quantitatifs caractérisant la rugosité.

Un certain nombre de procédés de représentation de l'état de surface ont été testés pour permettre de mieux saisir les différents aspects du problème :

- visualisation graphique par noircissement (fig. 34) ;
- cartes hypsométriques (fig. 35) : les 20 transects initiaux ont été extrapolés à 60 transects contigus. Chaque classe d'altitude a un grisé différent ;
- sorties automatiques de blocs diagrammes ombrés (fig. 36) ;
- cartographie des pentes ;
- cartographie des mottes, ou de leur plage ombrée (fig. 37) ;
- cartographie des crêtes.

Ces méthodes permettent d'étayer les hypothèses faites sur la validité des prélèvements réalisés avec le système CLEMENTINA, ainsi que la validité des critères "linéaires" caractérisant la rugosité.

L'approche spatiale de la rugosité nécessiterait d'autres traitements à partir des relevés réalisés. On verra dans les paragraphes suivants que les critères linéaires définis précédemment ont été suffisants pour cette étude.

Les programmes utilisés sont détaillés p. 15 et 28, en annexe 3.

1. carte hypsométrique : programme principal "CARTE TOPOGRAPHIQUE", sous-programmes "POSI", "REDUC", "SORTY", "LISS".
2. carte des plages ombrées : "POSI", "LISS", "REDUC", "OMB", "SORTY", "LISCA".
3. Bloc diagramme : "POSI", "LISS", "REDUC", "OMB", programme principal.

2.3. Conclusion

La rugosité a été appréhendée par une méthode simple, tant dans la collecte des données que dans le principe de leur traitement. Cette méthode n'est pas définitive. C'est un moyen proposé pour quantifier ce paramètre. Il permet d'établir une échelle de valeur pour distinguer différents états de surface.

Les tests, opérés sur labour, n'ont pas permis une mise en évidence satisfaisante de phénomènes périodiques à l'échelle du relevé de surface. Toutefois, des critères intéressants ont pu être définis par deux approches de la rugosité :

- l'étude de la distribution des hauteurs et des pentes d'un transect (critères S et IPS) ;
- l'étude de la distribution des "mottes" d'un transect par la technique de l'ombrage.

Ces traitements ont été appliqués à l'ensemble des relevés effectués durant l'expérimentation du système RAMSES.

3 - EVOLUTION DE LA RUGOSITE DURANT LA CAMPAGNE

3.1. Echantillonnage

Trois types d'états de surface ont été étudiés durant cette campagne :

- un état très rugueux, réalisé à l'aide d'une charrue monosoc 36 pouces, travaillant à 25 cm de profondeur et dans le sens perpendiculaire à l'axe principal des visées (schéma 38).

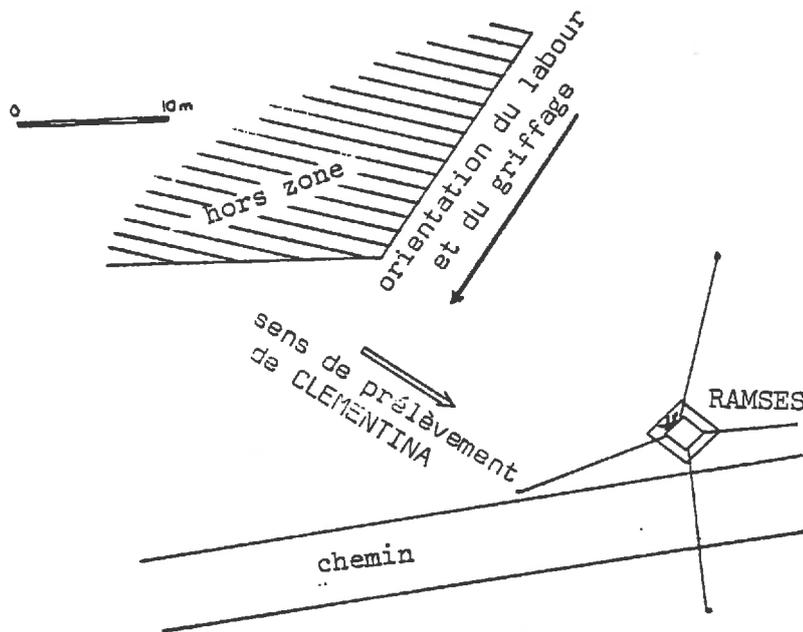


fig.38 Orientation des relevés de rugosité.

- un état moyennement rugueux, obtenu avec un griffage du sol par un cultivateur de type canadien (espacement des dents de 35 cm, profondeur de travail 10 à 15 cm), travaillant dans le même sens que le labour.
- un état peu rugueux, correspondant à un hersage très fin, fait sans orientation préférentielle.

Chacun de ces trois états de surface a été laissé respectivement :

- .62 jours (du 15 mars au 16 mai) pour le labour,
- .32 jours (du 17 mai au 8 juin) pour le griffage,
- .14 jours (du 13 juin au 27 juin) pour le hersage.

Les échantillonnages ont été réalisés avec le système CLEMENTINA dès que le travail culturel est obtenu (état frais) et à la veille d'une modification de la rugosité (état ancien).

L'axe des prélèvements est perpendiculaire au sens du passage de l'outil, cette disposition correspond à une orientation du relevé perpendiculaire à l'axe principal des visées avec le scattéromètre.

Le fichier global ainsi établi comprend :

- 2 relevés sur labour récent (fichiers 1 et 2),
- 1 relevé sur labour ancien (fichier 3),
- 1 relevé sur griffage frais (fichier 4),
- 1 relevé sur griffage ancien (fichier 5),
- 1 relevé sur hersage frais (fichier 6).

Soit l'équivalent d'un fichier global de $6 \times 6\ 000 = 36\ 000$ données, obtenues sur bande magnétique.

3.2. Résultats des traitements

Les données mises sur bandes ont subi les traitements mis en place au cours de l'investigation des méthodes d'études des paramètres de terrain :

- l'étude de la distribution des altitudes d'un transect, représentée par l'écart-type S (fig. 39). Chaque point représente l'écart-type d'un transect, chaque ligne de points l'ensemble des valeurs présentes sur un relevé.

- l'étude de la distribution des pentes d'un transect, représentée par le critère IPS (fig. 39).

- l'étude de la distribution des "mottes" d'un transect, obtenue par le comptage des mottes, avec des classes de 1 cm. Les exemples d'un labour ancien, d'un griffage frais et d'un hersage sont représentés sur la figure 40.

Les autres comptages sont consignés en annexe 3, p. 31.

De même, le comptage du nombre de mottes ayant une taille proche de la longueur d'onde utilisée, figure dans le tableau ci-dessous :

Longueur d'onde		20 cm	10 cm	6,6 cm	3,3 cm
Taille des mottes		10-30	5-15	3-9	1-5
Nombre de mottes de chaque classe	Fichier 1	76	122	131	110
	Fichier 2	70	137	128	98
	Fichier 3	83	138	122	100
	Fichier 4	9	80	122	132
	Fichier 5	4	50	92	106
	Fichier 6	0	21	38	66

- La recherche d'une périodicité, par l'utilisation de la fonction d'auto-corrélation a été tentée, malgré les résultats peu satisfaisants obtenus lors des tests. Seuls, les transects correspondants aux griffages ont permis d'obtenir des pics importants, et périodiques, significatifs d'une corrélation entre les points d'un transect tous les 36 cm (voir un exemple de sortie ordinateur en annexe 3, p. 32).

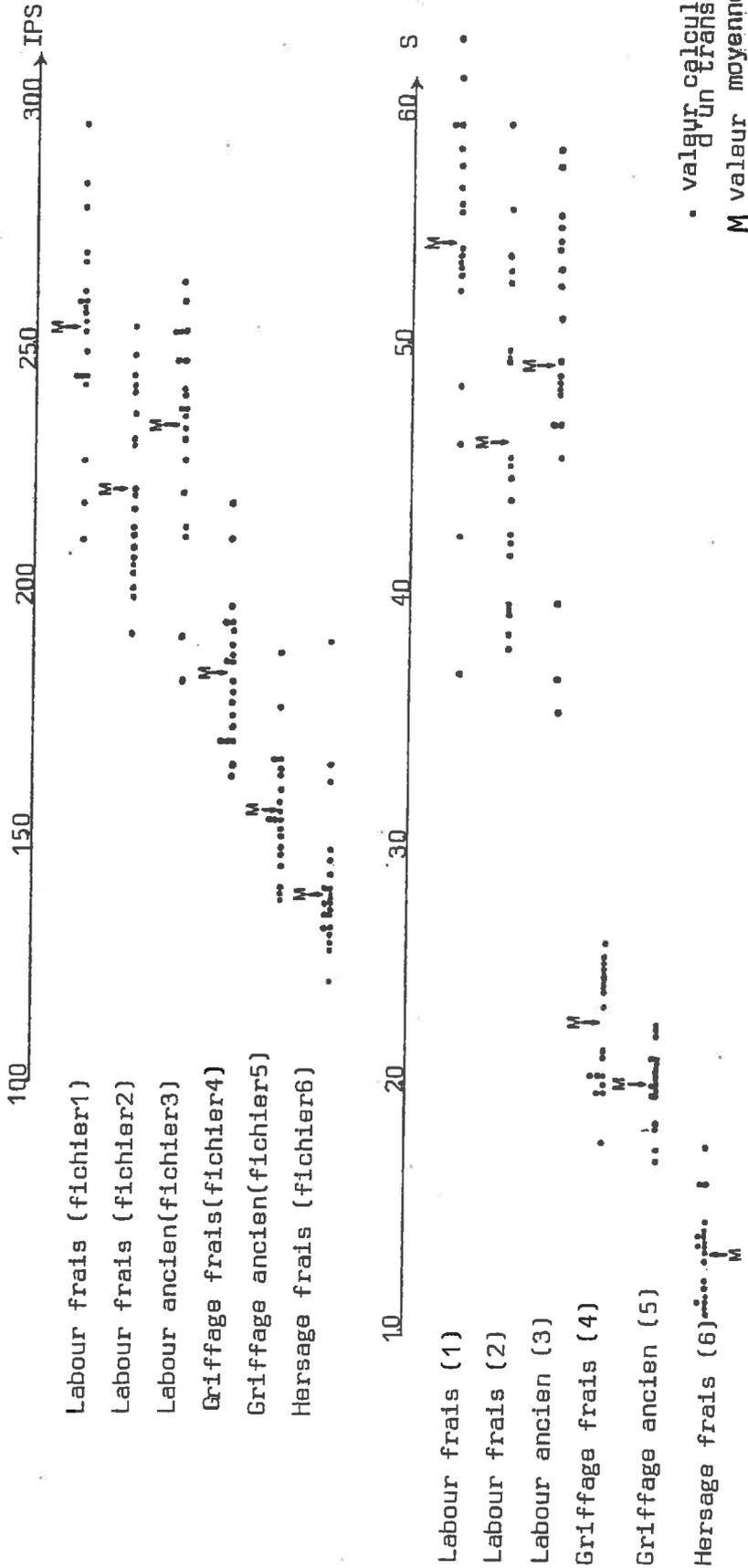


Fig.39 Distribution des critères de rugosité IPS et S.

. valeur calculée à partir d'un transect
M valeur moyenne

Les relevés sur labour ou sur herse traités de la même façon n'ont permis de rendre compte d'aucune périodicité.

- L'utilisation de l'indice empirique (σ^2/λ^2) ne donne pas une discrimination satisfaisante des différents états culturaux suivant la longueur d'onde considérée (fig. 41) ; (en annexe 3, p. 33, les valeurs correspondantes).

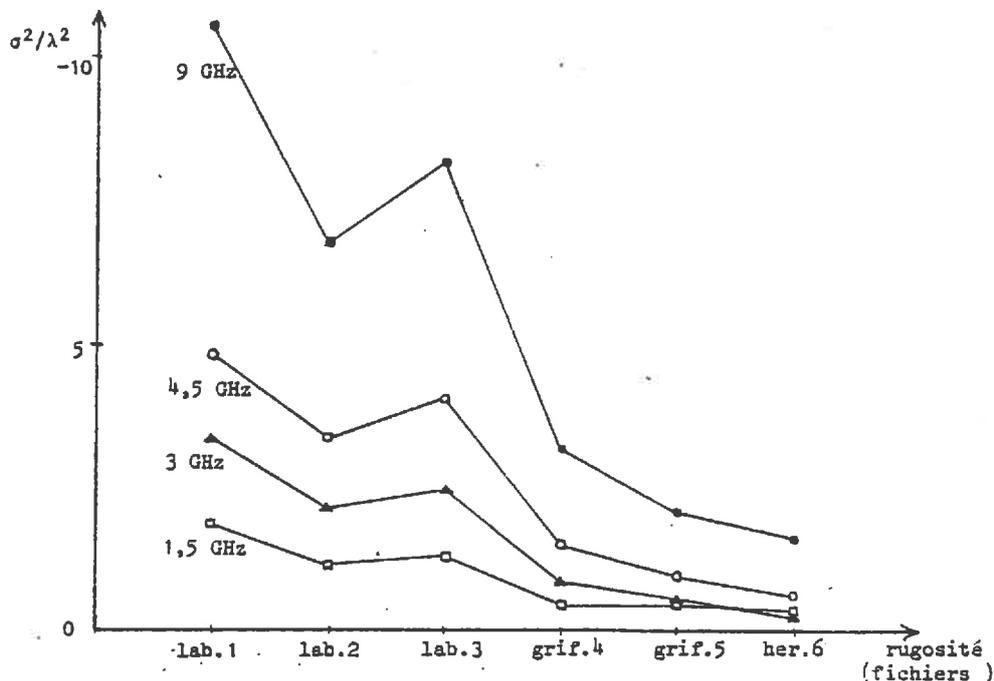


fig.41 Indice σ^2/λ^2 en fonction des surfaces échantillonnées

- Enfin, une approche spatiale des rugosités réalisées durant l'expérimentation s'est matérialisée par :

- .une cartographie de l'hypsométrie (p.34 à 39, annexe 3).
- .une cartographie des plages ombrées à 50° d'incidence (p.40, annexe 3).

3.2. Interprétation des résultats

a) Représentativité de l'échantillonnage

Comme nous l'avons déjà détaillé, la surface d'échantillonnage de 6 m² représente une très faible partie de l'aire d'exploration du scattéromètre (1 à 600 m²). Ainsi est faite l'hypothèse suivante : le travail cultural réalisé est homogène sur l'ensemble de la zone-test.

Les résultats des traitements concernant les critères d'écart type S et de comptage des mottes montrent une certaine différence entre les valeurs obtenues sur les deux échantillons relevés sur labour frais (fig. 39 et p. 31, annexe 3). Mais cette différence représente un écart assez faible vis-à-vis de celui existant entre les valeurs obtenues sur labour et sur griffage. Nous pouvons donc considérer que l'échantillonnage, tel qu'il a été réalisé, est suffisamment représentatif de chacun des états de surface étudiés. Rappelons toutefois que la taille de l'échantillonnage n'a pas fait

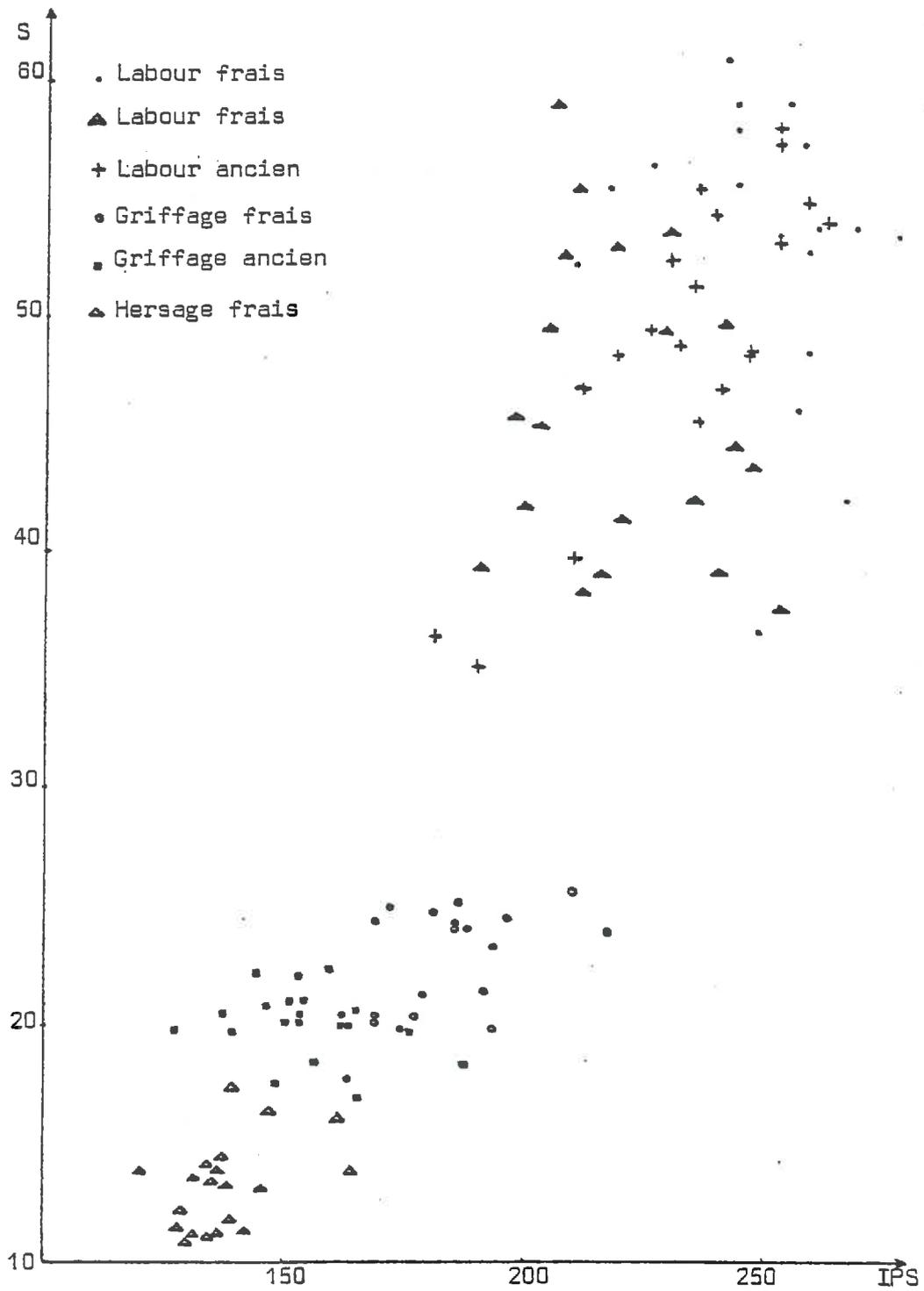


fig.42 Distribution de l'écart-type des altitudes S en fonction de la somme des pentes IPS

l'objet de tests systématiques permettant de définir les dimensions optimales de la surface relevée qui pourrait être qualifiée d' "aire minimale d'échantillonnage". Dans le temps disponible, la priorité a été accordée à l'acquisition des données de scattérométrie.

b) Dégradation de l'état de surface

Les échantillonnages de date différente sur un même état de surface ont été faits dans l'espoir de suivre la modification de l'état de surface au cours du temps. L'état de surface conservé le plus longtemps est le labour (62 jours).

Les résultats ne permettent en aucune façon de considérer la variation des critères calculés comme la traduction exacte de la réalité, puisque la surface échantillonnée sur un labour de 60 jours a une rugosité intermédiaire entre celle des 2 surfaces échantillonnées sur un labour de 5 jours.

L'écart observé, pour les critères calculés des fichiers 4 et 5 (griffage frais et griffage ancien) est, de même, insuffisant pour être significatif d'une dégradation quantifiée en l'espace de 30 jours (voir fig. 43, p. 75). Ce résultat corrobore ce qu'on connaît du comportement des sols de la parcelle dans sa partie basse. Ces sols, à texture équilibrée, à teneur en matière organique importante (4,3 %) et en ambiance calcaire, ont une bonne stabilité structurale.

c) Discrimination des travaux culturaux

L'étude de la dispersion de chacun des critères définis à partir des transects de CLEMENTINA a mis en évidence les meilleurs critères de discrimination des travaux culturaux de cette campagne de printemps.

Cette représentation graphique (fig. 42) montre que la dispersion des valeurs est plus importante selon l'axe de S que selon l'axe de IPS, et que les nuages de points correspondants aux 3 états de surface sont plus nettement séparés selon l'axe S. Nous utiliserons préférentiellement le critère S dans l'étude de l'influence de la rugosité sur le signal rétrodiffusé.

Un autre mode de discrimination intéressant se confirme par l'utilisation de la méthode du comptage de mottes. Quatre classes de mottes ont été distinguées à partir de l'étude des tableaux 40, p. 71, et ceux de l'annexe 3, p. 31.

Sur la figure 43, les trois échantillonnages faits sur labour ont des tailles équivalentes de classes de mottes, exceptés la classe des plus grosses mottes.

Les labours et les griffages ont des classes (0-6 cm) de petites mottes équivalentes, leur distinction se fait essentiellement par les classes (14-22) et (22-40 cm), qui sont absentes sur le griffage, et la nette différence entre les tailles de la classe (14-22 cm).

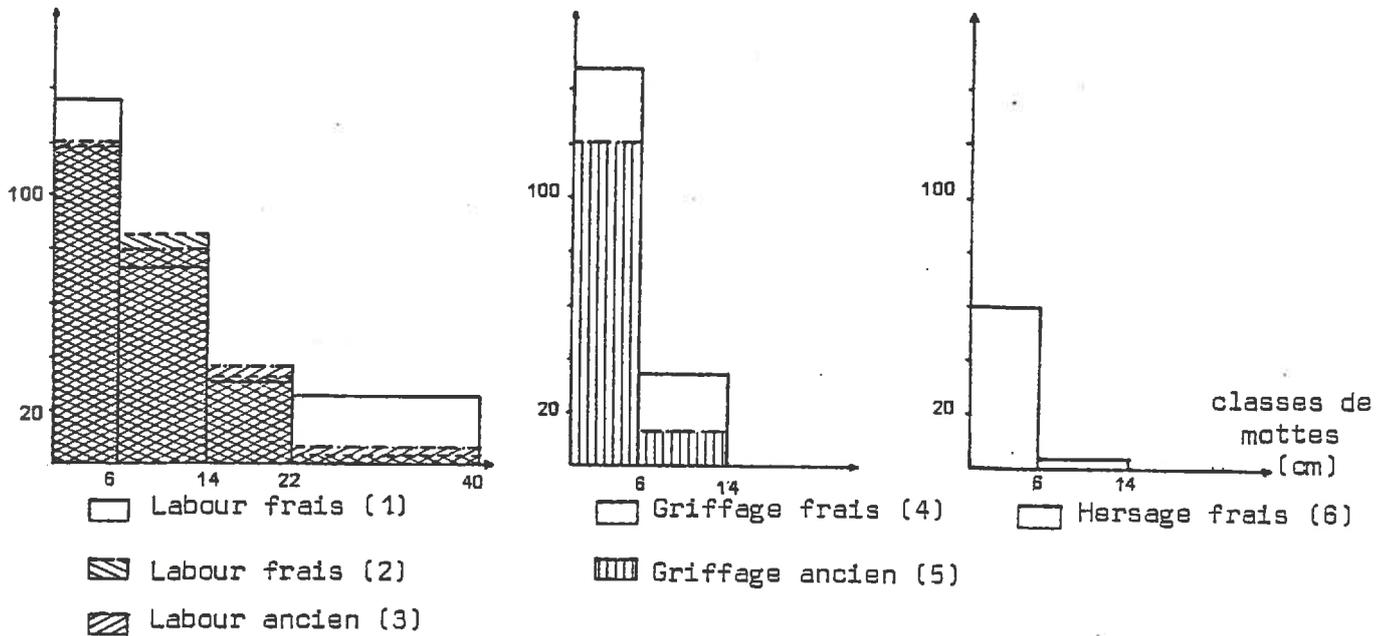


fig.43 Histogrammes des classes de "mottes" de chaque relevé de surface. (6m²)

Enfin, les hersages se distinguent des griffages par la différence d'importance des classes (0-6 cm) et (7-14 cm).

En résumant :

- le hersage ne présente que des mottes inférieures à 7 cm* et en faible nombre ;
- les griffages présentent des mottes très nombreuses de 0 à 7 cm et peu nombreuses de 7 à 14 cm ;
- les labours présentent toutes les classes de mottes de 0 à 40 cm, avec une diminution du nombre de mottes avec la taille de celles-ci.

Ces critères établis à partir de l'étude des transects permettent donc une discrimination des trois états culturaux choisis pour le déroulement de l'expérimentation. De plus, on peut par cette méthode, distinguer les différents "éléments" qui composent la rugosité.

4 - CONCLUSION

Les différents états de surface étudiés durant cette expérimentation ont été parfaitement discriminés par les critères de rugosité définis, S (écart-type des altitudes des vingt transects d'une surface échantillonnée) et le comptage de mottes (obtenu par la technique de l'ombrage). Par ces deux critères, le labour, très rugueux, s'isole du griffage et du hersage, voisins l'un de l'autre. Ces comparaisons n'ont pas fait intervenir l'orientation du travail cultural.

Ces trois états de surface sont représentatifs d'une grande part des types de rugosité existants. D'autres travaux culturaux complèteraient cet ensemble : le passage d'un rouleau pour la réalisation d'un état très lisse, celui d'un foncescar pour un état intermédiaire entre le griffage par canadien et le labour, celui d'une sous-soleuse pour un défoncement.

*Rappelons que les classes de mottes sont établies à partir de la taille de leur plage ombrée.

IV.- CONCLUSION

Les méthodes utilisées pour l'étude des paramètres terrain regroupent essentiellement :

- .pour la température du sol, le relevé en continu des variations grâce à des thermo-couples en batterie ;
- .pour l'humidité du sol, la méthode de HENIN, par analyse de la teneur en eau d'échantillons prélevés à la tarière ;
- .pour la rugosité du sol, une méthode de relevés d'altitudes des points d'une surface (système CLEMENTINA). Un traitement des données assisté par ordinateur, a facilité la quantification de ce paramètre mal connu.

La grande simplicité de mise en oeuvre de ces méthodes, la courte durée de manipulation et la possibilité de répétitivité des mesures ont rendu cette collecte des données de terrain compatible avec celle des données de scattérométrie.

L'évolution des conditions de terrain et les observations faites au cours de l'expérimentation ont permis de dégager quelques éléments essentiels pour une comparaison avec le coefficient de rétrodiffusion σ_0 .

- Les températures du sol augmentent irrégulièrement, mais progressivement durant toute la durée de la campagne. Des conditions de températures identiques, pour des conditions d'humidité et de rugosité différentes, ne se présentent que très rarement.

- L'humidité du sol est caractérisée par une prédominance des variations de teneurs en eau de surface. En profondeur (de 10 à 40 cm), les teneurs restent quasiment constantes, entre 20 et 25 %. Seule l'humidité de surface est à considérer dans la confrontation avec les modifications du signal rétrodiffusé.

- La rugosité du sol est caractérisée par des critères quantifiés (écart-type des altitudes et comptage des mottes). Ces critères permettent la distinction de trois états de surface réalisés durant la campagne (labour, griffage, hersage). La dégradation de chacun de ces états au cours du temps est évaluée comme négligeable. Dans l'interprétation des résultats de scattérométrie, les conditions de rugosité sont supposées identiques pour toutes les séquences de mesures réalisées sur un même état de surface.

*
* *

TROISIÈME PARTIE

DEPOUILLEMENT DES RESULTATS DE SCATTEROMETRIE

La collecte simultanée des données de terrain et des valeurs de puissance du signal rétrodiffusé s'est déroulée durant les mois de mars à juin. Elle concerne :

- les séquences de travail dans une fréquence donnée et les quatre groupes de polarisations : soit un total de 59 séquences complètes, ce qui représente 9 540 mesures de puissances reçues ou 3 060 valeurs calculées de coefficient de rétrodiffusion σ_0 .
- les mesures d'humidité par prélèvements (1 250) et par humidimètre à pointe (50).
- les relevés de rugosité sur les différents états de surface réalisés, soit 36 000 données brutes.
- les mesures de densité apparente (100 prélèvements).
- les relevés quotidiens de température du sol aux trois profondeurs : 5 cm, 15 cm et 25 cm.

Le début de cette campagne était programmé pour la fin du mois de janvier. Les retards dans l'arrivée du matériel, les conditions climatiques très défavorables en février, et la durée de l'installation et de la mise au point des systèmes, n'ont permis ce début d'expérimentation qu'à la fin du mois de mars.

Le bilan complet de la manipulation, détaillé dans l'annexe 4, p. 41, s'établit comme suit. Sur 70 jours ouvrables, il y a eu :

- .19 jours de pannes,
- .9 jours de mises au point des visées et d'étalonnage,
- .2 jours de pluies continuelles,
- .3 jours de démonstration,
- .37 jours de manipulation.

Les 59 séquences réalisées ne sont pas toutes utilisables à cause de pluies en cours de manipulation.

I.- QUALITE DES MESURES DE SCATTEROMETRIE

1 - HOMOGENEITE ET REPRESENTATIVITE DES SEQUENCES DE MESURES.

Rappelons tout d'abord la définition d'une séquence de travail : c'est l'obtention des mesures de la puissance du signal rétrodiffusé par balayage en incidence de la zone-test, avec, pour chaque incidence de visée, un maximum de pointages en gisement. Ces mesures se font à une fréquence donnée, sur une antenne de réception donnée et dans les quatre configurations de polarisation. Chaque valeur du coefficient de rétrodiffusion σ_0 est calculée à partir d'une moyenne des puissances reçues à une incidence. Les classes d'humidité ont été établies à partir de l'écart-type de la distribution des mesures d'humidité de surface (la moyenne de ces distributions est de 1,7 % pour l'ensemble de la campagne).

Dans le tableau ci-après sont représentées les différentes séquences de mesures réalisées, suivant la fréquence utilisée et les diverses valeurs d'humidité de surface.

La campagne de mesures se solde par un total de 52 séquences utilisables dans la phase de dépouillement et 7 séquences perturbées par des conditions météorologiques instables.

Ce bilan permet de tirer les constatations suivantes :

1. Pour un même état de surface, et à une fréquence donnée, le nombre total de séquences n'excède pas 7.
2. Les conditions d'humidité ont peu varié pour les séquences de mesures faites sur labour et hersage : la quantité de précipitations abondantes du printemps en est la cause.

Un nombre important de séquences ont eu lieu dans des conditions d'humidité de surface voisines de 15 %.

3. Pour des conditions d'humidité comparables, et à une fréquence donnée, on n'a pas pu réaliser de séquences sur tous les états de surface.

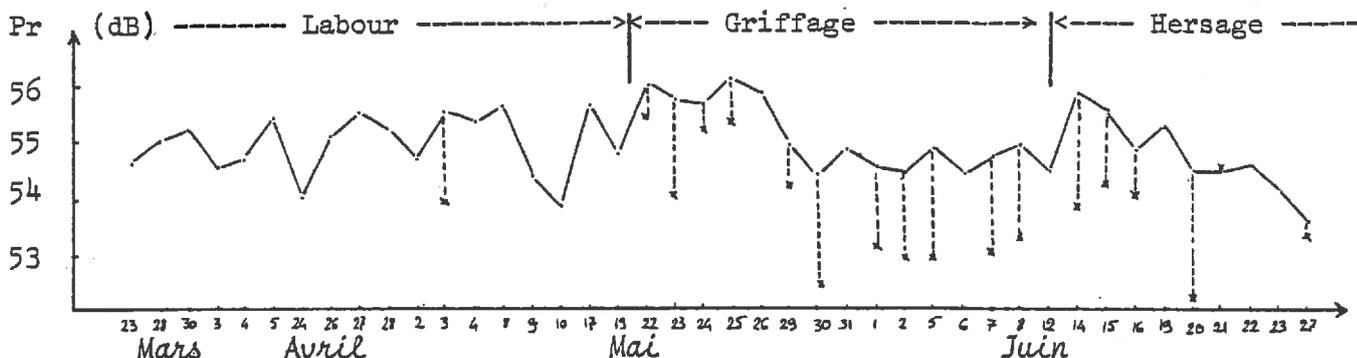
Humidité % Fréquence	0-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30
1.5		○		○		▽	○	▽		○	▽	○			
3		○	×	▽		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
4.5		○				×		○	○	○	○	○	○		
9		○		×	×	×	○	○	○	○	▽			×	○

X Hersage ○ Griffage ▽ Labour

Répartition des séquences réalisées suivant les conditions de terrain.

2 - FIDELITE DU SCATTEROMETRE RAMSES

Cette fidélité peut être appréciée grâce aux valeurs d'étalonnage obtenues quotidiennement à partir de pointages sur cible-étalon. En figure 44, sont représentées les valeurs d'étalonnage en 4,5 GHz et polarisation HH. Lorsque deux points sont l'un au-dessous de l'autre, ils traduisent l'écart de mesures entre les deux étalonnages réalisés dans la même journée l'un étant fait le matin, une demi-heure après la mise en route des appareils, et l'autre, en milieu de journée, alors que tout le système électronique a fonctionné plusieurs heures.



* deuxième étalonnage réalisé à une date donnée

fig.44

Fidélité de l'étalonnage en 4,5 GHz

(Pr puissance reçue sur le trièdre étalon en fonction du tem

Outre les variations quotidiennes représentées par les couples de points, les mesures d'étalonnage, réalisées pour une même position de la cible-étalon (c'est-à-dire pendant toute la durée d'un état de surface), présentent entre elles un écart inférieur à 3 dB. Les étalonnages faits aux fréquences 1,5 - 3 et 9 GHz sont représentés p. 43, en annexe 4.

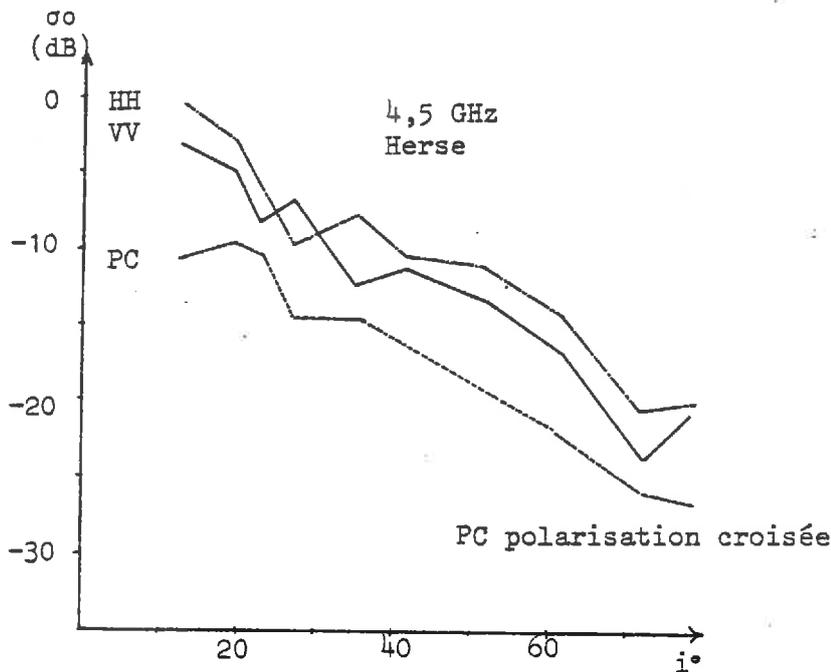
Ainsi, la fidélité de l'appareil est incontestable aux fréquences 4,5 GHz, 1,5 GHz et 3 GHz.

A 9 GHz, les valeurs d'étalonnage connaissent une très grande amplitude journalière. Ceci est dû non à un mauvais fonctionnement de l'appareil, mais à une taille non adaptée de la cible-étalon. Ces valeurs ne seront pas prises en compte, le calcul du coefficient d'étalonnage se fera à partir des seuls étalonnages absolus réalisés au début de chaque nouveau type de rugosité, sur les lentilles de Luneberg.

3 - PRECISION DES MESURES DE PUISSANCE RECUES

3.1. Allure générale des "résultats bruts"

Les résultats bruts sont présentés sous forme de graphiques où la valeur du coefficient de rétrodiffusion σ_0 est reportée en ordonnée et l'incidence de l'axe du faisceau d'antenne en abscisse. L'allure générale des courbes obtenues est très semblable quelle que soit la fréquence d'émission et les conditions de terrain (fig. 45).



- la rétrodiffusion est plus importante aux incidences proches de la normale qu'aux incidences plus élevées.
- elle est assez voisine entre les configurations de polarisation homogène (HH et VV).
- elle donne un niveau de gain beaucoup plus faible (d'environ 7 dB) en polarisation croisée (HV ou VH).

fig.45 Allure générale des résultats bruts
(exemple d'une courbe $\sigma_0=f(i)$)

3.2. Précision des mesures

Cette précision dépend de plusieurs facteurs :

- la *fidélité* du système d'émission-réception. Elle est évaluée par M. LOPEZ du C.N.E.S. à 1 ou 2 dB.
- le *nombre d'échantillons indépendants* pris en compte dans le calcul de la puissance reçue moyenne. La valeur de l'intervalle de confiance en fonction du nombre total d'échantillons indépendants a été calculée par les physiciens. Les courbes correspondantes sont données en annexe 4, p.44.
- la présence d'une *interférence* peut intervenir dans la précision de la mesure : ainsi, le bruit de fond (signal parasite dû à l'électronique du système) peut se combiner au signal de rétrodiffusion, si la valeur de celui-ci est proche du seuil de bruit. On observe souvent une "remontée" des valeurs de σ_0 aux incidences fortes, car le signal rétrodiffusé devient faible et le bruit devient prédominant.

Pour évaluer la précision des mesures, il faut tenir compte de tous ces facteurs. Pour chacune des configurations de pointage et de fréquence, nous avons calculé le nombre total d'échantillons indépendants pris en compte par les ellipses juxtaposées : (ces calculs sont consignés dans le tableau p. 44 de l'annexe 4).

- aux incidences faibles (de 10° à 23°), le nombre total d'échantillons N est assez faible. Les conditions de visées étant assez proches, on a affecté à chaque incidence une valeur de σ_0 correspondant à la moyenne mobile sur trois incidences. Ceci améliore le nombre d'échantillons indépendants et par conséquent, la précision de la valeur du coefficient de rétrodiffusion σ_0 .

- l'utilisation des calculs de MM. LANNELONGUE et LOPEZ du C.N.E.S. permet de réduire l'influence de l'interférence due au bruit de fond aux incidences fortes.

La marge d'erreur (avec un intervalle de confiance de 66 %) a ainsi pu être évaluée dans les configurations de travail correspondant à l'expérimentation faite sur le site de Grignon.

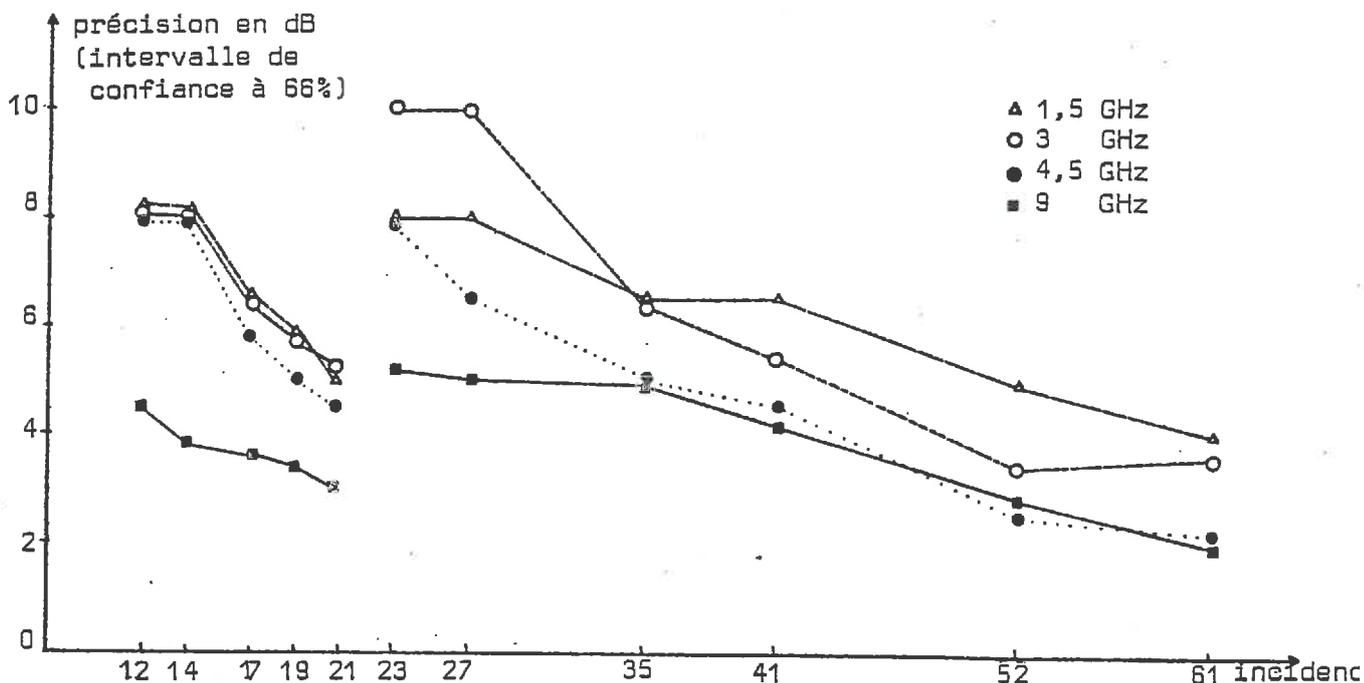


fig.46 Précision des mesures en fonction de l'incidence des visées

La discontinuité des courbes, observée pour une incidence de 23° (fig. 46), correspond à la limite du "lissage" qui a été possible aux incidences faibles. Cette discontinuité n'a pas une signification réelle, dans la mesure où les courbes $\sigma_0 = f(i)$ sont continues autour de cette incidence. Si cette condition de continuité dans l'évolution du coefficient σ_0 est vérifiée, la marge d'erreur d'un point est confirmée par son voisinage.

Dans la phase d'interprétation, la précision des mesures intervient de manière sous-jacente : deux séquences, réalisées à deux dates différentes seront *comparables* si les écarts observés entre les valeurs correspondantes de σ_0 sont inférieurs à la marge d'erreur calculée. Et inversement, deux séquences seront *disjointes* si leurs écarts sont supérieurs à cette marge.

L'étude qui va suivre s'appuiera essentiellement sur les valeurs de σ_0 calculées en conditions de polarisation homogènes. Le cas des polarisations croisées est plus complexe. Il ne permet pas une étude simple des phénomènes observés durant cette campagne.

II.- INTERPRETATION DES RESULTATS

Le coefficient de rétrodiffusion σ_0 est fonction de plusieurs paramètres :

- les paramètres systèmes : incidence i de visée, fréquence d'émission F , puissance d'émission p ;
- les paramètres terrain : humidité du sol H , rugosité de surface rg , température du sol t° .

$$\sigma_0 = f \left(\underbrace{F, p, i}_{\text{paramètres systèmes}}, \underbrace{H, rg, t^\circ}_{\text{paramètres terrain}} \right)$$

Pour interpréter les résultats, une méthode globale analysant simultanément toutes les variables permettrait une description de l'ensemble des n valeurs de σ_0 en fonction des m paramètres quantitatifs.

Mais les deux types de paramètres (système et terrain) n'ont pas été explorés de façon similaire :

- l'exploration des paramètres-systèmes a été entreprise d'une manière très *systematique* du fait de la définition des séquences de travail qui ont permis de tester l'appareil RAMSES sur l'ensemble des configurations de visées possibles. De plus, cette exploration a été très simple à réaliser techniquement puisqu'elle dépend de commandes automatiques.
- la variation du paramètre rugosité a été provoquée artificiellement, et celles de l'humidité et de la température ont été soumises aux seules conditions climatiques. L'exploration de chacun de ces paramètres a donc été très *discontinue* et n'a permis de rendre compte que d'une part limitée des conditions possibles de terrain.

L'influence des paramètres terrain sur le signal rétrodiffusé nous intéresse de manière prépondérante. Il n'est pas possible de réaliser son étude d'une manière complète du fait de la discontinuité des résultats de terrain. Une analyse globale des données ne sera donc pas satisfaisante.

Nous avons adopté une démarche plus directe d'interprétation. Elle nous permet d'approfondir l'étude dans les conditions où les données acquises sont les plus complètes ; elle comprend trois points principaux :

- inventaire des séquences réalisées en considérant les variations d'un seul paramètre de terrain, toutes les autres conditions d'observation étant les mêmes.
- comparaison de ces séquences, chacune d'elles étant significative puisque les 14 valeurs de σ_0 , reportées sur une courbe $\sigma_0 = f(i)$ représentent en réalité 33 mesures en 1,5 GHz, 27 mesures en 3 GHz, 40 mesures en 4,5 GHz et 73 mesures en 9 GHz.
- étude des relations existantes entre le paramètre de terrain considéré et le pouvoir de rétrodiffusion du sol nu.

L'influence simultanée de deux paramètres-terrain sur le signal sera étudiée dans les cas les plus favorables. Signalons que l'appréciation de la profondeur de pénétration du signal n'a pas été possible de manière expérimentale.

1 - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU SOL SUR LE SIGNAL RETRODIFFUSE

L'inventaire des conditions de température du sol selon les états d'humidité et de rugosité est reporté p. 45, en annexe 4.

Le regroupement des séquences réalisées en conditions équivalentes d'humidité et de rugosité s'avère difficile : les possibilités de comparaison sont peu nombreuses, au maximum trois séquences sont regroupées, et plus souvent, deux séquences seulement.

Dans les stades successifs de cette interprétation, nous négligerons tout d'abord ce paramètre non en connaissance de cause, mais par nécessité, avec la seule confirmation apportée par l'étude des éléments bibliographiques. Nous verrons, au paragraphe 4, que l'influence de ce paramètre a pu être étudiée pour 4,5 GHz.

2 - SENSIBILITE DU SIGNAL RETRODIFFUSE A LA RUGOSITE

Le comportement du signal rétrodiffusé ne peut être connu en fonction d'une grande gamme de rugosité de surface, puisque les 3 états réalisés durant cette campagne n'en couvrent qu'une partie de manière discontinue. Aussi, les possibilités de corrélation directe entre le coefficient σ , et la rugosité s'avèrent limitées. Néanmoins, il est possible de dégager la tendance générale de l'influence de la rugosité sur le comportement du signal.

2.1. Comparaison des séquences

La répartition des séquences en fonction de l'humidité et de la rugosité (tableau page 81) a permis de mettre en évidence le faible nombre de séquences réalisées, pour des conditions d'humidité identiques (écarts inférieurs à 2 %) sur différents états de rugosité. Cette difficulté limite les possibilités de comparaisons possibles, à chacune des quatre fréquences.

Nous avons élargi la gamme des conditions d'humidité de surfaces comparables à 4 %, soit deux fois la valeur de l'écart-type moyen des distributions des mesures d'humidité. De la sorte, le nombre de séquences comparables a un peu augmenté.

Cela a permis de comparer, de 12,5 % à 16,5 % d'humidité :

- 5 séquences en 1,5 GHz (dont une n'a été réalisée qu'en une polarisation HH, à la suite d'une panne) ;
- 7 séquences en 3 GHz ;
- 9 séquences en 4,5 GHz.

A 9 GHz, ce regroupement n'a pas été possible, la dispersion des conditions d'humidité étant trop importante.

Nous avons regroupé (figure 47) les séquences réalisées en 1,5 GHz, l'amplitude des erreurs des courbes extrêmes est signalée en annexe 4, p. 47.

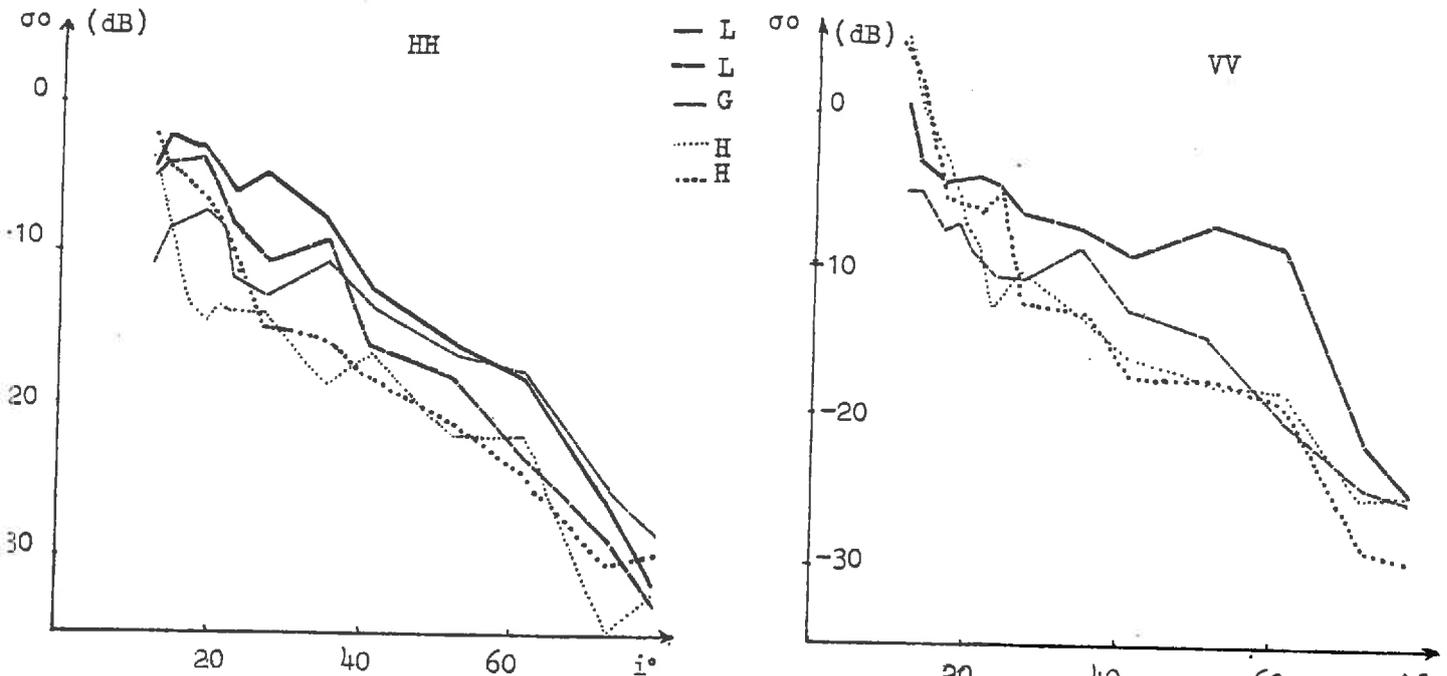


fig.47 Regroupement des séquences à 1,5 GHz pour une humidité donnée (12 à 16%)
L labour, G griffage, H hersage

Malgré le faible nombre de séquences, et la relativité des valeurs de σ_0 due à la marge d'erreur calculée, on observe une certaine graduation dans l'ordre des séquences les unes par rapport aux autres :

- les 2 séquences correspondant au hersage sont, dans les deux polarisations, aux niveaux les plus bas (σ_0 faible) ;
- les séquences correspondant au labour et griffage ont des valeurs communes dans certaines configurations.

Le faible nombre de séquences permet seulement de dégager une différence de comportement du signal rétrodiffusé entre une surface hersée et des surfaces plus rugueuses (griffage ou labour) : la rétrodiffusion semble moins importante sur une surface peu rugueuse que sur les surfaces plus accidentées.

Par contre, on n'observe pas d'effet spéculaire net, c'est-à-dire une grande valeur de la puissance reçue aux incidences proches de la normale et une décroissance très rapide de cette valeur avec l'augmentation de l'incidence. Aussi, la surface hersée ne doit-elle pas être très lisse vis-à-vis de la longueur d'onde utilisée ($\lambda = 20$ cm) ; (rappel : fig. 1, p. 6.

- A 3 GHz, 7 séquences ont été regroupées (fig. 48). La superposition des courbes ne permet pas d'observer un ordre apparent, entre les différentes conditions de surface dans lesquelles les séquences correspondantes ont été réalisées. Nous n'avons donc pas de renseignements concernant l'influence de la rugosité sur le signal rétrodiffusé à 3 GHz.

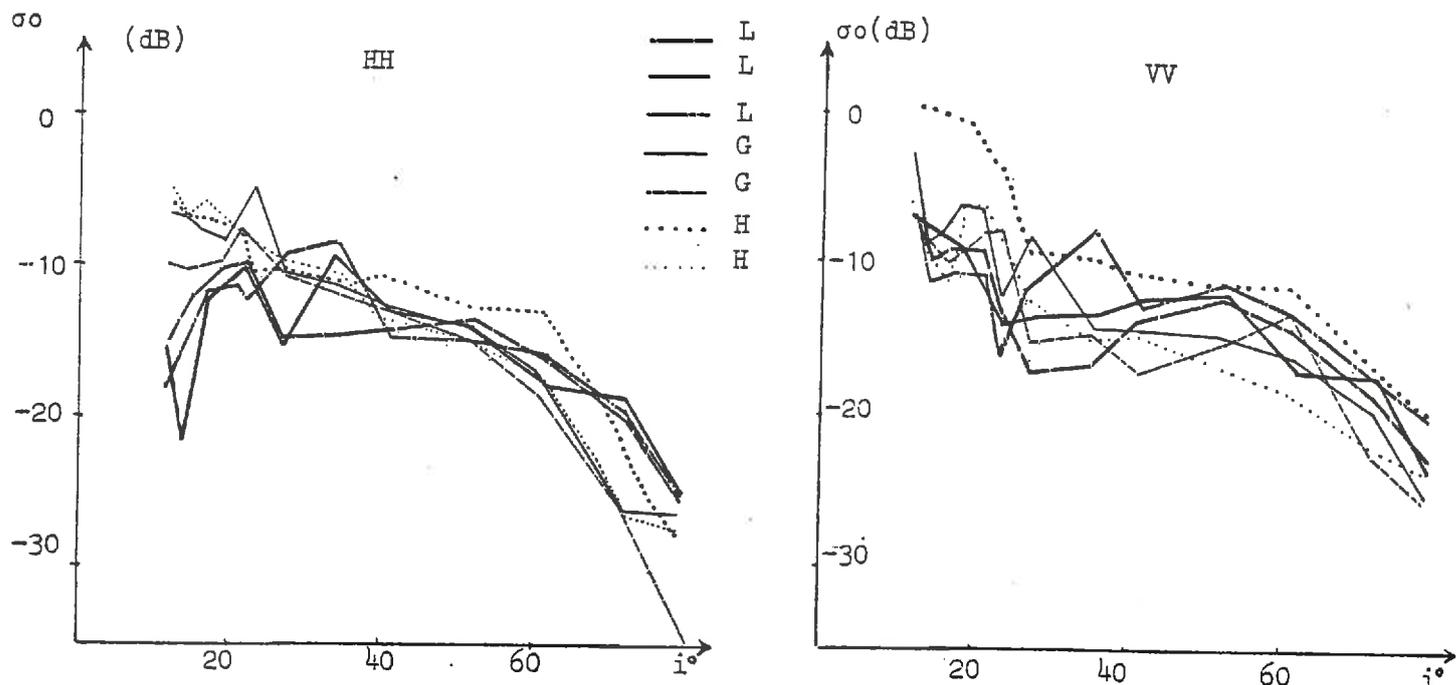


fig.48

Regroupement des séquences à 3 GHz pour une humidité donnée (12 à 16,5%)
L labour, G griffage, H hersage

- Les 9 séquences comparables réalisées à 4,5 GHz sont représentées sur la figure 49. Quelles que soient les conditions de polarisation, ces séquences donnent des courbes $\sigma_0 = f(i)$ qui se superposent très étroitement à partir d'une incidence de 35° (exceptée une courbe VV sur herse). Les limites de précision des valeurs (annexe 4, p. 47) sont très proches, même aux incidences faibles. Aussi, est-ce sur l'ensemble de la gamme d'incidence que les séquences peuvent être considérées comme très semblables.

Dans les conditions d'expériences décrites, à 4,5 GHz, le signal rétrodiffusé apparaît donc insensible à la rugosité.

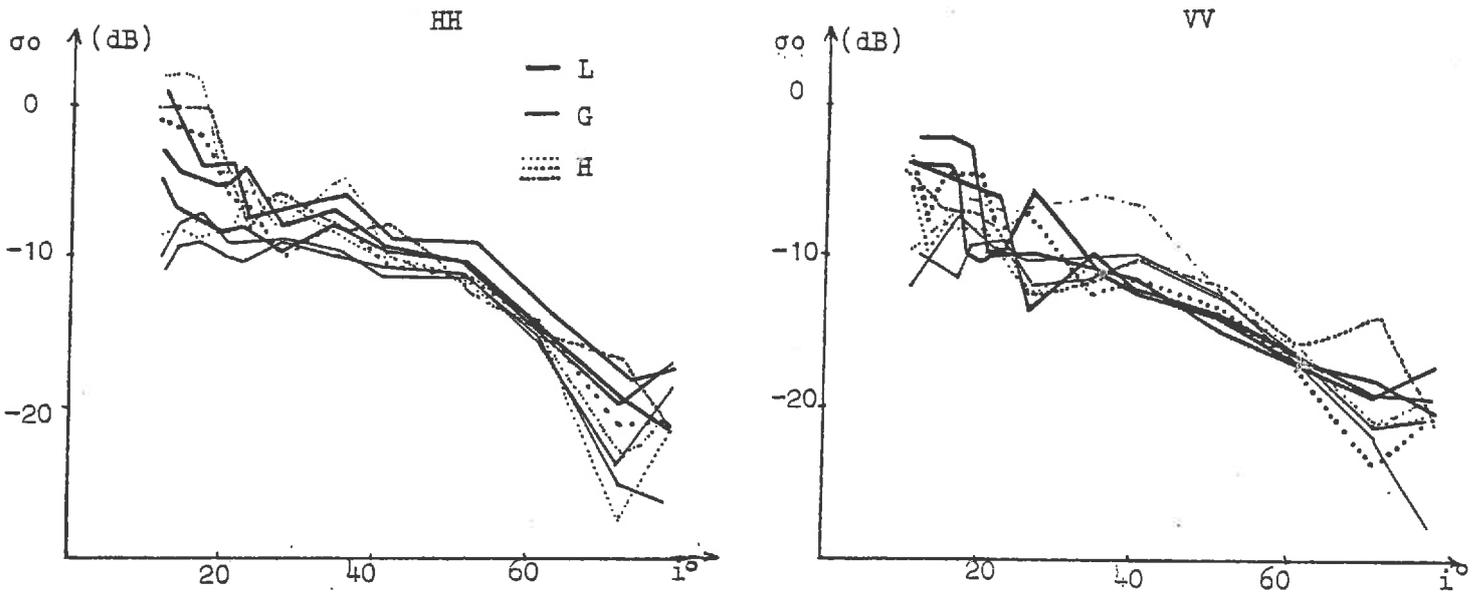


fig.49 Regroupement des séquences à 4,5 GHz pour une humidité donnée (12 à 16,7%)
L labour, G griffage, H hersage

- Enfin, sur la figure 50, nous avons reporté quelques séquences réalisées à 9 GHz. Les taux d'humidité vont de 14,6 % sur la herse à 22,3 % sur le labour. Les courbes s'entre-croisent très peu, et leur disposition est croissante avec la rugosité et l'humidité. Il est difficile de savoir quel est le paramètre prédominant sur le comportement du signal rétrodiffusé. L'augmentation du coefficient σ_0 se manifeste avec l'augmentation simultanée des deux paramètres.

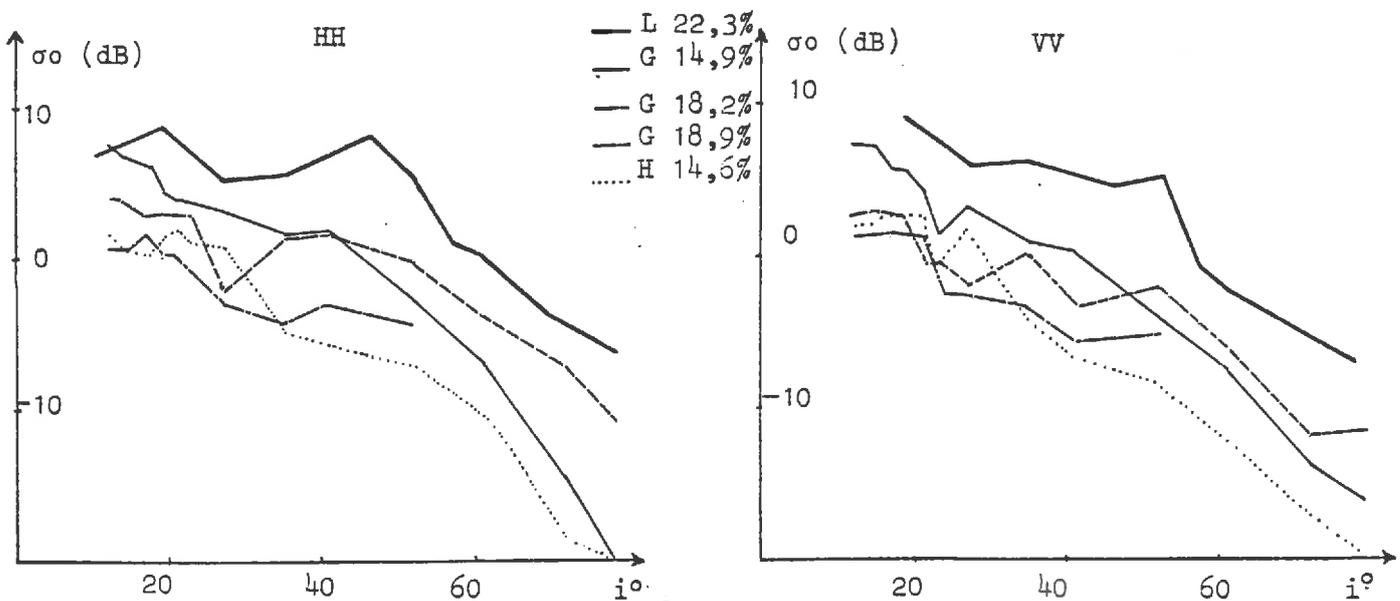


fig.50 Regroupement des séquences à 9 GHz pour une humidité de 14,6 à 22,3%
L labour, G griffage, H hersage

Ainsi, la comparaison des séquences nous permet de dégager quelques éléments significatifs d'une relation entre le signal rétrodiffusé et la rugosité de surface observée :

- .à 1,5 GHz et 9 GHz, le coefficient σ_0 augmente avec la rugosité. Mais le nombre restreint de séquences, réalisées en conditions d'humidité comparables, limite la signification de ces résultats ;
- .à 3 GHz, aucune information n'est obtenue sur l'influence de la rugosité ;
- .à 4,5 GHz, le signal rétrodiffusé est insensible aux différences de rugosité réalisées durant cette campagne.

2.2. Utilisation des critères de quantification de la rugosité

Nous avons cherché à relier les valeurs de σ_0 avec les critères de rugosité définis dans la deuxième partie.

Lorsque les conditions d'humidité et de rugosité sont voisines, et que l'écart entre les valeurs correspondantes des σ_0 de deux séquences n'est pas supérieur à l'intervalle de précision, nous avons calculé les moyennes de ces coefficients σ_0 , à une incidence donnée, en utilisant le tableau p. 46 de l'annexe 4.

Nous avons tout d'abord utilisé le critère de rugosité S (écart-type de la distribution des altitudes d'un transect), qui disperse le mieux les trois types de prélèvements de surface réalisés (voir la figure 39, page 70). Pour chacun de ces trois états, nous avons pris la valeur moyenne des écarts-types de tous les transects réalisés sur un type de rugosité (60 sur labour, 40 sur griffage, 20 sur hersage).

Labour : S = 50
Griffage : S = 21
Hersage : S = 13

Sur la figure 51, nous avons représenté les valeurs moyennes de σ_0 en fonction du critère S, à une incidence et une fréquence données ; les segments qui joignent chacun des points n'ont pas de réalité ; il permettent seulement une visualisation plus rapide.

- en 1,5 GHz, le signal rétrodiffusé augmente avec le critère S, quelle que soit l'incidence de visée et la polarisation. Cette augmentation est plus importante entre le hersage et le griffage qu'entre le griffage et le labour.
- en 3 GHz, la variation du coefficient σ_0 est très irrégulière suivant l'incidence et son amplitude est très variable. Il est difficile de déceler une relation entre le paramètre de rugosité S et le coefficient σ_0 .
- en 4,5 GHz : exceptées les incidences de 17° et 21°, les points correspondants à une incidence quelconque sont pratiquement alignés. Le coefficient σ_0 est bien insensible aux variations du critère S.

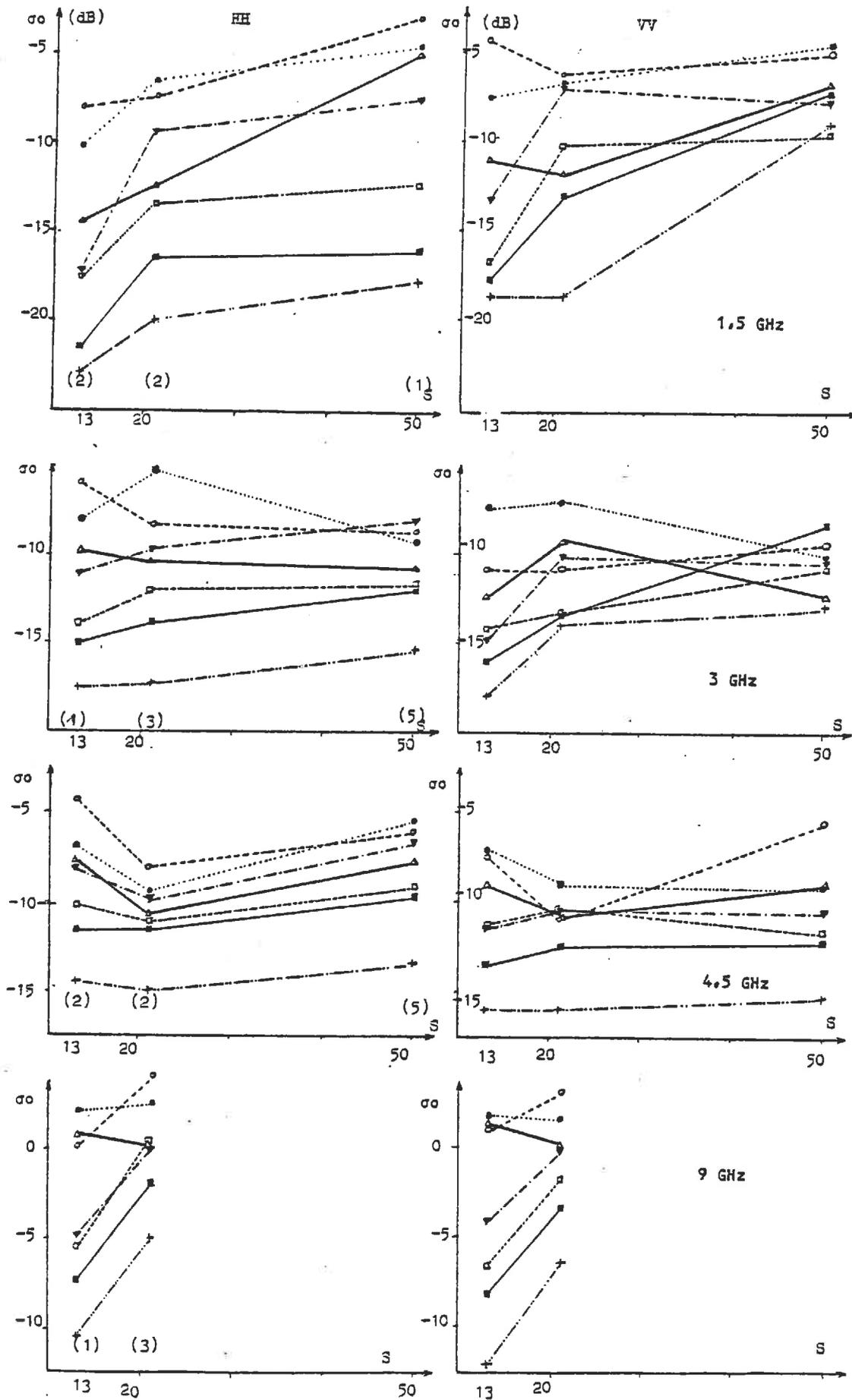


fig.51 Signal rétrodiffusé en fonction du critère S de rugosité.

les chiffres indiqués entre parenthèses correspondent au nombre de séquences prises en compte dans la valeur moyenne à une rugosité.

- à 9 GHz : seules des séquences, réalisées sur griffage et hersage, ont pu être comparées. A toutes les incidences (sauf 27°), le signal augmente fortement entre les valeurs de S correspondant à ces rugosités.

Ce type de représentation permet de confirmer les observations signalées précédemment. Mais il n'est pas possible, avec trois points, de préciser davantage la relation propre existant entre un paramètre de rugosité et le coefficient de rétrodiffusion.

Ce même problème est renouvelé lorsqu'on tente d'utiliser des paramètres de rugosité intégrant la longueur d'onde, tels le comptage des mottes en fonction de leur taille vis-à-vis de la longueur d'onde, ou l'indice σ^2/λ^2 .

2.3. Comparaison de ces résultats avec la bibliographie

Cette comparaison est difficile à réaliser. En effet, les conditions d'expériences, décrites dans un certain nombre de documents, sont très différentes de celles réalisées dans notre étude. Le dispositif expérimental de l'équipe de M. ULABY (Kansas, U.S.A.) est le plus semblable au système RAMSES : dans de nombreuses expériences, ils ont utilisé un scattéromètre FM-CW, monté sur la nacelle élévatrice d'un sherry-picker. L'élévation, possible jusqu'à une vingtaine de mètres, permet de viser différentes parcelles de sols nus ou cultivés.

L'influence de la rugosité sur le signal rétrodiffusé n'a pas été étudiée de façon propre. Seul, un critère "RMS surface height" qui correspond à un écart-type des hauteurs a été utilisé pour caractériser les différents états de surface. Mais son mode d'obtention n'est pas défini dans la littérature. Quelques séquences réalisées par cette équipe sont comparables aux nôtres (réf. 60). Elles concernent des fréquences voisines de 5 GHz (4,7 GHz, 5,9 GHz et 7,1 GHz) choisies par M. ULABY comme les plus intéressantes pour l'étude de la sensibilité à l'humidité du sol. Les différences de comportement du signal suivant la rugosité du sol ne sont ni commentées ni interprétées.

2.4. Conclusion

La recherche d'une relation existant entre le phénomène de rétrodiffusion et l'aspect rugueux de la surface observée s'est heurtée aux difficultés suivantes :

- l'insuffisance des séquences de mesures "comparables",
- la faible diversité des rugosités.

L'étude préalable concernant l'appréciation de la rugosité du sol a permis une discrimination et une quantification de différents états de surface. Cette quantification n'a pu être utilisée de manière satisfaisante, du fait de cette faible diversité, et la rugosité a encore conservé un aspect qualitatif dans l'interprétation. Cependant, nous pouvons considérer que la rugosité n'est plus une information purement qualitative, mais fait partie des informations qualitatives ordonnées.

Nous avons pu dégager quelques traits relatifs au comportement du signal rétrodiffusé avec la variation de la rugosité :

- elle a une influence différente, selon la longueur d'onde utilisée ;
- à 1,5 GHz et 9 GHz, l'accentuation de la rugosité s'accompagne d'une augmentation de la rétrodiffusion, dans la majorité des conditions d'incidence comprises entre 20° et 60° ;
- à 4,5 GHz, le signal présente un caractère d'indifférence vis-à-vis de la rugosité, qui est très marquée pour les incidences de 35° à 60°. Cet aspect est un élément important : dans l'étude de l'influence de l'humidité du sol, il permet de s'affranchir du paramètre de rugosité dans cette longueur d'onde.
- à 3 GHz, les éléments dont nous disposons ne nous permettent aucune conclusion sur le rôle défini de la rugosité.

Ces premières conclusions demanderaient à être confirmées lors d'une campagne ultérieure, tant par la persistance des phénomènes observés que par la signification statistique des séquences prises en compte et la diversité des rugosités de surface.

3 - SENSIBILITE DU SIGNAL RETRODIFFUSE A L'HUMIDITE DE SURFACE

L'influence du paramètre humidité a été étudiée selon la même démarche que les autres paramètres-terrain.

3.1. Comparaison des séquences

Suivant chacune des trois rugosités, les valeurs d'humidité de surface, mesurées lors de la réalisation de chaque séquence, sont plus ou moins dispersées. Le bilan des conditions d'expériences est dressé dans le tableau ci-après :

Etat de surface	Fréquence	Nombre de séquences utilisables	Gamme d'humidité
LABOUR	1,5	3	12,5 % à 23,5 %
	3	7	6,5 % à 27 %
	4,5	6	16,5 % à 20,3 %
	9	1	22,3 %
GRIFFAGE	1,5	5	3 % à 27 %
	3	6	3 % à 18 %
	4,5	6	3,5 % à 27 %
	9	5	3 % à 30,5 %
HERSAGE	1,5	3	5,5 % à 13 %
	3	2	5,5 % à 16 %
	4,5	4	12 % à 15 %
	9	4	7,5 % à 27 %

Les conditions d'une étude satisfaisante nécessitent :

- une dispersion maximale dans les valeurs d'humidité,
- un nombre suffisant de séquences réalisées à une fréquence donnée et sur une rugosité donnée.

Aussi, pour chaque fréquence, notre étude a-t-elle portée sur les séries de séquences les plus appropriées :

- .à 1,5 GHz : la série réalisée sur griffage,
- .à 3 GHz : les séries réalisées sur labour et griffage,
- .à 4,5 GHz : la série réalisée sur griffage,
- .à 9 GHz : la série réalisée sur griffage.

3.2. Corrélation entre le signal rétrodiffusé et l'humidité de surface

Pour chacune des séries choisies, les valeurs des coefficients σ_0 sont représentées en fonction de l'humidité de surface, à une incidence et une polarisation données.

Les graphiques correspondants sont reportés sur les figures 52 à 55, dans les pages suivantes. L'étude de ces graphiques permet d'observer très globalement une augmentation générale du coefficient σ_0 avec l'humidité, selon des pentes propres à chaque incidence de visée. Il apparaît que l'humidité du sol a bien une influence sur la rétrodiffusion, celle-ci est plus ou moins marquée suivant la fréquence et la polarisation.

Pour évaluer la sensibilité du signal rétrodiffusé à l'humidité, nous avons utilisé la méthode d'ajustement linéaire. Par cette méthode, il est possible de calculer les coefficients de la droite de régression correspondant aux couples de valeur (σ_0 , H) d'une série choisie. L'utilisation de cette méthode ne signifie pas que la relation entre le coefficient σ_0 (en dB) et l'humidité (en %) soit strictement linéaire. Mais, dans la mesure où cette droite a une signification, -c'est-à-dire où les points d'expérience sont peu dispersés autour de la droite-*, la sensibilité du signal rétrodiffusé peut être approchée par la valeur de la pente de cette droite.

Nous n'avons considéré, pour chaque fréquence et chaque incidence, que les valeurs de pente des droites "significatives" (P^* au plus égale à 0,1). Les calculs n'ont pas été tentés pour des incidences inférieures à 17° : la variation du coefficient σ_0 y est souvent importante,

*La probabilité P que le coefficient de corrélation r soit dépassé en valeur absolue est donnée dans la table de distribution du coefficient de corrélation (extrait de "Méthodes Statistiques" de MORICE et CHARTIER).

même avec des séquences réalisées dans des conditions de terrain très voisines. La précision de la mesure du signal est beaucoup moins bonne à ces incidences. De même, aucun calcul n'a été tenté au-delà de 62°, pour les mêmes raisons de précision.

- Fréquence à 1,5 GHz (griffage - 5 séquences). (Fig. 52).

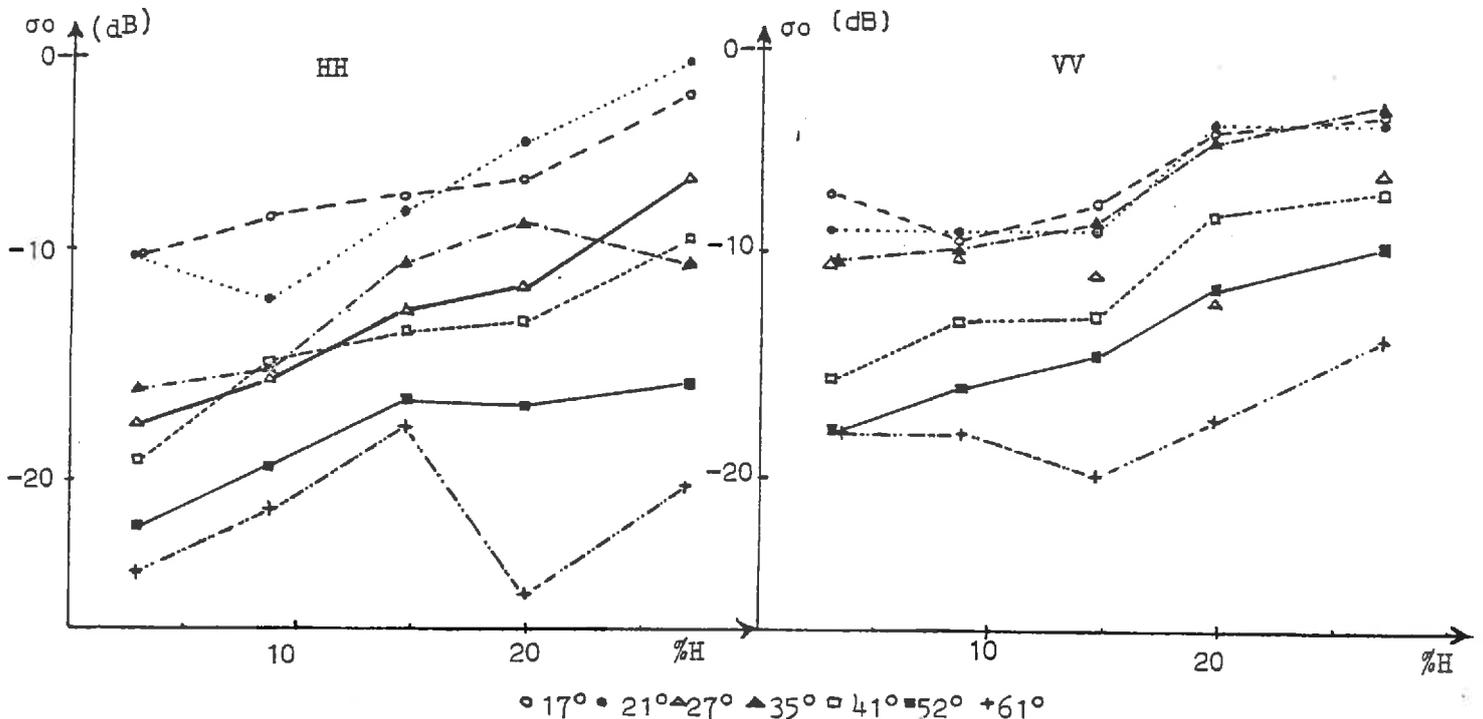


fig.52 Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 1,5 GHz sur une surface griffée (Canadien)

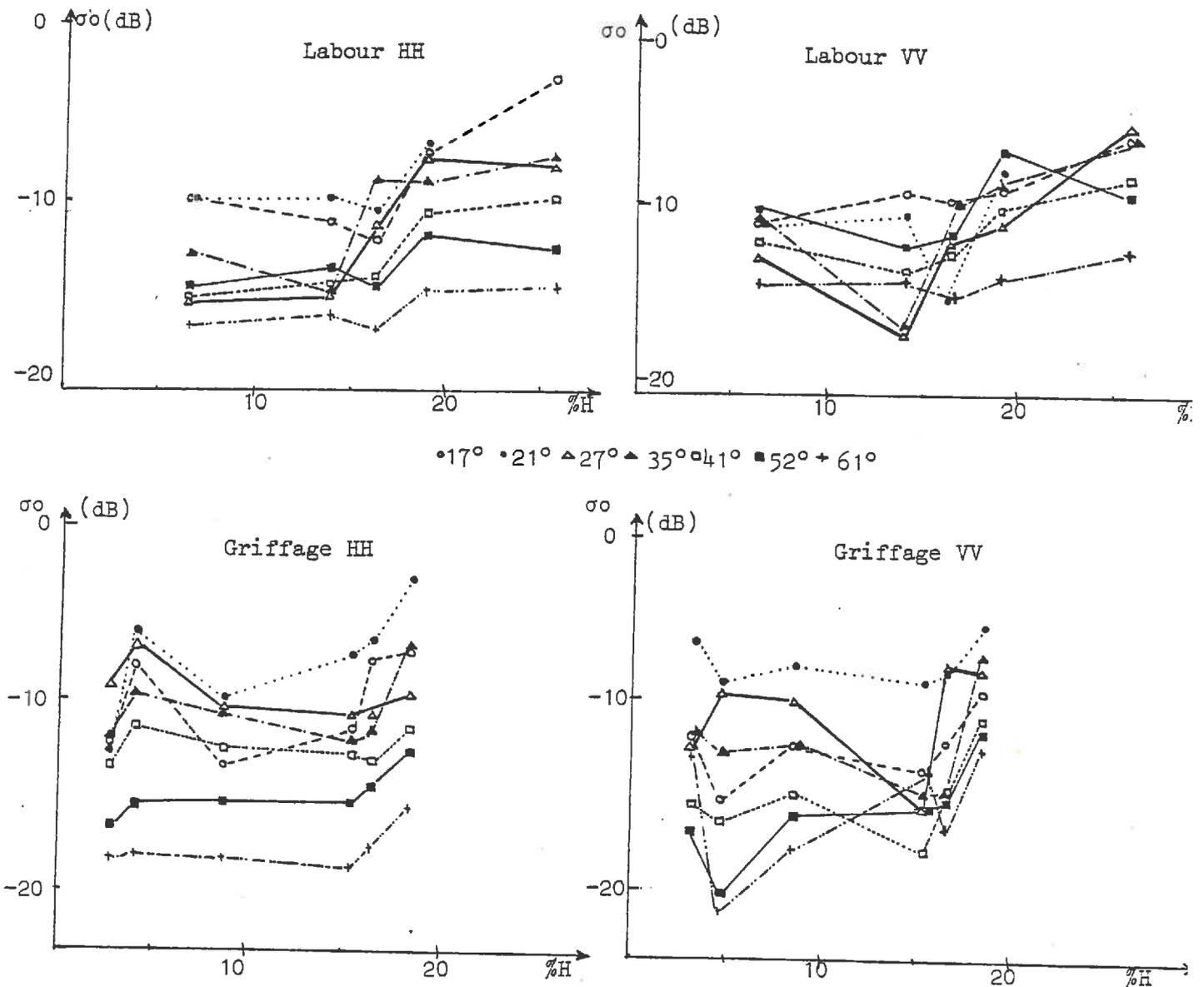
Polarisation	i	Pente	r	P
HH	17°	0.270	0.96	< 0.01
	21°	0.408	0.92	0.02
	27°	0.439	0.99	< 0.01
	35°	0.292	0.839	0.07
	41°	0.370	0.966	< 0.01
	52°	0.255	0.911	0.04
VV	17°	0.195	0.803	0.10
	21°	0.236	0.857	0.07
	35°	0.307	0.949	0.03
	41°	0.358	0.953	0.01
	52°	0.348	0.989	0.01

A cette fréquence, la valeur du coefficient de corrélation des droites de régression calculées est très significative dans la plupart des conditions d'incidence (17° à 52°, exceptée 27° en polarisation V).

Aussi, l'évaluation de la pente des droites nous permet-elle une bonne approche de la sensibilité du signal à l'humidité de surface du sol. Nous n'envisageons pas ici d'étudier la variation de la sensibilité du signal rétrodiffusé avec l'incidence de visée, considérant que notre approche est trop limitée, notamment par le nombre de couples de mesures (σ_0 , H) pris en compte. Mais, pour comparer cette sensibilité à celles obtenues aux autres fréquences, nous avons pris la valeur médiane des pentes significatives : à 1,5 GHz

- en polarisation HH, de 17° à 52°, sensibilité évaluée à 0,31 dB par pourcent d'humidité ;
- en polarisation VV, de 17° à 52°, excepté 27°, sensibilité évaluée à 0,30 dB par % d'humidité.

fig.53 Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 3 GHz sur des surfaces labourées et griffées.



- Fréquence 3 GHz (labour - 7 séquences ; griffage - 6 séquences). (Fig. 53).

Polarisation	i	Pente	r	P
Labour HH	27°	0.41	0.76	0.05
	41°	0.28	0.79	0.03
	61°	0.13	0.71	0.07
Labour VV	17°	0.23	0.86	0.01
Griffage HH	52°	0.17	0.84	0.03
Griffage VV	52°	0.35	0.80	0.06

Sur les deux séries utilisables réalisées à 3 GHz, seuls les résultats obtenus à partir de séquences sur labour en polarisation HH sont quelque peu satisfaisantes : à 27°, 41° et 61°. Les trois valeurs de pente obtenues sont très différentes les unes des autres. Il est difficile d'en prendre une valeur médiane représentative de la sensibilité du signal à l'humidité.

Les résultats obtenus sur les séries faites sur griffage peuvent se justifier par quelques hypothèses :

1. La gamme d'humidité couverte est insuffisante (3 à 18 %) ;
2. La relation entre le signal rétrodiffusé et l'humidité n'est pas assimilable à une relation linéaire.

- Fréquence 4,5 GHz

L'indifférence du signal vis-à-vis de la rugosité a été mise en évidence pour des conditions d'humidité comprises entre 12 et 16 %. Il n'est pas possible, avec les séquences obtenues durant cette campagne, de vérifier ce résultat pour d'autres conditions d'humidité. En supposant que humidité du sol et rugosité sont des variables indépendantes, nous pouvons comparer simultanément toutes les séquences réalisées à cette fréquence, quelle que soit la rugosité.

(Rugosité indifférente - 15 séquences). (Fig. 54).

Polarisation	i	Pente	r	P
HH	35°	0.32	0.90	< 0.01
	41°	0.29	0.81	< 0.01
	52°	0.33	0.88	< 0.01
	61°	0.25	0.89	< 0.01
VV	35°	0.24	0.83	< 0.01
	41°	0.22	0.63	0.1
	52°	0.23	0.73	< 0.01
	61°	0.15	0.73	< 0.01

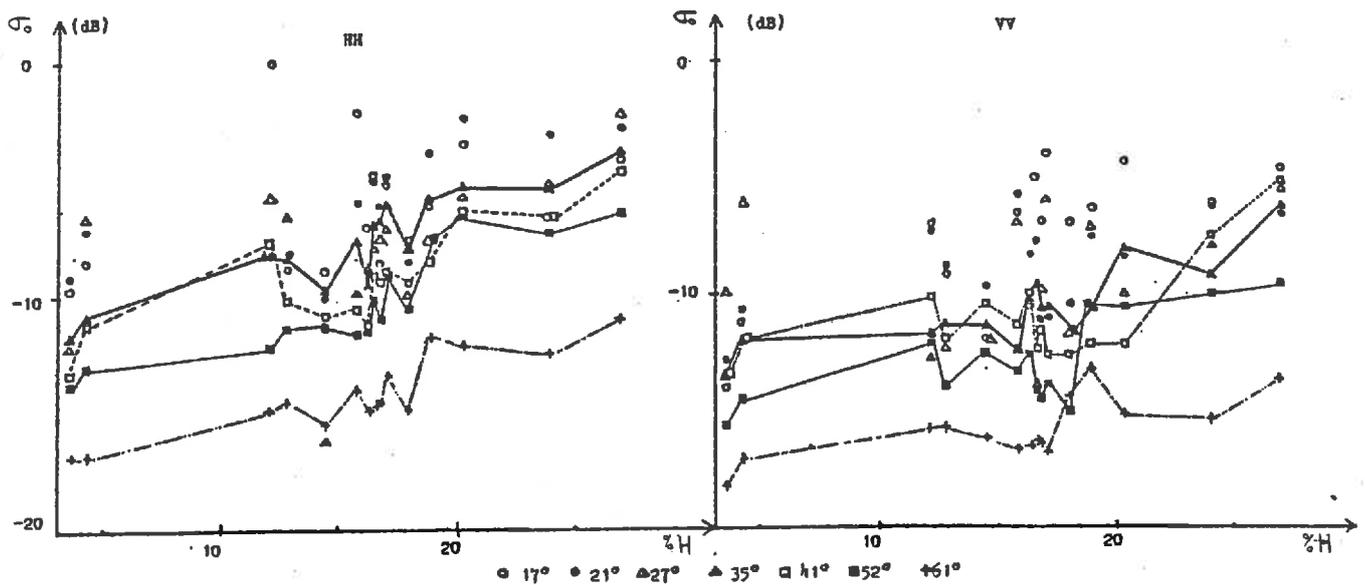


fig.54 Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité à 4,5 GHz

Les droites de régression correspondent à une corrélation significative ($P < 0,1$) seulement pour les incidences élevées (35° à 61°). Mais le nombre important de séquences prises en compte (15) confère à ces valeurs de pentes une grande validité dans l'appréciation de la sensibilité du signal à l'humidité.

A 4,5 GHz :

- en polarisation HH, de 35° à 61° , sensibilité évaluée à 0,3 dB par % d'humidité ;
 - en polarisation VV, de 35° à 61° , sensibilité évaluée à 0,22 dB par % d'humidité.
- Fréquence 9 GHz (griffage - 5 séquences). (Fig. 55).

Aucune des droites calculées ne présente un coefficient de corrélation significatif. La faible augmentation du coefficient de rétrodiffusion σ_0 avec l'humidité de surface ne correspond pas, sur les 5 séquences réalisées, à une augmentation linéaire. La sensibilité du signal à l'humidité ne peut pas être évaluée par cette méthode d'ajustement linéaire à cette fréquence de 9 GHz. L'observation des graphiques laisse à penser que, si cette sensibilité est réelle, elle est faible.

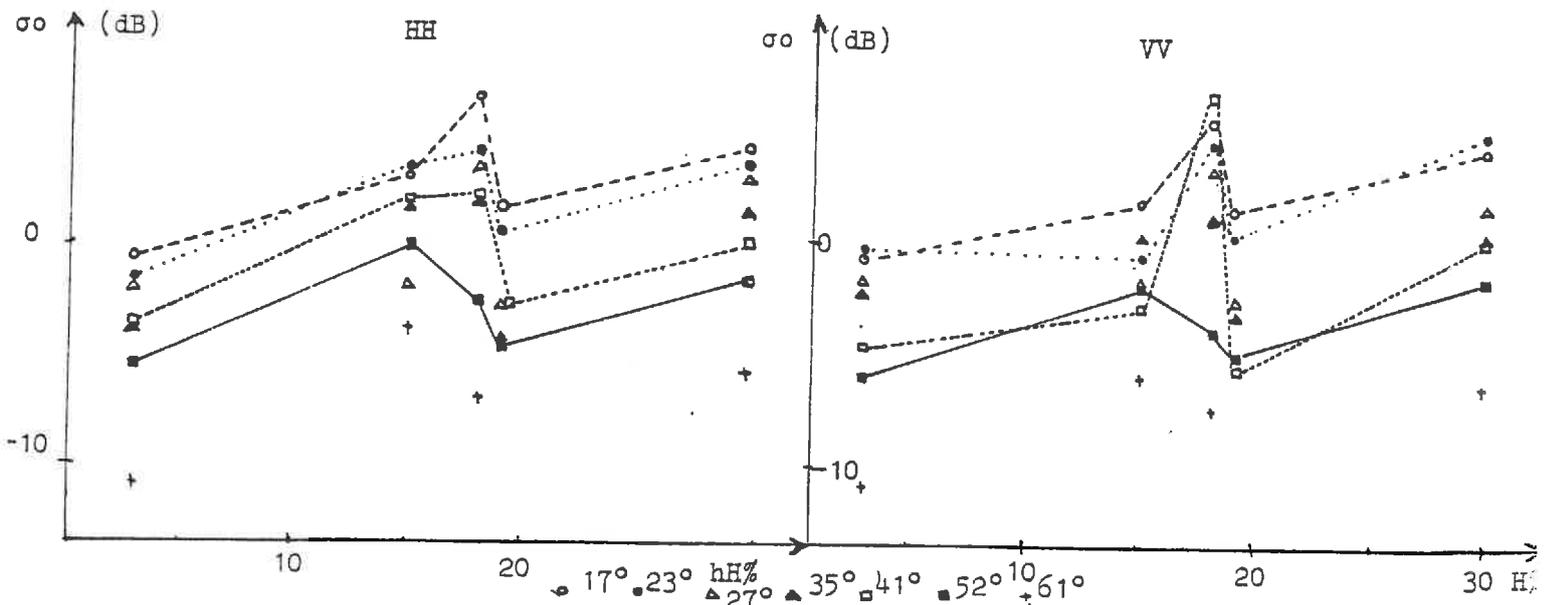


fig.55 Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 9 GHz sur une surface griffée.

3.3. Comparaison de ces résultats avec la bibliographie

Nous avons vu que les possibilités de comparaison sont assez réduites, du fait notamment des conditions d'expériences très diverses, lorsqu'elles sont décrites.

L'influence de l'humidité du sol et la détermination de la sensibilité du système micro-ondes vis-à-vis de l'humidité ont été étudiées pour des fréquences de 4,7 GHz, 5,9 GHz et 7,1 GHz (réf. 60) par l'équipe de M. ULABY. Sur la figure 56 sont reportées les courbes expérimentales réalisées en 4,7 GHz sur deux types d'état de surface (très rugueux et faiblement rugueux).

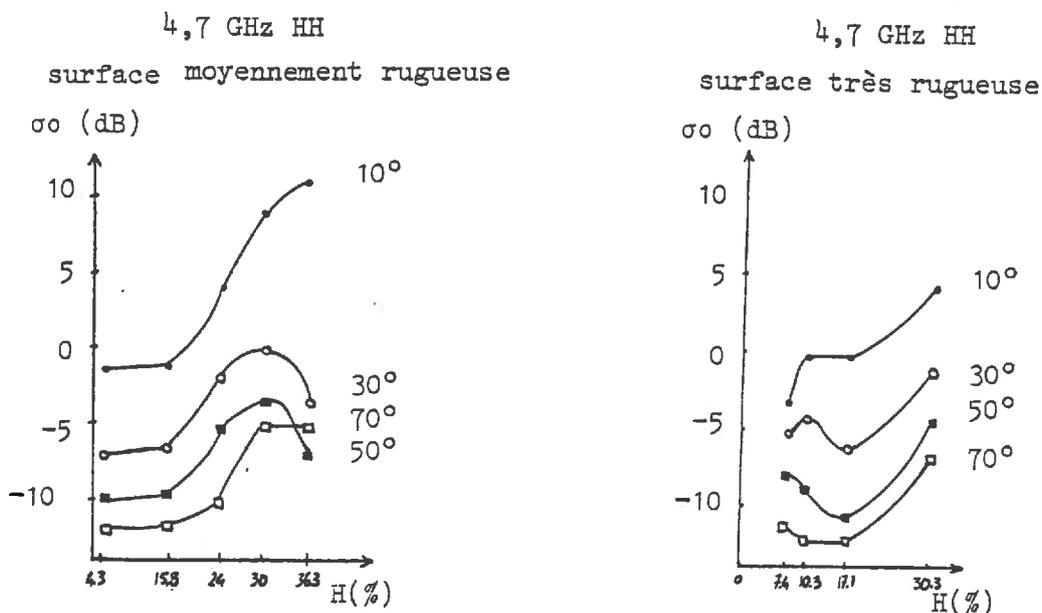


fig.56 Influence de l'humidité de surface sur le signal (extrait de F.T.Ulaby réf.60)

L'équipe de recherche du Kansas a mis en évidence :

- l'augmentation du signal rétrodiffusé avec l'humidité de surface du sol ;
- la relation linéaire entre le signal et l'humidité, qui s'observe sur des sols moyennement rugueux seulement, et se limite à l'intervalle 15-30 % d'humidité.

Le nombre de séquences à partir desquelles sont tirées ces informations n'est pas indiqué.

M. ULABY a également évalué la sensibilité par la détermination de la pente des droites de régression du signal à l'eau d'un sol nu (réf. 51). Elle est représentée sur la fig. 57.

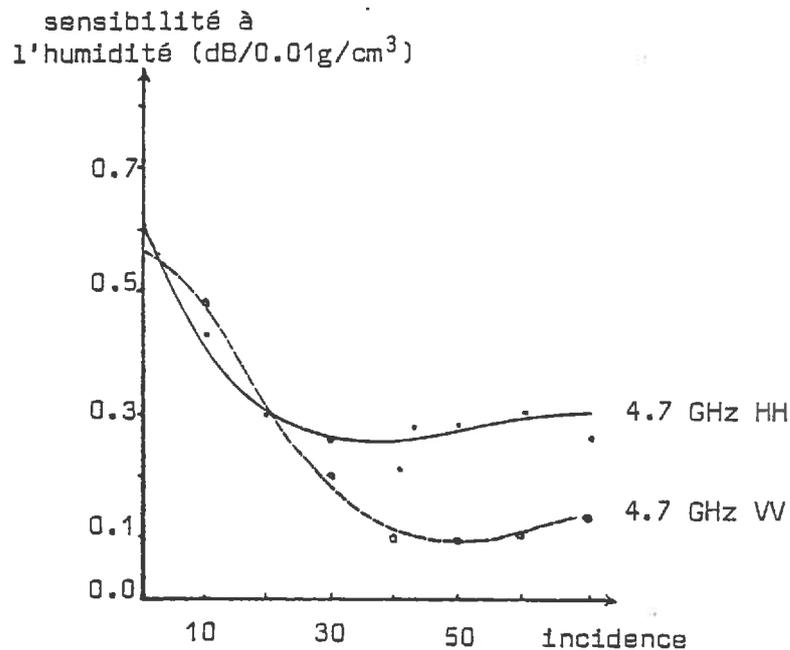


fig. 57 Sensibilité du radar à l'humidité d'un sol nu (ULABY et al. 75. - réf.51)

Dans la gamme d'incidence correspondant aux possibilités du RAMSES (15° à 70°), cette sensibilité (évaluée en dB par 0,01 grammes d'eau par cm³) est de l'ordre de 0.3 en 4,7 GHz, polarisation HH, et de 0,15 en 4,7 GHz, polarisation VV. Pour comparer avec la sensibilité évaluée grâce au système RAMSES, rapportons l'humidité pondérale à une humidité volumique en utilisant la densité apparente de la couche superficielle du sol, après un griffage : elle est égale à 1,4. Nos résultats donnent donc des sensibilités d'environ 0.21 dB/0,01 g/cm³ en polarisation HH et 0.16 en polarisation VV. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par l'équipe de M. ULABY.

3.4. Conclusion

Cette étude de l'influence de l'humidité du sol a été limitée par des difficultés d'ordre expérimental :

- Les conditions d'expérience permettant une comparaison des séquences ont été restreintes : cinq séquences seulement ont été étudiées à 1,5 GHz et 9 GHz.

Il n'a pas été possible de considérer l'influence de l'humidité du sol en profondeur, dont la valeur est restée très constante durant toute la campagne.

Malgré ces contraintes, un certain nombre de résultats importants se sont dégagés :

- l'augmentation de l'humidité de surface s'accompagne à toutes les fréquences d'une augmentation de la rétrodiffusion, quelle que soit l'incidence de visée.
- cette influence est plus ou moins marquée selon les fréquences, les incidences et la polarisation.

Dans certaines conditions, la méthode d'ajustement linéaire nous a permis une approche de la sensibilité du signal à l'humidité de surface, qui peut être résumée dans le tableau ci-dessous :

Fréquence GHz	Polarisation	Incidence	Sensibilité dB par % d'humidité.
1,5	HH	17° - 52°	0,32
	VV	idem sauf 27°	0,3
4,5	HH	35° - 61°	0,3
	VV	idem	0,22

En 3 GHz et 9 GHz, la sensibilité n'a pu être évaluée de manière précise. Elle semblerait être du même ordre qu'à 1,5 GHz et 4,5 GHz en 3 GHz, d'après les quelques évaluations qu'il a été possible de faire. A 9 GHz, la sensibilité semble très faible.

L'insensibilité de la fréquence 4,5 GHz à la rugosité a permis de nous affranchir de ce paramètre dans nos conditions d'expérience et d'évaluer la sensibilité à l'humidité à partir d'un bon nombre de séquences (15).

Avec le scattéromètre RAMSES, l'appréciation d'une classe d'humidité de surface peut donc être envisagée aux fréquences 1,5 GHz et 4,5 GHz en particulier. Pour un résultat fiable, un grand nombre de mesures de puissance reçue sera nécessaire, pour pallier à l'imprécision de la mesure liée au nombre d'échantillons indépendants.

4 - ETUDE DE CAS PARTICULIERS

4.1. Utilisation des propriétés du signal à 4,5 GHz

Dans le cas particulier de cette fréquence, nous avons tenté d'étudier l'influence de la température du sol, selon la démarche établie au début de ce chapitre. L'insensibilité du signal à la rugosité permet de regrouper 8 séquences réalisées dans des conditions d'humidité équivalente (15 % à 19 %).

Sur la figure 58 sont reportées les valeurs du coefficient σ_0 en fonction des températures au sol relevées à 5 cm de profondeur. Ces températures correspondent à celles enregistrées au cours de la réalisation d'une séquence de mesures. L'ensemble de ces températures, sur les 8 séquences considérées, représente une gamme de valeurs peu étendue : de 11°C à 19°C.

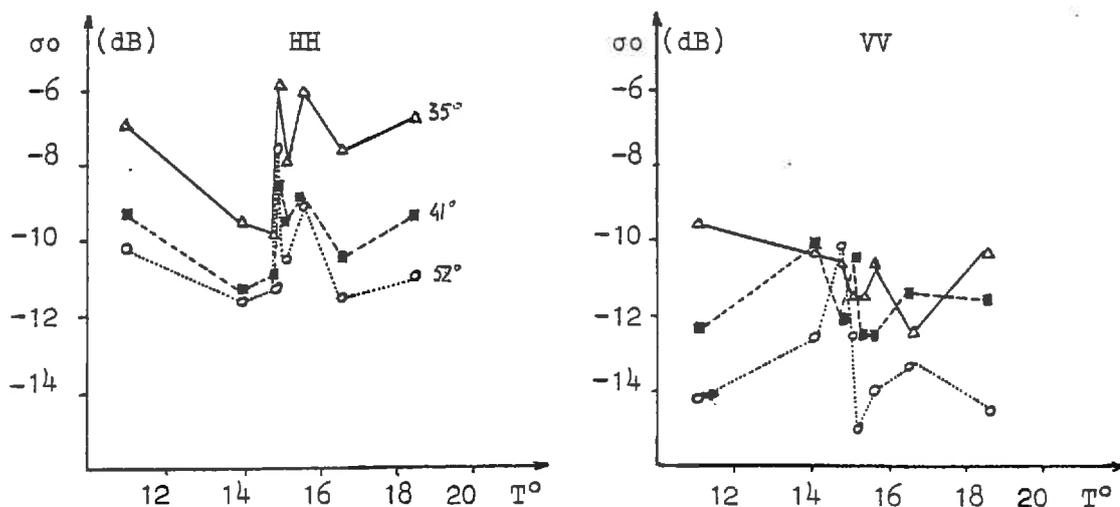


fig. 58 Signal rétrodiffusé en fonction de la température du sol à 4,5 GHz

Les variations du coefficient σ_0 avec la température ont une amplitude peu importante avec l'incidence de visée : 4 dB à 35°, 2,5 dB à 41° et 4 dB à 52°. Ces amplitudes sont très proches de la précision du système (fig. 46, p. 84).

L'utilisation des propriétés du signal à 4,5 GHz permet de renforcer l'hypothèse de base faite au début de l'interprétation des résultats : l'influence de la température du sol sur le signal rétrodiffusé est, si elle existe, négligeable vis-à-vis de celle des autres paramètres de terrain.

Mais ce cas particulier ne saurait être suffisant pour conclure de manière générale à la nature de l'influence de la température du sol.

4.2. Influence combinée de plusieurs paramètres sur le signal rétrodiffusé

Une étude globale de l'influence combinée des paramètres terrain ou système serait souhaitable sur l'ensemble des séquences réalisées à toutes les fréquences. Elle permettrait de comparer la part relative des modifications de la rétrodiffusion due à chacun des paramètres de terrain. L'aspect discontinu des variations des conditions de terrain limite une telle étude à l'examen des cas les plus favorables.

Ainsi, dans le choix particulier des séquences réalisées en 1,5 GHz, nous avons dégagé séparément, dans les paragraphes précédents, l'influence des paramètres rugosité et humidité :

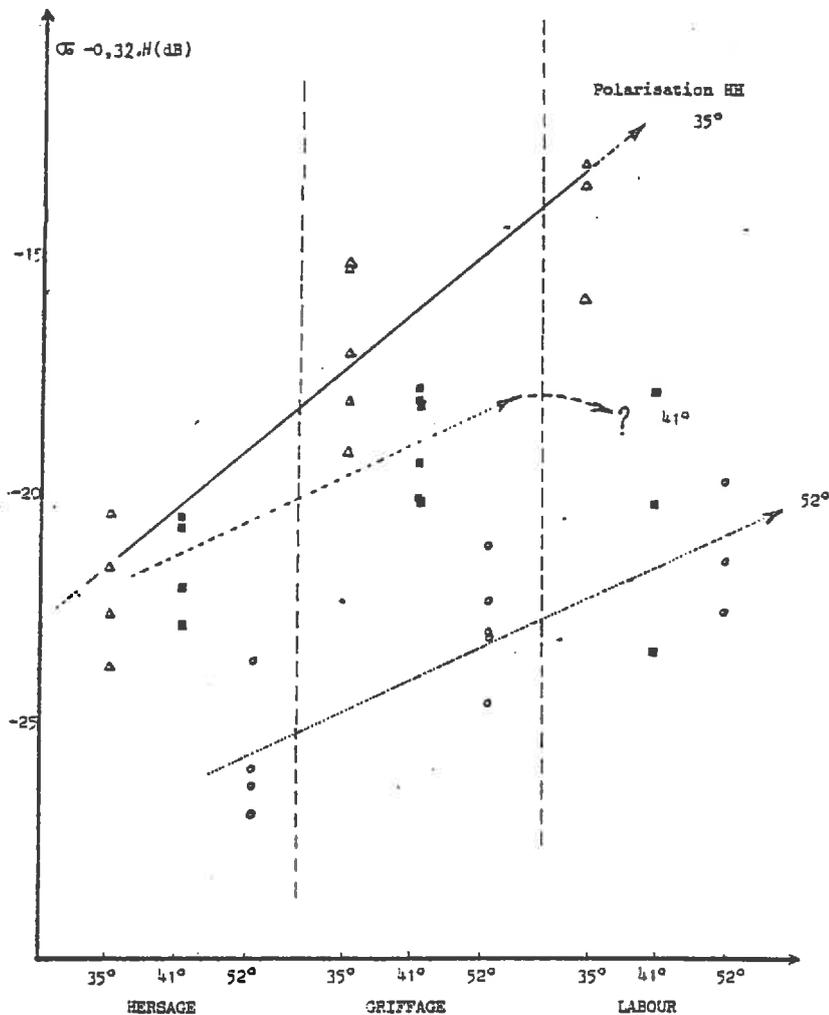
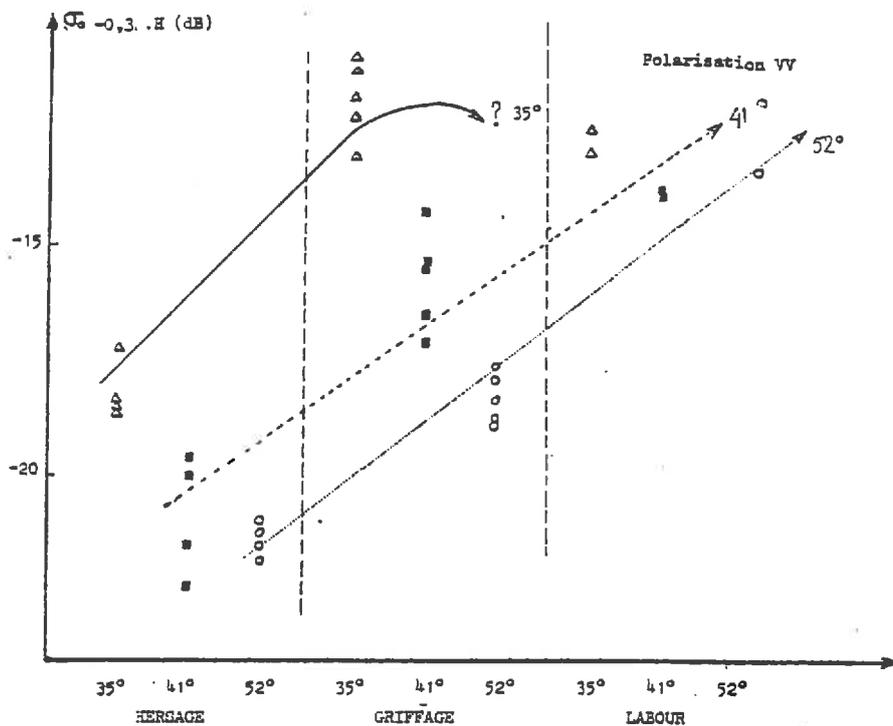


fig.59 Influence de la rugosité et de l'incidence sur le coefficient ($\sigma_0 - s \cdot H$)

$s=0,32$ en HH
 $s=0,3$ en VV

- .une influence positive de la rugosité sur la variation du signal rétro-diffusé ;
- .une sensibilité à l'humidité, caractérisée par la pente de la droite de régression, de l'ordre de 0.3 dB par % d'humidité.

En simplifiant, on peut écrire :

$$\sigma_o = 0,3.H + f (rg) + g (x)$$

rg = rugosité

g(x) = fonction résiduelle dépendant d'autres paramètres non ou mal définis

$$\text{d'où } \sigma_o' = \sigma_o - 0,3.H = f (rg) + g (x)$$

Par cette transformation simple, il est possible d'étudier directement l'influence de la rugosité sur les 12 séquences réalisées en 1,5 GHz durant la campagne. Cette comparaison est restreinte aux incidences 35°, 41° et 52° (fig. 59).

Plusieurs caractéristiques se dégagent de cette comparaison :

- 1 - A une incidence donnée et une rugosité donnée, les valeurs des coefficients σ_o' de chaque séquence se retrouvent très groupées (écarts inférieurs à 4 dB) dans les deux polarisations.

La transformation réalisée est donc justifiée. Les séquences réalisées à une rugosité donnée et affranchies du paramètre humidité sont très comparables. Cela confirme l'hypothèse d'indépendance faite entre les variables humidité et rugosité. De plus, le bon fonctionnement du système RAMSES est encore vérifié par ce biais.

- 2 - Suivant chaque incidence de visée, l'augmentation de la rugosité a une influence variable. -Elle s'accompagne d'une augmentation régulière du coefficient σ_o' à 35° et 52° en HH et à 41° et 52° en VV.

-Elle correspond à un "palier" plus ou moins net du coefficient σ_o' au niveau du griffage et du labour à 41° en HH et 35° en VV.

La rugosité du sol a donc une influence certaine sur le signal rétrodiffusé. Lors d'une campagne ultérieure, il reste à vérifier la différence de comportement de la rétrodiffusion suivant l'incidence et à évaluer plus précisément la sensibilité du signal à la rugosité.

- 3 - L'augmentation du coefficient σ_o' est du même ordre d'une rugosité à l'autre à une incidence donnée que d'une incidence à l'autre pour une rugosité donnée.

L'incidence de visée, de même que l'angle sous lequel le faisceau atteint la surface observée (angle rasant) sont donc des facteurs d'importance, qu'il ne faudra pas oublier de considérer lors d'une interprétation d'enregistrements.

Ainsi, des comparaisons d'enregistrements faits sur des zones de relief différent ne seront possibles que dans les cas où les angles rasants seront de même ordre.

L'examen de ce cas particulier, quoique très ponctuel, permet de souligner la complexité de l'intervention de chaque paramètre, terrain ou système, sur les modifications du signal rétrodiffusé. Une meilleure compréhension de ces influences multiples doit rester la préoccupation de recherches ultérieures.

5 - CONCLUSION

Plusieurs problèmes, techniques et expérimentaux, ont rendu délicate l'interprétation des résultats de scattérométrie obtenus durant cette première expérimentation du prototype RAMSES. Il s'est agi de la précision du système et de la variation discontinue des conditions de terrain.

Les influences des paramètres-terrain sur les modifications du signal rétrodiffusé ont été dégagées indépendamment les unes des autres. Les caractéristiques suivantes ont été mises en valeur :

- .le signal rétrodiffusé augmente avec la rugosité croissante, aux fréquences 1,5 et 9 GHz, mais ce facteur n'apporte aucune modification au comportement du signal à 4,5 GHz. Aucune information n'a pu être extraite des séquences réalisées à 3 GHz.
- .la sensibilité du signal rétrodiffusé à l'humidité de la surface du sol est plus ou moins importante suivant les fréquences. Elle a pu être évaluée, en 1,5 et 4,5 GHz à environ 0,3 dB par % d'humidité grâce à l'utilisation d'une méthode d'ajustement linéaire. Cette méthode ne s'est pas avérée satisfaisante aux fréquences 3 et 9 GHz, où la sensibilité à l'humidité semble néanmoins effective mais en proportion plus faible qu'au deux autres fréquences.

Certaines hypothèses de base, comme l'insensibilité du signal à la température du sol et l'indépendance des variables humidité et rugosité, ont pu être confirmées ponctuellement lors de l'examen de cas particuliers (à 4,5 GHz, insensibilité à la température, à 1,5 GHz indépendance des variables humidité et rugosité).

Ces premières conclusions sont importantes. Elles apportent des éléments complémentaires aux données bibliographiques. Elles mettent l'accent sur les différences d'informations qu'on peut obtenir du sol suivant la longueur d'onde choisie, notamment à 1,5 GHz et 4,5 GHz. Elles offrent des perspectives plus précises quant à l'utilisation de radars aéroportés : en effet, de tels appareils permettent d'explorer de grandes surfaces et leur précision peut atteindre le décibel. Dans ces conditions, il est possible d'envisager le zonage d'une région en classes d'humidité distinctes. Avec une sensibilité de 0,3 dB par % d'humidité, ces classes d'humidité peuvent être de l'ordre de 3 % à 5 %. De la même façon pourrait se réaliser le suivi temporel de l'évolution de l'humidité.

Ces possibilités originales des micro-ondes peuvent donc jouer un rôle très complémentaire vis-à-vis des autres longueurs d'onde utilisées en télédétection. L'appréhension volumique de l'état du sol grâce à la capacité d'une certaine pénétration du signal, reste à préciser. De même, l'étude de l'influence simultanée de tous les paramètres avec le signal demande à être approfondie pour évaluer la part relative des modifications de la rétrodiffusion due à chacun d'eux. Notre approche, bien qu'insuffisante, a mis l'accent sur cette nécessité.

*
* * *

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'utilisation du scattéromètre RAMSES, dans une première série d'expériences menées à Grignon, a été l'occasion d'approfondir les possibilités offertes par les techniques micro-ondes dans l'étude des sols.

L'ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

La littérature fait état des paramètres terrain qui ont une influence sur les modifications du signal écho (signal rétrodiffusé) enregistré par les systèmes actifs (scattéromètre, SLAR, SAR). Il s'agit des propriétés diélectriques complexes du matériau exploré et de la rugosité de surface. La part relative des effets de chacun de ces facteurs est encore bien mal connue. En télédétection, les travaux de recherche antérieurs traduisent l'espoir d'utiliser les propriétés spécifiques des micro-ondes, notamment leurs possibilités de pénétration, pour étudier le sol et ses caractéristiques grâce à une approche volumique.

LES CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Le scattéromètre RAMSES, prototype du Centre National d'Etudes Spatiales, est un système actif multifréquences (1,5 - 3 - 4,5 et 9 GHz) et multipolarisation (HH, HV, VH, VV). Il mesure le pouvoir réflecteur de la surface observée (coefficient de rétrodiffusion σ_0). Son installation à poste fixe permet d'étudier la rétrodiffusion dans diverses configurations d'angles de visée sur une parcelle de quelques centaines de mètres carrés. Pour mener avec cohérence l'acquisition globale des données de l'expérimentation, une bonne connaissance de la technologie du RAMSES a été nécessaire simultanément à une juste appréciation de la zone-test et à une mise au point précise des méthodes de mesures des paramètres de terrain. En effet, la représentativité des mesures et leur précision sont des éléments importants pour l'interprétation des résultats.

LES PARAMETRES PEDOLOGIQUES ETUDIES

- La température du sol :

L'insensibilité du signal à la température et l'indépendance des variables humidité et rugosité sont des hypothèses qui se sont confirmées dans quelques cas particuliers.

- L'humidité :

L'humidité du sol a une influence prépondérante sur les propriétés diélectriques. Deux méthodes de mesures ont été testées. L'utilisation de l'humidimètre à pointe des Ponts et Chaussées, méthode inédite en agronomie, présente l'intérêt de mesurer, en place et sans perturbation, l'humidité de la couche superficielle du sol. A la suite de difficultés d'étalonnage, les résultats n'ont pu être exploités, mais les conditions d'une utilisation ultérieure ont été précisées. La méthode de prélèvements à la tarière, à diverses profondeurs, a constitué la référence de base. L'évolution des teneurs en eau du sol a été suivie par cette méthode durant toute l'expérimentation. Du fait de la faible variation de l'humidité de profondeur, l'humidité de surface a seule été prise en compte dans la confrontation avec le signal rétrodiffusé.

- La rugosité :

La rugosité du sol est la résultante de l'action de plusieurs facteurs externes (anthropiques, climatiques) et des caractéristiques intrinsèques au matériau (stabilité structurale). L'objectif de la méthode d'étude décrite et utilisée dans ce mémoire est la quantification de l'état de surface d'un sol et la prise en compte de son évolution dans le temps en vue d'une interprétation du signal micro-ondes. Les données échantillonnées par le système CLEMENTINA constituent des "transects topographiques" successifs. Cette approche linéaire a suffi pour définir, par traitement ordinateur, des critères représentatifs de chaque type de rugosité étudiée (labour, griffage, hersage). Les plus discriminants de ces critères sont l'écart-type S des altitudes des points d'une surface et le comptage des mottes présentes sur plusieurs transects (technique de l'ombrage). La dégradation de chaque état de surface a été évaluée comme négligeable par cette méthode. Une approche spatiale de la rugosité a été également tentée, mais cet aspect n'a pas été approfondi, car les résultats obtenus par l'approche

linéaire ont été suffisants pour interpréter les données du scattéromètre. D'un point de vue agronomique, les différents états de surface explorés représentent une bonne part des types de rugosité pouvant exister sur sols nus.

LES MESURES DE SCATTEROMETRIE

La qualité des données de scattérométrie a été évaluée par la fidélité du système RAMSES et la précision des mesures. La répartition, vis-à-vis des conditions de terrain, des 53 séquences expérimentales réalisées s'est avérée très irrégulière. Elle est à l'origine des limitations apportées à l'analyse des résultats.

LES RESULTATS

Un certain nombre d'éléments ont été dégagés quant aux relations entre les paramètres de terrain et le signal rétrodiffusé.

A 1,5 GHz, et sans doute à 9 GHz, le signal rétrodiffusé augmente lorsque la rugosité croît. Aucune information n'a pu être tirée des séquences réalisées à 3 GHz. Par contre, la rugosité n'a pas d'influence sur la rétrodiffusion à 4,5 GHz et le comportement particulier du signal à cette fréquence bien précise permet d'éliminer l'action de la rugosité pour étudier alors l'influence propre de l'humidité du sol.

Le signal rétrodiffusé augmente, en règle générale, avec l'humidité quelle que soit la fréquence. La sensibilité du signal à l'humidité a été évaluée à 4,5 GHz par la méthode d'ajustement linéaire : elle est de l'ordre de 0,3 dB par % d'humidité. Des résultats voisins sont obtenus par cette méthode à la fréquence de 1,5 GHz. Cette évaluation n'a pas été satisfaisante aux fréquences 3 GHz et 9 GHz où l'influence de l'humidité sur le signal reste à vérifier.

LES PERSPECTIVES D'AVENIR

Les résultats obtenus dans cette étude contribuent pour une part à la connaissance des relations entre le rayonnement micro-ondes et les cibles naturelles de la surface de la terre. Ces recherches permettent de préciser quelque peu les espoirs fondés sur l'utilisation des radars aéroportés, tel le radar français VIGIE.

En effet, les difficultés d'échantillonnage sur la surface explorée, rencontrées avec RAMSES, ne se présentent plus avec des appareils qui survolent de grandes surfaces. En télédétection, de précieuses informations sur l'humidité des sols pourraient être obtenues en complément de celles fournies par d'autres capteurs, en particulier dans l'infra-rouge thermique. La cartographie des caractères hydriques des sols en serait plus précise et le suivi temporel des conditions d'humidité pourrait être assuré très régulièrement grâce à la capacité des radars de travailler en toutes conditions atmosphériques.

Afin d'approfondir les résultats présentées dans ce mémoire, il sera en particulier nécessaire d'entreprendre des études complémentaires pour préciser la réaction d'un sol couvert de végétation par rapport à celle d'un sol nu. En outre, les possibilités de pénétration du signal sont encore diversement appréciées, et l'utilisation opérationnelle des techniques micro-ondes dépend des progrès réalisés dans la connaissance de cette pénétration.

*

* *

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

1. ATTEMA E.P.W. (1978) - "The interaction of vegetated and bare fields with 3cm wavelength electromagnetic radiation ; modelling and experiment". *OST Mars B.2.*
2. AXELSSON S. and O. EDWARSSON (1973) - "Passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys. Basic physics and technology". *ESRO CR-71, Février.*
3. BASHARINOV A.B., L.F. BORODIN and SHUTHEO (1974) - "Passive microwave sensing of moist soils". *Proc. of the URSI. Commission II. Specialist Meeting on microwave scattering and emission from the earth. BERNE.*
4. BATLIVALA P.P. and F.T. ULABY (1976) - "Radar look direction and row crops". *Photogrammetric Engineering. Vol. XLII. n° 2.*
- *5. BATLIVALA P.P. and F.T. ULABY (1977) - "Estimation of soil moisture with radar remote sensing. *Proceedings of 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann. Arbor, MI. Mars. p. 270 (résumé).*
6. BRUNELLES N.D. and coll. (1974) - "The usefulness of imaging passive microwave for rural and urban terrain analysis". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI. Avril. pp. 1603-1620.*
7. BUSH T.F. and F.T. ULABY (1975) - "Remotely sensing wheat maturation with radar". *CRES Report. 177-55. Mai.*
8. BUSH T.F. and F.T. ULABY (1978) - "An evaluation of radar as a crop classifier". *Remote Sensing of Environment 7, 15-36.*
9. BRYAN M.L. (1973) - "Radar Remote Sensing for Geosciences, an annotated and tutorial bibliography". *ERIM. Washington DC. Décembre.*
10. CANNON P.J. (1973) - "The application of radar and infrared imagery to quantitative geomorphic investigations". *Remote Sensing of earth resources. vol. II, ed. SHAROKHI. pp. 503-519.*

* les références cochées de ce signe permettent de faire un rapide survol des problèmes fondamentaux de l'utilisation des hyperfréquences dans le domaine des ressources terrestres et plus particulièrement pédologiques.

11. CLEMONSON D.B., J.H. MOORE and K. TOMIYASU (1973) - "Development and application of A.A.F.E. two frequency composite microwave radiometer-scatterometer". *Remote Sensing of earth resources. Vol. II, ed. SHAROKHI. pp. 491-502.*
12. DEANE R.A. (1973) - "Side looking radar systems and their potential application to earth resources surveys. Basic physics and technology". *ESRO. C.R. 136. Avril.*
- *13. DEANE R.A. and A.R. DOMVILLE (1973) - "Side looking radar systems and their potential application to earth resources surveys. Radar scattering from natural surfaces". *ESRO. C.R. 137. Octobre.*
14. EACLEMAN J.R. (1974) - "Moisture detection from Skylab". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 701-706.*
15. EDGERTON A.T. (1968) - "Engineering applications of microwave radiometry". *Proceedings of 5th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 711-724.*
16. ESTES J.E., MEL M.R. and HOOPER J.O. (1977) - "Measuring soil moisture with an Airborne Imaging Passive Microwave Radiometer". *Photogr. Engineering and Remote Sensing. Vol. XLII, n° 10. Octobre.*
17. FOURNIER B. (1976) - Image radar du Marais Poitevin et de ses bordures. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie. n° 61. pp. 15-18.*
18. GAUSMAN H.W. and coll. (1977) - "Field-measured spectroradiometric reflectances of disked and nondisked soil with and without wheat straw". *Soil Sci. Soc. Am. j. Vol. 41. pp. 793-796.*
19. GRANT K. (Study Group leader) and Coll. (1973) - "Side looking radar systems and their potential application to earth resources surveys". *ESRO. C.R. 141.*
20. HAMMOND A.L. (1977) - "Remote sensing II. Brazil explores its Amazon wilderness". *"Science" Am. Ass. for the advancement of science. 29 avril. vol. 196. n° 4289. pp. 513-516.*
- *21. HENDERSON (1975) - "Radar for small scale land-use mapping". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. XLI, n° 3. Mars.*
22. HIROSAWA H., S. KOMIYAMA and Y. MATSUZAKA (1978) - "Depolarization of radar return from rough soil surface". *OST. Mars. B.4.*
23. HOPPE G. and coll. (1972) - "The application of passive microwave radiometry to earth resource surveys". *ESRO. C.R. 75. Juin.*
24. HRUBY R.J. and A.T. EDGERTON (1971) - "Subsurface discontinuity detection by microwave radiometry". *Proceedings of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Mai. pp. 319-326.*

25. JACKSON P. and coll. (1975) - "The utilisation of digitized multichannel microwave data". *Proceedings of 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Oct.
26. JANSE A.R.P. (1975) - "Reflection of radar waves by soils, crops and forest - a review of some recent dutch work". *Neth. J. agric. Sci.* 23 pp. 308-320.
27. JEAN B.R., RICHERSON J.A. and ROUSE J.W. (1971) - "Experimental microwave measurements of controlled surfaces". *Proceedings of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Mai. pp. 1847-1860.
28. JENSEN H., GRAHAM L.C., PORCELLO L.J. and LEITH E.N. (1977) - "Cartographie par radar". *Pour la Science*. pp. 80-92.
29. KUNZI K., WUTHRICH M. and SCHANDA E. (1971) - "A mm. wave scanning radiometer for terrain mapping". *Proceedings of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Mai. pp. 865-868.
30. KUNZI K. and coll. (1971) - "Passive microwave Remote Sensing at the University of Bern". *Proceeding of 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Mai. pp. 1819-1826.
31. LANNELONGUE N. (1976) - "Observation de la terre par techniques micro-ondes". *Cours de Technologie Spatiale. Session I. C.N.E.S. DS. TTI. RC.*
32. LANNELONGUE N. et coll. (1976) - "RAMSES" - Radar multifréquence sol d'évaluation de signatures spectrales. *Centre Spatial Toulouse. Division Observation de la terre et collecte des données.*
33. LEWIS A.J. and WAITE W.P. (1973) - "Radar shadow frequency". *Photogrammetric Engineering*. Vol. XXXIX. n° 2. Février.
34. LINTZ J. Jr. and SIMONETT D.S. (1976) - "Crop discrimination with radar imagery". *Remote Sensing of Environment*. Addison Wesley Publishing Company. pp. 459-464.
- *35. de LOOR G.P. (1974) - "Measurements of radar ground returns". *Proceedings of the URSI Commission II. Specialist Meeting on Microwave Scattering and Emission from the Earth*. Berne. Septembre. pp. 185-195.
36. de LOOR G.P., JURRIENS A.A. and GRAVENSTEIJN H. (1974) - "The radar backscatter from selected agricultural crops". *IEEE. Trans. on Geoscience Electronics*. Vol. GE-12. n° 2. Avril. pp. 70-77.
- *37. de LOOR G.P. (1977) - "Infrared and microwaves techniques. (Survey of radar applications in agriculture)". *ISPRA Courses Remote Sensing in Agriculture and Hydrology*.

38. MAC ANERNEY J.M. (1966) - "Terrain interpretation from radar imagery". *Proceedings of 4th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 731-750.
39. MEYLAN P., MUSY A., MORZIER C., WYSSEN D. et HOFER R. (1978) - "Etude de la variation spatio-temporelle de l'humidité du sol par télé-détection". *OST. Mars. B.3.*
- *40. MOORE R.K. (1966) - "Radar scatterometry, an active remote sensing tool". *Proceedings of 4th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 339-373.
41. MOORE R.K. and SIMONETT D.S. (1967) - "Potential research and earth resources studies with orbiting radars : result of recent studies". *AIAA 4th Annual Meeting and Technical Display*. Anaheim, Californie. Octobre. pp. 23-27.
42. MOORE R.K. and ULABY F.T. (1969) - "The radar radiometer". *Project Themis. Appendice C. Mars.*
43. MOORE R.K. and coll. (1974) - "Simultaneous active and passive microwave responses of the earth". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 189-218.
44. MOORE R.K., ULABY F.T. and SOBLI A. (1975) - "The influence of soil moisture on the microwave response from terrain as seen from orbit". *Proceedings of 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, Octobre. pp. 1141-1148.
45. MUSY A., MEYLAN P. et MORZIER C. (1978) - "Etude des composantes du bilan hydrique d'un sol par télédétection". *Sté Hydrotechnique de France : utilisation de la télédétection pour l'étude des ressources en eau et de la pollution. Journées d'études.*
- *46. NASA (1975) - "Active microwave workshop report". *NASA SP. 376. Washington D.C. pp. 97-126.*
47. NEWTON R.W. (1977) - "Microwave Remote Sensing and its application to Soil Moisture Detection". *NASA Technical Report RSC 81. Texas A & M University.*
48. OHLSSON E. (1972) - "Summary report on a study of passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys". *ESRO. C.R. 116. Septembre.*
49. ORHAUG T. (1973) - "Passive microwave radiometry and its potential applications to earth resources surveys. Microwave emissions from natural materials". *ESRO. CR. 74. Mai.*
50. PARRY J.T. (1977) - "Interpretation techniques for X-Band SLAR". *4ème Symposium Canadien sur la Télédétection. pp. 376-394.*

- *51. REEVES R.G. (1975) - "Crops and soils". *Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry. Falls church, Virginia. pp. 1730-1784.*
- *52. ROUSE J.W. Jr., NEWTON R.W. and LEA S.L. (1974) - "On the feasibility of Remote monitoring of soil moisture". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 725-738.*
53. SCHAERER G. and SCHANDA E. (1974) - "Deteriorating effects on 3 mm. wave passive imagery". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 1593-1602.*
- *54. SCHWARTZ D.E. and CASPALL F. (1968) - "The use of radar in the discrimination and identification of agricultural land use". *Proceedings of 5th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 233-247.*
55. SCHANDA E., SCHAERER G. and WUTHRICH M. (1972) - "Radiometric terrain mapping at 3 mm Wavelength". *Proceedings of 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Octobre. pp. 739-746.*
56. SCHANDA E. et R. HOFER (1974) - "Scattering, emission and penetration of 5mm waves in soil". *Proceedings of the URSI. Commission II. Specialist Meeting on Microwave scattering and emission from the earth. Berne. Septembre.*
57. SCHANDA E. and HOFER R. (1974) - "Emissivities and forward scattering of natural and man-made material at 3 mm. Wavelength". *Proceedings of 9th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Avril. pp. 1585-1592.*
58. SKOLNIK M. (1971) - "*Radar Handbook*". Mc Graw Hill. 648 p.
- *59. ULABY F.T. (1974) - "Vegetation and Soil Backscatter over the 4-8 GHz region. *Proceedings of the URSI. Commission II. Specialist Meeting on Microwave scattering and emission from the earth. Berne. Septembre.*
- *60. ULABY F.T. (1974) - "Radar measurements of soil moisture content". *IEEE. Trans. on antennas and propagation. Vol. AP. 22. n° 2. Mars.*
61. ULABY F.T. (1975) - "Radar response to vegetation". *IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Vol. AP 23. n° 1. Janvier.*
62. ULABY F.T. and FUNG (1970) - "Effects of roughness on emissivity of natural surfaces in the microwave region". *Projet THEMIS. Appendice A. Mars.*
63. ULABY F.T. and coll. (1972) - "On microwave remote sensing of vegetation". *Proceedings of 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. MI. Octobre. pp. 1279-1286.*

- *64. ULABY F.T., CIHLAR J. and MOORE R.K. (1974) - "Active microwave measurement of soil water content". *Remote Sensing of Environment*. 3. pp. 185-203.
- 65. ULABY F.T., BUSH T.E. and BATLIVALA P.P. (1975) - "Radar response to vegetation II - 8-18 GHz Band", accepted for publication in *IEEE, Trans. on Antennas and Propagation*. Septembre.
- 66. ULABY F.T. and BATLIVALA P.P. (1975) - "Measurements of radar backscatter from a hybrid of sorghum". *CRES. Remote Sensing Laboratory NASA. Technical Report 262-2*.
- 67. ULABY F.T. and BUSH T.F. (1977) - "Agricultural applications of radar". *URSI Comm. F, Colloque La Baule*. ed. CNES. pp. 573-578.
- 68. VOGEL M. (1972) - "Microwave radiometry at the DFVLR, Oberpfaffenhofen, Germany". *Proceedings of 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. MI. Octobre. pp. 199-216.

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE

Il n'a pas été possible de trouver les documents suivants ; néanmoins, ils peuvent être une source d'informations non négligeables.

--:

69. BUSH T.F. and ULABY F.T. (1975) - "Fading characteristics of radar backscatter from selected agricultural targets". *IEEE. Trans. on geosciences electronics. Vol. GE-14. Octobre.*
70. CARLSON N.L. (1976) - "Dielectric constant of vegetation at 8,5 GHz". *Ohio State University. Electroscience Lab. Tech. Report 1903-5.*
71. CIHLAR J. and ULABY F.T. (1974) - "Dielectric properties of soil as a function of moisture content". *Un. of Kansas. RSL. Technical Report 177-47. Lawrence, KA, Novembre.*
72. COSGRIFF R.L., PEAKE W.H. and TAYLOR R.C. (1960) - "Terrain scattering properties for sensor system design". *Ohio state University. Engineering experiment station. Bulletin 181, Vol. 29. n° 3.*
73. JEAN B.R. and coll. (1973) - "Microwave radiometer measurements of soil moisture". *Tech. Report R. SC-43. Texas AEM University. Juin.*
74. KROLL C.L. (1973) - "Remote monitoring of soil moisture using airborne microwave radiometers". *Tech. Report RSC-43. Texas AEM University. Juin.*
75. de LOOR G.P. (1974) - "Radar Ground Returns Part III : further measurements on the radar backscatter of vegetation and soils". *Physics Laboratory TNO. Report n° PHL. 974-05. La Hague. Mars.*
76. LUNDIEN J.R. (1966) - "Terrain analysis by electromagnetic means : radar responses to laboratory prepared soil samples". *U.S. Waterways Experiment Station. Techn. Report. 3-639.*
77. MORAIN S.A. (1970) - "Recent Advances in Radar applications to Agriculture". *Third annual Earth Resources Program Review. Vol. 2, Agriculture, Forestry and Sensor Studies. NASP, MSC, Houston. Décembre. pp. 43-1 à 43-27.*
78. NIKODEN H.J. (1966) - "Effects of soil layering on the use of VHF radio waves for remote terrain analysis". *Proc. 4th Symposium on Remote Sensing of Environment. pp. 691-704.*
79. PARRY J.T. (1974) - "X Band radar in terrain analysis under summer and winter conditions". *Proc. 2nd Canadian Symposium on Remote Sensing. pp. 471-485.*
80. SIBLEY T.G. (1973) - "Microwave emission and scattering from vegetated terrain". *Tech. Report RSC-44. Texas ACM University. Août.*

BIBLIOGRAPHIE PHYSIQUE DU SOL ET PEDOLOGIE

81. BELIN J.P. et CARRIOU J. (1972) - *Expérimentation de l'humidimètre à pointe*. Fiche programme 1971. N. 16452D. Section Application des Radioisotopes. Doc. polycopié. Laboratoire Régional de Rouen. 27 p.
82. KING D. (1976) - *Modélisation pédologique et cartographie automatique à l'échelle du 1/5 000ème*. Mémoire présenté pour l'obtention du D.A.A. Doc. polycopié, 82 p.
83. KING C. et KING D. (1978) - Méthode d'étude de la rugosité d'un sol, en vue de l'interprétation d'un signal hyperfréquence. *Bulletin de la Société Franç. de Photogrammétrie*. A paraître.
84. POUYAUD B. et CHARTIER R. (1971) - Méthode thermodynamique de mesure de l'humidité des sols". *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*. Vol. VIII, n° 1. pp. 65-58.
85. SKIDMORE E.L., DICKERSON J.D. and SCHIMMEZPFENNING H. (1975) - Evaluating surface soil water content by measuring reflectance. *Soil Science Society of America Proceedings*. Vol. 39, Mars-Avr., n° 2. pp. 238-242.
86. TRAN NGOC LAN, CHAIGNE et PHILIPES (1971) - Méthode de mesure de la teneur en eau dans les sols par l'utilisation de leurs propriétés diélectriques. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*.

T A B L E D E S F I G U R E S

- Figure 1 - Comportement reflexif de surface en fonction de la longueur d'onde.
- Figure 2 - Reflexion à partir de différentes surfaces (Méthodes passives).
- Figure 3 - Bandes de fréquences utilisées.
- Figure 4 - Reflexion à partir de différentes surfaces (Méthodes actives).
- Figure 5 - Eléments de base d'un système SLAR.
- Figure 6 - Distortions d'images radar.
- Figure 7 - Configuration géométrique du système.
- Figure 8 - Parcelle des Divisions.
- Figure 9 - Localisation des observations.
- Figure 10 - Carte pédologique de la Parcelle de la Côte des Divisions.
- Figure 11 - Configuration du système RAMSES.
- Figure 12 - Modulation par impulsion.
- Figure 13 - Modulation de fréquence.
- Figure 14 - Modulation triangulaire.
- Figure 15 - Trajet du signal.
- Figure 16 - Obtention de la fréquence de battement (Fb).
- Figure 17 - Contraintes d'antennes.
- Figure 18 - Zone des visées sur la parcelle des Divisions.
- Figure 19 - Evolution des conditions de températures du sol.
- Figure 20 - Comparaison des prélèvements à la tarière et sur fosse.
- Figure 21 - Schéma de l'humidimètre à pointe.
- Figure 22 - Humidité du sol durant les séquences de scattérométrie.
- Figure 23 - Schéma d'obtention d'un spectre de diffraction.
- Figure 24 - Système CLEMENTINA.
- Figure 25 - Principe d'acquisition des données de rugosité.
- Figure 26 - Exemples de transects.
- Figure 27 - Histogrammes des altitudes

- Figure 28 - Distribution des écarts-types S obtenus sur le fichier de base.
- Figure 29 - Histogrammes des pentes.
- Figure 30 - Distribution des critères IPS sur le fichier de base.
- Figure 31 - Principe de l' "ombrage" d'un transect.
- Figure 32 - Choix de l'incidence pour l'évaluation de la taille d'une motte.
- Figure 33 - Comptage des mottes.
- Figure 34 - Visualisation graphique par noircissement.
- Figure 35 - Cartographie automatique : hypsométrie.
- Figure 36 - Bloc diagramme ombré.
- Figure 37 - Cartographie automatique : position des mottes.
- Figure 38 - Orientation des relevés de rugosité.
- Figure 39 - Distribution des critères de rugosité IPS et S.
- Figure 40 - Comptage des mottes.
- Figure 41 - Indice σ^2/λ^2 en fonction des surfaces échantillonnées.
- Figure 42 - Distribution de l'écart-type des altitudes S en fonction de la somme des pentes IPS.
- Figure 43 - Histogrammes des classes de "mottes" de chaque relevé de surface.
- Figure 44 - Fidélité de l'étalonnage à 4,5 GHz.
- Figure 45 - Allure générale des résultats bruts.
- Figure 46 - Précision des mesures en fonction de l'incidence de visée.
- Figure 47 - Regroupement des séquences à 1,5 GHz pour une humidité donnée.
- Figure 48 - Regroupement des séquences à 3 GHz pour une humidité donnée.
- Figure 49 - Regroupement des séquences à 4,5 GHz pour une humidité donnée.
- Figure 50 - Regroupement des séquences à 9 GHz pour une humidité de 14,6 à 22,3 %.
- Figure 51 - Signal rétrodiffusé en fonction du critère S de rugosité.
- Figure 52 - Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 1,5 GHz.
- Figure 53 - Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 3 GHz.
- Figure 54 - Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 4,5 GHz.
- Figure 55 - Signal rétrodiffusé en fonction de l'humidité de surface à 9 GHz.

Figure 56 - Influence de l'humidité de surface sur le signal (F.T. ULABY).

Figure 57 - Sensibilité du radar à l'humidité d'un sol nu (F.T. ULABY).

Figure 58 - Signal rétrodiffusé en fonction de la température du sol à 4,5 GHz.

Figure 59 - Influence de la rugosité et de l'incidence sur le coefficient ($\sigma_0 - \sin^2 \theta$).

ANNEXES

ANNEXE 1

LEXIQUE

Brillance (*Brightness*) : puissance radiative reçue par unité de surface, par unité de largeur de spectre, par unité d'angle solide ($W/m^2.Hz.ster.$). Elle permet de définir le rayonnement émis par l'objet observé.

Emissivité (*Emissivity*) : rapport de l'énergie émise par un objet et de l'énergie émise par un corps noir à la même température. Elle varie avec la température physique de l'objet, la polarisation, la fréquence, l'angle d'observation et la rugosité.

Excursion (*Bandwidth*) : amplitude de la variation de la fréquence modulée autour de la fréquence centrale d'émission.

Modulation (*Modulating wave form*) : modification de la fréquence d'une oscillation au moyen d'une autre oscillation de fréquence différente.

Polarisation (*Polarization*) : distribution du champ électrique dans un plan normal à la direction de propagation. Le rayonnement du corps noir n'est pas du tout polarisé, mais celui de la plupart des objets naturels montre des effets de polarisation.

Réflectance (*Reflectance*) : rapport de la puissance réfléchie par m^2 sur la puissance incidente par m^2 .

Signal rétrodiffusé (*Backscatter signal*) : fraction du signal ré-émis par l'objet dans la direction du récepteur radar

Température de brillance (*Brightness temperature*) : température physique du corps noir ayant la même brillance que l'objet considéré.

Température radiométrique (*Radiometric temperature*) : produit de la température physique de l'objet considéré par son émissivité (définition applicable dans le domaine hyperfréquence en système actif).

EXEMPLES DE SPECIFICATIONS D'APPAREILS UTILISES

Equipe	C.N.E.S. (France)	KANSAS (USA)	NIWARS (Hollande)	C.N.E.S. (France)	de LOOR (Hollande)
Type	SLAR. (Vigie)	MAS - FM/CW	Scattéromètre radar	Scattéromètre radar FM	SLAR Phillips & GR 260100
Modulation	impulsion	triangulaire	impulsion	triangulaire	impulsion
Fréquences	9,3 GHz	2 GHz à 8 GHz	9,3 GHz	1,5 GHz à 9 GHz	33 GHz
Excursion FM (ΔF)		450 MHz		40 à 240 MHz	
Polarisation	HH	HH - VV	VV	HH, HV, VH, VV	HH, VV, HV, VH
Angles d'incidence	0° à 80°	0° à 80°	20° à 60°	0° à 80°	
Antenne Hauteur au-dessus du sol	aéroporté portée 20 km	20 m	3 m	15 m	75 m

ANNEXE 1

ETUDES SUR SOLS NUS1 - ETUDES IN SITU : - Méthodes Actives

Année	Références	Type de l'appareil	Fréquences utilisées
1977	5	MAS	1-18 GHz
1975	26		10 et 36 GHz
1975	66	FM-CW	4-8 GHz
1975	51	FM-CW	4-8 GHz
1974	64	FM-CW	4-8 GHz

- Méthodes Passives

Année	Références	Type de l'appareil	Fréquences utilisées
1978	45		4,9-10,5-21 et 36 GHz
1974	52		1,4 et 10,6 GHz
1978	15		13,5-19,4- et 36,5 GHz

2 - ETUDES PAR AVIONS OU SATELLITES

- Méthodes Actives

Année	Références	Type de l'appareil	Fréquences utilisées
1977	50	SAR	10 GHz
1975	44	RADSCAT	13,9 GHz
1974	43	RADSCAT	13,9 GHz
1968	54	SLAR	34 GHz

- Méthodes Passives

Année	Références	Type de l'appareil	Fréquences utilisées
1977	16	MICRAD	35 GHz
1974	43	RADSCAT	13,9 GHz
	6	MICRAD	35 et 94 GHz
	3	Radiomètre	10-40 GHz et 1,5-3 GHz
1971	27	Radiomètre	31,4 GHz

ANNEXE 2

RESULTATS D'ANALYSES

FOSSES ET SONDAGES REALISES SUR LA ZONE - TEST

(extrait de "Modélisation Pédologique et Cartographie automatique" D. KING, 1976)

Id.	P	AR	LI	SA	pH	KT	KA	MO	C	N
11	0-25	24	22	54	7,3	223	56	41,5	24,1	2,02
12	25-45	26	20	50	7,65	148	34	20,7	12	0,92
13	45-80	28	22	50	7,80	25	19	0	0	0
14	80-105	33	23	44	7,70	16	0	0	0	0
15	105-120	15	26	59	7,80	605	172	0	0	0
31	0-35	23	20	57	7,75	218	57	30,7	17,8	1,29
32	35-65	15	17	48	8	179	43	9,1	5,2	0,56
33	65-120	13	18	65	8,10	612	161	0	0	0
41	0-20	25	28	47	7,8	165	49	39,1	28,7	2,02
42	20-35	26	21	53	8	131	36	23,4	13,6	1,15
43	35-55	27	20	53	7,9	72	27	0	0	0
44	55-80	24	22	54	8,05	195	62	0	0	0
45	80-100	19	25	56	8,1	342	126	0	0	0
46	100-110	13	24	63	8,1	489	154	0	0	0
C 1	0-25	22	23	55	7,6	235	69	42,7	24,8	2,1
C 2	25-110	28	22	50	7,85	93	35	14,0	8,1	1,05
C 3	110-120	18	26	56	8,05	482	157	0	0	0
H 1	0-60	17	25	58	7,75	318	110	34,5	20	0,95
N 1	0-50	22	23	55	7,6	226	65	35,2	20,4	1,7
N 2	50-80	8	44	48	7,8	272	99	15,7	9,1	0,91
N 3	80-120	23	24	53	8,1	845	191	0	0	0

Densité réelle des horizons de surface : 2,58.

Id : identification de l'horizon observé - P : profondeur de l'horizon en cm -
 AR : taux d'argile en % - LI : taux de limon en % - SA : taux de sable en % -
 KT : calcaire total en % - KA : calcaire actif en % - MO : matière organique
 en % de MS - C : taux de carbone en % de MS - N : taux d'azote.

CARTE DE LA CHARGE EN CAILLOUX EN SURFACE
DE LA PARCELLE DES DIVISIONS

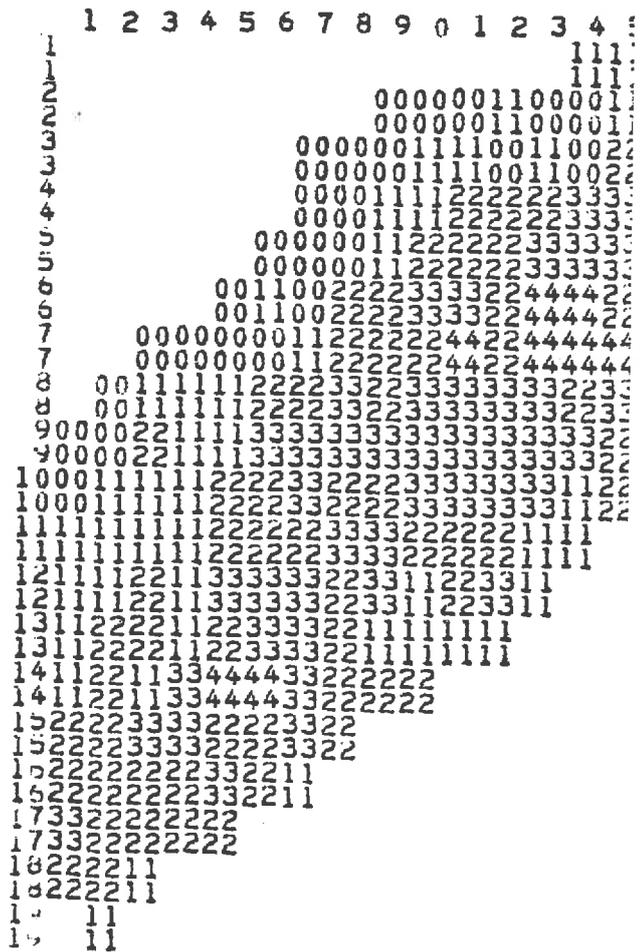
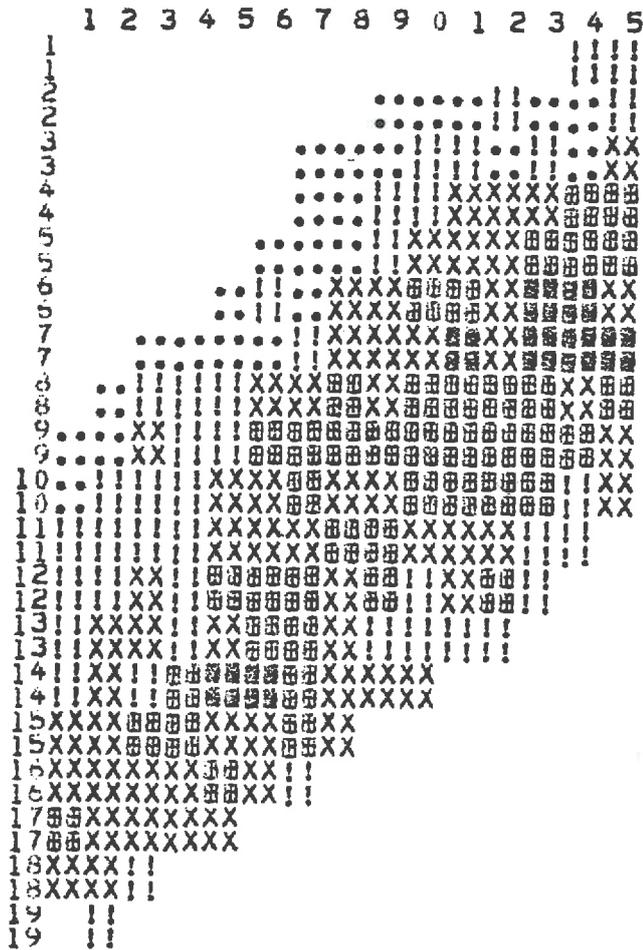
NOMBRE DE CLASSES 5

VARIABLE PROFIL 7

VARIABLE HORIZON 0

VALEUR MAXIMALE	5.00	VALEUR MINIMALE	1.00	NOMBRE DE CLASSES	5
CLASSE 1	25 INDIVIDUS	VARIATION DE	1.00A	1.80	*****
CLASSE 2	43 INDIVIDUS	VARIATION DE	1.80A	2.60	*****
CLASSE 3	59 INDIVIDUS	VARIATION DE	2.60A	3.40	*****
CLASSE 4	43 INDIVIDUS	VARIATION DE	3.40A	4.20	*****
CLASSE 5	6 INDIVIDUS	VARIATION DE	4.20A	5.00	**

A NORD



LEGENDE

ECHELLE: 1/5000

CLASSE 1
.....

CLASSE 2
|||||

CLASSE 3
XXXX
XXXX
XXXX
XXXX

CLASSE 4
M M M M
M M M M
M M M M
M M M M

CLASSE 5
M M M M
M M M M
M M M M
M M M M

CLASSE 6
M M M M
M M M M
M M M M
M M M M

CLASSE 7
0000
0000
0000
0000

CLASSE 8
///
///
///
///

CLASSE 9
+++
+++
+++
+++

CLASSE 10

ANNEXE 2

CARTE DE LA MATIERE ORGANIQUE DE LA PARCELLE DES DIVISIONS

DE L'HORIZON DE SURFACE

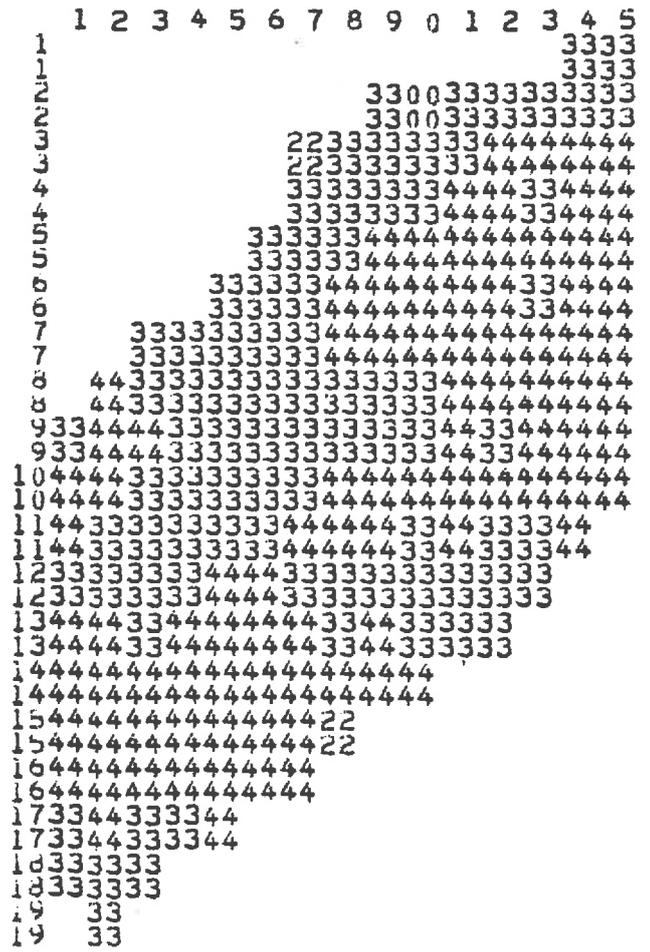
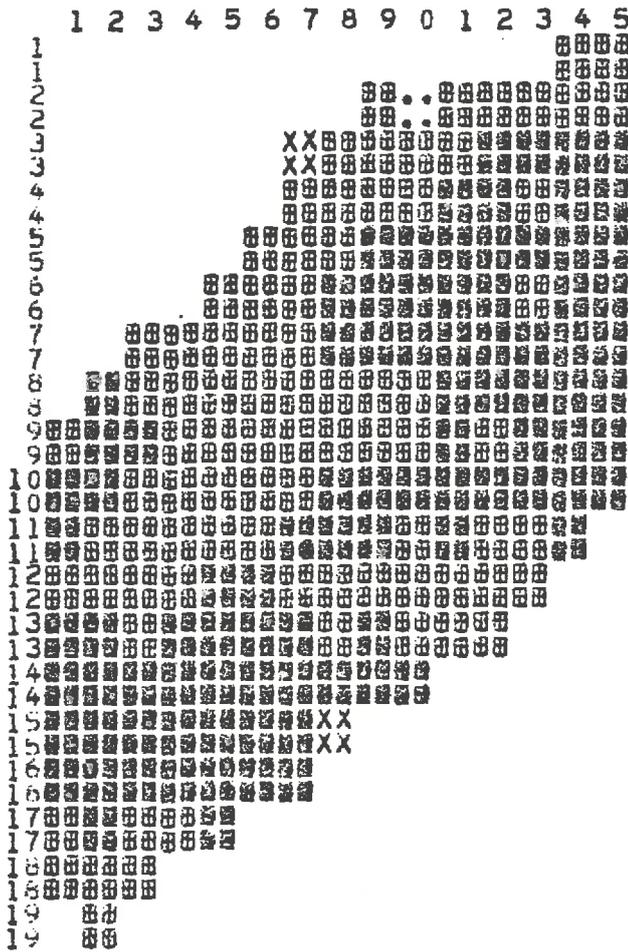
NOMBRE DE CLASSES 5

VARIABLE PROFIL 19

VARIABLE HORIZON 18

LEUR	MAXIMALE	52.10	VALEUR MINIMALE	0.00	NOMBRE DE CLASSES	5
ASSE 1	1	INDIVIDUS	VARIATION DE	0.00A	10.42*	
ASSE 3	2	INDIVIDUS	VARIATION DE	20.84A	31.26*	
ASSE 4	8	INDIVIDUS	VARIATION DE	31.26A	41.68	*****
ASSE 5	9	INDIVIDUS	VARIATION DE	41.68A	52.10	*****

A NORD



LEGENDE

ECHELLE:1/5000

CLASSE 1

CLASSE 2

CLASSE 3
 XXXX
 XXXX
 XXXX
 XXXX

CLASSE 4
 @@@@
 @@@@
 @@@@
 @@@@

CLASSE 5
 @@@@
 @@@@
 @@@@
 @@@@

CLASSE 6
 MMMM
 MMMM
 MMMM
 MMMM

CLASSE 7
 0000
 0000
 0000
 0000

CLASSE 8
 ////
 ////
 ////
 ////

CLASSE 9
 ++++
 ++++
 ++++
 ++++

CLASSE 10
 ++++
 ++++
 ++++
 ++++

ANNEXE 2

CARTE DU TAUX DELIMON DEL*HRZ 1 DE LA PARCELLE DES DIVISIONS

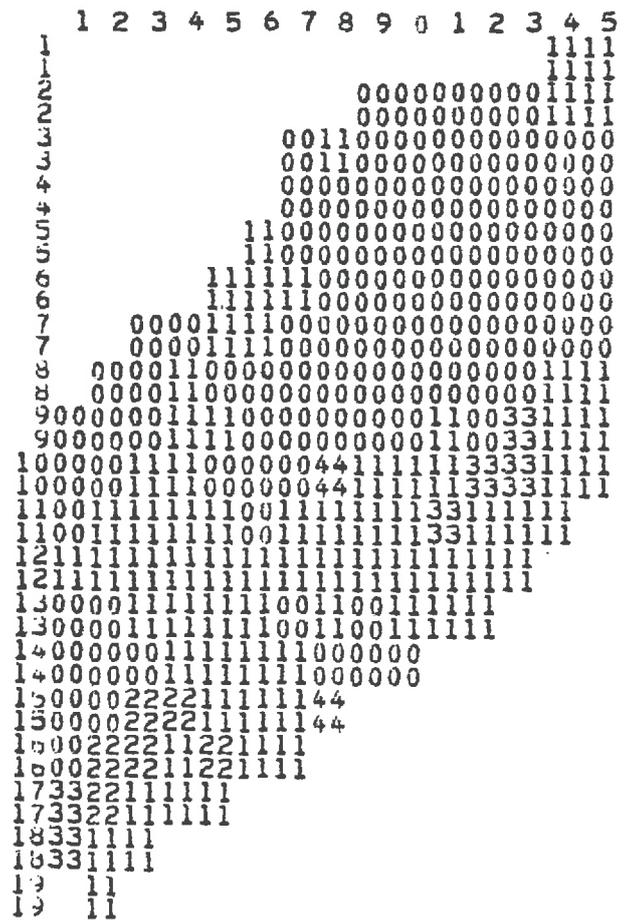
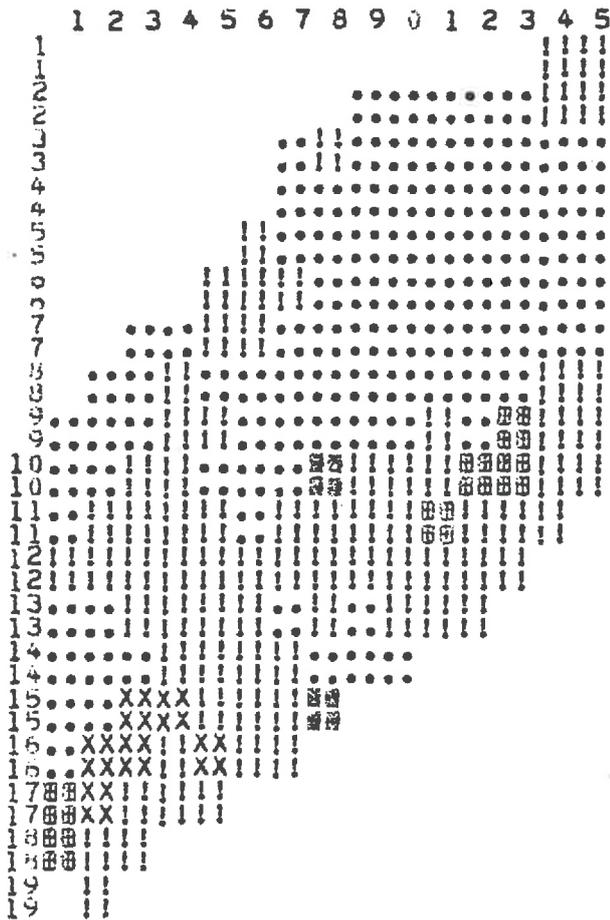
NOMBRE DE CLASSES 5

VARIABLE PROFIL 19

VARIABLE HORIZON 5

VALEUR MAXIMALE	43.00	VALEUR MINIMALE	20.00	NOMBRE DE CLASSES	5
CLASSE 1	90 INDIVIDUS	VARIATION DE	20.00A	24.60	*****
CLASSE 2	74 INDIVIDUS	VARIATION DE	24.60A	29.20	*****
CLASSE 3	6 INDIVIDUS	VARIATION DE	29.20A	33.80	**
CLASSE 4	6 INDIVIDUS	VARIATION DE	33.80A	38.40	**
CLASSE 5	2 INDIVIDUS	VARIATION DE	38.40A	43.00	*

A NORD



LEGENDE

ECHELLE: 1/5000

CLASSE 1

.....

CLASSE 2

|||||

CLASSE 3

XXXX

CLASSE 4

####

CLASSE 5

#####

CLASSE 6

MMMM

CLASSE 7

0000

CLASSE 8

////

CLASSE 9

++++

CLASSE 10

CARTE DE LA ROCHE MERE
DE LA PARCELLE DES DIVISIONS

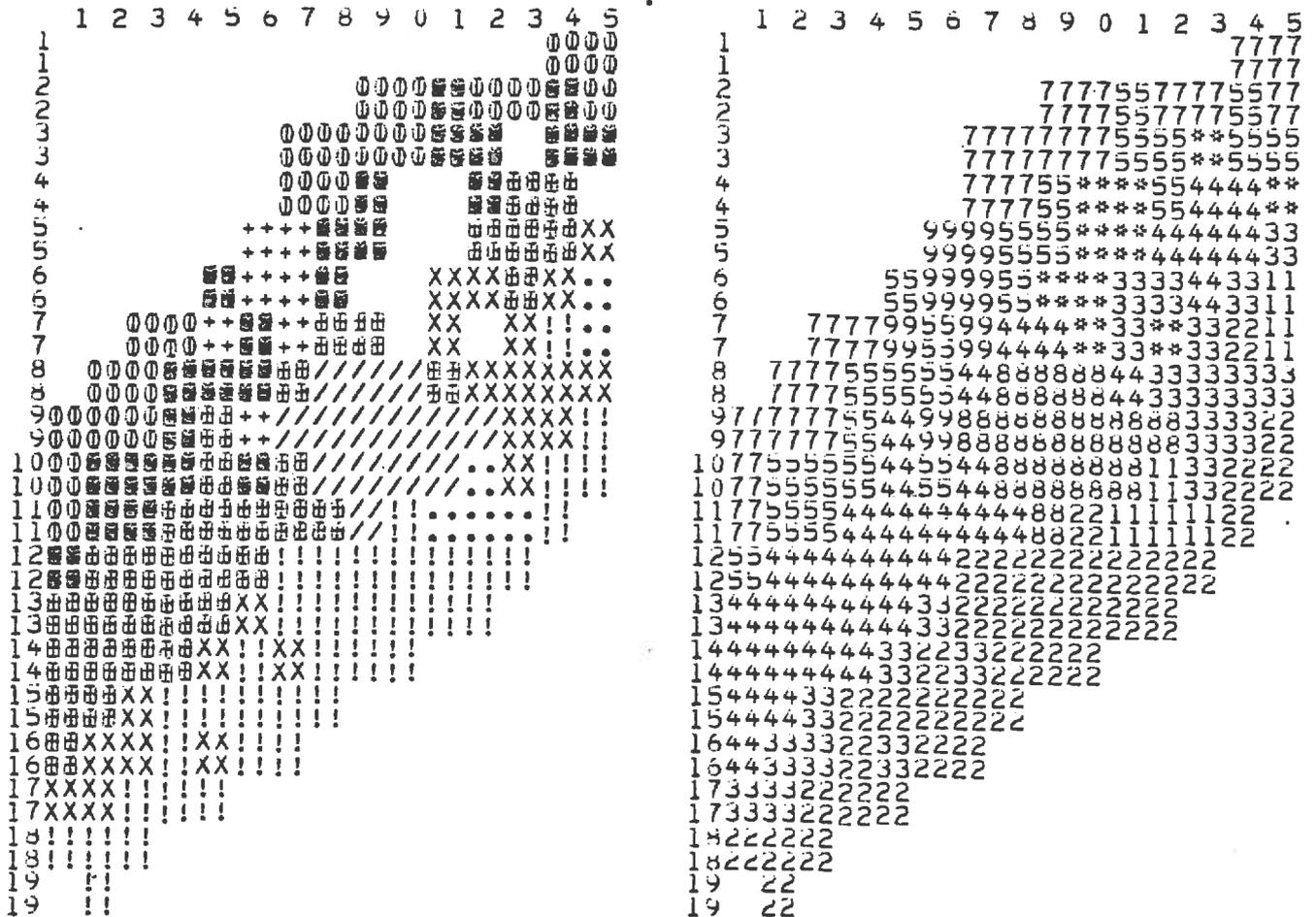
NOMBRE DE CLASSES 10

VARIABLE PROFIL 13

VARIABLE HORIZON 0

VALEUR MAXIMALE	9.00	VALEUR MINIMALE	0.00	NOMBRE DE CLASSES	10
CLASSE 1	6 INDIVIDUS	VARIANT DE	0.00A	0.90**	
CLASSE 2	3 INDIVIDUS	VARIANT DE	0.90A	1.80*****	
CLASSE 3	22 INDIVIDUS	VARIANT DE	1.80A	2.70*****	
CLASSE 4	35 INDIVIDUS	VARIANT DE	2.70A	3.60*****	
CLASSE 5	24 INDIVIDUS	VARIANT DE	3.60A	4.50*****	
CLASSE 7	22 INDIVIDUS	VARIANT DE	5.40A	6.30*****	
CLASSE 8	14 INDIVIDUS	VARIANT DE	6.30A	7.20****	
CLASSE 9	7 INDIVIDUS	VARIANT DE	7.20A	8.10**	
CLASSE 10	10 INDIVIDUS	VARIANT DE	8.10A	9.00***	

A NORD



LEGENDE

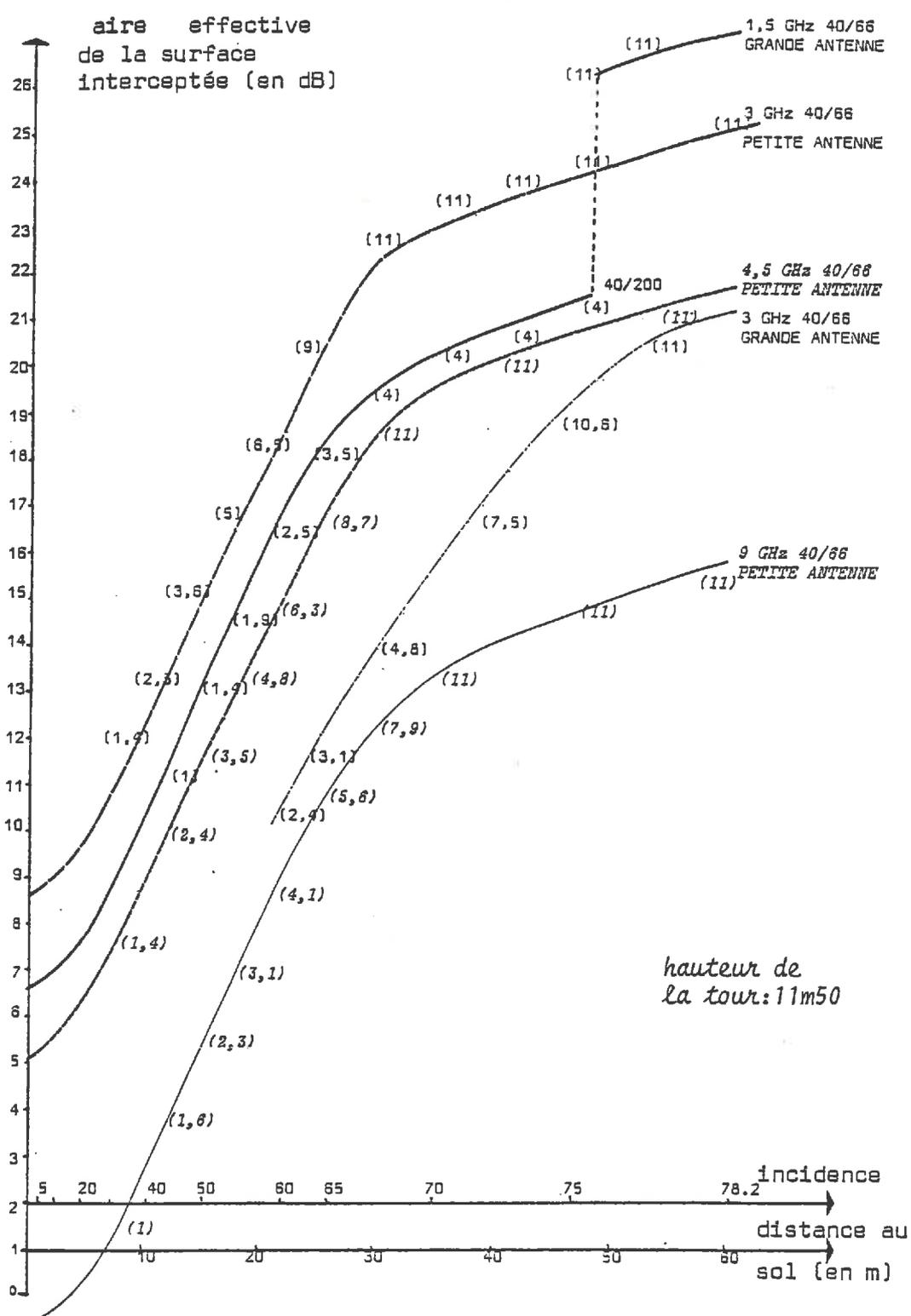
- classe 1 calcaire en plaquettes
- classe 2 calcaire marneux
- classe 3 dalle calcaire dure
- classe 4 sables calcaires (faluns)
- classe 5 sables glauconieux
- classe 6
- classe 7 colluvions sablo-limoneuses
- classe 8 carriere
- classe 9 craie ou dalle calcaire

ECHELLE: 1/5000

classe 10 formation de pente

CLASSE 1	CLASSE 2 !!!!	CLASSE 3 XXXX XXXX XXXX XXXX	CLASSE 4 田田田 田田田 田田田 田田田	CLASSE 5 田田田 田田田 田田田 田田田
CLASSE 6 NNNN NNNN NNNN NNNN	CLASSE 7 0000 0000 0000 0000	CLASSE 8 //// //// //// ////	CLASSE 9 ++++ ++++ ++++ ++++	CLASSE 10

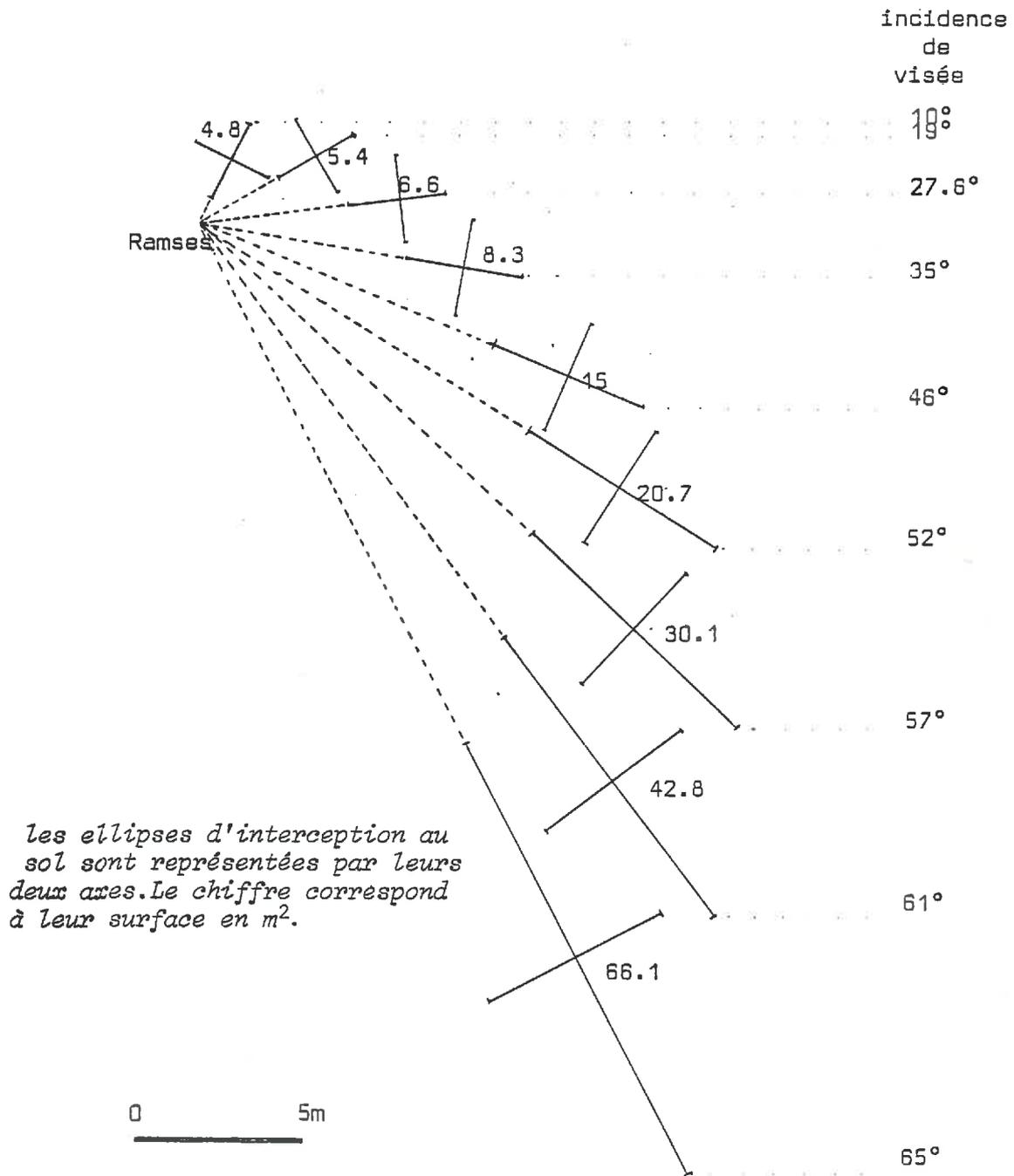
ANNEXE 2



Le nombre d'échantillons indépendants correspondant à chaque surface interceptée par le lobe principal de l'antenne de réception est signifié par les chiffres notés entre parenthèses.

Aire effective et nombre d'échantillons indépendants suivant chaque condition de visées (fréquence-incidence)

ANNEXE 2



Possibilités de visées à 1,5 GHz

ANNEXE 3

DONNEES CLIMATIQUES ENREGISTREES PAR LA STATION DU STEFCE

Valeurs moyennes

Mois	Jour	1	2	3	4	5	6	7
3	9	7.0	8.2	7.3	6.0	85.2	85.3	4.6
3	10	7.6	8.5	7.8	7.1	92.1	98.1	6.5
3	11	8.3	9.6	8.8	7.3	85.9	95.3	6.1
3	12	8.1	8.3	7.9	7.4	94.4	100.3	7.0
3	13	7.6	7.6	7.1	5.3	77.8	77.9	3.3
3	14	7.1	7.0	7.3	5.9	80.8	83.1	4.2
3	15	6.5	6.7	7.3	6.4	88.2	90.7	5.4
3	16	6.6	6.3	5.4	4.4	86.3	77.5	3.2
3	17	4.8	4.3	2.7	2.2	92.2	68.4	1.5
3	18	5.0	4.7	2.7	1.6	84.0	61.7	0.3
3	19	5.0	5.1	4.8	3.8	86.5	74.8	2.7
3	20	6.8	7.7	8.4	8.0	96.2	105.8	7.7
3	21	6.2	5.5	5.5	3.4	71.3	64.2	0.8
3	22	4.4	4.3	4.6	4.2	93.5	80.7	3.7
3	23	5.8	5.8	5.4	4.4	84.7	76.6	3.0
3	24	4.9	4.8	4.5	3.4	85.7	71.6	2.2
3	25	6.0	7.0	8.3	7.6	91.2	100.4	6.9
3	26	6.4	6.3	6.2	4.5	77.5	73.1	2.4
3	27	6.8	7.9	9.0	8.4	92.9	107.3	7.9
3	28	9.2	10.9	11.5	10.1	84.3	113.8	8.8
3	29	9.2	9.3	9.5	8.0	82.9	98.0	6.7
3	30	7.7	7.8	6.5	6.0	92.9	89.8	5.4
3	31	6.8	6.8	5.9	4.7	86.1	80.5	3.7
4	1	8.1	9.0	9.0	7.8	85.5	98.0	6.7
4	2	8.0	8.8	7.2	6.1	87.7	88.8	5.1
4	3	8.0	8.0	7.4	7.2	97.2	100.5	7.0
4	4	7.8	8.4	8.5	7.9	91.6	101.9	7.2
4	5	7.7	7.5	7.2	6.2	87.5	88.6	5.2
4	6	7.4	7.8	7.2	4.3	65.1	64.2	1.1
4	7	6.8	6.6	5.6	2.3	57.5	51.2	0.0
4	8	6.6	6.1	5.1	3.4	77.3	67.4	1.4
4	9	6.6	7.4	5.3	3.6	79.6	69.6	2.0
4	10	7.6	7.6	4.8	3.9	88.2	75.2	2.9

1 : Température du sol à 10 cm
 2 : Température du sol à 0 cm
 3 : Température sèche du psychromètre

4 : Température humide du psychromètre
 5 : Humidité de l'air en %
 6 : Pression en mbar
 7 : Température du point de rosée.

ENREGISTREMENT AUTOMATIQUE (STATION STEFCE)

PLUVIOMETRIE

DATE	HEURE	PLUIE mm
21.3.78	6 H 30	0,5
22.3.78	16 H 30 20 H 15	0,5 0,5
23.3.78	1 H 2 H 4 H 15 13 H 45	4,5 0,5 1
24.3.78	6 H 45 9 H 30	1,5 0,5
25.3.78	10 H 10 20 H 30	0,5 1,5
26.3.78	16 H 30	0,5
27.3.78	0H45 6H30	8
28.3.78		0
29.3.78		0
30.3.78	3 H 9 H 13 H 00	4,5 0,5
31.3.78	7 H 45	0,5
1.4.78	18 H 15	0,5
2.4.78		0
3.4.78		0
4.4.78	8 H 00	0,5
5.4.78		0

ANNEXE 3

DISPERSION DES MESURES D'HUMIDITE DE SURFACE

Date 1978	H %	σ
28/3	24	1,4
29/3	22,3	2,5
30/3	29,1	1,5
31/3	26,2	1,1
	16,9	2,6
4/4	25,4	1,3
26/4	16,3	1,8
27/4	16,4	1,2
28/4	12,5	0,7
21/5	18,9	1,2
10/5	16,2	2,3
22/5	19,8	2,3
23/5	16,3	1,3
24/5	14,5	3,4
25/5	14,9	3,7
26/5	15,3	4,1
29/5	8,5	2,4

Date 1978	H %	σ
30/5	3,5	2,1
31/5	3	0,6
1/6	3,1	1
2/6	23,3	0,8
5/6	4,1	0,9
6/6	30,4	1,4
7/6	26,9	1,4
8/6	18,2	1
14/6	5,6	2,2
15/6	7,6	1,5
16/6	15,9	2,6
19/6	27	1,7
20/6	12,2	1,7
21/6	10,2	1,5
22/6	12,5	0,9
26/6	14,6	3
27/6	12,6	1,4

H : Humidité moyenne de la surface du sol (en % TS)

σ : distribution des valeurs d'humidité des 5 échantillons prélevés à une date donnée.

ANNEXE 3

NOTICE BREVE DES PROGRAMMES UTILISES

- AUTOCORRELATIONS :

- Programme principal : AUTOCORRELATION, calcul du coefficient ρ pour des pas d'échantillonnage de 0 à 150.
- Sous-programmes : .LISS, lissage des courbes en valeurs réelles.
.IMPRI, impression de la courbe.
.CORB, impression de la variation de ρ avec le pas d'échantillonnage.
.NUAG, distribution des couples de cotes à un pas d'échantillonnage correspondant à un ρ maximum et minimum, supérieure à 10,41.
.CVIA, conversion des valeurs réelles en valeurs alphanumériques.

- ANALYSE SPECTRALE :

- Programme GHOST

- MOTTE

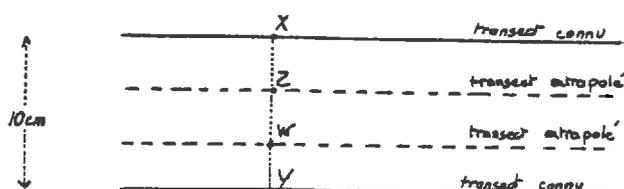
- Programme principal : OMBRE, ombrage des transects
- Sous-programmes : .LISS, lissage des courbes en valeurs réelles.
.MOTTE, comptage par classes de plages ombrées.
.CVIA, conversion des valeurs réelles en alphanumériques.
.IMPRI, impression des transects ombrés.

- LANN

- Programme principal : INDICE DE RUGOSITE DE LANNELONGUE : il lit les valeurs d'un transect, le lisse suivant LANN de 2 façons différents [MEM (2,5) et MEM (1,5)], puis il calcule les écarts entre les valeurs J des deux matrices et la variance de ces écarts. L'ensemble des résultats est imprimé dans un tableau λ transect σ^2/λ^2 correspondant au fichier.
- Sous-programmes : .LANN : lissage d'un transect suivant un pas choisi.
.IMPRA : facultatif, permet d'imprimer les transects lissés suivant LANN.

- CARTE HYPSONOMETRIQUE

- Sous-programmes :
 - .POSI : lecture de la carte-commande où est indiquée l'adresse du fichier à cartographie. Cette carte commande comporte deux numéros : le numéro de fichier, et le numéro du transect en format I2. Puis le sous-programme lit le début du premier transect.
 - .LISS : lissage avec un pas de 3 de tout transect mis dans la matrice ID.
 - .REDUC : réduction d'un transect de 300 points en 100 points, en prenant un point sur trois, de manière à permettre une impression qui tiendra dans le format de sortie de l'imprimante (max. 180).
- Programme principal : CARTE TOPOGRAPHIQUE : après avoir appelé tous ces sous-programmes, le programme principal établit une sorte de continuité entre chaque transect mesuré par CLEMEN-TINA est espacés chacun de 10 cm. Pour ce faire, il calcule les transects qui sont au 1/3 et au 2/3 de l'intervalle de 10 cm, en faisant une moyenne pondérée Z ou W des X altitudes X et Y des points correspondants :



Cette extrapolation permet de couvrir la surface de 3 m sur 2 m avec des carreaux ordinateurs représentant 3 cm x 3,3 cm, soit une représentation presque normée.

Chaque "altitude" existante ou extrapolée, est rangée dans la matrice CARTE.

- Sous-programme : SORTY : Calcul du maximum et du minimum des valeurs rangées dans CARTE ainsi que l'intervalle des classes d'altitude (10 classes). Remplacement de chaque valeur d'altitude par la valeur de la classe à laquelle elle appartient, et placement de cette nouvelle valeur dans la matrice LIGNE qui s'imprime. 60 lignes sont ainsi imprimées.

- CARTOGRAPHIE DES MOTTES OU DE LEUR PLAGE OMBREE

- Programme principal : appel successif des sous-programmes "POSI", "LISS", "REDUC", calcul de la "continuité" cartographique comme précédemment. Placement de toutes les "altitudes" de la matrice CARTE dans la matrice ID.
- Sous-programmes : .OMB : suivant le même principe que le programme "OMBRAGE" : ombrage des courbes dans ID sous l'angle IANG = JANG, après lecture d'une carte IANG avec le format I2. Puis appel du sous-programme "SORTY".
.LISCA : lissage des contours cartographiques obtenus par le sous-programme "SORTY".

- SORTIES AUTOMATIQUES DE BLOCS DIAGRAMMES OMBREES

- Programme principal : appel successif des sous-programmes "POSI", "LISS", "REDUC", "OMB". Puis juxtaposition des transects ainsi transformés, avec décalage de chacun d'une même valeur selon les deux axes qui donnent ainsi une impression de perspective. Puis impression.

Ce programme permet une visualisation moins nette, mais plus proche de la réalité.

```

C   TABLEAU DES IPS ET AUTRES HABIOLES
    DEFINE FILE 1=U:1(R:300,IN,AN,DV)
    COMMON NE
    DIMENSION ID(300)
    REAL KX,KX0,IDYX,IAYX,IPS,IPSM,ICLA(50)
    INTEGER X,Y
    M=300
10   CALL POSI(ID,M,NC)
    IF (NC.EQ.1) WRITE(108,100)
100  FORMAT(//,' NE   NC   IPS   RPP   ISC   RMOY   SIGMA   IPS2   I
2PS3   IPS4   IPS5 ')
    IPS=0
    RPP=0
    SIGMA=0
    RMOY=0
    DO5 I=1,50
5     ICLA(I)=0
    DO 110 I=2,298
    X=ID(I)
    ISUI=I+1
    Y=ID(ISUI)
    IDYX=Y-X
    IAYX=ABS(IDYX)
    IPS=IPS+IAYX
    FL=100.+(IAYX**2)
110  RPP=RPP+SQRT(FL)
    IPSM=IPSM+IPS
    RPPM=RPPM+RPP
    DO 120 IBU=1,4
    NPA=IBU+1
    IPSA=0
    DO 120 I=1,300,NPA
    X=ID(I)
    ISUI=I+NPA
    IF (ISUI.GT.300) GO TO 120
    Y=ID(ISUI)
    ICLA(IBU)=ICLA(IBU)+ABS(Y-X)
20   CONTINUE
    RS=0
    DO 130 I=1,300
    RS=RS+ID(I)
30   CONTINUE
    RMOY=RS/300.
    RMOYM=RMOYM+RMOY
    VAR=0
    DO 140 I=1,300
    KX=ID(I)
    KX0=KX-RMOY
    VAR=VAR+(KX0*KX0)
40   CONTINUE
    SIGMA=SQRT(VAR/300.)
    SIGMM=SIGMM+SIGMA
    WRITE(108,200) NE,NC,IPS,RPP,RSC,RMOY,SIGMA,(ICLA(IBU),IBU=1,4)
00   FORMAT(2I5,4I7,F7.2,5I7)
    IF (NC.NE.20) GO TO 10
    RPSM=IPSM/20.
    RPPM=RPPM/20.
    RMOYM=RMOYM/20.
    SIGMM=SIGMM/20.
    WRITE(108,220) RPSM,RPPM,RMOYM,SIGMM
20   FORMAT(' MOYENNE ',2(F7.2),7X,2(F7.2))
    IPSM=0
    RPPM=0
    SIGMM=0
    RMOYM=0
    GO TO 10
END

```

```

SUBROUTINE IMPRI(ID)
DIMENSION IMP(40,100)
DIMENSION ID(300)
DIMENSION ITN(300)
DIMENSION IV(300)
INTEGER ECHEL(10),X,Y,Z,w
DATA IPOIN/1H. /
DATA IETUI/1H* /
DATA IT/1H /
DO 140 I9=1,300
IV(I9)=ID(I9)
IF(IV(I9).GE.1000) IV(I9)=IV(I9)-1000
140 CONTINUE
DO 120 I=1,300
ITN(I)=ID(I)
120 ID(I)=IFIX(FLOAT(ID(I))/10.)
MIN=1000
DO 100 I8=1,300
IF(IV(I8).LT.MIN) MIN=IV(I8)
100 CONTINUE
MIN=IFIX(FLOAT(IV(I8))/10.)
DO 110 I7=1,300
110 ID(I7)=ID(I7)-MIN+2
K=1
DO85 IE=1,10
ECHEL(IE)=(IE*(10/K))
85 CONTINUE
WRITE(108,82) IAI,(ECHEL(IE),IE=1,10)
82 FORMAT(/,I5,10(3X,F6.2,1HV))
J1=1
5 DO 10 I=1,40
DO 10 J=1,100
10 IMP(I,J)=IT
DO 20 J=1,100
IF(ID(J1).GT.100) GO TO 90
X=40-ID(J1)
IMP(X,J)=IETUI
GO TO 19
90 X=140-ID(J1)
IMP(X,J)=IPOIN
IF(J1.GE.300) J1=299
19 J1=J1+K
20 CONTINUE
DO 40 I=1,40
DO 41 J=1,100
IF(IMP(I,J).EQ.IETUI.OR.IMP(I,J).EQ.IPOIN) GO TO 42
41 CONTINUE
GO TO 40
42 ICOTE=40-I
WRITE(108,50) ICOTE,(IMP(I,J),J=1,100)
50 FORMAT(5X,I2,100A1)
40 CONTINUE
IF(J1.LT.290) GO TO 5
DO 130 I=1,300
130 ID(I)=ITN(I)
RETURN
END

```

FICHER: 1
Labour frais

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
1	1	2564	4421	0	164	45.92	2218	1961	1711	1781
1	2	2609	4490	0	157	53.66	2398	2083	2067	1979
1	3	2776	4555	0	151	53.26	2365	2074	1931	1837
1	4	2177	4060	0	140	55.48	2022	1850	1736	1678
1	5	2529	4330	0	129	53.34	2152	1860	1821	1648
1	6	2414	4342	0	133	60.89	2216	2114	1997	1933
1	7	2825	4648	0	144	62.43	2471	2358	2208	2074
1	8	2435	4271	0	167	58.92	2123	1835	1801	1623
1	9	2434	4280	0	159	55.58	2072	1792	1677	1703
1	10	2489	4275	0	152	36.60	2210	1963	1782	1524
1	11	2664	4460	0	155	42.16	2297	1927	1908	1736
1	12	2688	4470	0	161	53.75	2219	1868	1738	1691
1	13	2947	4773	0	157	67.88	2698	2254	1984	1869
1	14	2541	4367	0	156	58.99	2308	2110	2006	1786
1	15	2578	4420	0	163	57.22	2284	2108	1973	1834
1	16	2431	4325	0	157	57.95	2180	2011	1969	1880
1	17	2266	4242	0	160	56.32	2005	1822	1821	1708
1	18	2588	4389	0	145	52.69	2322	2120	2031	1751
1	19	2583	4359	0	147	48.31	2064	1834	1566	1586
1	20	2100	3975	0	153	52.11	1813	1638	1468	1341
MOYENNE	2532.00	4372.56			152.49	54.17				

FICHER: 2
Labour frais

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
2	1	2470	4292	0	150	43.67	1996	1975	1648	1577
2	2	2110	3988	0	145	55.41	1833	1595	1470	1347
2	3	2298	4170	0	140	49.33	1913	1765	1684	1607
2	4	1969	3896	0	124	45.07	1603	1451	1219	1246
2	5	2358	4251	0	129	42.23	2068	1824	1643	1702
2	6	2068	3969	0	162	58.94	1801	1714	1690	1597
2	7	2193	4053	0	156	52.93	1936	1789	1685	1565
2	8	2436	4291	0	151	44.54	2080	1838	1665	1424
2	9	2309	4227	0	156	53.52	2037	1914	1610	1456
2	10	2419	4278	0	151	49.62	2061	1859	1696	1631
2	11	1914	3857	0	154	39.31	1668	1563	1430	1289
2	12	2123	3989	0	143	38.28	1789	1645	1566	1565
2	13	2087	4004	0	143	52.53	1807	1662	1510	1519
2	14	2050	3986	0	148	49.46	1719	1649	1444	1236
2	15	2037	3943	0	156	45.39	1763	1563	1574	1443
2	16	2002	3969	0	163	41.95	1755	1561	1440	1256
2	17	2207	4118	0	170	41.44	1920	1787	1551	1518
2	18	2405	4247	0	158	39.12	2066	1864	1816	1739
2	19	2534	4359	0	159	37.62	2302	1899	1700	1550
2	20	2164	4054	0	151	39.07	1940	1547	1492	1280
MOYENNE	2208.65	4096.88			150.34	45.97				

NE: numéro de fichier

IPS: somme des pentes

RMOY: altitude moyenne

NC: numéro de transect

RPP: longueur réelle des transects

SIGMA: écart-type S des altitudes

IPS 2,3,4,5: somme des pentes sur un échantillon pris avec
un pas variable

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
3	1	2108	4060	0	140	39.69	1885	1685	1410	1356
3	2	2323	4223	0	137	48.77	1969	1747	1678	1499
3	3	2408	4315	0	124	46.83	2128	1910	1885	1786
3	4	2369	4226	0	123	45.44	2012	1846	1649	1525
3	5	2123	4040	0	119	46.83	1896	1737	1603	1529
3	6	2398	4234	0	112	54.28	2007	1825	1745	1601
3	7	2264	4141	0	113	49.32	2033	1810	1693	1553
3	8	1815	3784	0	123	36.41	1560	1487	1412	1302
3	9	1902	3829	0	113	35.12	1649	1526	1372	1197
3	10	2460	4299	0	110	48.42	2210	1974	1771	1607
3	11	2626	4419	0	117	53.91	2225	2093	1896	1740
3	12	2587	4411	0	118	54.78	2272	2004	1786	1596
3	13	2521	4338	0	101	57.95	2287	2051	1965	1663
3	14	2369	4200	0	109	55.29	2178	1898	1802	1676
3	15	2529	4287	0	116	53.09	2133	1934	1804	1728
3	16	2466	4299	0	134	48.30	2112	1946	1749	1542
3	17	2523	4348	0	140	57.23	2073	1910	1767	1617
3	18	2198	4088	0	143	48.15	1972	1703	1720	1578
3	19	2357	4251	0	137	51.16	2073	1726	1712	1453
3	20	2305	4198	0	119	52.33	2058	1871	1696	1544
MOYENNE		2332.55	4199.61		122.44	49.16				

FICHER: 4

Griffage frais

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
4	1	1744	3687	0	180	19.85	1390	1208	969	882
4	2	1620	3617	0	178	20.47	1287	1014	965	887
4	3	1793	3726	0	177	21.28	1464	1168	1075	925
4	4	1934	3840	0	177	19.89	1581	1274	1112	1002
4	5	1694	3698	0	175	20.11	1429	1243	997	981
4	6	1638	3648	0	175	17.79	1432	1296	1187	916
4	7	1883	3797	0	178	24.04	1581	1391	1215	1171
4	8	1856	3785	0	176	24.28	1531	1316	1138	1077
4	9	1817	3787	0	176	24.74	1542	1426	1361	1082
4	10	1729	3688	0	173	24.95	1357	1292	1098	962
4	11	1692	3653	0	167	24.44	1356	1152	821	886
4	12	1960	3834	0	166	24.51	1604	1356	1331	957
4	13	1852	3791	0	168	24.13	1447	1308	1170	1111
4	14	1694	3673	0	170	20.40	1249	1091	1063	917
4	15	1770	3694	0	173	20.40	1386	1234	998	996
4	16	1911	3832	0	175	21.44	1572	1295	1134	1078
4	17	1939	3833	0	177	23.28	1542	1361	1258	1088
4	18	1868	3810	0	176	25.18	1559	1345	1181	1081
4	19	2107	3971	0	174	25.83	1701	1612	1446	1358
4	20	2173	4000	0	175	23.95	1855	1553	1410	1171
MOYENNE		1833.70	3768.21		174.30	22.55				

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
5	1	1398	3471	0	174	19.65	1125	845	853	720
5	2	1629	3626	0	175	19.95	1302	1146	1034	927
5	3	1763	3684	0	173	19.71	1344	1199	959	870
5	4	1548	3586	0	171	21.01	1296	1093	921	806
5	5	1467	3519	0	172	20.87	1129	888	802	667
5	6	1376	3465	0	177	19.88	1160	1066	946	742
5	7	1475	3525	0	177	20.50	1012	973	791	772
5	8	1534	3570	0	176	20.37	1217	1064	888	873
5	9	1538	3575	0	175	22.05	1234	1067	870	827
5	10	1656	3627	0	175	16.90	1269	990	840	726
5	11	1565	3586	0	174	18.49	1217	988	801	752
5	12	1594	3611	0	176	22.33	1339	1195	1039	896
5	13	1488	3524	0	177	17.51	1163	960	806	722
5	14	1878	3769	0	178	18.39	1565	1366	1117	971
5	15	1515	3577	0	178	21.08	1228	1056	938	863
5	16	1447	3511	0	176	22.29	1135	1012	914	885
5	17	1533	3603	0	181	20.23	1243	1237	1007	925
5	18	1655	3635	0	176	20.61	1342	1278	1023	933
5	19	1635	3649	0	176	19.90	1318	1060	929	800
5	20	1505	3539	0	171	20.18	1163	1014	881	849
MOYENNE 1559.953582.69.					175.43	20.09				

FICHER: 6

Hersage frais

NE	NC	IPS	RPP	ISC	RMOY	SIGMA	IPS2	IPS3	IPS4	IPS5
6	1	1313	3424	0	187	13.57	937	719	620	522
6	2	1380	3479	0	187	13.23	967	837	724	501
6	3	1640	3659	0	187	13.88	1333	959	880	779
6	4	1422	3528	0	187	11.32	1088	836	662	586
6	5	1279	3420	0	192	11.52	999	757	589	549
6	6	1361	3478	0	193	11.38	904	800	665	526
6	7	1205	3360	0	186	13.98	814	594	497	515
6	8	1396	3466	0	183	17.57	1011	717	628	523
6	9	1619	3623	0	195	16.05	1157	1006	827	753
6	10	1351	3460	0	192	13.52	1039	829	618	579
6	11	1371	3489	0	189	14.54	964	816	594	587
6	12	1472	3522	0	187	16.04	1129	862	681	550
6	13	1362	3470	0	193	13.94	996	774	681	649
6	14	1455	3525	0	191	13.04	1032	886	623	691
6	15	1391	3472	0	192	11.81	1029	773	634	533
6	16	1349	3460	0	196	14.12	1039	861	685	504
6	17	1309	3407	0	194	10.84	975	691	588	501
6	18	1318	3423	0	190	11.38	958	673	528	545
6	19	1289	3400	0	190	12.14	943	773	631	458
6	20	1349	3430	0	185	11.09	921	671	615	487
MOYENNE 1381.553474.86					189.69	13.25				

ANNEXE 3

```

C      CLASSIFICATION DES MOTTES PAR OMBRAGE
      DEFINE FILE 1=U:1(K:300,IN,AN,OV)
      DIMENSION ID(300)
      COMMON NE,NC,T,RPP
      M=300
5      CONTINUE
      IF(NE.EQ.7) STOP
      CALL POSI(ID,M)
      IF(NC.EQ.1) WRITE(108,20)
20     FORMAT(1H+)
      CALL LISS(ID)
      RPP=0
      DO 30 I=1,299
      ISUI=I+1
30     RPP=RPP+SQRT(100.+((ID(ISUI)-ID(I))*(ID(ISUI)-ID(I))))
      CALL OMB(ID)
      CALL MOT(ID)
      DO 50 I=1,300
      IF(ID(I).GT.1000) ID(I)=ID(I)-1000
50     CONTINUE
      GO TO 5
      END

      SUBROUTINE POSI(ID,M)
      COMMON NE,NC,T,RPP
      DIMENSION ID(300)
      K=K+1
      IF(K.GT.1) GO TO 20
      READ(105,10) NELU,NCLU
10     FORMAT(2I2)
      NE=1
      IF(NELU.EQ.1) GO TO 20
5      READ(1,15,END=200) ID
15     FORMAT(100I3)
      GO TO 5
20     CONTINUE
      READ(1,15,END=300) ID
      NC=NC+1
      IF(NC.LT.NCLU) GO TO 20
      GO TO 400
200    NE=NE+1
      IF(NE.EQ.NELU) GO TO 20
      GO TO 5
300    NE=NE+1
      WRITE(108,310)NE
310    FORMAT(//////,5X,'FICHER:',I2)
      NC=0
      GO TO 20
400    CONTINUE
      RETURN
      END

```

ANNEXE 3

```

SUBROUTINE LISS(ID)
REAL INT(400)
DIMENSION ID(300)
DO 10 I=2,299
  IPRE=I-1
  ISUI=I+1
10  INT(I)=FLOAT(ID(I)+ID(IPRE)+ID(ISUI))/3.
  DO 20 I=2,299
20  ID(I)=IFIX(INT(I))
  RETURN
END

```

```

SUBROUTINE OMB(ID)
COMMON NE,NC,T,KPP
DIMENSION ID(300)
KR=KR+1
IF(KR.EQ.1) READ(105,20) IANG
IF(KR.EQ.1) WRITE(108,30) IANG
20  FORMAT(I2)
30  FORMAT(//,10X,'ANGLE D INCIDENCE:',I2,//)
JANG=IANG
TETA=(JANG/180.)*3.14159
T=TAN(TETA)
LUT=0
LOP=0
DO 50 I=1,299
  I6=I+1
  IF(ID(I).GE.1000) GO TO 50
  DO 100 KK=I6,300
  KR=ID(KK)+(10.*FLOAT(KK)/T)-ID(I)-(10.*FLOAT(I)/T)
  IF(KR.GE.0) GO TO 105
  ID(KK)=ID(KK)+1000
  LOP=LOP+1
100  CONTINUE
  GO TO 50
105  LUT=LUT+1
50  CONTINUE
  RETURN
END

```

ANNEXE 3

```

SUBROUTINE MOT(ID)
COMMON NE,NC,T,RPP
INTEGER BLANC,CLAS(100),CLOR(100)
DIMENSION ID(300)
DIMENSION IA(2)
DATA BLANC/1H /
DO 2 IJ=1,50
CLOR(IJ)=0
CLAS(IJ)=0
TSOMB=0
DO 10 I=1,299
ISUI=I+1
Y=FLOAT(ID(ISUI))
X=FLOAT(ID(I))
X100=X
Y100=Y
IF(X100.LT.1000.AND.Y100.LT.1000) GO TO 10
IF(X.GT.1000.)X=X-1000.
IF(Y.GT.1000.)Y=Y-1000.
HYPO=SQRT(((Y-X)*(Y-X))+100.)
IF(X100.GT.1000.AND.Y100.LT.1000) GO TO 180
SOMB=SOMB+HYPO
IF(X100.GT.1000.AND.Y100.GT.1000.AND.I.EQ.299) GO TO 530
GO TO 10
180 CONTINUE
DO 190 J=1,300
JU=I-J
W=FLOAT(ID(JU))
IF(W.LT.1000.) GO TO 200
190 CONTINUE
200 A=Y-X
B=X-(A*10.*FLOAT(I))
AO=-(1./T)
BO=W+((10.*FLOAT(JU))/T)
S1=((BO-B)/(A-AO))-(10.*FLOAT(I))
IF(S1.GE.0) GO TO 529
S1=0
GO TO 530
529 SOMB=SOMB+((HYPO*S1)/10.)
530 J=SOMB/10.+1
CLAS(J)=CLAS(J)+1
TSOMB=TSOMB+SOMB
SOMB=0
10 CONTINUE
DO 500 IL=1,50
IQ=(2*IL)
IP=IQ-1
II=CLAS(IL)
IF(II.NE.0) GO TO 510
CLOR(IP)=BLANC
CLOR(IQ)=BLANC
GO TO 500
510 CALL CVIA(IA,2,II)
CLOR(IP)=IA(1)
CLOR(IQ)=IA(2)
500 CONTINUE
IF(NC.EQ.1) WRITE(108,25)
25 FORMAT('X, 1 2 3 4 5 6 7 8 91011121314151617181920212223242526272
2829303132333435363738394041+24344454647484950')
WRITE(108,30) NE,NC,(CLOR(J),J=1,100)
30 FORMAT(5X,2I2,100A1)
RETURN
END

```

```

C      -----
      INDICE DE RUGOSITE DE LANNELONGUE
      DEFINE FILE I=0:1(R:300,IN,AN,DV)
      DIMENSION ID(300)
      DIMENSION MEM(2,300)
      DIMENSION ITN(300)
      REAL MAT(4,21),SIG(4,21)
      COMMON NE,NC,IP,IE
      REAL KX,KX0,L
      INTEGER P,P1,P2
      M=300
      L=0
5      CONTINUE
      CALL POSI(ID,M)
      DO 100 K=1,4
      IF(K.EQ.1) L=20
      IF(K.EQ.2) L=10
      IF(K.EQ.3) L=6.6
      IF(K.EQ.4) L=3.3
      P1=IFIX(3*L)
      P=P1
      CALL LANN(ID,MEM,P)
      DO 10 I=1,300
10     MEM(2,I)=MEM(1,I)
      DO 20 J=1,300
20     ITN(J)=MEM(2,J)
      DO 22 I=1,300
      MEM(1,I)=0
22     ITN(I)=0
      P2=IFIX(FLOAT(L)/3)
      IF(P2.LT.3) GO TO 45
      P=P2
      CALL LANN(ID,MEM,P)
      DO 30 J=1,300
30     ITN(J)=MEM(1,J)
      DO 32 I=1,300
32     ITN(I)=0
      GO TO 48
45     DO 47 I=1,300
47     MEM(1,I)=ID(I)
48     CONTINUE
      VAR=0
      KX=0
      MOY=0
C      COMPARAISON DES 2 LISSAGES
      IQ=IFIX(FLOAT(P1)/2)
      IR=300-IQ
      DO 40 I=IQ,IR
      KX=ABS(MEM(2,I)-MEM(1,I))
40     RMOY=RMOY+KX
      RMOY=FLOAT(RMOY)/FLOAT(IR-IQ)
      DO 50 I=IQ,IR
      KX=ABS(MEM(2,I)-MEM(1,I))
      KX0=KX-RMOY
      VAR=VAR+(KX0*KX0)
50     CONTINUE
      SIGMA=VAR/FLOAT(IR-IQ)
      SIG(K,NC)=SIGMA
      RUGO=SIGMA/(L*L)
      MAT(K,NC)=RUGO
      MAT(K,21)=MAT(K,21)+RUGO

```

```
SIG(K,21)=SIG(K,21)+SIGMA
100 CONTINUE
DO 105 I=1,300
MEM(1,I)=0
105 MEM(2,I)=0
RUGO=0
SIGMA=0
IF(NC.NE.20) GO TO 5
DO 75 K=1,4
SIG(K,21)=SIG(K,21)/20.
75 MAT(K,21)=MAT(K,21)/20.
WRITE(108,60)
60 FORMAT(0X,'1',5X,'2',5X,'3',5X,'4',5X,'5',5X,'6',5X,'7',5X,'8',5X,
2'9',4X,'10',4X,'11',4X,'12',4X,'13',4X,'14',4X,'15',4X,'16',4X,'17
2',4X,'18',4X,'19',4X,'20MOYENNE')
DO 65 K=1,4
DO 64 NC=1,20
64 SIG(K,NC)=SQRT(SIG(K,NC))
WRITE(108,71)(SIG(K,NC),NC=1,21)
71 FORMAT(1X,21(F6.1))
WRITE(108,70)(MAT(K,NC),NC=1,21)
70 FORMAT(1X,21(F6.2))
65 CONTINUE
DO 80 K=1,4
DO 85 I=1,22
85 MAT(K,I)=0
80 CONTINUE
GO TO 5
END
```

SUBROUTINE LANN(ID, MEM, P)

```

LISSAGE A PAS VARIABLE
COMMON NE, NC, IP, IE
INTEGER ID(300), MEM(2, 300)
INTEGER P
K=K
IOP=IFIX(P/2)
IP=1+IOP
IE=300-IOP
DO 10 I=IP, IE
IS=0
II=I-IOP
DO 20 J=1, P
IK=II+J
20 IS=IS+ID(IK)
10 MEM(1, I)=IFIX(IS/P)
CONTINUE
RETURN
END

```

SUBROUTINE IMPRA(ITN)

```

DIMENSION IMP(40, 100)
DIMENSION ITN(300)
INTEGER ECHEL(10), X, Y, Z, W
COMMON NE, NC, IP, IE
DATA IETUI/1H* /
DATA IT/1H /
DO 120 I=IP, IE
120 ITN(I)=IFIX(FLOAT(ITN(I))/10.)
MIN=1000
DO 100 I=IP, IE
IF (ITN(I).LT. MIN) MIN=ITN(I)
100 CONTINUE
*WRITE(108, 99) MIN
99 FORMAT(5X, 'MIN=', I4)
DO 110 I=IP, IE
110 ITN(I)=ITN(I)-MIN+1
DO 113 I=1, IP
113 ITN(I)=1
DO 125 I=IE, 300
125 ITN(I)=1
K=1
DO 85 IF=1, 10
ECHEL(IF)=(IF*(10/K))
85 CONTINUE
WRITE(108, 82) IAI, (ECHEL(IF), IF=1, 10)
82 FORMAT(/, 15, 10(3X, F6.2, 1MV))
J1=1
5 DO 10 I=1, 40
DO 10 J=1, 100
10 IMP(I, J)=IT
DO 20 J=1, 100
X=40-IFN(J1)
IMP(X, J)=IETUI
IF (J1.GE.300) J1=299
J1=J1+K
20 CONTINUE
DO 40 I=1, 40
DO 41 J=1, 100
IF (IMP(I, J).EQ. IETUI) GO TO 42
41 CONTINUE
GO TO 40
42 ICOTE=40-I
WRITE(108, 50) ICOTE, (IMP(I, J), J=1, 100)
50 FORMAT(3X, I2, 100A1)
40 CONTINUE
IF (J1.LT.290) GO TO 5
RETURN
END

```

ANNEXE 3

```

C   CARTE TOPOGRAPHIQUE          1 SEULE DONNEE: N. D EXP. , N. DE COURBE
   DEFINE FILE I=U:1(R:300,IN,AN,DV)
   INTEGER CARTE(00,100),ID(300)
   COMMON NE,NC,T,RPP
   DO 10 N=1,58,3
   CALL POSI(ID,M)
   CALL LISS(ID)
   CALL REDUC(ID)
   DO 20 I=1,100
20  CARTE(N,I)=ID(I)
   IF(N.EQ.1) GO TO 10
   NP=N-3
   JA=N-2
   JB=N-1
   DO 10 I=1,100
   X=((7./10.)*(FLOAT(CARTE(NP,I))))+((3./10.)*(FLOAT(CARTE(N,I))))
   CARTE(JA,I)=INT(X)
   Y=((3./10.)*(FLOAT(CARTE(NP,I))))+((7./10.)*(FLOAT(CARTE(N,I))))
   CARTE(JB,I)=INT(Y)
10  CONTINUE
   CALL SURTY(CARTE,LISC)
   REWIND 1
   END

```

```

   SUBROUTINE LISS(ID)
   REAL INT(+00)
   DIMENSION ID(300)
   DO 10 I=2,299
   IPRE=I-1
   ISUI=I+1
10  INT(I)=FLOAT(ID(I)+ID(IPRE)+ID(ISUI))/3.
   DO 20 I=2,299
20  ID(I)=IFIX(INT(I))
   RETURN
   END

```

```

C   SUBROUTINE REDUC(ID)
   REDUCTION D'UNE LIGNE DE 300 PTS EN 100 PTS
   DIMENSION ID(300)
   ICO=0
   DO 20 I=2,299,3
   ICO=ICO+1
   ISUI=I+1
   IPRE=I-1
   ID(ICO)=(ID(I)+ID(IPRE)+ID(ISUI))/3
20  CONTINUE
   DO 40 I=101,300
40  ID(I)=0
   DO 50 I=1,100
50  ID(I)=ID(I)+1
   RETURN
   END

```

ANNEXE 3

```

SUBROUTINE SORTY(CARTE,LISC)
  INTEGER CARTE(60,100),LIGNE(5,100),ICA(40)
  DIMENSION CLA(10)
  DATA ICA/'      + . ! X O M M M      + . ! X O W W W      . X I
2I I      W @ @ '/
C NOCLA=NUMBER DE CLASSES DESIREES
  NOCLA=10
  IF(LISC.EQ.1) GO TO 45
  MIN=2000
  MAX=0
  DO 30 I=1,100
  DO 30 J=1,58
  IF(CARTE(J,I).GT.MAX) MAX=CARTE(J,I)
  IF(CARTE(J,I).LT.MIN) MIN=CARTE(J,I)
30 CONTINUE
  ECART=FLOAT(MAX-MIN)/FLOAT(NOCLA)
  WRITE(108,25) MIN,MAX,ECART
25   FORMAT(1H1,10X,'MIN=',I4,5X,'MAX=',I4,5X,'ECART=',F5.1,////)
  NO=NOCLA+1
  DO 50 ICL=1,NO
  CLA(ICL)=FLOAT(MIN)+(FLOAT(ICL-1)*ECART)
  DO 40 I=1,100
  DO 40 J=1,60
  DO 35 ICL=1,NOCLA
  ICP=ICL+1
  IF(CARTE(J,I).GE.CLA(ICL).AND.CARTE(J,I).LE.CLA(ICP)) GO TO 40
35 CONTINUE
40 CARTE(J,I)=ICP-1
45 CONTINUE
  DO 70 J2=3,60
  J=61-J2
  DO 80 I=1,100
  DO 80 K=1,4
  IG=(10*(K-1))+CARTE(J,I)
80 LIGNE(K,I)=ICA(IG)
  DO 90 K=1,3
  WRITE(108,100)(LIGNE(K,I),I=1,100)
100  FORMAT(1H+,10X,100A1)
90 CONTINUE
  WRITE(108,110)(LIGNE(4,I),I=1,100)
110  FORMAT(1H ,10X,100A1)
70 CONTINUE
  RETURN
END

```

ANNEXE 3

Programme principal: BLOC DIAGRAMME

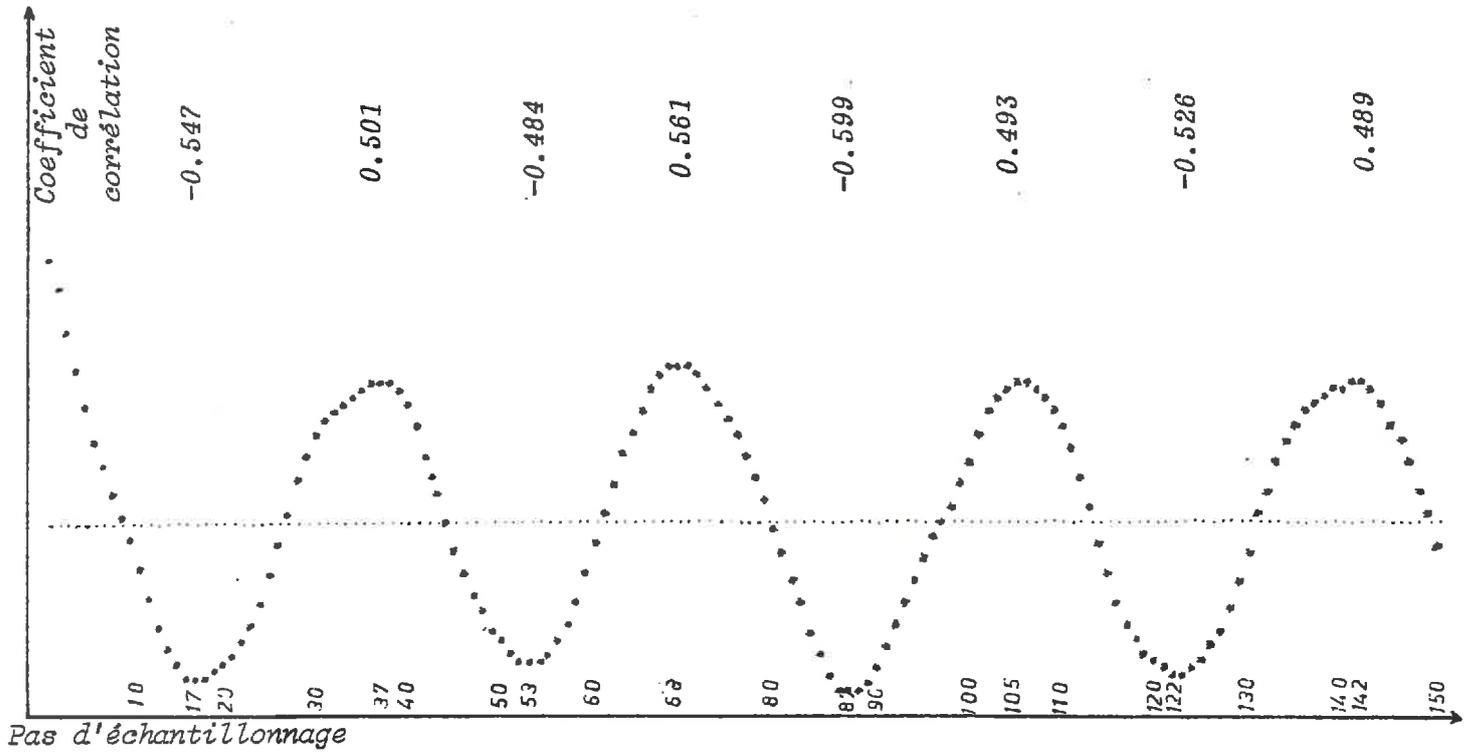
```

DEFINE FILE 1=U:1(R:300,IN,AN,DV)
INTEGER BLOC(55,140),MAT(20,100)
DIMENSION ID(300),ICA(10)
DATA ICA/' * + = . - # '/
DO 5 I=1,55
DO 5 J=1,140
5 BLOC(I,J)=ICA(1)
DO 10 I=1,20
CALL POSI(ID,NC)
CALL LISS(ID)
CALL REDUC(ID)
CALL OMB(ID)
DO 10 J=1,100
10 MAT(I,J)=ID(J)
CONTINUE
MAX=0
DO 15 I=1,100
IF (MAT(20,I).GE.100) GO TO 15
15 IF (MAT(20,I).GT.MAX) MAX=MAT(20,I)
CONTINUE
IBASE=MAX-1
L=1
DO 20 N=1,20
K=21-N
IBASE=IBASE+2
L=L+1
IF (L.EQ.5) L=2
LL=L+3
ICOLE=((N-1)*2)+1
DO 20 I=1,100
ICOTE=I+ICOLE
IF (MAT(K,I).GE.100) GO TO 40
JCOTE=IBASE-MAT(K,I)
BLOC(JCOTE,ICOTE)=ICA(L)
GO TO 70
40 JCOTE=IBASE-(MAT(K,I)-100)
BLOC(JCOTE,ICOTE)=ICA(LL)
70 JCOTE=JCOTE+1
DO 80 JJ=JCOTE,55
80 BLOC(JJ,ICOTE)=ICA(1)
20 CONTINUE
WRITE(108,93)
93 FORMAT(1H1)
DO 90 I=1,55
90 WRITE(108,100) (BLOC(I,J),J=1,119)
100 FORMAT(1X,119A1)
WRITE(108,93)
DO 120 I=1,55
120 WRITE(108,110) (BLOC(I,J),J=1,140)
110 FORMAT(30X,60A1)
REWIND 1
END

```


ANNEXE 3

FONCTION D'AUTOCORRELATION



Griffage frais.transect 6. MINIMUM -0.599 MAXIMUM 0.561
 pas 87 pas 0.68

Exemple de sortie: fonction d'autocorrélation sur un transect
 de Griffage

Tableau des valeurs de q^2/λ^2 de chaque transect en 1^{ère} ligne et q^2 en 2^{ème} ligne pour chaque fréquence

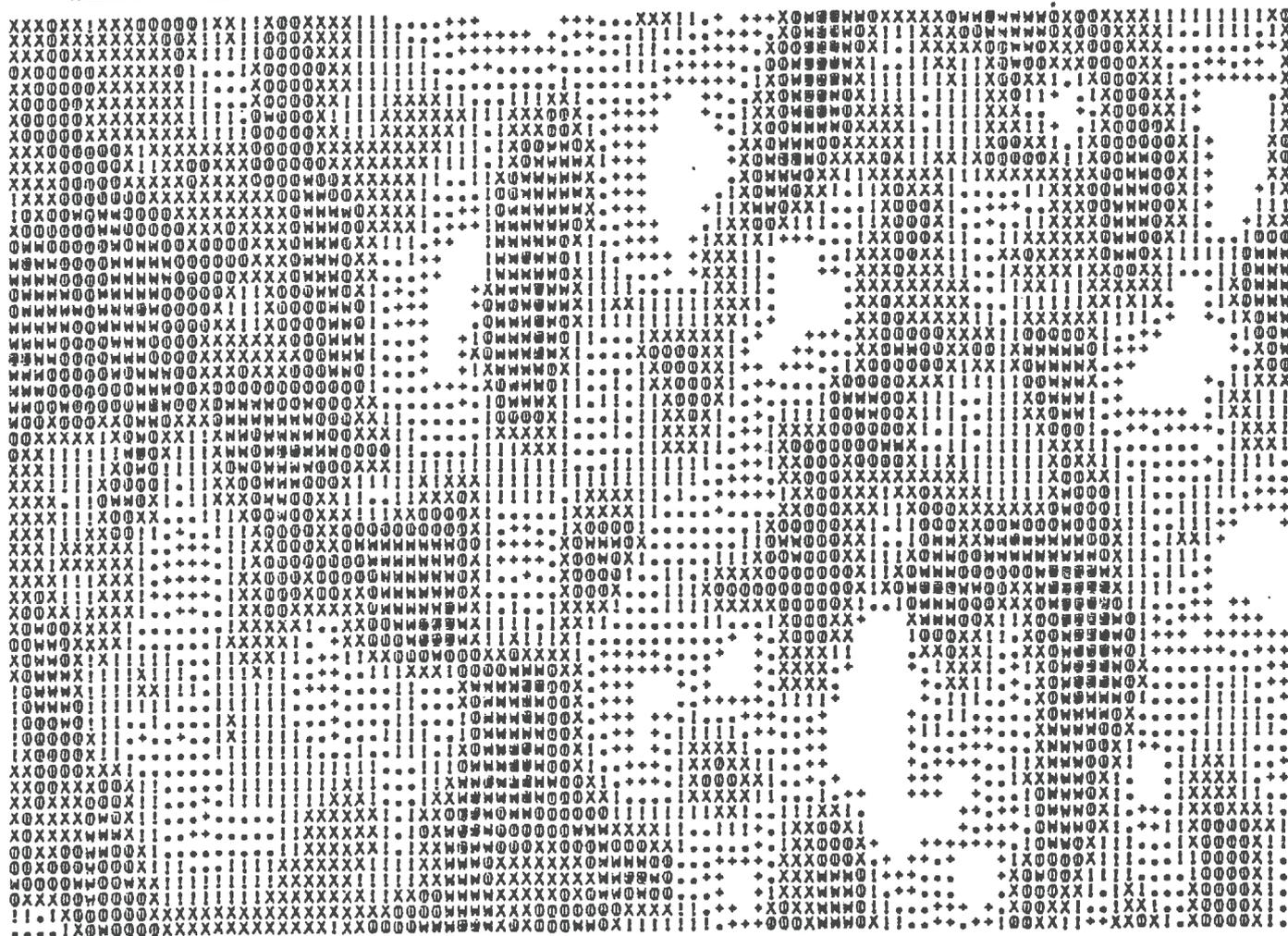
FICHIER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	ZUMOYENNE		
FICHIER: 1	1,5	25.2	31.5	27.2	28.2	22.6	32.2	23.9	26.1	19.8	21.6	27.3	31.4	32.1	32.4	31.0	29.8	27.6	25.2	24.7	26.36	
	3	18.6	20.7	19.3	17.7	13.5	18.3	17.6	16.0	13.3	17.0	18.7	24.6	25.8	2.02	2.40	2.22	1.90	1.59	1.52	1.91	
	4,5	17.0	10.1	14.0	12.5	11.1	14.4	20.6	12.7	2.57	1.78	2.88	3.19	3.45	4.42	3.34	3.25	3.48	13.8	13.8	14.0	33.5
	9	11.0	11.6	10.1	8.1	9.3	10.6	15.6	9.1	8.9	8.6	9.8	10.0	13.2	12.0	10.8	14.7	14.6	10.3	9.8	21.3	3.5
	ZUMOYENNE	12.30	12.39	9.44	5.97	7.98	10.22	22.41	1.62	7.34	6.75	8.85	9.22	15.94	11.14	10.70	13.49	11.08	9.36	5.40	10.54	
FICHIER: 2	1,5	22.4	20.2	28.0	10.6	18.3	22.4	21.4	19.8	22.5	17.0	16.9	25.5	21.2	23.1	18.7	25.4	24.8	20.4	17.8	49.4	
	3	19.1	11.5	18.2	11.8	14.8	13.8	14.3	14.9	14.6	13.4	14.3	14.3	12.4	16.2	0.87	1.61	1.54	1.04	0.79	1.14	
	4,5	15.1	8.6	13.4	8.5	12.3	10.3	12.5	12.9	14.0	11.7	2.06	2.06	2.03	2.62	1.52	2.54	2.99	15.4	10.9	231.7	
	9	10.1	6.3	9.0	0.5	9.2	6.8	8.3	9.6	10.5	8.9	7.5	8.2	9.5	8.2	7.4	8.3	9.2	10.1	9.4	6.7	7.2
	ZUMOYENNE	9.31	3.04	7.41	3.82	7.70	4.22	6.35	8.41	10.15	7.31	5.11	6.21	8.20	6.24	4.98	6.31	7.83	9.46	8.18	4.14	8.75
FICHIER: 3	1,5	21.7	24.5	20.3	18.4	21.6	23.6	23.7	18.5	21.3	22.1	22.5	19.4	20.6	24.3	26.3	28.8	25.9	20.3	24.2	59.3	
	3	14.7	15.5	20.2	15.6	15.6	14.0	12.9	10.7	18.3	18.5	17.6	0.94	1.06	1.47	1.73	2.07	1.68	1.03	1.46	1.31	
	4,5	12.8	13.8	15.7	13.1	11.9	10.5	11.3	9.9	9.3	15.8	16.1	16.3	2.04	2.93	3.03	2.78	13.8	14.3	15.8	251.2	
	9	8.6	10.2	10.9	8.2	8.6	8.9	8.4	6.4	6.7	10.9	10.3	10.8	11.0	7.7	9.5	9.7	9.8	8.9	11.1	10.1	92.7
	ZUMOYENNE	6.72	9.51	10.04	6.12	6.85	7.25	6.44	3.74	4.10	10.85	9.69	10.81	11.12	5.46	8.22	8.57	8.77	7.20	11.37	9.40	8.15
FICHIER: 4	1,5	13.7	13.1	12.2	13.1	12.2	12.5	14.5	13.6	11.5	9.9	11.7	14.9	13.1	13.7	11.9	13.8	13.8	13.6	13.6	201.1	
	3	8.1	8.0	9.0	8.9	8.7	7.9	9.9	10.5	10.6	8.2	8.4	10.5	0.43	0.47	0.35	0.48	0.48	0.46	0.47	4.4	
	4,5	0.65	0.65	0.82	0.80	0.75	0.62	0.99	1.11	1.13	0.67	0.55	0.70	1.11	0.74	0.76	0.84	1.03	1.30	1.31	4.85	
	9	5.1	4.5	5.8	5.1	5.7	5.7	6.0	5.5	6.0	5.5	5.8	5.8	5.3	5.3	5.8	5.8	6.5	8.0	7.3	39.1	
	ZUMOYENNE	2.40	1.82	3.05	3.05	2.35	3.00	3.32	2.85	3.31	2.80	3.13	3.13	3.07	2.59	3.06	3.07	3.86	5.91	4.84	3.10	
FICHIER: 5	1,5	14.4	13.7	14.4	14.3	15.0	14.6	14.5	15.3	13.1	12.9	15.1	14.6	13.1	14.5	13.4	13.6	13.6	12.6	13.3	207.4	
	3	7.5	7.7	8.0	7.7	6.6	7.2	7.3	8.5	6.3	6.5	8.4	6.5	8.3	0.52	0.45	0.46	0.46	0.40	0.45	4.4	
	4,5	5.9	6.4	6.7	6.8	6.4	6.4	6.0	7.3	6.8	6.1	6.6	0.42	0.68	0.51	0.56	0.59	0.64	0.67	7.8	81.0	
	9	4.3	4.4	4.7	4.6	4.1	4.4	4.4	4.0	4.4	4.8	4.5	4.0	4.0	3.2	4.3	5.4	5.1	4.8	4.3	24.2	
	ZUMOYENNE	1.71	2.09	1.53	1.76	1.56	1.74	1.75	2.12	2.11	2.05	1.94	1.87	1.46	2.51	1.72	2.07	2.42	2.13	1.88	2.04	
FICHIER: 6	1,5	12.5	13.3	12.2	12.6	12.1	12.1	11.2	12.8	12.0	11.0	12.9	13.4	12.0	12.3	12.7	11.9	12.1	12.3	11.5	100.7	
	3	4.0	4.7	5.6	4.8	4.6	4.6	3.8	4.1	4.7	4.7	7.0	5.5	4.7	4.3	5.0	4.0	3.7	4.0	4.0	20.7	
	4,5	4.5	5.3	5.9	5.7	5.5	5.1	4.4	4.4	4.9	4.9	6.2	5.1	5.0	0.19	0.25	0.16	0.13	0.16	0.16	0.24	
	9	3.4	4.4	5.1	5.1	4.6	4.6	3.3	4.0	4.7	4.1	4.7	4.2	4.2	4.1	4.3	3.3	3.6	4.2	3.4	18.8	
	ZUMOYENNE	1.09	1.50	1.36	1.37	1.32	1.37	1.01	1.50	2.06	1.54	1.49	1.59	1.59	1.51	1.67	1.01	1.22	1.61	1.08	1.02	

ANNEXE 3

CARTE HYSOMETRIQUE

MIN= 1 MAX= 101 ECART= 10.0

Labour frais (fichier 1)



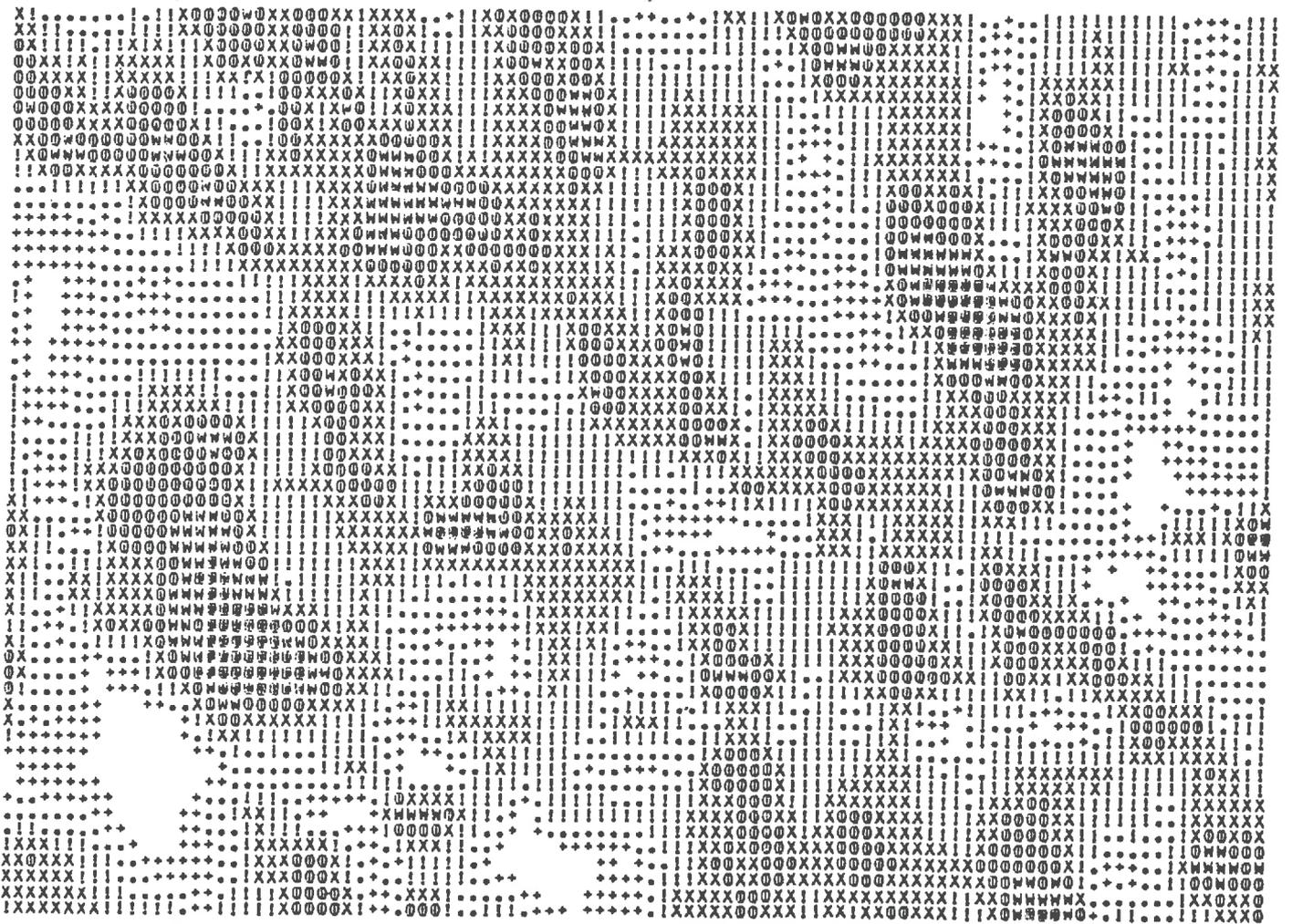
L'échelle des grisés correspond à 10 classes établies entre l'altitude la plus élevée (MAX) en mm et l'altitude la plus basse (MIN).

ANNEXE 3

CARTE HYSOMETRIQUE

MIN= 3 MAX= 102 ECART= 9.9

Labour frais (fichier 2)

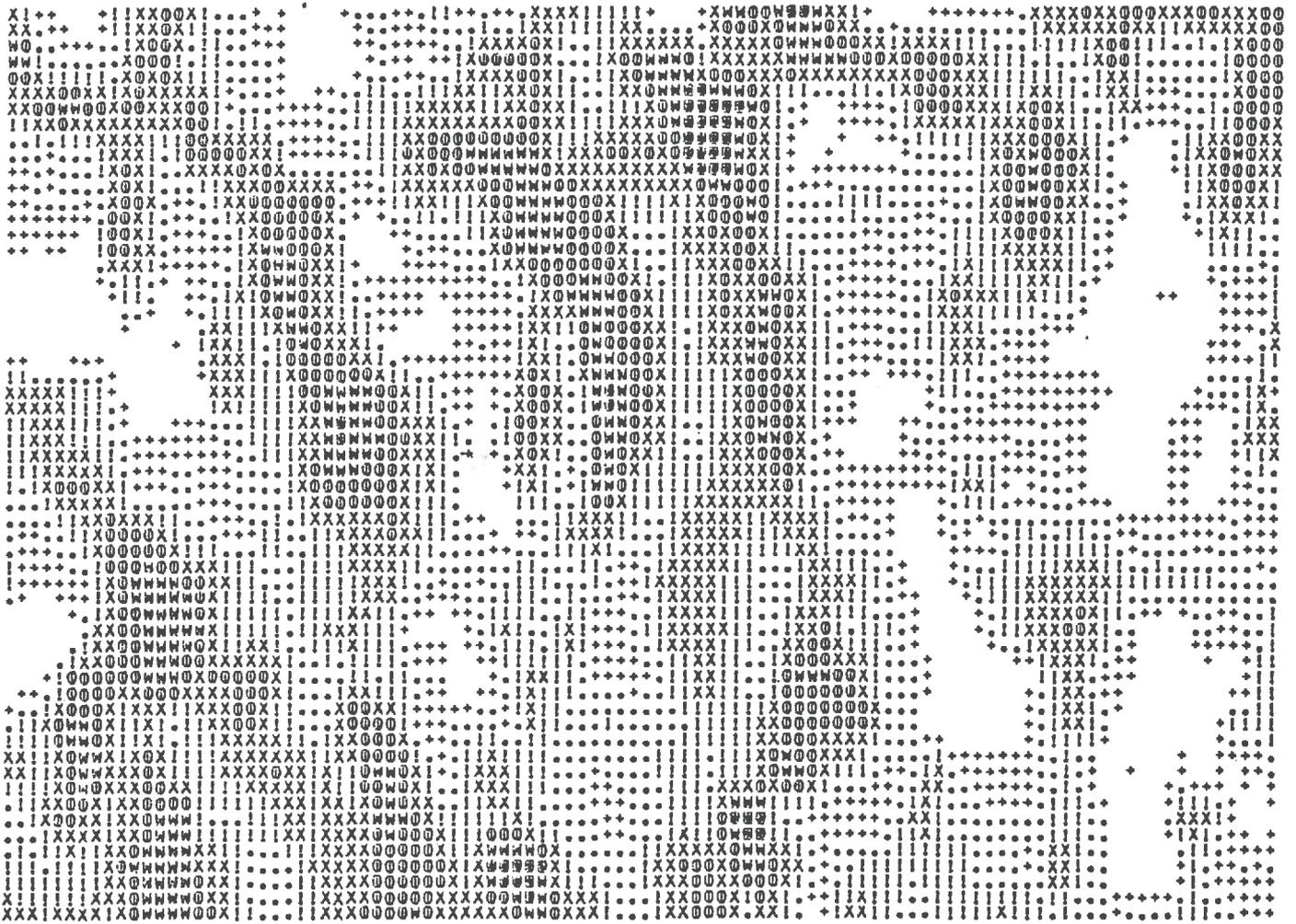


ANNEXE 3

CARTE HYSOMETRIQUE

MIN= 2 MAX= 94 ECART= 9.2

Labour ancien (fichier 3)

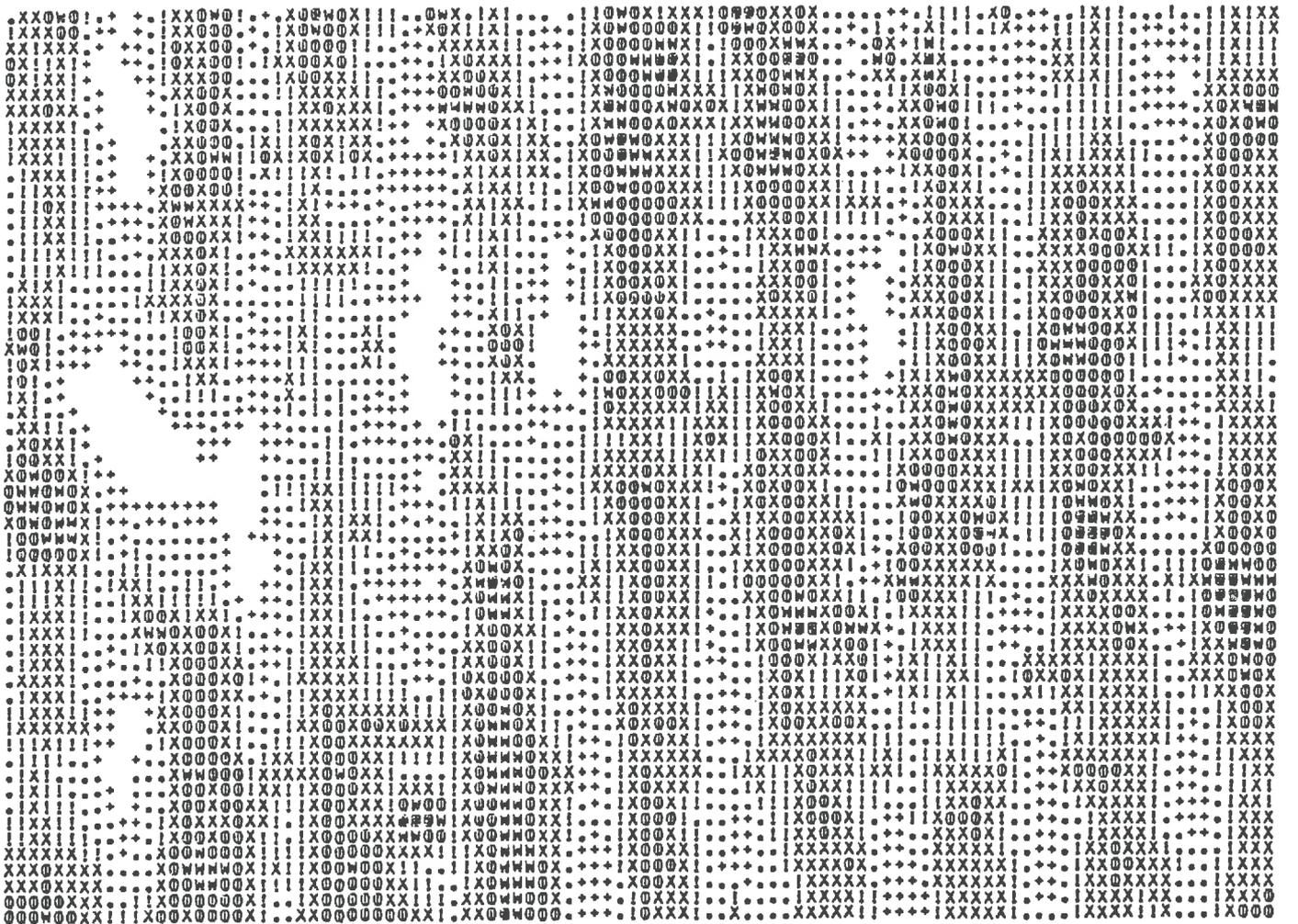


ANNEXE 3

CARTE HYPSONOMETRIQUE

Griffage frais (fichier 4)

MIN= 36 MAX= 84 ECART= 4.8

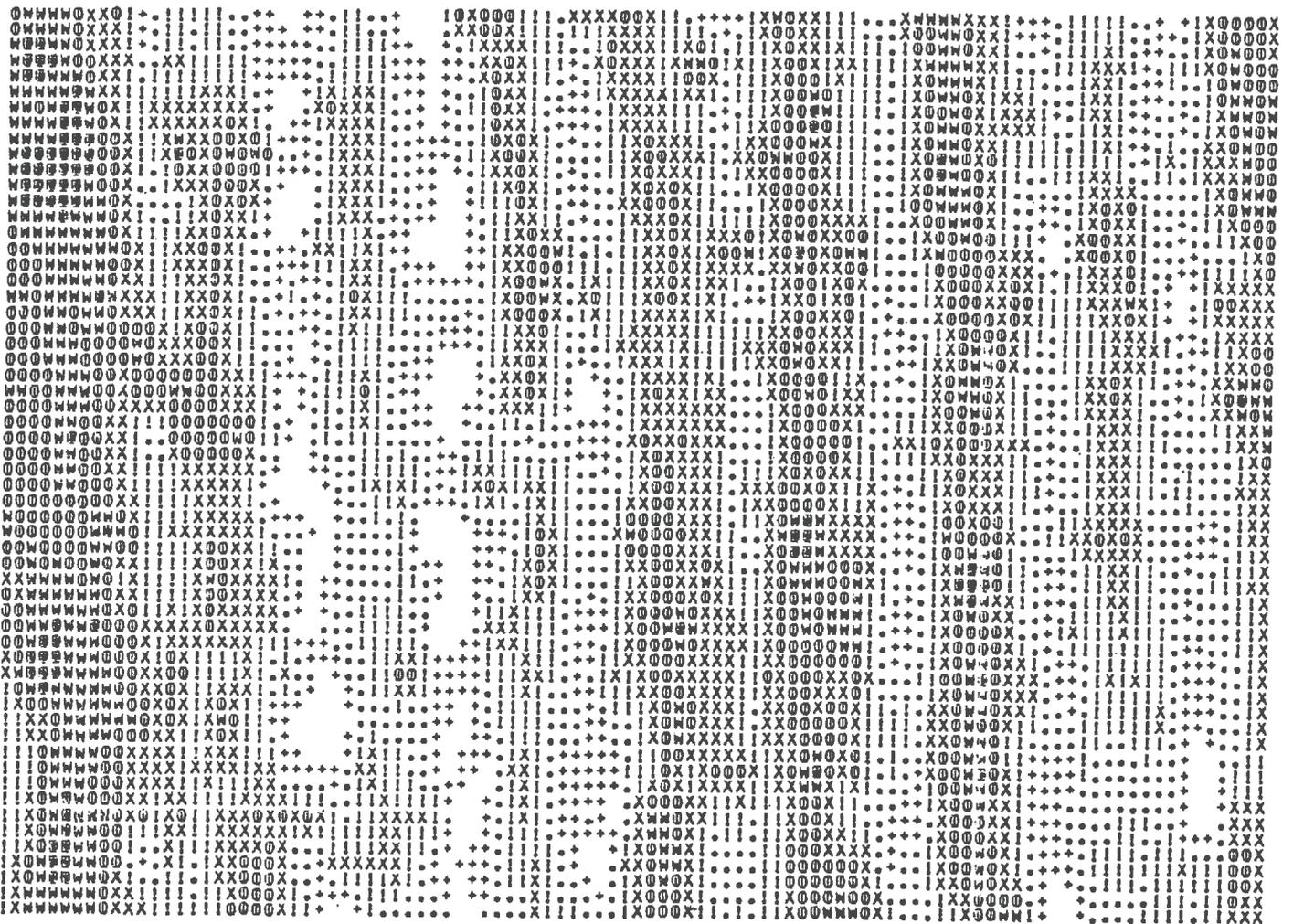


ANNEXE 3

CARTE HYPSONOMETRIQUE

Griffage ancien (fichier 5)

MIN= 39 MAX= 79 ECART= 4.0



ANNEXE 3



CARTE HYSOMETRIQUE

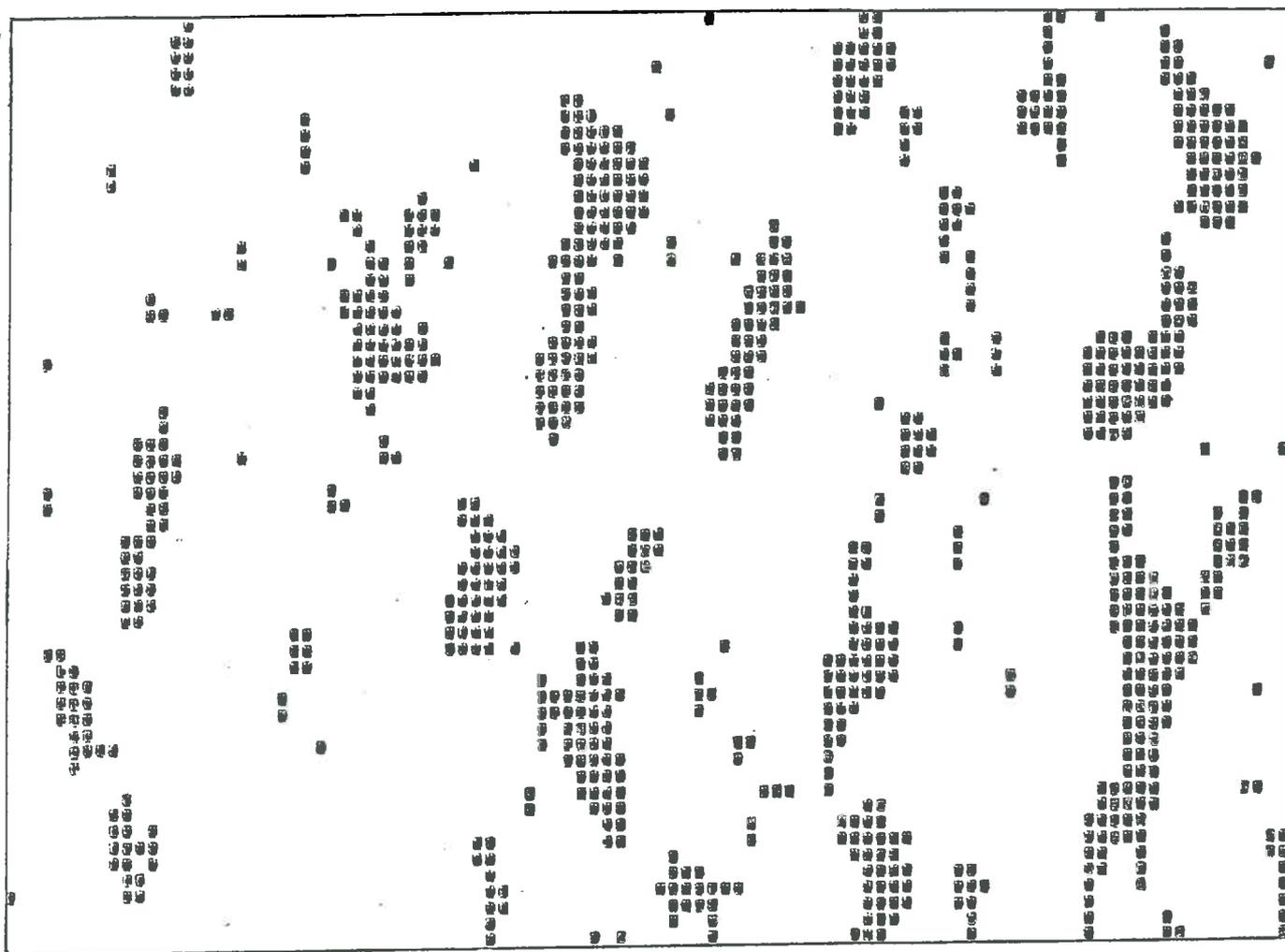
MIN= 50 MAX= 78 ECART= 2.8

Hersage frais (fichier 6)



ANNEXE 3

CARTOGRAPHIE DES PLAGES OMBREES



Labour frais (fichier 1)
angle d'incidence 50°

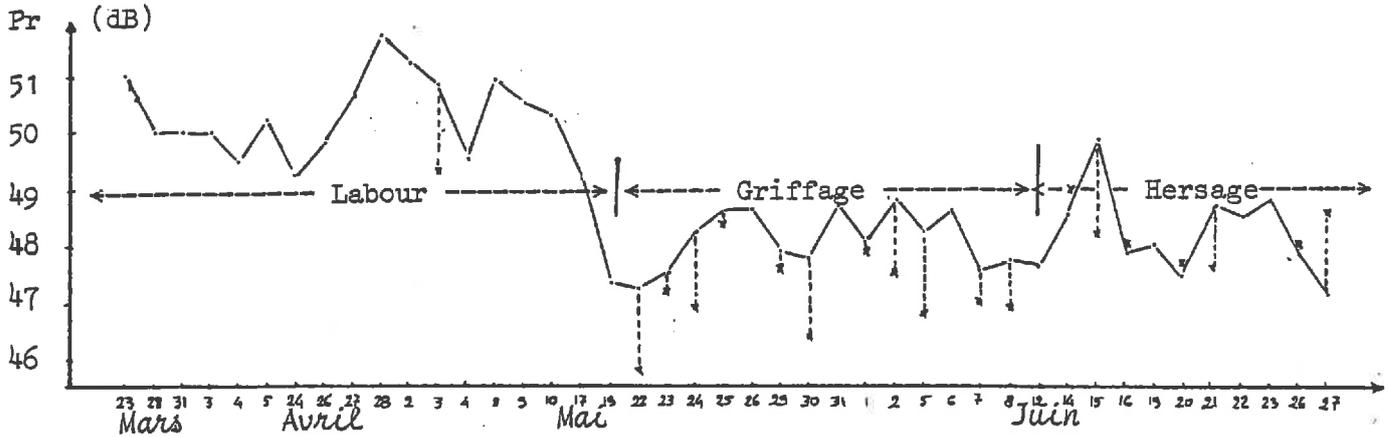
CALENDRIER DES TRAVAUX

Mars	Avril	Mai	Juin
21 Mise au point 22 3 GHz 23 Panne 24 3 GHz 28 1,5 GHz 29 9 GHz 30 4,5 GHz 31 3 GHz	3 Mise au point 4 3 GHz 5 Panne } 21 moteur 24 Panne module 9 GHz 25 Panne 26 1,5 et 3 GHz 27 4,5 et 1,5 GHz 28 Panne réception V	2 4,5 et 3 GHz 3 4,5 et 4,5 GHz 5 3 et 3 GHz 8 Mise au point 9 4,5 et 4,5 GHz 10 3 et 3 GHz 11 Démonstration 12 Mise au point 16 Réparations 17 Mise au point 18 Mise au point 19 Pluie 22 1,5 et 9 GHz 23 4,5 et 3 GHz 24 1,5 et 4,5 GHz 25 9 GHz 26 3 GHz 30 Mise au point 31 9 GHz	1 1,5 et 3 GHz 2 4,5 et 4,5 GHz 5 3 et 4,5 GHz 6 9 GHz 7 1,5 et 4,5 GHz 8 9 et 3 GHz 9 Pluie 12 Mise au point 13 Mise au point 14 1,5 et 3 GHz 15 9 et 1,5 GHz 16 4,5 et 3 GHz 19 démonstration 9 GHz 20 4,5 et 1,5 GHz 21 9 et 3 GHz 22 4,5 GHz 23 Mise au point 26 9 et 1,5 GHz 27 3 et 4,5 GHz 28 } Démontage 29

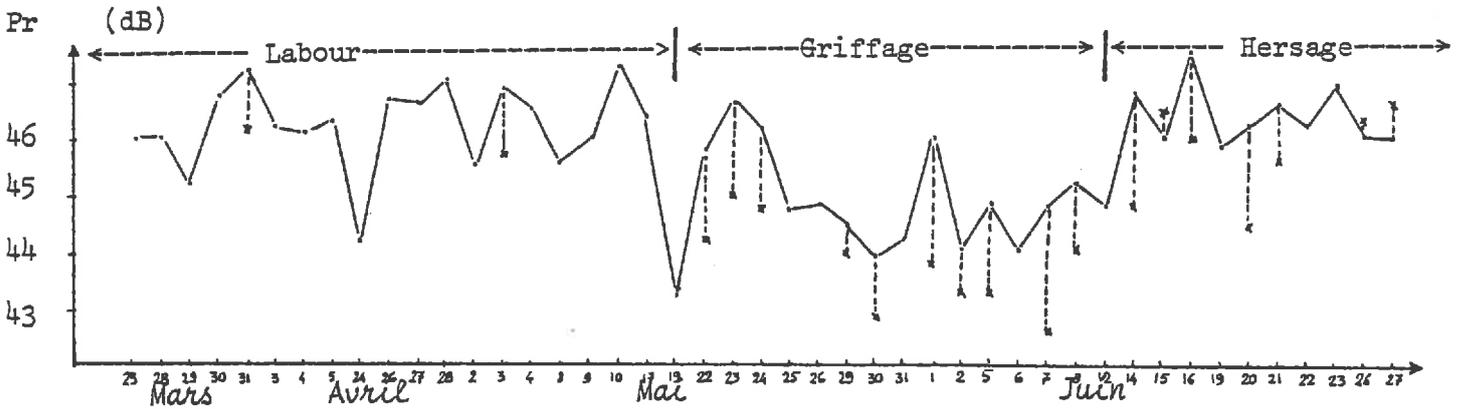
Humidité Fréquence	0-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30
1.5		G 1/6	H 14/6	G 29/5		L 28/4	G 24/5	L 26/4		G 22/5		L 28/3	G 7/6		
3		G 1/6 G 5/6	L 4/5			H 20/6	L 4/5	L 10/5 L 10/5	L 2/5				L 4/4 L 31/3		
4.5			H 14/6	G 29/5		H 27/6		G 23/5 G 26/5	G 8/6						
		G 30/5 G 5/6					G 24/5	L 27/4 L 3/5 L 9/5	L 2/5 L 3/5	L 9/5		G 2/6	G 7/6		
9		G 31/5		H 15/6		H 20/6 H 27/6 H 22/6	G 25/5	H 16/6	G 22/5 G 8/6		L 29/3			H 19/6	G 6/6

Répartition des séquences réalisées suivant les conditions de terrain
(L labour - G griffage - H herse)

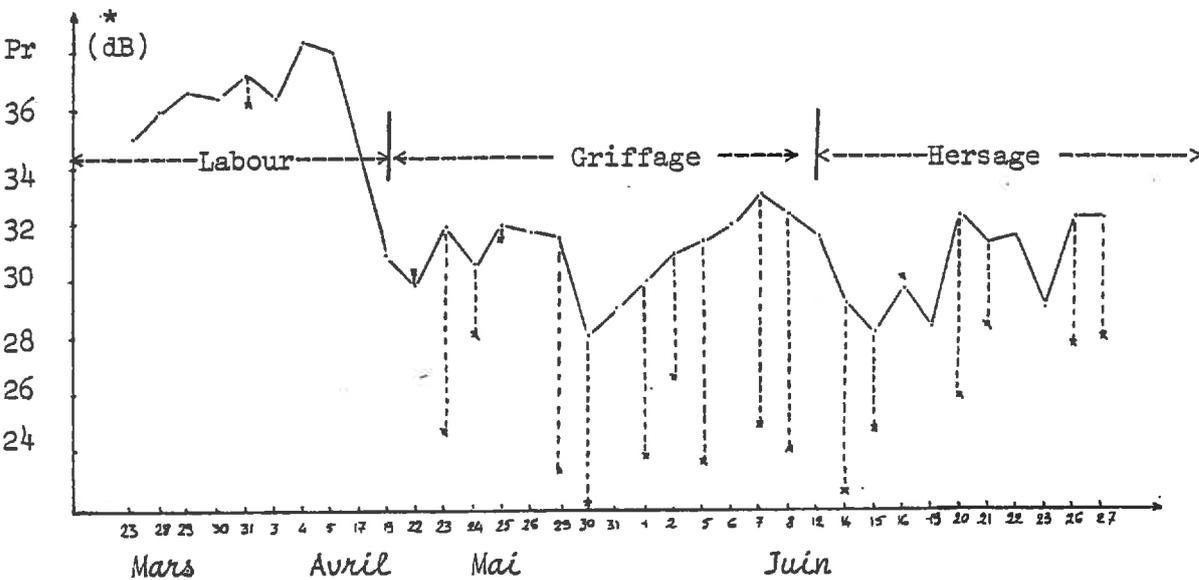
ANNEXE 4



Etalonnage en 1,5 GHz HH



Etalonnage en 3 GHz HH



Etalonnage en 9 GHz HH

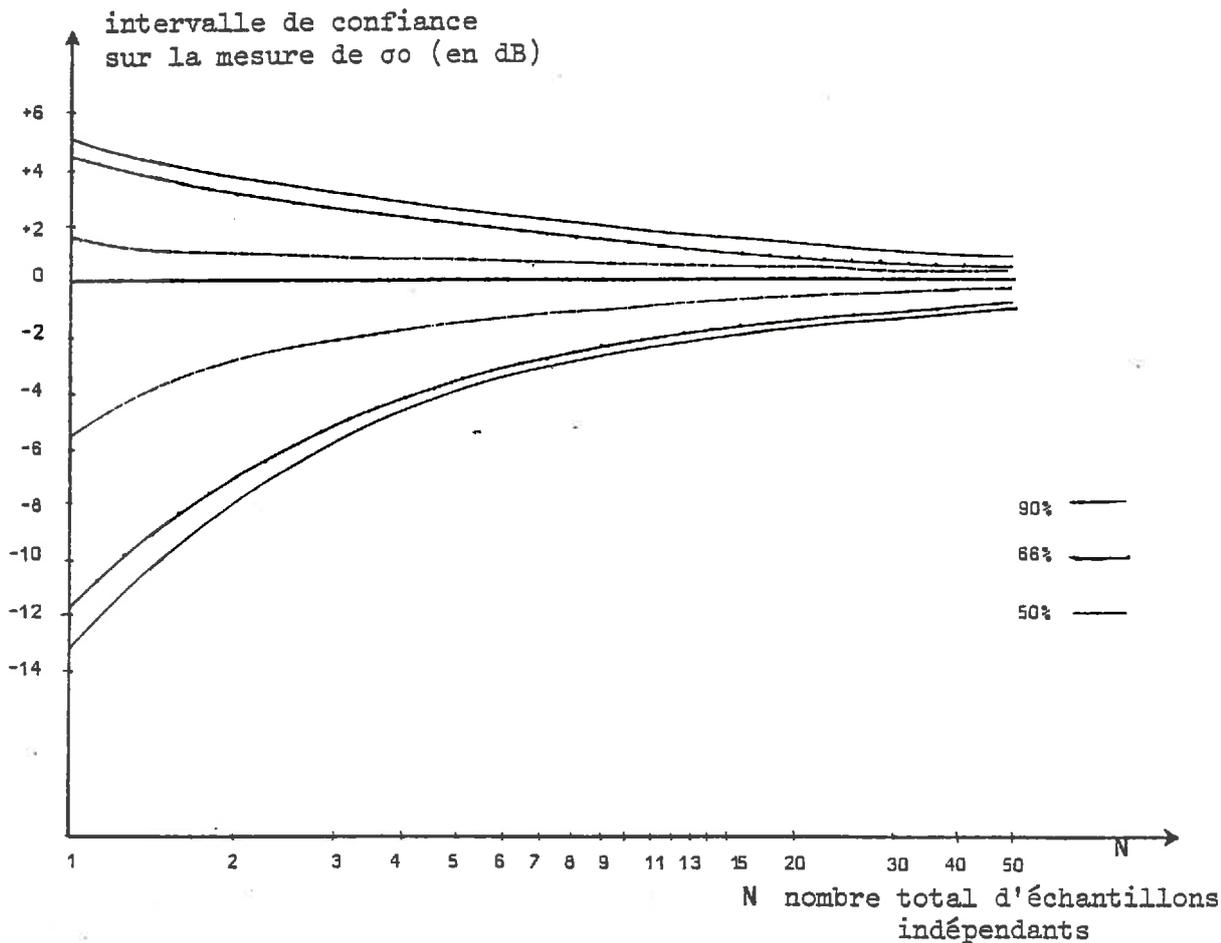
* Attention l'échelle du graphique est différente à cette fréquence.

ANNEXE 4

i° \ F	1,5 GHz	3 GHz	4,5 GHz	9 GHz
10	1	1	1	2
12	3	3	3	9
14	3	3	3	11
17	4	4	5	13
19	5	5	7	14
21	7	6	9	16
*23	3	2	3	6
27	3	2	4	7
35	4	4	7	8
41	4	6	9	9
52	7	14	21	18
61	10	13	25	32
72	8	11	22	33
79	11	11	11	22

*- fin de l'utilisation d'un lissage.

Nombre total d'échantillons indépendants pris en compte à une incidence et une fréquence donnée.



Valeur de l'intervalle de confiance en fonction de N

ANNEXE 4

CONDITIONS DE TEMPERATURES MOYENNES RELEVÉES AU COURS DES SEQUENCES REALISEES

Fréquences	Surface	Humidité	Température 5 cm	Température 15 cm	Température 25 cm
1,5 GHz	L	24	14	12	9
	L	16,3	8,5	7	7
	L	12,5	13	11,5	11
	G	19,8	12,5	12,5	13
	G	14,5	13	12	12
	G	8,5	18	17	16
	G	3,1	22	19	19
	G	26,9	19	19	18
	H	5,6	21	20	20
	H	7,6	22	21	21
	H	12,2	24	20	18
	H	14,6	18,5	16,5	15
3 GHz	L	26,2	11	8	7
	L	25,4	8	8	8
	L	16,3	14	13	12
	L	18,9	15	12	11
	L	14	15	13,5	13
	L	6,4	22	15	14
	L	16,2	10,5	11	12
	L	16,2	18	13	11,5
	G	16,3	15	13	12
	G	15,3	15	14	12,5
	G	8,5	28	18	17
	G	3,1	25	21	19
	G	4,1	21	19	19
	G	18,2	21	19	19
	H	15,9	16	16	16
H	10,2	21	18,5	17,5	
H	12,6	15	15	15	
4,5 GHz	L	29,1	9	8	8
	L	16,4	11	11	11,5
	L	18,9	10	10	10
	L	18	15	11,5	11
	L	16,5	18,5	14	12
	L	20,3	12	12	12
	L	16,7	14	12	12
	G	16,3	13	12	12
	G	14,5	15	13,5	13
	G	3,5	24	20	18
	G	23,3	20	20	20
	G	23,3	21	20	20
	G	4,1	23	21	19
	G	26,9	21	18,5	18
	H	15,9	15	15,5	15,5
H	12,2	18	17	17	
H	12,5	16,5	16,5	17	
H	12,6	17,5	16	15	
9 GHz	L	22,3	9	9	8
	G	18,9	13,5	12,5	12,5
	G	14,9	12	12,5	12,5
	G	3	20	18	18
	G	30,4	20	20	20
	G	18,2	20	18	18
	H	7,6	20	20	20
	H	27	22	17	17
	H	10,2	19	18	18
	H	14,6	16	15	15

ANNEXE 4

VALEURS DES COEFFICIENTS σ_{θ} D'UNE SEQUENCE DANS DES CONDITIONS D'HUMIDITE, DE RUGOSITE ET D'INCIDENCE DEFINIES.

Séquences	Humidité	Incidence													
		en polarisation HH					en polarisation VV								
		17°	21°	27°	35°	41°	52°	61°	17°	21°	27°	35°	41°	52°	61°
1,5 GHz	3,1	-10,2	-10,1	-17,6	-16	-18,3	-22	-24,1	-7,5	-9	-10,5	-10,4	-15,6	-17,9	-17,9
	8,5	-8,6	-12,2	-15,7	-15,3	-15	-18,6	-21,3	-9,4	-9,2	-10,3	-9,7	-13	-15,9	-18
Griffage	14,5	-7,7	-8,3	-12,8	-10,5	-13,4	-16,5	-17,6	7,8	-9	-11	-8,8	-12,8	-14,5	-18,8
	18,8	-6,9	-5,2	-11,6	-8,7	-13	-7,8	-25,4	-4,7	-4,6	-12,2	5	-8,4	-11,7	-17,4
	26,9	-3,1	-1,7	-6,6	-10,5	-8,5	-15,8	-20,4	-4,1	-4,3	-6,6	-3,7	-7,3	-9,8	-13,8
3 GHz	6,4	-10	-10	-15,4	-12,8	-15,1	-14,6	-16,7	-11	-11	-12,8	-10,7	-12	-10,5	-14,2
	14	-11,2	-9,9	-14,9	-14,7	-14,1	-13,5	-16	-9,6	-10,6	-16,9	-16,4	-13,4	-12,2	-13,8
Labour	16,2	-12	-11,6	-9,2	-8,2	-14,8	-14,9	-16	-11	-13,2	-11,1	-7,6	-12,6	-11,2	-13,2
	18,9	-12	-9,7	-15,2	-9,5	-13,4	-14	-17,8	-9,1	-10,7	-13,1	-13,2	-12,2	-11,8	-17
3 GHz	25,4	-7,4	-7,2	-7,5	-8,9	-10,6	-11,7	-14,7	-9,2	-8,2	-11	-8,9	-10,1	-7,2	-13,8
	26,2	-1,6	-	-8,1	-8,4	-8,6	-14,4	-14,2	-5,9	-	-6,5	-8,3	-10,3	-8,9	-13,3
Griffage	3,1	-12,3	-12,5	-9,1	-12,1	-13,3	-16,7	-18,2	-11,6	-6,2	-12	-11,4	-15	-16,4	-12,6
	4,1	-8	-6,3	-7	-9,6	-11,2	-15,5	-18,1	-14,9	-8,7	-9,1	-12,2	-15,9	-19,8	-20,6
4,5 GHz	8,5	-13,4	-9,8	-10,1	-10,6	-12,5	-15,3	-18,2	-12	-7,7	-9,5	-12	-14,5	-17,4	-17,4
	15,3	-11,4	-7,5	-10,6	-12	-12,7	-15,2	-18,8	-13,1	-8,4	-15,1	-14,2	-17,3	-15,1	-12,9
Rugosité indifférente	16,3	-7,9	-6,6	-10,7	-11,3	-13	-14,3	-17,6	-11,6	-7,9	-7,7	-14,2	-14,1	-14,7	-16,2
	18,2	-7,3	-3,5	-9,6	-7	-11,3	-12,6	-15,5	-8	-5,4	-7,9	-7	-10,4	-11,1	-12
9 GHz	3,5	-9,7	-9,2	-12,1	-11,8	-13,4	-13,8	-16,8	-13,9	-12,8	-9,9	-13,5	-13,5	-15,6	-18,2
	4,1	-8,5	-7,1	-6,6	-10,9	-11	-13	-16,8	-11,2	-10,6	-6	-12	-12	-14,5	-17
Griffage	12,2	-0,1	-8,2	-5,7	-8,2	-7,7	-12,2	-14,9	-7	-7,2	-12,7	-11,7	-10,1	-12,1	-15,7
	12,6	-8,8	-8,3	-6,5	-8,4	-10,1	-11,4	-14,5	-9,1	-8,8	-13,3	-11,3	-11,9	-13,8	-15,7
9 GHz	14,5	-8,9	-10	-16,2	-9,8	-10,9	-11,3	-15,5	-12	-9,7	-12	-11,9	-10,4	-12,5	-16,2
	15,9	-2,1	-6	-9,9	-7,6	-10,5	-11,6	-14	-6,5	-5,7	-6,9	-12,4	-11,3	-13,3	-16,6
Rugosité indifférente	16,3	-7	-8	-8,8	-9,5	-11,3	-11,5	-14,8	-10,5	-8,3	-10,5	-10,2	-10	-12,6	-16,5
	16,4	-4,9	-5	-7,9	-6,9	-9,2	-10,2	-14,8	-5	-7,6	-14	-9,6	-12,3	-14,1	-16,3
Griffage	18,5	-8,6	-6,1	-7,5	-6,8	-9,3	-11	-14,5	-6,8	-11,1	-9,7	-10,6	-11,5	-14,5	-18,4
	18,7	-5,2	-4,9	-7,1	-6	-8,9	-9	-13,4	-3,9	-11	-5,9	-10,6	-12,6	-13,8	-16,7
9 GHz	18,9	-7,6	-8,5	-9,9	-7,9	-9,4	-10,5	-14,8	-6,8	-10,4	-11,6	-11,6	-12,6	-15	-14,4
	20,3	-6	-3,8	-7,6	-5,9	-8,5	-7,6	-11,7	-6,3	-7,5	-7,1	-10,6	-12,1	-10,6	-13,2
Griffage	23,3	-3,5	-2,4	-5,7	-5,4	-6,4	-6,5	-12,2	-4,3	-8,4	-10	-8,2	-12,1	-10,5	-15,2
	26,9	-6,7	-3,2	-5,3	-5,4	-6,7	-7,4	-12,5	-6,1	-6,2	-7,8	-9,2	-7,5	-10	-15,4
9 GHz	3	-4,2	-2,8	-2,2	-3,9	-4,6	-6,4	-11	-4,7	-6,5	-5,5	-6,3	-5,2	-9,6	-13,7
	14,9	-0,7	-1,7	-2	-3,9	-3,7	-5,5	-10,9	-0,6	-0,5	-1,7	-2,3	-4,7	-5,9	-10,8
Griffage	18,2	2,8	3,1	3,3	1,5	1,9	0,2	-3,8	1,8	-0,6	-1,8	0,3	-2,8	-1,8	-5,9
	18,9	6,2	4	3,3	1,6	1,8	-2,8	-6,8	5,2	4,3	3,2	1,1	6,5	-3,8	-7,3
Griffage	30,4	1,5	0,4	-2,9	-4,2	-2,9	-4,4	-	1,5	0,3	-2,4	-3,2	-5,4	-5	-
	30,4	4,2	3,4	2,8	1,3	0	-1,6	-5,7	4,3	4,8	1,8	0,3	0,1	-1,5	-6,3

ANNEXE 4

Intervalles d'erreurs des mesures de σ

chevauchement des intervalles à une incidence donnée pour les séquences regroupées à une humidité donnée (12 à 16%). Seules les séquences extrêmes de chaque groupe sont représentées.

