

~~Th. FB9~~
TH-GD3

POTENTIALITES D'ETUDE DE LA
BATTANCE PAR LA TELEDETECTION.

Mémoire de fin d'études
I.N.A. PARIS-GRIGNON

Pascal BROUSSARD

Promotion 1983-1986

INRA
STATION DE SCIENCE DU SOL
5. SEP. 1986
De Paul - B. 91
84140 MONTFAVET

REMERCIEMENTS.

Je tiens à remercier toutes les personnes de la Station de Science du Sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET qui m'ont apporté aide et soutien dans ce travail :

- Monsieur Pierre STENGEL, Directeur de la Station, qui m'a accueilli, et qui a participé à l'encadrement de ce stage de fin d'études,
- Monsieur Patrick BERTUZZI, Ingénieur d'Etudes, mon maître de stage, qui a suivi et encadré mon travail dans toutes ses phases,
- Messieurs Jean-Claude GAUDU et Michel BOURLET qui m'ont initié à la pratique de la photographie,
- Monsieur André CHANZY qui m'a aidé dans mes recherches bibliographiques radar,
- et tous ceux que j'ai sollicité pendant ces six mois, et qui m'ont témoigné leur sympathie notamment mes "voisins de parcelle" Monsieur Laurent BRUCKLER, Chargé de Recherches, et Monsieur Harry WITTONO, stagiaire.

Je remercie Monsieur BOIFFIN qui a encadré ce stage de PARIS pour la partie "battance", et a participé à la réflexion finale.

Enfin, je remercie Mademoiselle Catherine MALAUSSENA, qui a assuré la dactylographie de ce rapport.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
<u>I. RAPPELS SUR LE PHENOMENE DE BATTANCE.</u>	3
I.1. Caractérisation morphologique.	
I.2. Modalités et processus de mise en oeuvre.	
<u>II. LA MESURE RADAR : PRINCIPAUX RESULTATS.</u>	7
II.1. Définition de la section efficace de rétrodiffusion.	
II.2. Equation radar.	
II.3. Comportement électromagnétique de l'onde au contact du sol.	
II.4. Principaux critères de rugosité pris en compte en télédétection.	
II.5. Principaux résultats expérimentaux acquis.	
<u>III. MATERIEL ET METHODES.</u>	19
III.1. Site expérimental.	
III.1.1. La parcelle.	
III.1.2. Problèmes d'échantillonnage.	
III.2. Techniques mises en oeuvre.	
III.2.1. Observations morphologiques.	
III.2.2. Mesures aspérimétriques et traitements des données associées.	
III.2.3. Mesure de l'humidité du sol.	
III.2.4. Mesure de la densité apparente du sol.	
III.3. Traitement expérimental.	
III.3.1. Les pluies réalisées.	
III.3.2. Etat initial et dégradation de la surface du sol.	
III.4. Les mesures radar.	
III.4.1. Configuration des mesures.	
III.4.2. Précision et sources d'erreurs des mesures.	

IV. RESULTATS.

44

- IV.1. Evolution de la rugosité de la surface du sol : résultats des relevés aspérimétriques.
 - IV.1.1. Evolution des critères H_{RMS} et écart-type des pentes en fonction de la dégradation structurale.
 - IV.1.2. Evolution de la rugosité de surface du sol en fonction des filtrages réalisés.
 - IV.1.3. Evolution de la rugosité de surface du sol en terme de fréquences.
- IV.2. Résultats des mesures radar.
 - IV.2.1. Influence de l'incidence.
 - IV.2.2. Influence de la fréquence.
 - IV.2.3. Influence de la polarisation.
 - IV.2.4. Discussion.
 - IV.2.5. Conclusion.

CONCLUSION

67

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

69

ANNEXES

71

INTRODUCTION

L'utilisation des hyperfréquences en télédétection est un objet de recherche en plein développement depuis de nombreuses années : la possibilité qu'elles offrent de s'affranchir de la couverture nuageuse en semble la cause la plus importante. En effet, une surveillance continue de vastes portions de territoire peut être alors envisagée.

A ce sujet, de par les propriétés des micro-ondes, les applications à l'agriculture paraissent potentiellement importantes. Une d'entre elles, à partir de laquelle a été envisagé ce travail, est le suivi d'état de surface de sol nu : l'intérêt est évident pour des applications concernant les phénomènes de battance, d'érosion hydrique des sols. En effet, les conséquences agronomiques et économiques associées à ces phénomènes en font un problème important pour l'agriculture mais aussi l'environnement :

- risques de mauvaises germinations et levée des plantes, donc risques de resemis.
- action favorable vis-à-vis du ruissellement, voire de l'érosion hydrique des sols.

Ainsi, à l'aide du radar, le suivi, donc la prévision de tels phénomènes pourrait être envisagé sur une vaste échelle : par exemple, suivi de bassins versants, etc...

Notre travail se situe donc dans ce cadre général. Il s'appuie à la fois sur :

- la connaissance et la description des différentes étapes marquant le phénomène de dégradation structurale par la pluie. L'instrument de base en est le modèle récemment proposé par J. BOIFFIN dans sa thèse.
- des travaux expérimentaux réalisés précédemment par certains auteurs sur les relations mesures radar-configurations géométriques de la surface du sol. Ces dernières concernent généralement des surfaces dont le degré de rugosité a été créé à partir de passage(s) d'engins agricoles.

Ces études sont peu nombreuses par rapport aux publications concernant les interactions teneur en eau du sol-ondes radar, et leurs applications pratiques sont réduites : discrimination de surfaces agricoles travaillées par des outils différents, dont la rugosité est caractérisée sur le terrain par un critère simple.

Nous mettrons donc parallèlement en oeuvre des techniques de description de la dégradation morphologique de surface, différentes voies d'approche de la rugosité de surface et des mesures radar proprement dites ; l'objectif étant l'étude de la sensibilité du radar à une variation de rugosité provoquée par la battance.

Figure I.1 : Exemples de critères pris en compte pour caractériser la dégradation du caractère fragmentaire initial. (BOIFFIN , 1984)

- critère de suivi global :

* Ntf

état de désagrégation de la terre fine totale (Tfi + Tfg). est une notation qualitative ordonnée basée sur la disparition progressive de l'aspect fragmentaire et son accompagnement par des signes de séparation des constituants.

ASPECT	Tous fragments parfaitement distincts	Fragments soudés mais contours encore reconnaissables		Fragments soudés, contours disparus, pas de signes de dispersion		Continuité totale avec signes de "dispersion"	
		Soudure de Tfi	Soudure de Tfi et Tfg	Continuité totale de Tfi	Continuité totale de Tfi et Tfg	Apparition importante de Limons et sables très fins	Croûtes de dépôts étendues et épaisses avec dépôts noirs plus fins
Note	0	1	2	3	4	5	6

- critères de suivi morphologique plus spécifique à F₁ :

* Dmin

calibre des fragments distincts les plus fins (noté en mm). Ce calibre doit être observable au moins en 4 ou 5 points distincts de la placette. La sensibilité de l'observation n'est pas identique sur toute la gamme de variation. Elle est de l'ordre du mm de 0 à 5 mm ; de 2 mm de 5 à 10 mm ; de 5 mm de 10 à 30. La notation est donc discontinue. Au-delà de 25 ou 30 mm, cette notation n'est plus praticable, car cette valeur correspond généralement à un stade d'altération trop poussé.

* surface des plaques

- critères de suivi morphologique plus spécifique à F₂ :

* surface des zones de départ

* date d'apparition de dépôts triés

I. RAPPEL SUR LE PHENOMENE DE BATTANCE.

Nous nous bornerons à rappeler dans ce chapitre les grands traits du phénomène de dégradation structurale par la pluie, ceci dans une optique d'application pratique vis-à-vis du travail réalisé. Nous nous intéresserons donc davantage à la description du phénomène, à la mise en évidence d'indicateurs pertinents vis-à-vis du stade de dégradation morphologique atteint, qu'aux facteurs agissant sur le déroulement de la Battance. Les principaux résultats exposés ci-après sont issus de la thèse de BOIFFIN (1984).

I.1. Caractérisation morphologique du phénomène.

In situ, la dégradation structurale se manifeste toujours par la succession de deux grands faciès F_1 et F_2 , discontinuité qualitative qui correspond au passage d'une phase Φ_1 de fermeture de la surface à une phase Φ_2 de sédimentation. En effet, à partir d'un état initial F_0 , fragmentaire, hétérogène, on note dans l'ordre :

- un faciès F_1 caractérisé par une altération progressive du caractère fragmentaire initial (voir Figures n° I.1 et I.2), ceci par naissance et extension de plaques ou croûtes structurales. Celles-ci correspondent au colmatage des interstices entre les fragments, sans toutefois qu'il y ait séparation des constituants élémentaires, dans les zones de terre fine. C'est pourquoi l'on parle de phase Φ_1 de fermeture de la surface.
- un faciès F_2 associé à une incorporation complète des fragments dans une croûte où apparaissent néanmoins deux sortes de zones (voir Figure I.1 et pour l'évolution de critères F_2 Figure I.2) :

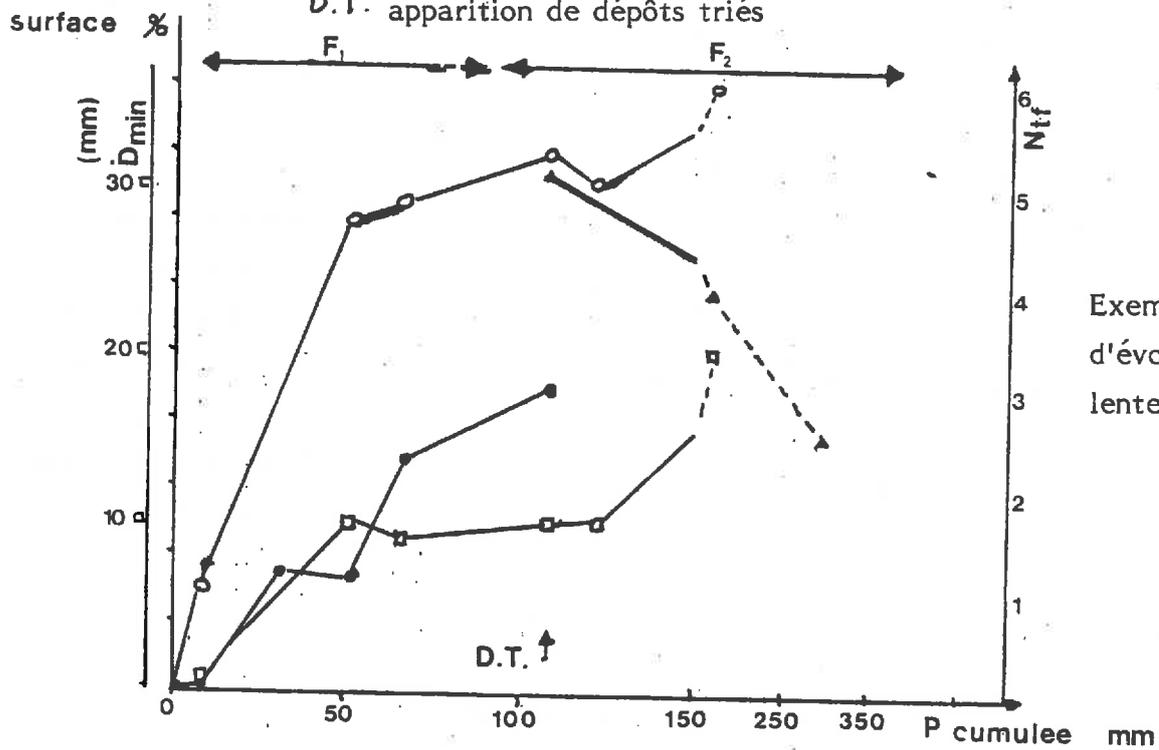
- des zones hautes, pentues, dites zones de départ, sources des transferts de matériaux.
- des zones basses, lisses, dites zones d'arrivée correspondant à des dépôts de particules élémentaires plus ou moins triées, après mise en suspension dans l'eau et transfert. Celles-ci coïncident avec l'emplacement des zones de flacage au moment de la pluie.

I.2. Modalités et processus mis en oeuvre au cours de chaque phase.

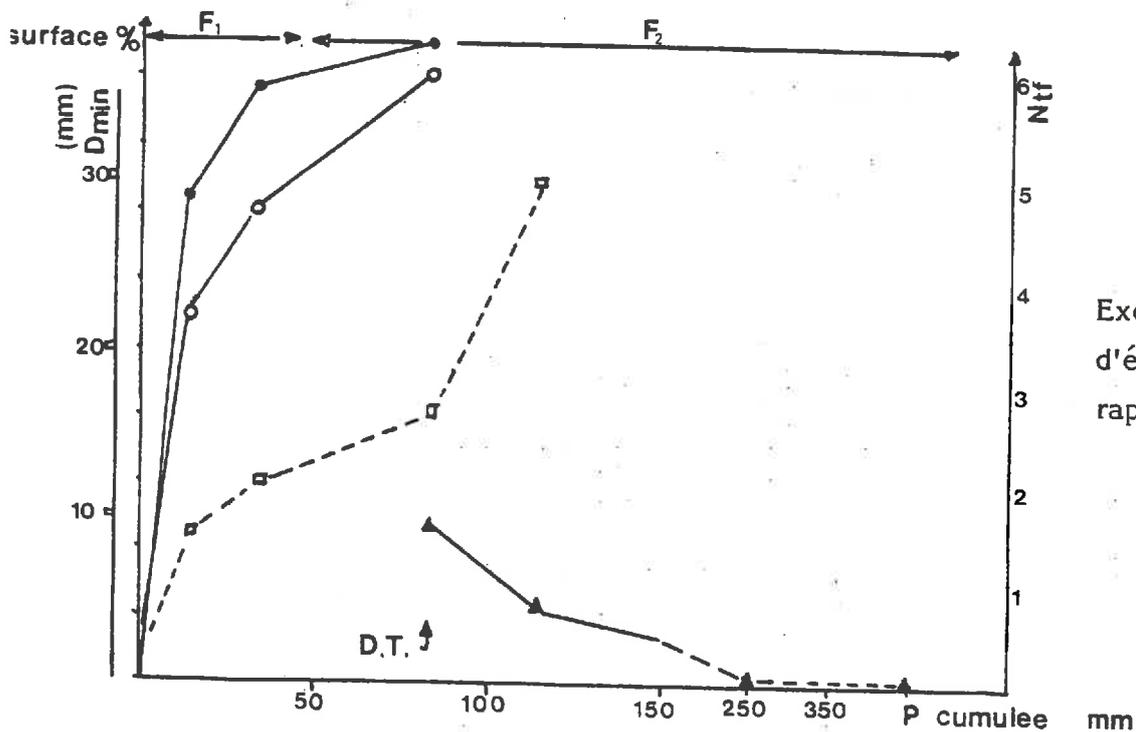
La phase I se caractérise donc principalement par, d'une part une baisse de la rugosité associée à une redistribution spatiale de matériau, très locale, et d'autre part, une baisse de la conductivité hydraulique, celle-ci restant toutefois toujours supérieure à l'intensité des pluies.

Figure I.2 : Exemples d'évolution des critères morphologiques en fonction de la pluie cumulée. (BOIFFIN, 1984)

Légende : ○ Ntf □ Dmin
 ● Surface des plaques
 ▲ Surface des zones de départ
 D.T. apparition de dépôts triés



Exemple d'évolution lente

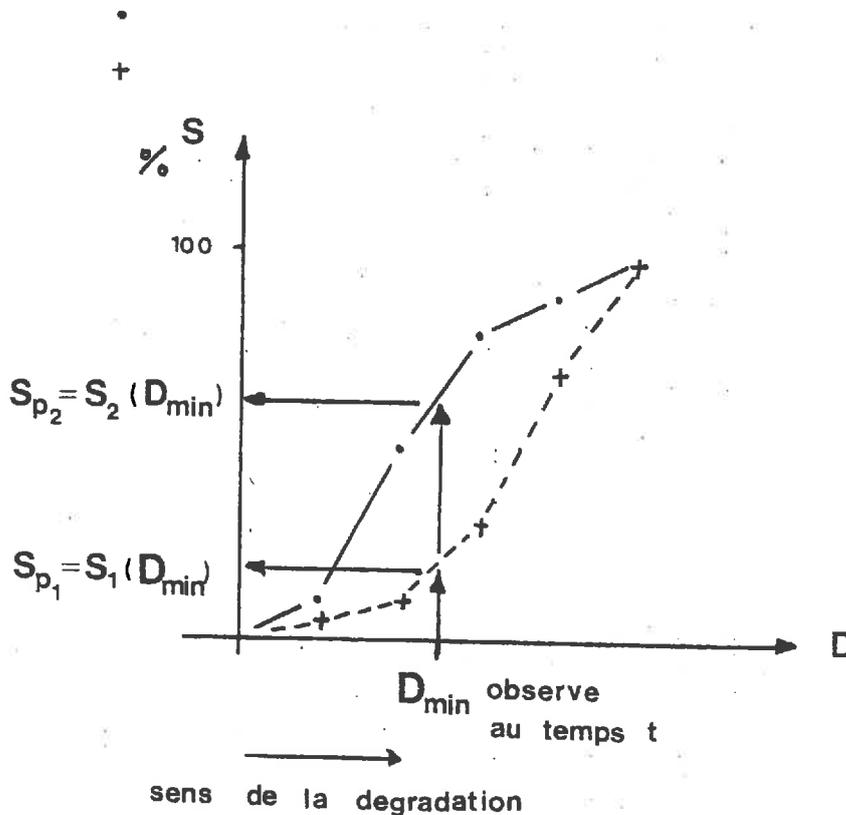


Exemple d'évolution rapide.

Figure I.3 : Corrélation du critère D_{min} avec :

* la surface des croûtes structurales : schéma de prédiction d'incorporation progressive des fragments suivant deux états initiaux différents.

- état initial fin
- état initial grossier



S : surface cumulée occupée par les fragments de taille inférieure ou égale à D (en pourcentage surface totale observée)

D : diamètre des fragments

* l'infiltrabilité I : exemples de relations calculées.

SITE	D_{lim} (cm)
PALAISEAU (20 % Clay)	$I = 10.1 \exp (-1.20 D_{lim})$ $n = 11, r^2 = 0.89$
MONTLUEL (10 % Clay)	$I = 42.0 \exp (-0.64 D_{lim})$ $n = 12, r^2 = 0.90$

Le processus mis en oeuvre est un déplacement de terre sur des distances très faibles, après désagrégation des fragments sous impact des gouttes de pluie.

A ce stade, un indicateur d'évolution morphologique apparaît particulièrement intéressant : il s'agit du critère D_{min} , défini comme étant le diamètre du plus petit fragment non encore incorporé dans les croûtes structurales. Celui-ci est corrélé avec (voir figure n° I.3) :

- la masse de terre subissant la redistribution spatiale, donc l'élément moteur du phénomène,
- la surface des croûtes structurales,
- l'infiltrabilité : l'évolution morphologique qui se manifeste par l'augmentation du diamètre de D_{min} en cours de dégradation rend bien compte de la baisse de celle-ci.

Au cours de la phase 2, l'élément moteur du phénomène est là encore la masse de terre déplacée, mais cette fois en présence d'une lame d'eau superficielle. Quelle que soit la parcelle, la phase 2 se déclenche à la première pluie telle que : son intensité soit supérieure à l'infiltrabilité (voir figure n° I.4), l'excès d'eau ainsi créé sous forme de flaques ait une épaisseur et une vitesse d'écoulement suffisante pour qu'il y ait détachement et déplacement d'une quantité significative de matériau.

I.3. Conclusion.

A ce stade du travail, deux choses sont essentielles à souligner :

- le processus de dégradation structurale que l'on va mettre en oeuvre doit aller au moins jusqu'au déclenchement de la phase 2. C'est elle qui par les changements de propriétés mécaniques, thermiques et de transferts à l'interface sol-atmosphère qu'elle induit, crée des obstacles vis-à-vis de la germination et de la levée des plantes d'une part, et, d'autre part, des conditions favorables vis-à-vis du ruissellement donc de l'érosion. Concrètement, les signes d'apparition de la phase 2, comme le flacage et les signes de dispersion, devront être observés avec précision.
- le déclenchement de la phase 2 dépend avant tout de la durée de la phase 1 (vitesse de fermeture de la surface). Le suivi de celle-ci est donc essentiel et D_{min} constitue dans ce cas un indicateur morphologique particulièrement intéressant.

Figure I.4 : évolution de l'infiltrabilité au cours du temps.

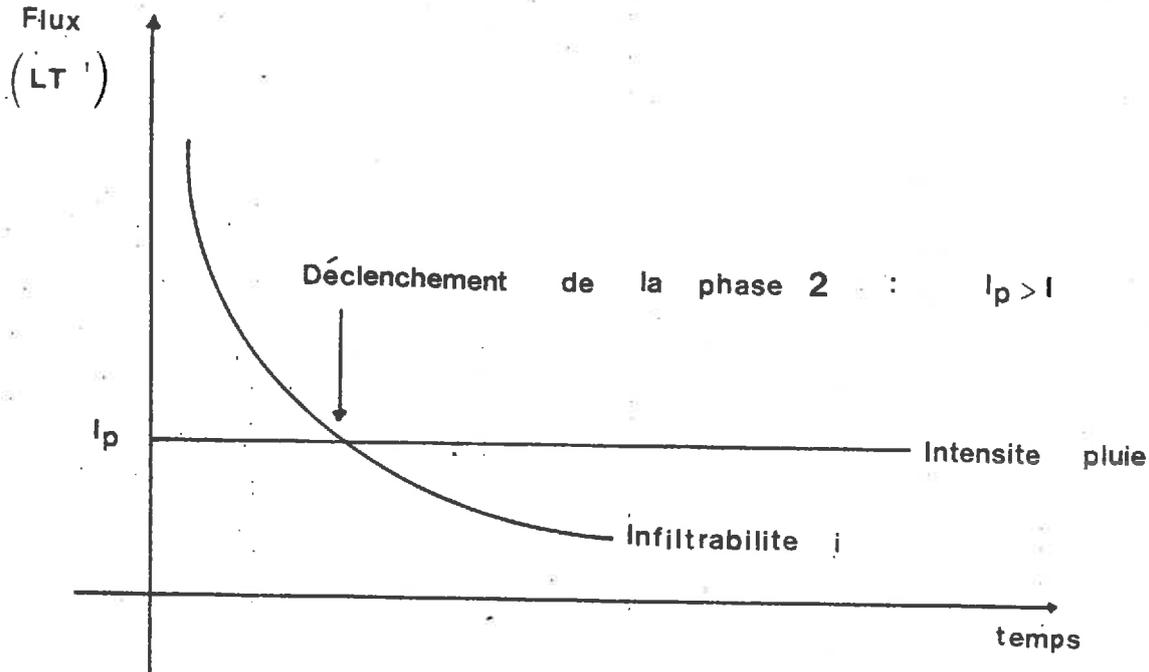
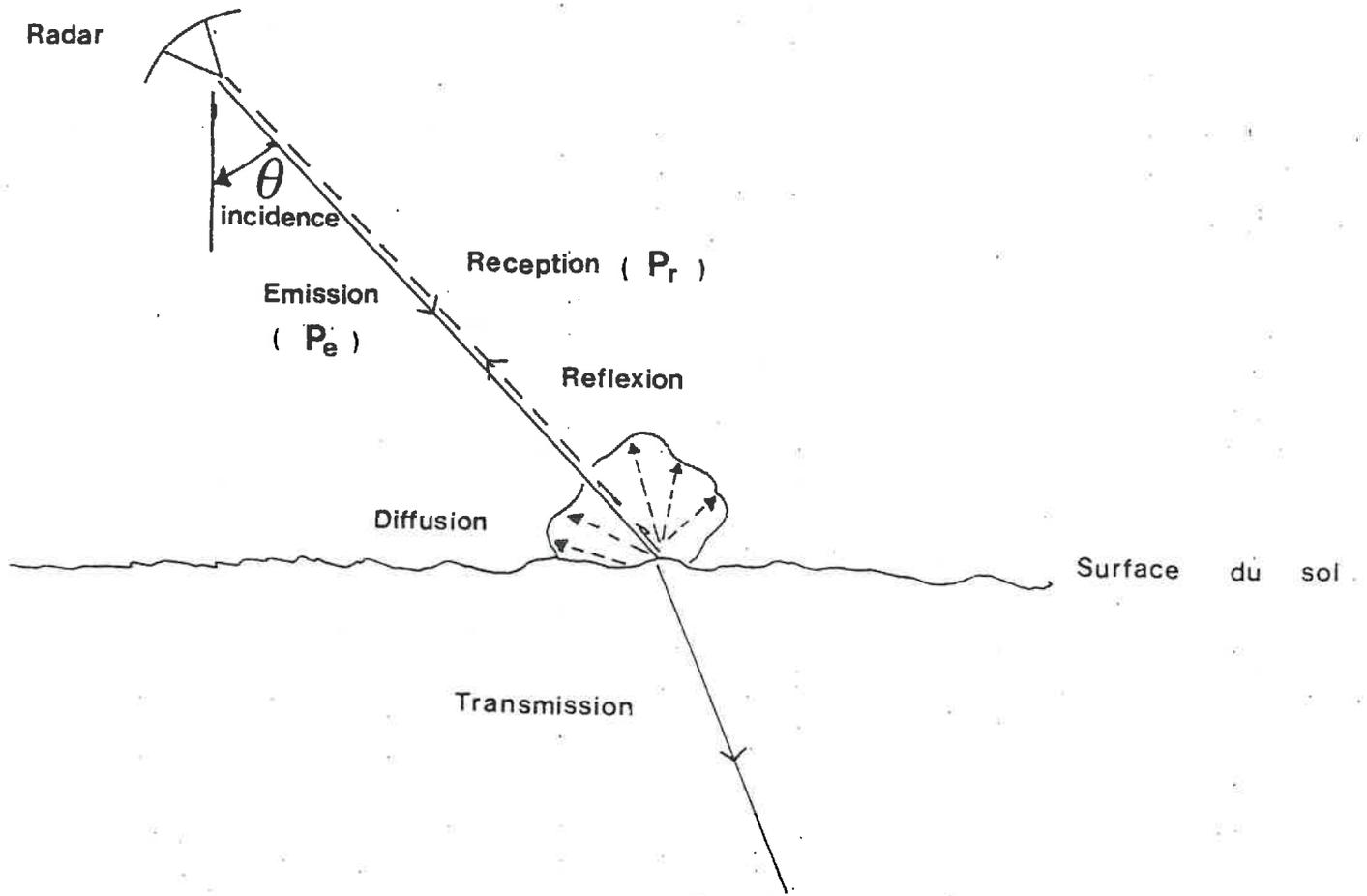


Figure II.1 : Réflexion d'une onde électromagnétique à l'interface sol-atmosphère.



II. LA MESURE RADAR - PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS.

Le radar est un système actif d'émission et de réception d'une onde électromagnétique hyperfréquence ou micro-onde. Pour les observations de la surface terrestre, les longueurs d'onde (λ) des principaux systèmes radar sont comprises entre 1 et $25 \cdot 10^{-2}$ m correspondantes à des fréquences comprises entre 1 et 30 GHz (1 GHz = 10^9 Hz).

L'onde électromagnétique émise par le radar peut être assimilée à une onde plane caractérisée par sa :

- direction de propagation ou incidence (Θ)
- fréquence d'émission (f)
- puissance émise (P_i)
- polarisation.

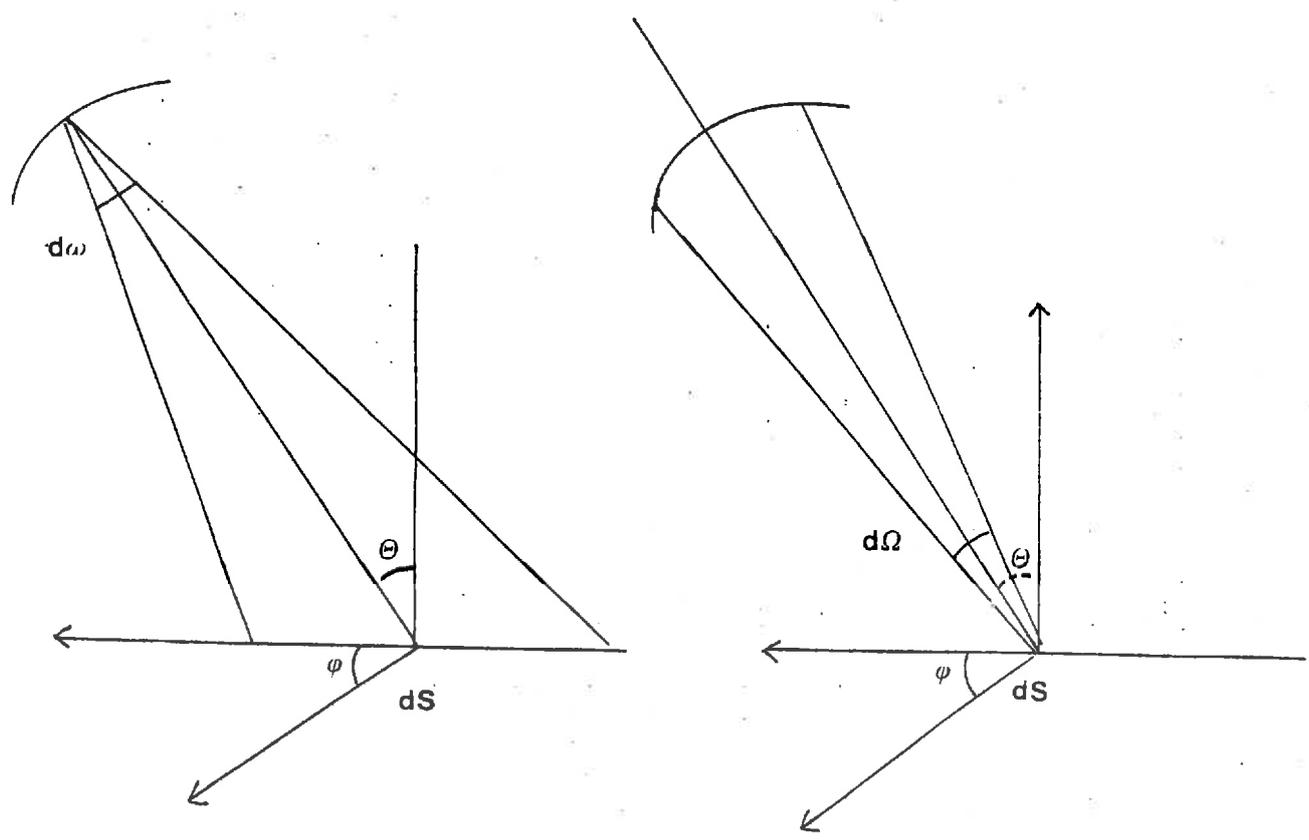
L'onde électromagnétique émise se propage dans l'air sans subir d'atténuation et parvient à l'interface de séparation "air-sol". Une partie de l'onde incidente est transmise dans le sol (milieu absorbant). Une autre partie est réfléchiée ou diffusée à l'interface (Cf. figure II.1).

A l'aide du radar, on mesure le rayonnement électromagnétique réfléchi ou diffusé provenant de cette surface de séparation. Celui-ci, par ses caractéristiques physiques propres (fréquence, polarisation, déphasage, puissance) véhicule des informations acquises au moment de l'interaction de l'onde électromagnétique incidente avec l'interface de séparation. Une étude exhaustive des lois physiques d'interaction nécessiterait un développement long et fastidieux basé sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme. Nous nous bornerons à recenser dans ce chapitre, les caractéristiques physiques du sol qui ont une influence sur les conditions de réflexion et de diffusion de l'onde radar.

Le radar utilisé est un scattéromètre. Par sa configuration géométrique, il mesure la puissance du rayonnement réfléchi dans une direction de propagation privilégiée qui est la direction de l'onde incidente. C'est pourquoi, on parle de la mesure de la puissance réfléchiée ou rétrodiffusée. Il est possible sur les radars utilisés en télé-détection de choisir :

- la fréquence d'émission (f),
- la polarisation de l'onde incidente,
- la polarisation de l'onde réfléchiée,
- l'angle d'incidence (Θ).

Figure II.2 :



(a)

(b)

irradiation d'une
surface dS par une
antenne

vision de l'antenne
par une surface dS

Le choix d'un jeu de ces paramètres constitue une configuration radar, par exemple :

- Fréquence : 4,5 GHz
- Polarisation : HH
- Incidence : 10°

Lorsque nous parlons de la polarisation HH, la première lettre correspond à la polarisation de l'onde émise, la seconde à la polarisation de l'onde reçue. Dans l'exemple choisi, la polarisation est horizontale (H), l'autre possibilité étant verticale (V).

Nous venons de voir que la mesure radar consiste à mesurer la puissance du rayonnement rétrodiffusé. Cette puissance, reçue par le capteur, dépend à la fois :

- des caractéristiques géométriques du radar,
- de la configuration de la mesure,
- du pouvoir de rétrodiffusion de la surface étudiée.

C'est ce dernier facteur qui nous intéresse. Pour pouvoir isoler ce facteur, il faut définir une grandeur physique qui traduit le pouvoir d'une cible à fournir un rayonnement rétrodiffusé, par unité de surface ou section efficace de rétrodiffusion (σ).

II.1. Définition de la section efficace de rétrodiffusion.

Considérons une antenne radar de surface A et luminance L_i^* . Cette antenne irradie une surface élémentaire dS située à une distance R (Cf. figure II.2, a). Soit $d\omega$ l'angle solide sous lequel l'antenne A voit la surface élémentaire dS . L'angle solide $d\omega$ est donné par la relation :

$$d\omega = \frac{\cos \theta}{R^2} dS \quad (1)$$

Soit $d\Omega$ l'angle solide sous lequel la surface élémentaire dS voit l'antenne A (Cf. figure II.2, b)

$$d\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (2)$$

La puissance incidente dP_i reçue par l'élément de surface dS s'écrit :

$$dP_i = L_i A d\omega \quad (3)$$

* Luminance : puissance émise ou réfléchie par unité de surface et d'angle solide.

En combinant (1) + (2) + (3), nous obtenons :

$$dP_i = L_i \cos\Theta \, dS \, d\Omega \quad (4)$$

Le flux de la puissance incidente :

$$d\Phi_i = L_i \, d\Omega \quad (5)$$

En combinant (2) + (5) :

$$d\Phi_i = L_i \frac{A}{R^2} \quad (6)$$

L a puissance mesurée par l'élément de surface dS , dans l'angle solide $d\Omega$, est donnée par :

$$dP_{re} = L_r \, dS \, \cos\Theta \, d\Omega \quad (7)$$

où L_r est la luminance de réflexion de la cible dS .

Par définition, la section efficace différentielle d'une surface dS localisée par ses coordonnées polaires (Θ, Φ) est la puissance réémise par unité d'angle solide et par unité de flux incident :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta, \Phi) = \frac{dP_{re} \cdot dS / d\Omega}{\Phi_i} \quad (8)$$

Par définition, la section efficace radar est :

$$\sigma_r = 4\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Theta, \varphi) \quad (9)$$

Les radaristes introduisent le coefficient de rétrodiffusion ou section efficace de rétrodiffusion σ_o définie par :

$$\sigma_o = \frac{\sigma_r(\Theta, \varphi)}{d\Sigma} \quad (10)$$

où $d\Sigma$ est la surface illuminée.

II.2. Equation radar.

La puissance reçue au niveau de l'antenne provenant d'une surface S correspond à la somme des contributions des surfaces élémentaires dS . Elle est reliée aux caractéristiques du radar et de la cible par l'équation radar :

$$P_{re} = P_i \frac{1}{(4\pi)^3} \lambda^2 \iint_S \frac{G_E(\Theta, \varphi) G_r(\Theta, \varphi)}{D^4} \sigma_o dS \quad (11)$$

P_{re} : puissance reçue

P_i : puissance incidente émise

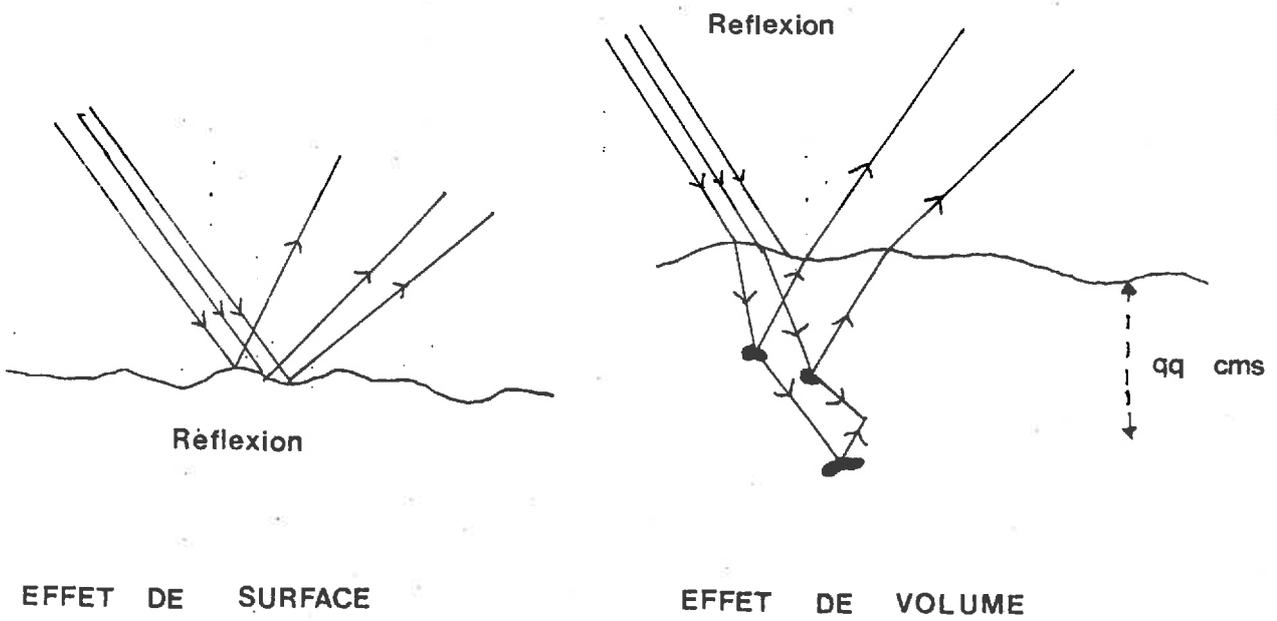
λ : longueur d'onde

$G_E(\Theta, \varphi)$, $G_r(\Theta, \varphi)$, gain de l'antenne (émission et réception)

σ_o : section efficace de rétrodiffusion

D : distance de la cible à l'antenne.

Figure II.3 : Réflexion d'une onde électromagnétique à l'interface air-sol.



L'équation radar est composée de trois termes fonction de :

la contribution de la cible (σ_0)

la contribution du système ($P_i, G_E(\Theta, \Phi), G_r(\Theta, \Phi), \dots$)

la géométrie de la mesure.

Pour une configuration de la mesure, la valeur de σ_0 est obtenue par la résolution de l'équation radar, sous certaines hypothèses. On démontre ainsi que σ_0 est une variable proportionnelle au rapport des puissances émises et reçues.

Enfin, cette grandeur présentant une forte dynamique de variation, est donc exprimée en décibel :

$$\sigma_0(\text{dB}) = 10 \text{ Log } \sigma_0 \quad (12)$$

II.3. Comportement électromagnétique de l'onde au contact du sol.

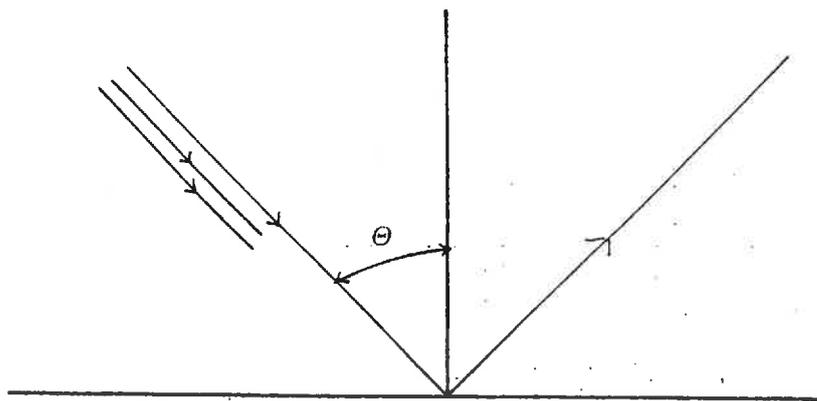
Dans le paragraphe précédent, nous avons montré à l'aide de l'équation radar que la section efficace de rétrodiffusion σ_0 constitue, pour une configuration radar donnée, une grandeur physique synthétique traduisant la contribution de la cible visée à la puissance rétrodiffusée mesurée. La valeur de celle-ci dépendra des caractéristiques géométriques et physiques de la cible. Le problème théorique à résoudre consiste dans un premier temps à étudier le processus de réflexion d'un rayonnement micro-onde à l'interface air-sol.

En considérant un rayonnement qui se propage dans l'air vers le sol, le mode de réflexion présente deux aspects (voir figure n°II.3) :

- une réflexion ou diffusion de volume,
- une réflexion de surface.

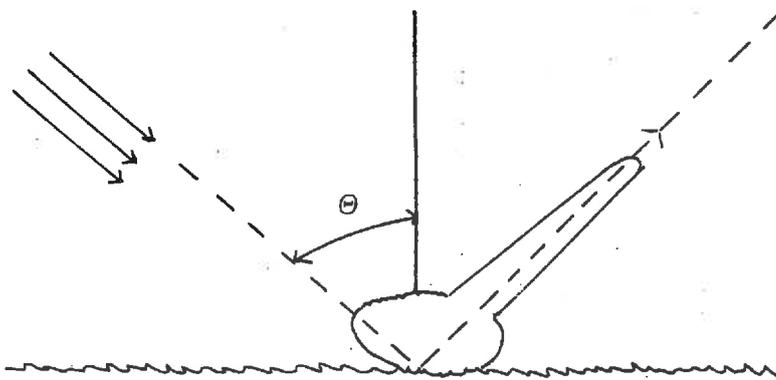
que nous allons voir plus en détails séparément, tout en insistant sur le fait que ces deux phénomènes sont toujours committents.

Figure II.4 :



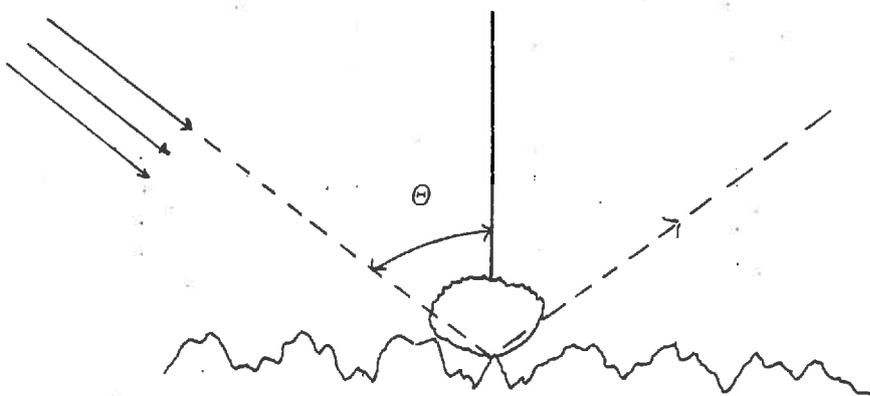
Surface lisse infinie

(a)
Rétrodiffusion :
uniquement une
composante cohérente



Surface peu rugueuse

(b)
Rétrodiffusion :
2 composantes
- 1 cohérente importante
- 1 incohérente ou
diffuse peu importante



Surface très rugueuse

(c)
Rétrodiffusion :
uniquement composante
diffuse

(D'après ULABY, MOORE,
FUNG, 1982)

II.3.1. La réflexion de volume.

Celle-ci fait intervenir les propriétés internes du profil, en particulier et surtout l'humidité du sol. En effet, l'état hydrique du sol gouverne les propriétés diélectriques de celui-ci. Ces dernières vont conditionner l'aptitude du sol à la réflexion de l'onde incidente en profondeur, ainsi que la profondeur de pénétration de l'onde.

Ainsi, plus un sol sera humide et moins l'onde pénétrera profondément, mais plus la contribution de la diffusion de volume à la valeur de σ_0 sera importante. Au total, la profondeur de pénétration n'excède pas quelques centimètres (sachant que la longueur d'onde λ intervient également). Ainsi, l'humidité du sol constitue une variable dont il faudra contrôler au maximum l'influence sur la mesure de σ_0 de façon à isoler l'effet de la rugosité du sol.

II.3.2. La réflexion de surface.

Celle-ci fait principalement intervenir les caractéristiques géométriques de la surface du sol que l'on regroupe sous la notion de rugosité. Qualitativement, les relations entre rugosité et réflexion de surface peuvent être illustrés par les schémas de la figure II.4 :

- Pour une surface lisse infinie (a), la rétrodiffusion est de type uniquement spéculaire.
- Pour une surface peu rugueuse aux dimensions finies (b), l'onde rétrodiffusée présente deux composantes : une cohérente élevée, dans la direction de la réflexion, et une incohérente, faible. Si l'angle d'incidence θ est proche de la verticale, la valeur de σ_0 mesurée sera forte : elle correspondra à la valeur de la composante cohérente. Par contre avec augmentation de θ , σ_0 décroîtra puisque l'on mesurera en fait la composante incohérente (cas de la figure (b)).
- Pour une surface très rugueuse, le schéma de rétrodiffusion présente uniquement une composante incohérente. Quel que soit l'angle d'incidence, la valeur de σ_0 mesurée sera faible.

La rugosité de surface gouverne donc la distribution spatiale de l'énergie. Compte tenu des schémas précédents, ce phénomène peut s'appréhender alors simplement à travers les variations de σ_0 en fonction de l'angle d'incidence, pour chacune des surfaces décrites auparavant, comme le montre la figure n° II.5. Deux grands types de comportements sont ainsi mis en évidence :

Figure II.5 : Variation du coefficient de rétrodiffusion σ_0 en fonction de l'angle d'incidence pour différentes surfaces.
(d'après ULABY, FUNG, MOORE, 1982)

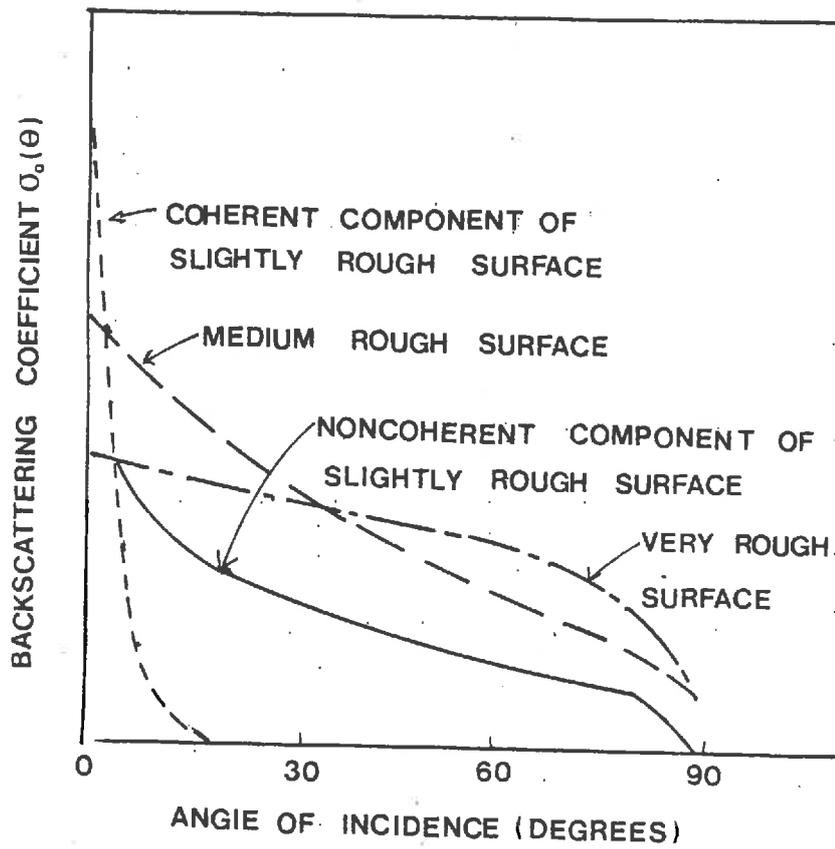
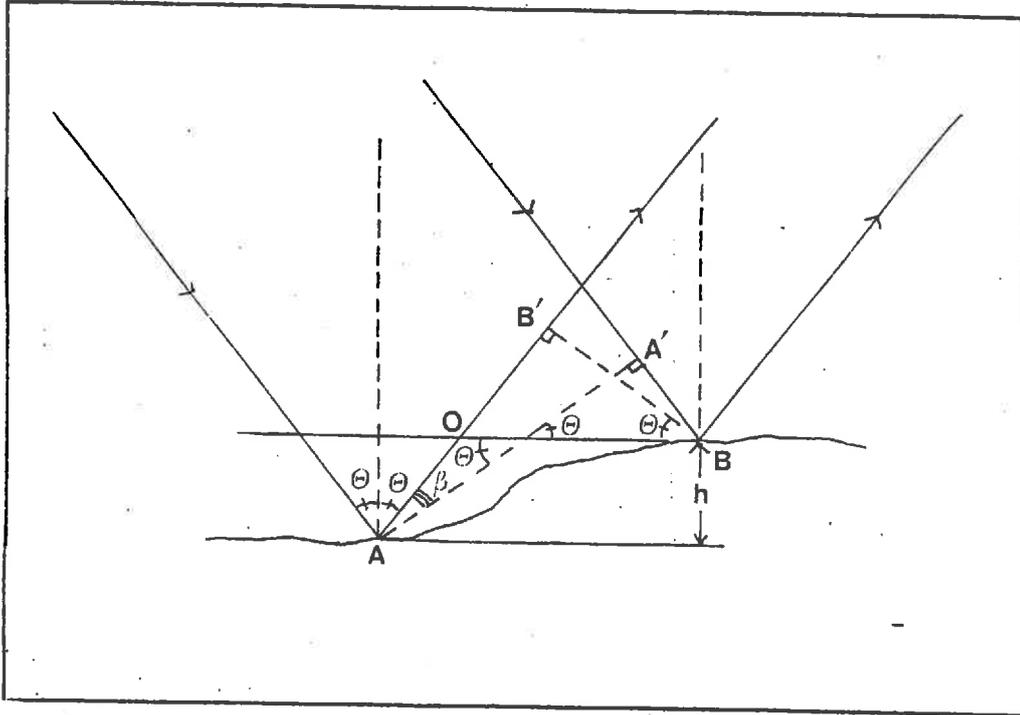


Figure II.6 : Déphasage de deux ondes réfléchies par une aspérité.



(les rayons incidents sont considérés comme parallèles, la source étant située à grande distance).

Dephasage : $\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$ où $\delta = AB' - A'B$

or : $OB' = h \left(\frac{\cos^2\theta - \sin^2\theta}{\cos\theta} \right) + A'B$

et : $AO + OB' = \frac{h}{\cos\theta} + OB'$

d'où : $AB' - A'B = \frac{h}{\cos\theta} (\cos^2\theta - \sin^2\theta + 1) = 2h \cos\theta$

Le critère de RAYLEIGH est :

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta \quad \rightarrow \quad h = \frac{\lambda}{8 \cos\theta}$$

- un comportement dit spéculaire sur les surfaces lisses avec prédominance ou la composante cohérente aux faibles incidences, et de la composante incohérente aux fortes, d'où la forte décroissance de σ_0 lorsque θ augmente.
- un comportement dit diffus où la composante incohérente prédominera quel que soit l'angle incidence.

A partir de là, le problème qui se pose est le passage d'un comportement à l'autre vis-à-vis des ondes électromagnétiques, la rugosité d'une surface est une notion relative : en effet, une surface qui apparaît lisse pour une micro-onde peut être "vue" comme rugueuse par une onde de longueur d'onde plus petite. Ainsi, même s'il est possible de caractériser une rugosité de surface sur le terrain, après traitement statistique, il est nécessaire de relier ces grandeurs calculées aux paramètres radar, en particulier à la longueur d'onde, l'objectif étant de définir des critères de rugosité spécifiques au radar.

Le critère le plus utilisé est celui de RAYLEIGH. Pour le calculer, la rugosité de surface est appréhendée à travers le déphasage de deux ondes réfléchies, introduit par une aspérité (Cf. figure n° II.6). Celui-ci se calcule par l'intermédiaire de la différence de marche δ entre les deux ondes (voir calculs, figure n° II.6). A partir de là, empiriquement, une surface est déclarée rugueuse si le déphasage entre les ondes réfléchies est supérieur à $\frac{\pi}{2}$. En terme de hauteur d'aspérité, le critère est le suivant :

Si $h \ll \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$, la surface est considérée comme lisse.

Si $h \gg \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$, la surface est considérée comme rugueuse.

Ainsi vis-à-vis d'une appréciation de la rugosité de surface par le radar, le choix de la longueur d'onde donc de la fréquence est fondamentale vis-à-vis des hétérogénéités à détecter. Inversement, celles-ci doivent être caractérisées sur le terrain.

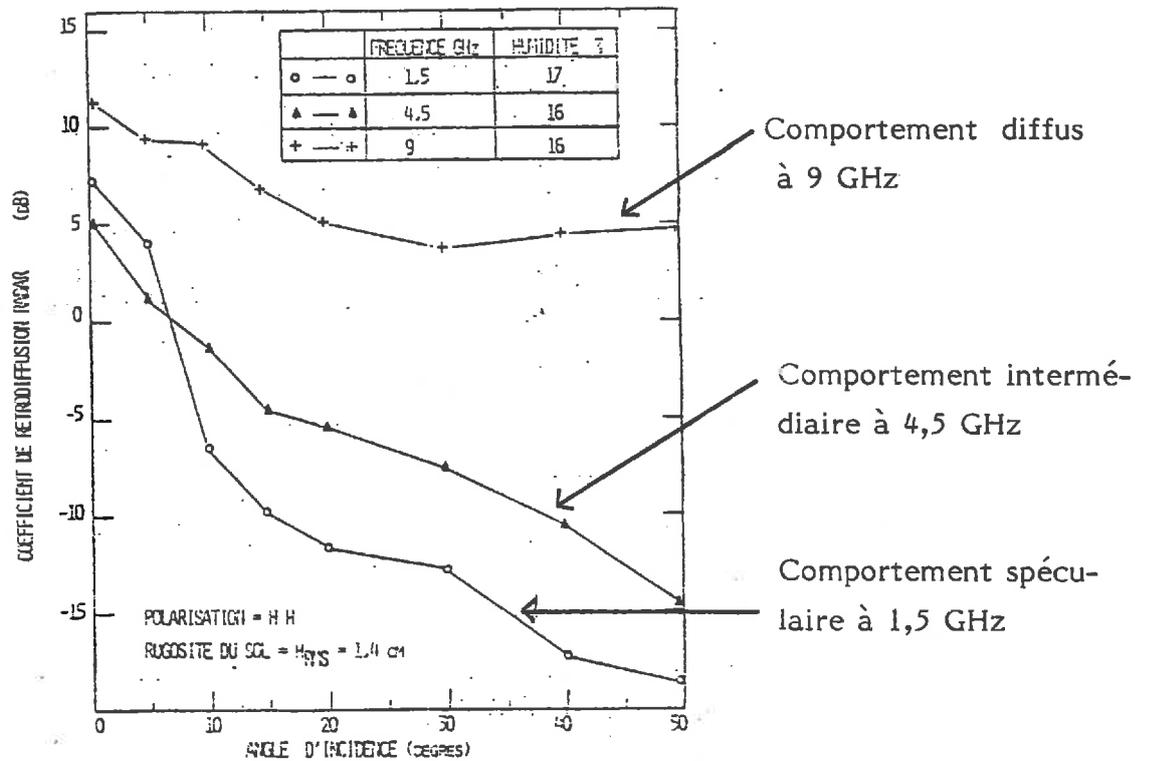
II.4. Principaux critères de rugosité pris en compte en télédétection.

Jusqu'à présent, l'appareil le plus utilisé pour la mesure de la rugosité d'une surface est l'aspérimètre à aiguilles. Nous reviendrons ultérieurement sur l'utilisation de cet appareil dans le chapitre III.

A partir des données de base, en l'occurrence des hauteurs, sont réalisées généralement plusieurs traitements statistiques d'où sont issus des critères de rugosité terrain :

Figure II.7 :

- courbe n° 1 : variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence, à trois fréquences pour une surface de h_{RMS} égale à 1,4 cm, la teneur en eau étant constante (FLUHR, 1981).



- tableau n° 1 : critères de RAYLEIGH (FLUHR, 1981).

F_{GHz}	λ_{cm}	$\lambda / 8 \cos \theta$ (cm)	
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 40^\circ$
1,5	20	2,5	3,3
3	10	1,25	1,6
4,5	6,7	0,8	1
9	3,3	0,4	0,5

> 1,4 cm

≈ 1,4 cm

< 1,4 cm

- le plus utilisé est la hauteur R.M.S. (rough medium surface) qui est l'écart-type des hauteurs calées par rapport à la moyenne de celles-ci (Ulaby [1978-1982], Fluhr [1981]). Il rend compte uniquement de la dispersion des hauteurs de rugosité. L'écart-type des pentes, calculées à partir de la différence de hauteurs entre deux points voisins, est quelquefois aussi cité (KING [1979]).

- Dans les modèles théoriques de comportement de σ en fonction de la rugosité, il est tenu compte de la longueur l de corrélation. Celle-ci est un moyen de définir un critère de dépendance spatiale des hauteurs de rugosité le long du profil. Le critère de définition de la longueur de corrélation suppose que la distribution des hauteurs de rugosité est aléatoire, et repose sur le calcul de la fonction d'autocorrélation expérimentale des hauteurs de rugosité. Ce critère est utilisé dans la modélisation du calcul de la composante incohérente du coefficient de rétrodiffusion radar σ_0 . Pratiquement, le critère synthétique le plus utilisé reste la hauteur R.M.S., les auteurs privilégiant systématiquement cette approche de la rugosité d'un sol.

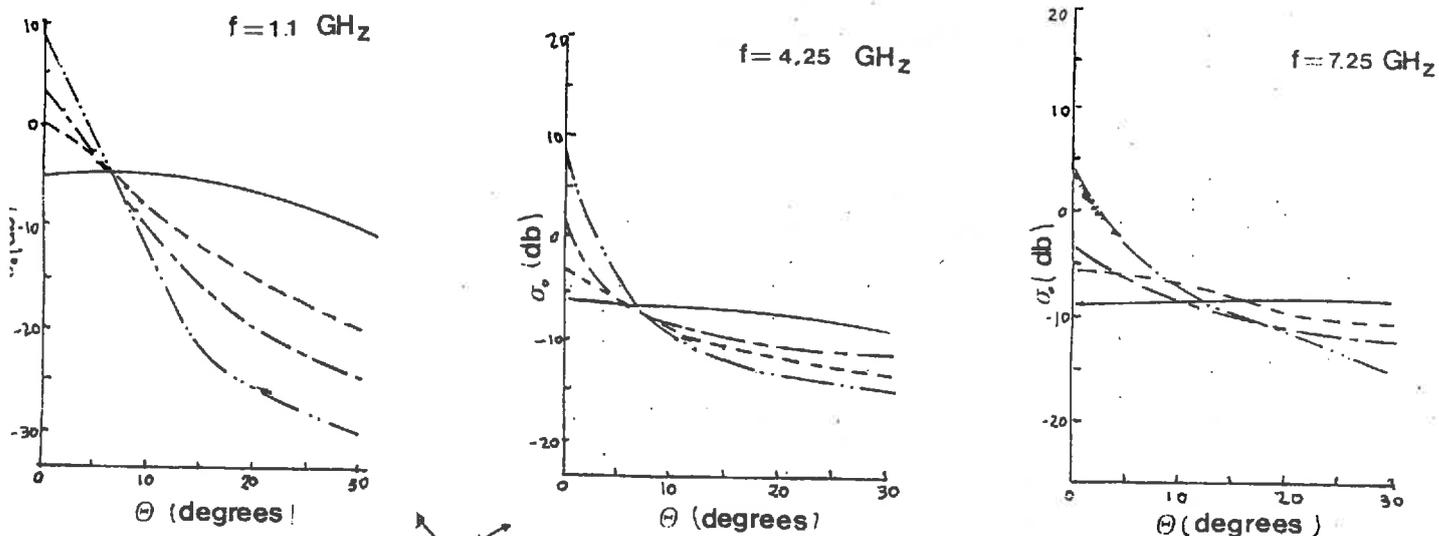
II.5. Résultats expérimentaux acquis.

II.5.1. Effet de la rugosité de surface sur la réponse radar.

FLUHR [1981] et ULABY [1978] ont travaillé sur différentes surfaces de sol nu caractérisées par leur hauteur R.M.S. associée à un mode de travail du sol, ceci à différentes fréquences et en polarisation HH. L'influence de la rugosité est appréhendée à travers les variations du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement émis (voir figure n° II.8). Les deux grands types de comportements définis précédemment, spéculaires pour les surfaces aux plus faibles hauteurs R.M.S., diffus pour celles aux fortes hauteurs R.M.S., apparaissent clairement.

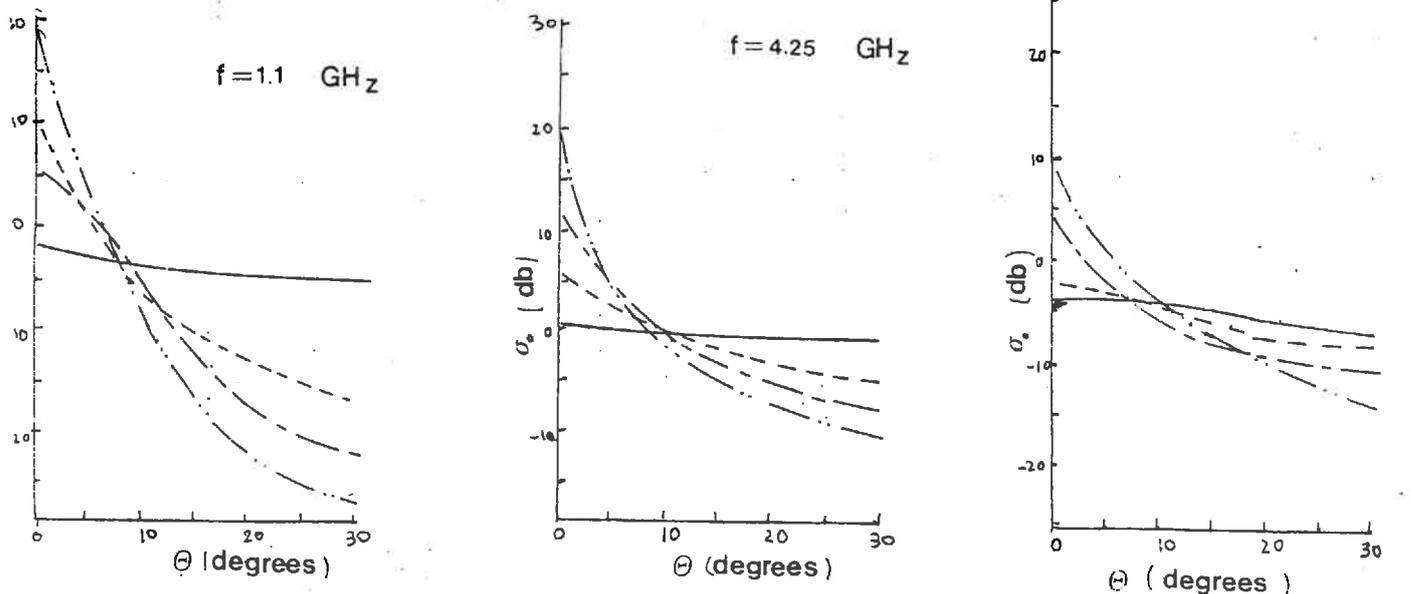
De même, l'influence du "rapport" longueur d'onde (donc fréquence utilisée) - taille des aspérités de la surface observée, est bien mis en évidence (Cf. figure n° II.8, et figure n° II.7, courbe n° 1) : une surface de hauteur R.M.S. égale à 1,4 cm a un comportement spéculaire à 1,5 GHz et diffus à 9 GHz. FLUHR, en calculant le critère de RAYLEIGH pour chaque surface étudiée, chaque longueur d'onde et angle d'incidence utilisés, montre le bon accord entre comportement observé à l'expérimentation et prédiction de celui-ci par le critère de RAYLEIGH (voir figure n° II.7, tableau n°1) :

Figure II.8 : Variations du coefficient de rétrodiffusion σ_0 en fonction de l'angle d'incidence θ sur cinq surfaces, à 2 niveaux d'humidité et à 3 fréquences f (ULLABY, 1978).



	Hrms (cm)	Humidite horizon 0-1 cm (g/cm ³)	
—	4.1	.09	.40
- - -	2.2	.04	.35
— · —	1.8	.05	.39
- · - · -	1.1	.03	.34

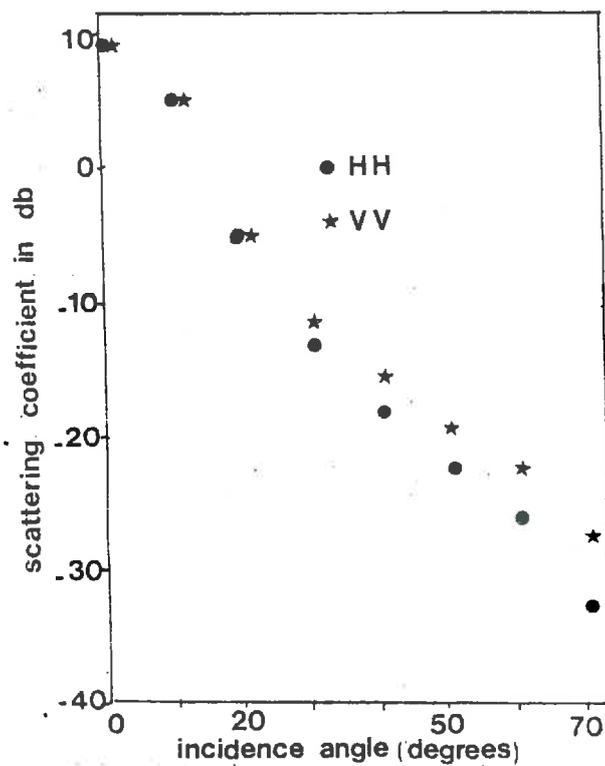
Polarisation: HH



161

Figure II.9 : Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion σ_0 , à deux polarisations HH et VV, ceci pour une surface comportant deux échelles "aléatoires" de rugosité, caractérisée par :

- un écart-type des pentes de 0,123 rd pour la macro-rugosité,
- une hauteur RMS de 0,85 mm et une longueur l de corrélation de 6,2 mm pour la micro-rugosité.



- à 1,5 GHz, $H_{RMS} < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$ le comportement doit être spéculaire.
- à 3 ou 4,5 GHz, H_{RMS} et $\frac{\lambda}{8 \cos \theta}$ sont du même ordre de grandeur. Le comportement doit être intermédiaire.
- à 9 GHz, $h_{RMS} > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$ le comportement doit être diffus.

Tous ces résultats sont obtenus pour des niveaux de teneur en eau du sol donnés. Il convient maintenant de souligner la part d'influence de celle-ci sur les comportements angulaires du coefficient de rétrodiffusion, compte tenu de notre volonté de privilégier l'étude de la rugosité de surface d'un sol.

II.5.2. Effet de la teneur en eau du sol sur la réponse radar.

L'influence d'une variation de la teneur en eau du sol sur le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion peut être cernée à travers les deux séries de courbes de la figure n° II.8. Il est intéressant de remarquer que la forme des courbes σ_0 fonction de l'angle d'incidence se conserve lorsque l'humidité du sol varie, ceci à toutes les fréquences. Toutefois, les courbes se trouvent décalées vers le haut lorsque la teneur en eau du sol augmente (celle-ci concerne celle de l'horizon superficiel travaillé). Inversement, notons qu'il est possible de mettre en évidence des couples de fréquence-angle d'incidence pour lesquels la réponse du signal radar est indépendante de la rugosité : ils correspondent aux points d'intersections des courbes $\sigma_0 = f(\theta)$ pour les différentes hauteurs R.M.S.

II.5.3. Polarisation et signal radar.

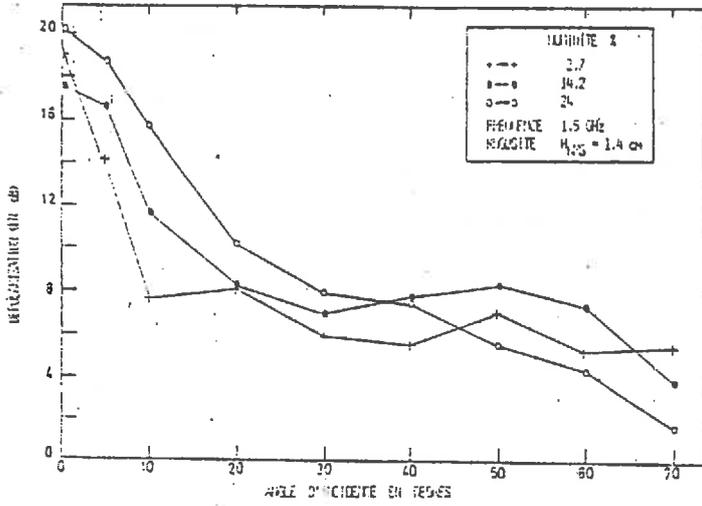
Les études de variation du coefficient de rétrodiffusion σ_0 en fonction de l'angle d'incidence sur diverses surfaces ont toutes été réalisées en polarisation HH.

Le comportement angulaire de VV est similaire. Toutefois, certains auteurs (FUNG [1985]) mettent en évidence la présence d'une double échelle de rugosité, ce qui est le cas de la majeure partie des terres agricoles, par le décalage existant entre les courbes $\sigma_0 = f(\theta)$ associées aux polarisations, ceci aux fortes incidences. (Cf. figure n°II.9).

Toutefois, ce type de résultat est à considérer avec précaution :

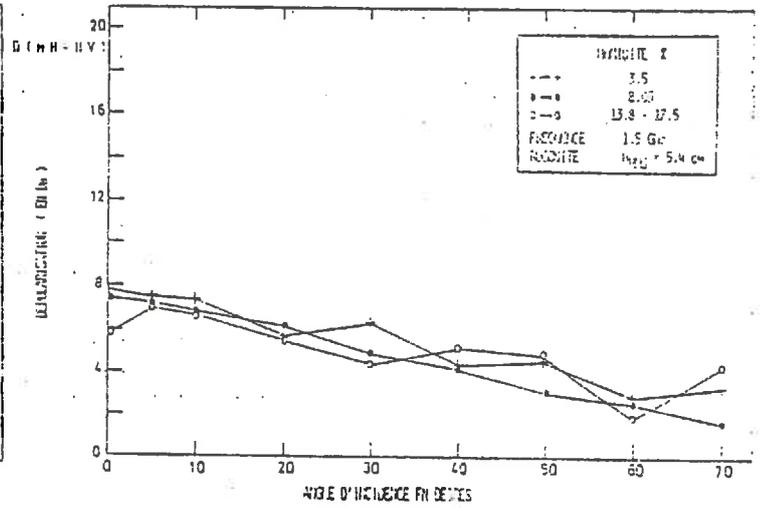
- il s'agit là de résultats issus à partir de simulations de rugosité.
- la fréquence utilisée est très grande et rien n'est dit sur l'effet d'une variation de celle-ci.

Figure II.10 : Dépolarisation évaluée par le rapport $\frac{\sigma_{\theta,HH}}{\sigma_{\theta,HV}}$ en fonction de l'angle d'incidence.



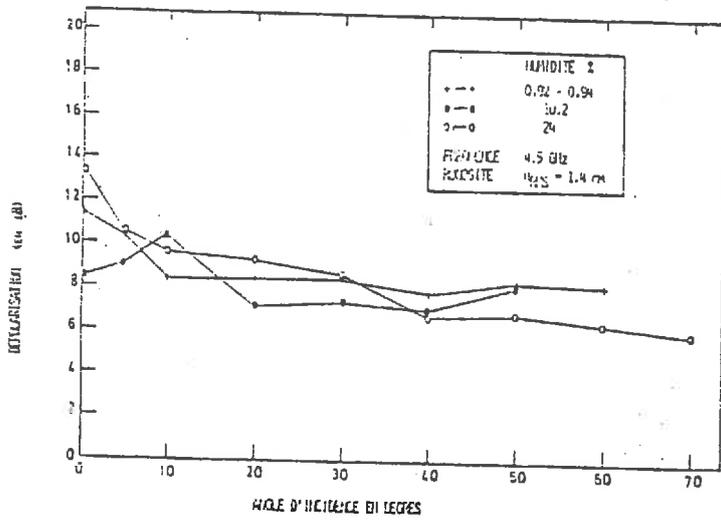
Surface S_1 (HRMS = 1,4 cm)

f = 1,5 GHz

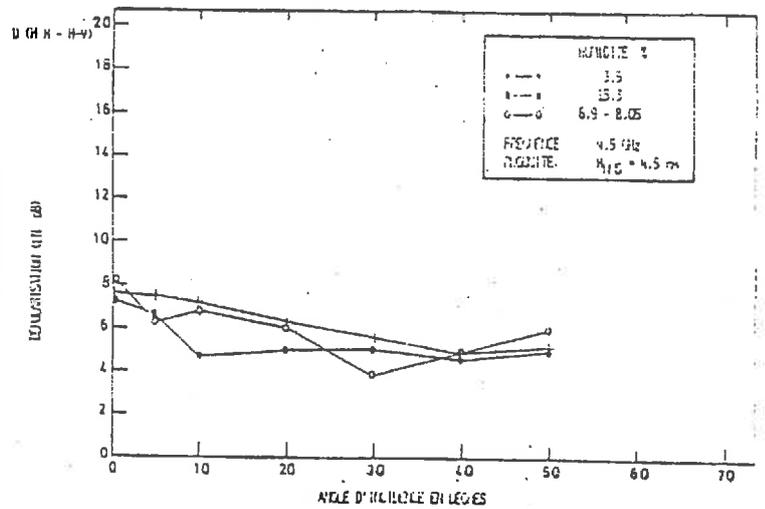


Surface S_2 (HRMS = 4,5 cm)

f = 4,5 GHz



Surface S_1 (HRMS = 1,4 cm)



Surface S_2 (HRMS = 4,5 cm)

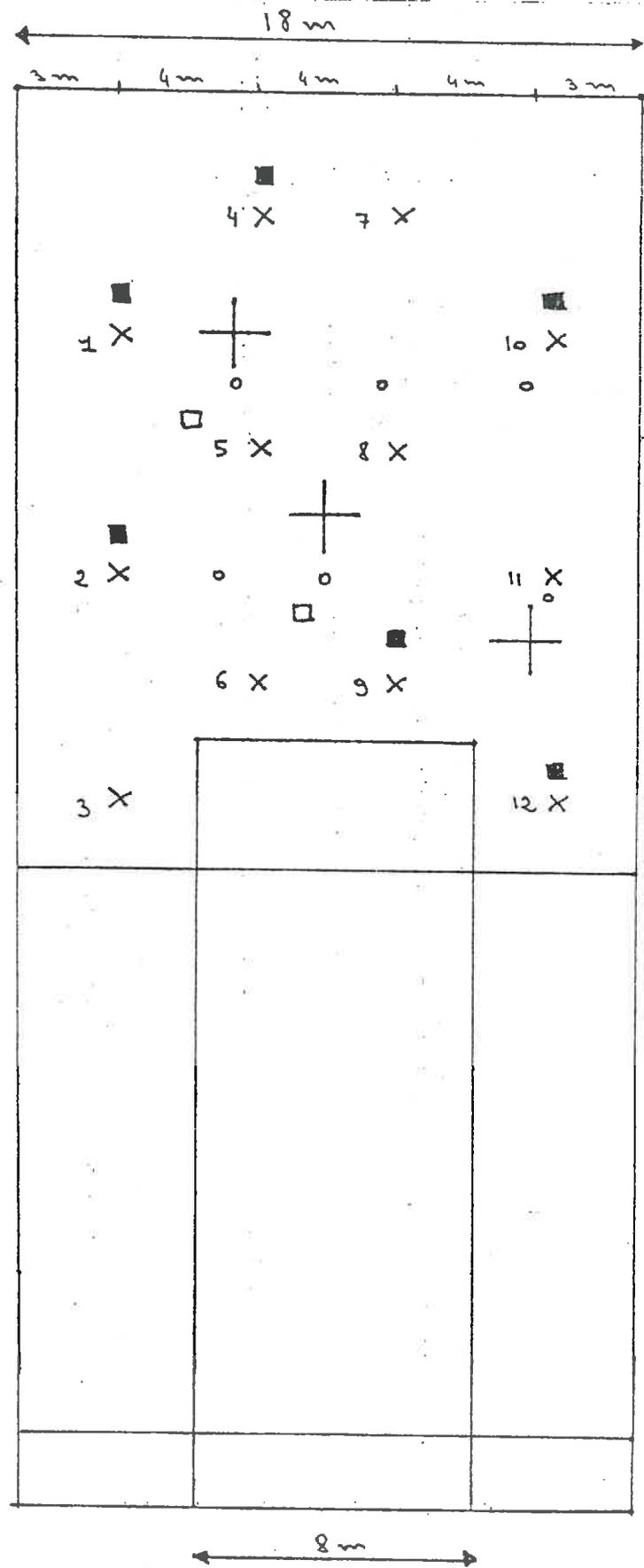
Enfin, d'autres auteurs comme ULABY [1979] et FLUHR [1981], travaillent sur le taux de dépolarisation $\frac{\sigma_{oHH}}{\sigma_{oHV}}$, l'intérêt majeur étant de s'affranchir de l'effet diffusion de volume (la dépolarisation ne dépend en effet que de celle-ci) (voir figure n° II.10°.

- les courbes expérimentales montrent une relative indépendance vis-à-vis de l'humidité avec, chose plus intéressante, aux faibles fréquences (1,5 GHz) une bonne discrimination des surfaces de Hauteur R.M.S. différentes. Mais, à des fréquences moyennes comme 4,5 GHz, la différence s'estompe nettement ce qui constitue pour nous une limite importante vis-à-vis de l'utilisation de cette méthode, sachant que la fréquence minimale disponible sur Ramses est de 3,5 GHz.

Enfin, le point essentiel à retenir est la sensibilité de σ_o à une rugosité de surface. Or, le phénomène de dégradation structurale par les pluies se manifeste en partie par une diminution de celle-ci. Il est donc raisonnable d'envisager le suivi et la caractérisation de cette dégradation en terme de mesures radar, moyennant : d'une part, le choix d'une configuration radar optimale vis-à-vis de l'évolution d'une rugosité de surface, d'autre part, la caractérisation de la dégradation in situ, au fur et à mesure que celle-ci se déroule. Toutefois, la variation de rugosité de hauteur R.M.S. que l'on risque de mettre en évidence lors de l'étude de la battance n'excèdera certainement pas 1 cm, chiffre de loin inférieur à la gamme de rugosité (de 1 à 5 cm) rencontrée dans la littérature. Cette différence d'échelle est donc de nature à apporter des restrictions sur la nature de nos résultats vis-à-vis de ceux présentés précédemment.

Le chapitre suivant est consacré au dispositif et traitements mis en oeuvre pour atteindre l'objectif défini précédemment.

- ◀ Point d'humidité
- Mesure densité
- ⊥ Site aspenimètre
- ≧ Pluviomètre
- Placette d'observation



Rails : Grue + radar

Figure III.1

III. MATERIEL ET METHODES.

Notre problème concerne donc la caractérisation spectrale, in situ, du processus de dégradation par la pluie. Sur un site expérimental donné, il s'agit de mettre en oeuvre :

- des techniques de caractérisation directe du phénomène de battance : observations morphologiques, relevés aspérimétriques et contrôle de la quantité d'eau apportée par irrigation.
- des mesures de paramètres qui nous intéressent, non pas directement vis-à-vis de l'objet d'étude, mais qui ont une influence sur la mesure radar : profil hydrique, densité apparente et rugosité du sol, même si cette dernière nous intéresse aussi par rapport à la première approche.

Toute cette chaîne de caractérisations se répètera à chaque mesure radar, elle-même associée à chaque apport d'eau.

Le traitement expérimental est le processus de dégradation mis en oeuvre qui se caractérise par :

- l'apport d'eau réalisé,
- la dégradation morphologique au sens strict, réalisée à partir d'un état initial donné.

III.1. Le site expérimental.

Il s'agit d'une parcelle de 43 mètres sur 18 mètres, bordée sur sa partie ouest par un dispositif de rails sur béton, sur lesquels circule la grue portant le radar (voir figure n° III.1 et la photographie de la figure III.2, p. 20).

III.1.1. La parcelle expérimentale.

Les caractéristiques granulométriques de la couche de surface (0 - 20 cm) du sol de la parcelle sont indiquées dans le tableau n° III.1, p. 21 . La texture est limono-argileuse, à laquelle correspond, sauf effet organique correcteur, une stabilité qualifiée de "moyennement stable".

Figure III.2 : La grue portant RAMSES
La cabine de commandes
Les rails sur lesquels circule la grue



Tableau III.1 : Tableau analyse granulométrique de la parcelle expérimentale (réalisée à partir de 52 échantillons indépendants).

ARGILE < 2 μm	LIMONS FINS 2 -20 μm	LIMONS GROSSIERS 20-50 μm	SABLES TOTAUX > 50 μm	M. O.
27,0	46,0	16,0	11,0	1,7

$$\text{MO/Arg.} \times 100 = 6,3$$

III.1.2. Problèmes d'échantillonnage liés aux techniques mises en oeuvre et à la mesure radar.

Comme l'indique la figure III.1, toute la partie ouest de la parcelle est vierge de toute mesure au sol : il s'agit de la zone sur laquelle se font les mesures radar. Vis-à-vis d'une étude de rugosité de surface, il est essentiel de la préserver de tout processus destructeur (piétinements...). De plus, l'utilisation de moyens de mesure métalliques (plots de fixation des aspérimètres) nuirait aux mesures radar proprement dites.

III.1.2.1. Echantillonnage et observations morphologiques superficielles (voir figure n° III.1).

Celles-ci ont été réalisées sur deux placettes de dimension 0,5 x 0,5 mètres. Le choix de deux sites a été estimé suffisant vis-à-vis de la variabilité éventuelle de déclenchement de la phase 2. Les positions de chacune des placettes ont été choisies pour rendre compte de différences futures de stade de dégradation liées à :

- une hétérogénéité éventuelle de l'arrosage,
- une variabilité due au travail du sol original. Toutefois, dans ce cas, l'hétérogénéité intra-placette se révèle être plus grande que l'hétérogénéité inter-placette.

III.1.2.2. Echantillonnage et relevés aspérimétriques.

Le nombre des relevés, trois au total, a été limité par la dimension de la zone sur laquelle sont effectuées les mesures terrain ainsi que le nombre de celles-ci. De plus, nous avons dû intégrer le facteur temps de travail dans notre décision... Là encore, les emplacements des sites (voir figure n° III.1 p. 13) ont été choisis de manière à couvrir une éventuelle variabilité créée d'une part par une répartition hétérogène de l'apport d'eau liée au mode d'arrosage (décalage Nord-Sud des aspérimètres) et, d'autre part, par le travail du sol (décalage est-ouest des aspérimètres à relier à une possible variation de vitesse de travail du sol).

III.1.2.3. Echantillonnage des mesures de l'humidité du sol.

Le nombre (12) et la disposition des points de mesure de l'humidité du sol (voir

figure n° III.1, p. 12) ont été décidés en fonction du compromis imposé par :

- la taille de la zone de la parcelle où sont effectuées les mesures et observations,
- les distances minimales d'échantillonnage à choisir entre chaque point. A ce sujet, une étude géostatistique de l'échantillonnage de la mesure d'humidité pondérale a été réalisée préalablement. Celle-ci montre qu'une distance minimale d'échantillonnage de 4 mètres nous garantit l'indépendance statistique entre chaque mesure (WITONO, 1986).

Nous avons finalement retenu le plus grand nombre d'échantillons compatibles avec la surface de mesure, en respectant la distance minimale de 4 mètres, de façon à réduire au maximum la variance d'estimation de la teneur en eau.

III.1.2.4. Echantillonnage des mesures de densité apparente du sol.

Le nombre (6) de sites de mesure a été décidé compte tenu :

- du nombre et de la place occupée par les autres sites,
- du compromis nécessaire entre couverture au maximum de la zone de mesures, et temps de travail.

Leur disposition sur la parcelle (voir figure n° III.1) a été réalisée de façon aléatoire.

III.2. Techniques mises en oeuvre.

III.2.1. Observations morphologiques.

Sur chaque placette ont été réalisées :

- une caractérisation de l'état initial de la surface du sol à l'aide de notations qualitatives (voir fiche de notation, ANNEXE n° 1) et d'une prise de photographie pour juger de la correspondance entre notations et réalité.
- une notation qualitative du stade de dégradation atteint, après chaque pluie, associée à une mesure radar. Trois grands critères ont été choisis (voir fiche de notation, ANNEXE n° 2) :

Figure III.3 : L'aspérimètre à aiguilles utilisé.



Caractéristiques :

- résolution ou écartement entre deux aiguilles : 0,5 cm
- longueur de l'appareil : 1 m
soit 200 points mesurés
- hauteur d'une aiguille : 29,9 cm
- diamètre d'une aiguille : 0,2 cm

- 24
- * le critère Dmin (voir figure n° I.1, p. 1), car il est facile à mesurer in situ. De plus, il constitue un indicateur de dégradation synthétique (voir les corrélations qu'il présente avec différents traits majeurs du phénomène de battance, figure n° I.3, p. 5). Son éventuelle corrélation, au niveau de la parcelle, avec les mesures radar, voire les données statistiques issues des relevés aspérimétriques, apparaît donc intéressante. Toutefois, cette notation devient difficile lorsqu'on approche de la phase 2.
 - * le critère Ntf (voir figure n° I.1, p. 1), permet de noter qualitativement le stade de dégradation, avec une même sensibilité sur l'ensemble du processus, ceci en considérant les zones de terre fine initiale. Toutefois, son utilisation restera essentiellement descriptive du fait de son mode de notation par classe.
 - * Enfin, l'observation d'éventuels signes de dispersion, notamment la mise en évidence des dépôts de sables fins ou limons blancs, associée à une apparition du flacage, est essentielle pour se situer par rapport au déclenchement de la phase 2.

III.2.2. Mesures de la rugosité de surface et traitements des données.

III.2.2.1. L'appareil utilisé et le dispositif de mesure.

Il s'agit d'un aspérimètre à aiguilles (voir figures n° III.3) où celles-ci retracent dans un plan vertical, le profil discrétisé de la surface du sol. Deux caractéristiques de l'appareil sont essentielles :

- sa résolution ou l'écartement entre deux aiguilles (0,5 cm),
- sa longueur d'échantillonnage : 1 mètre soit 200 points pris en compte.

Chaque site est constitué de deux transects perpendiculaires, d'une longueur de deux mètres chacun (deux aspérimètres mis bout à bout, soit 400 relevés de cotes), correspondant aux deux directions du travail du sol effectué ainsi qu'aux deux azimuths de la mesure radar.

III.2.2.2. La mesure.

Celle-ci s'organise de la façon suivante :

21

Tableau III.2 : Traitements des données aspérimétriques et causes d'erreurs.

- Pose des aiguilles sur le terrain :

* biais de 1 mm

- Chaîne de traitements des données :

* tracer des points sur le calque : $\pm 0,25$ mm

* lecture des points sur le papier millimétré : $\pm 0,25$ mm

soit suivant le facteur d'échelle (deux appareils photo ont été utilisés en cours de manipulation) 2,6 ou 2,75, une incertitude de :

$\pm 1,3$ ou $\pm 1,4$ mm

- pose de l'aspérimètre in situ. Celui-ci est fixé sur une barre métallique (voir la photographie de la figure n° III.3, p. 24), reposant elle-même sur deux plots fixes enfoncés dans la terre. Les aiguilles sont mises en contact avec la surface du sol puis bloquées.
- photographie de l'appareil, dans un local, pour conserver toujours les mêmes conditions de prise de vue.
- projection du négatif sur un papier calque et tracé des points correspondants aux hauteurs des aiguilles, ceci par rapport à un plan de référence.
- mesure de la hauteur de chaque aiguille après superposition du calque sur du papier millimétré. Chaque valeur ainsi mesurée est stockée dans un fichier de données, puis corrigée d'un facteur d'agrandissement (rapport entre la longueur réelle des aiguilles de l'aspérimètre et celle de la projection du négatif).

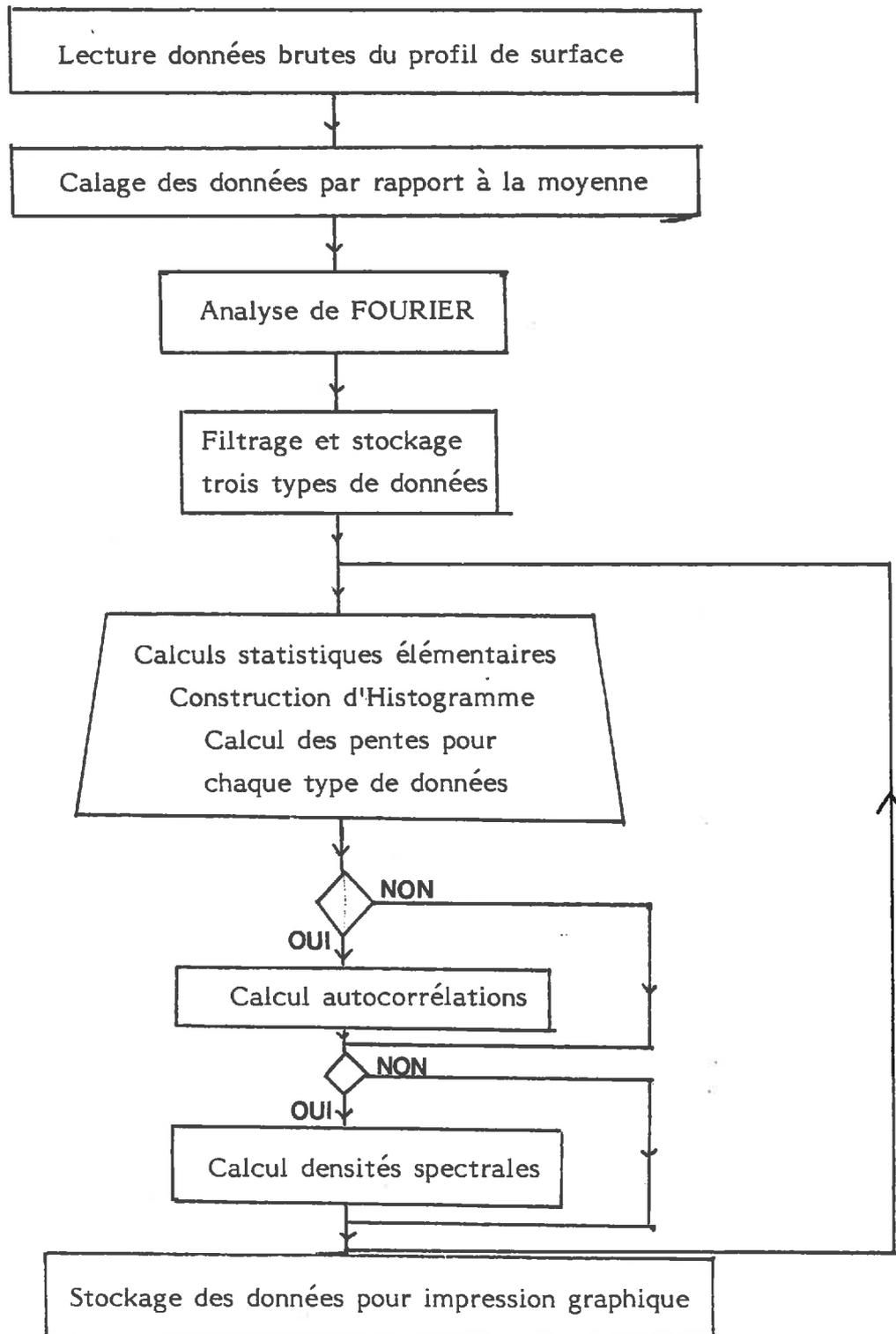
Cette méthode, certes lourde, a été utilisée pour tous les transects de rugosité, faute de pouvoir disposer de moyens plus rapides. De plus, elle présente l'inconvénient de multiplier les risques d'erreurs (voir tableau n° III.2, p. 25).

III.2.2.3. Traitements statistiques réalisés.

La figure n° III.4, p. 26 , retrace l'organigramme du programme de traitement des données aspérimétriques de chaque profil :

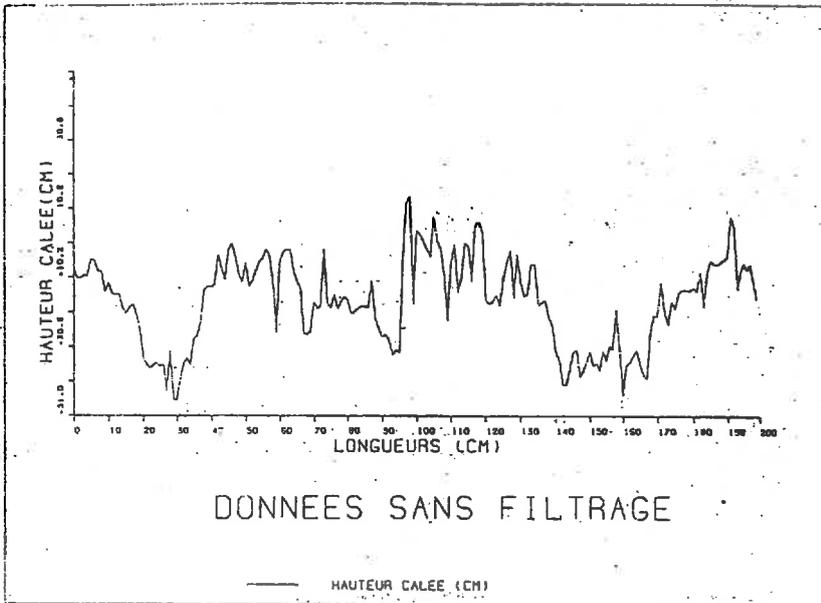
- la première étape est le calage des données par rapport à la moyenne.
- la seconde est la réalisation d'une analyse de FOURIER sur les hauteurs ht calées par rapport à la moyenne. Il s'agit d'effectuer une partition de chaque donnée ht en p composantes sinusoïdales, chaque composante étant caractérisée par ses deux coefficients dits de FOURIER a_p et b_p , et surtout, par sa fréquence f_p ou pulsation w_p ($w_p = 2 \pi f_p$) associée (voir ANNEXE n° 3). L'intérêt de cette méthode est de pouvoir réaliser sur les données ainsi générées un "filtrage" pour obtenir des nouveaux profils que l'on qualifiera de macro-rugosité et micro-rugosité. En effet, la surface du sol présente a priori des rugosités de fréquences différentes (juxtaposition et calibre des mottes, écartement entre les pièces travaillant le sol), qu'il paraît intéressant de séparer. Pour cela, il suffit d'occulter dans chaque terme ht les composantes basses fréquences

Figure III.4 : Organigramme simplifié du programme RUGOS.F de traitement des profils aspérimétriques.

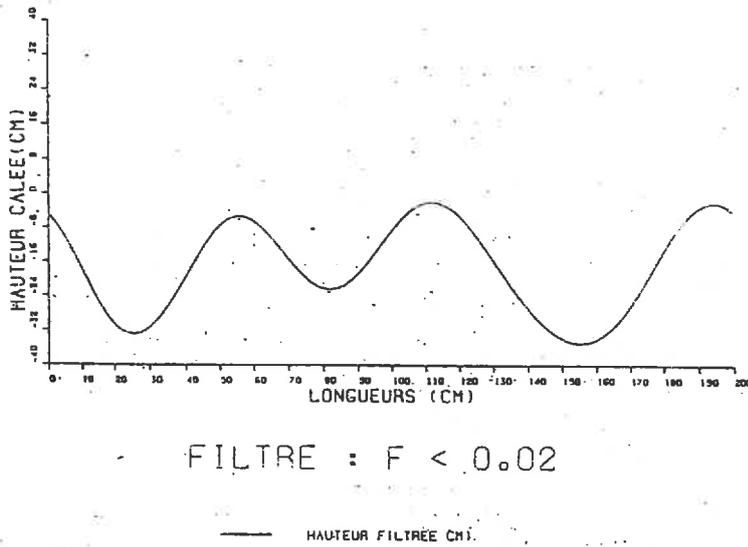


26'

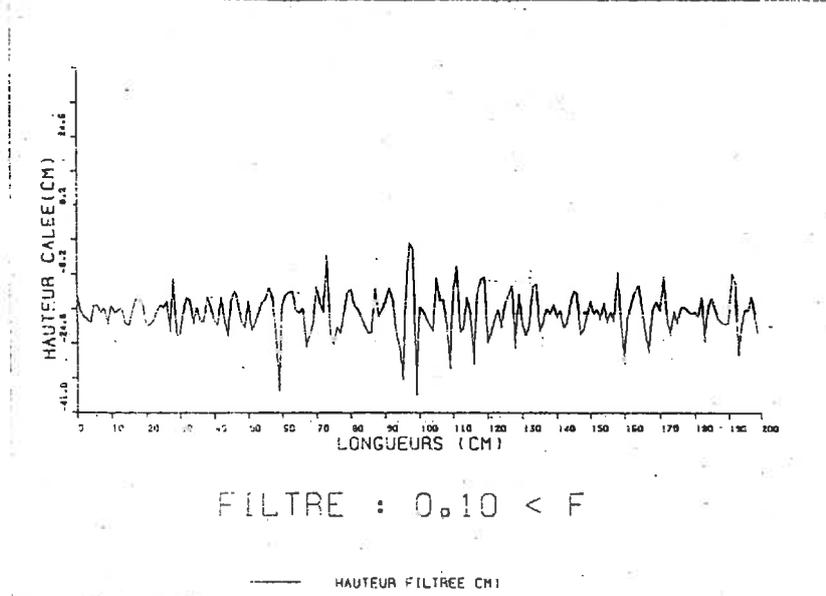
Figure III.5 : Exemple d'analyse de FOURIER.



données brutes
profil initial



données filtrées de leurs compo-
santes hautes fréquences
→ mise en évidence d'une
macro-rugosité



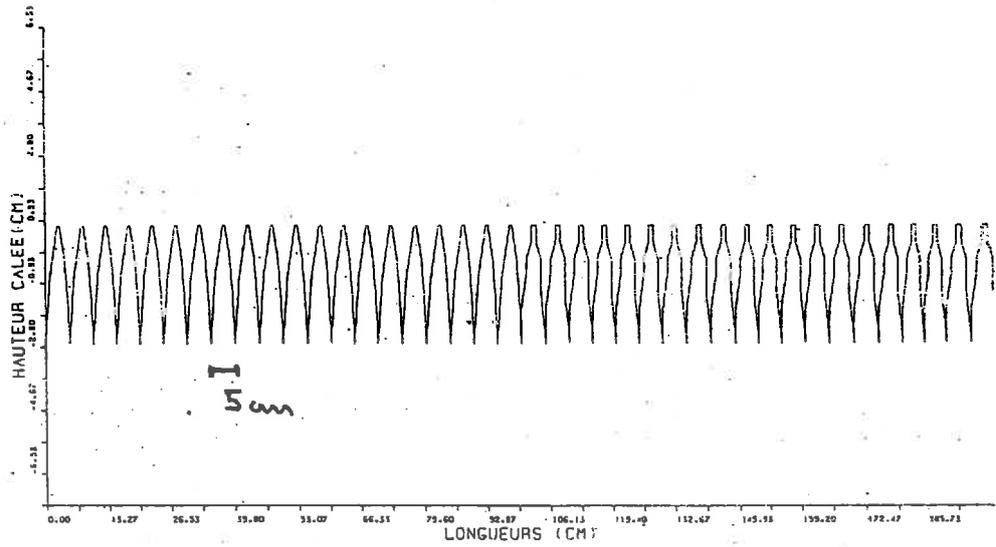
données filtrées de leurs compo-
santes basses fréquences
→ mise en évidence d'une
micro-rugosité

- ou hautes fréquences générant ainsi des profils respectifs micro- ou macro-rugosité. Nous obtenons ainsi, par exemple, les courbes de la figure n° III.5, p. 27 .
- sur chaque type de données brutes, de macro-rugosité et micro-rugosité, sont alors effectués les traitements suivants :
 - * calcul des pentes,
 - * calcul de statistiques élémentaires pour caractériser grossièrement la population de points considérée (ceci à la fois sur les hauteurs et pentes, soit 6 types de données en tout) : la moyenne, la variance, l'écart-type, le maximum et le minimum.
 - * construction d'histogrammes de la distribution de chaque population de points considérée.
 - à partir de là, est mise en oeuvre une technique pour analyser nos données de rugosité en termes de structure : il s'agit de détecter d'éventuelles périodicités "cachées", liées à la répartition et aux calibres des mottes sur le profil ; l'objectif étant le suivi et l'analyse de celles-ci au fur et à mesure de la dégradation structurale. Les variables prises en compte sont les 3 types de hauteurs calées. Les traitements suivants sont effectués :
 - * calcul d'un estimateur de la fonction d'autocorrélation (voir ANNEXE n° 4). Celle-ci constitue un moyen de mettre en évidence des périodes.
 - * analyse spectrale des données. Il s'agit d'une méthode visant à estimer la fonction de densité spectrale $f(\omega_p)$ (voir ANNEXE n° 4). Schématiquement ceci revient à raisonner, non plus en termes de hauteurs calées, mais en termes de fréquence f_p ou pulsation ω_p , la fonction de densité spectrale traduisant alors la proportion de variance totale des données, expliquée par une fréquence ou pulsation donnée. Graphiquement, la mise en évidence de la prédominance d'une période $t = 1/f$ se visualise par un pic.

Pour illustrer cette méthode, nous avons réalisé des simulations de rugosité (courbes n° 1 des figures n° III.6 et n° III.7, p. 28, 29) sur lesquelles ont été effectuées les calculs et sorties graphiques des densités spectrales par la méthode de la fonction d'autocovariance tronquée (voir ANNEXE n° 4). Sur ces types de courbes, les ordonnées sont donc des "variances", la surface limitée par les axes du graphique et la courbe de densité spectrale étant la variance totale du signal. Dans les deux cas, nous observons :

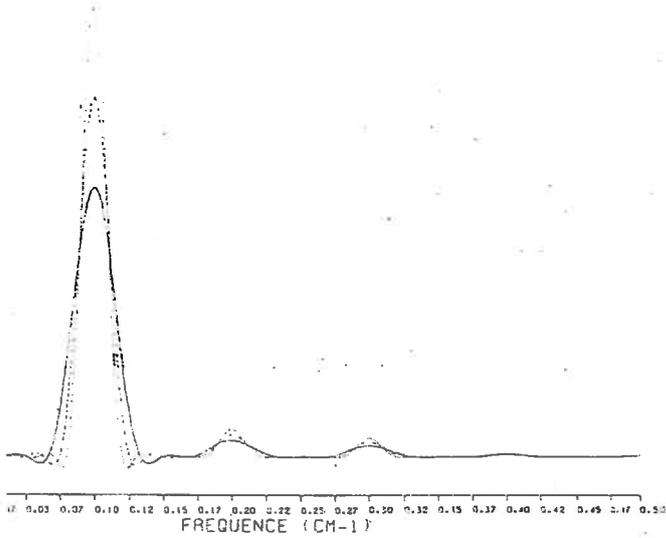
Figure III.6 : Simulation de rugosité et analyse spectrale : exemple 1.

courbe n° 1 :
profil des
données
brutes.



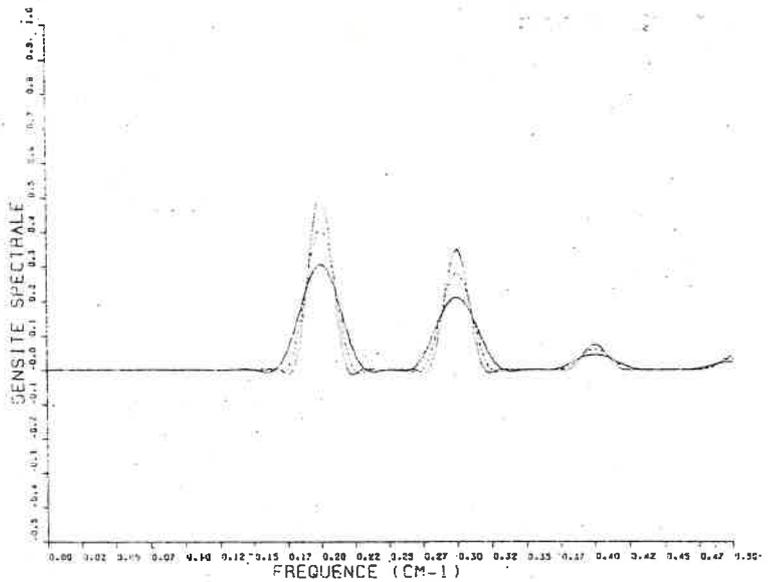
SIMULATION 1

— PROFIL INITIAL



SIMULATION 1

— NTMTRUC=30
- - - NTMTRUC=40
- . - . NTMTRUC=50
(points de
troncature)



SIMULATION 1

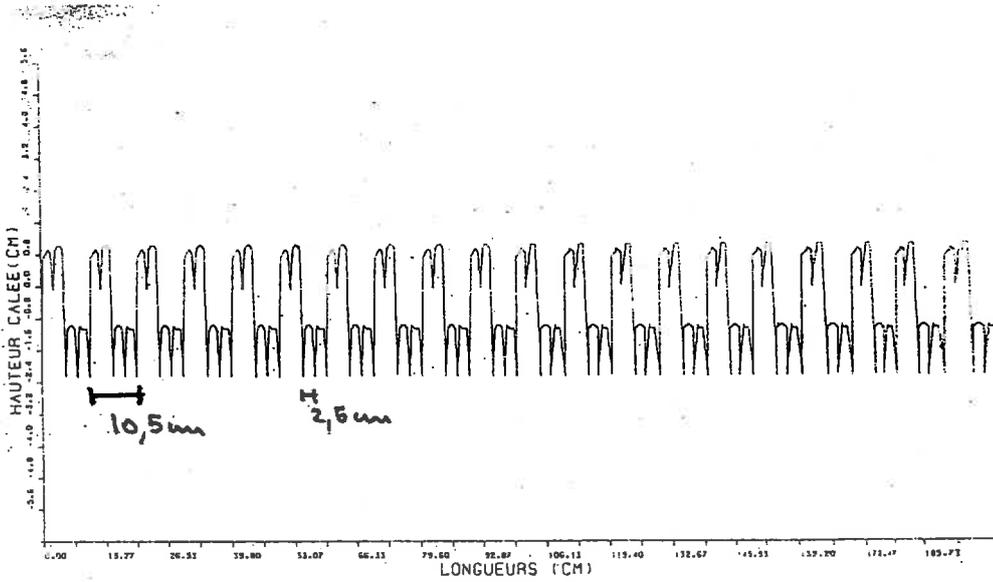
— NTMTRUC=30 (F=0.15)
- - - NTMTRUC=40 (F=0.15)
- . - . NTMTRUC=50 (F=0.15)

courbe n° 2 : densités spectrales
sur données brutes.

courbe n° 3 : densités spectrales
sur données filtrées de leurs
composantes basses fréquences
($F = 0,15 \longleftrightarrow p = 3,3 \text{ cm}$).

31

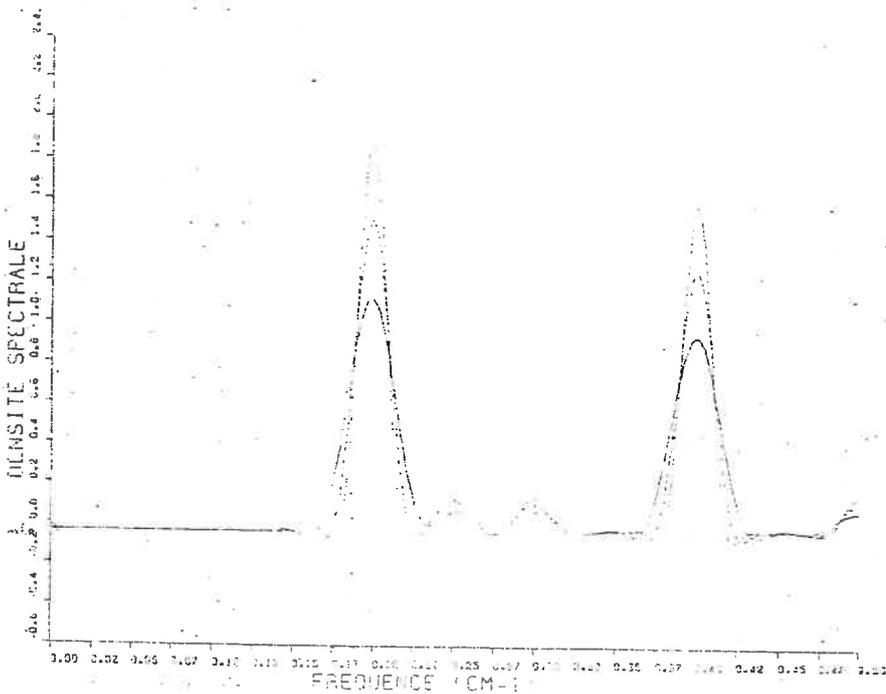
Figure III.7 : Simulation de rugosité et analyse spectrale : exemple 2.



SIMULATION 3

— PROFIL INITIAL

courbe n° 1 :
profil des
données brutes



SIMULATION 3

— NITFRUC=30 (F=0.15)
- - - NITFRUC=40 (F=0.15)
... NITFRUC=50 (F=0.15)

courbe n° 2 : densités
spectrales sur données
brutes

- de forts pics aux fréquences $0,10 \text{ cm}^{-1}$ (exemple 1) et $0,05 \text{ cm}^{-1}$ (exemple 2) qui, compte tenu de la résolution de l'aspérimètre $0,5 \text{ cm}$, correspondent bien à celles observées graphiquement sur les courbes n° 1 des figures n° III.6 et III.7.
- la présence de pics secondaires à des fréquences multiples des précédentes qui peut s'interpréter de la façon suivante : les côtes de points distants d'une fraction de période sont en effet très liées, fait qui se reproduit par définition de façon moins régulière que pour une période. Ainsi, les pics de densités sont moins importants. sur la courbe n° 2 de la figure n° III.7, l'un d'eux se trouve renforcé, ce qui traduit la présence de la deuxième échelle de rugosité.
- après filtrage (courbe n° 3, figure n° III.6), l'allure de la structure des courbes se conserve, mise à part la suppression des pics basses-fréquences. Par contre, les valeurs des densités spectrales sont différentes : il s'agit là, en effet, d'un autre signal, caractérisé entre autres par une autre variance totale des cotes.

Cette méthode visualise qualitativement et de façon satisfaisante la structure spatiale de la rugosité. Sur des simulations simples, certains résultats quantitatifs apparaissent. Mais sur des profils moins réguliers et, vis-à-vis de l'évolution de ceux-ci en cours de dégradation (confrontation de courbes), une éventuelle interprétation quantitative sera beaucoup plus délicate.

III.2.3. Mesure de l'humidité du sol.

Les auteurs ayant étudié les relations profondeurs de pénétration de l'onde et humidité du sol s'accordent pour penser, qu'au-delà de 15 cm , la contribution du sol à la rétrodiffusion radar est négligeable (PAUSADER [1981]).

L'échantillonnage pour la mesure de la teneur en eau a donc été réalisé aux profondeurs inférieures à 15 cm et en séparant les couches suivantes (voir ANNEXE 5) :

- tous les centimètres de 0 à 7 cm .
- de 7 à 10 cm .
- de 10 à 14 cm .

La méthode gravimétrique est utilisée. Elle consiste à peser chaque échantillon prélevé, avant et après passage à l'étude à 105° , pendant 24 heures, la boîte utilisée jouant le rôle de la tare. L'humidité pondérale est alors donnée par la formule :

$$W = \frac{(\text{poids humide} + \text{tare}) - (\text{poids sec} + \text{tare})}{\text{poids sec}}$$

Figure III. 8 : Rampe d'arrosage utilisée pour l'expérimentation.



Asperseurs rotatifs

Asperseurs
paraboliques

roues :
entraînement hydraulique

- longueur : 20 m

- hauteur : 1,60 m

- 4 vitesses d'avancement

Ensuite sont effectués des calculs statistiques à chaque séance de prélèvements, pour obtenir les valeurs moyennes et écart-type associé de chaque horizon.

III.2.4. Mesure de la densité apparente du sol.

Celle-ci a été mesurée à l'aide d'une double sonde gamma LPC-I.N.R.A. (Stengel et al, 1986). Les mesures ont été réalisées à plusieurs profondeurs (voir ANNEXE n° 6), l'intérêt étant :

- le suivi du processus de battance sur un plan structural (augmentation de compacité),
- le contrôle d'un paramètre du milieu, et, plus précisément de l'influence qu'il peut exercer sur les mesures radar, ceci en liaison avec l'humidité du sol. (calcul de l'humidité volumique, par exemple).

III.3. Le traitement expérimental réalisé.

Nous pouvons distinguer :

- les modalités de mise en oeuvre : les apports d'eau réalisés,
- le processus en lui-même : la dégradation structurale réalisée à partir d'un état initial de surface du sol donné.

III.3.1. Les apports d'eau réalisés.

L'appareil utilisé est la rampe d'irrigation présentée figure n° III.8, p. 30 . En moyenne, l'intensité de chaque aspersion a été estimée à 20 mmh⁻¹ (l'estimation a été faite à partir de la quantité d'eau recueillie pendant la durée de passage de la rampe). Celle-ci n'a pas toujours été régulière du fait de la grossièreté de certains réglages (débit de la pompe, vitesse d'avancement de la rampe) et de la présence ou non de vent pendant l'aspersion. La variable que nous avons privilégiée a été la quantité d'eau apportée, ceci pour accélérer le processus de dégradation, compte tenu du temps disponible.

En tout état de cause, cette imprécision sur l'intensité des apports et la mécon-

Tableau III.3 : Les quantités d'eau apportées.

PLUVIOMETRE APPORTS D'EAU (mm)	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	μ	σ	APPORT MOYEN CUMULE
APPORT 1	15	14,5	16,5	15,5	17	16,5	16	1	16
APPORT 2	9	8,5	10,5	9,5	9,5	9	9,5	1	25,5
APPORT 3	21	20,5	20,5	28	19	22,5	22	3	47,5
APPORT 4	33	30	37	36,5	31	32	33	3	80,5
TOTAL	78	73,5	84,5	89,5	76,5	80	80,5	6	

Remarques :

- APPORT 1 : 2 passages consécutifs
- APPORT 2 : 1 passage + Mistral
- APPORT 3 : 1 passage
- APPORT 4 : 2 passages espacés d'une journée

naissance totale de l'énergie cinétique correspondante ne constituent pas une difficulté expérimentale majeure, l'objet de l'étude étant la description de la dégradation de surface et, non pas, ses relations avec les caractéristiques pluviométriques. Les apports d'eau réalisés et leurs caractéristiques sont confinés dans le tableau n° III.3, p. 31. En moyenne, 80 mm d'eau ont été apportés sur la parcelle.

III.3.2. Etat initial et dégradation de la surface du sol.

L'état initial de la surface du sol a été créé par un double passage croisé de cultivateur. Les caractéristiques de ce dernier sont reportées dans le tableau n° III.4, p. 32. Le double passage a été choisi de façon à ne pas privilégier de direction de travail du sol, ceci vis-à-vis des mesures radar.

Le choix de l'outil a été effectué à l'issue d'un essai comparatif de dégradation structurale sur une même parcelle, à partir de trois états initiaux différents créés par le passage :

- d'un rotavator,
- d'une bêche rotative,
- d'un cultivateur.

Ce dernier outil a été retenu à partir de deux considérations :

- l'état initial créé apparaissait plus homogène,
- les premiers dépouillements aspérimétriques analysés en terme de fréquence, apparaissaient plus facilement interprétables.

Les caractéristiques morphologiques de départ sont indiquées dans le tableau n° III.5. Qualitativement, l'état initial ainsi créé apparaît (sur les deux placettes d'observation) :

- relativement grossier. Le calibre modal des mottes est de l'ordre de 1,5-1,7 cm, et le pourcentage de terre fine inférieure à 2 mm tourne autour de 15 %.
- faiblement hétérogène vis-à-vis, d'une part de la distribution des mottes au sein d'une placette et, d'autre part, d'une placette à l'autre pourtant choisie pour rendre compte d'états initiaux différents. La placette A apparaît toutefois avoir un état de surface plus grossier.

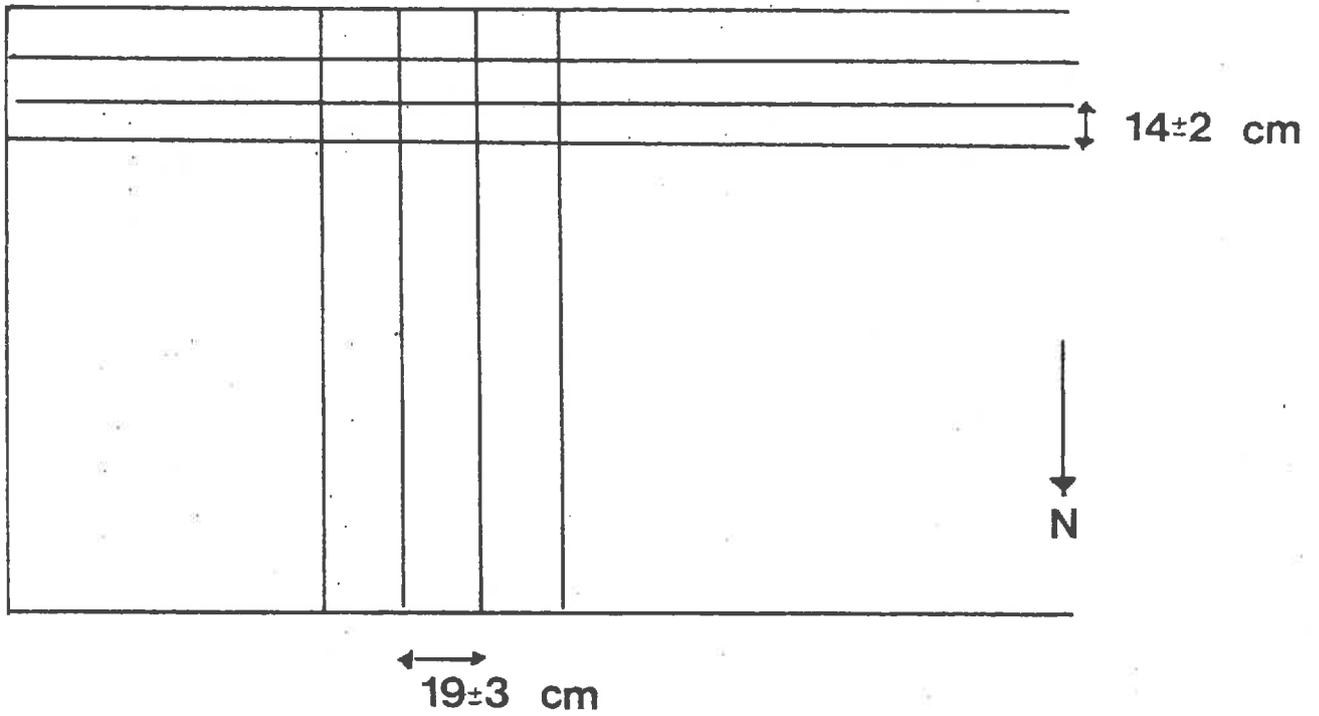
Tableau III.4 : Caractéristiques du cultivateur utilisé pour le travail du sol.

- largeur du travail	2,20 m
- 6 rangs	
- Ecartement entre les rangs	0,20 m
- Ecartement entre deux dents	0,40 m

Tableau III.5 : Caractérisation de l'état initial.

PLACETTE	B	A
% SURFACE couverte par : <ul style="list-style-type: none"> • $T_{fi} < 2$ mm • Mottes > 50 mm 	20 €	10-20 €
T_{fi} calibre modal (mm)	1	1 ⁺
CALIBRE DES MOTTES (cm) en % de 1 ^{er} decile recouvrement modal de la surface 9 ^e decile	0,1 1,7 3,5	0,1 1,7 4

Figure III.9 : Schéma des sillons créés par le travail du sol.



A partir d'observations réalisées sur des sites aspérimètres.

- transect Nord

		Nb de mesures	μ (cm)	σ (cm)
site	A	15	13	2
site	B	14	14,5	2

- transect Est

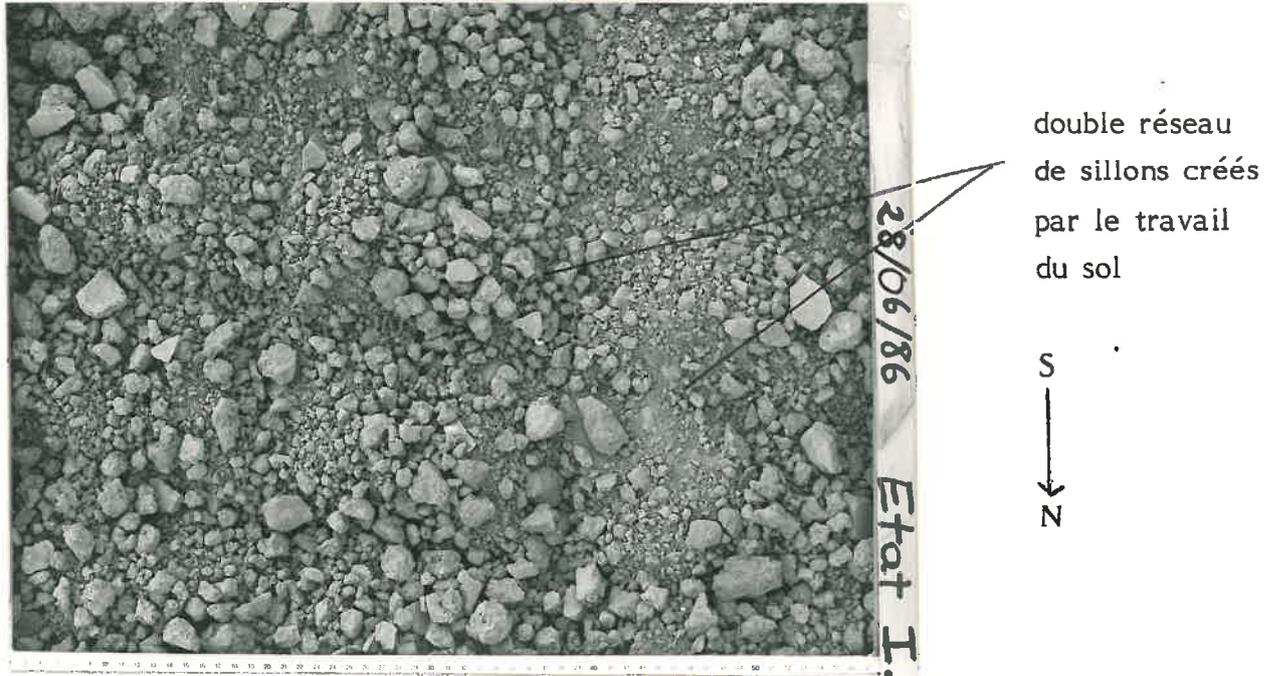
site	C	11	19	3
------	----------	----	----	---

Le réseau de sillons créé à partir du double passage du cultivateur a été caractérisé par observation directe des sites de mesure aspérimétrique et schématisé sur la figure n° III.9, p. 34 . Le suivi qualitatif de la dégradation structurale mise en oeuvre est retracé dans les figures n° III.10 et n° III.11, p. 35,36 dans lesquelles sont regroupés photographies et commentaires associés, des différents stades atteints pour une placette.

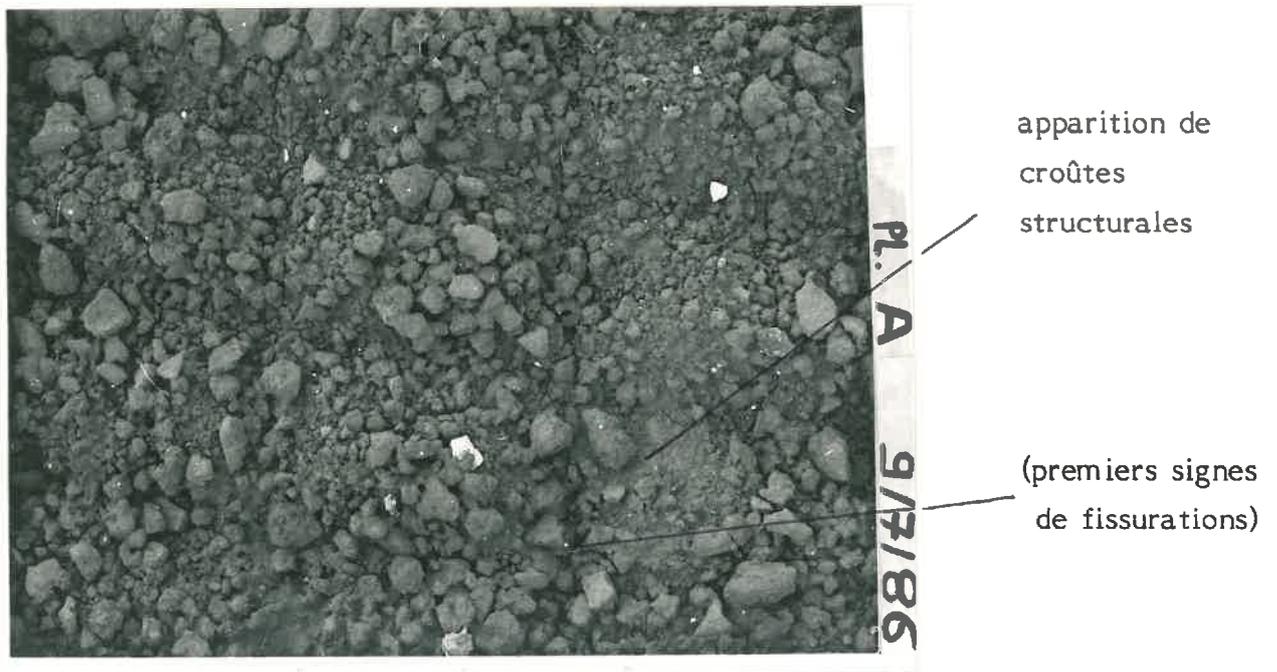
L'évolution des deux principaux critères D_{min} et N_{tf} caractérisant la dégradation morphologique de surface, en fonction de la pluie cumulée, a été reportée dans la figure n° III.12, p. 37 . Plusieurs remarques s'imposent :

- l'évolution de la surface a atteint la phase 2. Ceci est confirmé par l'apparition de dépôts groupés de limons blancs d'une part, et, d'autre part, d'un flacage d'une vingtaine de minutes en cours de "pluie" 4. Les zones de dépôts (zones "d'arrivée") correspondent par ailleurs aux emplacements des flaques. Les valeurs finales atteintes par D_{min} et N_{tf} vont aussi dans ce sens.
 - la phase 1 s'est révélée très longue. Il a fallu en moyenne 80 mm d'eau à des intensités pourtant relativement fortes (20 mmh^{-1}) pour l'atteindre : trois éléments d'explication peuvent être avancés :
 - * l'énergie cinétique des gouttes était certainement plus faible par rapport à celle d'une pluie naturelle.
 - * l'état initial était relativement grossier : les valeurs élevées de D_{min} , de l'ordre du centimètre, dès la première pluie de 18 cm, l'attestent.
 - * le caractère stable du matériau (27 % d'argile).
 - sur le plan du suivi de la dégradation, les valeurs des deux critères D_{min} , associés à chaque placette, évoluent sensiblement de la même façon, au décalage près des courbes. Celui-ci est certainement induit par les différences de quantité d'eau reçue à chaque irrigation. Les variations de D_{min} se situent entre la "pluie" 3 et la "pluie" 4.
- Par contre, une divergence est à noter lors de la "pluie" 3 pour les valeurs de N_{tf} , différence qui s'atténue d'ailleurs à la "pluie" 4 : l'explication semble être la sensibilité de la notation (en classes) associée à une différence de quantité et de qualité d'eau reçue : variation de l'intensité reçue du fait de la proximité ou de l'éloignement d'un des asperseurs de la rampe d'irrigation.

Figure n° III.10 : dégradation morphologique de surface : exemple de la placette A.

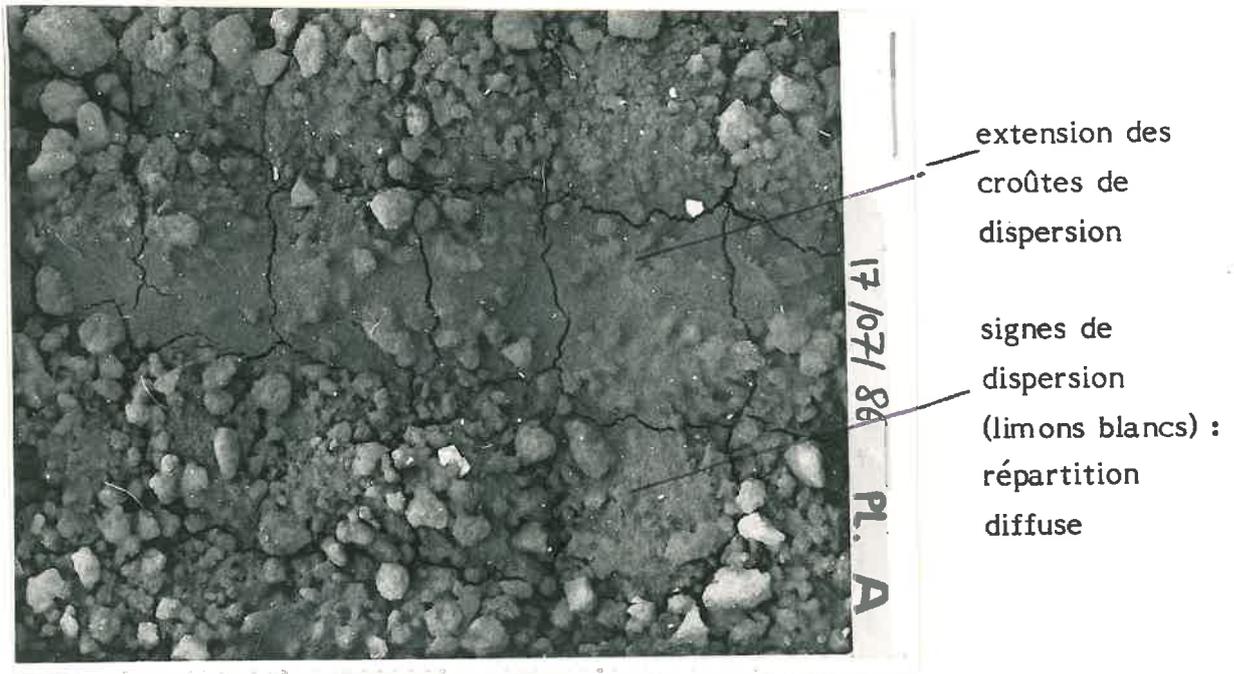


- Etat initial

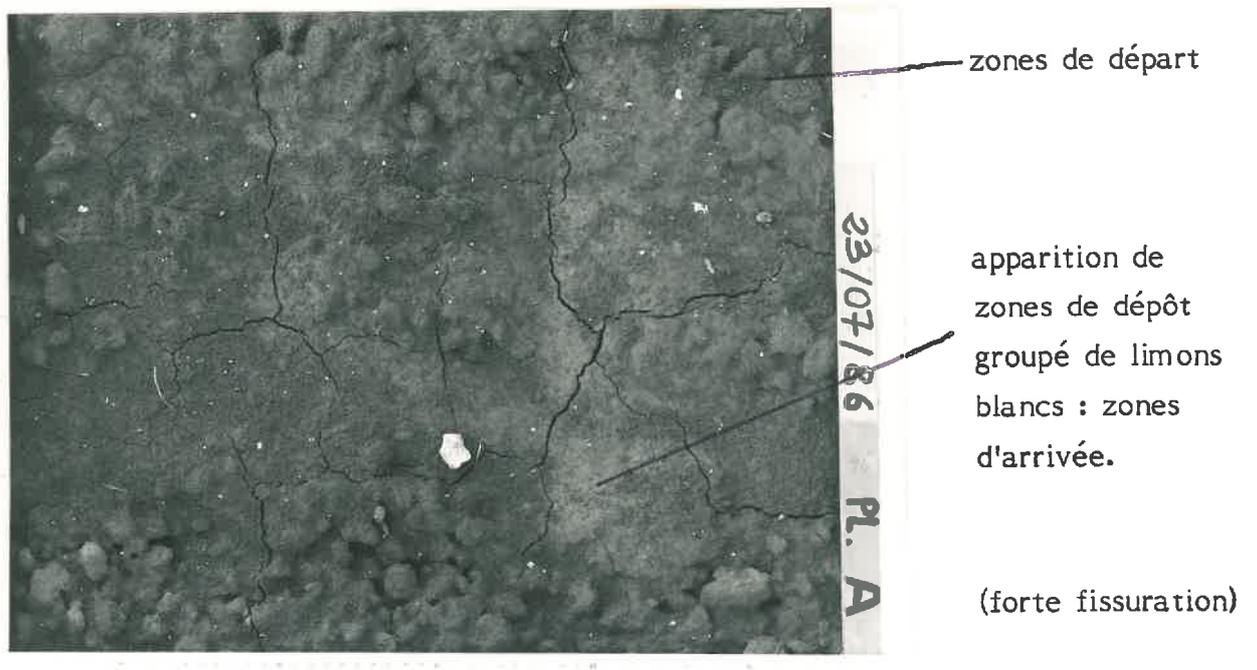


- Premier apport d'eau : 16 mm

Figure n° III.11 : dégradation morphologique de surface : exemple de la placette A.



- troisième apport d'eau : $p = 47,5$



- quatrième apport d'eau : $p = 80$ mm

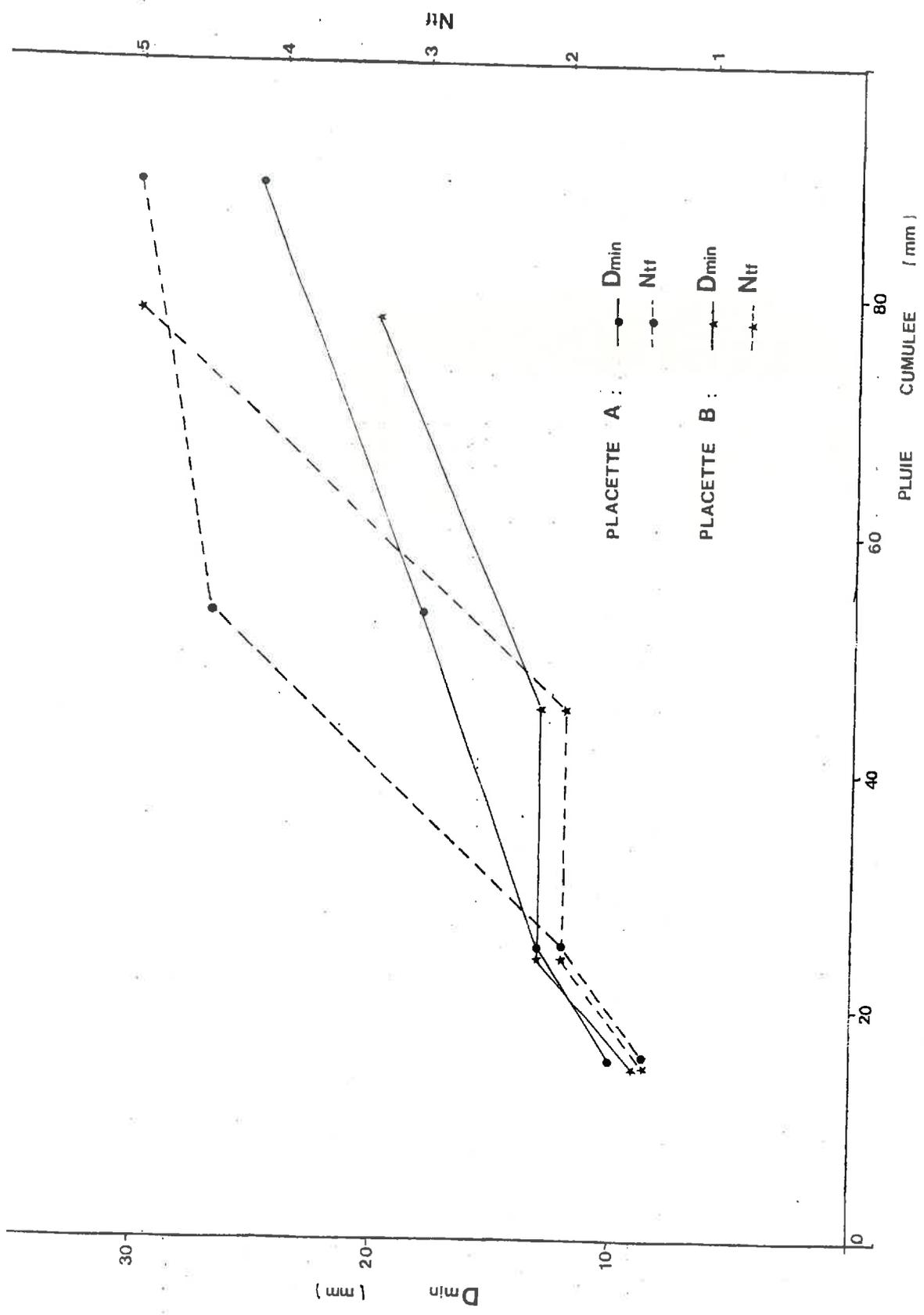


Figure III.12 : Dégradation structurale réalisée.

Figure III.13 : Le scattéromètre RAMSES II.



Antenne de
réception

cornet d'émission

III.4. Les mesures radar.

III.4.1. Configuration expérimentale.

Le radar RAMSES II est monté sur la flèche d'une grue de chantier à une hauteur de 14 mètres (voir photographies, figure n° III. 2 et figure n° III.13). La position de celle-ci par rapport à la parcelle expérimentale est fonction de l'azimuth choisi d'une part, et de l'angle d'incidence de la mesure d'autre part (voir schéma, figure n° III.14). Sa distance vis-à-vis de la parcelle est calculée à partir de l'évaluation des surfaces participant effectivement à la rétrodiffusion (voir schéma et calculs associés figure n° III.15).

Les mesures sont réalisées suivant deux azimuths : Nord-Sud et Est-Ouest, pour tenir compte du double passage croisé de cultivateur. En effet, la rugosité de surface n'est pas forcément la même suivant la direction d'observation.

Enfin, le principe général de fonctionnement de RAMSES est traité en ANNEXE n° 7.

III.4.2. Choix des configurations des paramètres radar.

Chaque séquence de mesures est effectuée après chaque "pluie utile" vis-à-vis de la dégradation de la surface de sol. Celle-ci se compose de deux séances de mesures :

- la première a lieu juste après l'apport d'eau après attente d'un léger ressuyage (une heure) pour pouvoir pénétrer dans la parcelle, afin d'effectuer les prélèvements d'échantillons nécessaires aux mesures d'humidité.
- la seconde après dessèchement par évaporation de la couche superficielle. Elle s'associe à de nouvelles mesures d'humidité, l'objectif étant de comparer les effets d'humidités différentes sur la rétrodiffusion des micro-ondes pour une même géométrie de surface.

Ces deux séances se justifient par l'allure des courbes σ_0 fonction de l'angle d'incidence, où des variations d'humidité de l'horizon superficiel provoquent un décalage des courbes pour une surface de même rugosité (ULABY [1978], FLUHR [1981]). Pour chaque séance de mesures, nous avons choisi les valeurs des paramètres radar suivants :

Figure III.14 : Configuration des mesures radar sur la parcelle.

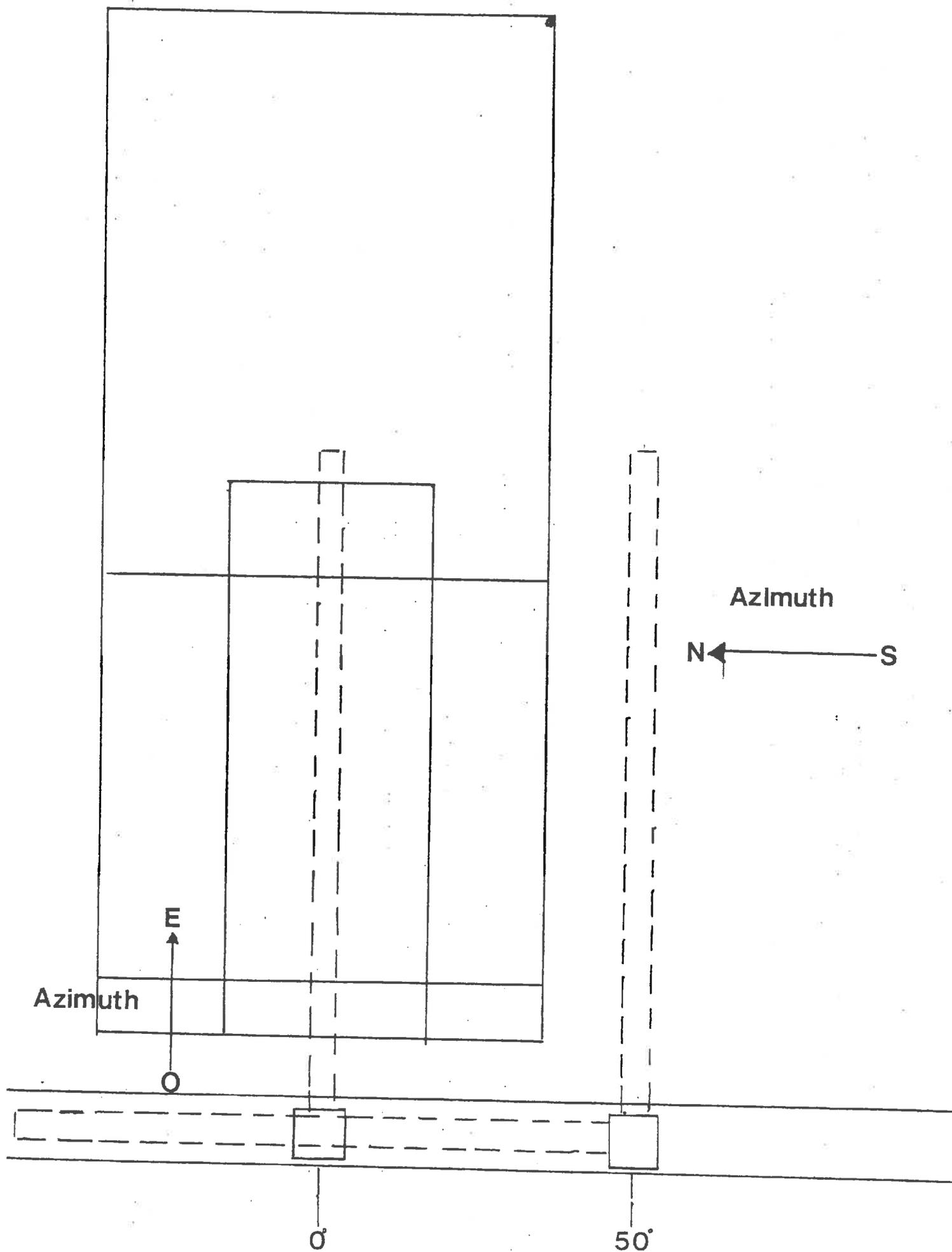
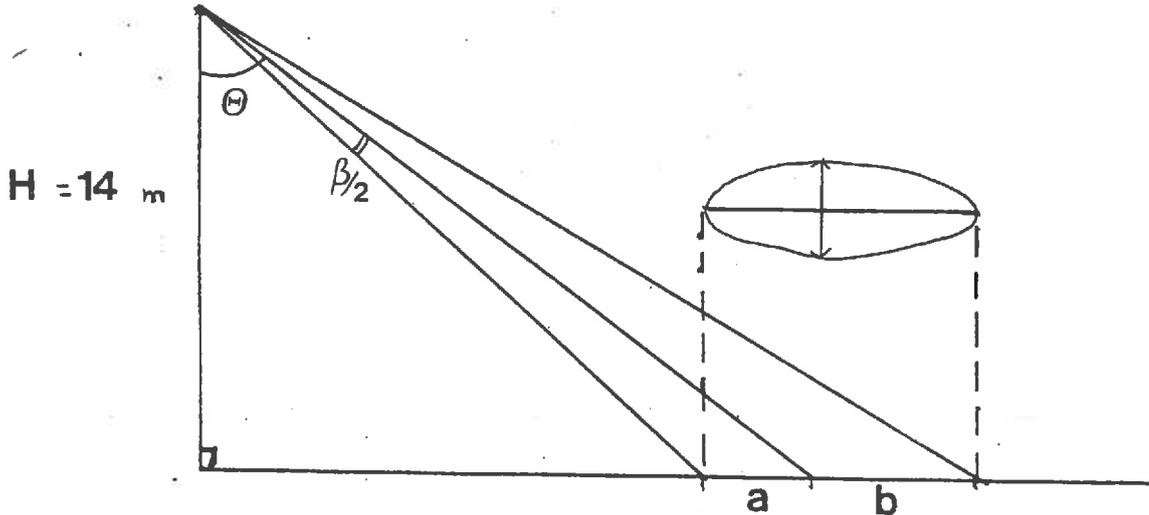


Figure III.15 : Evaluation des surfaces participant à la rétrodiffusion.



fréquence GHz	$\beta/2$ degrés
3,5	5,91
4,5	4,60
9,0	3,65

$$a = H (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg}(\theta - \beta/2))$$

$$b = H (\operatorname{tg}(\theta + \beta/2) - \operatorname{tg} \theta)$$

Fréquence GHz	Incidence (°)	a (m)	b (m)
3,5	0	1,45	1,45
	50	3,12	4,00
4,5	0	1,13	1,13
	50	2,49	3,02
9,0	0	0,89	0,89
	50	2,01	2,34

Tableau n°6 : Tableau des critères de RAYLEIGH en fonction des fréquences disponibles sur RAMSES.

Fréquence f (GHz)	Longueur d'onde λ (cm)	Critère de RAYLEIGH $\frac{\lambda}{8 \cos \Theta}$ (cm)	
		0	50
3,5	8,6	1,07	1,70
4,5	6,7	0,84	1,3
9,0	3,3	0,41	0,64

- 0 et 50° pour l'angle d'incidence. Ceci se justifie par :
 - * l'allure des relations expérimentales obtenues par ULABY (1978) entre σ_0 et l'angle d'incidence, pour différentes valeurs de la hauteur RMS. L'effet de cette dernière est très marqué pour l'incidence normale et les incidences élevées, ceci pour toutes les fréquences étudiées.
 - * l'analyse théorique et la modélisation de FUNG (1986) qui préconise des mesures à incidence normale et aux basses fréquences pour des détections de hauteur RMS de surfaces peu rugueuses. Notons que les mesures à 0° sont impossibles pour l'azimuth est-ouest du fait de la position de la flèche.
- 3,5, 4,9 et 9 GHz pour les fréquences utilisées, pour lesquelles on peut reprendre les deux arguments précédents :
 - * les courbes σ_0 fonction de l'angle d'incidence pour chaque surface de hauteur RMS différente, se discriminent mieux aux basses fréquences (ULABY [1978]).
 - * FUNG préconise l'utilisation de basses fréquences, ceci pour une approche de la rugosité par le critère H_{RMS} .
 D'autre part, le calcul des critères de RAYLEIGH pour chaque fréquence disponible sur RAMSES (voir tableau n° 6, p. 41) montre qu'à partir de 9 GHz, la précision associée apparaît illusoire vis-à-vis de la résolution de notre aspérimètre.
- deux polarisations HH et VV, justifiées par la bibliographie (FUNG [1986] et voir chapitre I).

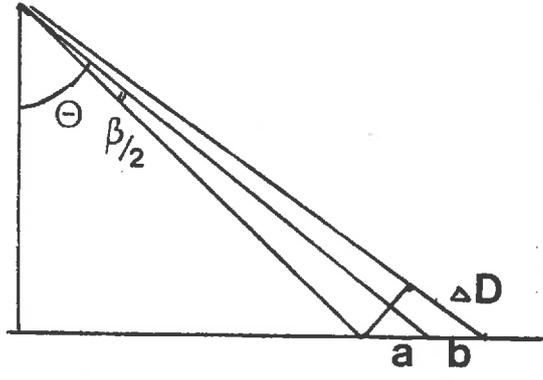
Au total, en intégrant l'azimuth, chaque séance se compose de 18 configurations (12 pour le Nord-Sud, 6 pour l'Est-Ouest). Pour chaque configuration, la mesure est répétée deux fois, ceci nous donnant une indication sur la variabilité de celle-ci.

III.4.3. Précision des mesures.

La mesure radar (calcul de la section efficace de rétrodiffusion σ_0) est en réalité, une mesure statistique : elle est la moyenne d'un nombre d'échantillons indépendants intégrés dans une même mesure. La précision de cette dernière dépend du nombre de ces échantillons. Ceux-ci sont obtenus de deux façons (voir figure n° III.16, p. 42) :

Figure III.16 : Obtention du nombre d'échantillons indépendants. (FLUHR , 1981)

• décorrélation en fréquence



$$* \Delta F_c = \frac{150}{\Delta D}$$

où $\Delta D = (a+b)(\sin(\beta/2) - \theta - \beta/2)$

* Nombre total d'échantillons décorrélés spatialement :

$$N_f = \frac{\Delta F}{\Delta F_c}$$

• décorrélation spatiale

$$N_s = \frac{2\beta L}{\lambda} = \frac{2\beta L f}{c}$$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

$\beta = 2\beta/2 \text{ rd}$

$f = 10^9 \text{ Hz}$

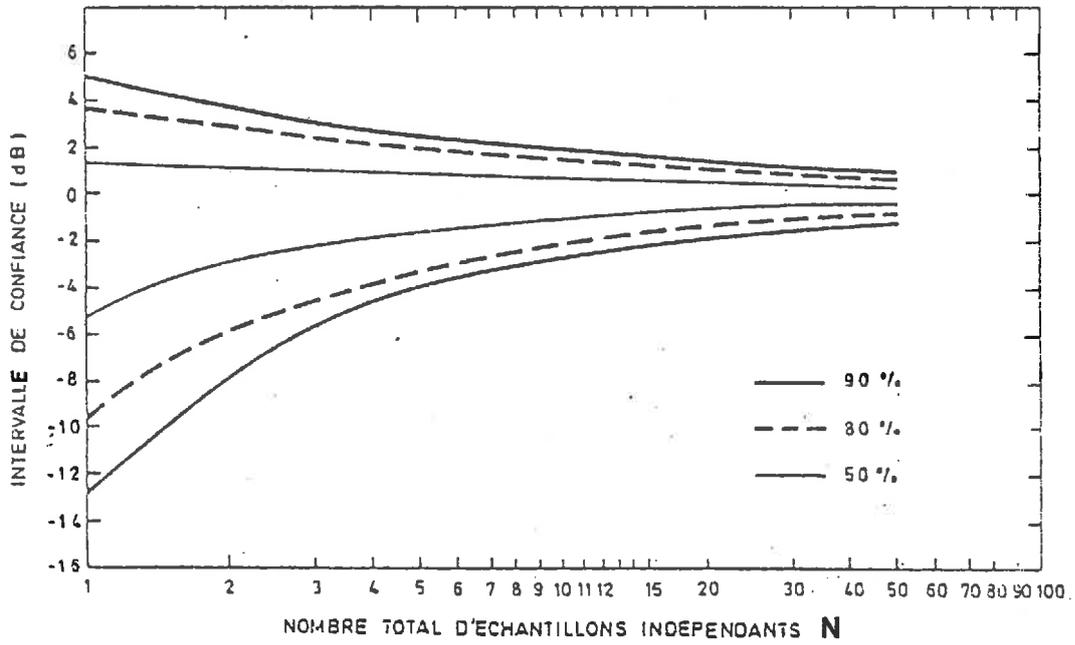
L = Longueur de la fleche

ou $\Delta L = \frac{\lambda}{2\beta}$

• Nombres d'échantillons indépendants totaux

$\Theta (^{\circ})$ $f (\text{GHz})$	0	50
3,5	330	260
4,5	265	190
9,0	360	300

Figure III.17 : Intervalle de confiance de la mesure radar en fonction du nombre d'échantillons indépendants.



(FLUHR, 1981)

$$\sigma_0 \approx \chi(2N)$$

$$\text{Si } N \text{ grand, } \sigma_0 \approx N \left(\sigma_0, \frac{\sigma_0}{\sqrt{N}} \right)$$

- par un procédé de décorrelation en fréquence. En effet, lorsqu'on parle de mesure à une fréquence donnée, il s'agit d'une fréquence centrale, sorte de moyenne autour de laquelle est modulé le signal émis. Il est donc possible de calculer une variation minimale de fréquence ΔF_c permettant deux mesures décorrelées, et pour finir le nombre total d'échantillons, ceci pour chaque fréquence centrale.
- par un procédé de décorrelation spatiale. Celui-ci s'obtient par le déplacement du radar sur la flèche de la grue au moment de la mesure. Il suffit de calculer la distance minimale de déplacement ΔL pour laquelle deux mesures sont décorrelées pour avoir le nombre d'échantillons connaissant la longueur utile de la flèche de la grue soit 14 mètres.

Le nombre total d'échantillons indépendants pour une configuration de mesure donnée, s'obtient par multiplication des deux précédents termes. A partir de là, connaissant ce nombre et la loi de probabilité que suivent les mesures, peut être calculé l'intervalle de confiance. Nous nous bornerons à rappeler l'allure des courbes (figure n° III.17, p. 43).

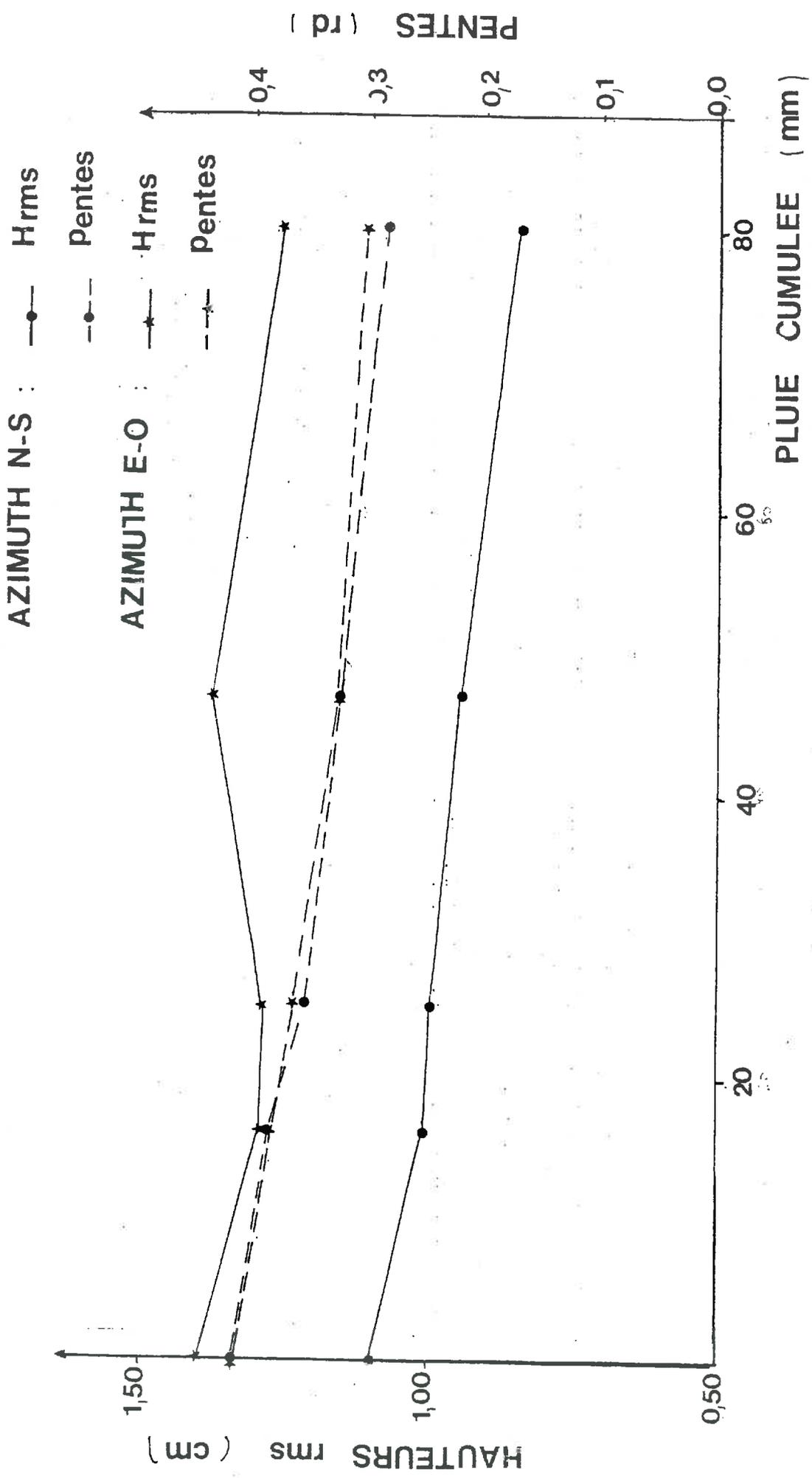


Figure n° IV-1 : Evolution des écarts-types des hauteurs calculés et des pentes en fonction des apports d'eau cumulés (Niveau parcelle)

IV. RESULTATS ET DISCUSSION.

Nous allons discuter dans un premier temps les résultats concernant la méthode utilisée pour la description de l'évolution de la rugosité de surface du sol. Dans un deuxième temps, nous présenterons les mesures radar proprement dites réalisées corrélativement à l'évolution de la rugosité de surface.

IV.1. Evolution de la rugosité de la surface du sol : résultats des relevés aspérimétriques.

Nous avons appréhendé la rugosité de surface du sol à travers le calcul des écarts-types des hauteurs calées par rapport à la moyenne et des pentes, ceci à deux niveaux :

- sur chaque transect (6 au total) : on travaille dans ce cas sur 400 points,
- par azimuth : dans ce cas, nous regroupons les 3 transects d'un même azimuth (soit 1200 points pris en compte), ceci pour des corrélations ultérieures avec les mesures radar, qui ne peuvent se faire qu'au niveau de la parcelle. Nous supposons pour cela que les hétérogénéités intra-zone de mesures sont supérieures aux hétérogénéités inter-zone de mesures terrain et radar. L'observation visuelle de la variabilité spatiale n'a pas contredit cette hypothèse.

IV.1.1. Evolution des critères hauteur RMS et écart-type des pentes en fonction de la dégradation structurale.

La figure n° IV.1, p. 43 et le tableau n° IV.1, p. 44 présentent les résultats obtenus.

IV.1.1.1. Variation de la hauteur RMS.

La dégradation structurale réalisée en terme de diminution de la rugosité de surface est peu importante : la hauteur RMS ne décroît que de 2,5 millimètres pour l'azimuth Nord-Sud et de 1,5 millimètres pour l'azimuth Est-Ouest. Deux conclusions partielles découlent de ces observations :

- il faut disposer d'une série de mesures en pleine phase 2 pour juger vraiment de la sensibilité totale de ce critère à une baisse de rugosité de surface par la battance.
- la gamme observée de variation de rugosité de surface, faible, est un atout pour juger de la sensibilité de la mesure radar à une diminution de celle-ci.

Tableau n° IV-1 : Evolution des vitesses Hrms et σ_s au cours de la dégradation réalisée.

1) Au niveau de la parcelle

	<u>AZIMUTH N-S</u>		<u>AZIMUTH E-O</u>	
	Hrms (cm)	σ_s (rd)	Hrms (cm)	σ_s (rd)
lit i	1,10	0,42	1,40	0,42
ort 1	1,01	0,39	1,29	0,39
ort 2	1,00	0,36	1,29	0,37
ort 3	0,95	0,33	1,38	0,33
ort 4	0,85	0,29	1,26	0,31
4)	23%	30%	10%	26%

Stabilité intra-parcellaire

	<u>AZIMUTH N-S</u>						<u>AZIMUTH E-O</u>					
	Hrms (cm)			σ_s (rd)			Hrms (cm)			σ_s (rd)		
	AN	BN	CN	AN	BN	CN	AE	BE	CE	AE	BE	CE
lit i	1,06	1,33	0,84	0,42	0,42	0,40	1,40	1,42	1,38	0,46	0,37	0,42
ort 1	1,00	1,23	0,73	0,44	0,38	0,32	1,16	1,38	1,32	0,42	0,41	0,34
ort 2	0,94	1,26	0,71	0,39	0,36	0,33	1,35	1,33	1,20	0,40	0,40	0,32
ort 3	0,96	1,13	0,69	0,38	0,30	0,29	1,25	1,18	1,66	0,37	0,31	0,29
ort 4	0,85	1,03	0,64	0,34	0,27	0,25	1,22	1,18	1,37	0,36	0,28	0,28
4)	20%	23%	24%	19%	36%	38%	13%	17%	10%	22%	24%	33%

D'après les données du tableau n° IV.1 a), h_{RMS} rend compte selon l'azimuth d'une différence de rugosité de départ : 0,3 cm à l'état initial. Celle-ci se maintient tout au long de la dégradation réalisée. Les observations visuelles et mesures réalisées (voir chapitre III) ont montré que cette différence résultait du travail du sol effectué : en d'autres termes, la différence exprimée par h_{RMS} est induite par une différence de macro-rugosité. Des résultats ultérieurs corroboreront ce fait.

Cet effet azimuth se retrouve au niveau intra-parcellaire lorsqu'on calcule les écarts-types des hauteurs RMS associés à chaque transect pour chaque "pluie" (voir tableau n° IV.1 b) : là encore, compte tenu du stade de dégradation atteint (début de phase 2), les niveaux de variabilité diffèrent selon l'azimuth.

IV.1.1.2. Variation de l'écart-type des pentes .

D'après les données du tableau n° IV.1 et compte tenu de l'évolution de surface observée et du stade de dégradation atteint, l'écart-type des pentes semble être un critère plus sensible que la hauteur RMS : quel que soit l'azimuth, la variation enregistrée sur toute la dégradation structurale est toujours supérieure en moyenne de 10 %. En terme de variation diachronique, σ_s apparaît donc plus sensible vis-à-vis de la dégradation réalisée.

De plus, l'écart-type des pentes apparaît être un critère de description beaucoup plus homogène (voir courbes en pointillés de la figure n° IV.1). En terme de variations synchroniques, que ce soit au niveau parcellaire ou site de mesure (voir tableau n° IV.1), les valeurs σ_s sont très voisines.

IV.1.1.3. Discussion.

La meilleure sensibilité et homogénéité du critère σ_s par rapport à la hauteur RMS peut s'expliquer par le modèle de dégradation morphologique en phase 1 de la battance. En effet, celui-ci explique la dégradation de surface par émoussement des mottes dans les zones de terre fine et colmatage des interstices existants entre celles-ci. Le processus de destruction affecte donc plus une échelle de rugosité que l'on peut qualifier de microassociée aux valeurs faibles de h_{RMS} et fortes de σ_s . Or, dans ce calcul de h_{RMS} , les points qui pèsent le plus lourd sont les fortes valeurs des hauteurs, que l'on peut qualifier de macro-rugosité. Ceux-ci sont au premier temps

de la dégradation peu affectés d'où la moindre sensibilité de h_{RMS}

Ces résultats sont donc très contingents de l'intensité de la dégradation réalisée.

IV.1.2. Evolution de la rugosité de surface du sol en fonction des filtrages réalisés.

Une rugosité de surface du sol peut se manifester à plusieurs échelles :

- une créée par le travail du sol que l'on peut qualifier de macro-rugosité,
- une associée à la disposition et aux calibres des mottes sur le profil que l'on peut qualifier de micro-rugosité.

L'évolution structurale doit les affecter différemment (hypothèse de BOIFFIN). Il paraît donc intéressant d'étudier séparément leurs variations. Pratiquement, ceci va se traduire par un filtrage utilisant la technique décrite au chapitre III.

Notre problème concerne alors le choix de la valeur de la borne de filtrage. En d'autres termes, ceci revient à se poser les questions préalables suivantes :

- les deux échelles de rugosité observées sur le terrain sont-elles suffisamment disjointes de telle façon que l'on puisse y placer un seuil, autrement dit que le résultat du comportement de chaque échelle de rugosité ne soit pas trop sensible au choix du seuil ?
- A partir de là, l'existence et le niveau de ce seuil sont-ils stables :
 - * dans le temps ?
 - * dans l'espace ?

Pour répondre à la première question, nous avons choisi les valeurs de la borne de filtrage dont la différence paraissait être la plus grande possible sachant que :

- pour la valeur la plus basse en fréquence (donc la plus forte en période), les valeurs limites étaient celles associées au travail du sol. Dans ce cas, la borne a été fixée à :

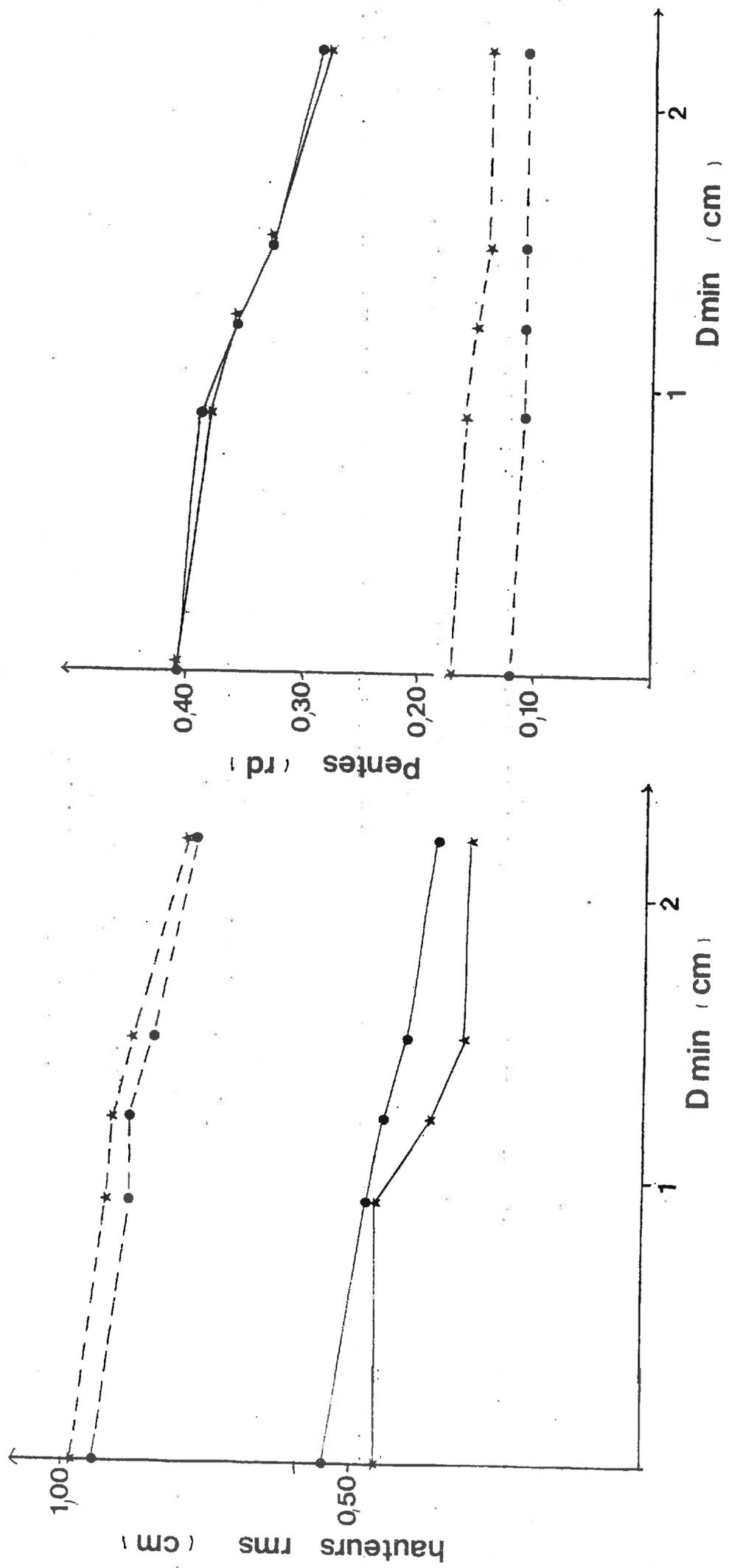
$$f = 0,083 \text{ cm}^{-1} \text{ soit } t = \frac{1}{0,083} = 12 \text{ cm}$$

pour l'azimuth Nord-Sud, et à :

$$f = 0,055 \text{ cm}^{-1} \text{ soit } t = \frac{1}{0,055} = 18 \text{ cm}$$

pour l'azimuth Est-Ouest (0,5 cm est la résolution de l'aspérimètre).

Rappelons que les périodes observées sur le terrain avaient une valeur moyenne de 14 cm pour l'azimuth Nord-Sud et 19 cm pour l'azimuth Est-Ouest (voir figure n° III.9, p. 34).



rugosite : — micro
 --- macro

critère parcelle : ● $f = 0,083 \text{ cm}^{-1}$
 ★ $f = 0,154 \text{ cm}^{-1}$

Figure n° IV-2 : Evolution des critères Hrms et écart-type des pentes de chaque niveau de rugosité en fonction de la dégradation

- à l'état initial, le calibre des plus grosses mottes observées sur chaque placette était de 4 à 5 cm. Dans ce cas, la borne de filtrage a été fixée à :

$$f = 0,154 \text{ cm}^{-1} \text{ soit } t = \frac{1}{0,154} = 6,5 \text{ cm}$$

Pour répondre à la deuxième question, la borne de filtrage a été fixée à :

$$f = 0,200 \text{ cm}^{-1} \text{ soit } t = \frac{1}{0,200} = 5 \text{ cm}$$

IV.1.2.1. Sensibilité de la méthode : influence du choix du filtrage en fonction de la dégradation réalisée.

Les courbes de la figure n° IV.2 présentent pour l'azimuth Nord-Sud l'évolution des critères H_{RMS} et σ_s associés à chaque niveau de rugosité et à chaque filtre en fonction de D_{min} : d'un filtrage à l'autre, donc pour des valeurs de périodes variant de 12 à 6,6 cm, la forme des courbes équivalentes se conserve : on ne met donc pas en évidence d'effet de seuil sur les variations de H_{RMS} ou σ_s en fonction de D_{min} .

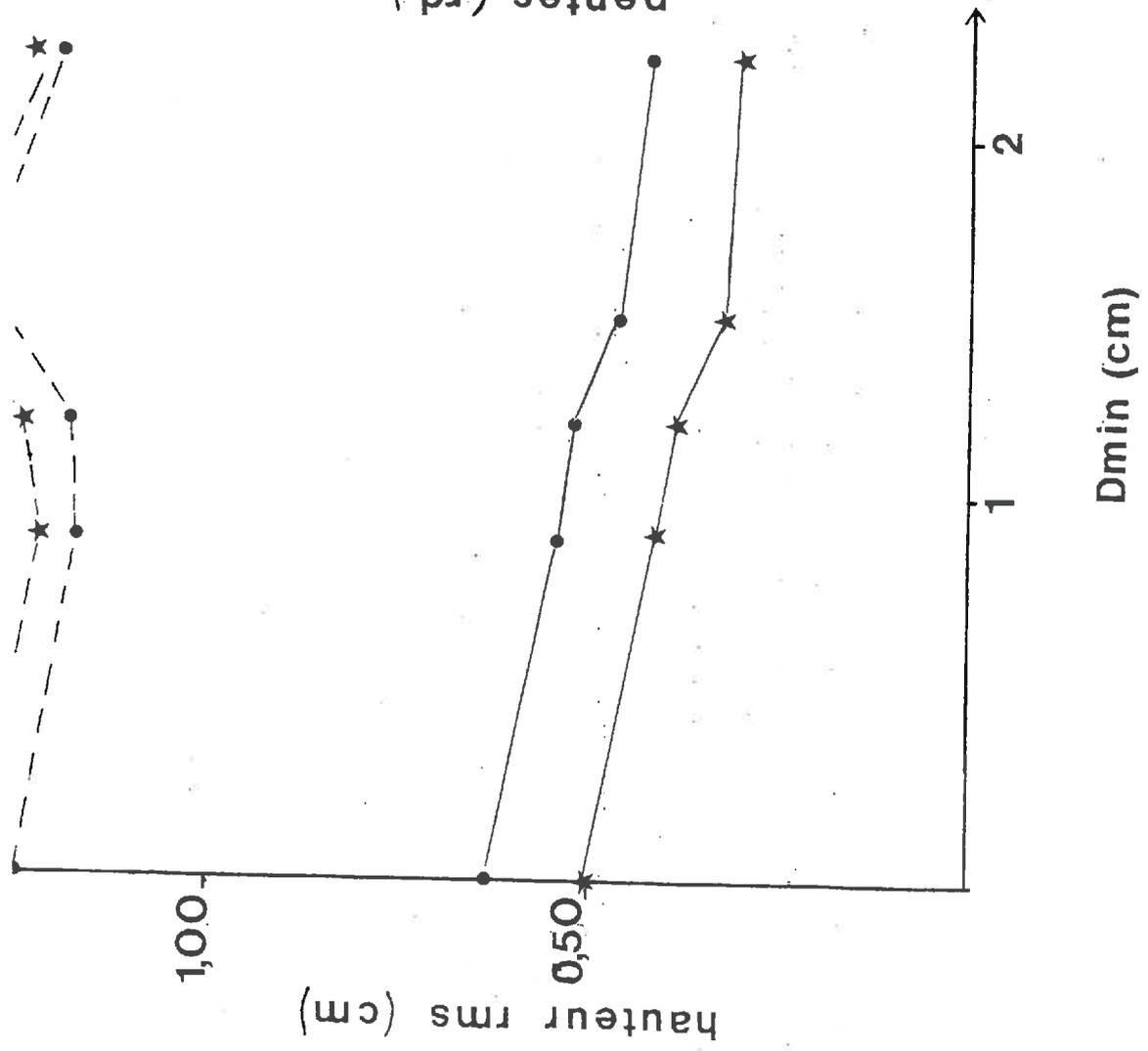
Seul un décalage apparaît entre chaque courbe équivalente : une augmentation de la valeur au filtre en terme de fréquence se traduit par une diminution de la valeur de la micro-rugosité associée à une augmentation de la macro-rugosité. Ceci semble donc indiquer qu'il n'y a pas vraiment discontinuité nette entre composantes de hautes fréquences et basses fréquences. Toutefois, les écarts entre courbes équivalentes associés à chaque filtre sont très inférieurs aux écarts entre courbes micro- et macro-rugosité de chaque filtre.

Ceci est le plus net pour le critère H_{RMS} même si les variations brutes restent faibles surtout pour la macro-rugosité.

Les courbes de la figure n° IV.3, p. 43 associées à l'azimuth Est-Ouest sont redevables des mêmes remarques. Notons de plus que la différence de valeur brute de H_{RMS} selon l'azimuth s'explique bien par la composante macro-rugosité (comparaison des macro-rugosités H_{RMS} des figures n° IV.2 et IV.3).

IV.1.2.2. Sensibilité du seuil de filtrage et variabilité intra-parcellaire.

Les courbes de la figure IV.4, p. testent la sensibilité de la méthode en tenant compte de la variabilité intra-parcellaire. Deux types de courbes coexistent :



rugosité: — micro
 --- macro

critere parcelle: ● $f = 0,055 \text{ cm}^{-1}$
 ★ $f = 0,154 \text{ cm}^{-1}$

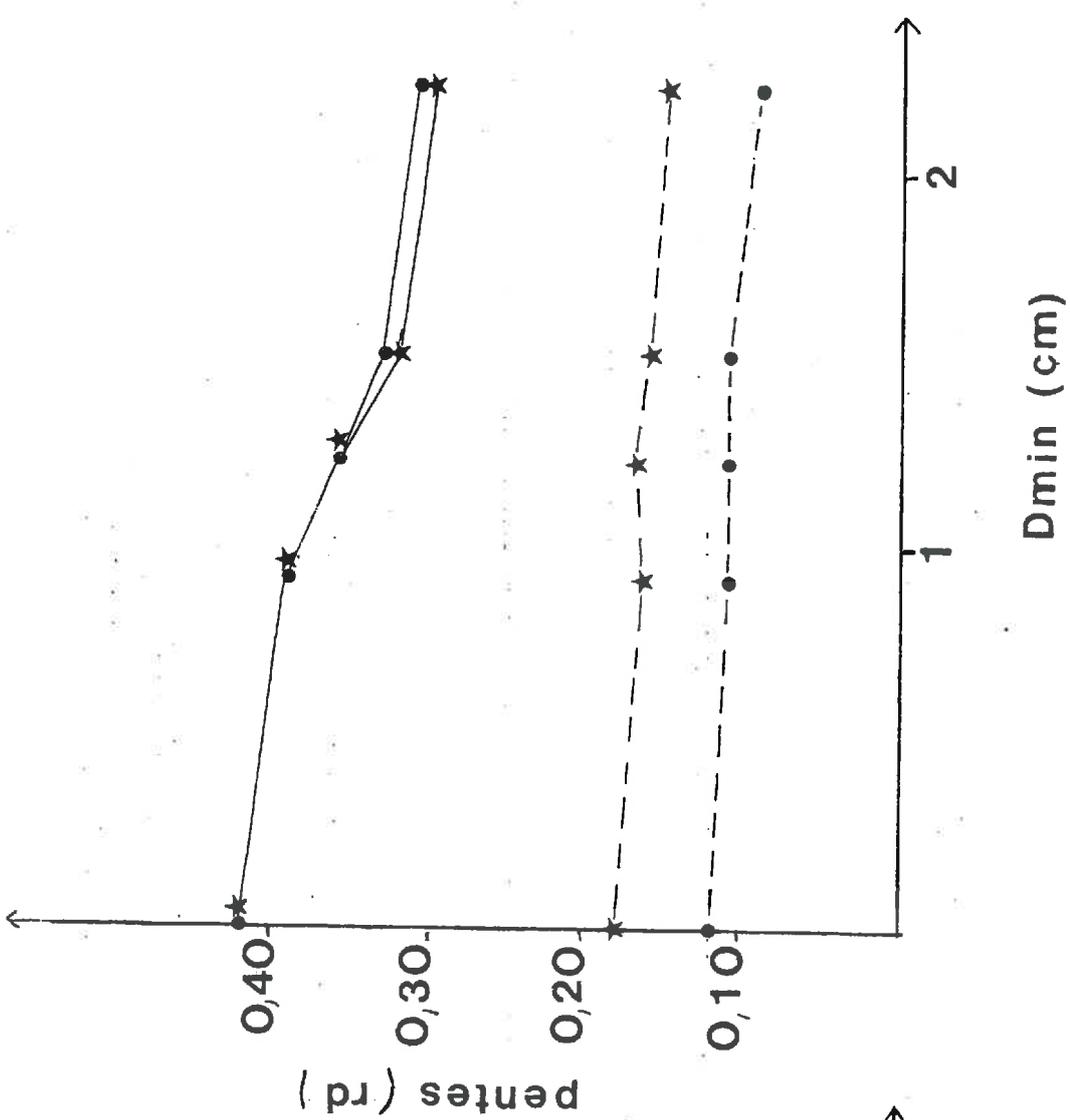


Figure n° IV.3 : Evolution des critères RMS et écart type des pentes de chaque niveau de rugosité en fonction de la densité de rugosité

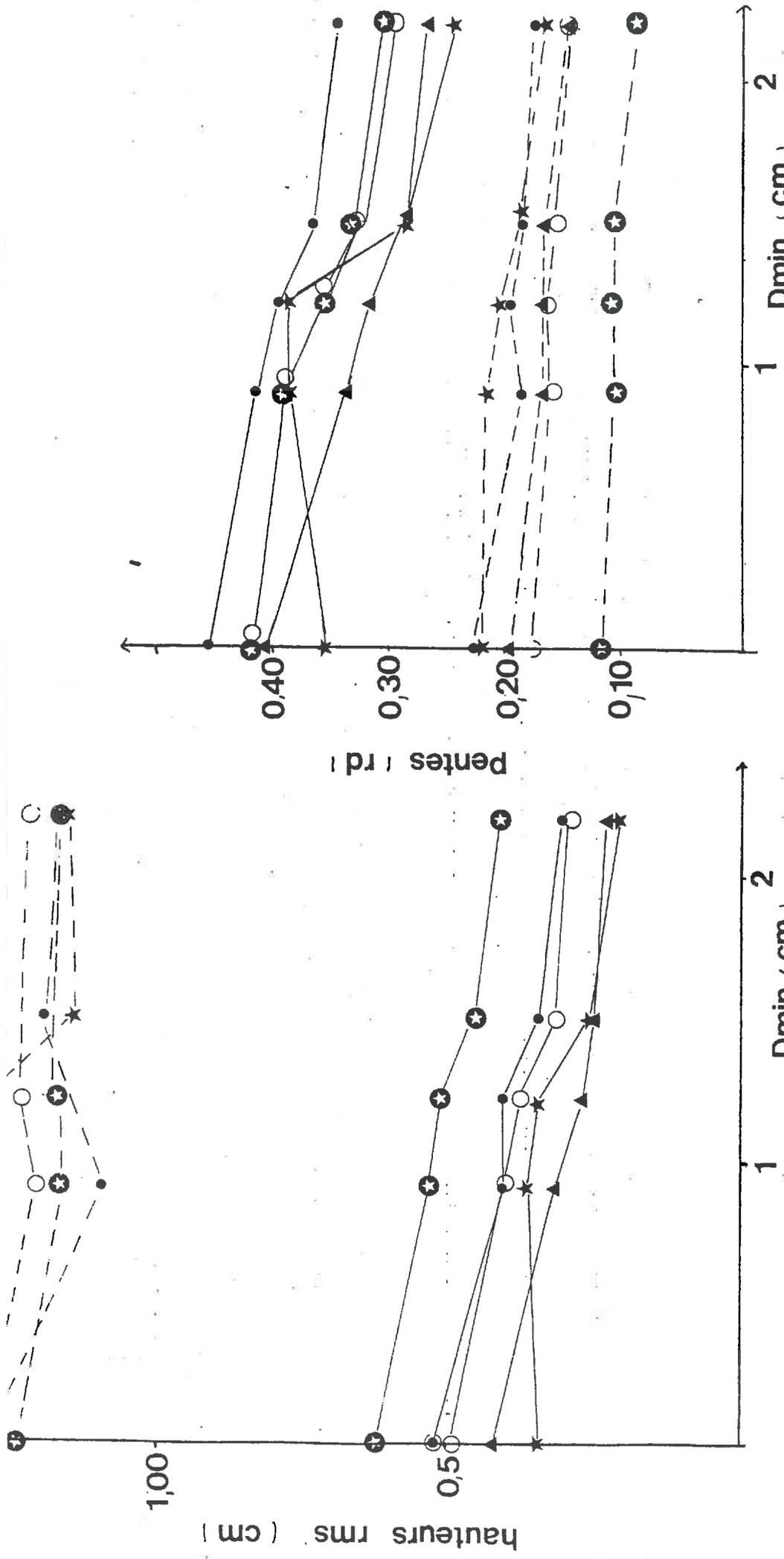


Figure n° IV.4: Evolution des écarts-types des hauteurs et pentes de chaque échelle de rugosité en fonction de la dégradation structurale: variabilité intra-parcellaire et inter-parcelle (AZIMUTH EST-OUEST)

Tableau n° IV-2 : Variabilité inter-filières et intra-parcellaire de la baisse relative des cistées H_{RMS} et σ_3 entre \bar{z} initial et aspersion n°4 : exemple l'Azimuth Est. Ouest

		Variabilité inter-filières	Variabilité intra-parcellaire
H_{RMS}	Micrométrie	3,5%	3,5%
	Macro-métrie	3,5%	3,5%
σ_3	Micrométrie	0,5%	4%
	Macro-métrie	3,5%	1,5%

- des courbes au niveau parcellaire associées aux deux filtres précédents 0,055 et 0,154 cm⁻¹,
- des courbes au niveau site de mesure associées au filtre 0,200 cm⁻¹.

Nous constatons que :

- quelle que soit l'échelle spatiale considérée, la forme des courbes se conserve là encore globalement. Les évolutions diachroniques sont identiques d'un site à l'autre.
- Compte tenu de l'échantillonnage réalisé, la variabilité inter-filtres apparaît du même ordre de grandeur que la variabilité intra-parcellaire de la fréquence 0,100 (voir tableau n° IV.2, p. 51) pour chaque apport de "pluie", ceci pour l'azimuth Est-Ouest. Les résultats sont identiques pour l'autre azimuth.

IV.1.2.3. Sensibilité de la méthode : conclusion et discussion.

Au vu des considérations précédentes, la marge de manoeuvre concernant le choix du seuil de filtrage pour séparer composantes micro-rugosité et macro-rugosité apparaît relativement importante : les comportements de chaque échelle de rugosité se révèlent stables

- dans le temps
- dans l'espace

Toutefois, ce résultat est directement contingent de nos conditions expérimentales au sens large :

- à la fois du stade de dégradation atteint, le déclenchement de la phase 2, et des modalités de mise en oeuvre qui jouent sur la vitesse de la dégradation, c'est-à-dire :
 - * nature du matériau
 - * l'état initial de surface réalisé où deux échelles de rugosité bien distinctes qui se surimposent : l'une décimétrique, l'autre centimétrique
 - * l'histoire hydrique

Il convient donc de retester les résultats observés sur une gamme de situations suffisamment variables par la nature du matériau, l'état de surface initial, l'histoire hydrique, pour prouver la pleine utilité de cette méthode ou définir des conditions limites à son application, et enfin, pour confirmer les résultats associés à chaque filtrage que nous allons maintenant exposer.

51
Tableau n° IV-3: Baisse relative des composantes m
 et m_s des rugosités de surface

on considère $\left\{ \begin{array}{l} \cdot 100 - \frac{\text{Hrms apport 4}}{\text{Hrms état i}} \times 100 \\ 100 - \frac{\sigma_s \text{ apport 4}}{\sigma_s \text{ état i}} \times 100 \end{array} \right.$
 : () : baisse relative entre apport 3 et état

AZIMUTH NORD-SUD

		NIVEAU F=0,083	PARCELLE F=0,154	NIVEAU INTRA-PARCELLAIRE (F=0,200)		
				A _N	B _N	C _N
Hrms	MICRO	30%	35%	25%	47%	43%
	MACRO	18% (10%)	20% (11%)	39% (31%)	21% (13%)	20% (15%)
σ _s	MICRO	30%	32%	19%	40%	39%
	MACRO	8%	18%	8%	21% (11%)	37% (27%)

AZIMUTH EST-OUEST

		NIVEAU F=0,055	PARCELLE F=0,154	NIVEAU INTRA-PARCELLAIRE F=0,200		
				A _E	B _E	C _E
Hrms	MICRO	33%	40%	37%	40%	45%
	MACRO	5%	6%	9%	16%	/
σ _s	MICRO	29%	29%	24%	31%	34%
	MACRO	25% (8%)	17% (11%)	22%	25% (15%)	25% (15%)

IV.1.2.4. Résultats associés à chaque filtrage.

Au vu des courbes des figures n° IV.2 et IV.3, pour un filtrage donné et quel que soit le critère considéré, la composante micro-rugosité explique une grande part de la diminution de la rugosité brute mise en évidence dans le paragraphe IV.1.1 : en effet, les courbes macro-rugosité paraissent pratiquement indépendantes de D_{min} ou présentent une pente très faible.

Cette différence de variation relative entre état initial et final, entre composantes micro- et macro-, est aussi mise en évidence en considérant le tableau n° IV.3, p. 52 : quel que soit le critère et l'azimuth considérés, la variation relative de la micro-rugosité est toujours supérieure de plus de la moitié de celle de la macro-rugosité. Pour cette dernière, en considérant la diminution entre état initial et apport d'eau n° 3, donc en moyenne juste avant le déclenchement de la phase 2, celle-ci ne dépasse jamais 15 %. Le début de la phase 2 coïncide avec une valeur de l'ordre de 20 %.

La micro-rugosité est la composante la plus affectée par la dégradation réalisée. Un autre résultat confirme ce fait. Il s'agit de considérer les histogrammes de distribution des hauteurs calées ou des pentes de chaque échelle de rugosité, et d'étudier pour chaque classe la variation du nombre d'individus (voir figure n° IV.5 et IV.6, p. 53,54). Deux variations sont présentées :

- entre le premier apport d'eau et l'état initial,
- entre le dernier apport d'eau et l'état initial.

D'un azimuth à l'autre, les résultats sont similaires ; aussi, ne présenterons-nous qu'un exemple : l'azimuth Est-Ouest. Nous constatons que :

- les variations par classes des histogrammes macro-rugosité sont peu perceptibles (cas des pentes) ou ne présentent pas de tendance décelable (cas des hauteurs).
- les histogrammes micro-rugosité, quelle que soit la variable considérée, présentent un renforcement très important des deux grandes classes correspondant aux valeurs des pentes nulles ou hauteurs calées proches de la moyenne, au détriment des valeurs extrêmes.

En tout état de cause, compte tenu du stade final de dégradation structural atteint (déclenchement de la phase 2), ces résultats se révèlent cohérents avec le modèle de battance présenté précédemment (châpître I) :

Figure n° IV.5 : variation des effectifs de chaque histogramme hauteurs entre état initial et apport 1 ou apport 4. (azimuth Est).

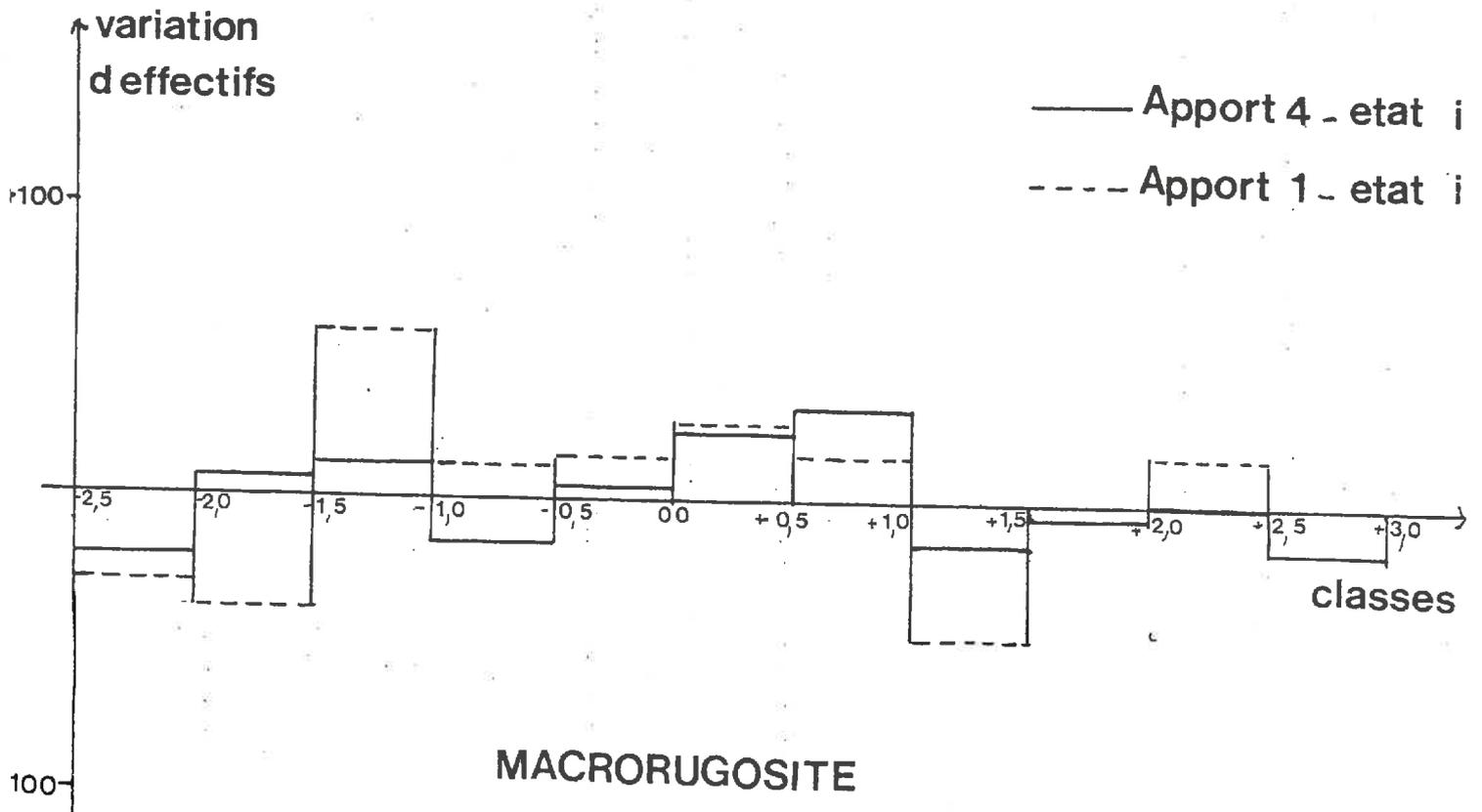
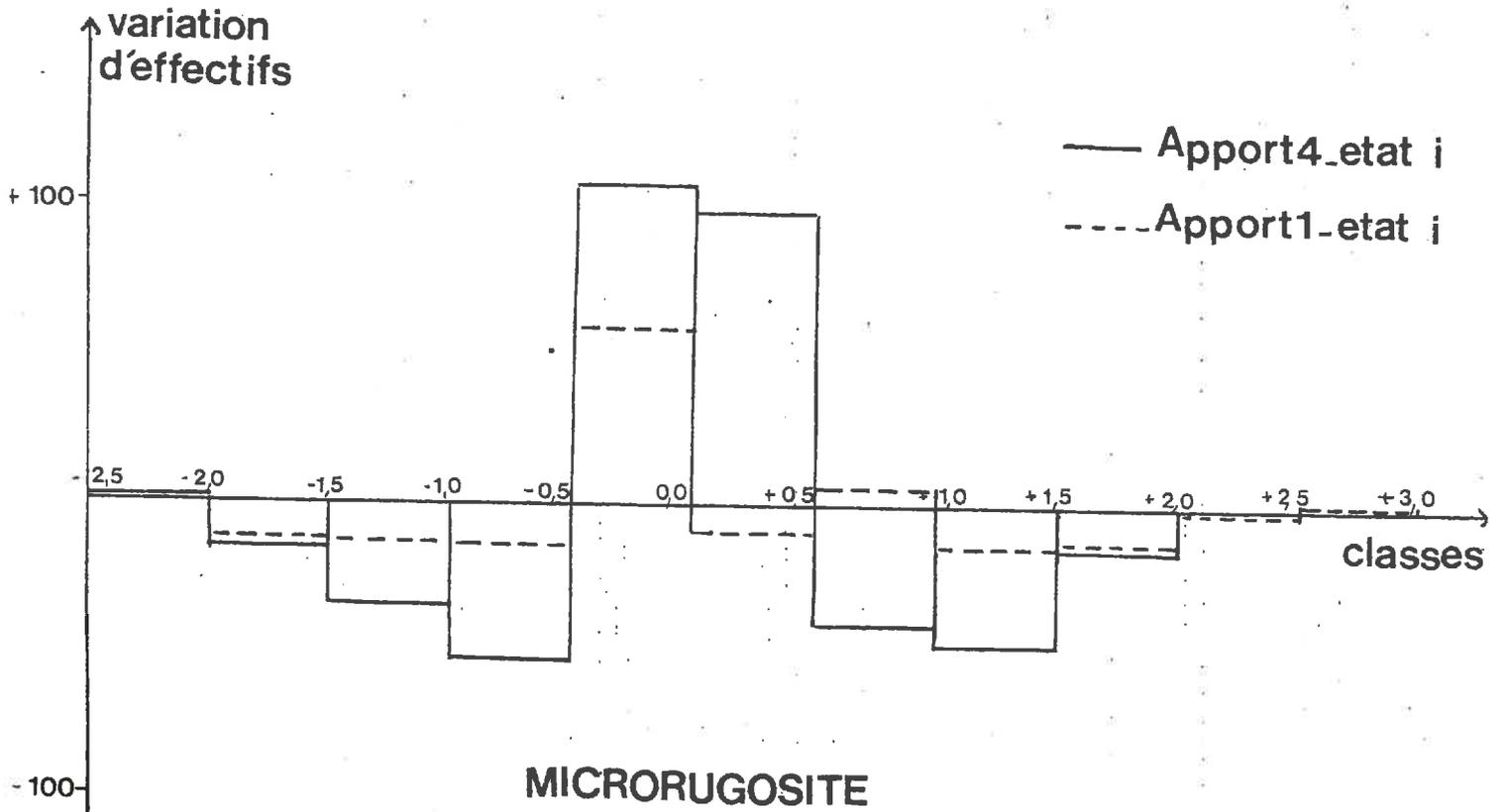
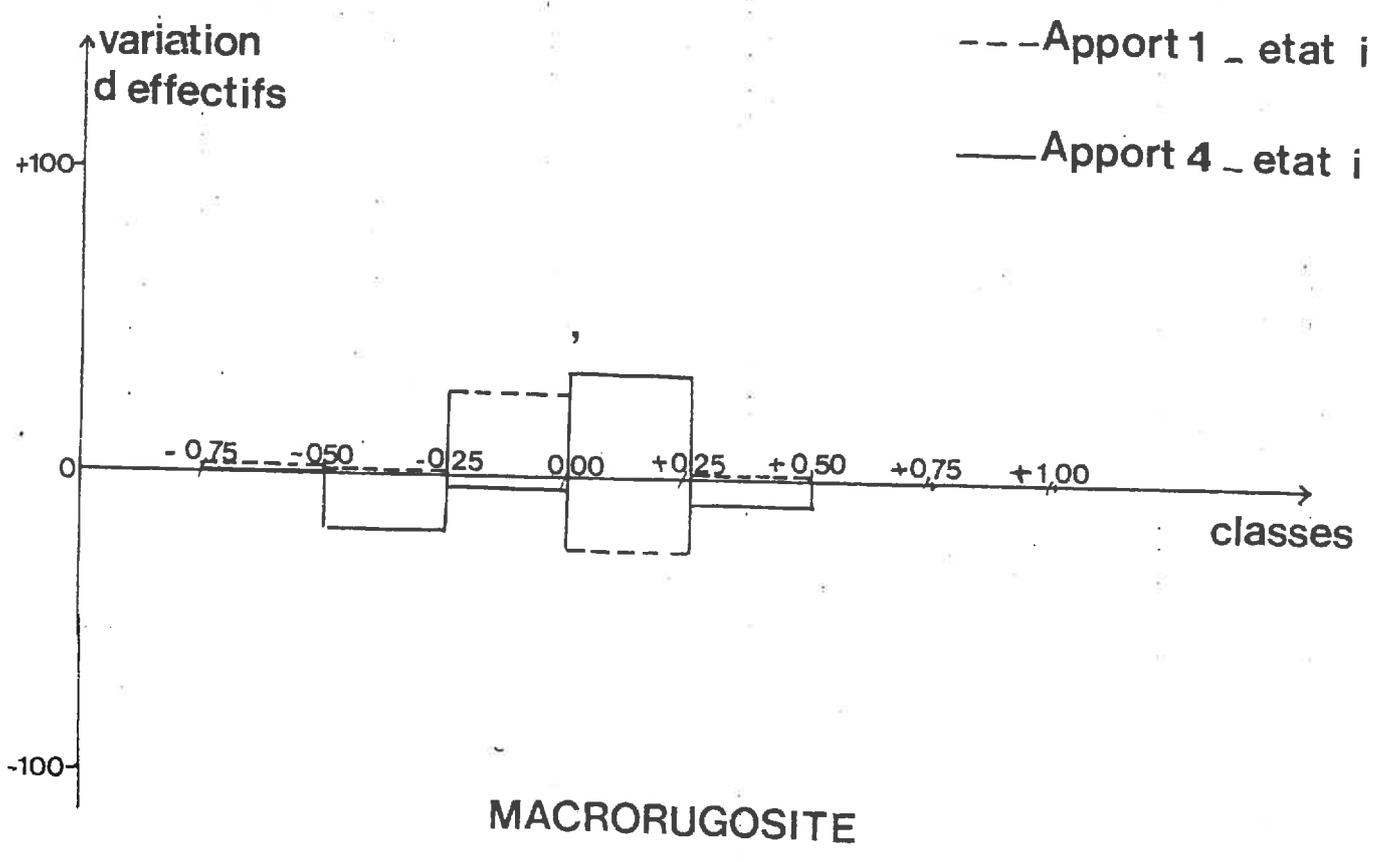
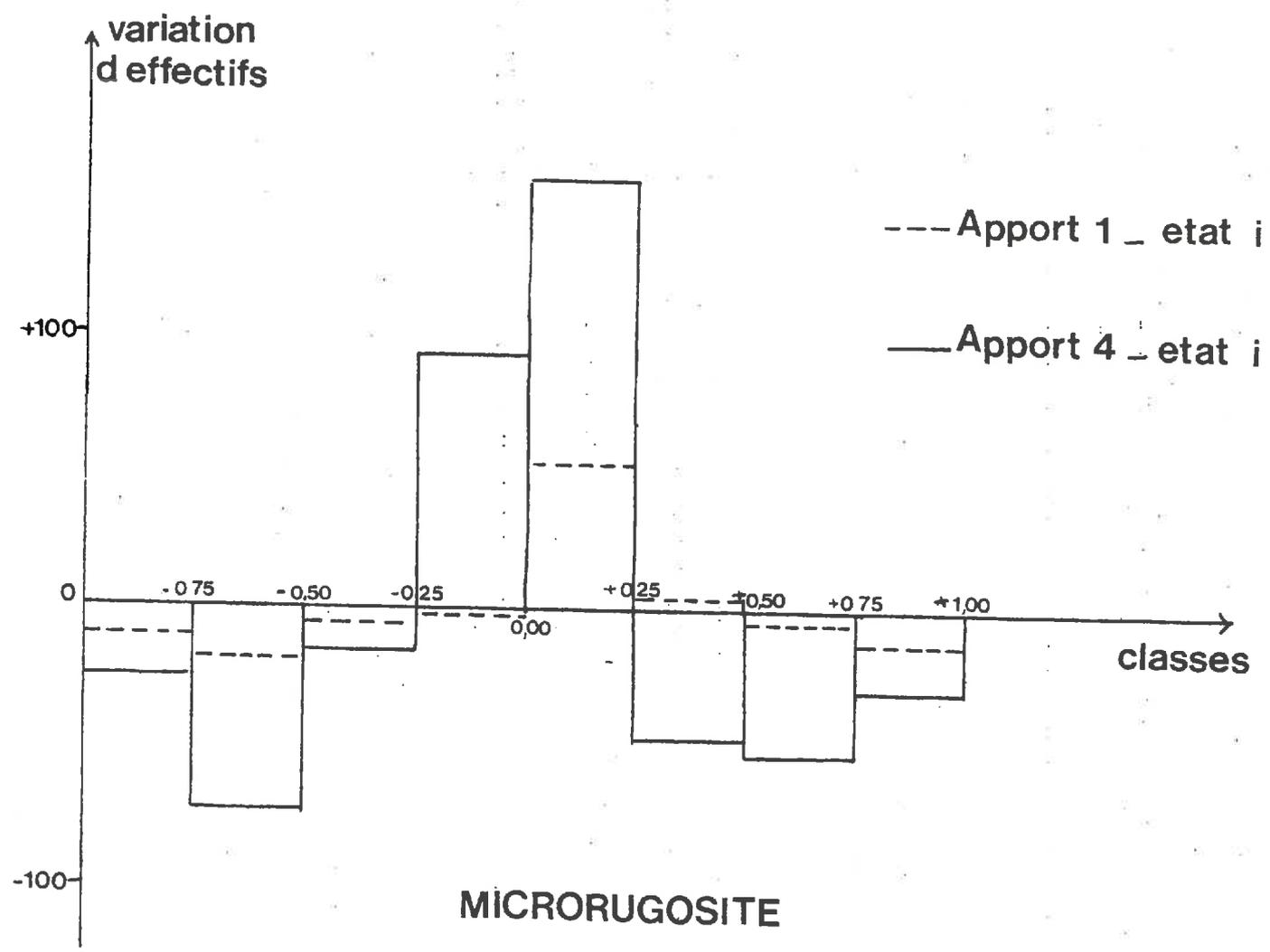


Figure n° IV.6 : variation des effectifs des classes des histogrammes pentes entre état initial et apport 1 ou 4 (azimuth Est).



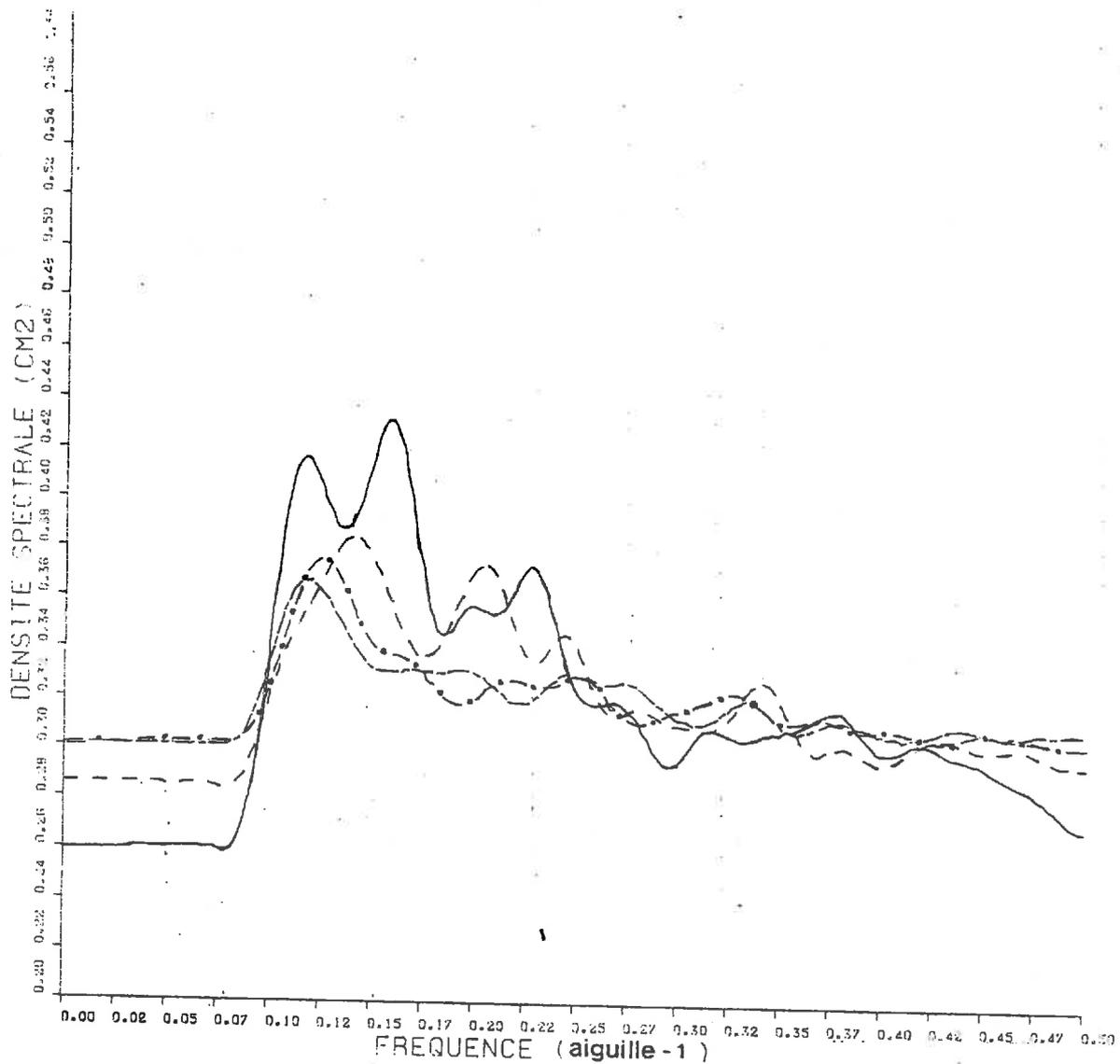


Figure n° IV.7 :

DENSITE SPECTRALE SITE C
MICRORUGOSITE
AZIMUTH E/O
FREQUENCE FILTRE F=0.028

- ETAT INITIAL
- - - PLUIE CUMULEE 15 MM
- · - PLUIE CUMULEE 47 MM
- · · PLUIE CUMULEE 80 MM

- une phase 1 qui se caractérise par la naissance et l'extension de croûtes structurales. Celles-ci se créent par colmatage des interstices entre fragments des zones les plus fines. Il y a donc baisse de rugosité par remplissage des vides et émoussement des mottes. La taille des fragments impliqués (terre fine) et les distances sur lesquelles se réalisent les transferts de matériaux coïncident parfaitement avec l'ordre de grandeur des périodes associées à notre composante micro-rugosité.
- la phase 2 se caractérise par des transferts de matériaux entre des zones de départ, dans notre cas les mottes des monticules créées par le travail du sol, et des zones d'arrivée dans les dépressions créées par le passage des dents. Les différences d'altitude entre chaque zone et les distances sur lesquelles se réalisent ces transferts (de l'ordre du décimètre) sont de l'ordre de grandeur des périodes associées à notre composante macro-rugosité. Celle-ci doit donc évoluer, en termes de H_{RMS} ou σ_s , avec la progression de la dégradation en phase 2.

IV.1.3. Evolution de la rugosité de la surface du sol en termes de fréquences.

Les courbes des figures n° IV.7 et IV.8, p. 54,55 retracent l'évolution des densités spectrales associées à chaque étape de la dégradation réalisée pour deux profils de micro-rugosité :

- B azimuth Nord-Sud
- C azimuth Est-Ouest

Qualitativement, chaque courbe se caractérise par :

- la présence de pics plus ou moins renforcés traduisant, d'après nos essais de simulation, la présence de phénomènes périodiques plus ou moins cachés dans le profil brut (voir figure n° IV.7 et IV. 8, p. 54,55) ou attachés à des fractions de périodes de la macro-rugosité (voir chapitre III).
- le degré de signification que l'on peut accorder à chacun de ces lobes reste très incertain. La sensibilité de cette méthode par rapport à la longueur d'échantillonnage reste à tester : une augmentation de la taille de l'échantillon doit se traduire par la suppression de lobes secondaires attachés aux fractions de périodes (CHATFIELD, 1983).

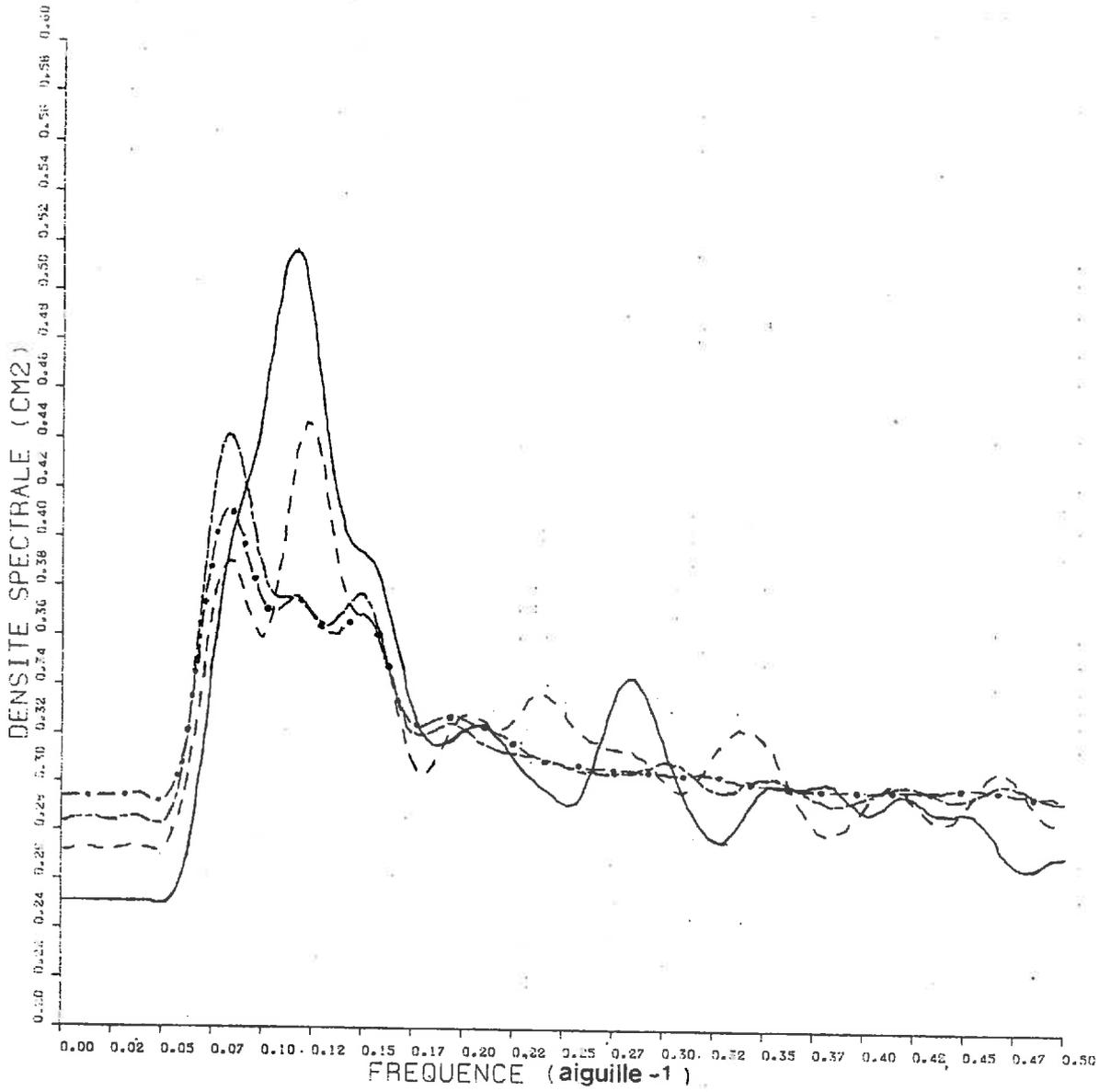


Figure n° IV.8 :

DENSITE SPECTRALE SITE B
 MICRORUGOSITE
 AZIMUTH N/S
 FREQUENCE FILTRE F=0.042

- ETAT INITIAL
- - - PLUIE CUMULEE 16 MM
- · - PLUIE CUMULEE 47 MM
- · · PLUIE CUMULEE 80 MM

- le filtrage se traduit par la présence de ce que l'on peut appeler un "bruit de fond" aux fréquences comprises entre 0 et la borne de filtrage, donc aux périodes variant de la longueur totale du transect à celle du filtre. En effet, il existe une "valeur résiduelle" des densités spectrales qui correspond à la valeur :

$$\frac{1}{\pi} \left[\lambda_0 c_0 + \sum_{k=1}^M \lambda_k c_k \right] = \frac{1}{\pi} \left[c_0 + \sum_{k=1}^M \lambda_k c_k \right]$$

Celle-ci dépend à la fois :

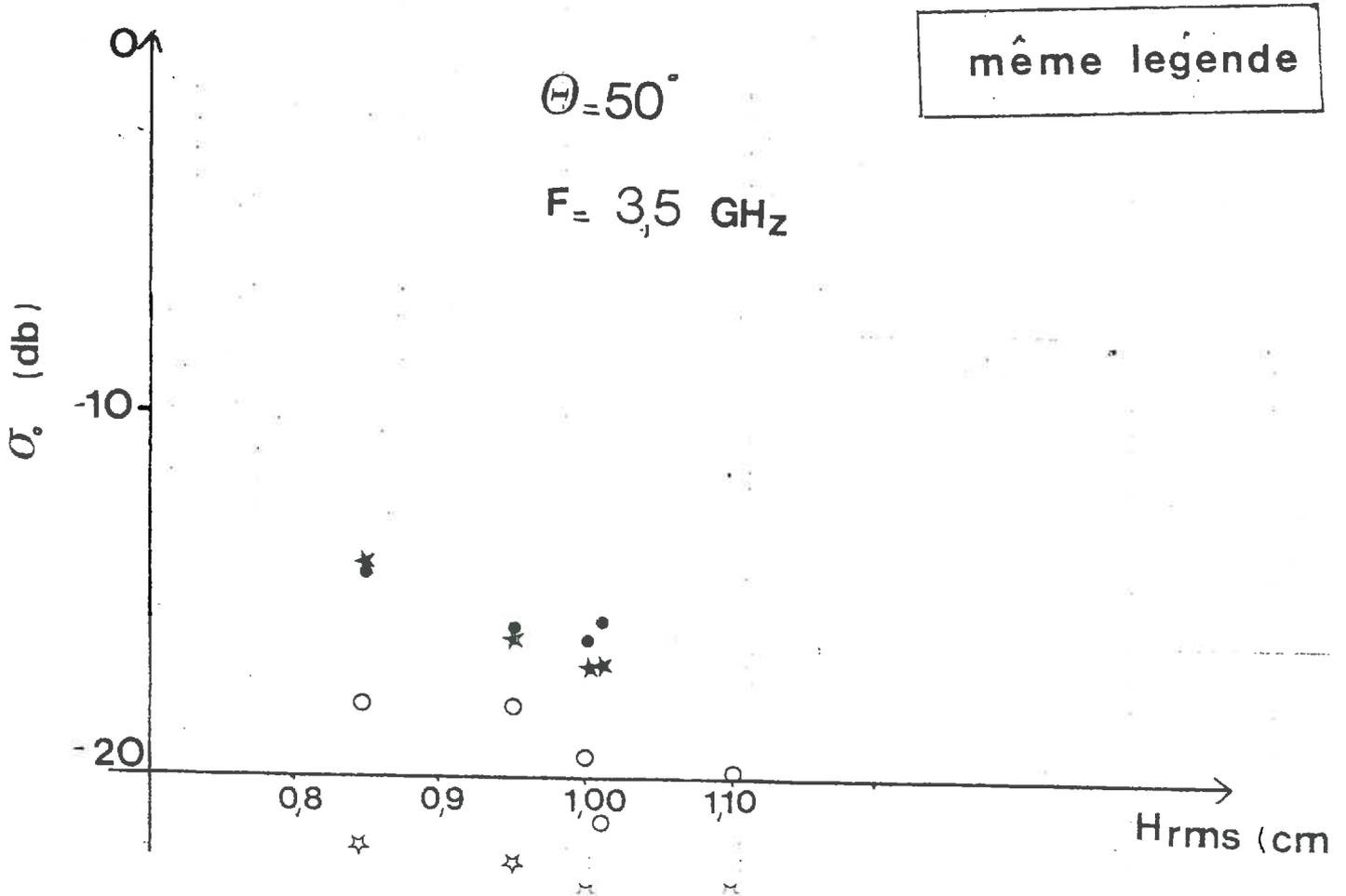
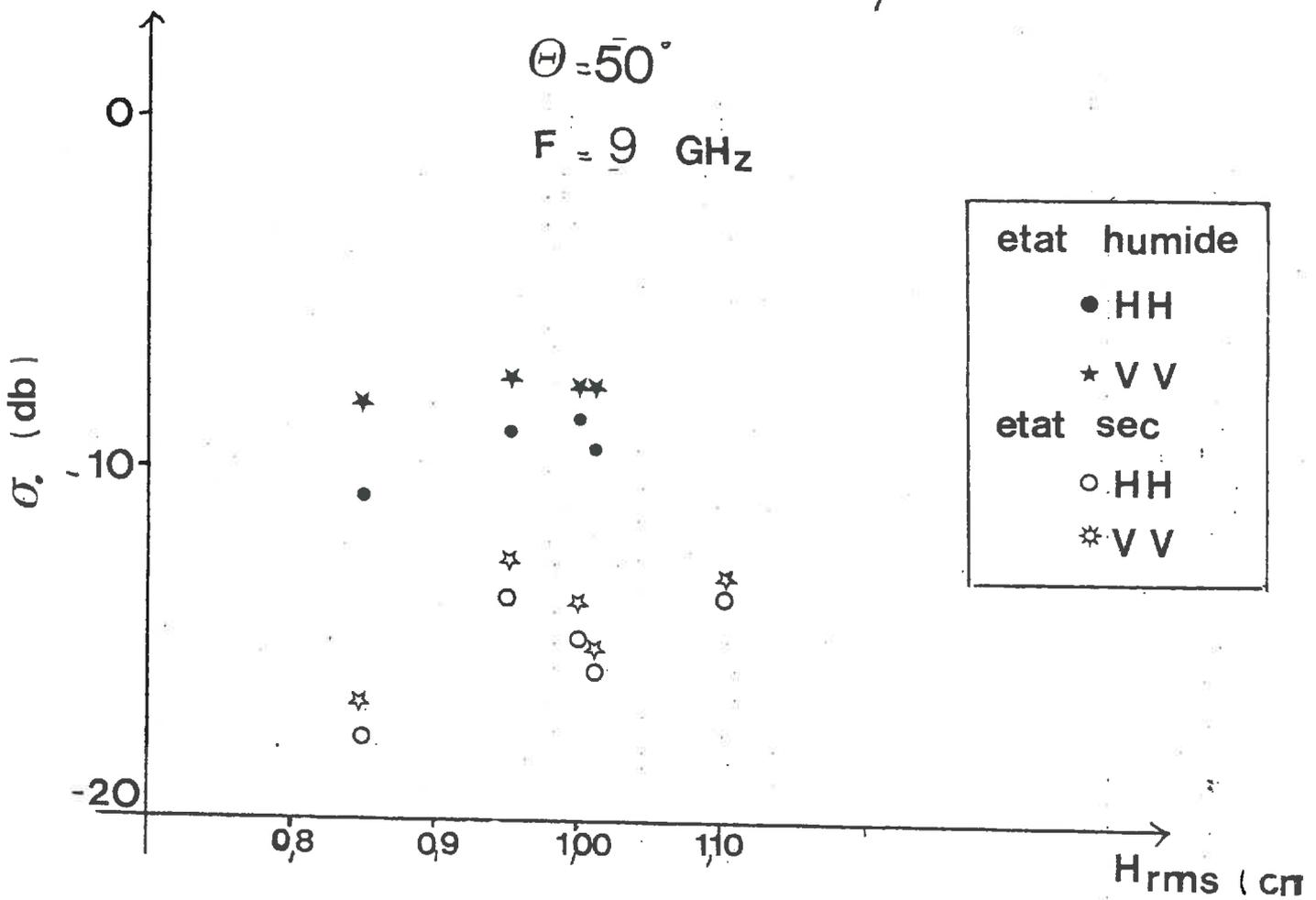
- * de la variance C_0 des cotes du profil,
- * de la fonction d'autocovariance C_K pondérée par une constante λ_K .

Qualitativement, la dégradation se manifeste par :

- une augmentation du bruit de fond résiduel. Sachant que la variance des cotes associée à chaque profil diminue en cours de dégradation, cette remontée de la courbe ne peut s'expliquer que par augmentation de la fonction d'autocovariance. Intuitivement, ceci est interprétable : la dégradation se traduit par une simplification de la structure du profil par suppressions de certaines échelles de rugosité. Les cotes peuvent donc apparaître comme de plus en plus corrélées.
- atténuation des pics moyennes fréquences. Les structures périodiques correspondantes existent donc toujours, mais leur poids vis-à-vis de la variance totale du profil apparaît diminué.
- étalement puis disparition des fluctuations hautes fréquences à partir de $f = 0,25$ "aiguille⁻¹" soit $t = 2$ cm pour le site B et $t = 1,5$ cm pour le site C. Nous entendons par étalement et disparition :

* une baisse de la part de variance du profil expliquée par ces fréquences ou périodes. Ceci est interprétable par disparition progressive des petites variations de cotes associées à des petites périodes. La valeur des densités spectrales hautes fréquences tend alors vers celle du "bruit de fond" mis en évidence aux plus basses fréquences : les petites périodes n'ont plus de signification dans le profil considéré, compte tenu de la résolution de l'aspérimètre. Un aspect intéressant à rechercher est la correspondance entre valeurs de D_{min} et valeur limite de la fréquence au-delà de laquelle plus aucune fluctuation de la courbe de densités spectrales n'est observée : d'une "pluie" à l'autre et d'un site à l'autre, rien de clair n'apparaît.

56 Figure n° IV-9: Variations de σ_0 en fonction de H_{rms}
(Azimuth Nord - Sud)



- En l'état actuel de nos connaissances, cette méthode paraît très prometteuse :
- elle permet de décrire la géométrie de surface en tenant compte du caractère périodique des différentes origines (taille des éléments structuraux, largeur des outils). Elle permettrait de décrire finement l'évolution du profil en cours de dégradation et de savoir quelles composantes sont prioritairement affectées.
 - elle apparaît très sensible puisque des modifications des courbes se visualisent parfaitement en cours de dégradation alors que la variation de la hauteur RMS est très faible. Ceci est à discuter ultérieurement en fonction de la signification des changements observés.
 - enfin, l'interprétation qualitative n'est qu'une étape : seul un traitement quantitatif de telles données permettra d'apporter de nouveaux éléments dans la description, voire la modélisation d'une rugosité de surface du sol.

IV.2. Résultats des mesures radar.

Compte tenu du nombre important de configurations de mesures, nous avons choisi de représenter quelques courbes parmi les plus significatives. Celles-ci sont regroupées dans les figures n° IV.9, IV.10, IV.11 où sont représentées les évolutions du coefficient de rétrodiffusion σ_0 en fonction de la hauteur RMS. Nous avons choisi ce dernier critère du fait de sa large utilisation dans la littérature : les comparaisons avec les gammes de rugosité sur lesquelles travaillent les auteurs précédents en sont facilitées.

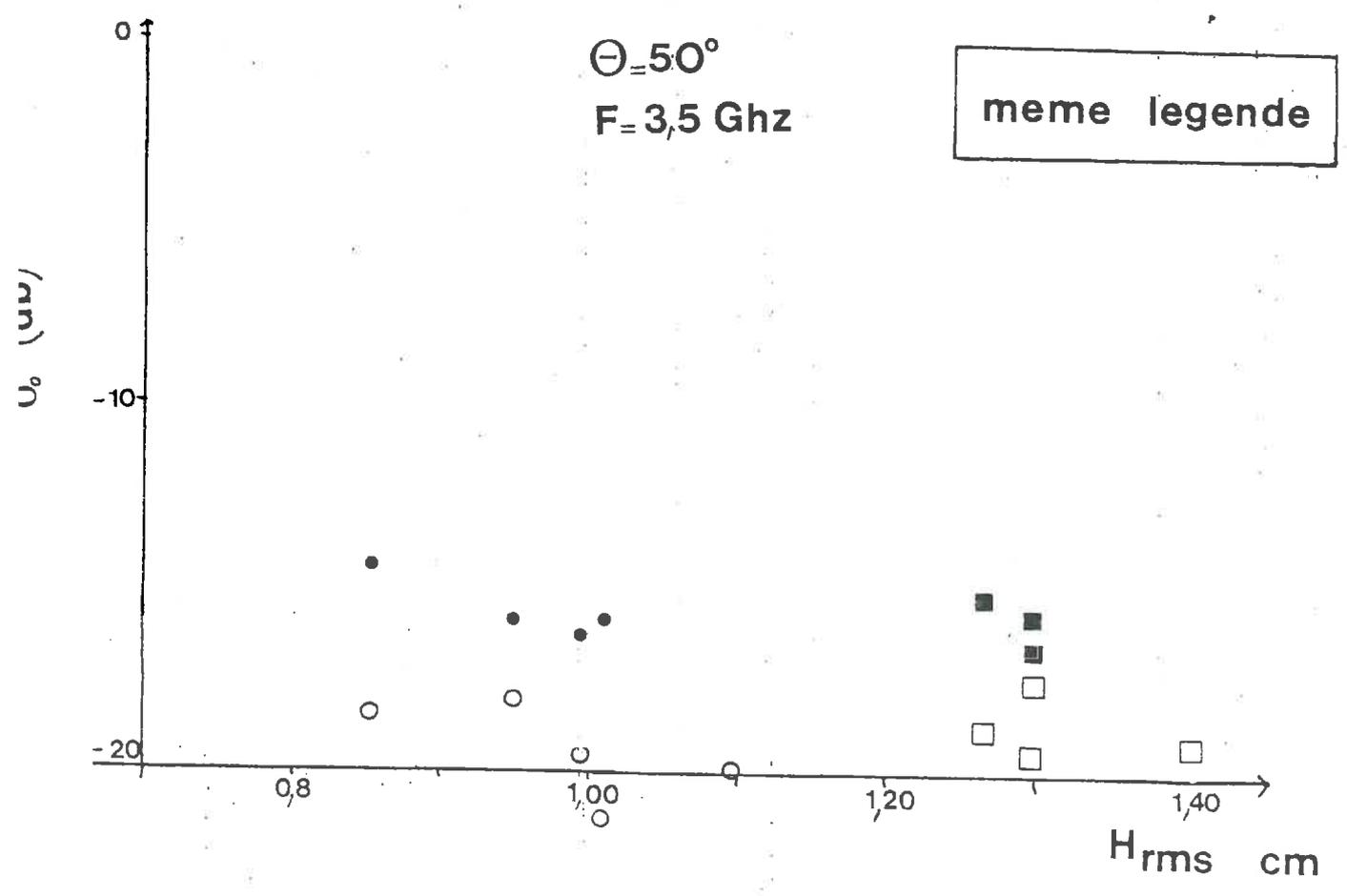
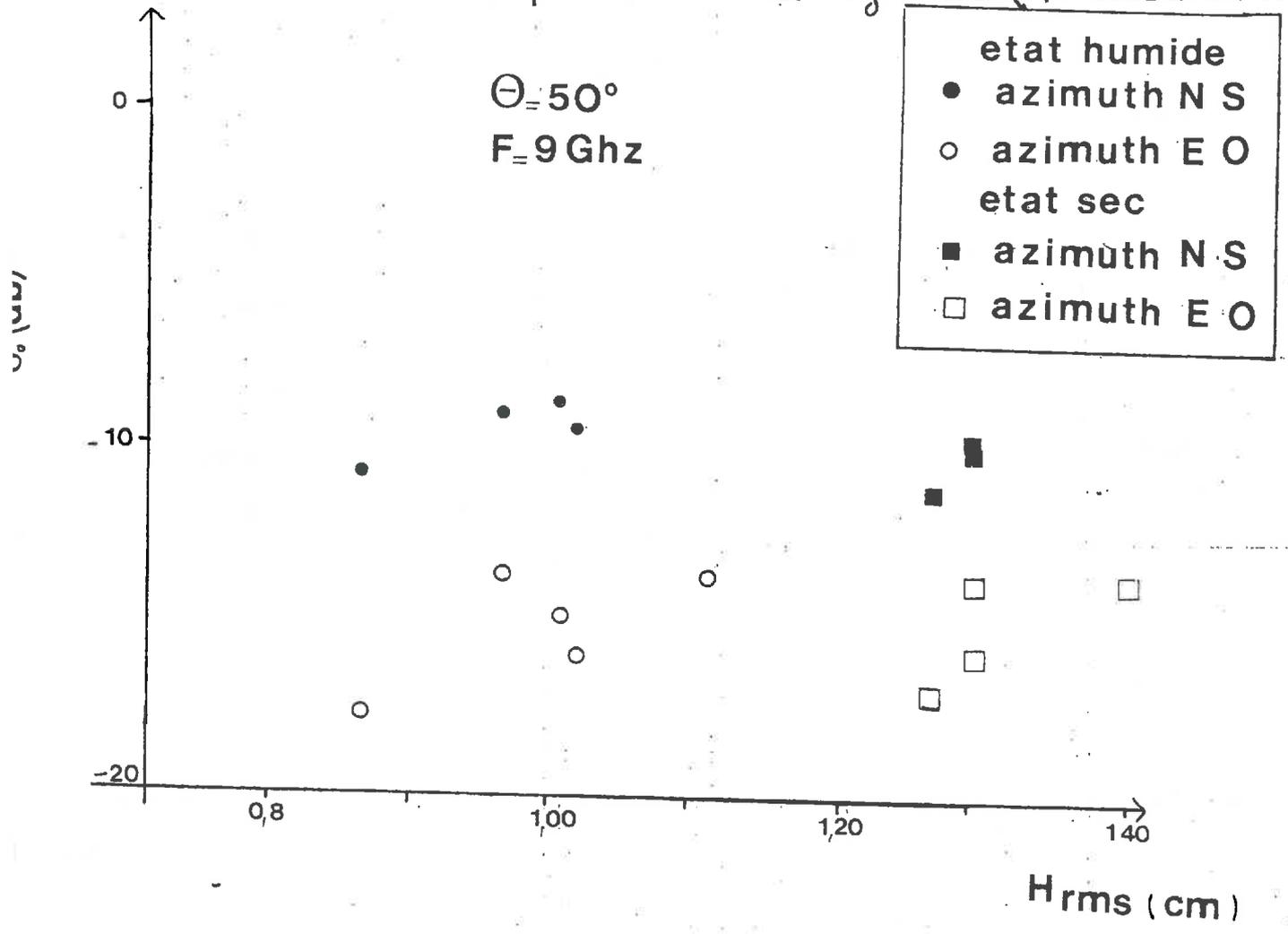
L'évolution des profils d'humidité pondérale associée à chaque apport d'eau pour les états dits "secs" et "humides" est reportée dans les figures n° IV.14, IV.15, p. Ceux-ci seront commentés ultérieurement en liaison avec les courbes des mesures radar. Ajoutons simplement pour l'instant qu'à des états "sec" et "humide" correspondent des humidités volumiques de surface de l'ordre, respectivement, de 3 % et 35 % en moyenne (les profils de densité apparente sont reportés dans la figure n° IV.16).

IV.2.1. Mesures radar : influence de l'incidence.

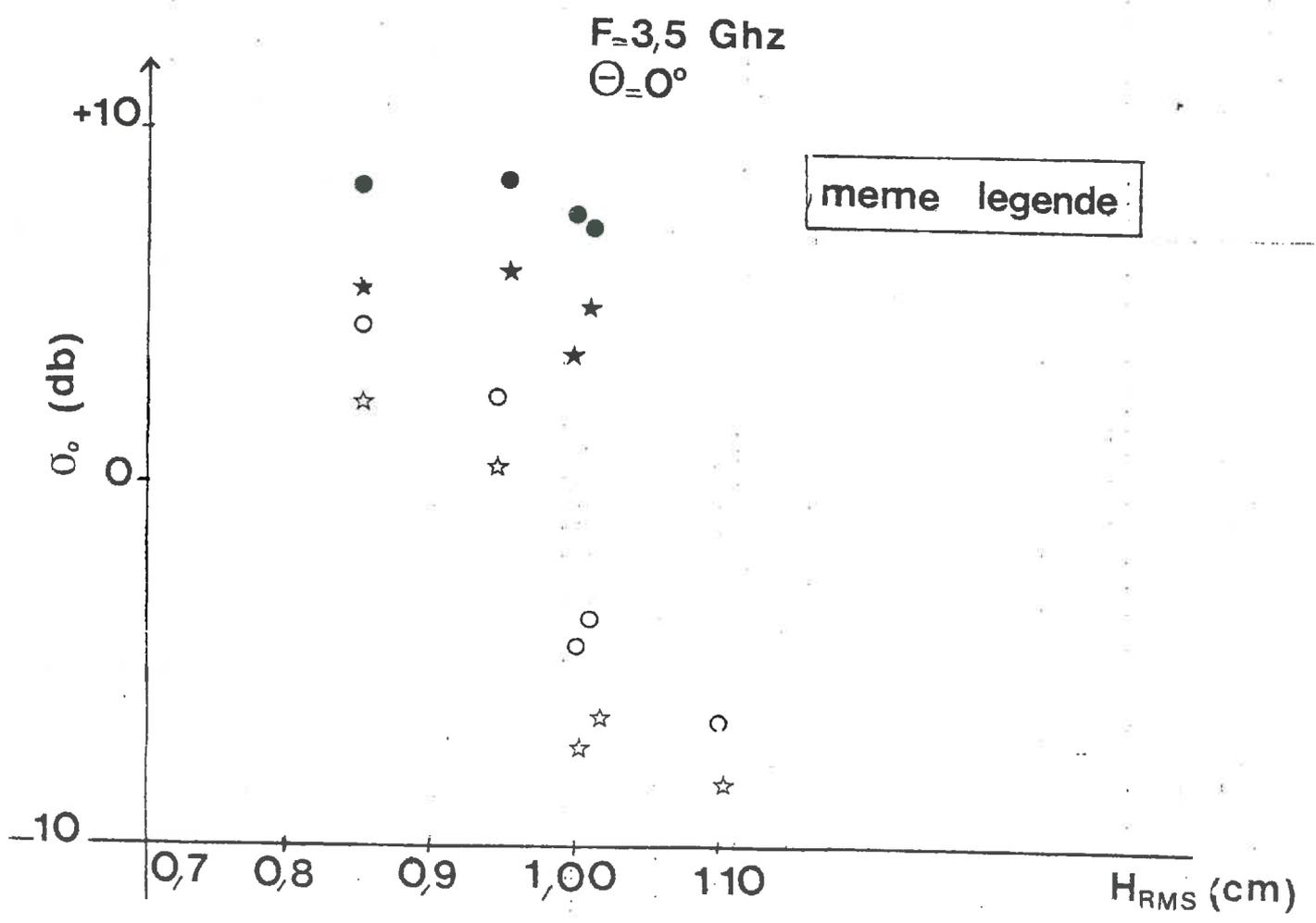
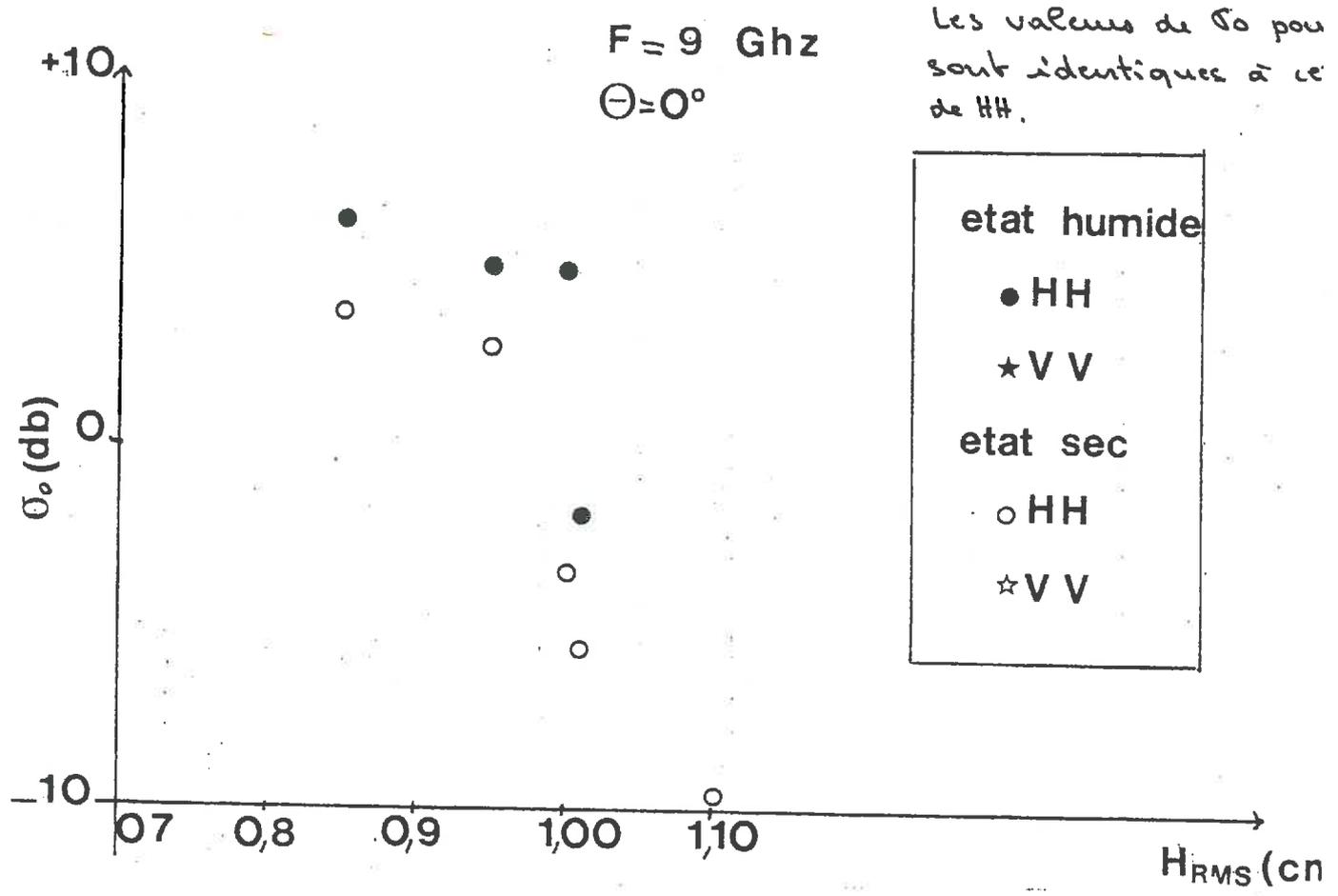
Les courbes associées aux mesures effectuées à 50° sont présentées dans les figures n° IV.9 et IV.10, p. 57,58 :

- quels que soient l'azimut, l'état d'humidité de la surface du sol, la fréquence et la polarisation utilisées, l'évolution du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la dégradation morphologique ne présente aucune tendance remarquable.

Figure n° IV-10 : Comparaison des variations de T_0 en fonction de H_{rms} pour les deux Azimuts (polarisation HH)



53
 Figure n° IV-11 : Variations de σ_0 en fonction de H_{RMS}
 (Azimuth Nord-Sud)



la figure n° IV.10 compare les résultats des deux azimuths. Les valeurs de σ_0 se révèlent pratiquement identiques et suivent les mêmes fluctuations pour les deux azimuths. Or, la rugosité de surface appréhendée par la hauteur RMS révélait à l'état initial et à chaque étape de la dégradation une différence de niveau suivant la direction d'observation. Aussi, soit σ_0 ne distingue pas une variation de 3 millimètres ou est plus sensible à une caractéristique de la rugosité de surface telle que l'écart-type des pentes, soit l'influence de la configuration de surface est masquée par un autre effet.

Les courbes associées aux mesures effectuées à 0° sont représentées dans la figure n° IV.11 : les résultats les plus nets se situent à la fréquence de 9 GHz où croît avec la diminution de H_{RMS} . L'effet humidité se manifeste dans ce cas par un décalage de la courbe vers le haut, ce qui concorde avec les résultats exposés dans le chapitre II : une augmentation de l'humidité de l'horizon superficielle du sol ne change en rien la forme des courbes σ_0 fonction de l'angle d'incidence mais se manifeste uniquement par une augmentation du coefficient de rétrodiffusion.

A 3,5 GHz (les résultats à 4,5 GHz sont similaires), l'interprétation se révèle délicate :

- à l'état sec, une évolution est encore visible même si elle est atténuée par rapport à la fréquence précédente.
- à l'état humide, on ne peut conclure : tout dépend du degré de confiance que l'on attribue au point correspondant au premier apport d'eau pour décider de la tendance de la courbe.

Les courbes de la figure n° IV.1 , p. 60 représentent les variations de σ_0 en fonction de l'indicateur de dégradation morphologique D_{min} pour l'incidence 0° : rien de cohérent ne se dégage. En effet :

- a l'état sec, σ_0 augmente avec la croissance de D_{min} ,
- à l'état humide, par contre, aucune conclusion ne peut être tirée.

IV.2.2. Mesures radar : influence de la fréquence.

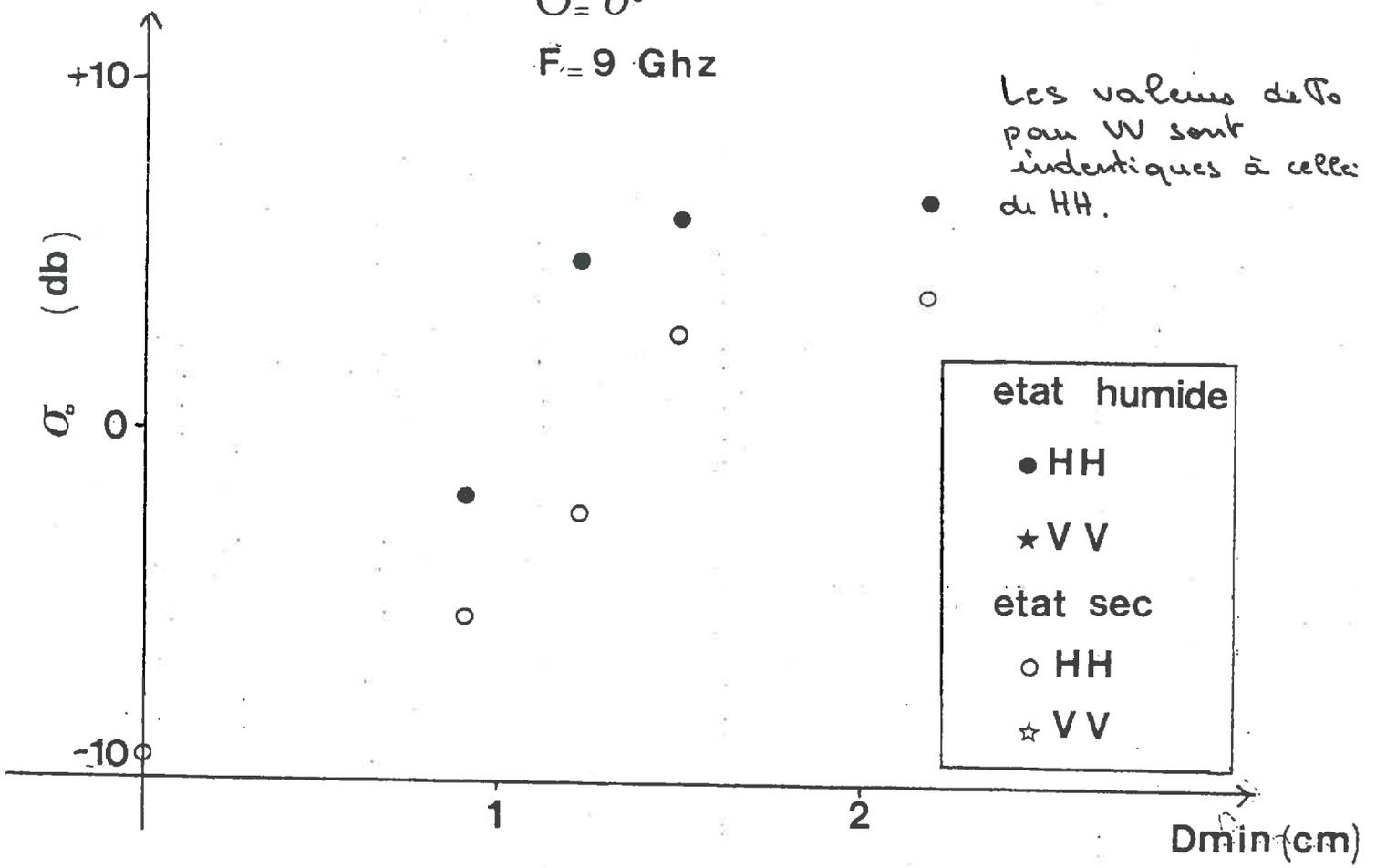
La comparaison portera sur les courbes associées à 3,5 et 9 GHz, le comportement de σ_0 à 4,5 GHz étant semblable à celui de 3,5 GHz.

Les courbes de la figure n° IV.13 comparent les comportements de σ_0 aux deux incidences pour chaque fréquence : en effet, la différence brute entre les valeurs

Figure n° IV-12: Variations de σ_0 en fonction de D_{min} (Azimuth Nord - Sud)

$\Theta = 0^\circ$
 $F = 9 \text{ Ghz}$

Les valeurs de σ_0 pour VV sont identiques à celle de HH.



meme legende

$\Theta = 0^\circ$
 $F = 3, \text{ Ghz}$

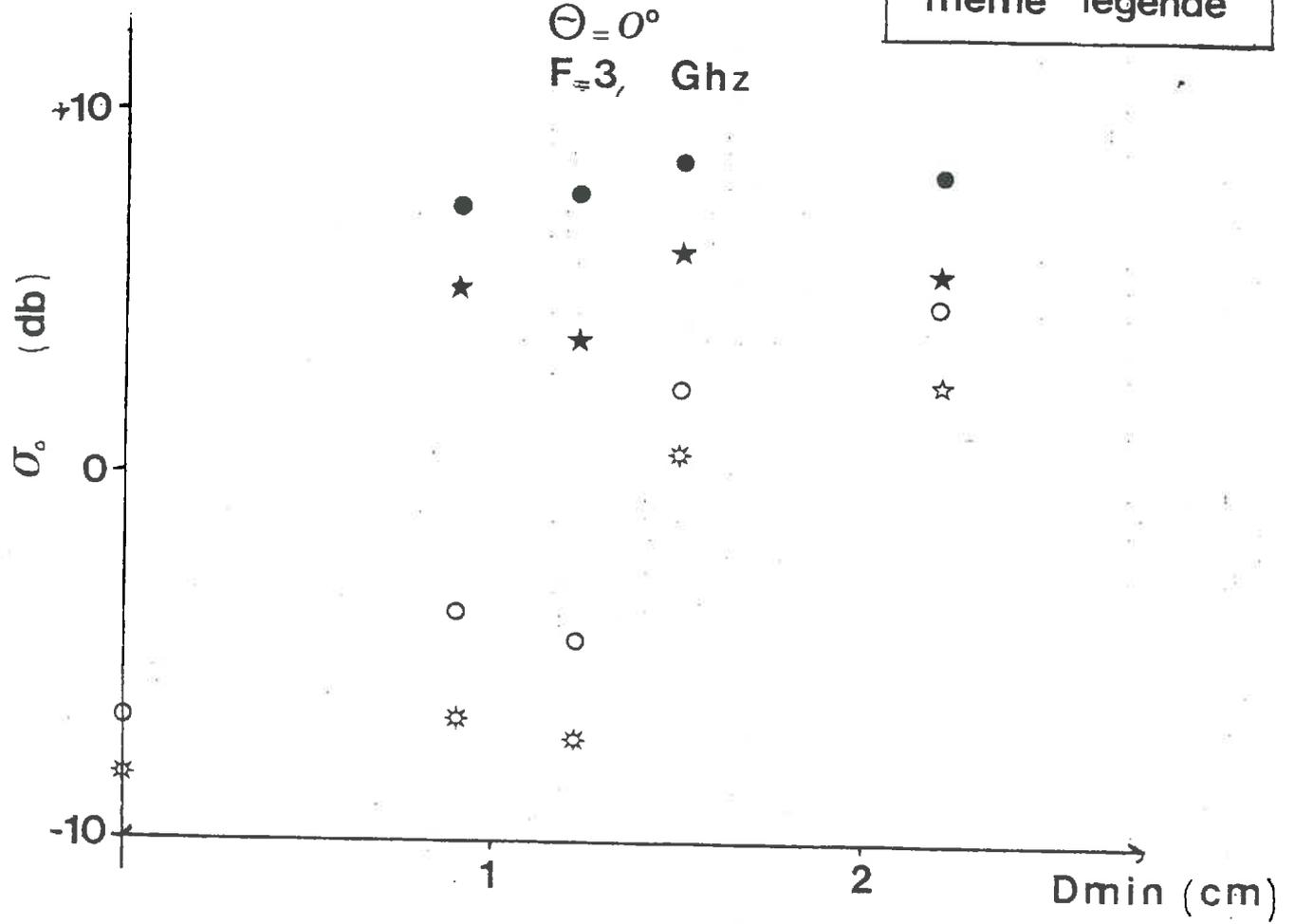
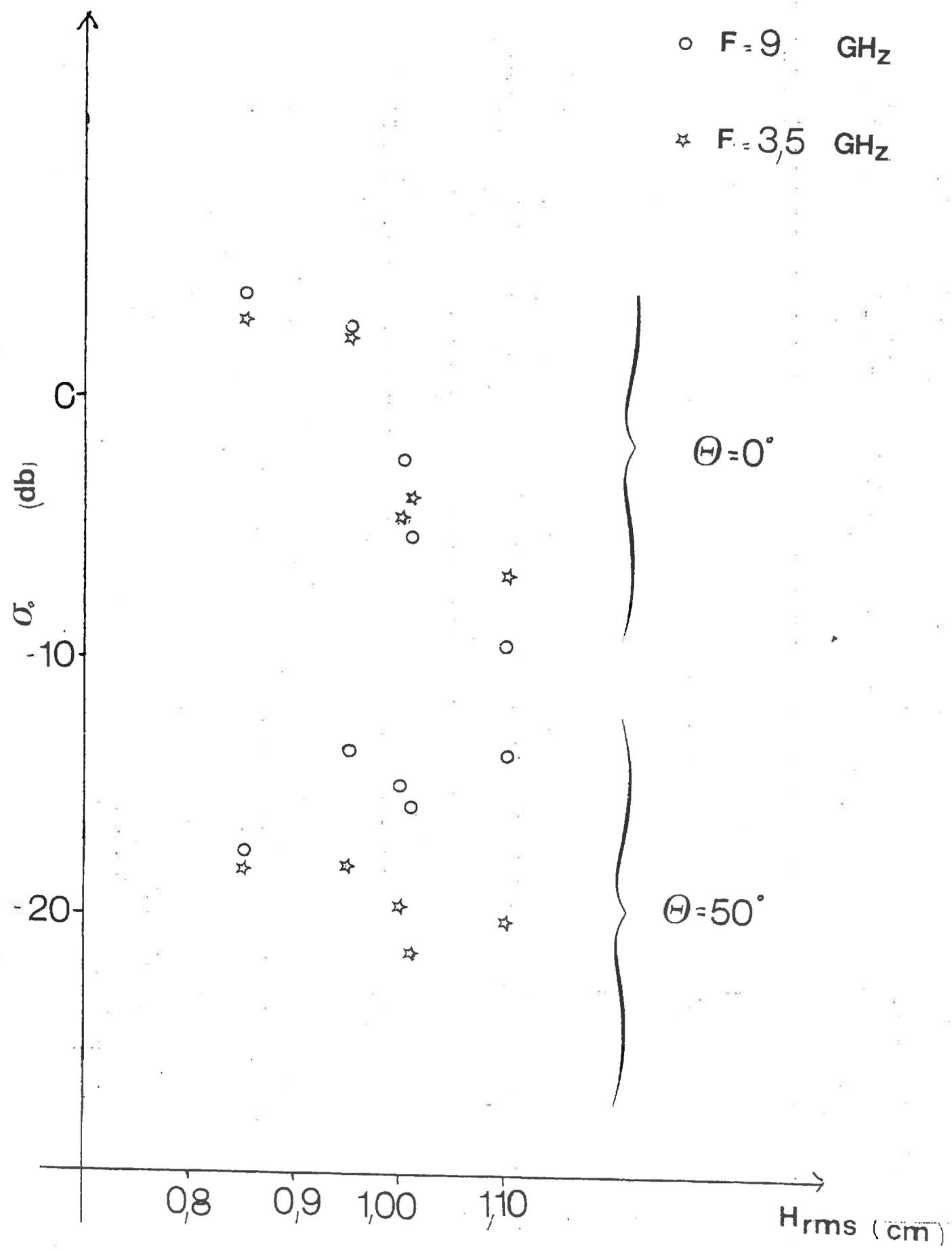


Figure n° IV-13: Effet Fréquence sur les variations de σ_0 en fonction de H_{rms} .
(Azimuth Nord-Sud)



de associées à 0° et 50° peut être considérée comme un "estimateur" du comportement diffus ou spéculaire de σ_0 (voir chapitre II). La variation relative de la différence considérée entre état final et état initial de la dégradation réalisée est beaucoup plus importante pour 9 GHz : augmentation de la valeur initiale d'un facteur 5 (tout juste 2 pour 3,5 GHz). Compte tenu de la gamme de variation de rugosité réalisée, l'utilisation d'une forte fréquence est donc préférable vis-à-vis de la sensibilité de à cette dégradation.

Cette différence de comportements peut s'interpréter : compte tenu de la valeur de H_{RMS} de départ (1,10 cm) et des valeurs des critères de RAYLEIGH associées à chaque fréquence (voir tableau n° III; p. 41) :

- à 3,5 GHz, H_{RMS} est inférieure ou égale à $\frac{\lambda}{8 \cos \theta}$: le comportement de est déjà spéculaire.
- à 9,0 GHz, H_{RMS} est supérieure à $\frac{\lambda}{8 \cos \theta}$: le comportement est plutôt de type diffus. La "marge" de progression vers un comportement spéculaire apparaît donc beaucoup plus importante, la sensibilité plus importante de à la diminution de rugosité réalisée peut donc s'expliquer.

IV.2.3. Mesures radar : influence de la polarisation.

En fonction de H_{RMS} , les comportements HH et VV sont similaires pour toutes les courbes quels que soient l'incidence, la fréquence et l'état d'humidité de surface du sol : la différence de polarisation induit simplement un décalage entre les valeurs des points HH et VV d'un même apport, décalage qui reste stable au cours de la dégradation. De plus rien de cohérent n'apparaît : pour un même azimuth, les différences brutes varient avec l'incidence, la fréquence.

IV.2.4. Discussion.

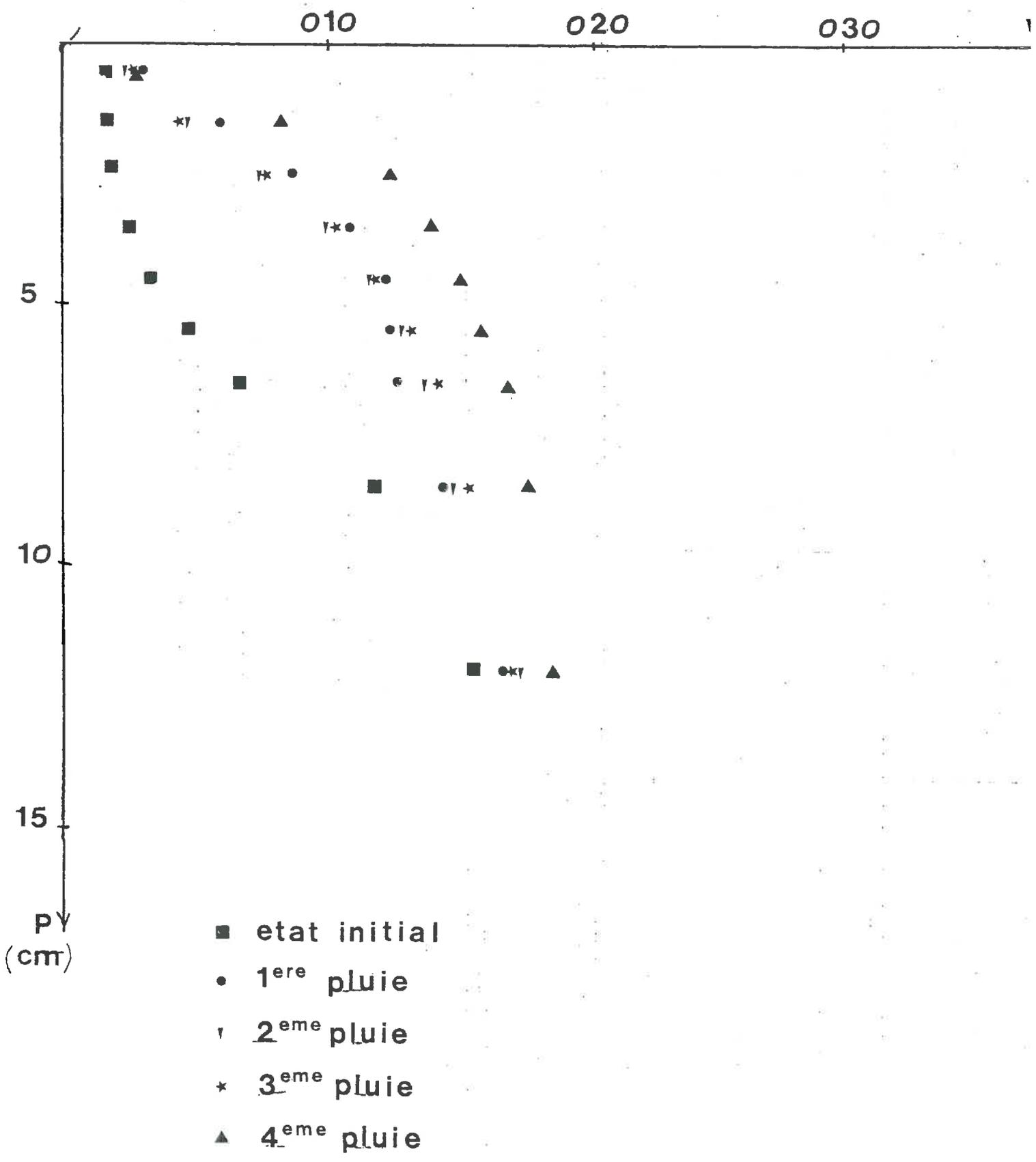
Avant toute chose, le premier élément à considérer est l'insuffisance de la dégradation structurale réalisée : en effet, la possession d'une série de mesures en pleine phase 2 aurait permis de juger plus sûrement de la sensibilité d'une évolution de σ_0 en fonction de la diminution de rugosité de surface pour chaque configuration radar.

Cette remarque étant faite, plusieurs éléments d'hypothèses peuvent être avancés pour discuter de nos résultats. Nous les rappelons brièvement :

21

Figure n° IV.14: Evolution des profils hydriques au cours de la dégradation réalisée:

"etat sec"



- à 50°, σ_0 paraît indépendant de la dégradation et donc diminution de la rugosité associée.
- à 0°, l'interprétation de la variation de σ_0 en fonction de la dégradation est contradictoire suivant l'humidité du profil.

Deux hypothèses générales peuvent être avancées :

- soit σ_0 n'est pas sensible à la gamme de variations de rugosité observée sur le terrain, et dans ce cas, l'évolution observée à incidence normale en conditions sèches résulte d'une confusion d'effets.
- soit σ_0 est sensible à 0° à la dégradation de surface réalisée et les mesures en conditions humides sont par conséquent masquées par un effet de nature indéterminée pour l'instant, ou sujette à caution (erreurs de mesure). Vis-à-vis de ce dernier fait, l'absence de points humides à l'état initial est un manque important pour juger de l'évolution des courbes.

Dans le cadre de la première hypothèse, une confusion possible d'effets concerne les variations des profils hydriques lors de la dégradation : en conditions sèches, l'onde pénètre plus profondément et a pu être réfléchi en atteignant une surface caractérisée par une variation brutale de teneur en eau (type MULCH). Les profils hydriques sont représentés dans la figure n° IV.14. Les profils associés aux apports 1, 2 et 3, pratiquement identiques, contredisent cette hypothèse : les variations de σ_0 entre l'apport 1 et 3 sont réelles à incidence normale.

Une autre explication peut être proposée. Elle résulte directement des conditions expérimentales : la présence à l'état sec d'un réseau dense de fissures à la surface du sol. Celles-ci s'expliquent par la texture du matériau alliée à une évapotranspiration d'été très importante. Au fur et à mesure qu'avancait la dégradation, le réseau devenait plus dense et les fissures plus profondes :

- les mailles du réseau correspondaient aux sillons créés par le double passage de cultivateur (voir photographies des figures n° III, p.35,36).
- la profondeur des fissures les plus importantes atteignait une dizaine de centimètres. Ces fissures n'ont pas été considérées lors des mesures de rugosité de surface car nous cherchions à prendre en compte les variations de rugosité imputables uniquement à la battance. Or, l'incidence normale est la condition optimale pour la perturbation des ondes radar par ces fissures : ceci se traduit

par une augmentation de rugosité de surface en terme d' H_{RMS} par exemple. Il s'agit là d'une explication possible vis-à-vis :

- des seules variations de σ_0 observées justement à l'état sec sous incidence normale.
- de l'absence de variations de σ_0 en conditions humides (absence de fissures). Dans ce cas, le radar n'est pas sensible à la gamme de diminutions de rugosité réalisée.
- de l'absence de variations σ_0 à 50° quelle que soit la teneur en eau du profil : en effet, à 50° , la "contribution" des fissures en termes de différences de cotes à la rugosité de surface est nulle.

Figure n° IV.15: Evolution des profils hydriques au
 cours de la dégradation réalisée:
 "etat humide"

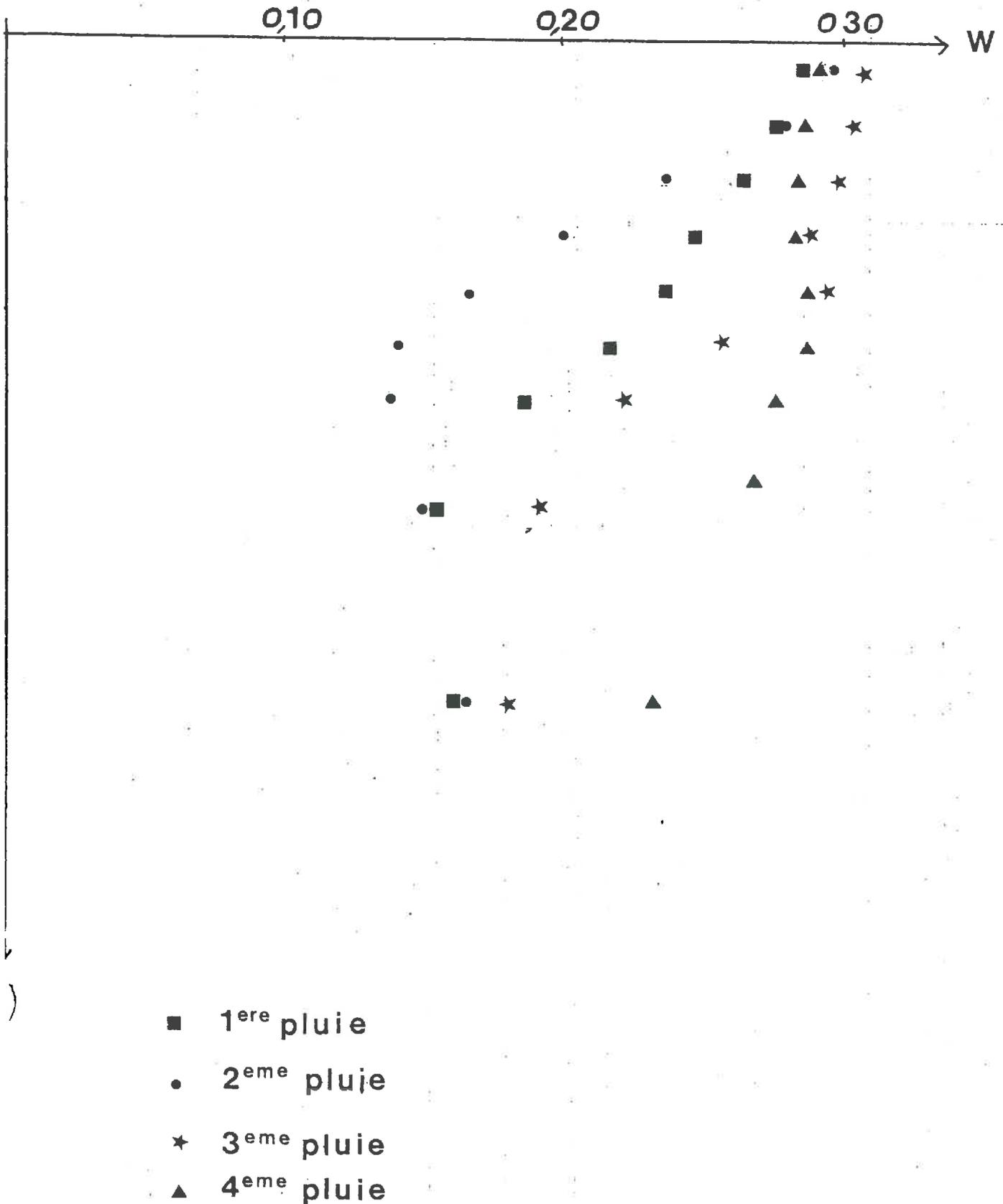
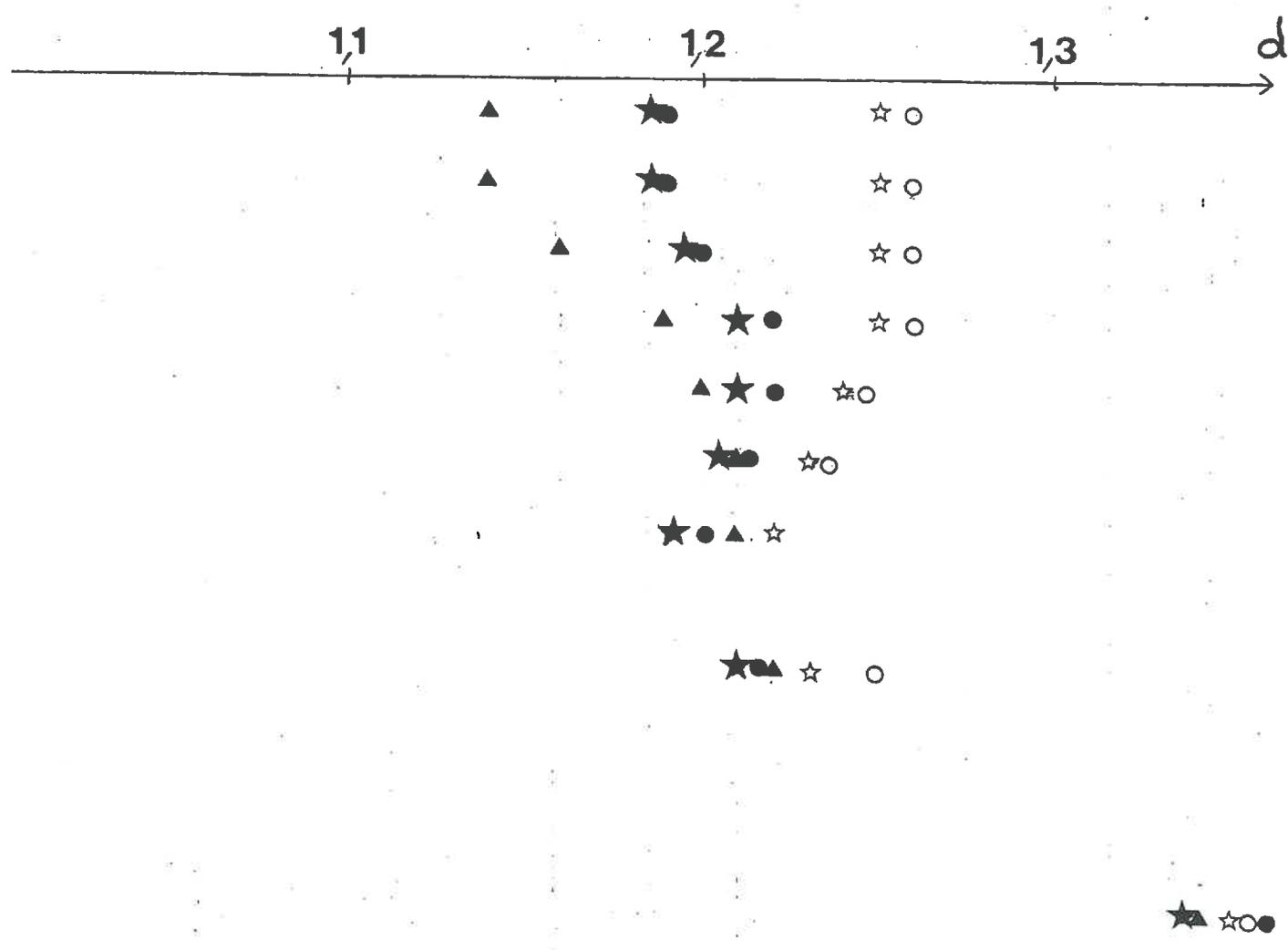


Figure n° IV.16: Evolution des profils de densité apparentes au cours de la dégradation réalisée



- ▲ état initial
- 1^{ere} pluie
- ★ 2^{eme} pluie
- ☆ 3^{eme} pluie
- 4^{eme} pluie

CONCLUSION.

Notre objectif initial concernait l'étude des relations entre τ_0 et les états de surface se succédant en cours de dégradation. Ceci ne peut se faire qu'après avoir choisi des critères de description de l'état de surface. Vis-à-vis de ce choix, certaines questions se dégagent à la lumière de nos résultats :

- par rapport aux variations de τ_0 , l'approche par corrélation est insuffisante car très lourde du fait de la multiplicité des critères possibles à envisager. Par ailleurs, leurs effets peuvent varier en fonction des configurations des paramètres radar choisis. Il apparaît donc absolument nécessaire de disposer de modèles de rugosité de surface.
- les critères les plus étroitement reliés aux variations de τ_0 ne sont pas nécessairement les plus pertinents vis-à-vis de la description de la dégradation d'une surface par la pluie. Il y a donc nécessité de décrire la surface en tenant compte de sa structure à différentes échelles et de relier les différents critères intervenant entre eux. De ce point de vue, l'étude entreprise marque un progrès dans les méthodes de description de l'état de surface (analyse spectrale en particulier). Des domaines d'applications comme les études de l'érosion pourraient être de ce fait envisagés.

Vis-à-vis des résultats de nos mesures radar, nos objectifs n'ont pas été atteints. Plusieurs raisons peuvent être envisagées :

- la première concerne la gamme de variations de rugosité trop réduite. Les expérimentations ultérieures se doivent d'augmenter l'intensité de la dégradation.
- la deuxième concerne les interactions entre facteurs difficiles à contrôler expérimentalement : rugosité de surface, profils hydriques, fissuration. Le contrôle expérimental peut être amélioré en travaillant en conditions hydriques les plus homogènes, ce qui revient à privilégier les mesures à l'état humide.

Toutefois, la séparation totale de ces effets ne pourra se faire que par utilisation de modèles. De plus, il ne faut pas oublier que par rapport à des utilisations futures du radar, l'influence de ces interactions peut être rédhibitoire.

Compte tenu de ces remarques, certains résultats partiels se dégagent néanmoins :

- les mesures à incidence verticale sont a priori plus sensibles à des variations de rugosité. Ce résultat est entaché toutefois d'une incertitude (différence des mesures à l'état sec et humide).
- les fréquences élevées apparaissent plus intéressantes pour la gamme de rugosité étudiée. Il s'agit de tester cet effet pour des mesures à des fréquences supérieures à 9 GHz. Un prolongement éventuel est l'étude de surface de sol aux états initiaux plus fins.

Toutefois, la liaison fréquence radar-niveau de rugosité à étudier fait que l'étude éventuelle d'évolution de surface à grande ampleur devra se faire à plusieurs fréquences.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- BECKER F., 1978 .- Bases physiques de la télédétection. La Houille Blanche n° 7-8.
- BOIFFIN J., 1984 .- La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de Docteur Ingénieur, I.N.A. PARIS-GRIGNON, pp. 320 + annexes.
- BOIFFIN J., 1985 .- Stages and time dependancy of soil crusting in situ. International Symposium on the assessment of soil surface sealing and crusting, Ghent, BELGIUM.
- BOIFFIN J., MONNIER G., 1985 .- Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. International symposium on the assessment of soil surface sealing and crusting, Ghent, BELGIUM.
- BRUCKLER L., 1986 .- Rapport ATP, I.N.R.A. AVIGNON.
- CHATFIELD C., 1983 .- The analysis of time sries : an introduction, 3^d edition, chap. II, III, IV, VI, VII.
- FLUHR A., 1981 .- Etude de l'influence des propriétés géométriques de surfaces de sol nu sur la réflectivité radar. Thèse de 3ème cycle, Université Paul Sabatier, TOULOUSE, pp. 71.
- FUNG A.K., 1986 .- Inverse methods in rough-surface scattering. Reidel Publishing Company, Part 2, pp. 931-942.
- KING C., 1979 .- Contribution à l'utilisation des micro-ondes dans l'étude des sols. Thèse de Docteur Ingénieur, I.N.A. PARIS-GRIGNON, pp. 120 + annexes.
- PAUSADER M., 1981 .- Influence de l'humidité des sols sur la réflectivité radar. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, TOULOUSE.

STENGEL P., BERTUZZI P., GAUDU J.C., 1985 .- La double-sonde gamma LPC-I.N.R.A. : Précision-Utilisation agronomique. Station Science du Sol, I.N.R.A. AVIGNON.

ULABY F.T., BATLIVALA P.P., DOBSON M.C., 1978 .- Microwave back scatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture : Part I-Bare soil. IEE Transactions on geoscience electronics, vol. GE-16.

ULABY F.T., MOORE R.K., and FUNG A.K., 1982 .- Microwave Remote Sensing. Addison-Wesley, reading Massachussets. Vol. 2, chap. 12.

CARACTERISATION DE L'ETAT INITIAL

Parcelle:

Observateur:

Date:

numéros de la placette				
------------------------	--	--	--	--

% S couverte par <ul style="list-style-type: none"> • $T_{pi} < 2 \text{ mm}$ • Mottes $> 50 \text{ mm}$ 				
--	--	--	--	--

ϕ_i calibre modal (mm)				
--------------------------------	--	--	--	--

libre des mottes (cm) % de couverture de la surface <ul style="list-style-type: none"> • 1^{er} decile • Modal • 9^e decile 				
---	--	--	--	--

remarques:

Notice d'utilisation (Boiffin, 1984)

% S couverte :

* T_{fi}

proportion de la surface de la placette couverte par la terre fine dont les fragments sont inférieurs à 2 mm (y compris leurs interstices), soit T_{fi}.

* Mottes

idem pour fragments de dimension (la plus grande) supérieure à 50 mm.

T_{fi} calibre modal

calibre prédominant au sein de T_{fi}, en 3 classes : < 1 mm ; 1 mm ; 2 mm.

Calibre des mottes (cm)

classes de calibres (intervalles : cm) de fragments tels que la proportion de la surface recouverte (interstices compris) soit :

- d'au moins 10 % (classe inférieure : ligne supérieure ; ligne 9).

- la plus importante (ligne 3)

Notice d'utilisation (d'après Boiffin, 1984)

• Critère D_{min}

D_{min}, calibre des fragments distincts les plus fins (noté en mm). Ce calibre doit être observable au moins en 4 ou 5 points distincts de la placette. La sensibilité de l'observation n'est pas identique sur toute la gamme de variation. Elle est de l'ordre du mm de 0 à 5 mm ; de 2 mm de 5 à 10 mm ; de 5 mm de 10 à 30. La notation est donc discontinue. Au-delà de 25 ou 30 mm, cette notation n'est plus praticable, car cette valeur correspond généralement à un stade d'altération trop poussé.

• Critère N_{tf}

N_{tf}, état de désagrégation de la terre fine totale (T_{fi} + T_{fg}). est une notation qualitative proportionnée basée sur la disparition progressive de l'aspect fragmentaire et son accompagnement par des signes de séparation des constituants.

ASPECT	Tous fragments parfaitement distincts	Fragments soudés mais contours encore reconnaissables		Fragments soudés, contours disparus, pas de signes de dispersion		Continuité totale avec signes de "dispersion"	
		Soudure de T _{fi}	Soudure de T _{fi} et T _{fg}	Continuité totale de T _{fi}	Continuité totale de T _{fi} et T _{fg}	Apparition importante de Limons et sables très fins	Croûtes de dépôts étendues et épaisses avec dépôts noirs plus fins
Note	0	1	2	3	4	5	6

Signes de dispersion :

* Aspect

- sables très fins ou limons, se distinguant par une teinte très claire (on note LB).
- accompagnés le cas échéant de taches de particules plus fines, de couleur très foncée (on note ON).

* Abondance

- Présence dans la placette

E : 1 ou 2 motifs. 1 : sur qq motifs. 2 : sur plupart des motifs

* Localisation

Localisation ponctuelle (P) ; Diffuse (D) ; groupée (GR). Dans ce dernier cas on indique explicitement les zones de localisation préférentielle (cuvettes, pentes faibles, plateaux, etc...).

% S d'origine : Formation de dépôts type sédimentaire

Estimation de la proportion de la surface de la placette couverte par ces dépôts (en fait essentiellement identifiables par la séparation et le tri des particules).

ANNEXE 3 : Décomposition en série de FOURIER.

A partir des données brutes ht calées par rapport à la moyenne :

$$ht = a_0 + \sum_{p=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[a_p \cos\left(\frac{2\pi p}{N} t\right) + b_p \sin\left(\frac{2\pi p}{N} t\right) \right] + a_{\frac{N}{2}} \cos \pi t$$

où $a_0 = \bar{h}$

$$a_{\frac{N}{2}} = \sum (-1)^t \frac{ht}{N}$$

$$a_p = 2 \left[\sum ht \cos\left(\frac{2\pi pt}{N}\right) \right] / N$$

$$b_p = 2 \left[\sum ht \sin\left(\frac{2\pi pt}{N}\right) \right] / N$$

$$p = 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

La gamme de fréquences f_p ($f_p = p/N$) prise en compte pour le calcul navigue entre 0, correspondant à une période de taille N , et la fréquence maximale au-dessus de laquelle on ne pourra pas mettre en évidence de périodicité, appelée fréquence de NYQUIST et égale à :

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{\Delta r}$$

où Δr est la résolution de l'aspérimètre.

Pratiquement, ceci traduit le fait que, pour mettre en évidence un phénomène de période d , il faut disposer d'au moins deux mesures à l'intérieur du pas d .

ANNEXE 4 : Fonction d'autocorrélation et analyse spectrale.

Estimateur utilisé de la fonction d'autocorrélation :

$$r_K = \frac{\sum_{t=1}^{N-K} (x_t - \bar{x})(x_{t+K} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2}$$

où

$$\frac{\sum_{t=1}^{N-K} (x_t - \bar{x})(x_{t+K} - \bar{x})}{N} \quad \text{est un estimateur}$$

de la fonction d'autocovariance $C_K \left(r_K = \frac{C_K}{C_0} \right)$

Les périodes se détectent de la façon suivante : lorsque K est une période, 1K ou CK est maximale.

Analyse spectrale :

La fonction de densité spectrale $f(\omega)$ est la transformée de FOURIER de la fonction d'autocorrélation :

$$f(\omega) = \left(\gamma(0) + 2 \sum_{K=1}^{+\infty} \gamma(K) \cos(\omega K) \right) \frac{1}{\pi}$$

où $\omega = 2\pi f$

$\gamma(K)$ est la fonction d'autocorrélation

Pratiquement, le calcul se fait à l'aide d'un estimateur de la forme :

$$\widehat{f}(\omega_p) = \frac{1}{\pi} \left[c_0 + 2 \sum_{K=1}^{N-K} c_K \cos(\omega_p K) \right]$$

où c_K est la fonction d'autocovariance
 N est le nombre total de données

mais qui se révèle être biaisé. En effet :

- l'échantillon discrétisé considéré étant fini, chaque c_K n'a pas le même poids, le nombre de points utilisé pour son calcul diminue lorsque K augmente.
- de plus, si :

$$\underset{N \rightarrow +\infty}{E(\widehat{f}(\omega_p))} \longrightarrow f(\omega_p)$$

la variance de $\widehat{f}(\omega)$ ne tend pas vers 0 lorsque N tend vers l'infini mais vers une valeur constante. Les valeurs de $\widehat{f}(\omega)$ fluctuent donc autour de $E(\widehat{f}(\omega))$ ce qui se traduit graphiquement, par l'existence de lobes secondaires, pour nous sans aucune signification.

Une correction se fait par (Méthode d'utilisation de la fonction d'autocovariance tronquée) :

- réduction de la taille N de la somme à une valeur M , appelée point de troncature, choisie par compromis entre une valeur trop grande qui laissera des lobes secondaires sans signification et une trop petite qui supprimerait des lobes secondaires ceux-là réels. Généralement, on trace trois courbes associées à trois points de troncature centrés autour de $2\sqrt{N}$
- associations à chaque c_K d'un coefficient λ_K , chaque valeur ayant ainsi le même poids.

Le calcul se réalise à partir de la formule :

$$\widehat{f}(\omega_p) = \frac{1}{\pi} \left[\lambda_0 c_0 + 2 \sum_{K=1}^M \lambda_K c_K \cos(\omega_p K) \right]$$

$$\lambda_K = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi K}{M} \right) \quad K = 0, 1, \dots, M$$

Le dernier point de l'analyse est le calcul de l'intervalle de confiance associé à chaque pic éventuel : la taille de l'échantillonnage peut être éventuellement remise en question.

FICHE DE PRELEVEMENT

DATE :			HEURE :		
NO DE PARCELLE :			X :		
NO DE PROFIL :			✓ :		
OBSERVATEUR :					
Profondeur (Cm)	No de Boite	Tare (g)	Poids		Humidi- té
			Humid (g)	Sec (g)	
0 - 1					
1 - 2					
2 - 3					
3 - 4					
4 - 5					
5 - 6					
6 - 7					
7 - 10					
10 - 14					

Observations :

DATE : HEURE :

N° Profil : Observateur :

Ecartement : Cote 0.0 15.0
 Valeur

Profondeur cm	C ₁	C ₂	C ₃	Observation
2.0				
4.0				
6.0				
8.0				
10.0				
12.0				

Observations :

Annexe n° 7 : Principe général du fonctionnement de Ramses II. (Fluhr, 1981)

Le schéma suivant aide à la compréhension de celui-ci :

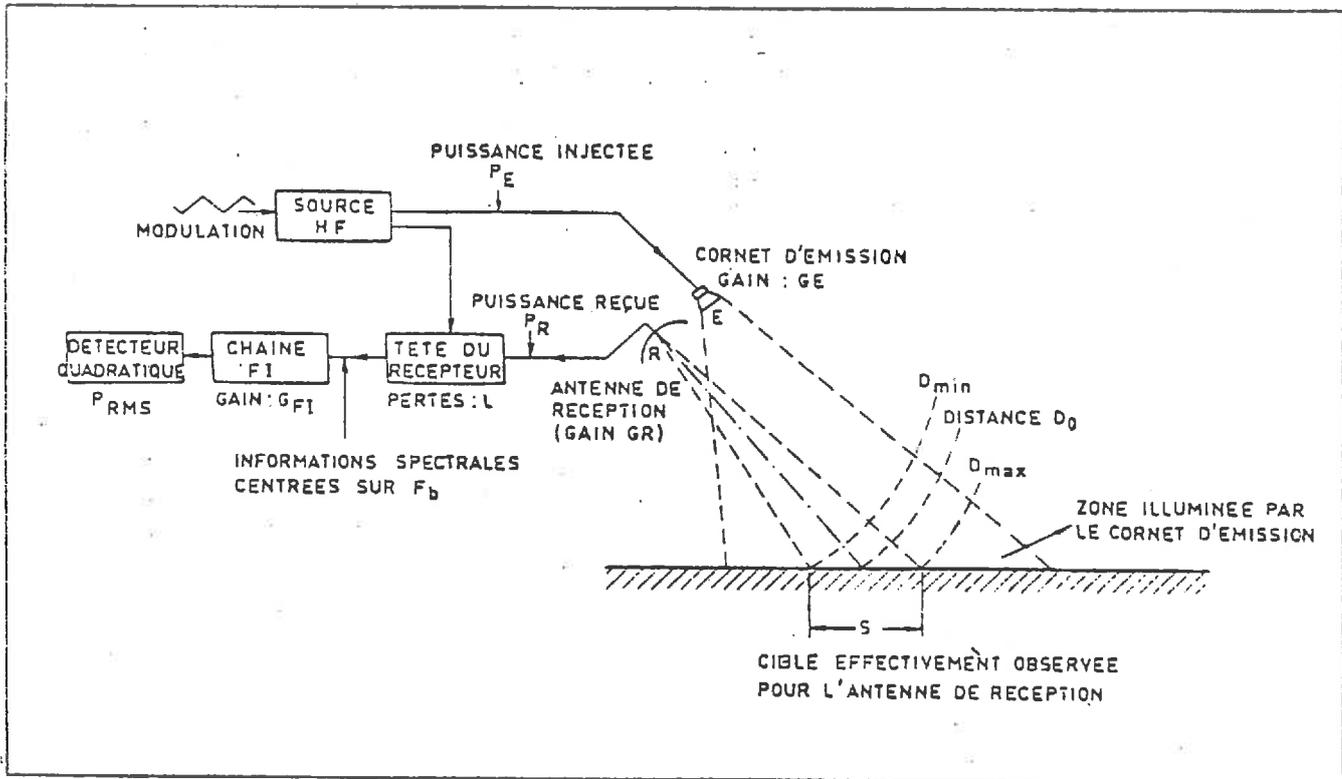


Schéma de l'appareil RAMSES

Une onde à fréquence modulée est émise par un cornet rectangulaire à large bande permettant les fréquences de 1,5 à 9 GHz. L'antenne de réception de type parabolique est située à côté du cornet émetteur pour assurer une observation quasi-monostatique. L'onde électromagnétique rétrodiffusée par la cible et une fraction de l'onde émise au même instant sont mélangées dans le récepteur. Du déphasage des deux ondes, résulte un signal de battement dont le spectre est centré sur la fréquence de battement F_b .

L'information sur la puissance rétrodiffusée est contenue dans le spectre. Pour éliminer les échos parasites et ne garder que l'écho correspondant à la distance radar-cible, un filtre passe-bas est utilisé. Après le filtrage vidéo, l'amplitude du signal qui représente la puissance rétrodiffusée est mesurée à l'aide d'un détecteur quadratique.