



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE
INVESTIGACION Y ENSEÑANZA**

**PROGRAMA MANEJO INTEGRADO DE
RECURSOS NATURALES**

AREA DE MANEJO DE CUENCAS

CIRA-IICA-CATIE

30 MAR 1995

RECIBIDO
Turrialba, Costa Rica



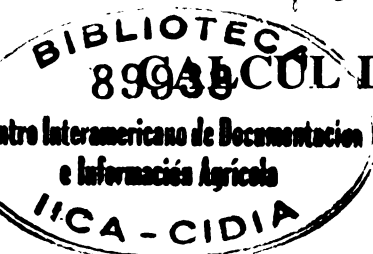
RENARM
MANEJO DE CUENCAS

PUBLICACIONES DEL PROYECTO RENARM/MANEJO DE CUENCAS

**CALCUL DE PARAMETRES DE RUGOSITE A PARTIR D'UN
PROFILOMETRE ECONOMIQUE**

**Preparado por:
Grégoire Leclerc
Nathalie Beaulieu
Yves Moisan**

**CATIE, TURRIALBA
1994**



89137 2462C

CUL DE PARAMETRES DE RUGOSITÉ A PARTIR D'UN PROFILOMETRE ÉCONOMIQUE

Nathalie Beaulieu*, Grégoire Leclerc* et Yves Moisan

Centre d'Applications et de Recherche en Télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

*Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, 7170, Costa Rica. Tel/fax. 506-556-15-76, fax.: 506-556-15-33.

Abstract

This article describes the construction and use of a profilometer for the determination of surface roughness on soil, rock or snow surfaces, during field work related to radar remote sensing. It also explains the different types of analysis which can be conducted with the resulting data, such as autocorrelation and variogram analysis, incident angle distribution and spectral density. It describes in detail how to derive roughness parameters such as height range, Root Mean Square (RMS) height, correlation length, Hausdorff-Besicovich dimension and chain index. The profilometer is easy to construct and use; because its construction is inexpensive, many devices can be elaborated for simultaneous measurements by various members of a field crew during field work synchronized with the acquisition of the images.

Résumé

Cet article décrit la construction et l'utilisation d'un profilomètre pour la détermination de la rugosité de surface sur le sol, le roc, la glace ou la neige, dans le cadre de mesures de terrain reliées à la télédétection radar. Il décrit différents types d'analyse pouvant être réalisées à partir des données issues des mesures, dont le calcul de la fonction d'autocorrélation, du semivariogramme de l'histogramme des angles d'incidence locaux et la densité spectrale. Il décrit aussi en détail les étapes de calcul de différents paramètres de rugosité, dont la hauteur quadratique moyenne (hauteur RMS), la longueur de corrélation, la dimension de Hausdorff-Besicovich et l'indice de chaîne. Le profilomètre est facile à construire et à utiliser; comme son coût de construction est fait plusieurs appareils peuvent être utilisés simultanément par les différents membres d'une équipe lors d'une campagne de terrain synchronisée à l'acquisition des images.

I. Introduction

Le travail de terrain relié à la télédétection radar implique la mesure de nombreux facteurs affectant la rétrodiffusion radar. On considère la rugosité de surface comme l'un des plus importants de ces facteurs, avec les propriétés diélectriques et la topographie. Même lorsque l'étude de la rugosité n'est pas l'objectif essentiel d'un programme, elle devrait être évaluée systématiquement de façon à mieux pouvoir isoler les paramètres étudiés. Divers appareils ont été conçus pour la mesure de la rugosité mais ceux-ci sont souvent coûteux ou difficiles à utiliser. Lorsque ce genre d'équipement est disponible, il l'est souvent en un seul ou en peu d'exemplaires, ce qui rend difficile l'acquisition d'un grand nombre de mesures en une courte période de temps. Cet article a pour objectif de présenter un appareil simple et économique pour le calcul de la rugosité de surface, qui puisse être construit autant dans les pays en voie de développement que dans les pays industrialisés. Il vise aussi le rappel des étapes de calcul des paramètres de rugosité traditionnellement utilisés, et la présentation de paramètres moins courants.

fortement affectée par le degré d'irrégularité de la surface. peut être mesuré à l'aide d'un profilomètre. L'importance de la diffusion volumique augmente avec la profondeur de pénétration, qui elle dépend des propriétés diélectriques du milieu. Lorsque la pénétration est importante, la diffusion volumique est affectée par les irrégularités diélectriques structurales du milieu auxquelles un profilomètre est bien insensible. Cependant, quelle que soit l'importance de la diffusion volumique, une partie significative de l'information contenue dans une image radar est liée à la rugosité de surface.

En l'absence de diffusion volumique, les surfaces lisses apparaissent sombres sur une image radar: comme il se produit peu de diffusion, la majeure partie de l'énergie est réfléchie spéculairement en direction opposée à celle de l'antenne, pour une visée au nadir. La composante diffuse de la réflexion, donc aussi le rayonnement rétrodiffusé, augmente avec la rugosité jusqu'à l'obtention d'une diffusion isotrope pour des surfaces très rugueuses (Ulaby *et al.*, 1983). Les surfaces présentant des éléments disposés angulairement entr'eux occasionnent des réflexions multiples pour augmenter significativement la rétrodiffusion.

II. Imagerie radar et rugosité

La rétrodiffusion radar est le résultat combiné de la diffusion à l'interface air-cible (diffusion de surface) et sous la surface (diffusion volumique). La diffusion de surface est

III. Matériel disponible

Dans le cas du sol ou de la neige, la mesure de la rugosité la plus simple et la plus couramment employée est

à enfoncer un panneau rigide quadrillé dans le milieu étudié et de le photographier. Le contour du sol ou de la neige, tel qu'intercepté par le panneau, est numérisé puis analysé. Cette méthode a le désavantage de seulement se prêter aux matériaux très meubles et de pouvoir altérer la surface lors de l'enfoncement du panneau. De plus, à cause de la visée horizontale de la photographie, les irrégularités situées en avant plan peuvent masquer le véritable profil.

Hirshi *et al.* (1987) ainsi que Paterson *et al.* (1991) ont passé en revue différentes approches utilisées pour la mesure de la rugosité, la plupart consistant en la mesure d'un profil, soit par des méthodes mécaniques, mécano-électriques ou sans contact. L'approche mécanique, dans laquelle nous nous situons, consiste en un ensemble de barres verticales coulissantes, disposées comme les dents d'un peigne, que l'on ajuste au contour du sol et dont la partie supérieure est photographiée contre un fond de référence. Comme l'ont mentionné Paterson *et al.* (1991), l'espacement entre les éléments coulissants est généralement autour de 1 cm, et la longueur totale du profilomètre autour de 1m. Ils ont ajouté: "Les profilomètres sont encombrants, requièrent la participation de deux personnes, et, selon les conditions de surface, peuvent détruire les éléments de rugosité par le contact avec les barres". Nous verrons plus loin comment nous avons résolu ces problèmes.

L'approche mécano-électrique consiste à mesurer la variation de tension électrique résultant du déplacement des dents du profilomètre. Un appareil fonctionnant sous ce principe a été développé à l'Université de Sherbrooke (Beaudoin, 1986). Les méthodes sans contact incluent l'utilisation d'un sonar, d'un laser ou encore d'une source lumineuse et d'un détecteur. Le Centre Canadien de Télédétection a développé un rugosimètre de surface formé d'un "flash" au Xénon et d'un appareil photo, fixés sur un trépied, à une distance donnée l'un de l'autre (Brisco *et al.*, 1989). Une portion rectangulaire du terrain est illuminée par le flash et photographiée par l'appareil photo, le tout sous une housse. Le négatif de la photographie est ensuite numérisé.

IV. Paramètres de rugosité

A partir de ces mesures, on calcule généralement des valeurs visant à quantifier la rugosité, qui sont utilisées pour comparer les surfaces entre elles, pour établir des relations entre la rétrodiffusion radar et la rugosité, ou pour estimer si la surface est lisse, intermédiaire ou rugueuse, à l'aide de critères de rugosité. Cependant, les profils eux-même peuvent être utilisés lors de simulations à l'aide de modèles de rétrodiffusion.

Les paramètres de rugosité les plus couramment calculés sont la hauteur quadratique moyenne ou écart-type de la hauteur (que nous appellerons désormais hauteur RMS) et la longueur de corrélation, cette dernière étant définie comme étant la longueur à laquelle la fonction d'autocorrélation tombe en-deçà de 1/e. La longueur de corrélation est, en théorie, la séparation à partir de laquelle la hauteur de deux points est statistiquement indépendante. La majorité des critères

de rugosité que l'on retrouve dans la littérature se réfèrent à la hauteur RMS. Par exemple, les critères de Fraunhofer (cité dans Ulaby *et al.*, 1982), de Rayleigh (cité dans Elachi, 1988) et de Peake et Oliver (1971) établissent une valeur de la hauteur RMS correspondant à la limite entre deux états de surface, qui est proportionnelle à $\lambda/\cos\theta$. Ceci implique qu'une même surface apparaîtra plus rugueuse en bande C qu'en bande L, et plus encore en bande X. Une même surface apparaîtra plus rugueuse à angles d'incidence plongeants qu'à angles rasants.

La forme du semivariogramme (la demie variance de la dénivellation entre deux points, en fonction de leur séparation) et la dimension de Hausdorff Besicovich (ou dimension fractale) sont des indicateurs bien connus de l'irrégularité, bien que nous n'ayons encore jamais vu leur utilisation pour caractériser la rugosité de surface dans les études de télédétection radar. La dimension de Hausdorff-Besicovich peut être calculée à partir du semivariogramme si celui-ci est linéaire lorsqu'il est tracé à échelles log-log, et est définie comme étant $2-P/2$, P étant la pente de cette relation linéaire.

La méthode de la chaîne est une approche qui nous paraît prometteuse, bien qu'elle ne mène ni à l'obtention d'un profil, ni au calcul de la hauteur RMS ou de la longueur de corrélation. Il s'agit de mesurer la distance entre les deux extrémités d'une chaîne à maillons fins et de longueur connue, reposant sans tension sur la surface étudiée et en épousant donc ses aspérités selon une ligne droite. Le rapport entre la longueur développée de la chaîne et la distance mesurée est un indice d'irrégularité utilisé par les agronomes et pédologues (Collinet, 1994, communication personnelle). Ce rapport est en fait un indice de la surface spécifique, pour une échelle déterminée par la taille des maillons, qui pourrait éventuellement être relié à la diffusion radar.

Johnson *et al.* ont suggéré le calcul l'histogramme des inclinaisons comme analyse de la rugosité de surface. En effet, une surface qui contiendrait un fort pourcentage de ses composantes orientées en direction de la visée radar devrait produire une rétrodiffusion élevée. La densité spectrale issue de la transformée de Fourier peut aussi être utilisée pour caractériser la rugosité. Johnson *et al.* calculent un paramètre numérique à partir de la densité spectrale, qui est la fréquence en-deçà de laquelle on retrouve 90% de la puissance des variations.

V. Construction du profilomètre

Le profilomètre que nous décrivons suit les mêmes principes que les profilomètres traditionnels (Hirshi *et al.*, 1987); son originalité provient du fait qu'il est construit avec des pailles de plastique communes, ce qui lui confère légèreté, faible coût, une résolution horizontale supérieure à la majorité des profilomètres, et la possibilité de le réaliser dans presque tous les pays du monde. Ses éléments coulissants très légers sont moins susceptibles d'altérer la surface étudiée que les sont les tiges de bois ou de métal. Le concept a été développé à Turrialba, au Costa Rica, où le marché d'appareils de mesure

pour la télédétection radar est peu développé. Il a été utilisé au Costa Rica pour obtenir des profils de sols agricoles lors d'une campagne de terrain reliée à l'acquisition d'images radar en bande C dans le cadre du projet Radar Costa Rica/Canada '92-'94 (Beaulieu et al., 1993). Il a ensuite été utilisé dans l'Arctique pour mesurer la rugosité de moraines glaciaires (Moisan et al., 1994), pour l'étude d'images de ERS-1, aussi en bande C.

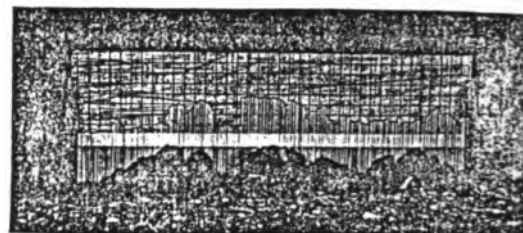
La construction du profilomètre débute avec la préparation d'un fond rectangulaire rigide ou semi-rigide, sur lequel on imprime un quadrillage ou de nombreux points de contrôle pour la numérisation. Ensuite, des pailles sont coupées en segments de 4 à 5 cm qui sont collés côte à côte sur la partie inférieure de ce fond, à l'aide d'une colle à base de néoprène. Ces segments de paille serviront de guides aux pailles coulissantes dont le diamètre est légèrement inférieur au leur, et assureront un intervalle d'échantillonnage constant. Les pailles coulissantes, qui sont laissées à leur entière longueur, sont insérées dans les pailles guides après avoir été munies d'une mince bande de ruban adhésif coloré autour de leur extrémité supérieure. Cette bande a pour fonctions d'empêcher les pailles de tomber et d'améliorer le contraste entre la partie supérieure des pailles et le fond, pour la numérisation. L'alternance de couleurs d'une paille à l'autre facilite le processus de numérisation manuelle.

La figure 1 montre un profilomètre avec fond semi-rigide qui a l'avantage de pouvoir être roulé et facilement transporté. Le fond est composé d'une bande de carton mince dont les faces sont recouvertes de plastique adhésif. Des piquets sont fixés à ses deux extrémités de façon à permettre de l'assujettir au sol. Le profilomètre à fond rigide de la figure 2 peut être aisément employé par une personne seule. Il est composé d'un rectangle de contreplaqué mince et verni, aux extrémités duquel sont vissées des pattes lui permettant de maintenir sa position pendant que l'utilisateur(trice) le photographie. Il est plus difficile à transporter que le rugosimètre roulant, mais ce désavantage est largement compensé par sa meilleure précision, sa facilité d'utilisation et par la confection d'un étui de transport.

Figure 1: Profilomètre à fond roulant



Figure 2: Profilomètre à fond rigide



VI. Critères de conception

D'après Winebrennen *et al.* (1989) et Bredow (1985) la résolution horizontale d'un appareil de mesure de rugosité devrait pas être plus grossière que le quart de la longueur d'onde utilisée par le radar. De plus, selon le critère d'échantillonnage de Nyquist, on doit prévoir un intervalle d'échantillonnage égal à la moitié ou moins de la résolution. Selon ces exigences, on devrait utiliser des pailles d'un diamètre égal ou inférieur à 2.5 mm pour les études avec la bande X ($\lambda = 2$ cm), à 6mm en bande C ($\lambda = 5.6$ cm), et à 2.5 cm en bande L ($\lambda = 22.5$ cm). Selon les mêmes auteurs, les images radar sont sensibles à des irrégularités aussi petites que 5% de la longueur d'onde, ce qui implique que la résolution verticale devrait être au moins aussi fine que 1mm en bande X, 2.8 mm en bande C et 11 mm en bande L.

La longueur que devraient avoir les éléments coulissants dépend du type de surface étudié mais aussi de la longueur d'onde du rayonnement. En effet, si les hauteurs mesurées sur la surface ont une distribution normale, 95% des mesures seront comprises dans un intervalle de quatre écarts type. On cherchera donc à être capable de mesurer des variations de hauteur au moins quatre fois supérieures aux hauteurs RMS correspondant aux critères de rugosité disponibles dans la littérature. Pour un profil sinusoïdal l'amplitude est de 2.8 fois la valeur de la hauteur RMS et pour des surfaces aléatoires simulées, nous avons calculé des proportions oscillant autour de 3.6. Le tableau 1 présente le jeu vertical souhaité pour les angles d'incidence maximum et pour le critère de Peake et Oliver, critère spécifiant la valeur la plus élevée de la hauteur RMS correspondant à une surface très rugueuse.

Tableau 1: jeu vertical souhaité pour les éléments coulissant profilomètre ($4 * \lambda / 4.4 \cos \theta$)

	ERS-1 ($\theta_{max} = 26.6^\circ$)	JERS-1 ($\theta_{max} = 44^\circ$)	RadarSat ($\theta_{max} = 60^\circ$)	Images aéroportées ($\theta_{max} = 75^\circ$)
Bande X: $\lambda = 2$ cm				7 cm
Bande C: $\lambda = 5.6$ cm	6 cm		19.7 cm	28 cm
Bande L: $\lambda = 22.5$ cm		28 cm		79 cm

On voit que les profilomètres des figures 1 et 2 sont, avec un intervalle d'échantillonnage de 6mm et un jeu vertical de 15 cm, adéquats pour la bande C sauf aux angles rasants que l'on retrouve seulement dans les images aéroportées. De toutes manières, pour pouvoir mesurer des profils dans des surfaces présentant d'importantes variations de hauteur, il faut remplacer les pailles coulissantes communes par des éléments plus longs. La résolution horizontale de nos appareils est trop grossière pour la bande X, mais on pourrait construire un profilomètre adapté en utilisant des pailles très fines comme guides et des éléments coulissants encore plus fins, comme des rayons de bicyclette. Pour la bande L, l'excès de résolution horizontale obtenu ne peut nuire, mais les éléments coulissants doivent être de longueur supérieure à celle des pailles, selon le type de terrain étudié.

Avec le profilomètre à fond rigide, nous pouvons déceler des variations de hauteur du profil aussi petites qu'un millimètre.

VII. Utilisation sur le terrain

Sur le terrain, le profilomètre est placé au-dessus de la surface à étudier, en s'assurant que les pailles coulissantes soient bien en contact avec elle et que le fond soit vertical et bien étiré, dans le cas du fond roulant. Le profilomètre est incliné selon la pente locale, dont la valeur est mesurée. Une photographie ou une diapositive est prise à une distance permettant d'englober toute la longueur du profilomètre dans 60% de la largeur du cadrage, pour minimiser les distorsions se produisant aux bords de la photographie. Il est déconseillé d'utiliser des lentilles à grand angulaire puisqu'elles occasionnent des distorsions trop importantes. Au laboratoire, les profils sont reconstruits à partir des diapositives, puis numérisés, ou encore numérisés directement à partir des photographies agrandies. En l'absence d'une quantité suffisante d'appareils photographiques, le profil peut aussi être soigneusement tracé sur le terrain en plaçant une longue feuille de papier derrière les pailles, mais cette option est impraticable en présence de vent fort ou de bruine. Si la direction de visée radar est connue, il est préférable de mesurer les profils dans les directions parallèle et perpendiculaire à la visée.

Si la surface présente des éléments périodiques tels que ceux des champs labourés ou billonnés, il faut en noter l'orientation, en mesurer l'espacement, et de préférence réaliser un croquis pour décrire le mieux possible la surface. Il faut prendre au moins trois profils par point de mesure, un parallèle aux éléments périodiques, un perpendiculaire, et un autre dans la direction de visée. Cihlar *et al.* suggèrent que dans la direction perpendiculaire, la longueur du profil soit d'au moins dix fois celui de la longueur de périodicité. Selon la nature de l'étude, ce nombre peut se révéler impraticable. Nous suggérons néanmoins que même pour les études les plus superficielles, cette exigence ne soit pas réduite à moins du double de la longueur de périodicité, pour pouvoir distinguer les irrégularités périodiques de celles qui ne le sont pas. Plusieurs profils peuvent être réalisés côte à côte pour former un seul long profil.

VIII. Analyse des profils

Les logiciels de géostatistique se prêtent très bien à l'analyse des données issues d'un profilomètre. Par exemple GS+, développé par Gamma Design Software (1990), permet de calculer l'amplitude des variations de hauteur, la hauteur RMS, la fonction d'autocorrélation, le semivariogramme, la dimension de Hausdorff-Besicovich, entre autres. Cependant, ce logiciel ne permet pas de calculer la longueur de corrélation sans effectuer de programmation supplémentaire.

A des fins de démonstration, nous avons élaboré un programme à l'aide du logiciel Mathcad, développé par MathSoft inc. Ce logiciel permet en effet d'intégrer, dans un même document, les équations utilisées, les résultats calculés ainsi que des commentaires. Nous présentons donc un exemple d'analyse d'un profil mesuré dans l'Arctique canadien (figure 3), dans lequel on réalise le calcul de l'amplitude des variations de hauteur, la hauteur RMS, la fonction d'autocorrélation ($\rho(h)$), la longueur de corrélation (L), le semivariogramme ($\gamma(h)$), la dimension de Hausdorff-Besicovich (D), l'indice de chaîne (I), l'histogramme des inclinaisons, et la densité spectrale. Nous situons aussi graphiquement la valeur de la hauteur RMS calculée par rapport à différents critères de rugosité, en fonction de l'angle d'incidence, pour deux bandes spectrales.

Figure 3: Profil mesuré sur une moraine glaciaire, glacier de Thompson, Arctique Canadien



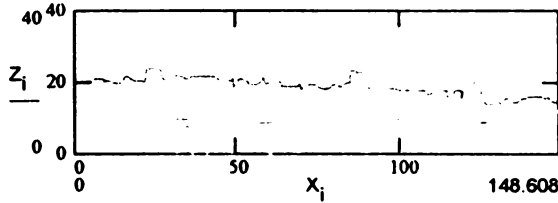
Le fichier d'entrée utilisé par le programme est issu de la numérisation du profil; il doit contenir deux colonnes, la première correspondant à la distance horizontale, et la seconde à la hauteur verticale. On doit spécifier le nom du fichier et le facteur d'échelle utilisé lors de la numérisation. Comme le calcul de L et de D impliquent des régressions linéaires sur les portions à peu près linéaires de $\rho(h)$ et de $\gamma(h)$, respectivement, on doit aussi intervenir pendant ces calculs en évaluant, à partir des graphiques, l'intervalle de valeurs de séparation h sur lequel on veut effectuer la régression.

PROFIL.MCD: Calcul de paramètres de rugosité à partir de profils numérisés

Le symbole ** indique une donnée à entrer par l'utilisateur.
 Le symbole * indique une réponse calculée par le programme.
 B := READPRN(per524) **lecture du fichier d'entrée d'extension .PRN

echelle := 5 **facteur d'échelle pour transformer les unités du fichier en centimètres
 npoints := rows(B) (nombre de points dans le fichier) i 1..npoints
 $Z_i := B(i,2) * echelle$ (2eme colonne du fichier, hauteur verticale)
 $X_i := B(i,1) * echelle$ (1ere colonne du fichier, distance horizontale)

Figure 4: hauteur verticale Z en fonction de la distance horizontale X, mesurées par le profilomètre:



Calcul de l'amplitude (A) des variations de hauteur

A := max(Z) - min(Z) A = 10.405 *(cm)

Calcul de la hauteur quadratique moyenne ou écart-type (RMS):

$Z_m := \text{mean}(Z)$ $z_i := Z_i - Z_m$
 z_i est l'écart de la hauteur Z_i par rapport à la moyenne Z_m.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i [z_i]^2}{npoints - 1}} \quad RMS = 2.389 \quad *(cm)$$

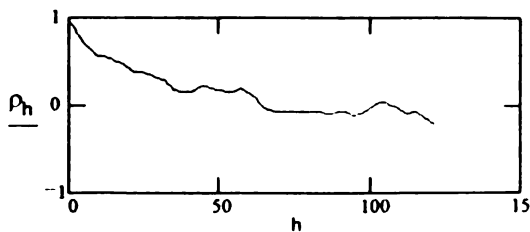
Calcul de la fonction d'autocorrélation (rho(h)) et de la longueur de corrélation (L). h est la séparation exprimée en nombre d'intervalles de mesure. L est calculée en réalisant une régression linéaire à travers la première

calculant la valeur de la séparation correspondant à $\rho(h) = 1/e$.
 première portion de la fonction d'autocorrélation et en

test_i est une variable booléenne dont la valeur est 0 lorsque l'indice i+h dépasse le nombre de points
 $h := 1.. \left[\frac{npoints}{2} \right]$ $test_i := (i \leq npoints - h)$

$$\rho_h := \frac{\sum_i [test_i * z_i * z_{i+h}]}{\sum_i [test_i * [z_i]^2]}$$

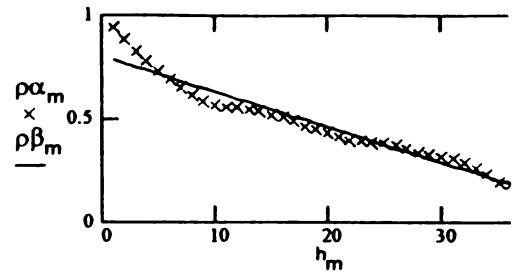
Figure 5: autocorrélogramme rho(h) de la hauteur Z



Régression linéaire: limite_h = 40 **
 **Limite_h est la valeur maximale de h, définissant l'intervalle sur lequel on veut réaliser la régression linéaire. Si rho(h) oscille autour de 0, limite_h = 0

m := 1..limite_h $\rho\alpha_m := \rho_m$ $h_m := m$
 pente := slope(h, rho_alpha) b := intercept(h, rho_alpha) $\rho\beta_m := pente * h_m + b$

Figure 6: régression linéaire (rho_beta_m) à travers la première portion (rho_alpha_m) de la fonction d'autocorrélation.



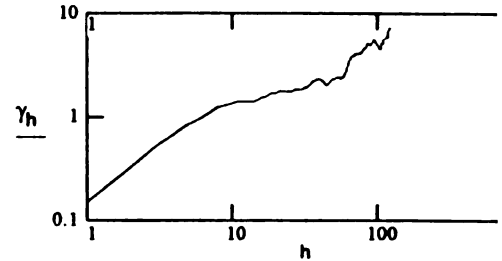
$$espacement := \left| \frac{X(npoints) - X_1}{npoints - 1} \right| \quad Lh := \begin{cases} \frac{1-b}{e} & \text{si } limite_h > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La longueur de corrélation L est calculée comme étant la valeur de séparation correspondant à rho(h)=1/e, mais si limite_h avait été évalué à 0, L est nulle.
 L := Lh * espacement L = 15.651 *(cm)

Calcul du semivariogramme gamma(h) et de la dimension de Hausdorff-Besicovich (D)

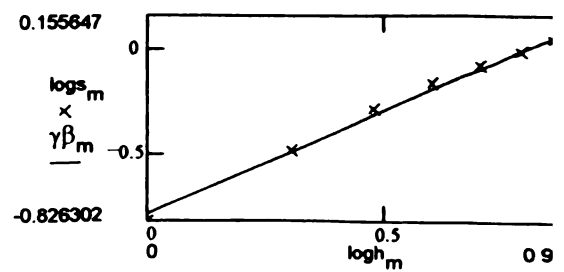
$$h := 1.. \frac{npoints}{2} \quad \gamma_h := \frac{\sum_i [test_i * [Z_i - Z_{i+h}]^2]}{2 * (npoints - h)}$$

Figure 7: semivariogramme gamma(h) de la hauteur verticales logarithmiques.



Régression linéaire: limite_h := 9 ** m := 1..limite_h
 **Limite_h est la valeur maximale de h, définissant l'intervalle sur lequel on veut réaliser la régression linéaire.
 $log_h_m := \log(m)$ $log\gamma_m := \log[\gamma_m]$ P := slope(log_h, log_gamma)
 b := intercept(log_h, log_gamma) $\gamma\beta_m := [P * log_h_m + b]$

Figure 8: logarithme du semivariogramme (log_gamma) première portion de la courbe et de la régression linéaire gamma_beta_m, en fonction du logarithme de la séparation (log_h).



D = 2 * P / 2 D = 1.504 *dimension de Hausdorff-Besicovich

Calcul de l'indice de chaîne (l)

rapport entre la longueur du contour du profil et la distance directe

$$k = 1..npoints - 1 \quad \text{distance} := |X_{npoints} - X_1|$$

$$L_{\text{chaîne}} = \sum_k \sqrt{[Z_k - Z_{(k+1)}]^2 + [X_k - X_{(k+1)}]^2}$$

$$l = \frac{L_{\text{chaîne}}}{\text{distance}} \quad l = 1.406 \text{ (adimensionnel)}$$

Calcul de l'inclinaison des segments du profil et de leur histogramme

pen_t_locale = 0 **Pente locale en degrés

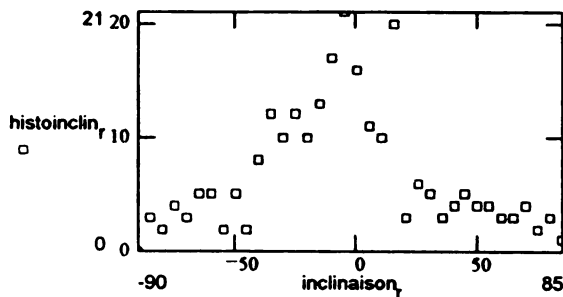
pen_t_locale et inclin sont positifs lorsque la surface est inclinée vers l'origine de X, et négatif lorsqu'inclinée dans la direction opposée

$$q := 1..37$$

$$\text{inclin}_k = \text{atan} \left[\frac{Z_{(k+1)} - Z_k}{X_{(k+1)} - X_k} \right] \cdot \frac{180}{\pi} + \text{pen_t_locale} \quad r := 1..36$$

$$\text{inclinaison}_q = -90 + 5 \cdot (q - 1) \quad \text{histoinclin} := \text{hist}(\text{inclinaison}, \text{inclin})$$

Figure 9: Histogramme des inclinaisons de la surface



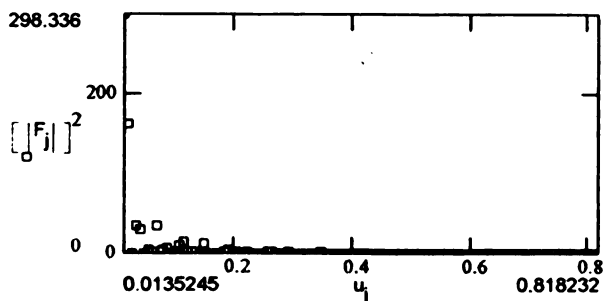
Calcul de la transformée de Fourier rapide et de la densité spectrale

$$i := 1..npoints - 1 \quad Z_{o_i} := Z_i \quad F := \text{cfft}(Z_o)$$

$$\text{delta}_u = \frac{1}{|X_{npoints} - X_1|} \quad j := 2.. \frac{npoints}{2} \quad u_j := \text{delta}_u \cdot j$$

$$F_1^{-2} = 8.78 \cdot 10^4 \quad \text{Valeur du pic de la densité spectrale, pour une fréquence égale à l'inverse de la longueur du profilomètre}$$

Figure 10: Densité spectrale en fonction de la fréquence en 1/cm



Résumé des paramètres calculés

Amplitude des variations de hauteur (cm):	A = 10.405
Hauteur quadratique moyenne (cm):	RMS = 2.389
Longueur de corrélation (cm):	L = 15.651
Dimension de Hausdorff-Besicovich:	D = 1.504
Indice de chaîne	l = 1.406

Interprétation de la hauteur RMS par rapport à différents critères de rugosité

$$b := 1..3 \quad \text{Bande X: } \lambda_1 := 2 \text{ (cm)} \quad \text{Bande C: } \lambda_2 := 5.6 \text{ (cm)}$$

$$\text{Bande L: } \lambda_3 := 22.5 \text{ (cm)} \quad \theta := 0, 0.05.. \frac{\pi}{2} \text{ (angle d'incidence en radians)}$$

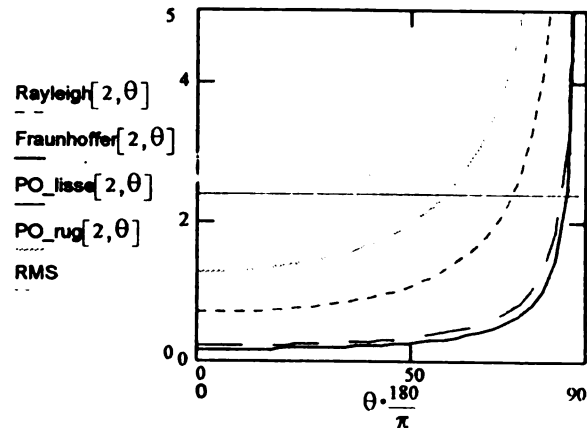
Le critère de Rayleigh établit une limite entre une surface légèrement rugueuse et franchement rugueuse. Le critère de Fraunhofer, entre une surface lisse et une surface rugueuse. Le critère de Peake et Oliver, entre des surfaces lisse et intermédiaire (PO_lisse) et entre des surfaces intermédiaire et très rugueuse (PO_rug)

$$\text{Rayleigh}[b, \theta] := \frac{\lambda_b}{8 \cdot \cos[\theta]} \quad \text{Fraunhofer}[b, \theta] := \frac{\lambda_b}{32 \cdot \cos[\theta]}$$

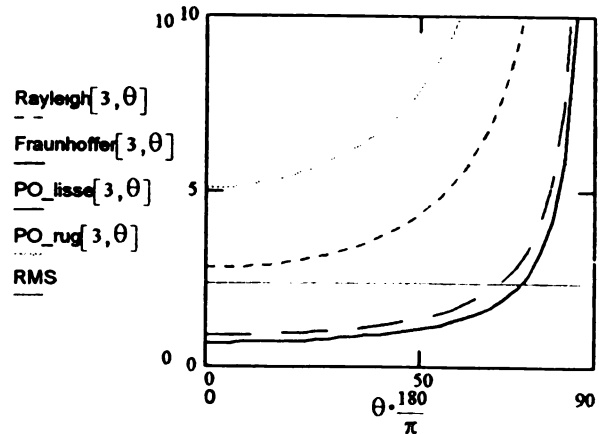
$$\text{PO_lisse}[b, \theta] := \frac{\lambda_b}{25 \cdot \cos[\theta]} \quad \text{PO_rug}[b, \theta] := \frac{\lambda_b}{4.4 \cdot \cos[\theta]}$$

Figure 11: Situation de la hauteur RMS par rapport aux critères de rugosité, pour les bandes C et L

a) Bande C



b) Bande L



De plus, Ulaby et Dobson (1989) proposent le critère suivant, indépendant de l'angle d'incidence: $k = 2\pi/\lambda$; la surface est lisse si $k \cdot \text{RMS} < 0.2$, et rugueuse si $k \cdot \text{RMS} > 1$.

$$k\text{RMS}_b := \frac{\text{RMS} \cdot [2 \cdot \pi]}{\lambda_b} \quad k\text{RMS}_1 = 7.506 \text{ (bande X)}$$

$$k\text{RMS}_2 = 2.681 \text{ (bande C)} \quad k\text{RMS}_3 = 0.667 \text{ (bande L)}$$

seulement de la rugosité mais aussi des propriétés diélectriques c'est à dire de la teneur en eau dans le cas de la neige et du sel et de la salinité dans le cas de la glace.

Par exemple, dans une étude sur les contrastes tonaux entre les champs de sols nus et de végétation dans les cultures maraichères et de canne à sucre au Costa Rica (Beaulieu *et al.*, 1993, Leclerc *et al.*, 1993), la teneur en eau est le facteur qui a eu le plus d'effet. Dans les sols secs, même très rugueux, il s'est probablement produit une importante pénétration du signal, occasionnant une atténuation et une faible rétrodiffusion et donc un bon contraste entre le sol nu et la végétation. Les sols nus humides apparaissent aussi brillants que les champs de canne à sucre avoisinants, et de ce fait ils pouvaient en être distingués. Une analyse quantitative de la rétrodiffusion radar pour ces sites agricoles, en fonction de différents paramètres de rugosité, de l'angle d'incidence local et de la teneur en eau, est en cours actuellement.

X. Limites des paramètres de rugosité

La hauteur RMS est un indicateur de l'amplitude des variations de hauteur mais est insensible à leur fréquence. Il est probable que la majorité des critères de rugosité que nous avons décrits ont connu leur succès en raison de la facilité de calcul de la hauteur RMS. Il convient certainement d'aller plus avant dans cette analyse et de développer des critères tenant compte d'un plus grand nombre de facteurs.

Johnson *et al.* (1993), qui ont étudié la précision du rugosimètre de surface du Centre Canadien de télédétection sur des surfaces artificielles, ont trouvé que la longueur de corrélation L est un facteur qui est très sensible aux variations de positionnement du négatif pendant la numérisation, ainsi qu'à la présence d'irrégularités importantes et isolées. Aussi, si la surface est assez lisse et que la fonction d'autocorrélation décroît très lentement, il peut se produire des erreurs importantes dans l'évaluation de L . Ces auteurs ont noté que le paramètre extrait de la densité spectrale n'était guère plus robuste.

D'autre part, la dimension de Hausdorff-Besicovich (D) est un facteur inapproprié si le comportement du semivariogramme n'est pas linéaire à l'échelle logarithmique c.à.d. si la surface ne présente pas une similitude d'irrégularité à travers différentes échelles, autrement dit si elle n'a pas un comportement "fractal". Si la surface n'est pas fractale l'observation de la forme du semivariogramme est plus appropriée, et on peut lui ajuster un modèle (exponentiel, sphérique, etc). Les coefficients des équations montrant le meilleur ajustement peuvent ensuite aussi être utilisés comme paramètres de rugosité. Le semivariogramme peut aussi être utilisé pour "reconstruire" la surface par Krigeage, à partir de profils perpendiculaires. Ces analyses se réalisent aisément à l'aide de logiciels de géostatistique. Il faut cependant noter que pour les surfaces périodiques, le semivariogramme et la fonction d'autocorrélation sont aussi des fonctions périodiques à partir desquelles on ne peut calculer D et L . Il est alors

Comme on l'a mentionné plus tôt, les paramètres de rugosité peuvent être utilisés pour comparer des surfaces entre elles, pour établir une relation entre la rétrodiffusion et la rugosité, ou pour situer les surfaces par rapport à des critères de rugosité. Comme règle générale, la hauteur RMS, l'indice de chaîne, la dimension de Hausdorff-Besicovich et la largeur du pic de l'histogramme des angles d'incidence locaux augmentent avec la rugosité de surface, et la longueur de corrélation diminue. Une surface totalement lisse aurait une hauteur RMS nulle, une longueur de corrélation infinie, un semivariogramme coïncidant avec l'abscisse, une dimension de Hausdorff-Besicovich et un indice de chaîne de 1, un histogramme d'inclinaisons totalement concentré à la valeur de la pente locale, et une densité spectrale totalement concentrée à la plus basse fréquence mesurable, c.à.d. l'inverse de la longueur du profilomètre. Une surface aléatoire aurait une longueur de corrélation nulle, les autres paramètres dépendant de l'amplitude des variations de hauteur, et un histogramme des inclinaisons ainsi qu'une densité spectrale bien distribués.

La surface que nous avons analysée se retrouve entre ces deux extrêmes, mais l'interprétation de l'analyse de la rugosité est plus intéressante lorsque l'on compare différentes surfaces entre elles, en relation avec une image radar. Néanmoins, nous pouvons tirer de la figure 11 que notre surface serait considérée rugueuse selon tous les critères en bande C jusqu'à un angle d'incidence de 58° , à partir duquel elle serait intermédiaire selon le critère de Peake et Oliver mais resterait rugueuse selon le critère de Rayleigh jusqu'à un angle de 73° . En bande L, elle serait lisse selon le critère de Rayleigh, intermédiaire selon le critère de Peake et Oliver et rugueuse selon le critère de Fraunhofer. Selon le critère de Ulaby et Dobson, la surface serait rugueuse en bande C et X, et intermédiaire en bande L. Bien que ces critères de rugosité produisent des valeurs numériques, il faut les considérer comme des appréciations approximatives et qualitatives. De plus, ces critères se basent uniquement sur la hauteur RMS qui est insuffisante pour caractériser à elle seule l'irrégularité d'une surface.

La densité spectrale (ou spectre de puissance) peut être utilisée dans certains types de modèles de rétrodiffusion comme le modèle de Bragg (Elachi, 1988). Ces modèles considèrent que la rétrodiffusion est amplifiée lorsque la rugosité de surface contient des composantes dont la fréquence satisfait au critère de résonance de Bragg, c.à.d. un multiple de $\lambda/2\sin\theta$.

En plus du calcul de paramètres comme tel, l'obtention d'un profil a l'avantage de permettre l'utilisation de modèles de rétrodiffusion tenant compte de la distribution des angles d'incidence locaux sur la surface, de la distribution de la surface dans l'espace des fréquences, ou des réflexions multiples. Il permet aussi une appréciation visuelle du type de rugosité et de la présence de réflecteurs en coin.

Dans l'interprétation des résultats en relation avec une image radar, il faut garder en tête la dépendance de la rugosité envers la longueur d'onde et l'angle d'incidence local. Il ne faut pas non plus oublier que la rétrodiffusion dépend non

nécessaire de séparer la composante périodique de la mésorugosité, pour les traiter à part.

Dans l'optique de caractériser la rugosité de surface au moyen de paramètres plutôt que par des fonctions ou des distributions, l'indice de chaîne pourrait compléter la hauteur RMS, si celui-ci est toujours mesuré avec une chaîne standard ou avec des profilomètres ayant un intervalle d'échantillonnage donné.

XI. Conclusions

Nous avons présenté dans cet article les méthodes de construction, d'utilisation et d'interprétation des données d'un profilomètre économique. Après avoir présenté le calcul de paramètres de rugosité traditionnels que sont la hauteur quadratique moyenne (RMS) et la longueur de corrélation (L), nous avons présenté d'autres analyses et paramètres, soient le calcul du semivariogramme, de l'histogramme des angles d'incidence locaux, la distribution spectrale (ou spectre de puissance), la dimension de Hausdorff Besicovich et l'indice de chaîne. Nous avons souligné que la majorité des critères de rugosité que l'on retrouve dans la littérature se réfèrent à la hauteur RMS qui est à elle seule insuffisante pour caractériser la rugosité de surface.

Bien que l'analyse que nous décrivons requiert l'utilisation d'un ordinateur et d'un appareil photographique, le profilomètre lui-même peut être construit à peu de frais dans pratiquement tous les pays, ce qui rend plus accessible la mesure quantitative de la rugosité de surface. Néanmoins, nous travaillons actuellement au développement de critères de rugosité basés sur l'indice de chaîne, de façon à rendre accessible une méthode encore plus simple, rapide et économique.

XII. Remerciements

Nous tenons à remercier Alexander Salas, technicien au CATIE, qui a réalisé la numérisation des profils utilisés pour notre étude, Tom Fryer et David Williams pour leur aide sur le terrain, Jean Collinet, Brian Brisco, Ferdinand Bonn, et Glenn Hyman pour leur révision constructive du manuscrit, ainsi que le laboratoire de télédétection et SIG du CATIE pour leur accueil. La présente étude a été possible grâce au financement du Centre de Recherche en Développement International (CRDI), du programme SYNERGIE du Fonds de Développement Technologique du Québec, et du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG).

XIII. Bibliographie

BEAULIEU, N., LECLERC, G. y BONN, F. (1993). Mesures de Terrain Reliées à l'Acquisition d'Images Radar pour le Suivi de l'Agriculture en Milieu Tropical. Actes du XVI Symposium Canadien sur la Télédétection, Sherbrooke, Canada, 7-10 juin, pp. 315-318

BEAULIEU, N., LECLERC, G., VELASQUEZ M... (1993). "Potencial de las Imágenes de radar de Alta Resolución para la Apreciación del Estado de Crecimiento y de Prácticas Culturales en Café, Caña de Azúcar y Hortalizas". *Memoires du Simposio Internacional de Radar*, San José, Costa Rica, 1-5 novembre.

BEAUDOIN, A. (1989). Modélisation de la Variabilité de la Rétrodiffusion Radar en Bande C, due à la Géométrie de Surface et de l'Humidité du Sol. Mémoire de M.Sc., Département de Géographie et de Télédétection, Université de Sherbrooke.

BREDOW, J.W. (1989). A Laboratory Investigation Into Microwave Backscattering of Sea Ice. Remote Sensing Laboratory, Technical Report 8240-1, University of Kansas, Lawrence, KS, USA.

BRISCO, B., BROWN, R.J., CIHLAR, J. and BRANCKER, R.W.S. (1989). A Field Instrument for Surface Roughness Measurement. IGARSS'89

CIHLAR, J., DOBSON, M.C., SCHMUDGE, T., HOOGEBOOM, P., JANSE, A.R.P., BARET, F., GUYOT, G., LE TOAN, T. et PAMPALONI, P. (1987). Procedures for the Description of Agricultural Crops and Soils in Optical and Microwave Remote Sensing Studies. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 8, No. 3, pp.427-439.

COLLINET, J.(1994) CATIE/ORSTOM. Communication personnelle

ELACHI, C. (1988). Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques. IEEE Press, 255 p.

HIRSCHI, M.C., BARFIELD, B.J., MOORE, I.D. and COLLIVER, D.G. (1987). Profile Meters for Detailed Measurement of Soil Surface Heights. *Journal of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 3(1).

JOHNSON, F., BRISCO, B. and BROWN, R.J. (1993). Evaluation of limits to the performance of the Surface Roughness Meter. *Canadian Journal of Remote Sensing*.

LECLERC, G., BEAULIEU, N. y VELASQUEZ, S.. Caracterización del Cultivo de Caña de Azúcar Mediante Imágenes de Radar. Présentation plénière au VI Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, 3-8 octobre 1993, Cartagène, Colombie.

MOISAN, Y, LECLERC, G. et BEAULIEU, N. (1994). Relation entre le coefficient de rétrodiffusion de surfaces couvertes de neige et la rugosité de moraines glaciaires sous-jacentes. En préparation.

PEAKE, W.H. and OLIVER, T.L. (1971). The Response of Terrestrial Surfaces at Microwave Frequencies. Ohio State University Electroscience Laboratory, 2440-7, Technical Report AFAL-TR-70-301, Columbus, Ohio.

PATERSON, J.S., BRISCO, B., ARGUS, S. and JONES, G.

(1991) In Situ Measurements of Micro-Scale Surface Roughness of Sea Ice. Arctic, Journal of the Arctic Institute of North America. Vol. 44, Supp. 1. pp. 140-146.

ULABY, F.T., MOORE, R.K. and FUNG, A.K. (1982). Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. 2. Radar remote Sensing and Surface Scattering Theory. Addison-Wesley publishing Co., Reading, Massachusetts.

ULABY, F.T. et DOBSON, M.C. (1988). Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. Artech House, 357 p.

WINEBRENNER, D.P., TSANG, L., WEN, B. and WEST, R. (1989). Sea-Ice Characterization Measurements Needed for Testing of Microwave Remote Sensing Models. IEEE Journal of Oceanic Engineering, V.14, No.2, pp. 149-158