PIROT R., PERRET S., MANICHON H. (éds.), 1997.
Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux,
Actes du colloque, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France.
Montpellier, France, Cirad-Sar, collection Colloques, 160 p.

Indices de rugosité du sol régionalisés

Serge GUILLOBEZ
Cirad-Ca, BP 5035, 34032 Montpellier cedex 1, France

Résumé : La rugosité de la surface du sol, sur une parcelle, est une notion qui est visuellement bien perceptible, mais qui est difficile à quantifier. Une chaîne de mesure a été développée comprenant un profilographe 3D (LASER) et un ordinateur portable. Les distances verticales entre la cellule laser et le sol sont mesurées sur une grille carrée (1m²), ce sont des variables régionalisées qui ont été traitées par des méthodes géostatistiques. Dans une direction donnée, la forme du semi-variogramme (en fonction de la distance) est comparable avec le modelé du sol. Elle reflète, d'une façon positive, les variations du modelé. De nouveaux indices quantitatifs sont proposés. Ils dérivent du semi-variogramme et caractérisent une rugosité à la fois verticale et latérale.

La rugosité du sol

Une surface rugueuse présente des aspérités, elle est rude au toucher. Pour Casenave et Valentin (1988), la rugosité est due aux petits accidents de terrain, (naturels, techniques culturaux) susceptibles de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

Les divers paramètres proposés à ce jour pour caractériser la rugosité du sol sont :

- le modelé du sol;
- la dénivellation du micro-relief;
- le degré d'obstruction.

Kuipers (1957) a mis au point le profilomètre à aiguille et a proposé comme indice de rugosité cent fois la valeur du logarithme décimal de l'écart-type des mesures (degré de déviation standard). Actuellement, la plupart des auteurs prennent l'écart-type des hauteurs mesurées sans transformation logarithmique : indice de déviation standard (SE).

Linden et Van Doren (1986) ont proposé deux indices spatiaux qui dérivent de l'étude du variogramme d'ordre 1, (différence d'élévation limite LD, et pente limitative LS).

Des travaux conduits au Burkina Faso ont conduit Guillobez et Zougmore (1991) à préférer l'indice SE, l'évolution de celui-ci sur une même parcelle suit celle de la pluviosité ; mais il ne permet pas une description du modelé de la surface du sol.

Matériel et méthodes

Le profilographe 3D

L'ensemble du système a été mis au point par le Cirad-Sar. Il comprend le profilographe (figure 1) et un ordinateur portable qui pilote les déplacements de la cellule laser et enregistre les données.

La cellule laser se déplace dans un carré d'environ un mètre de côté. Elle est située à environ 70 cm du sol (surface plane).

Le pas de mesure est réglable (4 à 32 mm). Les données sont enregistrées en format Texte.

Le profilographe permet d'étudier une surface de 1x1 m. On peut traiter les valeurs obtenues dans plusieurs directions et calculer pour chaque direction de l'indice SE ; pour ce faire, il faut ramener les mesures à la ligne du sol parallèle à la pente de la direction considérée.

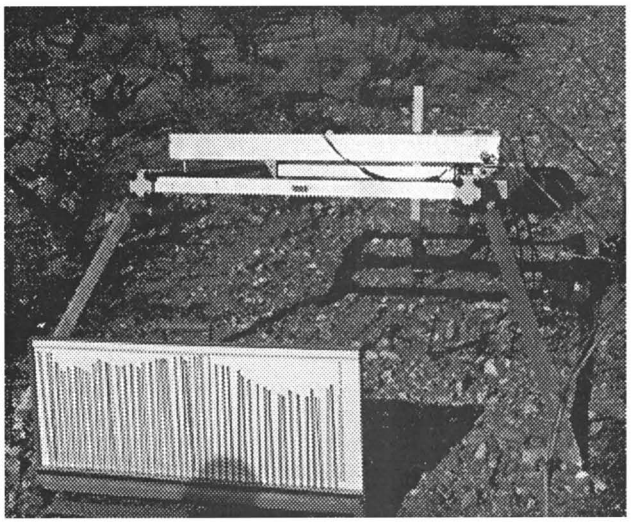

Figure 1. *Profilomètre et profilographe* LASER. *Au premier plan, le profilomètre à aiguille, à l'arrière plan le profilographe* LASER. *Sol caillouteux en pente entre deux rangées de vigne.*

Les principaux états de surface

Les mesures ont été effectuées dans le bassin du Réart (Pyrénées orientales) sur des parcelles cultivées en vigne entre les rangées selon différents types de travail du sol :

- travail du sol récent sans orientation ;
- travail du sol récent avec orientation, modelé en billons ;
- travail du sol ancien avec orientation, modelé en billons moyennement développé ;
- travail du sol très ancien avec orientation, modelé en billons peu développé ;
- absence de travail du sol visible, utilisation d'herbicides, sol battant plus ou moins caillouteux ;
- sol enherbé.

Les rangées de vigne sont établies sur un petit billon.

Variables régionalisées et géostatistique

La géostatistique ou théorie des variables régionalisées (Matheron, 1955 ; Krige, 1966) a été utilisée pour trouver un nouvel indice de rugosité adapté aux mesures effectuées.

Le semi-variogramme montre la dépendance spatiale des données. Selon une direction particulière, les distances Z_i de la cellule laser au sol caractérisent des points au sol de coordonnées X_i, Y_i ; elles sont connues pour tout i. La variance de la différence entre toutes les paires (de points) situées à des intervalles h, est notée :

$$\text{variance}[z_i - z_{i+h}]$$

La semi-variance est la moitié de cette variance :

$$\Gamma_h = 1/2\text{var}[z_i - z_{i+h}]$$

que l'on peut écrire :

$$\Gamma_h = 1/2n_h.\Sigma[z_i - z_{i+h}]^2$$

n_h = nombre de couples situés à la distance h.

La variation de Γ_h en fonction de h est le semi-variogramme dont la courbe est en général croissante et monotone. Elle peut atteindre un maximum (palier ou seuil). Plus rarement la courbe peut avoir une allure ondulatoire avec maxima et minima (effet de creux). La valeur à l'origine de la courbe quand elle n'est pas nulle est l'effet pépite. Cet effet pépite représente les fluctuations qui intéressent des distances inférieures au pas d'incrémentation. La distance h entre l'origine et le début du palier est la portée.

Les indices proposés par Linden et Van Doren (1986) s'inspirent de la géostatistique. Ils sont liés à la moyenne des différences en valeur absolue des dénivellations :

$$\Delta z_h = \Sigma|z_i - z_{i+h}|/N_h$$

Analyse des données

L'étude géostatistique a été réalisée dans plusieurs directions en fonction de la pente principale et de l'anisotropie. Les directions 0° et 90° ont été le plus souvent utilisées. Le logiciel *VarioWin* (Y. Pannatier, Université de Lausanne, Suisse) a été utilisé pour établir les semi-variogrammes.

Sol battant sans travail du sol

Cette parcelle présente une pente d'environ 6 % selon la première bissectrice des axes. Selon les axes X et Y du cadre de mesure (figures 2a et 2b), les semi-variogrammes présentent une dérive, leur croissance est monotone, sans palier ; en prolongeant visuellement les courbes on constate qu'elles ne passent pas par l'origine il y a un effet de pépite dont la valeur est la même quelle que soit la direction. La courbe (figure 2c) représentative de la direction 150°, pratiquement une ligne de niveau, est une droite plus ou moins parallèle à l'axe des distances.

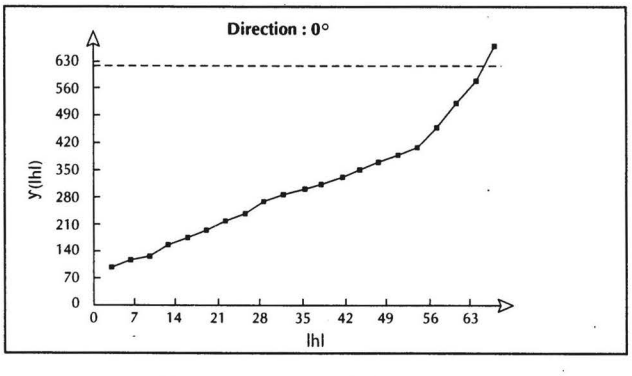

Figure 2a. *Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 0°.*

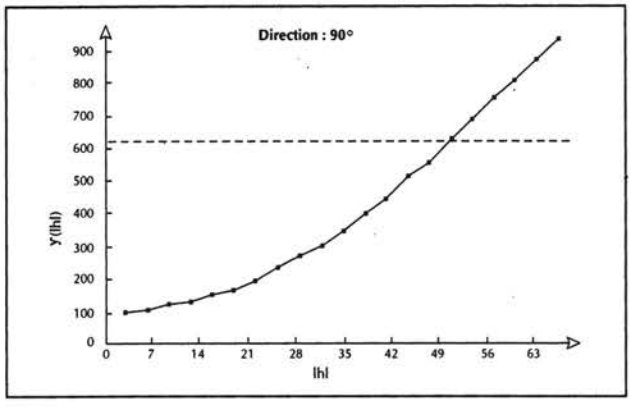

Figure 2b. *Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 90°.*

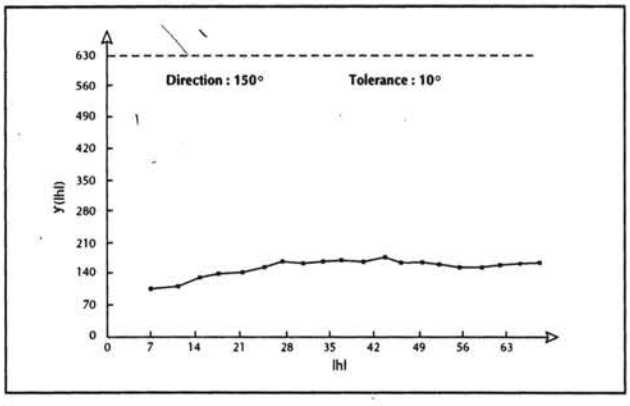

Figure 2c. *Semi-variogramme, sol battant sans travail du sol, dans la direction 150°.*

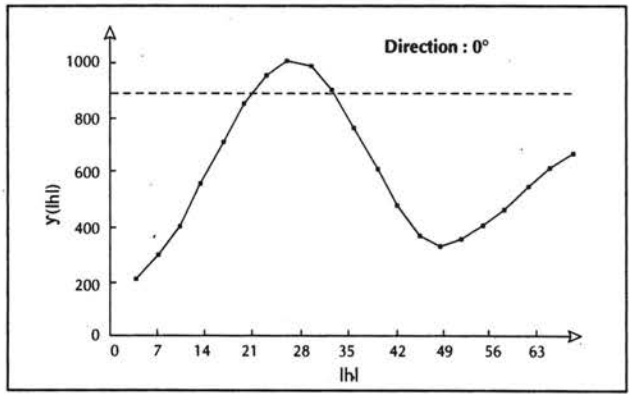

Figure 3a. *Semi-variogramme, modelé en bourrelet, direction perpendiculaire au bourrelet.*

Bourrelet le long d'une rangée de vigne

Les mesures ont été effectuées sur une rangée de vigne entre deux pieds. Les deux courbes principales ont été représentées. La courbe représentant le transect perpendiculaire au bourrelet (figure 3a) a un maximum (h = 22 cm) puis un effet de creux ; La courbe selon la plus grande pente (figure 3b) est croissante et monotone; l'effet pépite est inférieur à 200. Les deux courbes simulent le modelé du sol.

Travail du sol récent, orienté

Selon l'axe perpendiculaire aux rangées de vigne la courbe (figure 4a) est bimodale, elle présente deux maxima et un effet de creux. La courbe (figure 4b) dont l'axe est parallèle aux rangées de vigne a une forme monotone et croissante. Les deux courbes présentent un effet pépite commun. La forme des courbes comme pour les cas précédents est calquée sur le modelé du sol.

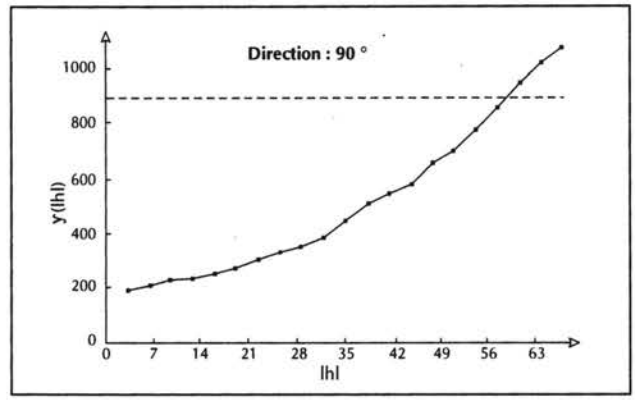

Figure 3b. *Semi-variogramme, modelé en bourrelet, direction perpendiculaire au bourrelet.*

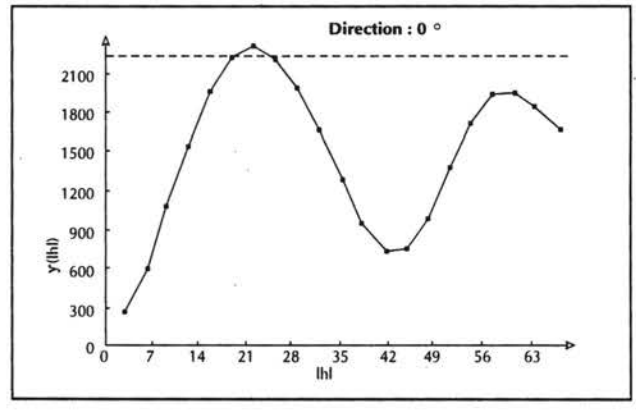

Figure 4a. *Semi-variogramme, travail du sol récent, axe perpendiculaire aux rangées de vigne.*

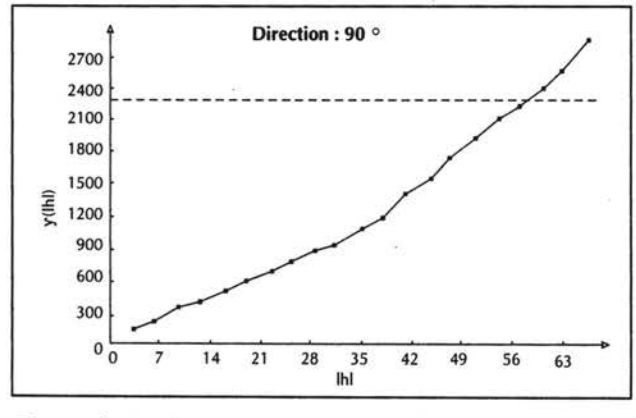

Figure 4b. *Semi-variogramme, travail du sol récent, axe parallèle aux rangées de vigne.*

Discussion

Semi-variogramme

La forme des courbes des trois parcelles précédentes (semi-variogramme en fonction de la distance) reflète le modelé du sol, dans la même direction. D'autres exemples sur d'autres types de modelé ont confirmé ces résultats. Cette forme est voisine d'une parabole pour un plan incliné, en cloche pour un bourrelet ou une rigole et présentant des ondulations pour des billons. Le semi-variogramme peut être utilisé pour décrire le modelé et estimer la rugosité du sol.

Quand la courbe atteint un maximum (courbe en cloche), le modelé est décrit à la fois par le maximum ou *palier* (Γ_m) qui correspond à la macro-rugosité (d'ordre décimétrique) et par la portée qui représente la dimension latérale (taille). Ces notions de palier et de portée décrivent des rugosités respectivement verticale et horizontale.

L'effet pépite (Γ_0) existe pour la plupart des enregistrements. Il doit être interprété comme une rugosité fine ou micro-rugosité de l'ordre du centimètre qui est due soit aux cailloux soit à la végétation herbacée.

Indices de rugosité régionalisés

Par analogie avec l'indice de déviation standard (SE), la racine carrée des valeurs de Γ est proposée comme indice de rugosité.

La micro-rugosité R_0 est la racine carrée de la valeur Γ_0, elle est déterminée en prolongeant les courbes obtenues dans les quatre directions au voisinage de l'origine. C'est une donnée en général isotrope, liée aux cailloux du sol, à l'enherbement.

La macro-rugosité R_m est la racine carrée de la valeur de Γ_m qui correspond à un palier quand il existe (première bosse dans le cas d'un modelé en billon). Cette donnée est le plus souvent liée à une direction. Dans les champs cultivés, un travail du sol réalisé dans une direction privilégiée construit un modelé anisotrope.

La taille ou portée T_m est la distance de l'origine du semi-variogramme au palier ou au premier sommet. Cette distance permet en général de caractériser la taille latérale de la macro-rugosité.

La méso-rugosité R_m^o est la différence entre macro et micro rugosité.

Pour la détermination de la rugosité d'un champ dans une direction donnée on retient la macro-rugosité si elle existe (labour, billons), autrement c'est la micro-rugosité qui est prise en considération (cas de sols non travaillés et battants). On appellera R_d cette rugosité.

Ces nouveaux indices sont appelés : indices de rugosité régionalisés

Comparaison à l'indice de déviation standard (SE)

Pour les deux directions principales (X et Y), les valeurs des maxima des courbes (le premier maximum dans le cas d'une courbe bimodale) ont été comparées à l'écart-type moyen des différents transects concernés de même direction (cette valeur étant déterminée à partir des altitudes corrigées de l'effet de pente). La figure 5 montre que le maximum du semi-variogramme suit le même sens de variation que l'écart-type. La courbe d'ajustement est une droite.

La liaison entre l'indice de rugosité directionnel R_d et l'écart-type moyen (indice de Kuipers modifié, SE) dans la même direction (après correction de la pente) est très significative.

Ces résultats ne sont pas surprenants car la plupart des semi-variogrammes cessent de croître au-delà d'une certaine distance : la portée. Le palier du modèle de transition est à priori la variance de toutes les données (Journel et Huijbregts, 1978). En effet, la relation entre la fonction représentative du semi-variogramme $\Gamma(h)$, la fonction d'autocorrélation $\rho(h)$ et la variance σ^2 est :

$$\Gamma(h) = \sigma^2[1 - \rho(h)]$$

Quand la fonction d'autocorrélation tend vers zéro, $\Gamma(h) = \sigma^2$; cette condition est réalisée quand il y a un palier. Si le modelé du sol ne présente pas de pente, σ est directement l'index SE.

Quand il y a un effet pépite, on a en fait des structures emboîtées (gigognes) et Γ_0 est le palier d'un semi-variogramme dont la portée est inférieure au pas de mesure. Dans ce cas le semi-variogramme est inconnu. Le palier est le même dans toutes les directions, il est indépendant de la pente du terrain. La racine carrée de ce palier est l'écart-type. Si la fonc-

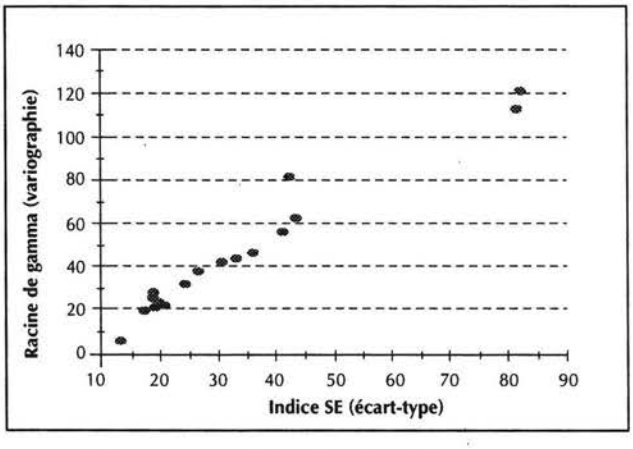

Figure 5. *Comparaison à l'indice de déviation standard SE.*

tion d'autocorrélation est périodique : $\Gamma(h) = \sigma^2[1 - \cos(h)]$, il n'y a pas de palier, mais le premier maximum est égal à σ^2 lorsque $\cos(h) = 0$, ($h = T_m$). Le premier maximum représente le contraste, (la rugosité) entre le sommet et le creux des deux faces des billons présents dans le champ de la mesure.

La racine carrée de Γ_0 ou de Γ_h est un indice de la rugosité du sol ; cet indice est comparable à l'indice SE, dérivé de celui établi par Kuipers.

Conclusion

La géostatistique est applicable à toutes les variables géoréférencées y compris les données altimétriques. Au niveau d'une parcelle (pas métrique), cette méthode permet de décrire le modelé et de proposer plusieurs indices d'évaluation de la rugosité du sol :

- une micro-rugosité (pas centimétrique) qui correspond à la présence de cailloux ou d'herbes fines, évaluée par l'effet pépite ;
- une macro-rugosité (pas décimétrique) qui est déterminée par le palier ou la bosse du semi-variogramme quand il y a un seuil ou un maximum.

Si le premier indice est isotrope le second est souvent anisotrope et dépend du travail du sol. Ces deux nouveaux indices sont donc peu différents de l'indice SE. Ils sont certes plus difficiles à calculer, mais ils ont l'avantage d'être établis à partir d'un graphique qui représente le modelé du sol. En l'absence de macro-porosité, une seule porosité est déterminée, c'est la micro-porosité (cailloux, micro-mottes). Seule cette méthode permet de déterminer la micro-rugosité en présence de macro-rugosité. Un troisième indice de rugosité latérale, la portée, est de plus proposé. La portée fournit des indications sur l'extension latérale des mottes et des billons.

Références bibliographiques

CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM. Paris, 229 p.

GUILLOBEZ S., ZOUGMORE R., 1991. Etude du ruissellement et de ses principaux paramètres, à la parcelle, (Saria, Burkina Faso). in Sem. In. Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Séminaire international, Bamako 9-13 déc. 1991; AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext : 319-329.

JOURNEL A.G., HUIJBREGTS CH.J., 1978. Mining Geostatistics, Academic Press, London, New York, San Francisco, 600 p.

KRIGE D.G., 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces fore or evaluation. In Proceedings of the Symposium on Mathematics Statistics and Computer Applications in One Valuation, Johannesburg. Journal of the South African Institution of Mining and Metallurgy, 66 : 13-38.

KUIPERS, H. 1957. A reliefmeter for soil cultivation studies. Neth. J. Agric. Sci., 5 : 255-262.

LINDEN D.R., D.M. VAN DOREN Jr., 1986. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. Soil. Sci. Soc. Am. J., 50 : 1560-1565.

MATHERON G., 1955. Application des Méthodes statistiques à l'estimation des gisements. Annales des Mines, déc., 50-75.

MATHERON G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris. 305 p.