

Césium-137 et études environnementales - Exemple de l'érosion des sols

C. Bernard*, S. Wicherek** et M.R. Laverdière***

* MAPAQ, Service des Sols, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Québec, G1P 3W8

** Centre de Biogéographie-Écologie, URA 1514 CNRS, Le Parc, 92211 Saint-Cloud

*** Université Laval, Département des Sols, Sainte-Foy, Québec, G1K 7

RESUME

Les techniques de mesure des isotopes dans les sols ont été développées aux USA en particulier par Ritchie & Mc Henry à partir des années 1970, puis ont été utilisées plus tard dans d'autres pays : Canada, Australie, Angleterre, Pologne.

Il s'avère que le Césium-137 s'impose comme l'un des meilleurs marqueurs de la dégradation des sols : sa durée de vie est de plus de 30 ans et grâce à un seul échantillonnage il nous permet d'évaluer l'érosion des sols. Actuellement des expériences utilisant cette méthode sont menées par les auteurs sur plusieurs sites au Québec et en France.

Il est prouvé que l'activité du Césium-137 dépend des données morphostructurales climatiques et également des couverts végétaux. Le lien direct entre les quantités de la pluviométrie et l'activité du Césium est évident. Ces études seront développées afin de déterminer l'impact de l'agriculture sur la qualité des sols et des eaux, en particulier à travers l'étude concernant les relations entre agrosystèmes et sylvosystèmes pour favoriser une agriculture durable et une meilleure gestion des espaces ruraux.

MOTS CLES

Bassin Parisien - Cs-137 - Eaux - Environnement - Erosion - Vallée du Saint-Laurent.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est une des causes essentielles de dégradation des sols agricoles. Ce phénomène contribue à réduire la productivité des sols affectés en plus de constituer une source majeure de pollution des eaux de surface en milieu agricole (ASAE 1985 ; Clark et al. 1985). Cependant, dans la plupart des pays, les gestionnaires des ressources sol et eau sont constamment confrontés à la rareté de données sur ce phénomène : son importance réelle, sa distribution géographique, les conditions topographiques et agronomiques les plus vulnérables, etc.

Les mesures en parcelles, pour répondre à ces interrogations, constituent une approche

longue et coûteuse. En effet, ces mesures doivent être poursuivies pendant plusieurs années, afin d'intégrer les fluctuations climatiques interannuelles. Le nombre de parcelles requises peut également devenir très important, si l'on désire estimer les risques d'érosion sous une variété de conditions édaphiques et agronomiques. De plus, dans les pays nordiques, l'érosion nivale résultant de la fonte de neige, doit être prise en considération, même si sa mesure est difficile à réaliser. Plusieurs auteurs remettent en question l'étude sur les parcelles d'expérimentation de quelques dizaines de m² concernant la validité des résultats (Mutchler et al. 1994 ; Roels 1985).

Dans ce contexte, l'utilisation de marqueurs persistants peut apparaître comme un complément essentiel aux méthodes conventionnelles (McHenry, 1968). Des divers isotopes qui ont été suggérés comme traceurs du processus d'érosion, le césium-137 s'avère particulièrement intéressant.

AVANTAGES DU Cs-137 COMME MARQUEUR D'ÉROSION

Le Cs-137 est un sous-produit des essais atomiques réalisés en haute atmosphère dans les années 1950 et 1960. La majeure partie des retombées s'est produite en 1963, avec un pic secondaire en 1959 (Figure 1). Les retombées de ces explosions, via les précipitations, ont constitué la principale source d'entrée du Cs-137 dans l'environnement terrestre. Comme la majeure partie des essais nucléaires a eu lieu dans l'hémisphère nord, les retombées y ont été beaucoup plus importantes que dans l'hémisphère sud (Figure 1). A l'échelle régionale, l'importance des retombées a été proportionnelle à celle des précipitations annuelles totales. La Figure 2 illustre cette relation pour l'Amérique du Nord. Une relation semblable a également été rapportée pour la Bavière (Bunzl et Kracke 1988) et la Nouvelle-Zélande (Basher et Matthews 1993). En Europe, l'accident survenu à la centrale de Chernobyl, en 1986, a introduit de nouvelles quantités de Cs-137. L'importance des ajouts est cependant très variable, en fonction des précipitations survenues dans les jours qui ont suivi cet accident (Anspaugh et al. 1988). Suite à l'étude de 16 sites situés au sud-est de Leuven, Van den Berghe et Gulink (1987) ont ainsi estimé ce nouvel apport à 1530 Bq m⁻² en moyenne, soit 75% des niveaux mesurés avant Chernobyl. La Figure 3 illustre le niveau et la variabilité de ces retombées pour la France.

L'intérêt pour le Cs-137 comme indicateur des mouvements de sol tient à plusieurs éléments (Ritchie et McHenry 1990) :

- a) les retombées ont été universelles, si bien que cette technique peut être utilisée partout dans le monde, à des échelles spatiales variant de la parcelle au bassin versant ;
- b) la majeure partie des retombées datant du début des années 1960, la mesure du déplacement de cet isotope permet d'estimer des taux d'érosion à long terme, portant sur plus de 30 ans ;
- c) en raison de sa demi-vie de 30,2 ans, les quantités de Cs-137 encore présentes dans les sols sont aisément détectables et le demeureront pour plusieurs années ;
- d) une fois retombé au sol, le césium est fermement retenu par les particules de sol, n'étant à toute fin pratique ni lessivé, ni prélevé par les cultures. Sa redistribution spatiale dans l'environnement reflète donc les mouvements de sol ;
- e) les mesures de Cs-137 renseignent non seulement sur l'érosion nette, mais sur l'ensemble des mouvements de sol, leur importance relative et leur distribution spatiale dans le paysage ;
- f) un seul échantillonnage des sols de la zone étudiée est suffisant pour pouvoir y estimer l'ensemble des mouvements de sol en cours depuis plus de 30 ans.

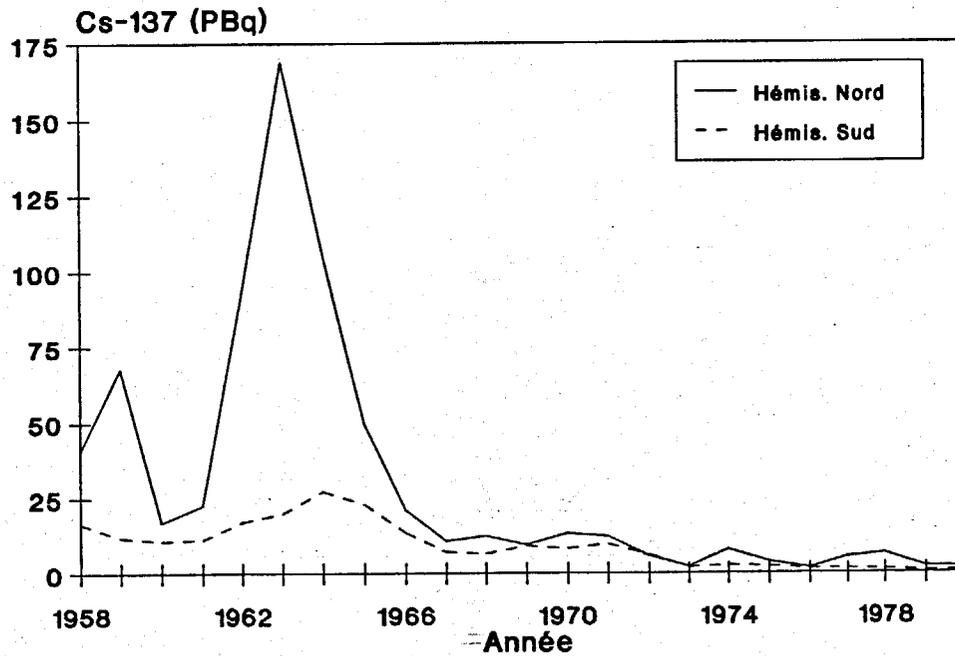


Figure 1. Retombées de Cs-137 dans les hémisphères nord et sud (UNSCEAR 1982).

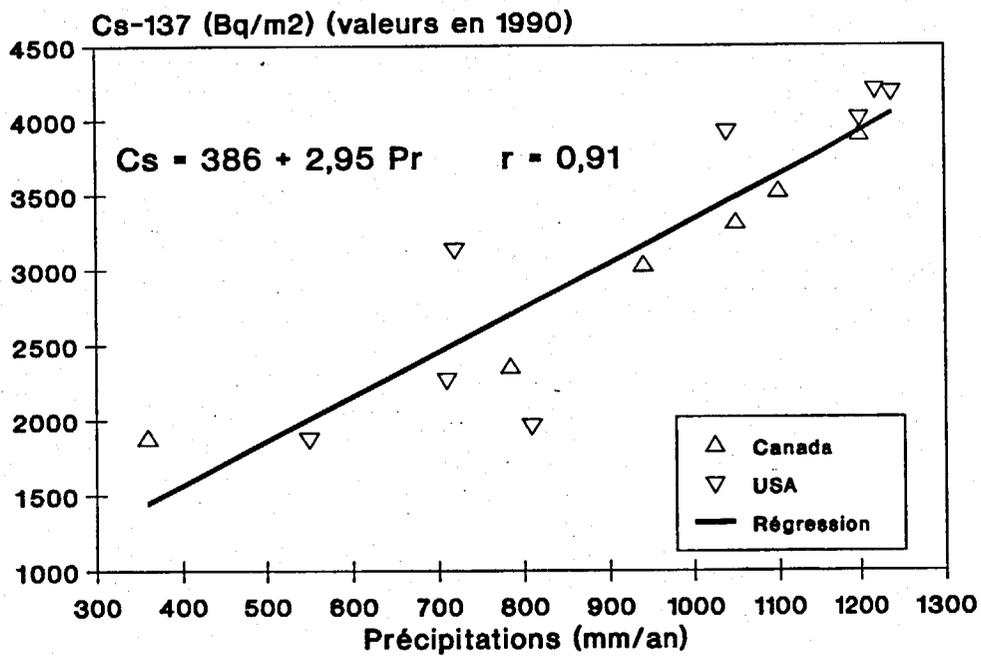


Figure 2. Teneur du sol en Cs-137 en fonction des précipitations annuelles, pour des sites non érodés

ESTIMATION DE L'EROSION A L'AIDE DU Cs-137

Dans un sol non perturbé, les retombées de Cs-137 sont normalement concentrées dans les premiers centimètres et diminuent de façon exponentielle avec la profondeur. Ceci confirme d'ailleurs la forte rétention de cet isotope par les sols. Le labour homogénéise la concentration en Cs-137 sur l'épaisseur de l'horizon cultivé (Figure 4). Lors de l'échantillonnage des sols, il faut donc veiller à échantillonner sur une profondeur suffisante pour estimer la totalité de Cs-137 présent au point de prélèvement.

L'importance des déplacements de sol est estimée en comparant l'activité spécifique d'un site en Cs-137 (Bq m^{-2}) à celle d'un site témoin, considéré comme non érodé (milieu forestier, vieille prairie). Plusieurs auteurs considèrent alors que la perte de sol subie par la couche labourée est directement proportionnelle à la réduction de l'activité spécifique du sol en Cs-137 :

$$E = [CL N^{-1}] * [1 - (T_n/T_o)] \quad (1)$$

où E : perte de sol ($\text{t ha}^{-1} \text{an}^{-1}$)

To : activité spécifique en Cs-137 du sol d'un site non-érodé (Bq m^{-2})

Tn : activité spécifique en Cs-137 du sol d'un site érodé (Bq m^{-2})

CL: poids de la couche de labour (t ha^{-1})

N : nombre d'années depuis le maximum de retombées (1963)

Cependant, la sélectivité du processus érosif se traduit par des sédiments enrichis en fractions fines, en nutriments ainsi qu'en césium (Bernard et al. 1992). D'autre part, le labour remplace graduellement le sol de surface entraîné par l'érosion par du sol provenant des horizons plus profonds. Ce dernier étant pauvre, sinon dépourvu, en Cs-137, il s'ensuit une baisse constante de la concentration du sol en Cs-137 dans la couche de labour. Une tonne de sol érodé en 1993 entraîne donc vraisemblablement moins de Cs-137 que la même tonne de sol perdue en 1963. Kachanoski (1993) a donc proposé une relation reliant perte de Cs-137 et perte de sol qui prend en considération ces deux éléments aux effets antagonistes :

$$E = CL R^{-1} [1 - (T_n/T_o)^{1/N}] \quad (2)$$

où R : rapport entre la teneur du sol érodé en Cs-137 et celle du sol en place.

L'utilisation de l'une ou l'autre des relations précédentes conduit à des estimations équivalentes jusqu'à une perte de 50 % des retombées de Cs-137, i.e. pour des taux d'érosion de $30 \text{ t ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ environ. Au delà de ce seuil, la relation (2) produit des estimations de pertes de sol significativement plus élevées que la première. Ce point est sans doute l'aspect de la technique qui mérite d'être étudié plus précisément.

UTILISATION DU Cs-137 POUR LA MESURE DE L'EROSION

Les premiers travaux utilisant le Cs-137 comme indicateur des mouvements de sol ont été réalisés aux USA, dans les années 1960. Depuis, son usage s'est répandu dans le monde. Au cours des 10 ou 15 dernières années, de nombreuses études utilisant cette technique ont été réalisées en Amérique du Nord (Bernard et Laverdière 1992 ; Sutherland et De Jong 1990 ; Lance et al 1986 ; McHenry et Bubenzer 1985), en Europe (Froehlich et al. 1993 ; Wicherek et al. 1993 ; Wicherek et Bernard 1994 ; De Roo 1991 ; Quine et Walling 1991), en Océanie (Elliott et Cole-Clark 1993 ; Campbell et al. 1986) ainsi que, dans une moindre mesure, en Asie et en

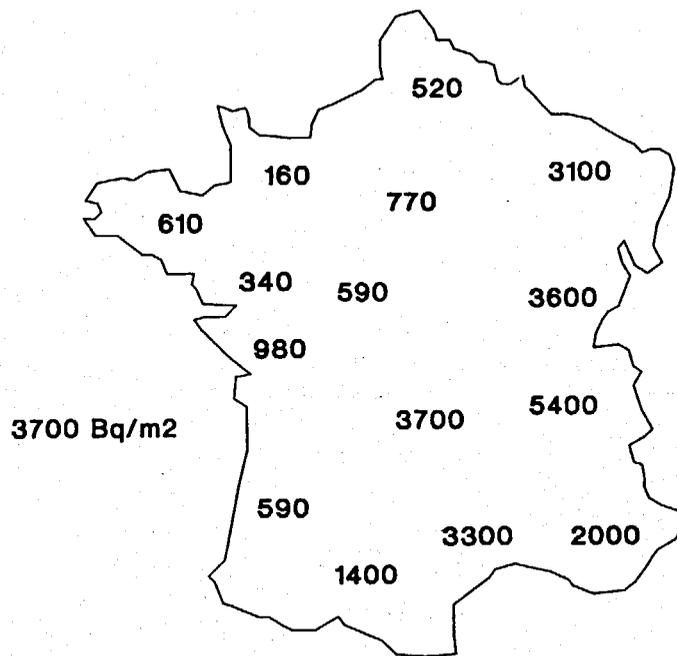


Figure 3. Retombées de Chernobyl en France (d'après Moroni et Pellerin 1987).

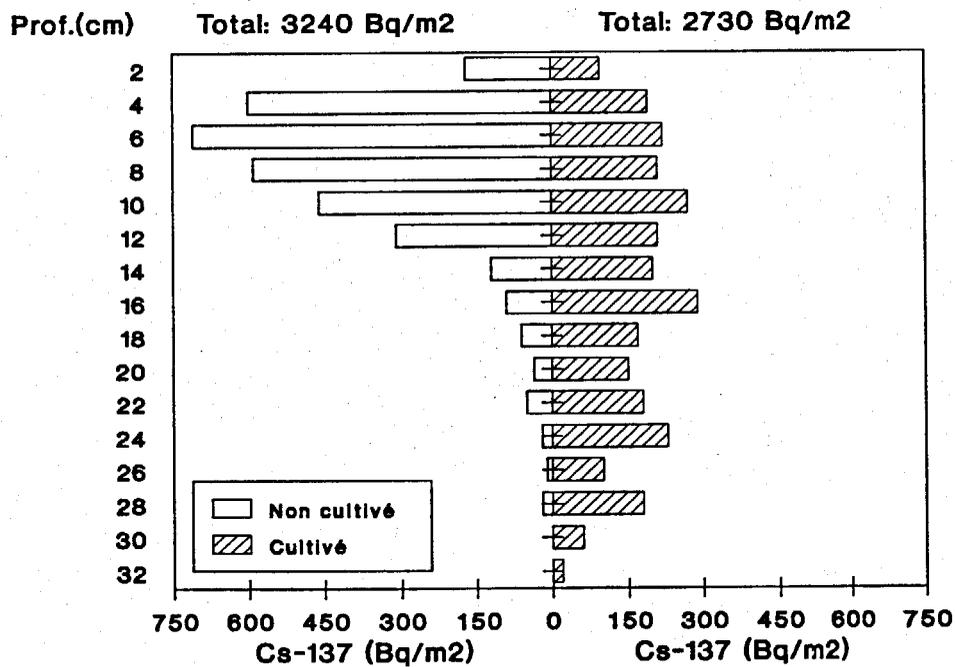


Figure 4. Distribution du Cs-137 dans le profil du sol (d'après Walling et al. 1986).

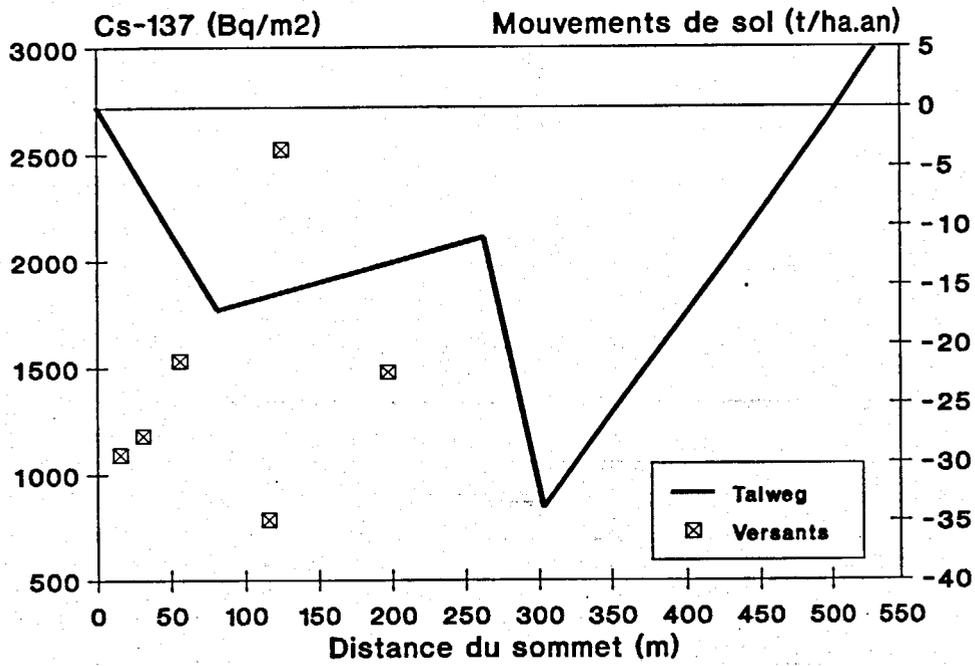


Figure 5. Activité du sol en Cs-137 dans le bassin versant d'Erlon (Wicherek et Bernard, 1994).

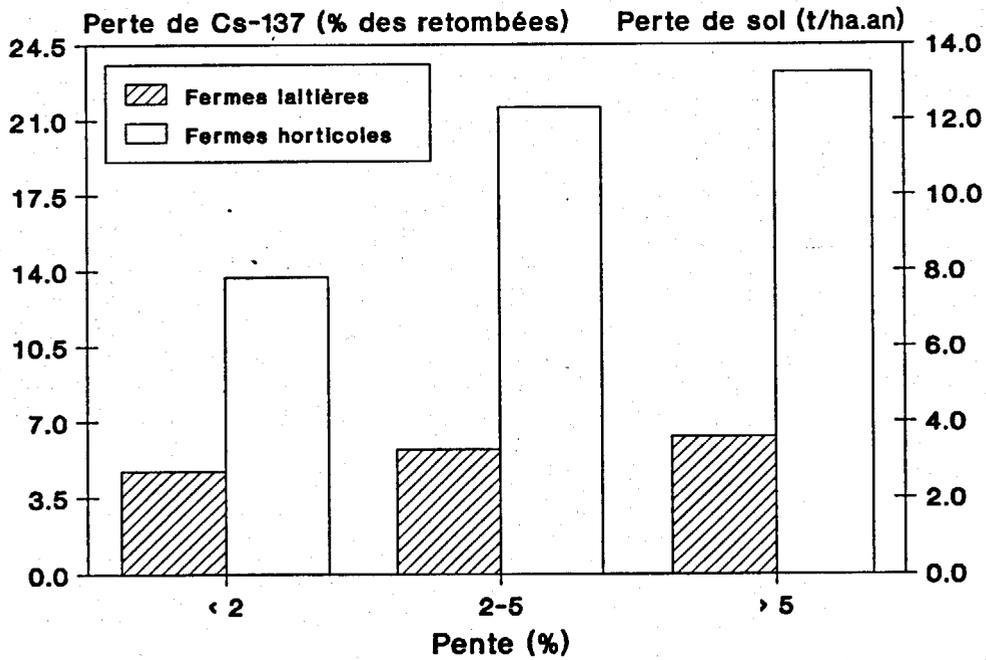


Figure 6. Pertes de sol, estimées à l'aide du Cs-137, en fonction de la pente et de l'usage du sol près de Québec (d'après Bernard 1992).

Afrique.

Ces diverses études ont été réalisées sur une vaste gamme de sols, de pentes, de cultures et de pratiques culturales. Bien que la plupart aient été conduites à l'échelle du champ, la taille de l'unité expérimentale a varié de la parcelle au bassin versant. La variété des conditions sous lesquelles elle a été utilisée démontre la certitude de cette technique.

Les auteurs ont eu recours au Cs-137 pour estimer les pertes de sol dans le bassin versant d'Erlon, d'une superficie de 28 ha (Wicherek et Bernard 1994). Les pertes de sol ainsi estimées ont pu être comparées à celles mesurées à l'exutoire du bassin pendant la période de 1989 à 1992 (Wicherek 1993). Les mesures de Cs-137 ont également permis d'étudier la distribution spatiale du risque érosif à l'intérieur des bassins, complétant ainsi de façon intéressante les relevés effectués à l'exutoire (Figure 5). Une seconde étude portant sur un bassin versant de la région de Vierzy est en cours de finalisation.

Une étude réalisée dans la région de Québec a permis de mettre en évidence l'influence de l'inclinaison de la pente et du type d'agriculture pratiquée sur l'importance des pertes de sol à long terme (Figure 6). Un petit bassin versant d'une superficie de 80 ha est également échantillonné de façon systématique suivant une maille de 25-30 m, en vue d'y étudier l'importance des mouvements de sol et leur relation avec la topographie et les pratiques culturales utilisées dans ce bassin.

UTILISATION DU Cs-137 POUR DES ETUDES ENVIRONNEMENTALES

Le Cs-137 peut également être utilisé dans le cadre d'études plus vastes portant sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants, sur les impacts environnementaux des activités agricoles, etc.

Ritchie et McHenry (1978) ont ainsi rapporté une activité spécifique des sols en Cs-137 de 2775 Bq m⁻² dans les sols de bassins cultivés et de 3845 Bq m⁻² dans les sols des bassins non cultivés. Les sédiments lacustres des mêmes bassins présentaient des activités spécifiques de 25010 et 13505 Bq m⁻² respectivement. Ces résultats démontraient une activité érosive beaucoup plus intense dans les bassins cultivés. Pour sa part, Walling et al. (1986) ont utilisé le Cs-137 pour étudier les mouvements de sol globaux dans de petits bassins versants. Ils ont ainsi estimé que près de 50 % du sol érodé avait redéposé en bordures des champs et qu'à peine 3,5 % des charges de sédiments avaient franchi les limites du bassin étudié.

Les auteurs comptent entreprendre bientôt une étude sur le bassin versant des marais de La Souche, où le Cs-137 servira à suivre le cheminement du sol érodé, et des polluants qui y sont associés, depuis les champs en culture (à l'amont du bassin), jusqu'aux marais (à l'aval), en passant par le réseau hydrographique (position intermédiaire). Un projet similaire sera conduit parallèlement au Québec, afin de comparer l'intensité des processus impliqués, en France et au Québec.

CONCLUSION

En conclusion, l'étude de la redistribution spatiale du Cs-137 est une technique rapide et relativement économique, permettant d'évaluer l'importance des mouvements de sol en cours depuis plus de 30 ans sous diverses conditions agro-climatiques. Cette technique constitue ainsi un très intéressant complément aux mesures directes en parcelles ou en bassin versant, et permet au sens large du terme de mieux comprendre le déplacement des flux solides et liquides sur les unités spatiales concernées.

BIBLIOGRAPHIE

- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 1985. Erosion and soil productivity. Proceedings of the National Symposium on Erosion and Soil Productivity. New Orléans, Dec. 10-11 1984. ASAE Publ. 8-85. 289 p.
- Anspaugh, L.R., Catlin, R.J., Goldman, M. 1988. The global impact of the Chernobyl reactor accident. *Science* 242 : 1513-1519.
- Basher, L.R., Matthews, K.M. 1993. Relationship between ^{137}Cs in some undisturbed New Zealand soils and rainfall. *Austr. J. Soil Res.* 31 : 655-663.
- Bernard, C. 1992. Etude de l'érosion des sols de l'île d'Orléans à l'aide du césium-137. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec. 135 p.
- Bernard, C., Laverdière, M.R. 1992. Spatial redistribution of Cs-137 and soil erosion on Orléans Island, Québec. *Can. J. Soil Sci.* 72 : 543-554.
- Bernard, C., Laverdière, M.R., Pesant, A.R. 1992. Variabilité de la relation entre les pertes de césium et de sol par érosion hydrique. *Geoderma* 52 : 265-277.
- Bunzl, K., Kracke, W. 1988. Cumulative deposition of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG). *J. Environ. Radioactiv.* 8 : 1-14.
- Campbell, B.L., Loughran, R.J., Elliott, G.L., Shelly, D.J. 1986. Mapping drainage basin sediment sources using caesium-137. Pages 437-446 In *Drainage Basin Sediment Delivery* Publ. 159. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford, England.
- Clark, E.H., Haverkamp, J.A., Chapman, W. 1985. Eroding soils. The off-farm impacts. The Conservation Foundation, Washington, D.C. 252 p.
- De Roo, A.P.J. 1991. The use of ^{137}Cs as a tracer in an erosion study in South-Limburg (The Netherlands) and the influence of Chernobyl fallouts. *Hydrol. Process.* 5 : 215-227.
- Elliott, G.L., Cole-Clark, B.E. 1993. Estimates of erosion on potato lands on krasnozems at Dorrigo, N.S.W., using the caesium-137 technique. *Aust. J. Soil Res.* 31 : 209-223.
- Froehlich, W., Walling, D.E., Higgitt, D.L. 1993. The use of caesium-137 to investigate soil erosion and sediment delivery from cultivated slopes in the Polish Carpathians. Pages 271-283 In *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. S. Wicherek ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Kachanoski, R.G. 1993. Estimating soil loss from changes in soil cesium-137. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 629-632.
- Lance, J.C., McIntyre, S.C., Naney, J.W., Rousseva, S.S. 1986. Measuring sediment movement at low erosion rates using cesium-137. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 1303-1309.
- McHenry, J.R. 1968. Use of tracer technique in soil erosion research. *Trans. ASAE* 11 : 619-625.
- McHenry, J.R., Bubenzer, G.D. 1985. Field erosion estimated from ^{137}Cs activity measurements. *Trans. ASAE* 28 : 480-483.
- Moroni, J.P., Pellerin, P. 1987. Contamination radioactive des produits alimentaires et santé publique. Pages 72-84 In *Actes du Groupe de réflexion sur la contamination radioactive de la chaîne alimentaire*. 11 Juin 1987, Paris, France.
- Mutchler, C.K., Murphee, C.E., McGregor, K.C. 1994. Laboratory and field plots for erosion studies. Pages

- 11-37 In *Soil erosion research methods*. 2nd edition. R. Lal ed. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa.
- Quine, T.A., Walling, D.E. 1991. Rates of soil erosion on arable fields in Britain: quantitative data from caesium-137 measurements. *Soil Use Managem.* 7 : 169-176.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R. 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns : A review. *J. Environ. Qual.* 19 : 215-233.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R. 1978. Fallout cesium-137 in cultivated and noncultivated north central United States watersheds. *J. Environ. Qual.* 7 : 40-44.
- Roels, J.M. 1985. Estimation of soil loss at a regional scale based on plot measurements some critical considerations. *Earth Surf. Proc. Landforms* 10 : 587-595.
- Sutherland, R.A., De Jong, E. 1990. Estimation of sediment redistribution within agricultural fields using caesium-137, Crystal Springs, Saskatchewan, Canada. *Applied Geogr.* 10 : 205-221.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 1982. Ionizing radiation-sources and biological effects. United Nations, N.Y.
- Vanden Berghe, I., Gulinck, H. 1987. Fallout ^{137}Cs as a tracer for soil mobility in the landscape framework of the Belgian loamy region. *Pedologie.* 37 : 5-20.
- Walling, D.E., Bradley, S.B., Wilkinson, C.J. 1986. A caesium-137 budget approach to the investigation of sediment delivery from a small agricultural drainage basin in Devon, UK. Pages 423-435 In *Drainage Basin Sediment Delivery* Publ. 159. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford, England.
- Wicherek, S. 1993. Impact of agriculture on soil degradation: modelisation at the watershed scale for a spatial management and development. Pages 137-153 In *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. S. Wicherek ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Wicherek, S., Veyret, Y., Bernard, C. 1993. L'utilisation du césium-137 pour la connaissance de la dégradation du sol. *Mém. Soc. géol. Fr.* 162 : 261-268.
- Wicherek, S., Bernard, Cl. 1994. Assessment of soil movements in a watershed from Cs-137 data and conventional measurements (ex : the Parisian Basin). *Catena* (sous presse).