

Étude de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant la méthode du ^{137}Cs

*L. MABIT¹, C. BERNARD² ET M. R. LAVERDIÈRE³

RÉSUMÉ - L. Mabit, C. Bernard et M. R. Laverdière, Étude de la dégradation des sols par l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants en utilisant la méthode du ^{137}Cs . *Agrosolutions* 18 (1) : 12-16. Afin de spatialiser et de quantifier la résultante de l'érosion hydrique à l'échelle fonctionnelle de deux bassins versants agricoles, un de 1,8 km² dans le nord-est de la France (Vierzy) et un de 0,8 km² sur le piedmont des Appalaches au Québec (Lennoxville), les auteurs ont utilisé la méthode du césium-137 (^{137}Cs). Pour les deux sites, la résultante des processus érosifs a été cartographiée et un bilan sédimentaire complet a été établi, distinguant les processus présents (érosion, dépôts), ainsi qu'une estimation du taux de dégradation spécifique à l'exutoire. Ces sorties nettes ont été estimées à 1,9 Mg ha⁻¹ an⁻¹ et 2,9 Mg ha⁻¹ an⁻¹ respectivement pour Vierzy et Lennoxville. La variabilité et les différences de répartition et d'amplitude des mouvements des sols, ainsi que les sorties nettes aux exutoires, s'expliquent par les pratiques agricoles, le choix des cultures et les conditions morphoclimatiques auxquelles sont soumis ces deux bassins à vocation agricole.

D'autre part, dans l'étude portant sur le site de Vierzy, les résultats ont été complétés par d'autres mesures dont celle de la teneur en matière organique qui s'est avérée étroitement corrélée à l'activité des sols en ^{137}Cs et à la topographie.

Cette étude révèle aussi que pour les deux bassins versants agricoles étudiés, les taux de dénudation sont 10 à 30 fois supérieurs aux processus de pédogenèse estimés en zone tempérée, remettant en cause à plus ou moins long terme la productivité et la durabilité de ces agrosystèmes, mais se situent tout de même à des niveaux inférieurs à la perte de sol tolérable établie à 6 Mg ha⁻¹ an⁻¹ en Amérique du nord.

Mots clés : Érosion hydrique, bassin versant agricole, césium-137 (^{137}Cs), France, Québec.

ABSTRACT - L. Mabit, C. Bernard and M.R. Laverdière, Water erosion measurement at the watershed level using the ^{137}Cs method. *Agrosolutions* 18 (1): 12-16. The caesium-137 (^{137}Cs) technique was used to quantify and spatialize the impact of water erosion at the scale of two small agricultural watersheds located in northern France in the Soissonnais region (1.8 km² in Vierzy) and in the Appalachian piedmont in southern Québec (0.8 km² near Lennoxville). Results from water erosion processes have been mapped for both experimental sites and a global sedimentary budget has been established to define erosional and depositional areas and to estimate the net losses at the outlets. The net sediment output was estimated at 1.9 and 2.9 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ in Vierzy and Lennoxville respectively. Variability and differences between the two sites, in terms of net sediment production and of spatial redistribution and magnitude of soil movements, reflect the differences of morphoclimatic conditions and of the cropping practices encountered in the two watersheds. Additional parameters were also measured for the French basin to evaluate the effect of erosion on soil quality. Organic matter was significantly correlated to with residual caesium activity. Despite the relatively low content of organic matter within the watershed, soil movement could be related with organic matter redistribution processes.

In this study soil loss rates appear to be 10 to 30 times higher than the average pedogenetic formation rates reported for soils developed under temperate climatic conditions. Despite the fact that the long-term sustainability of the present agricultural systems may thus be questioned to some extent, the soil loss estimations for both basins remained below the soil tolerable loss which has been established at 6 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ in North America.

Key words: Water erosion, agricultural watershed, Caesium-137 (^{137}Cs), France, Quebec.

1. Soil Science Unit, FAO/IAEA Agriculture and Biotechnology Laboratory, Agency's Laboratories, A-2444 Seibersdorf, Austria.

* Auteur pour la correspondance Téléphone : +43 (1) 2600-28271, Télécopieur : +43 (1) 2600-28222, courriel : l.mabit@iaea.org

2. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada.

3. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, Canada.

Introduction

Le sol n'a pas toujours été au centre des préoccupations des intervenants œuvrant en agriculture. Que ce soit en France ou au Canada, l'intensification et la spécialisation des productions ont largement contribué au dynamisme du secteur agricole, mais au prix d'une pression accrue sur les sols, ce qui a entraîné une accentuation de la dégradation de cette ressource naturelle (Mabit et al., 2000; Mabit et al., 2002 a) qui se manifeste fréquemment par l'érosion hydrique. L'érosion des sols et la détérioration de la qualité de l'eau sont deux problématiques imbriquées et indissociables. L'érosion par ruissellement concentré et l'érosion en nappe constituent d'importants vecteurs de transfert et de redistribution spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès), contribuant à induire des pollutions diffuses dans l'environnement. Pour lutter efficacement contre ces problèmes de pollution agricole d'origine anthropique, il est nécessaire d'adopter des mesures préventives en amont, afin de réduire l'apport de polluants associés, en contrôlant ou en influant sur la réduction de l'érosion hydrique. La maîtrise en amont de la gestion des sols, par la connaissance des zones à risque, permet d'éviter ou au moins, de réduire par la suite la modification de la charge interne en nutriments, les biomanipulations et autres méthodes de régénération des hydrosystèmes qui sont coûteuses et contraignantes. Mais l'étude des agrosystèmes pose certains problèmes en raison des limites d'interprétation spatiale et surtout temporelle des méthodologies existantes. De plus, les méthodes traditionnelles d'investigation permettent difficilement d'estimer et de cartographier les mouvements de sols à l'intérieur d'un bassin versant. L'utilisation d'isotopes anthropiques comme le ^{137}Cs peut lever cette limitation. L'étude de la redistribution de cet élément dans l'environnement permet en effet d'évaluer l'importance et la variabilité spatiale des déplacements de sol liés à l'action de l'érosion hydrique au sens large.

Les auteurs présentent ici une application de cette technique sur deux bassins versants agricoles, l'un situé en France et l'autre au Québec. L'objectif est d'étudier les mouvements de sol au sein de ces deux unités, d'estimer leur impact potentiel

respectif sur les écosystèmes aval et d'analyser les résultats obtenus en fonction des caractéristiques propres à chaque site.

Matériel et méthodes

Parmi les différents isotopes testés depuis le début des années 1960, le ^{137}Cs de par ses propriétés et son comportement environnemental s'est révélé comme un traceur particulièrement fiable pour mesurer l'érosion hydrique des sols à différentes échelles scalaires (Bernard et al., 1998). Apporté par les précipitations, ce radioélément se fixe rapidement et fortement aux particules du sol inférieures à 2 mm. Par la suite, l'érosion redistribue spatialement, ce radioisotope avec les particules de sol. L'utilisation d'un modèle d'interprétation tenant compte des retombées initiales permet de convertir en terme de perte ou de dépôt de sols l'activité en radio-isotope ainsi redistribuée (figure 1). La technique a été utilisée afin d'estimer l'impact de l'érosion sur deux sites agricoles expérimentaux l'un en France ($49^{\circ} 17'$ Nord - $3^{\circ} 18'$ Est) et l'autre au Canada ($45^{\circ} 22'$ Nord - $71^{\circ} 50'$ Ouest). Les études ont été menées parallèlement sur les deux bassins versants (Mabit, 1999).

Le premier site d'étude est localisé au sein du bassin sédimentaire parisien au nord-est de Paris (figure 2). Ce bassin de 1,8 km², Vierzy, est cultivé intensivement sur des sols limoneux à topographie plane. L'écoulement intermittent est soumis à des conditions climatiques plutôt clémentes. Le deuxième site étudié, Lennoxville, est un petit bassin versant de 0,8 km² situé à 150 km à l'est de Montréal dans le piémont

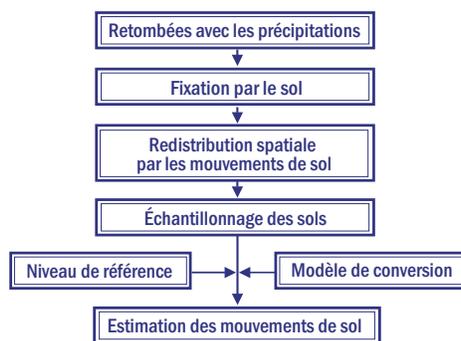


Figure 1. Principe de l'utilisation du ^{137}Cs pour l'estimation des mouvements de sol.

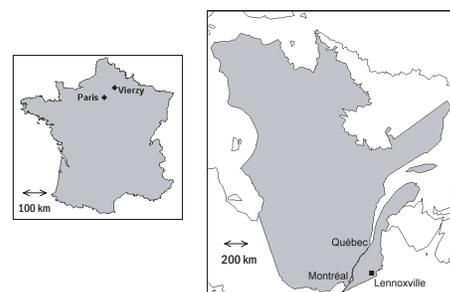


Figure 2 - Localisation des deux bassins versants agricoles étudiés

des Appalaches région d'élevage où règne un climat continental marqué (figure 2). Le site est vallonné et sa couverture pédologique est composée de séries de sols à texture limono-sableuse bordant un ruisseau permanent.

Les auteurs ont procédé à une « stratégie d'échantillonnage raisonnée » selon les différentes toposéquences pour le bassin agricole français (80 prélèvements). La plus grande partie du site québécois a été échantillonnée selon une maille de 25 par 30 m (539 prélèvements). Pour les deux sites, des prélèvements additionnels (13 pour Vierzy et 9 pour Lennoxville) ont été effectués à proximité immédiate des bassins, en milieu non perturbé (site de référence), afin d'estimer les retombées initiales de radio-isotope dans l'environnement. Les échantillonnages de sol des deux bassins ont été réalisés au cylindre de densité dans le cas du site français et à l'aide d'un carotteur motorisé pour le site québécois.

Les prélèvements des deux bassins ont été traités de manière similaire. Ils ont tout d'abord été séchés, puis tamisés à 2 mm. La fraction fine a été analysée par spectrométrie gamma d'après la procédure décrite par (De Jong et al., 1982) afin de quantifier sa teneur en ^{137}Cs . Les temps de comptage, afin d'obtenir une erreur de comptage inférieure à 10%, ont été compris entre 7 000 et 50 000 secondes. L'utilisation du modèle SMBM (Simplified Mass-Balance Model) (Walling et al., 2002) a permis de convertir en termes de mouvement des sols ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) les variations d'activité en ^{137}Cs des sols par rapport aux sites de référence. Par la suite, les mouvements de sols résultants ont été spatialisés et analysés en utilisant le logiciel Surfer 6,0 (Golden Software Inc., 1995).

Enfin, aucun facteur de correction associé à des retombées radioactives en provenance de l'explosion de Tchernobyl n'a été intégré dans le calcul. En effet, les impacts de cette dernière ont été évalués comme étant nuls en Amérique du nord et inférieurs à 10% des retombées initiales en radioélément pour le site de Vierzy.

Résultats et discussion

La cartographie et un bilan des mouvements de sols au sein des deux bassins versants ont été établis. Les résultats sont présentés aux figures 3 et 4 ainsi qu'au tableau 1. Pour les deux sites, les zones d'érosion et de dépôt sont étroitement liées à la morphologie et à la topographie (figures 3 et 4). Les sols dégradés se situent en haut des interfluves et en cours de pente.

D'un point de vue spatial, la dégradation des sols de Vierzy touche principalement l'aval du bassin versant aux pentes plus marquées et aux cultures érosives dominantes. Les zones stables et/ou de redépôt se positionnent dans les points bas du relief. Les taux de mouvement de sol à Vierzy varient de -18 à $+19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. L'érosion nette touche principalement l'aval du bassin versant, en raison de pentes plus prononcées et d'une présence plus marquée de cultures érosives (Mabit et al., 1998). La moitié amont du bassin se caractérise par un bilan net de mouvements de sol nul, voire par des redépôts, en bas de pente et à la confluence de talwegs secondaires.

La majeure partie du bassin de Lennoxville est érodée. L'amplitude des mouvements de sol est légèrement plus réduite que pour Vierzy, variant de -20 à $+12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Les différences amont/aval sont aussi moins marquées. La spatialisation des données ne permet pas de remarquer de différence notable entre l'amont et l'aval du site. Sans craindre de schématiser à l'extrême, une érosion modérée affecte le site de Lennoxville. En effet, 89% des secteurs érodés (68% de la surface totale du bassin) sont soumis à des pertes de sol inférieures à $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$; cette valeur étant souvent citée comme étant le seuil de perte de sol tolérable en agriculture en Amérique du nord (Wall et al., 2002). Les zones en équilibre et ou en situation de redépôt

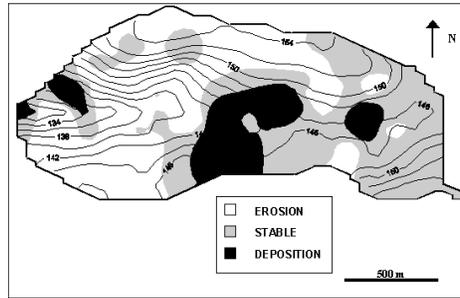


Figure 3. Carte globale des mouvements des sols du bassin versant de Vierzy.

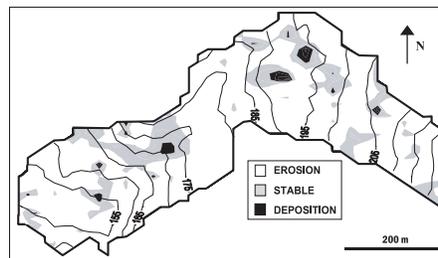


Figure 4. Carte globale des mouvements des sols du bassin versant de Lennoxville.

se localisent dans les dépressions, les ruptures de pente, au sein des replats topographiques ainsi qu'à la limite du talweg principal permanent. Les taux d'érosion brute rapportés au tableau 1 sont identiques, signifiant que l'amplitude de la dégradation des sols est comparable aux deux sites en secteurs érodés.

Cinquante-neuf pour cent (59%) des matières érodées sortent effectivement du bassin de Vierzy et quatre vingt treize pour cent (93%) de celui de Lennoxville. Les sorties nettes représentent une perte nette de sol de $1,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le site français et $2,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le site québécois (tableau 1).

Les secteurs nets de dépôt de sédiment étant peu importants au site de Lennoxville cela se traduit naturellement par un coefficient d'exportation ou *Sediment delivery ratio* (qui tient compte de l'ensemble des déplacements de sol quelle que soit leur nature) plus important qu'à Vierzy. Cela signifie que la plupart des sédiments mis en mouvement le long des interfluves est dirigée vers le talweg humide qui canalise les écoulements vers l'exutoire du bassin.

Les sorties à l'exutoire pouvant interférer avec les écosystèmes aval, ramenées à l'échelle des deux bassins, sont de 342 tonnes pour Vierzy et de 232 tonnes pour Lennoxville.

D'autre part lorsque les sols des régions climatiques tempérées et continentales sont protégés et/ou sous couvert végétal conséquent, l'érosion, et donc les taux de dénudation sont réduits à environ $0,01 \text{ mm/an}$, tandis que les processus de pédogenèse sont de quelques centièmes de millimètres par an (Robert et Cheverry, 1996). Sur la base d'une masse volumique apparente moyenne de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ soit $1,5 \text{ t m}^{-3}$ ($n = 80$) pour les sols de Vierzy et de $1,1 \text{ g/cm}^3$ soit $1,1 \text{ t/m}^3$ ($n = 539$) pour ceux de Lennoxville, on obtient donc respectivement en fonction des sorties nettes de chaque bassin agricole une perte de terre arable annuelle de $0,12 \text{ mm}$ et de $0,26 \text{ mm}$. Ces taux de dénudation sont tout de même 10 à 30 fois supérieurs aux taux naturels de dénudation des deux zones climatiques appréhendées.

Pour le bassin de Vierzy, les résultats ont été complétés par des mesures physico-chimiques afin de mesurer l'impact de l'érosion sur la qualité des sols. En fonction de la position topographique des sols

Tableau 1. Bilan des mouvements des sols pour les bassins versants de Vierzy (France) et de Lennoxville (Canada).

	Vierzy	Lennoxville
Surface totale (ha)	180	80
Surface stable (%)	41	19
Surface érodée (%)	45	76
Surface des dépôts (%)	14	5
Taux d'érosion brute ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	3,2	3,1
Sortie nette ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)	1,9	2,9
Coefficient d'exportation * (%)	59	93

* Perte nette de sol pour l'ensemble du bassin / taux d'érosion brute

analysés, une relation simple linéaire et croissante a été observée entre les taux de matière organique et les teneurs des sols en ^{137}Cs (Mabit et Bernard, 1998) :

% de matière organique = 0,0002 * ^{137}Cs (Bq m⁻²) + 0,9626 (n = 30; r² = 0,624 pour p < 0,001)

Ce résultat met en exergue la problématique à moyen et long terme de l'impact de l'érosion sur la qualité des sols et sur la durabilité des systèmes culturaux dans les régions à pratiques agraires intensives.

L'objectif de la discussion qui suit, divisée en deux sections, est de commenter la résultante des déplacements des sols des deux bassins. Plusieurs explications sont proposées et avancées en insistant tout particulièrement sur les différences entre les deux bassins versants mais aussi sur les limites de l'approche et de l'outil utilisé.

Stratégies d'échantillonnages et limites méthodologiques

Les deux bassins ont été échantillonnés selon deux stratégies d'échantillonnage différentes. Lorsque l'on utilise la méthode du ^{137}Cs à l'échelle de bassin versant dépassant le km², on procède à une stratégie d'échantillonnage raisonnée en fonction des toposéquences selon une méthode dite des transects.

Si l'on met en parallèle les résultats de cette étude franco-québécoise, la stratégie d'échantillonnage ne semble pas être le facteur explicatif majeur des différences observées. En effet, un test a été effectué en divisant par quatre l'échantillonnage du site de Lennoxville (maille de 50 x 60 mètres) (Mabit et al., 2002 b). Le bilan des mouvements des sols pour l'ensemble du bassin a été recalculé. La nouvelle grille testée n'a pas entraîné de modification majeure. Ce nouveau bilan sédimentaire se traduit par des sorties nettes de sédiments légèrement réduites, passant de 2,9 à 2,7 Mg ha⁻¹ an⁻¹. La réduction du nombre de prélèvements n'a finalement induit qu'une perte d'information négligeable par rapport à l'échantillonnage initial (Mabit et al., 2002 c). En revanche les profondes différences morphoclimatiques et agronomiques des sites semblent expliquer davantage les variabilités observées.

D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que la détermination des déplacements des sols à l'aide du césium-137 donne une information quantitative de la résultante des processus mais en aucun cas la ou les causes de ces derniers. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance des facteurs climatiques, hydrologiques et agronomiques ayant pu influencer les sites étudiés. De plus, la méthode du césium-137 ne tient pas compte des dépôts de matériels pouvant survenir dans les cours d'eau et considère que tout transfert de matière qui transite via un cours d'eau permanent sort du bassin, effet qui peut augmenter l'estimation des sorties nettes à l'exutoire (cas du site de Lennoxville). Ce cas de figure ne se pose pas pour le site français qui possède un talweg principal à écoulement non permanent. Enfin, le rôle de l'estimation des retombées radioactives, encore appelée valeur référentielle ou témoin, est primordial. En effet, la transposition (ou la conversion) de l'activité des sols en radioélément en terme de déplacement positif ou négatif de matériel est directement liée à cette estimation et à sa précision. Pour les deux études, l'intervalle de confiance de cette valeur est inférieur à 10% et cela à 95% de sûreté. La détermination des retombées initiales de radio-isotope apparaît donc fiable dans les deux cas.

De plus pour l'étude de Lennoxville, le facteur d'enrichissement R du modèle de conversion a été fixé à 2,0, sur la base d'une étude précédente concernant les mêmes types de sols (Bernard et al, 1992). Pour le site de Vierzy le facteur R a été limité à 1,5, tenant compte de la lithologie et de l'occupation des sols différentes de celles de Lennoxville. La valeur de ce paramètre a une influence directe sur l'évaluation des mouvements de sols et du coefficient d'exportation des deux bassins.

Des conditions morphoclimatiques et d'utilisation de sol dissemblables

Le bassin de Vierzy possède une surface potentiellement productrice de ruissellement plus grande que celui de Lennoxville, mais les résultats laissent supposer que ce dernier est moins concentré. Ce site est soumis aux conditions morphoclimatiques clémentes d'un climat tempéré océanique aux températures moyennes sans grand écart ($10,8 \pm 5,9^\circ\text{C}$). Les précipitations

annuelles moyennes sont de 700 mm. La neige persistante au sol est très rare et le relief peu marqué avec des pentes de l'ordre de 2%. Les taux et variations de mouvement de sol sont importants malgré tout, cela étant dû à une agriculture intensive pratiquée depuis le début des années 1960. Vierzy s'insère dans un paysage agricole de type « openfield », sans obstacle naturel ou anthropique contre le ruissellement. L'essentiel de la production annuelle est constitué par des céréales (45% de la superficie) et par des cultures industrielles particulièrement érosives comme la betterave à sucre et les pommes de terre (41% de la superficie). Les rotations culturales sont courtes et le travail du sol très mécanisé. De plus, la couverture pédologique est principalement constituée de limons loessiques à faible taux de matière organique (1,49% pour n = 30 (Mabit et Bernard, 1998)) et à faible stabilité structurale. De ce fait, les sols de ce bassin sont particulièrement sensibles à la battance et donc à l'érosion hydrique.

A priori, on aurait pu s'attendre à une érosion restreinte sur le bassin versant de Lennoxville soumis à des pressions anthropiques culturales réduites. En effet, ce bassin agricole situé dans une région à vocation laitière sur sol sableux et limoneux, n'est pas cultivé de manière intensive. Contrairement au bassin de Vierzy, un tiers seulement du site de Lennoxville est annuellement sous culture céréalière, le reste de la superficie étant en pâture ou prairie. Le ruissellement en provenance des champs est canalisé en bas de pente dans un talweg humide permanent. En raison de l'occupation du sol, le travail de sol y est réduit. Cependant, pour la plus grande superficie de la zone d'étude, l'érosion domine (figure 4 et tableau 1), mais avec des intensités réduites. En effet, moins de un hectare du site est soumis à une érosion supérieure à 10 Mg ha⁻¹ an⁻¹.

Le site de Lennoxville, caractérisé par la forte amplitude de ses températures moyennes annuelles ($5,2 \pm 11,1^\circ\text{C}$), est soumis à un climat tempéré continental à hiver marqué. Le biotope rude et contraignant apparaît comme étant un des facteurs explicatifs de la résultante de la dégradation des sols. Les gelées franches variant de 100 à 120 jours, conditionnent la saison des cultures de la mi-mai à la mi-octobre. Les précipitations atteignent annuellement

les 1 000 mm, dont près d'un tiers tombe sous forme neigeuse et reste au sol durant près de 5 mois. La fonte printanière rapide de cette couverture neigeuse couplée à la topographie bien marquée du site (les pentes pouvant atteindre plus de 11% à son exutoire) ainsi que l'érodabilité des sols accrue en période de dégel entraînent, malgré la présence d'un couvert végétal protecteur, une érosion hydrique amplifiée par une érosion nivale se traduisant par une dégradation spatiale globale des sols (Mabit et al., 1999). L'importance de la surface du bassin affectée par l'érosion ainsi que les mesures de flux liquide et solide lors de la fonte des neiges du bassin (Salehi, 1996) confirment une érosion saisonnière nivale marquée. Contrairement au site Vierzy il apparaît clairement, en raison des pratiques culturales peu agressives, que les conditions morphoclimatiques conditionnent principalement les processus érosifs.

Conclusion

L'utilisation du ^{137}Cs est une méthodologie reconnue mondialement et particulièrement bien adaptée à l'étude de problématiques agro-environnementales liées à l'érosion. Cette méthode rend possible l'établissement d'un bilan interne des mouvements de sols, pouvant intéresser les agriculteurs pour la gestion des ressources couplées eau/sol. Elle permet également l'estimation d'un bilan externe, ou sortie nette de flux solides, pouvant interférer avec les écosystèmes avoisinant le ou les sites étudiés. On dépasse la simple cartographie des risques car les données correspondent à un état des lieux actuel intégrant plus de trente années de gestion agricole. Le résultat final correspond plutôt à un audit érosif spatio-temporel.

Utilisé à deux échelles scalaires différentes, au sein de bassins versants dissemblables, cet isotope permet de mieux comprendre et quantifier l'impact érosif respectif des pratiques culturales, pour le bassin versant de Vierzy (soumis à des conditions morphoclimatiques clémentes) et des conditions morphoclimatiques beaucoup plus marquées dans le cas du bassin versant de Lennoxville (cultures et pratiques culturales peu érosives). La comparaison de ces deux agrosystèmes à travers une méthodologie similaire

est un premier pas vers l'établissement d'une typologie globale des agrosystèmes des zones tempérées au sens large.

Remerciements

Cette contribution a été finalisée dans le cadre du programme de L'Agence Internationale de l'Energie Atomique E 1.02 "Development of soil management and conservation practices for sustainable crop production and environmental protection".

Les auteurs tiennent à remercier Dr. Pierre Moutonnet (Soil and Water Management and Crop Nutrition Section, division jointe FAO/AIEA) pour ses commentaires et suggestions afin d'améliorer le manuscrit.

Références

- Bernard, C., M. R. Laverdière and A. R. Pesant. 1992. Variabilité de la relation entre les pertes de césium et de sol par érosion hydrique. *Géoderma*, (52) : 265-277.
- Bernard, C., L. Mabit, M.R. Laverdière et S. Wicherek. 1998. Césium-137 et érosion des sols. *Cahiers Agricultures* (7) : 179-186.
- De Jong E., H. Villar, and J.R. Bettany. 1982. Preliminary investigations on the use of ^{137}Cs to estimate erosion in Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* (62) : 673-683.
- Golden Software Inc. 1995. *Surfer for Windows*, version 6. User's Guide. Golden, Co.
- Mabit, L. 1999. Estimation de l'érosion hydrique des sols par la méthode du ^{137}Cs . Application aux bassins versants de Vierzy (France) et Lennoxville (Québec). Th. Doct. Univ. Paris I Panthéon-Sorbonne, 257 p.
- Mabit L. and C. Bernard. 1998. Relationship between soil inventories and chemical properties in a small intensively cropped watershed. *C. R. Acad. Sci., Earth and Planetary Sciences*. 327 (8) : 527-532.
- Mabit, L., M.R. Laverdière et C. Bernard. 2002 a. L'érosion hydrique : Méthodes et études de cas dans le Nord de la France. *Cahiers Agricultures*, 11 (3) : 195-206.

Mabit, L., C. Bernard and M.R. Laverdière. 2002 b. Influence of the sampling strategy on soil loss assessments from ^{137}Cs measurements. p. 2083-2090 (2). In : J.L. Rubio, R.P.C. Morgan, S. Asins and V. Andreu (ed.), *Man and Soil at the third Millenium*. Geoforma Ediciones, Logroño, Spain. Process and Geoforma Ediciones (ed.), Spain.

Mabit, L., C. Bernard and M.R. Laverdière. 2002 c - Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data. *Canadian Journal of Soil Science* 82 (4) : 423-431.

Mabit L., C. Bernard et M.R. Laverdière. 2000. Étude de l'érosion hydrique au Québec. *Vecteur environnement*, vol. 33, 6 : 34-43.

Mabit, L., C. Bernard, M.R. Laverdière and S. Wicherek. 1999. Assessment of water erosion in a small agricultural basin of the St. Lawrence river watershed. *Hydrobiologia*. 410 : 263-268.

Mabit, L., C. Bernard, M.R. Laverdière et S. Wicherek. 1998. Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope (^{137}Cs). *Étude et Gestion des sols*. 5 (3) : 171-180.

Robert, M. et C. Cheverry. 1996. Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahiers Agricultures*. 5 (4) : 243-248.

Salehi, F. 1996. Mesure et modélisation des sédiments d'un petit bassin versant agricole. Th. Doct. Univ. Laval, Québec, 121 p.

Wall, G.J., Coote, D.R., Pringle, E.A., Shelton, I.J. (eds). 2002. RUSLEFAC- Revised Universal Soil Loss Equation for application in Canada: A handbook for estimating soil loss from water erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contr. No 02-92. 117 p.

Walling, D.E., Q. He and P.G. Appleby. 2002. Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. Chap.7. In: *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*. Zapata, F. (Ed.), Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 111-164.