

Spatialisation et cartographie des risques érosifs à l'échelle d'un bassin versant agricole par un radio-isotope

L. Mabit ⁽¹⁾, Cl. Bernard ⁽²⁾, M.R. Laverdière ⁽³⁾ et S. Wicherek ⁽¹⁾

1 - Centre de Biogéographie-Ecologie, UMR180 CNRS, ENS Fontenay-Saint-Cloud - Le Parc, 92211 Saint-Cloud, France

2 - MAPAQ, Centre de recherche et d'expérimentation en sols - 2700 rue Einstein, Sainte-Foy (QC), Canada, G1P 3W8

3 - Université Laval, Département des Sols, Sainte-Foy (QC), Canada, G1K 7P4

RÉSUMÉ

L'érosion des sols et la qualité de l'eau sont deux problématiques imbriquées et indissociables. Outre les pollutions urbaines et industrielles, les pollutions diffuses agricoles contribuent à une dégradation des hydrosystèmes, ce qui entraîne une limitation coûteuse de leurs divers usages originels. La mesure de l'érosion hydrique des sols par des radio-traceurs a été initiée au début des années 1970. En raison de ses prédispositions (propriétés physico-chimiques, comportement environnemental) et de sa diffusion mondiale, le césium-137 (¹³⁷Cs) fut l'un des plus usités pour inventorier l'état de dégradation des sols. Les auteurs ont utilisé cette méthode d'investigation sur un bassin versant agricole en France, dans le Soissonnais (Vierzy). Un bilan érosif interne et externe a été établi. L'importance des processus érosifs a été estimée, spatialisée, et cartographiée. La réalisation d'une telle cartographie des zones à risques des agrosystèmes peut aider à la conservation et à la gestion des ressources couplées eau/sol.

Mots clés

Erosion hydrique, radio-traceurs, Césium-137 (¹³⁷Cs), bilan érosif, pollutions diffuses, gestion des ressources.

SUMMARY

SPATIALIZATION AND MAPPING OF EROSION RISKS AT THE WATERSHED SCALE, USING A RADIO-ISOTOPE (¹³⁷Cs)

Soil erosion and agricultural nonpoint pollution are two interrelated problems. Not only does erosion reduce the productivity of fields, it also contributes to water quality degradation. Traditional monitoring techniques for erosion require many years of measurements to integrate the interannual variability of precipitation erosivity and soil erodibility. The use of ¹³⁷Cs in erosion studies complement interestingly the conventional techniques. From the quantification of the spatial redistribution of ¹³⁷Cs in the landscape it is possible to assess the magnitude and the spatial extent of global soil movements since 1963. Net loss areas can be distinguished from net deposition areas. Global soil movement budgets can be calculated. This technique was used in a 1,8 km² watershed located in Vierzy, in the northern Parisian Basin (figure 2). This watershed is covered by loessial silty soils that are prone to surface crusting and are therefore vulnerable to water erosion. An experimental approach similar to that described by Walling et al., (1986) was used for this study (figure 1). Some 80 stations distributed within the limits of the watershed were sampled for ¹³⁷Cs (figure 4). The spatialization of these measurements revealed the sectors of the watershed that experienced a net soil loss over the years, those where a net deposition occurred and those where the net soil movement is zero (figure 4). Point data indicate annual soil movements ranging from a 18 t/ha/yr loss to a 19 t/ha/yr deposition. According to the ¹³⁷Cs measurements, the net sediment yield from the watershed would be 1,9 t/ha/yr, which represents 59 % of the gross erosion. This study illustrates how ¹³⁷Cs measurements can help to assess quickly and economically the magnitude and the spatial extent of erosive processes. These results can then support an ecological management of landscapes aimed

at nonpoint pollution prevention.

Key-words

Water erosion, radio-tracers, Caesium-137 (^{137}Cs), erosion budget, nonpoint pollution, ecological management.

RESUMEN

REPARTO DEL ESPACIO Y CARTOGRAFIA DE LAS ZONAS CON RIESGO DE EROSION A ESCALA DE UNA CUENCA AGRICOLA POR UN RADIOISOTOPO (^{137}Cs)

La erosión de los suelos y la calidad del agua son dos problemáticas imbricadas e indisolubles. Además de las contaminaciones urbanas e industriales, las contaminaciones agrícolas difusas contribuyen a una degradación de los hidrosistemas, lo que produce una limitación costosa de los diversos usos originales. La medida de la erosión hídrica de los suelos por los radiotrazadores fue iniciada al principio de los años 1970. A causa de sus predisposiciones (propiedades fisicoquímicas, comportamiento del medio ambiente) y de su difusión mundial, el Cesio-137 (^{137}Cs) fue uno de los más empleados para hacer el inventario del estado de degradación de los suelos. Los autores han utilizado este método de investigación en una cuenca agrícola de Francia, en el Soissonnais (Vierzy). Un balance erosivo interno y externo fue establecido. La importancia de los procesos erosivos internos fue estimada, estudiada cuanto al reparto del espacio, y cartografiada. La realización de tal cartografía de las zonas con riesgo de los agrosistemas puede ayudar a la conservación y a la administración de los recursos asociados agua/suelo.

Palabras claves

Erosión hídrica, radiotrazadores, Cesio-137 (^{137}Cs), balance erosivo, contaminaciones difusas, administración de los recursos.

Les ressources mondiales en eau et en sol, limitées et seulement renouvelables à long terme, subissent depuis plusieurs dizaines d'années une dégradation quantitative et qualitative. Les conséquences de l'érosion des sols, et principalement de l'érosion hydrique, sont nombreuses : pertes de terre arable et de polluants divers, diminution des éléments nutritifs (N, P, K) et de la matière organique, rendements moindres, champs ravinés. Outre la dégradation des sols, les impacts environnementaux peuvent être importants : eutrophisation des hydrosystèmes, coulées de boue, inondations, voies de communication endommagées, etc. L'érosion des sols et la qualité de l'eau sont donc deux problématiques imbriquées et indissociables.

Il apparaît primordial, bien sûr, de préserver les productions actuelles, mais aussi d'être conscient des problèmes d'érosion, dans un objectif de conservation des ressources eau/sol. Actuellement, l'agriculture traditionnelle se voit donc supplantée par la notion d'agriculture « durable » qui intègre le respect de l'environnement, tout en maintenant la productivité des agrosystèmes.

Contrairement aux autres pollutions (urbaines et industrielles), la pollution liée à l'agriculture est diffuse car difficilement localisable et souvent liée à plusieurs sources. S'il est possible de connaître les intrants potentiellement polluants auprès des agriculteurs, leur répartition spatiale n'est pas facilement estimable après un travail répétitif du sol, les récoltes et de nombreuses précipitations. L'érosion par ruissellement concentré et l'érosion en nappe constituent d'importants vecteurs de transfert et de répartition spatiale des polluants, allant des pesticides à l'accumulation des nutriments (P en particulier). En règle générale, les zones érodées sont appauvries en éléments nutritifs (ce qui implique une baisse potentielle des rendements), l'inverse se vérifiant pour les zones de dépôts.

Il est donc fondamental d'agir en amont par la prévention des risques, en ayant toujours en tête l'orientation actuelle pour les agrosystèmes : l'agriculture durable.

L'estimation et la spatialisation des risques d'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants ne sont pas aisées. Les mesures de charge en sédiment à l'exutoire de bassins versants ou de parcelles expérimentales doivent intégrer les variabilités climatiques interannuelles, et donc porter sur une dizaine d'années. Les mouvements internes des sols au sein de ces unités ne peuvent être estimés ou spatialisés par ces techniques.

Par contre, les mesures de redistribution spatiale du ^{137}Cs permettent d'estimer à la fois les mouvements internes et les sorties nettes des sites d'études. Les auteurs ont donc opté pour cette méthode, dans le dessein d'établir une cartographie des mouvements des sols d'un petit bassin versant élémentaire agricole. Ce type d'information peut aider à une meilleure gestion des agrosystèmes et à la prévention de leurs impacts directs sur les écosystèmes avoisinants.

LA MÉTHODOLOGIE DU ^{137}Cs ET SON APPLICATION À L'ÉCHELLE DES BASSINS VERSANTS AGRICOLES

Le ^{137}Cs est particulièrement bien adapté pour l'estimation des processus érosifs (Ritchie et McHenry, 1990; Quine et al., 1994). Cet isotope est facilement détectable en tout lieu car ses retombées, liées aux explosions atomiques aériennes, ont été universelles. Caractérisé par l'émission d'un fort rayon gamma (662 keV) et une demi-vie de 30 ans, il sera encore longtemps présent dans l'environnement et aisément mesurable. Une fois retombé sur le sol avec les précipitations, l'élément est fixé fortement aux particules fines. A titre d'exemple, Lomenick et Tamura (1965) ont soustrait moins de 1 % de ^{137}Cs adsorbé dans des échantillons de sol et de sédiments, en utilisant différents acides et bases. D'autre part, les prélèvements de ce radio-isotope par les cultures sont négligeables (Brown et al., 1981).

Sa redistribution spatiale dans l'environnement reflète donc les mouvements des sols, car elle se fait uniquement par des processus physiques, particulièrement l'érosion. Enfin, un seul échantillonnage est requis pour évaluer l'importance des mouvements de sols. Cette méthode est donc rapide, relativement économique, et ne nécessite pas d'infrastructure lourde (Wicherek et Bernard, 1995).

Cet outil a été utilisé mondialement par différents chercheurs depuis les années 1970. Une relation entre les mouvements des sols et les variations de répartition spatiale de ^{137}Cs a été validée et utilisée. De nombreux modèles et équations ont été développés pour mesurer l'érosion hydrique sur la base des variations de l'activité spécifique en ^{137}Cs des sites de prélèvements en milieu agricole (Ritchie et al., 1974; Quine, 1989; Bernard et al., 1992; Kachanoski, 1993).

Le principe de la technique est relativement simple. Elle consiste à comparer la teneur en ^{137}Cs de sols cultivés par rapport à la teneur en ^{137}Cs de sites témoins non érodés : par exemple, des pâtures à topographie plane, non cultivées depuis le début des années 1960, situées à proximité immédiate du site d'étude. On peut considérer que les retombées globales en ^{137}Cs ont été homogènes à l'échelle de la zone d'étude, si celle-ci est de dimension réduite (jusqu'à quelques km^2). Si la surface étudiée est plus grande, il est préférable de prendre en compte plusieurs sites représentant les retombées initiales pour intégrer la variabilité spatiale de ces dernières. Les zones à activité en ^{137}Cs inférieure à celle des témoins sont considérées comme érodées, et les zones à activité supérieure sont considérées comme zones d'accumulation nette de sédiment. On estime ainsi les mouvements globaux des sols depuis l'année 1963, date correspondant au maximum des retombées nucléaires (UNSCEAR, 1982). Cette

période coïncide aussi avec des changements agraires marqués par l'intensification et les remembrements. Si cette technique a été très utilisée à l'échelle de la parcelle, son utilisation à échelle scalaire supérieure est rare. Pour aborder l'utilisation de cette méthode à l'échelle des bassins versants et estimer les différents bilans internes et externes, nous nous sommes basés sur les principes présentés par Walling et al. en 1986 (figure 1). Les retombées totales de ^{137}Cs sont égales au produit $C1 \cdot A1$. Le stock résiduel de ^{137}Cs dans la zone étudiée est estimé par la somme $C2 \cdot A2 + C3 \cdot A3$. Enfin, les sorties nettes de ^{137}Cs sont égales à $C1 \cdot A1 - (C2 \cdot A2 + C3 \cdot A3)$.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Localisation et caractéristiques du site d'étude

La zone d'étude expérimentale se situe à Vierzy (49°17' Nord, 3°18' Est), dans le Soissonnais (Picardie), à 10 km au sud de la ville de Soissons (figure 2). Ce bassin versant agricole couvre une superficie de 1,8 km². Situé en région de grandes cultures, avec un assolement varié, où l'élevage faisait

partie jadis du paysage agricole, il est morcelé en 16 parcelles ayant des tailles variables de 5 à 33 ha (figure 2 et tableau 1).

Le blé domine et recouvre annuellement au moins 45 % de la superficie. Le reste des cultures est constitué par des betteraves à sucre, des pommes de terre et des pois (tableau 1). Les rendements peuvent avoisiner 80-90 quintaux par hectare pour le blé, 60-65 t/ha pour la betterave, 40-45 t/ha pour les pommes de terre (Angélie, 1996).

Les précipitations annuelles sont de 700 mm, avec un écart type de ± 125 mm. La zone d'expérimentation se présente sous une forme allongée (coefficient de compacité de Gravelius ou indice de forme de 1,21). La topographie du bassin est peu accidentée, avec un dénivelé de 26 mètres entre l'altitude maximale et l'altitude de l'exutoire, ce qui souligne son caractère peu incisé. Les pentes sont très modérées et longues. Celles inférieures à 2 % occupent 60 % de la superficie, et seulement 13 % du bassin possède des pentes supérieures à 4 % situées dans la partie aval (figure 3).

La couverture pédologique est composée de limons loessiques. Les limons moyens occupent 70 % de la surface appréhendée, le reste de l'espace étant occupé par des limons argileux (Maucorps, 1993).

La teneur en matière organique a été mesurée sur 52

Figure 1 - Bilan de ^{137}Cs à l'échelle des bassins versants

Figure 1 - ^{137}Cs budget at the watershed scale Walling et al., 1986

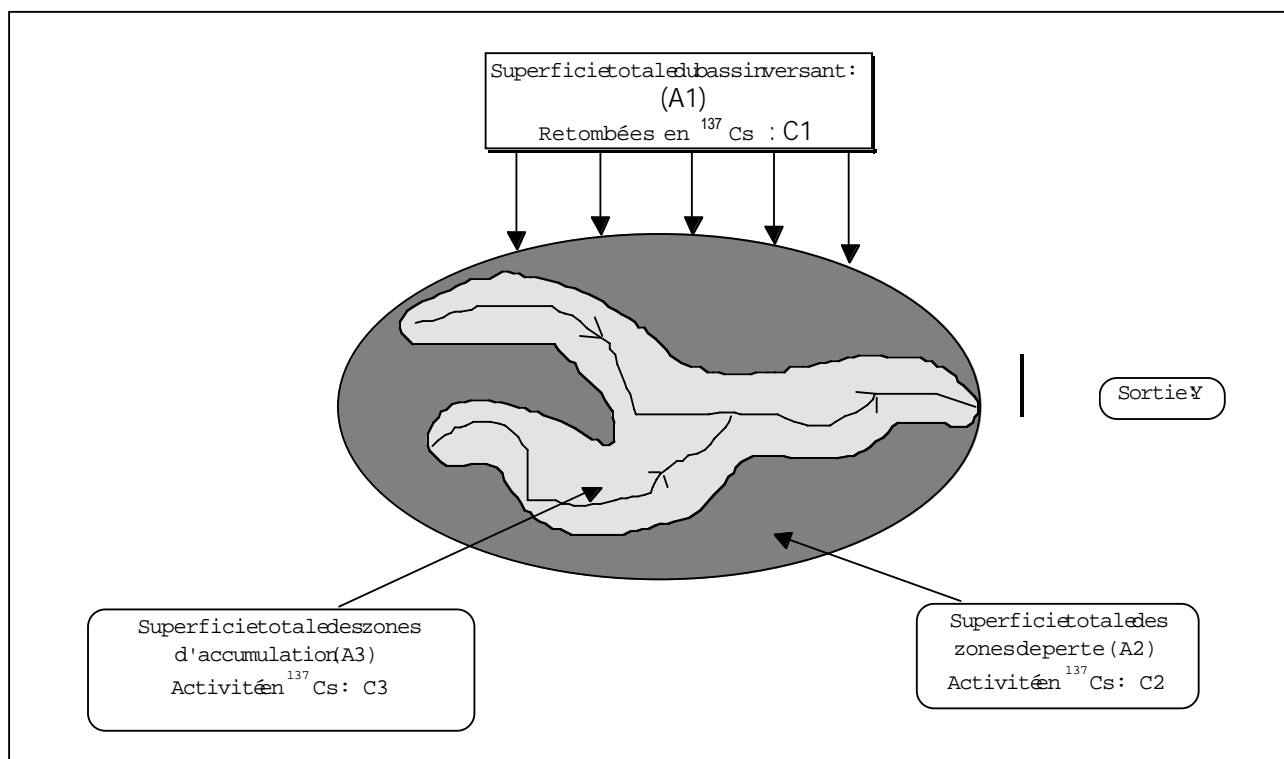


Figure 2 - Localisation du bassin versant de Vierzy et parcellaire du site

Figure 2 - Location of the Vierzy watershed and fields layout in the Vierzy watershed

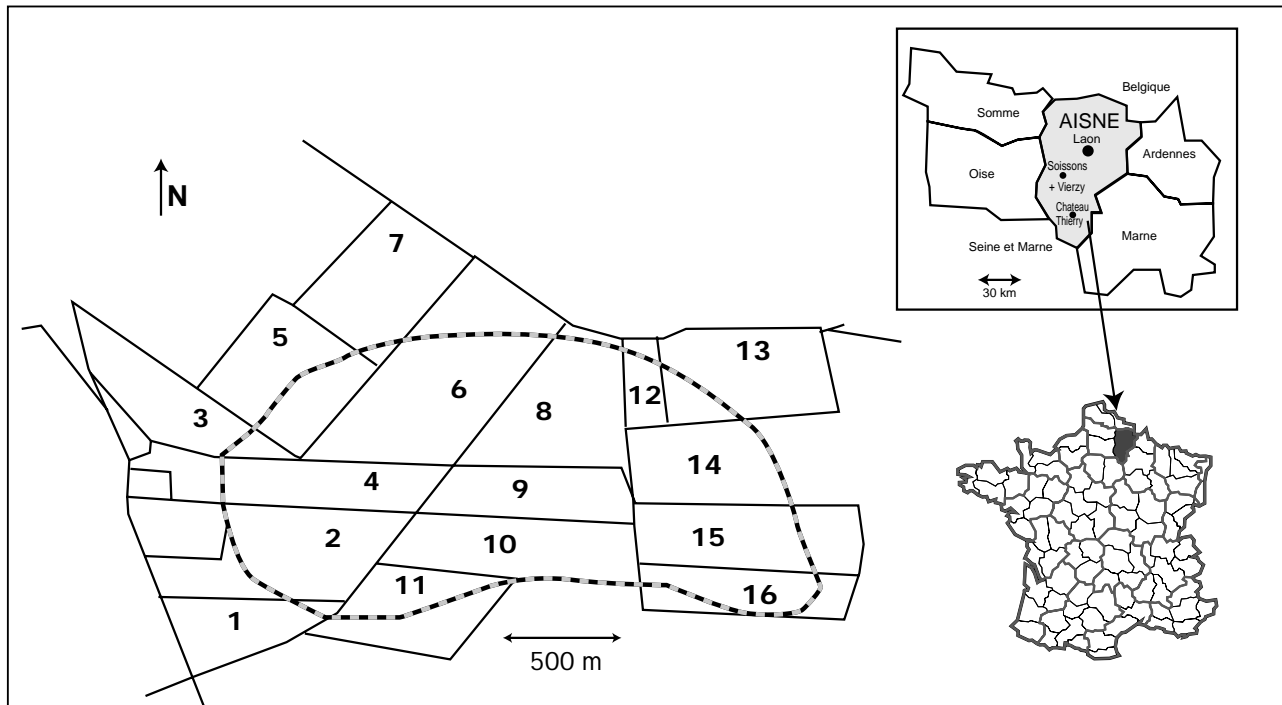


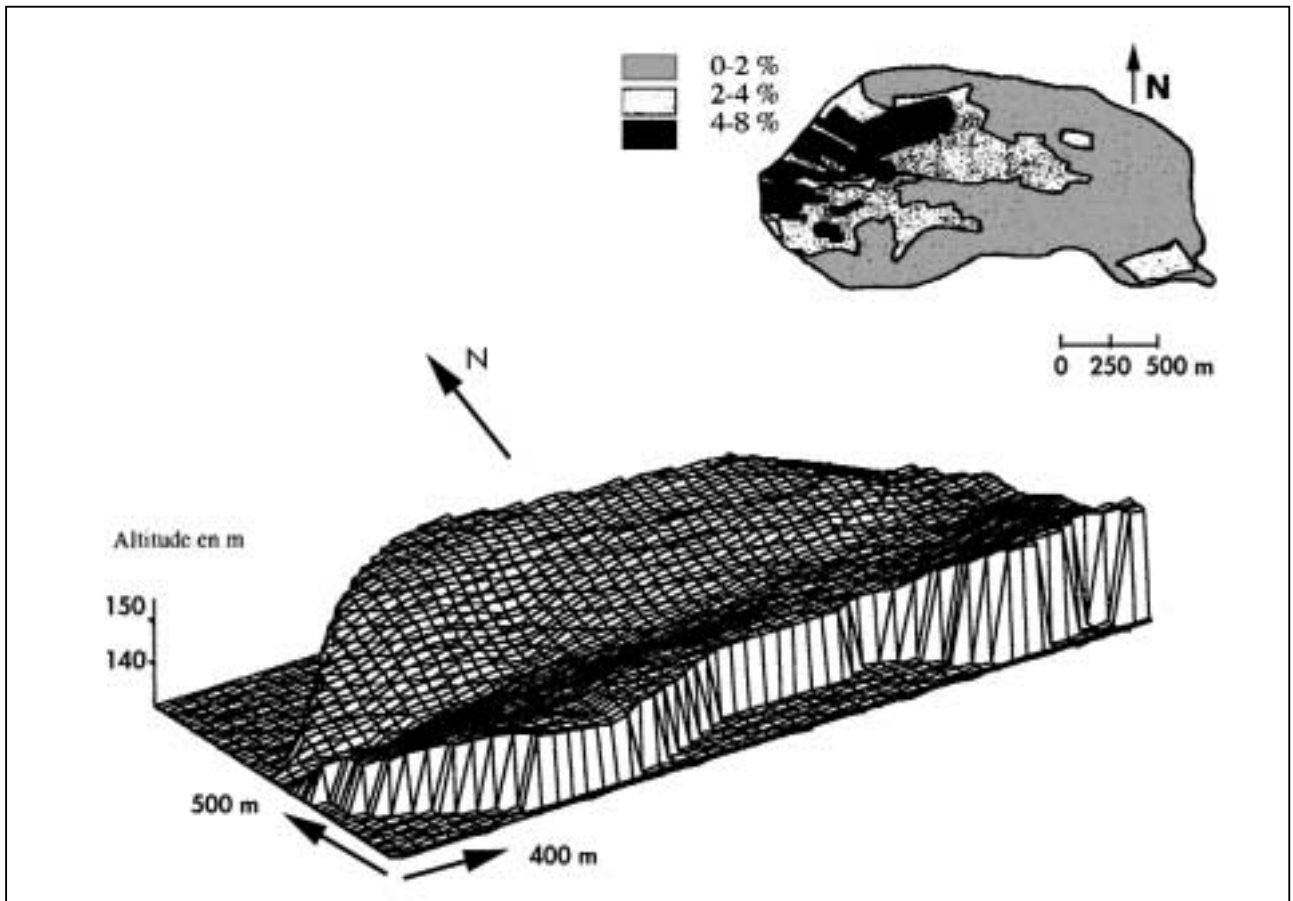
Tableau 1 - Parcellaire et calendrier cultural annuel du bassin versant de Vierzy (sur la base des enquêtes d'Angéliaume, 1996)

Table 1 - Fields and annual cropping practices calendar (from survey by Angéliaume, 1996)

Numéro de parcelle	Taille totale en hectares	% dans le bassin	Taille en ha de la parcelle dans le bassin	Occupation culturale des parcelles		
				1993	1994	1995
1	23,3	10	2,3	Blé d'hiver	Betteraves	Blé d'hiver
2	18	50	9	Betteraves	Blé d'hiver	Pois
3	13	10	1,3	Jachère	Jachère	Jachère
4	12,1	80	9,7	Blé d'hiver	Orge	Betteraves
5	21,9	20	4,4	Blé d'hiver	Orge	Blé d'hiver
6	33,3	75	25	Betteraves	Blé d'hiver	Betteraves
7	21,1	10	2,1	Orge	Betteraves	Blé d'hiver
8	15	100	15	Pommes de terre	Blé d'hiver	Betteraves
9	14	100	14	Blé d'hiver	Pommes de terre	Blé d'hiver
10	16	100	16	Betteraves	Blé d'hiver	Pommes de terre
11	20	100	20	Blé d'hiver	Pommes de terre	Blé d'hiver
12	5,2	75	3,9	Blé d'hiver	Pommes de terre	Blé d'hiver
13	20	15	3	Blé d'hiver	Pommes de terre	Blé d'hiver
14	30	80	24	Escourgeon Betteraves	Pois	Blé d'hiver
15	19,5	90	17,5	Blé d'hiver	Betteraves	Blé d'hiver
16	23	50	11,5	Betteraves	Pois	Blé d'hiver

Figure 3 - Modèle numérique de terrain et pentes du bassin versant de Vierzy

Figure 3 - Digital elevation model and slopes of the Vierzy watershed



échantillons de sol du bassin. Les taux sont faibles, avec une moyenne de 1,49 % et un écart type de 0,21. Les valeurs maximales relevées sont de 1,96 % et les valeurs minimales de 1,14 %. Ces sols, de par leur granulométrie et leur taux de matière organique, ont une faible stabilité structurale et sont donc très sensibles au risque de battance. Cette remarque est particulièrement vraie pour les limons moyens dont la teneur en argile est nettement inférieure à 20 %.

Un talweg sec parcourt la zone d'étude d'amont en aval. L'écoulement est intermittent et fonction de l'importance des événements pluvieux.

Démarche employée : échantillonnage, détermination et analyse des données

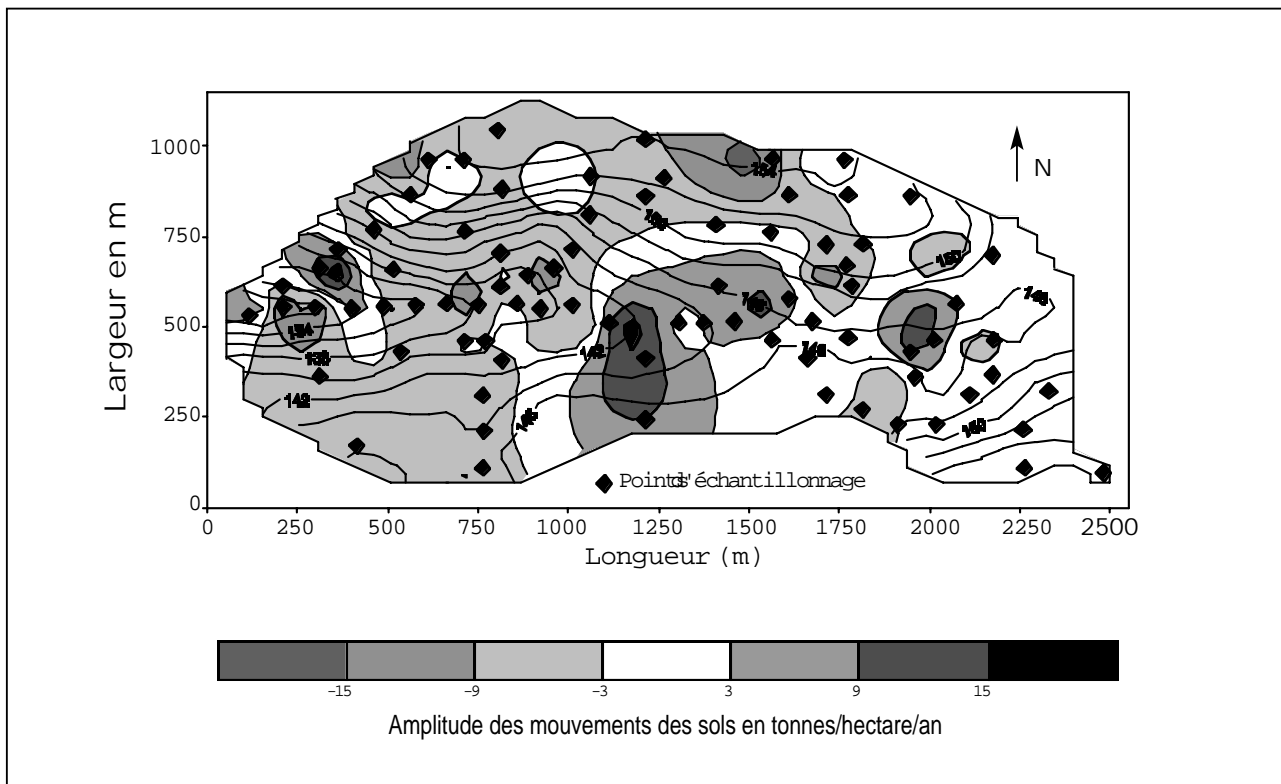
Les études utilisant le ^{137}Cs déjà publiées, portent sur des superficies ne dépassant que rarement la vingtaine d'hectares. On peut alors procéder à un échantillonnage régulier selon une grille serrée (20*30m par exemple) pour déterminer la variation

des mouvements de sol intra-champs. Il est en revanche difficilement envisageable, à une échelle scalaire dépassant le km^2 , de procéder à une stratégie d'échantillonnage aussi détaillée que pour les études à l'échelle des champs. Il faut alors établir un compromis entre la densité de l'échantillonnage, la représentativité des processus affectant le bassin considéré et les moyens pouvant être consentis (main d'œuvre, temps, prétraitement et analyses de laboratoire), comme le soulignent très bien Higgitt et Walling en 1993. Dans cet article, ces deux auteurs ont limité leur échantillonnage d'un bassin versant de $4,1 \text{ km}^2$ à moins de 60 prélèvements. Suite à une analyse cartographique, ces derniers ont été disposés de façon à prendre en compte du mieux possible les transferts de sédiments.

Plutôt qu'un échantillonnage systématique du bassin de Vierzy, un échantillonnage « raisonné » similaire a été employé pour l'estimation des mouvements des sols. Une première sélection des sites de prélèvements a été faite à partir des cartes existantes (topographique, pédologique et d'occupation

Figure 4 - Echantillonnage du bassin versant de Vierzy et cartographie des mouvements des sols

Figure 4 - Sampling of the Vierzy watershed and map of the soil movements



du sol), et des études précédentes (Angélaume, 1996). Le positionnement final a été arrêté sur le terrain (Bernard et al., 1998). Ainsi, quatre-vingt (80) points d'échantillonnage ont été retenus à l'intérieur des limites du bassin versant, dont vingt (20) le long du talweg principal et soixante (60) sur les versants (figure 4). Treize (13) stations témoins, situées à proximité du bassin, ont aussi été échantillonnées pour estimer le niveau résiduel de ^{137}Cs dans les sols de la région. Le choix de ces référentiels a été effectué sur la base de trois critères. Tout d'abord, le lieu des prélèvements ne doit pas être cultivé depuis le début des années soixante. D'autre part, les auteurs ont fixé une distance maximale de 1 km autour du bassin de Vierzy, afin d'être le plus représentatif possible des retombées globales ayant affecté ce dernier. Enfin, les sites sélectionnés doivent être peu soumis aux processus érosifs (topographie quasi plane). Seules deux prairies à proximité d'un cimetière, répondaient positivement aux trois exigences formulées.

Les prélèvements doivent permettre d'évaluer la totalité du stock de ^{137}Cs présent dans les sols. Pour chaque site témoin, 4 incréments de 10 cm ont été prélevés et analysés. Dans les champs cultivés, la teneur en ^{137}Cs est uniforme sur toute la profondeur du labour, en raison du

travail répété du sol. Aussi, pour chaque site cultivé, 3 échantillons ont été analysés, soit un dans la couche de labour (0-30 cm) et deux autres en dessous, dans les strates 30-40 cm et 40-50 cm.

Pour chaque prélèvement, une « mini-fosse » a été creusée, d'environ 50 cm/50 cm et d'une profondeur de 60 cm. L'échantillonnage a été réalisé sur les parois des fosses, à l'aide d'un cylindre de densité de 5 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre.

Après prétraitement (séchage et tamisage à 2 mm), la teneur en ^{137}Cs a été déterminée à l'aide d'un détecteur de rayons gamma. Les prélèvements s'étant échelonnés de 1993 à la fin de l'année 1995, toutes les teneurs en ^{137}Cs ont été ajustées à la date commune du 30 juin 1996 et traduites en terme de mouvements de sol, en appliquant l'équation proposée par Kachanoski (1993).

$$E = MR^{-1} (1 - (T_n/T_0)^{1/n})$$

où E : perte de sol ($\text{kg/m}^2/\text{an}$),

M : poids de la couche de labour en kg/m^2 ,

R : enrichissement relatif en isotope du sol érodé,

T_n : activité spécifique en ^{137}Cs de l'échantillon de sol prélevé en Bq/m^2 ,

T_0 : activité spécifique en ^{137}Cs du sol d'un site non-érodé en Bq/m^2 ,

n : nombre d'années écoulées depuis le maximum de retombées (année 1963).

Cette dernière prend en compte la dilution, par les façons culturales, des concentrations de ^{137}Cs dans la couche labourée, ainsi que l'enrichissement en isotope du sol érodé par rapport au sol en place.

Un variogramme expérimental des estimations ponctuelles des pertes de sol dérivées des mesures de ^{137}Cs a été établi (Dauphiné et Voiron-Canicio, 1988). Le meilleur modèle d'ajustement théorique obtenu est de forme sphérique, avec un pas de 300 m. La validation croisée a permis de montrer que l'ajustement pouvait être considéré comme satisfaisant. Le variogramme expérimental résultant présente un effet de pépité de $8 (\text{t/ha/an})^2$, un palier de $51 (\text{t/ha/an})^2$ et une portée de 420 m (figure 5). Les estimations des pertes de sol présentent donc une structure spatiale. L'interpolation des estimations ponctuelles d'érosion a été faite par krigeage. Cette technique présente l'avantage, par rapport à d'autres techniques d'interpolation, de mieux lisser les données et de limiter l'incidence des interpolations en « œil-de-bœuf » (Cressie, 1991), et d'établir un estimateur sans biais par construction. La spatialisation par krigeage des résultats à l'ensemble du bassin versant a été réalisée à l'aide du logiciel SURFER 6.01, ce dernier permettant l'intégration des différents paramètres de notre modèle expérimental obtenu par analyse variographique (Golden Software Inc, 1995).

RÉSULTATS

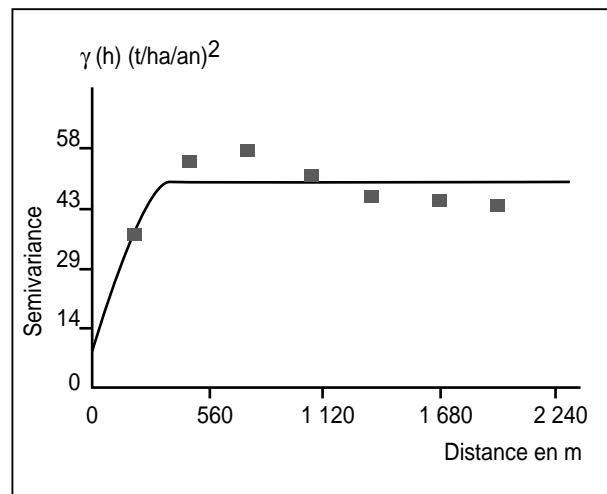
Niveau de base de ^{137}Cs

Pour le bassin versant de Vierzy, l'activité des sites référentiels varie entre 1 410 et 2 530 Bq/m^2 . La teneur moyenne en ^{137}Cs des treize profils témoins a été établie à 2 000 Bq/m^2 , avec un coefficient de variation de 16,5 % et un intervalle de confiance à 95 % de $\pm 200 \text{Bq/m}^2$.

Les retombées radioactives de Tchernobyl sont une réalité à prendre en compte lors de l'utilisation de la méthode du ^{137}Cs . En Europe, certains sols ont été enrichis de manière très importante, ce qui peut modifier considérablement les conclusions d'une étude utilisant ce radiotracteur.

Les pluies les plus contaminées ont touché la France du 30 Avril au 5 mai 1986 (Ramade, 1989). Pendant cette période, les précipitations ont été de 2,3 mm pour Soissons et de 2,7 mm pour Vierzy. Il est donc vraisemblable que les retombées de ^{137}Cs de Tchernobyl sur le bassin de Vierzy ont été similaires à celles de Soissons estimées à 260 Bq/m^2 ($\pm 200 \text{Bq/m}^2$)

Figure 5 - Variogramme expérimental et modèle ajusté
Figure 5 - Experimental variogram and fitted model



en 1996) par Cambray et al. (1987). Compte tenu du faible niveau de l'impact, les auteurs ont décidé de les négliger.

Mouvements des sols dans le bassin de Vierzy

En utilisant cette méthode, nous avons d'une part établi la cartographie des mouvements des sols (bilan interne), et d'autre part estimé les sorties nettes de sédiment à l'exutoire (bilan externe). Ces bilans correspondent à des valeurs annuelles moyennées sur les 33 dernières années (1963-1996). La répartition spatiale des mouvements des sols est présentée en figure 4. Les valeurs négatives correspondent à une érosion nette, et les valeurs positives à une redéposition nette de sédiment. Les valeurs comprises entre $\pm 3 \text{t/ha/an}$ ne sont statistiquement pas différentes d'un bilan net nul, sur la base de l'intervalle de confiance de nos témoins.

En fonction de cette cartographie, on estime que la moitié de la zone d'étude est érodée et qu'un peu plus de $1/10^{\text{ème}}$ de la superficie correspond à des zones de redéposition. Le restant peut être considéré comme stable, c'est-à-dire présentant un bilan net de zéro, ce qui correspond soit à une absence d'érosion, soit, plus vraisemblablement, à une situation où les pertes de sol sont compensées par les redépositions.

Les redistributions spatiales des sols, témoignant de la dynamique interne du bassin versant, se font en étroite relation avec la topographie et l'utilisation du sol. Globalement, l'amont du bassin versant est stable, en raison de la faiblesse des pentes et de la présence de cultures plus couvrantes en période estivale (blé d'hiver). Les zones d'érosion nette touchent principalement l'aval du bassin, les parties sommitales et les pentes. La localisation et l'ampleur des phénomènes érosifs

dans ce secteur se justifient par une topographie plus marquée et par des rotations culturales faisant plus de place aux cultures industrielles (betteraves à sucre et pommes de terre).

Ces cultures ont un faible développement aérien qui, au maximum de leur croissance végétative, ne couvre que 50 à 60 % de la surface. Elles ne protègent donc efficacement le sol que pendant un temps limité compris entre deux à trois mois en fonction de la précocité de la récolte. Ces plantes à large semence, cultivées en rangées en lignes espacées (40 à 50 cm d'écartement pour la betterave et 50 à 60 cm pour la pomme de terre), concentrent le ruissellement dans leurs larges sillons. On peut noter enfin, qu'après un chantier de récolte, en moyenne, près de 80 % de l'espace comporte des traces de roues (Boiffin et al., 1986), ce qui fragilise et dégrade le sol. Pour toutes ces raisons, les cultures industrielles accentuent donc les processus d'érosion hydrique (Wischmeier et Smith, 1978).

Les redépôts se situent essentiellement dans le talweg principal, dans les dépressions ou à la jonction de ce dernier et d'autres tributaires secondaires. Les résultantes des redistributions spatiales des sols sont très fluctuantes tout au long de cet axe majeur. Il apparaît clairement que le talweg principal possède une dynamique propre en fonction de son orientation, de sa pente, de la variabilité et de l'importance des chenaux d'accumulation secondaire conditionnant la collecte, le stockage et la redistribution des terres érodées.

L'amplitude maximale des redistributions des sols est importante. On peut aller d'une érosion de 1,3 mm/an (moyenne pour les surfaces érodées : 0,46 mm/an), à une sédimentation de 1,2 mm/an (moyenne pour les zones de redépôt : 0,41 mm/an¹).

On évalue que cinquante-neuf pour cent (59 %) des matières érodées sortent effectivement du bassin, ce qui représente une perte nette de sol de 1,9 t/ha/an. Cette exportation correspond à une perte annuelle de 0,12 mm de terre arable, en direction d'autres écosystèmes plus en aval. Sur les 33 dernières années, cette perte est donc estimable à 4 mm pour l'ensemble du bassin, et une projection dans 100 ans, sous les mêmes conditions agro-environnementales, laisse entrevoir une perte globale de 1,2 cm de terre arable. Si ce chiffre, du point de vue de l'évolution géomorphologique du modelé du site, n'est pas catastrophique par rapport à d'autres régions du globe, il prend une proportion tout autre si nous l'analysons d'une manière plus agronomique. Dans la nature, quand les sols sont protégés, sans pression anthropique, l'érosion est très lente. Cette dernière peut être estimée à environ un mètre pour une période de 100 000 ans, soit 0,01 mm/an (Roose, 1993). A partir des relevés de ¹³⁷Cs, les pertes en terre du

bassin de Vierzy seraient 12 fois plus importantes, malgré des conditions climatiques plutôt clémentes. Cela est d'autant plus alarmant que les phénomènes de pédogenèse sont de l'ordre de quelques centièmes de millimètres par année seulement (Robert et Cheverry, 1996).

Par ailleurs, des mesures de flux liquide et solide ont été réalisées à l'exutoire de ce site par le Centre de Biogéographie-Ecologie de Saint-Cloud (Angélaume, 1996). Pour l'année 1993, les pertes sont estimées à 7 kg/ha, et pour l'année 1994, à moins de 1 kg/ha. En 1995, un seul événement important est survenu, en juillet. Mais ce dernier n'a pas pu être mesuré car sa violence a emporté la station de mesure. On estime cependant les pertes nettes de sol à plusieurs t/ha, comme en témoigne la coulée de boue qui a envasé le petit village en aval. Historiquement, une telle situation à caractère catastrophique s'est aussi produite en 1968 et en 1988 (Angélaume, 1996).

Ces observations permettent de souligner la très forte variabilité interannuelle de l'érosion. Les résultats des bilans annuels obtenus par le césium doivent donc être analysés en ne perdant pas de vue qu'il s'agit de résultats moyennés sur 33 ans.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A notre connaissance, cette étude est la première réalisée en France avec le césium-137, sur un bassin versant agricole de plus de 1 km². Les résultats de cette étude suggèrent que l'érosion des sols est un problème réel, même dans des régions où règnent des conditions morphoclimatiques faiblement agressives.

L'utilisation du ¹³⁷Cs est rapide, comparativement aux méthodes de type pièges à sédiment. De plus, en spatialisant les données, on peut établir une cartographie des déplacements des sols à l'intérieur d'un site donné. Il faut aussi considérer que les nombreux modèles existants de simulation de l'érosion ont besoin d'être validés par des mesures de terrain. Le ¹³⁷Cs peut alors se révéler particulièrement utile pour produire des informations précieuses permettant de les calibrer.

Cette technique permet la réalisation d'un audit environnemental et érosif complémentaire aux mesures de flux en parcelles et bassins versants, pour estimer des processus érosifs. Le bilan interne, correspondant aux mouvements des sols du site depuis les 33 dernières années, peut aider considérablement les agriculteurs à la gestion des ressources sol et eau au sein de leur exploitation, en permettant de localiser et d'évaluer l'importance relative des zones à risques érosifs. L'établissement d'un bilan externe, ou l'évaluation des sorties nettes annuelles à l'exutoire, donne une idée de l'impact potentiel direct de l'agrosystème considéré sur les autres écosystèmes en aval (hydrosystèmes, sylvosystèmes, autres agrosystèmes).

1- Pour les calculs, une densité de 1,5 g/cm³ est utilisée pour les sols, valeur correspondant à la moyenne des densités de 80 échantillons de sol prélevés dans le bassin.

Ces informations peuvent contribuer à l'aménagement et à la gestion des espaces ruraux, tant par les acteurs directs (agriculteurs), que ceux situés à l'aval des agrosystèmes. Ainsi, une action raisonnée et ciblée sur les zones à hauts risques érosifs, qui représentent généralement de faibles superficies, réduirait considérablement, et à moindre coût, les impacts environnementaux des terres cultivées sur les écosystèmes.

La démarche de cette étude se situe en amont de l'application de l'agriculture durable par le diagnostic spatial de la ressource couplée eau/sol, car comme le soulignait très bien G. E. Cartier².

«Pour assurer notre existence, il faut nous cramponner à la terre et léguer à nos enfants la langue de nos ancêtres et la prospérité de nos sols »

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Angélie A., 1996 - Ruissellement, érosion et qualité des eaux en terre de grande culture : étude comparée de deux bassins versants du Laonnais et du Soissonnais. Thèse, Lille I, 588 p + annexes.
- 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.
- Bernard C., Mabit L., Wicherek S., Laverdière M.R., 1998 - Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from 137Cs data. *Journal of Environmental Quality*, Vol 27, 1178-1183.
- Boiffin J., Papy F., Peyre Y., 1986 - Système de production, système de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux. INRA-INA, 154 p + annexes.
- Brown R.B., Cutshall N.H., King G.F., 1981 - Agricultural erosion indicated by 137Cs redistribution: I. Level and distribution of 137Cs activity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1184-1190.
- Cambay R.S., Cawse P.A., Garland J.A., Gibson J.A.B., Johnson P., Lewis G.N.J., Newton D., Salmon L., Wade B.O., 1987 - Observations on radioactivity from the Chernobyl accident. *Nucl. Energ.* 26, 77-101.
- Cressie N.A.C., 1991 - Spatial Prediction and Kriging. In : *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and Sons. Inc., New York, 105-209.
- Dauphiné A., Voiron-Canicio C., 1988 - Variogrammes et structures spatiales. Collection reclus modes d'emploi, Montpellier, 56 p.
- Golden Software Inc., 1995 - Surfer for Windows, version 6. User's Guide. Golden, CO.
- Higgitt D.L., Walling D.E., 1993 - The value of caesium-137 measurements for estimating soil erosion and sediment delivery in an agricultural catchment, Avon, UK. In: *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. S. Wicherek ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 301-315.
- Kachanoski R.G., 1993 - Estimating soil loss from changes in soil cesium-137. *Can. J. Soil Sci.* 73, 629-632.
- Lomenick T.F., Tamura T., 1965 - Naturally occurring fixation of cesium-137 on sediments of lacustrine origin. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29, 383-386.
- Maucorps J., 1993 - Cartographie des sols du bassin versant du « Grand Fossé » au 1/5 000ème, Vierzy (02).
- Quine T.A., 1989 - Use of a simple model to estimate rates of soil erosion from caesium-137 data. *J. Water Resour.* 8, 54-81.
- Quine T.A., Navas A., Walling D.E., Machin J., 1994 - Soil erosion and redistribution on cultivated and uncultivated land near Las Bardenas in the central Ebro river basin, Spain. *Land Degrad. Rehab.* 5, 41-55.
- Ramade F., 1989 - Eléments d'écologie, écologie appliquée. Mc Graw. Hill ed. 580 p.
- Ritchie J.C., Spraberry J.A., McHenry J.R., 1974 - Estimating soil erosion from the redistribution of fallout 137Cs. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 137-139.
- 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.
- Robert M., Cheverry C., 1996 - Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahiers Agricultures*. Vol 5. 4, 243-248.
- Roose E., 1993 - Erosion...a current environmental problem ? The GCES, a new strategy for fighting erosion to resolve this dilemma of a growing society. In: *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. S. Wicherek ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 571-585. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), 1982 - Ionizing radiation-sources and biological effects. United Nations, N.Y.
- 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. In : *Drainage Basin Sediment Delivery*. Publ. 159. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford, England, 423-435.
- Wicherek S., Bernard C., 1995 - Assessment of soil movements in a watershed

2- Georges Etienne Cartier (1814-1874) : Ancien Premier Ministre canadien et l'un des principaux fondateurs de la Confédération Canadienne.