

*Kazimierz Krzemień, Wojciech Chełmicki, Mariusz Klimek*

## **LE CS-137 COMME TRACEUR D'ÉVALUATION DE L'ACTIVITÉ DES PROCESSUS DE REMODELAGE DES VERSANTS DANS LE MASSIF DES MONTS DORE (MASSIF CENTRAL, FRANCE)**

*Resumé:* Le présent article a pour objet de présenter les résultats d'études consacrées à la répartition de la concentration en Césium-137 dans les parties les plus élevées du massif des monts Dore. On a constaté en effet que la concentration de l'isotope de Césium 137 est un bon traceur de l'activité des processus de remodelage dans cette zone. Sur cette base, on a établi que des processus tels que le ruissellement linéaire ou de surface provoquent un remodelage des stocks de matière de manière très inégale. Leur plus grande activité se manifeste sur les longs versants où peut intervenir le ruissellement concentré. Les ravines des versants et les chenaux font alors partie des zones qui subissent le plus le processus de remodelage. La contamination superficielle des sols par le Césium 137 dans les parties les plus élevées du massif des monts Dore se situe entre 13 et 521 Bq/kg

*Mots clés:* Césium-137, processus de remodelage des versants, Massif central.

### **1. Introduction**

Dans le milieu naturel apparaissent les isotopes radioactifs de différents éléments. Une partie d'entre eux sont des isotopes naturels. Parmi eux, on retrouve notamment  $^{40}\text{K}$ , ainsi que les radio-isotopes des séries radioactives: uranium et thorium. Outre les radio-isotopes naturels, on observe, dans le milieu naturel, la présence d'isotopes artificiels qui sont apparus suite aux essais nucléaires et aux avaries de certains réacteurs. Parmi ces derniers, on recense entre autres  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{134}\text{Cs}$ . Un intérêt tout particulier est porté à l'isotope  $^{137}\text{Cs}$  car, en raison d'un temps de décomposition partielle relativement long (30,1 ans), il constitue le principal élément radioactif marqueur de la contamination de l'environnement suite à la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Étant donné que ces isotopes artificiels n'existaient pas dans l'environnement à l'état naturel, ceux-ci, après avoir atteint la surface de la terre et être absorbés par les éléments minéraux et organiques du sol, peuvent constituer un traceur particulier permettant d'évaluer l'intensité de la dynamique des processus morphogéniques (Stach 1986, Strömquist et al., 1989, Walling, Quine 1990, Chełmicki, Świąchowiec 1992, Froehlich, Walling 1992, Krzemień, Chełmicki 1997, Świąchowiec 2002). Dans le cadre de recherches antérieures on avait constaté que l'absorption du Césium était favorisée par la forte teneur des sols en argiles et en limons.

Dans le milieu naturel apparaissent les isotopes radioactifs de différents éléments. Une partie d'entre eux sont des isotopes naturels. Parmi eux, on retrouve notamment  $^{40}\text{K}$ , ainsi que les radio-isotopes des séries radioactives: uranium et thorium. Outre les radio-isotopes naturels, on observe, dans le milieu naturel, la présence d'isotopes artificiels qui sont apparus suite aux essais nucléaires et aux avaries de certains réacteurs. Parmi ces derniers, on recense entre autres  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{134}\text{Cs}$ . Un intérêt tout particulier est porté à l'isotope  $^{137}\text{Cs}$  car, en raison d'un temps de décomposition partielle relativement long (30,1 ans), il constitue le principal élément radioactif marqueur de la contamination de l'environnement suite à la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Étant donné que ces isotopes artificiels n'existaient pas dans l'environnement à l'état naturel, ceux-ci, après avoir atteint la surface de la terre et être absorbés par les éléments minéraux et organiques du sol, peuvent constituer un traceur particulier permettant d'évaluer l'intensité de la dynamique des processus morphogéniques (Stach 1986, Strömquist et al., 1989, Walling, Quine 1990, Chełmicki, Świąchowicz 1992, Froehlich, Walling 1992, Krzemień, Chełmicki 1997, Świąchowicz 2002). Dans le cadre de recherches antérieures on avait constaté que l'absorption du Césium était favorisée par la forte teneur des sols en argiles et en limons (Ritchie et al. 1975, McCallan et al. 1980, Campbell et al. 1982). La fixation du Césium est favorisée, quant à elle, par une forte teneur en éléments organiques (McHenry, Ritchie 1977, Ritchie, McHenry 1978).

Dans le cadre du programme de recherches réalisé dans le massif des monts Dore, dans les années 1995-2000, par l'Université Jagellonne et l'Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, les auteurs ont entrepris des études relatives à l'intensité des processus d'érosion des versants (profils longitudinaux des versants) dans certaines parties de ces versants à l'aide de la méthode du Césium 137. L'application de cette méthode consiste à déterminer la teneur en  $^{137}\text{Cs}$  dans l'horizon superficiel du sol et permet de définir ainsi l'intensité des processus. Dans le cas où l'on observe, sur le versant, une évacuation de matériel en raison du ruissellement, la teneur en Césium est faible. Dans le cas d'une accumulation de ce même matériel, la teneur en Césium est élevée, ceci même jusqu'à une profondeur d'une dizaine, voire de plusieurs dizaines de centimètres.

## 2. Le terrain de recherche

Le massif des monts Dore est situé dans la partie centrale du Massif central dont il abrite le point culminant avec 1 886 m d'altitude. Il s'agit d'un strato-volcan plioquaternaire constitué de laves massives (basaltes, sancyites, doréites, phonolites, trachytes) et de composés pyroclastiques tels que les cinérites (Peterlongo 1978). Au pléistocène, ce secteur était englacé (Veyret 1981). On peut considérer les monts Dore comme constituant un système géomorphologique de haute montagne. Ils répondent en effet aux critères de montagnes alpines formulés par C. Troll (1973) car ils s'élèvent au-dessus de la limite des neiges pluriannuelles du pléistocène et au-dessus de la limite supérieure actuelle de la forêt qui est située à une altitude d'environ 1 550 m. Dans les parties les plus élevées, on observe des formes typiques de haute montagne, à savoir des arêtes, des parois rocheuses, des couloirs d'avalanche mais dans la plupart des cas les versants sont couverts par des éluvions et par des couvertures organiques relativement épaisses (Libelt 1995). Sur les versants à faible inclinaison, on rencontre des couches à forte teneur en matériel organique, d'une profondeur de 50 à 70 cm. Les versants plus inclinés sont couverts de couches argileuses et argilo-pierreuses. Dans le relief étudié prédominent des systèmes de dépression en alvéole, et des systèmes d'arêtes et de fissures érosives et de cônes proluviaux (Kaszowski, Krzemień 1989).

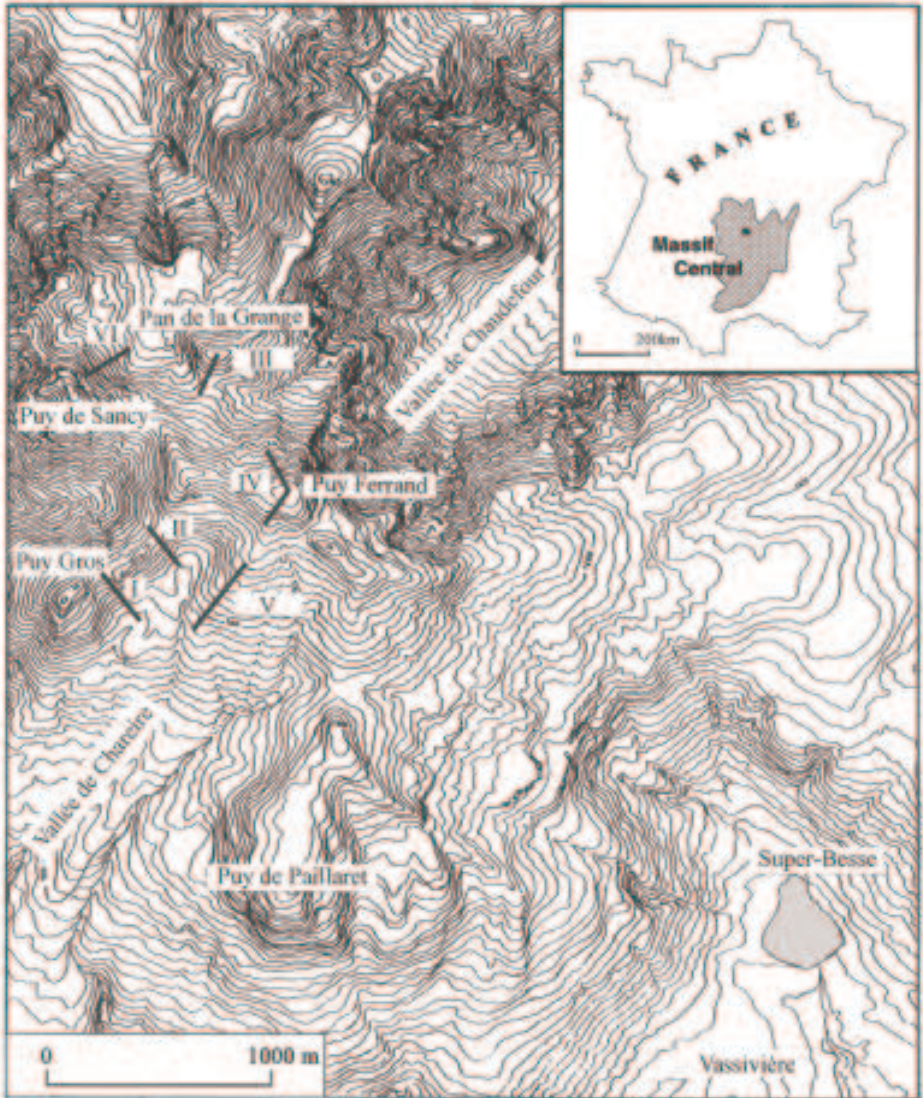


Fig. 1. Localisation du terrain de recherches et répartition des sites de mesure

La région étudiée est une zone de climat océanique humide. Elle reçoit, chaque année, entre 1700 et 2000 mm de précipitations, ce qui est beaucoup (Estienne 1989). Or, le climat influence de manière très directe la formation de la végétation. Ainsi, entre 900 et 1500 m d'altitude, dans la partie occidentale du massif on retrouve essentiellement des hêtres et des sapins (Tort 1989). L'étage subalpin, lui, est occupé par des pelouses naturelles et artificielles où la forêt n'a pas pu se développer en raison des conditions pédo-climatiques actuelles.

### 3. La méthodologie des recherches

Les études ont été effectuées sur le terrain entre le 19 et le 29 mai 1995, ainsi que du 26 mai au 15 juin 2000. Les échantillons de sols ont été prélevés dans six profils situés dans plusieurs transects sélectionnés dans des versants localisés au-dessus de la limite supérieure de la forêt en vue d'une analyse radiométrique (Fig. 1, Phot. 1,2). La totalité des sites de mesure se trouvent sur des versants couverts de gazons. Dans le profil longitudinal de ces versants, on n'observe pas de surfaces dégradées par des processus anthropogéniques. Dans chaque poste, l'herbe a été enlevée puis on a prélevé entre un et trois échantillons des couvertures des sols, à l'aide d'un échantillonneur spécial: entre 0 et 5 cm, 5 et 10 cm et 10 et 15 cm. Trois séries d'échantillons ont été prélevées dans la zone des aplatissements des crêtes, dans les versants et dans les lits des vallées. Ces échantillons ont ensuite été séchés à une température de 105°C, broyés dans un mortier et criblés par un tamis à mailles de 1 mm de diamètre. On a ensuite procédé à l'analyse radiométrique des échantillons dans le Laboratoire d'Analyse des Contaminations Radioactives de l'Environnement de l'Institut de Physique Nucléaire H. Niewodniczański de Cracovie. L'évaluation de la teneur en isotope

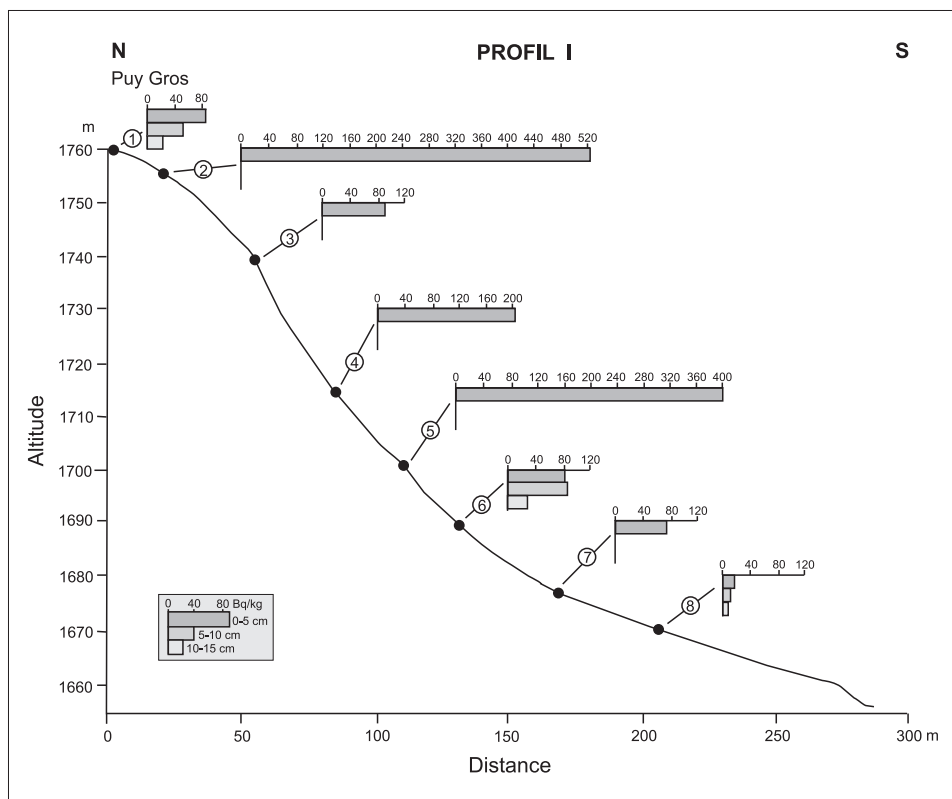


Fig. 2. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol dans le profil longitudinal du secteur de recherche au voisinage du Puy Gros

du Césium 137 a été effectuée à l'aide d'un spectromètre à rayons gamma avec détecteurs Ge(Li). Les spectromètres ont été calibrés grâce à l'étalon de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

La teneur en humus dans le sol a été déterminée à l'aide de la méthode oxydimétrique de Tiurin modifiée par Oleksyn. La teneur en matière organique est exprimée en pourcentage de la masse sèche du sol. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la Station Scientifique de l'Institut de Géographie et d'Aménagement du Territoire de l'Université Jagellonne située à Łazy.

#### **4. La régularité de la concentration en Césium 137 dans les couvertures de quelques transects choisis des versants.**

La teneur en Césium 137 dans les sols du massif des monts Dore est fortement diversifiée dans les différents transects des versants (profils longitudinaux) (Fig. 2-7). Dans la plupart des sites de mesure, la concentration en Césium diminue en fonction de la profondeur du sol. Cette tendance a été constatée dans de nombreux sites étudiés (Chelmicki, Święchowicz 1992). Cependant, sur les versants, existent des sites (Fig. 2, 3) où, en surface, la concentration en Césium est moins importante que dans l'horizon 5-10 cm, ce qui semble indiquer une activité accrue des processus morphogéniques dans ces lieux.

Au-dessus de la limite supérieure de la forêt, on a constaté, dans la couverture superficielle (0-5 cm) une concentration en Césium allant de 13 à 521 Bq/kg. À une profondeur de 5 à 10 cm, ces valeurs sont généralement moins importantes (de 10 à 186 Bq/kg), alors qu'elles sont les plus faibles à une profondeur de 10 à 15 cm (de 8 à 147 Bq/kg).

Afin de déterminer les différences entre les parties les plus élevées du massif et la partie inférieure du versant, on a prélevé des échantillons dans des conditions morphologiques similaires sur les crêtes du puy Ferrand (1854 m d'altitude), au Pan de la Grange (1768 m d'altitude) et à proximité du puy Gros (1760 m d'altitude) ainsi que sur la crête de la région de Vassivière (1310 m d'altitude) (Fig. 1). La variabilité de la teneur en Césium sur ces sites est faible seulement lorsque l'on compare ces valeurs uniquement sur les crêtes. Par contre, lorsque l'on tient compte des données relatives aux défilés, ces différences sont nettement plus importantes. Dans la couverture située à une profondeur de 0 à 5 cm, la concentration du Césium est inférieure de 17-21 Bq/kg (à proximité de Vassivière) par rapport à celles relevées sur le puy Gros et le puy Ferrand où elles s'élèvent à 67 Bq/kg. À une profondeur de 5 à 10 cm, la concentration en Césium à Vassivière est comparable ou supérieure à celle que l'on observe dans les parties hautes du massif. Dans ce lieu, on mesure 59 Bq/kg à une profondeur de 10 à 15 cm, valeur comparable ou inférieure à celle des parties supérieures du massif où elle est de 17 Bq/kg (Fig. 1, 2, 6). Dans les défilés et dans les parties planes des versants, la concentration en Césium peut être beaucoup plus élevée qu'au pied du massif et peut même atteindre 521 Bq/kg. De manière générale, la teneur maximale en Césium 137 dans le sol est supérieure de plus de 200 Bq/kg dans les parties les plus élevées du massif des monts Dore par rapport aux valeurs observées dans les Carpathes polonaises (Chelmicki et al. 1995). Ceci pourrait probablement être expliqué par une intensité différente des retombées radioactives et par des conditions environnementales différentes entre ces deux régions.

On a constaté que la concentration en Césium 137 dans les différents sites de mesure du massif des monts Dore dépend en effet de la variabilité des conditions environnementales et notamment de l'intensité des processus d'érosion et d'accumulation. C'est pourquoi, il est utile de procéder à l'analyse de ces valeurs le long des versants car telle est la direction selon laquelle interviennent les processus morphogéniques prédominants.

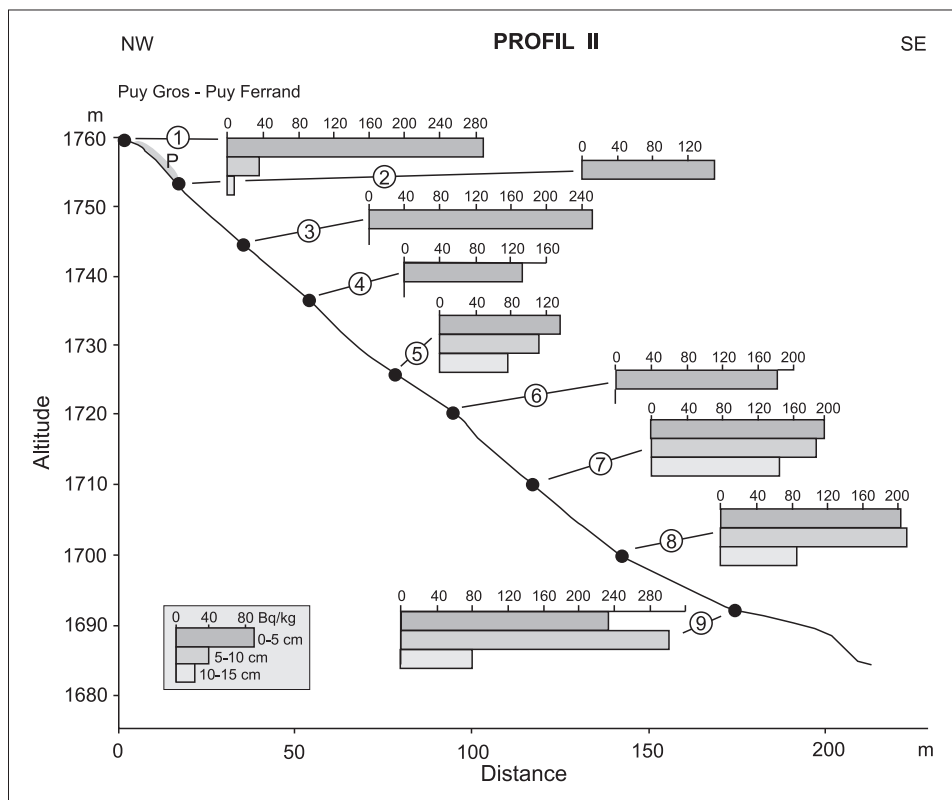


Fig. 3. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol dans la cuvette du versant f partir du défilé situé entre le puy Ferrand et le puy Gros. P – plaque de neige

Sur les versants sud-est du Puy Gros (Fig. 2), la plus forte concentration en Césium apparaît dans la zone des aplatissements des versants, ainsi que dans la partie supérieure et centrale du versant (postes 2 et 5), les échantillons étant prélevés parallèlement au chenal de ravinement. La partie inférieure du versant (poste 8) est formée par le ravinement provenant des parties supérieures, mais dans le prolongement du chenal parvient aussi du matériel fin transporté de manière oblique. Ainsi, la concentration en Césium dans le transect étudié indique une activation locale du matériel de ravinement et d'accumulation qui intervient sur de faibles aplatissements. A partir du poste de mesure numéro 6, l'impact du ruissellement est plus important, ce qui est confirmé par une concentration beaucoup plus faible en Césium f la surface par rapport au poste situé f une hauteur plus élevée et une concentration plus faible f la surface en comparaison avec celle que l'on constate f une profondeur de 5 f 10 cm. Le terrain situé près du poste numéro 8 est, lui aussi, exposé f une forte influence des processus d'accumulation de matériel nouveau, ceci dans le prolongement du cône formé par les ravinements.

Une situation similaire s'observe le long de la niche du versant (Fig. 3) qui se forme au-dessous du défilé situé entre le puy Gros et le puy Ferrand. Dans la partie supérieure

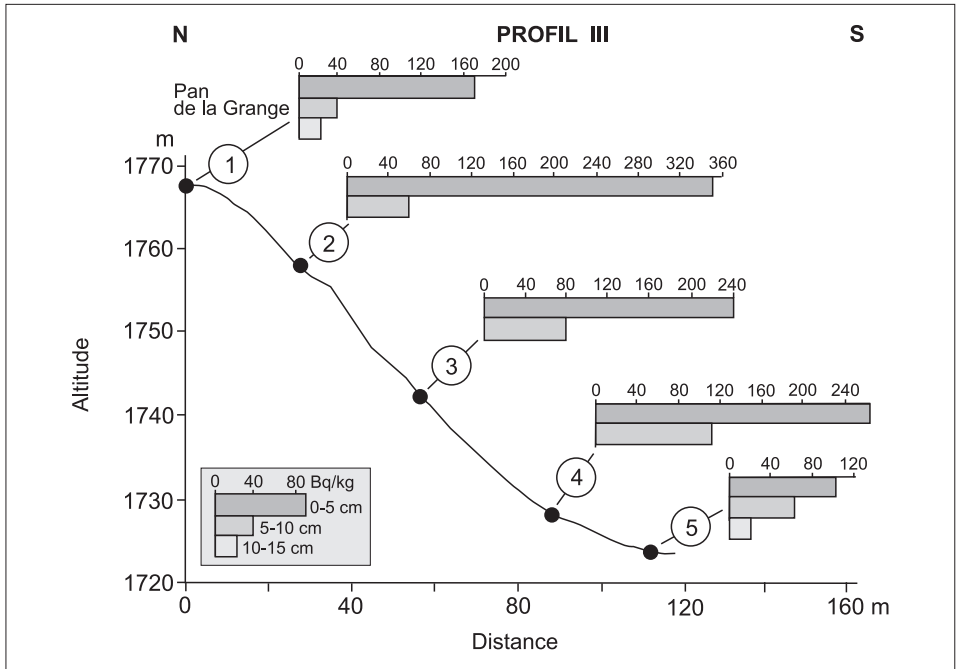


Fig. 4. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol sur le versant sud du Pan de la Grange

de la cuvette interviennent, alternativement, érosion et accumulation du matériel. Ce type de mécanisme de transport de matériel sur ce versant exploité comme pâturage a également été constaté sur les versants de Pogórze Karpackie par J. Święchowicz (2002). Dans la partie inférieure du versant étudié on a cependant observé, dans deux postes, une nette diminution de la concentration en Césium dans la couverture superficielle, ce qui indiquerait une accumulation de matériel transporté depuis les parties supérieures (Fig. 3). Dans la totalité du profil de la cuvette du versant interviennent des processus de ravinement concentrés, ce qui provoque l'érosion locale et, par la suite, une accumulation dans la partie inférieure, au pied du versant.

Sur le versant sud du Pan de la Grange, la plus forte concentration en Césium apparaît dans les zones applaties et dans la partie supérieure et inférieure du versant (postes 2 et 4, Fig. 4, Phot. 1). Cela indique une activation locale du matériel des versants et l'accumulation dans ces zones applaties. Dans la partie inférieure du versant, en revanche, on n'observe pas d'accumulation du matériel. Ce dernier est transporté plus bas car la partie inférieure du versant est située dans le défilé situé entre la vallée de Chaufour et la vallée de Dordogne.

Dans le secteur de la crête du puy Ferrand, ceci aussi bien sur les versants exposés au Nord qu'au Sud, la concentration en Césium est réduite, faiblement diversifiée et est maximale près de la surface (Fig. 5). Des variations plus importantes n'apparaissent que dans le transect allant de la crête du puy Ferrand jusqu'au fond de la vallée de Chaire (Fig. 6). D'après les études effectuées dans cette zone, on peut constater que le versant lisse couvert d'herbe, d'airelles et de bruyère dans sa partie centrale et inférieure, est exposé à une plus faible dégradation à la suite de processus d'érosion et de ravinement par rapport

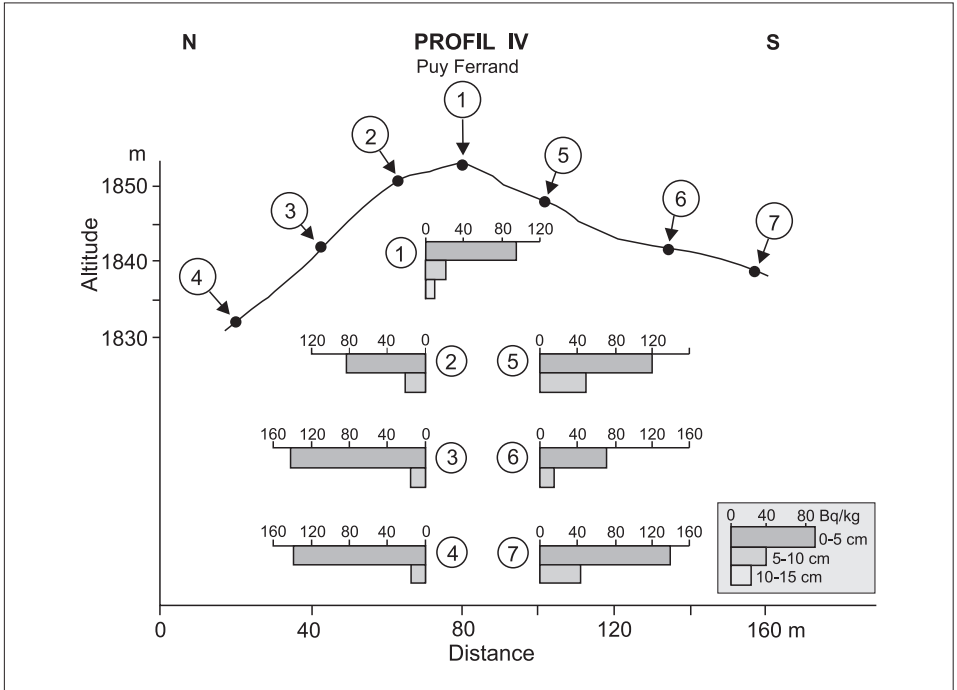


Fig. 5. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol sur les versants sud et nord du Puy Ferrand

à d'autres facettes. Cela est confirmé par les fortes valeurs de concentration en Césium observées dans cette partie du versant, valeurs allant jusqu'à 240 Bq/kg. Dans la section sommitale, les valeurs de concentration en Césium sont plus faibles, situées entre 74 à 90 Bq/kg et 140 Bq/kg, ce qui indiquerait une dégradation relativement importante de la section sommitale du puy Ferrand (Fig. 3). Dans la partie inférieure du versant s'ouvre, à partir du poste numéro 3, une cuvette peu profonde composée de quatre niches séparées par des courbures distinctes (Fig. 6, Phot. 2). Dans le profil longitudinal du chenal en cuvette, la concentration en Césium est très variable. Dans la partie supérieure, elle est très faible en surface puis augmente ensuite de 13 à 220 Bq/kg. Dans la cuvette, on voit distinctement les conséquences de l'érosion superficielle et du ravinement (partie supérieure) et de l'accumulation (partie inférieure) dans la section plus plane située au-dessus du fond de la vallée de Chaireire. Une situation très intéressante apparaît à hauteur du poste numéro 4, où, au fond de la cuvette, les valeurs de la concentration en Césium 137 sont inférieures de 50 % par rapport à un lieu situé à une distance de 10 m, à la même hauteur, mais sur un versant lisse non découpé (Fig. 6, Phot. 2).

Les plus faibles valeurs de concentration en Césium ont été relevées dans trois postes situés sur le versant nord du puy de Sancy (Fig. 7) où, en surface, on a mesuré des valeurs allant de 44 à 56 Bq/kg. Ces versants se caractérisent par de fortes inclinaisons (35° en moyenne) et n'ont que des couvertures squelettiques par rapport aux autres versants. D'une manière générale, les versants exposés au nord sont modelés plus intensivement par les processus de ravinement que les versants exposés au sud.



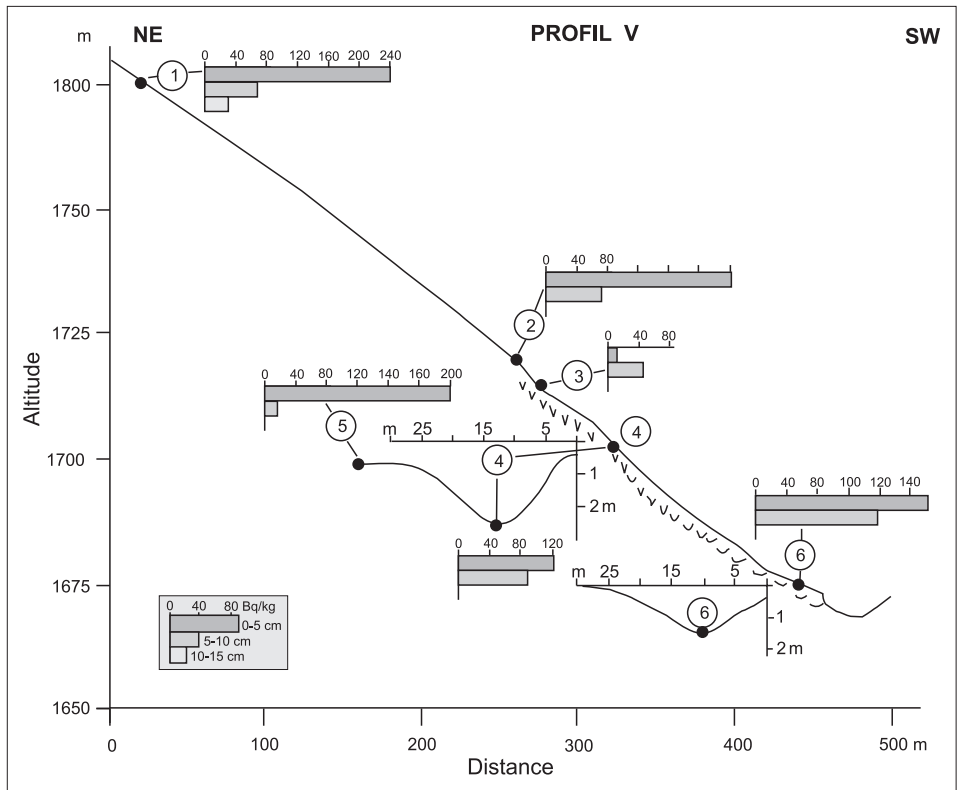


Fig. 6. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol sur le versant sud-ouest du puy Ferrand, f proximité de la vallée de Chareire

## 5. Le caractère régulier de l'activité actuelle des processus d'érosion des versants

L'analyse de la répartition du Césium 137 dans les sols a été effectuée sur des versants courts ou longs se caractérisant par une structure géologique et une végétation similaires. De manière générale, on a pu constater une importante variabilité de cette teneur en Césium dans le sol, ce qui est dû à la diversification des processus d'érosion, de ravinement et d'accumulation. L'alternance de faibles et de fortes concentrations en Césium 137 a été établie dans les cuvettes et dans les chenaux des versants, et de fortes concentrations s'observent à proximité, sur des versants lisses et dans les parties planes des versants. Sur cette base, on peut déduire que, dans la zone étudiée, les processus d'érosion et de ravinement interviennent en alternance. Le transport de matériel intervient lors des précipitations et pendant les périodes de dégel et se produit de manière inégale et par étapes (Świąchowicz 2002). Le matériel est alors transporté sur de petites distances et se dépose dans les parties les plus planes des versants ou dans les secteurs irréguliers de ceux-ci. Cela entraîne un remodelage complexe des versants dans le massif des monts Dore. On observe par

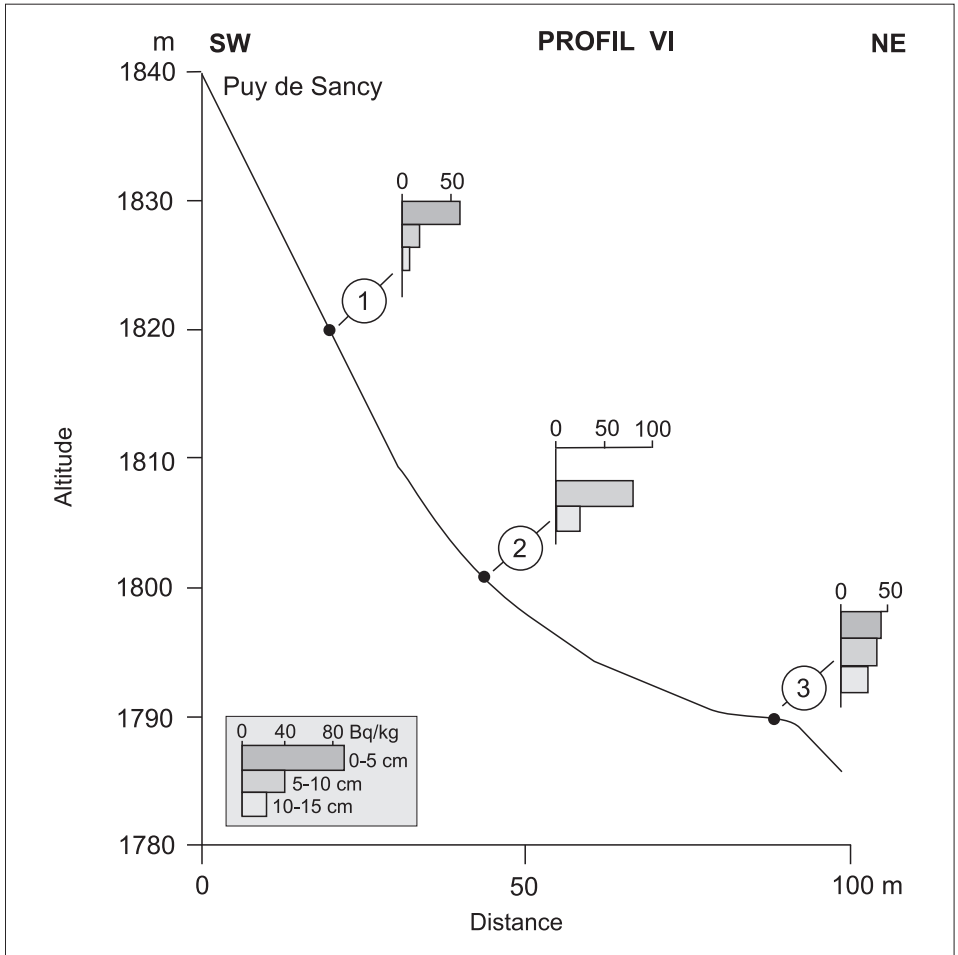


Fig. 7. Répartition de la concentration en Césium-137 dans le sol dur le versant nord-est du Puy de Sancy

ailleurs distinctement un remodelage beaucoup plus lent des versants lisses que des chenaux et, respectivement, des versants courts et longs (Fig. 2, 5). Un facteur supplémentaire qui influe sur la variabilité de la concentration en Césium pourrait d'autre part découler du caractère diversifié du matériel organique présent dans le sol. La relation entre la concentration en Césium et la teneur en matériel organique prend la forme d'une courbe logarithmique (Fig. 8) dont le coefficient est  $R^2 = 0,51$ .

## 6. Conclusions

Les études menées sur le terrain dans le massif des monts Dore dans les années 1995 et 2000 démontrent une forte variation de la concentration en Césium 137 dans le sol, ceci aussi bien dans les différents profils étudiés qu'à l'échelle du massif. De manière générale,

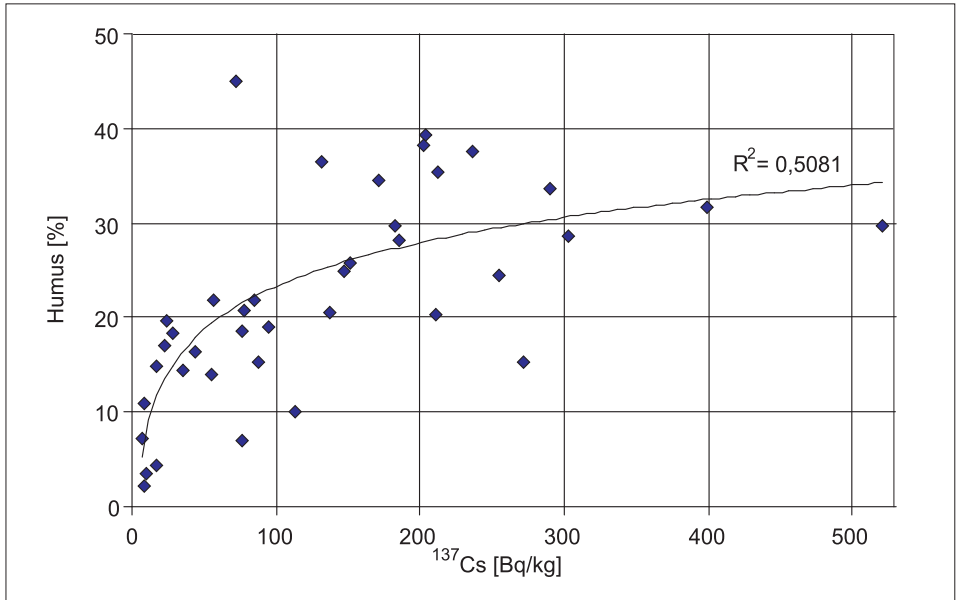


Fig. 8. Rapport entre la concentration en Césium-137 et la teneur en matériel organique (humus) dans les sols

la quantité de Césium diminue brusquement avec la profondeur. A une profondeur de 10 à 15 cm, elle ne représente que 9 à 21 % de la valeur détectée dans la couche superficielle. La raison principale de ces différences dans la zone des couvertures des versants réside dans l'intensité inégale d'évacuation du matériel suite aux processus de ravinement et d'érosion de surface. Ces processus entraînent un remodelage inégal des versants, ceci malgré leur stabilisation par la végétation herbacée. Leur plus grande activité se manifeste essentiellement le long des formes linéaires, le long de différents types de chenaux de versants. Outre ces zones, on recense des fragments de versant qui sont peu dégradés, voire stable. Le mécanisme de transport des produits de décomposition est complexe et dépend étroitement du micro-relief. Ces produits de décomposition, généralement de faible granulométrie, sont soumis à de nombreux déplacements jusqu'au pied des versants puis dans les lits des torrents. Les versants courts sont alors beaucoup plus faiblement remodelés que les versants longs. Les résultats des recherches effectuées en 1995 et en 2000 permettent de supposer que le remodelage actuel des versants couverts de végétation herbacée intérieurement le long des chenaux, des cuvettes des versants ainsi que dans les zones dans lesquelles a lieu le ravinement concentré. Les études géomorphologiques fondées sur l'utilisation de la méthode du Césium 137 ont confirmé la forte variabilité du processus de remodelage des versants dans le massif des monts Dore ainsi que le fait que toute sorte de chenaux et de lignes d'évacuation de l'eau constituent les zones les plus actives de dégradation dans cette région.

De manière générale, la contamination des sols dans les parties supérieures du massif des monts Dore est plus forte que dans les Carpates Polonaises. Ce fait pourrait s'expliquer par la variabilité spatiale des précipitations atmosphériques au moment du déplacement du

nuage radioactif diffusé après la catastrophe de Tchernobyl en 1986. Ainsi, ce phénomène pourrait confirmer la thèse présentée souvent dans la littérature scientifique, selon laquelle, dans les zones caractérisées par un volume plus important de précipitations atmosphériques, la contamination par le Césium radioactif a été supérieure à celle observée dans des zones où les pluies sont moins abondantes.

### Remerciements

Les auteurs veulent remercier toute l'équipe de l'Institut de Physique Nucléaire H. Niewodniczańskiego de Cracovie, à savoir Mme M. Jasińska, dr. K. Kozak, M. J.O. Krupa et dr J.W. Mietelski pour la réalisation des analyses radiométriques.

Les auteurs remercient sincèrement le professeur Daniel Ricard qui a bien voulu vérifier la traduction française de cet article.

### Bibliographie

- Campbell B.L., Loughran R.J., Elliot G.L., 1982, *Caesium-137 as an indicator of geomorphic processes in a drainage basin system*. Australian Geographical Studies, 20.
- Chełmicki W., Świąchowicz J., 1992, *Application of Cs-137 and Soil Trapping Methods for Studying Slope Processes in the Carpathian Foothills*, Pirineos, 139.
- Chełmicki W., Klimek M., Krzemień K., 1995, *Występowanie radioizotopu <sup>137</sup>Cs w glebach progów Pogórza Karpackiego między Rabą i Uszowicą*, [dans:] L. Kaszowski (ed.), *Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego progów Karpat pomiędzy Rabą i Uszowicą*, Instytut Geografii UJ, Kraków.
- Estienne P., 1989, *Le climat, Le Puy-de-Dôme*, cartes sur table, Le Puy-en-Velay.
- Froehlich W., Walling D.E., 1992, *The use of fallout radionuclides in investigations of erosion and sediment delivery in the Polish Flysch Carpathians*, IAHS Publ., 209.
- Kaszowski L., Krzemień K., 1989, *Quelques aspects du modèle actuel des Monts Dore et des Tatras*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 76.
- Krzemień K., Chełmicki W., 1997, *Evaluation de l'érosion des sols dans le massif des Monts Dore à l'aide de la méthode Cs - 137, Gestion des espaces fragiles en moyenne montagne: Massif central - Carpates polonaises*, CERAMAC 9, Clermont-Ferrand.
- Libelt P., 1995, *Caractérisation des formations superficielles quaternaires dans les Monts Dore*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geogr., 99.
- McCallan M.E., O'Leary B.M., Rose C., 1980, *Redistribution of Caesium-137 by erosion and deposition on an Australian soil*, Aust. Journ. of Soil. Res, 18.
- McHenry J. R., Ritchie J. C., 1977, *Physical and chemical parameters affecting transport of <sup>137</sup>Cs in arid watersheds*. Water Res. Research, 13.
- Peterlongo J.M., 1978, *Massif Central, Guides géologiques régionaux*, Masson, Paris, New York, Barcelone, Milan.
- Ritchie J. C., McHenry J. R., 1975, *Fallout Cs-137: A tool in conservation research*. Journ. of Soil and Water Conserv., 30, 6.
- Ritchie J. C., McHenry J. R., 1978, *Fallout caesium-137 in cultivated and non cultivated North-Central United States watersheds*, Journ. Environ.
- Stach A., 1986, *Podstawy teoretyczne i metodyczne wykorzystania radioizotopu <sup>137</sup>Cs w badaniach geomorfologicznych*. Sprawozdania Pozn. Tow. Przyj. Nauk., 106.
- Strömquist L., Jonasson C.H., Robinson C., 1989, *Testing <sup>137</sup>Cs as an Indicator of Slope Process Activity in Periglacial Environments*, Studia Geom. Carp.-Balc., 23.
- Świąchowicz J., 2002, *The influence of plant cover and land use on slope - channel decoupling in a foothill catchment: a case study from the Carpathian Foothills, Southern Poland*, Earth Surface Processes and Landforms, 27.

- Tort M., 1989, *Végétation potentielle, Le Puy-de-Dôme*, cartes sur table, Le Puy-en-Velay.
- Troll C., 1973, *High mountain belts between the polar caps and the equator, their definition and lower limit*, Arc. Alp. Res. 5, 3, part 2.
- Walling D. E., Quine T. A., 1990, *Use of Caesium-137 to Investigate Patterns and Rates of Soil Erosion on Arable Fields*, [dans:] J. Boardman, I. D. L. Foster, J. A. Dearing, *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley & Sons.
- Veyret Y., 1981, *Modèles et formations d'origine glaciaire dans le Massif central français*, Atelier de reproduction des thèses, Université de Lille III, 2.

## **Cs-137 used as an indicator of slope process activity in the Monts Dore, Massif Central, France**

### **Summary**

The paper presents the results of an investigation into the concentration of caesium -137 in selected slope sections made in the Monts Dore (1886 m), a massif in the highest part of the French Massif Central. Existing studies define the area as a high-mountain volcanic massif influenced by marine climate. The land relief is dominated by systems of niche-hollows, sharp erosional edges, flow lines and proluvial cones.

Field research conducted in the area in 1995 and 2000 revealed a great variation in the Cs-137 concentration in soils, both within investigated section and overall in the whole massif. Typically, concentration values dropped rapidly with depth. At the depth of 10-15 cm there was just 9-21 percent of the surface concentration value. The principal reason for the variation in the Caesium contamination in the slope cover is the varied intensity of the displacement of the slope material by downwash and erosion. Those processes have a varied impact on the slopes despite the binding grass vegetation. The impact is the greatest along the linear relief forms, such as slope chutes, but there are slope sections subject to very weak degradation or even stable. Overall, the rock-waste transport mechanisms are complex and related to the complex land micro-relief. The typical fine rock-waste found in the area undergoes multiple transport cycles until it reaches the slope foot and is washed into the streams. Short slopes feature less modelling than longer slopes. The field research has shown that contemporary modelling of grass-covered slopes concentrates along chutes, slope hollows and concentrated down-wash zones. Geomorphologic investigation using the caesium method has confirmed a high diversity in slope modelling in the the Monts Dore and that all kinds of chutes and flow lines constitute the most active zones of degradation in the area discussed.

*Kazimierz Krzemień, Wojciech Chelmicki, Mariusz Klimek  
Institut de Géographie et d'Aménagement du Territoire  
Université Jagellonne  
Cracovie  
Pologne*