

Application de la technique de ^{137}Cs à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Moulay Bouchta, Rif occidental, Maroc

A. ZOUAGUI¹, M. BENMANSOUR¹, N. AMENZOU¹, A. NOUIRA¹, M. SABIR²,
H. BENJELLOUN², H. MARAH¹ & A. BENKADAD¹

(Reçu le 15/01/2012; Accepté le 15/03/2012)

Résumé

Au Maroc, l'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols, en particulier dans la zone rifaine, où l'érosion engendre des dégâts importants en amont et en aval des structures hydrauliques, remettant en cause la durabilité de l'exploitation de ces dernières. De même, l'évaluation quantitative de ce processus reste difficile à mettre en œuvre du fait de la complexité du comportement des particules du sol, aussi bien dans l'espace que dans le temps, en réponse à la diversité et l'interaction des facteurs naturels et anthropiques. C'est ainsi qu'on propose d'évaluer les sédiments déplacés qui sont l'élément perceptible de ce phénomène à travers le suivi du traceur radioactif le Césium 137 (^{137}Cs) caractérisé par son affinité aux particules fines du sol (argile et matière organique).

La méthodologie adoptée combine l'utilisation de la technique du ^{137}Cs et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), ainsi, on a défini une trentaine d'unités fonctionnelles combinant trois paramètres agro-environnementaux « l'occupation du sol, le type de sol et l'inclinaison de la pente ». Jusqu'à présent, on a échantillonné 9 unités, représentant 68% du bassin versant, deux sites de référence et un prélèvement au niveau de la retenue du barrage pour évaluer le taux de sédimentation. Ensuite, les échantillons ont été analysés par spectrométrie gamma, les activités du ^{137}Cs (Bq/kg), ainsi obtenues, sont converties en taux de perte ou de gain du sol (t/ha/an) à l'aide du modèle masse balance 2 (MBM2) pour les sites perturbés (terrains cultivés) et le modèle de diffusion et migration (DMM) pour les sites non perturbés (forêts et matorrals).

Les résultats des pertes en sol à long terme (~ 50 ans) montrent que la majorité des sédiments arrachés (98%) proviennent des terrains cultivés. Ces terrains présentent des taux d'érosion variant de 18 à 36 (t/ha/an), alors que les sites du matorral et de la forêt présentent des taux d'érosion nettement plus faibles, ne dépassant pas 4,5 (t/ha/an). Ainsi, l'érosion globale calculée par pondération des surfaces de production de chaque unité de même sensibilité à l'érosion est estimée à 23 (t/ha/an). D'un autre côté, le taux de sédimentation mesuré dans la retenue du barrage montre que 0,34 cm de sédiments sont déposés chaque année, soit une dégradation spécifique de 50 (t/ha/an).

Mots-clés: Érosion, Sédimentation, Radio-isotope ^{137}Cs , SIG, Bassin versant, Rif.

INTRODUCTION

L'émergence de l'agriculture intensive et spécialisée a favorisé le développement de la production agricole, mais ce développement s'est accompagné d'une pression accrue sur les ressources eau-sol-biomasse. Parmi les conséquences de cette pression, on trouve en premier rang : la dégradation des sols par l'érosion hydrique qui menace de plus en plus les terrains agricoles et les écosystèmes forestiers (perte du sol, diminution de la productivité et de la biodiversité), ainsi que les hydrosystèmes et les infrastructures (pollution des eaux, ensablement des canaux d'irrigation et des retenues, destruction des villages et des routes). Cependant, l'évaluation quantitative de ce phénomène se heurte à la complexité du comportement spatio-temporel des particules du sol en réponse à la diversité et l'interaction

des facteurs biophysiques et anthropiques dont la détermination précise à l'échelle du bassin versant reste très onéreuse en terme de temps et de coût. C'est ainsi qu'on propose d'évaluer les sédiments déplacés qui sont l'élément perceptible de ce phénomène pour établir un diagnostic sédimentaire complet à l'échelle du bassin versant. Pour atteindre cet objectif, on a adopté une approche cartographique, intégrant les mesures d'érosion obtenues par les techniques isotopiques, qui consistent au suivi du césium-137 (^{137}Cs) présent dans l'environnement, en tant que traceur radioactif des particules du sol (Walling *et al.*, 1997, Benmansour *et al.*, 2000, Nouira *et al.*, 2003), et les systèmes d'information géographique (SIG) qui permettent d'intégrer les différentes informations sur le milieu afin d'orienter l'échantillonnage sur un ensemble d'unités homogènes de même sensibilité à l'érosion, et par la suite de cartographier les résultats de perte en terre.

¹ Centre National de l'Énergie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) ; BP 1382, R.P.10001 - Rabat, Maroc; zouagui.anis@gmail.com

² École Nationale Forestière d'Ingénieurs (ENFI) ; BP 511, Tabriquet - Salé, Maroc; sabirenfi@wanadoo.net.ma

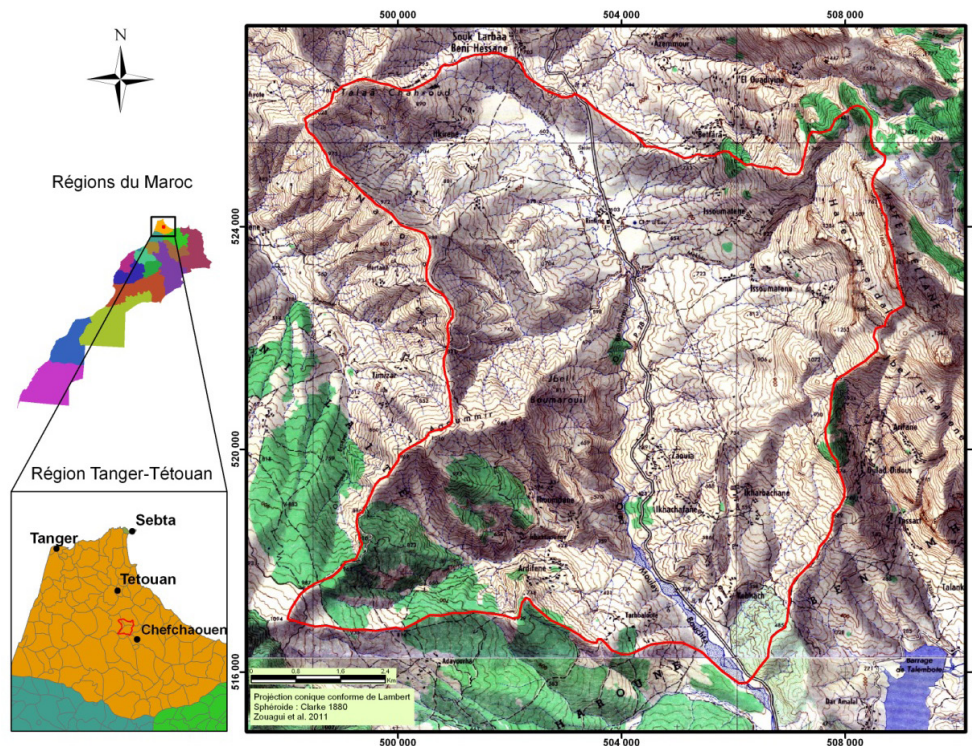


Fig. 1. Localisation du Bassin versant My Bouchta, Rif occidental, Maroc

MATERIELS ET METHODES

Zone d'Étude

La zone d'étude est le bassin Versant de Moulay Bouchta (7664 ha) situé dans la partie septentrionale du Maroc (Rif Occidental) (figure 1), entre la ville de Tétouan et la ville de Chefchaouen, il fait partie intégrante du grand bassin versant Oued Laou, est principalement drainé par l'oued Moulay Bouchta qui déverse dans le barrage « Ali Thlet » dont la capacité de retenue était de 30 hm³. Cet ouvrage, construit en 1935, est actuellement entièrement envasé (Rkiouak et al., 1997).

Le bassin versant est caractérisé par une topographie accidentée environ 65 % de la superficie du bassin présente des pentes fortes (plus de 15 %), une altitude variant de 180 m au niveau de l'exutoire à 1 800 m à Jbel Izmamene. Le substratum géologique du bassin est principalement constitué d'un bloc de roches marno-schisteuses tendres, la dorsale calcaire, et la nappe de flyschs constituée de formations argilo-sableuses, gréseuses et marnes (Mandimou, 2002). Le bioclimat de la zone d'étude est dominé par l'humide à variante tempérée et le subhumide à variante chaude, les précipitations annuelles moyennes varient de 605 à 1770 mm, la température est comprise entre 10,6 et 24,7 °C. Le bassin versant est constitué en grande partie des sols peu évolués (63%), puis, les sols bruns vertiques (19%), sols bruns fersialitiques (10%) et sols minéraux bruts (8%) (Benjelloun, 1993). L'espace est couvert à 78% de terrains agricoles (les céréales, les légumineuses, les cultures maraîchères, les fourrages et les arbres fruitiers), suivi d'une végétation de matorral (14%) parfois très dégradée, et des formations forestières (8%) avec le chêne-liège comme essence

prépondérante, ainsi que des reboisements de pin d'Alep, pin maritime et pin radiata (Zouagui, 2010).

Méthodologie

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des données topographiques, pédologiques et d'occupation du sol ainsi que sur des mesures isotopiques (^{137}Cs) des échantillons prélevés sur des unités homogènes. Ces données sont ensuite intégrées et analysées dans un environnement SIG, pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion hydrique.

Définition de la stratégie d'échantillonnage

Pour des besoins d'optimisation de l'échantillonnage, une carte des unités homogènes a été réalisée en superposant trois couches de données qui représentent les facteurs ayant une incidence directe sur l'érosion. A l'aide d'un SIG, on a adopté la classification suivante :

- Occupation du sol: 3 classes (Forêt, Matorral et champs agricoles);
- Facteur topographique (pente): 4 classes (0-5%, 5-15%, 15-30%, >30%);
- Facteur pédologique (type de sol): 4 classes (sols peu évolués, sols minéraux bruts, sols bruns vertiques, sols bruns fersialitiques).

Il est à signaler qu'en absence d'une carte de type de sol, on s'est basé sur une carte synthétique des types de sol établie par Mandimou (2002). Par la suite, l'échantillonnage a concerné un ensemble d'unités les plus représentatives du bassin versant en terme de superficie et du risque érosif. Et sur chacune de ces unités choisies le prélèvement s'effectue suivant l'approche transect (1 - 4 transects)

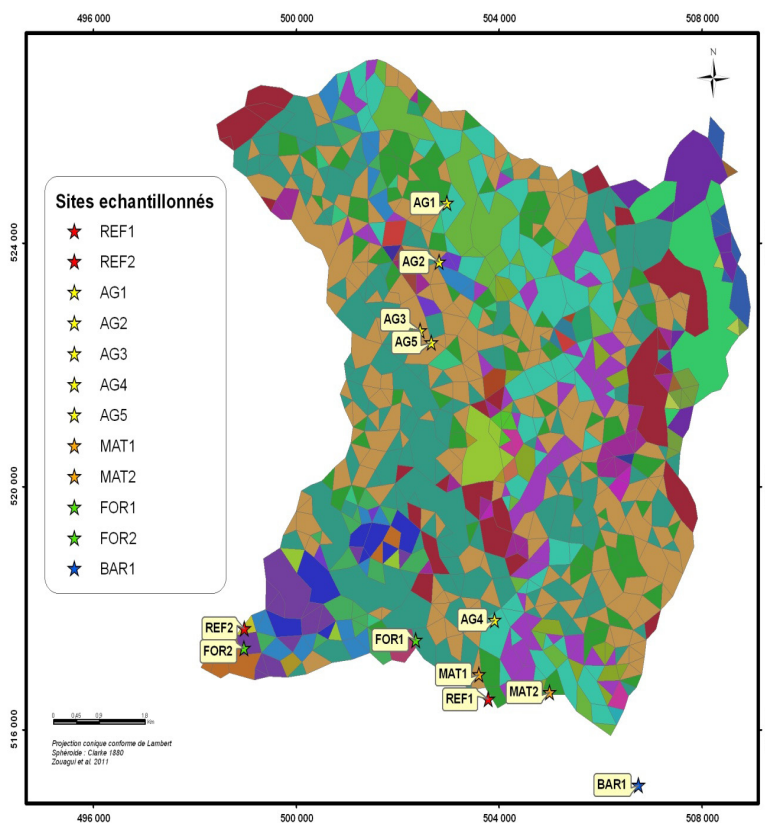


Fig. 2. Carte des Unités homogènes de même sensibilité à l'érosion et des sites échantillonnés, Bassin versant My Bouchta, Rif occidental, Maroc

pour collecter des échantillons tous les 20m à partir du haut vers le bas de la pente. Deux sites de référence (REF1 et REF2) ont été identifiés, à proximité des sites d'étude, dans la forêt avec une pente nulle, considérés sans érosion ni déposition. Une carotte de sédiments a également été recueillie dans le réservoir d'eau « Ali Thlet » situé à l'exutoire du bassin pour l'étude de la sédimentation.

Le prélèvement des échantillons a été réalisé à l'aide d'un moteur carottier composé d'un tube cylindrique de 9 cm de diamètre, inséré à une profondeur de 30 - 40 cm pour s'assurer que la carotte contient tout le stock du ¹³⁷Cs en place, trois échantillons ont été découpés en incréments de 1cm-2cm pour l'étude de la distribution du ¹³⁷Cs en profondeur.

Analyse au laboratoire et calcul de l'activité du ¹³⁷Cs

Les échantillons du sol ont subi un prétraitement qui consiste à un séchage dans une étuve à 105°C pendant 24h, ségrégation, tamisage de la matière fine (<2mm), homogénéisation puis conditionnement dans des flacons de géométrie 500ml et 75ml. Ensuite, ils ont été analysés par spectrométrie gamma à l'aide d'un détecteur germanium hyper pure pour calculer l'activité du ¹³⁷Cs, radio-isotope émetteur d'un rayonnement gamma de 661 keV.

L'activité massique A_m du ¹³⁷Cs (Bq/kg) est déterminée en exploitant l'équation suivante:

$$A_m = \frac{N_{net}}{t_c I_\gamma m \varepsilon}$$

Où :

- N_{net} : aire nette sous le pic photoélectrique γ ou nombre de coups net sous le pic;
- t_c : temps de comptage (s);
- I_γ : intensité du rayonnement γ (85,5%);
- m : masse de l'échantillon (kg);
- ε : efficacité de détection.

Estimation du taux d'érosion

L'évaluation des pertes en sol est réalisée en appliquant des modèles d'interprétation qui permettent de convertir l'activité du ¹³⁷Cs en taux d'érosion ou de déposition du sol.

Ainsi, les pertes en ¹³⁷Cs déduites de la différence entre les activités mesurées dans les sites de référence (forêt et pente nulle) et les sites étudiés permettent de calculer les pertes en sols selon le modèle de diffusion et de migration (DMM) dans les sites non perturbés (forêt et matorral), ce modèle présente l'avantage de prendre en compte l'entraînement de l'isotope radioactif récemment retombé avant son incorporation par le labour; et le modèle d'équilibre de masse 2 (MBM2) dans les sites perturbés (champs de culture) qui prend en compte l'entraînement de l'isotope radioactif récemment retombé avant son incorporation par le labour (Walling et He, 1997).

Taux de sédimentation

La technique de ¹³⁷Cs est également utilisée pour la datation des sédiments en exploitant les retombées des

radio-isotopes sur la surface terrestre, qui se sont produits pendant les essais nucléaires atmosphériques, aux cours des années 50 et milieu des années 60. Elle utilise ces dépôts comme un marqueur pour identifier les particules du sol et les sédiments fixés à cette époque.

Les mesures du ¹³⁷Cs permettent l'identification de l'année 1963 qui correspond au pic des retombées (Walling et al., 1993).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Stratégie d'échantillonnage

La combinaison des trois paramètres : occupation du sol, pente et type de sol a donné lieu à 39 unités homogènes (figure 2) dont on suppose la même sensibilité au processus érosif (Bouhlassa et al., 2000). Jusqu'à présent, on a échantillonné : 9 unités les plus représentatives du bassin versant en terme de superficie et du risque érosif, couvrant 68% du bassin, deux sites de références (REF1 et REF2), juste à proximité des sites d'étude. En outre, pour l'étude de la sédimentation

dans la partie aval du bassin, on a prélevé une carotte sédimentaire d'une profondeur de 56cm au niveau de la retenue du barrage « Ali Thlet ».

Le tableau 1 indique les paramètres physiques et biologiques des sites échantillonnés et leur mode de prélèvement.

Inventaire de référence

L'analyse des échantillons au niveau des deux sites de référence REF1 et REF2 montre un inventaire de 2704 (Bq/m²) à une altitude de 520 (m) et 3554 (Bq/m²) à une altitude de 980 (m), respectivement. Cette différence est due à la variation de la distribution spatiale des précipitations, agent responsable de la déposition du ¹³⁷Cs sur la surface terrestre, qui n'est pas uniforme sur l'ensemble du bassin.

Cette valeur de référence est la base de cette étude, or un site qui présente une activité du ¹³⁷Cs supérieure à l'activité de référence est interprété comme site de déposition alors qu'un site qui présente une activité inférieure est interprété comme site d'érosion.

Tableau 1. Caractéristiques physiques et biologiques des sites étudiés et mode de prélèvement des échantillons

| Site | Occupation du sol | Type de sol | Pente (%) | Nombre de transect | Nombre d'échantillons | Distance entre échantillons |
|------|-------------------|-------------|-----------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|
| FOR1 | Forêt | SBF | 34 | 1 | 6 | 20 |
| FOR2 | Forêt | SBF | 20 | 4 | 28 | 20 |
| MAT1 | Matorral | SPE | 31 | 1 | 6 | 20 |
| MAT2 | Matorral | SBV | 21 | 4 | 28 | 20 |
| AG1 | champs de culture | SBV | 9 | 1 | 8 | 20 |
| AG2 | champs de culture | SBV | 14 | 1 | 11 | 20 |
| AG3 | champs de culture | SPE | 20 | 4 | 35 | 20 |
| AG4 | champs de culture | SPE | 27 | 1 | 6 | 10 |
| AG5 | champs de culture | SPE | 34 | 1 | 8 | 20 |
| REF1 | Forêt | SBF | 0 | ---- | 6 | 10 |
| REF2 | Forêt | SBF | 0 | ---- | 6 | 10 |
| BAR1 | Barrage | SPE | ---- | ---- | 1 | ---- |

SBF: sols brun fersialitiques, SBV: sols brun vertiques, SPE: sols peu évolués

Tableau 2. Taux d'érosion dans les sites étudiés

| Site | Unité homogène | Superficie (ha) | Pourcentage (%) | Erosion (t/ha/an) | Pourcentage (%) |
|--|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| FOR1 | F,SBF,>30% | 121 | 1,6 | 1,6 | 0,2 |
| FOR2 | F,SBF,15-30% | 146 | 2,0 | 0,8 | 0,1 |
| MAT1 | M,SPE,>30% | 472 | 6,3 | 2,4 | 1,0 |
| MAT2 | M,SBV,15-30% | 23 | 0,3 | 4,5 | 0,1 |
| AG1/AG2 | A,SBV,5-15% | 654 | 8,8 | 27,4 | 15,4 |
| AG3 | A,SPE,15-30% | 1 723 | 23,1 | 18,5 | 27,4 |
| AG4 | A,SBV,15-30% | 382 | 5,1 | 22,5 | 7,4 |
| AG5 | A,SPE,>30% | 1 564 | 21,0 | 36,1 | 48,5 |
| Total | | 5 085 | 68,2 | ---- | 100 |
| L'érosion (t/ha/an) sur 68% du bassin versant : | | | | 23 (t/ha/an) | |

A: champs de culture, F: forêt, M: matorral, SPE: sols peu évolués, SBF: sols brun fersialitiques, SBV: sols brun vertiques.

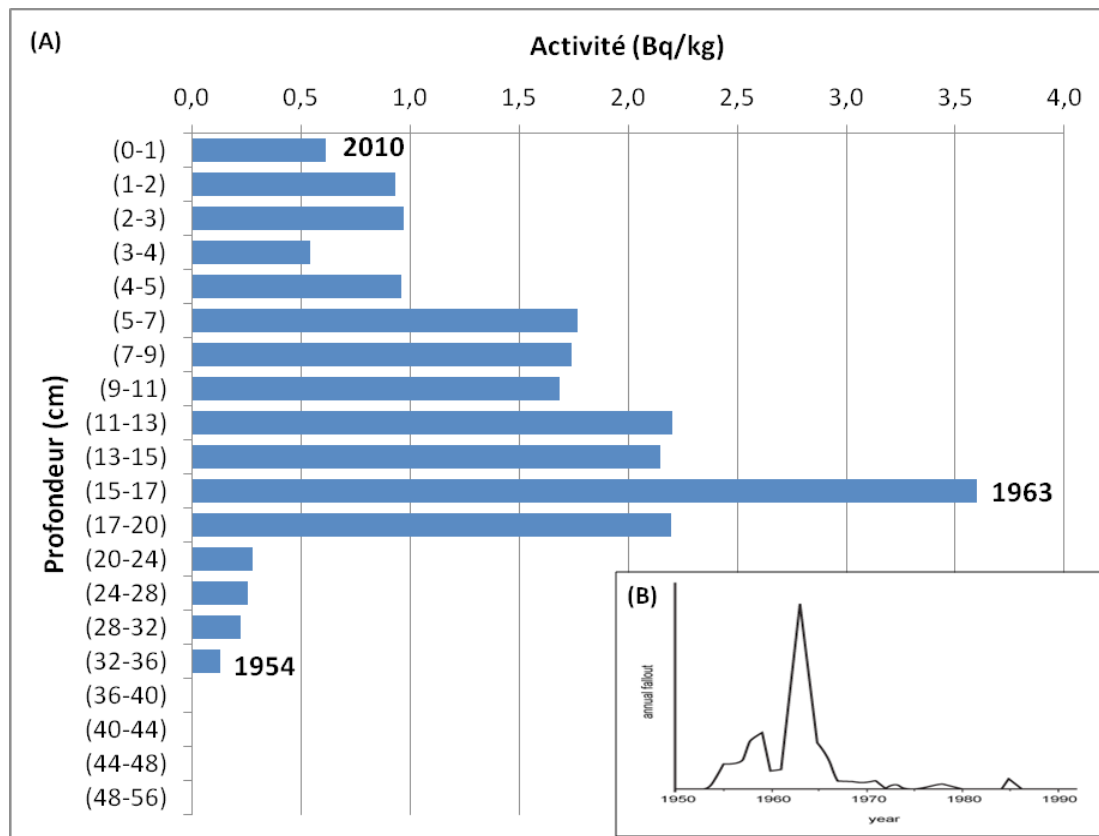


Fig.5: (A) : Variation de la concentration du ^{137}Cs en profondeur dans la carotte sédimentaire du barrage « Ali Thlet », Rif occidental, Maroc. (B) : Retombées annuelles de ^{137}Cs dans l'hémisphère Nord (Sutherland et De Jong, 1990).

Taux d'érosion

Les résultats obtenus montrent le rôle important de la végétation dans la protection des terres contre l'érosion hydrique. En effet, la grande partie du bassin versant, constituée des terrains de culture (78%), est touchée par une érosion accrue variant de 18,5 à 36,1 (t/ha/an). Tandis que l'espace occupé par le matorral et les forêts (22% du bassin versant), qui procurent une protection importante au sol, présente un taux d'érosion faible de 2,4 à 4,5 (t/ha/an) dans le matorral et un taux très faibles de 0,8 à 1,6 (t/ha/an) sous forêt (tableau 2).

Pour l'ensemble des unités échantillonnées qui représentent 68% de l'ensemble du bassin versant, l'érosion globale calculée par pondération des surfaces de production de chaque unité de même sensibilité à l'érosion est estimée à 23 (t/ha/an). Néanmoins, les terrains de culture qui occupent une grande superficie du bassin constituent la source prépondérante des sols érodés avec 98 % de sédiments déplacés.

Il est à signaler que ces taux d'érosion correspondent à une moyenne sur une période de 47 ans c'est-à-dire depuis les dernières retombées du ^{137}Cs (1963) jusqu'à la date de l'analyse, ce qui permet d'intégrer les variations climatiques annuelles et interannuelles. En revanche, ils ne prennent pas en compte le calendrier cultural et les changements d'utilisation des sols, d'où l'intérêt de l'utilisation du radio-isotope ^7Be , qui offre des opportunités complémentaires au ^{137}Cs , en permettant le suivi à

court terme du déplacement du sol et ainsi de définir les cultures les moins dégradantes et les techniques de conservation du sol à mettre en place dans les zones d'intervention prioritaire (Schuller et al., 2006).

Taux de sédimentation dans la retenue du barrage

L'analyse de la figure 5 montre que les premières concentrations de ^{137}Cs apparaissent sur le profil à une profondeur de 32-36 cm, ce qui correspond aux premières retombées atmosphériques du ^{137}Cs , découlant des essais d'armes nucléaires survenus durant les années 1950-1954, bien qu'une migration a pu se faire du haut vers le bas de la colonne du sédiment. Le pic observé à 15-17 cm de profondeur peut être attribué au maximum des retombées enregistrées en 1963. La vitesse de sédimentation a été estimée à environ 0,34 (cm/an). Ainsi, le taux de sédimentation moyen dans le réservoir d'eau « Ali Thlet » est d'environ 50 (t/ha/an).

Ce taux de sédimentation de 50 (t/ha/an) est relativement élevé comparé à l'érosion moyenne 23 (t/ha/an) enregistrée sur les versants. Cela ne peut s'expliquer uniquement par les sédiments issus des terrains de cultures, mais ils proviennent également, et en grande partie, d'autres formes d'érosions qui attaquent le réseau hydrographique (érosion concentrée, glissement de terrain, sapement des berges) et aussi des apports de sédiments d'un autre bassin sous-jacent qui déverse dans la même retenue d'eau.

CONCLUSIONS

Les résultats présentés ci-dessus indiquent que les mesures du césium ^{137}Cs dans le bassin Moulay bouchta fournissent une idée sur l'importance de l'érosion des sols sur les champs cultivés qui constituent la source dominante des sédiments arrachés et qui contribuent à côté d'autres formes d'érosion à l'envasement de la retenue d'eau en aval du bassin. Ainsi, on souligne le potentiel de l'utilisation du ^{137}Cs comme un traceur de sédiments pour la quantification à moyen terme de l'érosion et de la sédimentation à l'échelle des bassins.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), à Vienne, qui a financé en partie cette étude (Contrat de Recherche N° 15552), dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée intitulé : « Integrated Isotopic Approaches for an Area-wide Precision Conservation to Control the Impacts of Agricultural Practices on Land Degradation and Soil Erosion » - CRP D1.20.11 -

RÉFÉRENCES

- Benjelloun H. (1993) Soil genesis, classification and nitrogen cycling in forest ecosystem of northwestern Rif, Morocco. Ph. D Thesis, Oregon State University, USA, 249 pp.
- Benmansour, M., Ibn Majah, M., Marah, H., Marfak, T. and Walling, D.E. (2000) Use of the ^{137}Cs technique in soil erosion in Morocco - Case study of the Zitouna basin in the north. Proceeding of an international Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrients, Water and Soil management. IAEA/FAO, p.308-315.
- Bouhlassa, S., Moukhchane, M. and Aiachi, A. (2000) Estimate of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using ^{137}Cs technique and calibration models. Acta Geologica Hispanica, n 35 (3/4), p. 239-249.
- Mandimou S. (2002) Modélisation et cartographie de l'érosion hydrique en vue de l'aménagement intégré du bassin Versant de Moulay Bouchta (Rif occidental). Mémoire de 3^{ème} cycle, ENFI, 105 pp.
- Nouira, A., Sayouty, E.H. and Benmansour, M. (2003) Use of ^{137}Cs technique for soil erosion study at (Casablanca region) agricultural land in Morocco. Journal of Environmental Radioactivity, n 68, p. 11-26.
- Rkiouak S. et Pulido-bosch A. (1997) Potentialités hydrogéologiques d'une plaine littorale marocaine (Oued Laou, Tétouan-Chefchaouen). Journal des Sciences Hydrologiques, 42(1), p. 101-117.
- Schuller, P., Iroumé, A., Walling, D.E., Mancilla, H.B., Castillo, A. and Trumper, R.E. (2006) Use of beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations. Journal of Environmental Quality, 35 (5), p. 1756-1763.
- Walling, D. E. and He, Q. (1997) Models for converting ^{137}Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils (including

software for model implementation). Report to IAEA, University of Exeter, UK, p. 315-341.

Walling, D.E. and Quine, T.A. (1993) Use of caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the caesium-137 technique. U.K Overseas Development Administration Research Scheme R4579, Department of Geography, University of Exeter, Exeter, United Kingdom, 196 pp.

Zouagui A. (2010) Application des techniques isotopiques (^{137}Cs) à l'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de My Bouchta, Rif occidental, Maroc. Mémoire de 3^{ème} cycle, ENFI. 81 pp.