

Interaction entre les activités du ^{137}Cs et la matière organique dans les sols du sous bassin versant de Bougoula en zone soudanienne du Mali

Bengaly, A.,¹ Ahamadou, B.,^{1*} Diallo, D.¹ & Bonte, P.²

¹Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA) de Katibougou, BP 06, Koulikoro, Mali

²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) Gif sur Yvette CEDEX, Orme des Merisiers, Bat 714, 91190 Saint-Aubin, France

* **Correspondance:** bocartoure2003@yahoo.fr

Résumé

Les programmes de développement rural, de gestion des ressources en eau et plus généralement de la protection de l'environnement ont besoin d'outils d'aide à la décision. Il est urgent de trouver des méthodes de diagnostic simples, fiables et peu coûteuses. La méthode du césium ^{137} (^{137}Cs) a l'avantage de permettre la quantification du bilan érosion / sédimentation. Il est admis que le ^{137}Cs peut se fixer aux particules fines du sol. Cependant l'intervention de différents constituants du sol (matière organique et argile) dans la fixation du ^{137}Cs constitue un sujet à controverses. L'activité du ^{137}Cs permet de suivre le déplacement des particules du sol en vue d'identifier les zones érodées et les zones de dépôt. C'est dans ce contexte que cette recherche a été initiée afin de préciser les interactions de la matière organique avec l'activité spécifique du ^{137}Cs . La matière organique a été déterminée par la méthode Anne à partir du taux de carbone et le ^{137}Cs par spectrométrie gamma. Les résultats montrent des variations du taux de matière organique et du ^{137}Cs . Les teneurs en matière organique et en ^{137}Cs dans les couches de surface sont très bien corrélées ($r = 0,77$). Les résultats font aussi ressortir que dans les zones de dépression où s'accumulent les particules fines, on constate une élévation des teneurs en matière organique (plus de 1%) et de l'activité du ^{137}Cs (plus de 500 Bq/m²) contrairement aux modelés situés en amont où il y a très peu de matière organique (moins de 1 %) et une faible activité de ^{137}Cs (moins de 400 Bq/m²). Cependant, on a remarqué que les micros dépressions locales sur les plateaux sont des zones très riches en matière organique et en activité de ^{137}Cs .

Mots-clés: Mali, zone soudanienne, ^{137}Cs , matière organique

Abstract

Rural development, water resources management and more generally environmental protection programs need decision support tools. There is an urgent need to find simple, reliable and inexpensive diagnostic methods. The cesium ^{137} (^{137}Cs) method has an advantage of allowing the quantification of the erosion / sedimentation balance. It is accepted that ^{137}Cs can attach to fine soil particles. However, the intervention of different soil constituents (organic matter and clay) in the fixation of ^{137}Cs is a controversial subject.

The ^{137}Cs activity enables to tracking movement of soil particles in order to identify eroded and deposition zones. It is within this context that this research was initiated in order to specify the interactions of organic matter with the ^{137}Cs specific activity. The organic matter was determined from the carbon level by the Anne method and the ^{137}Cs by gamma spectrometry. Results show variations in the organic matter and ^{137}Cs rate. The organic matter and ^{137}Cs contents in the surface layers are much correlated ($r = 0.77$). In addition, results show that in depression zones where fine particles accumulate, there is an increase in the organic matter content (more than 1%) and the ^{137}Cs activity (more than 500 Bq / m²) unlike the upstream models where there is very little organic matter (less than 1%) and a low ^{137}Cs activity (less than 400 Bq / m²). However, the local micro depressions on the trays are very rich zones in organic matter and ^{137}Cs activity.

Mots-clés: Mali, Sudanian zone, ^{137}Cs , organic matter

Introduction

Quand les processus d'érosion sont influencés par les activités humaines (déboisement, gestion déséquilibrée de la fertilité des sols, surpâturage, etc.), l'érosion constitue un frein à la production rurale dans nombreuses régions du globe et un problème majeur de l'environnement planétaire. Le caractère angoissant de ce fléau apparaît fréquemment dans les statistiques des organismes des Nations Unies et dans les études des chercheurs : par exemple selon les estimations d'une étude réalisée en 1995 par Lal R., les diminutions de rendements liées à l'érosion antérieure seraient, en moyenne de 8,2% pour le continent africain, et de 6,2% pour l'Afrique subsaharienne. Si l'érosion accélérée se poursuit sans frein, d'ici 2020 les diminutions de rendement seraient de 16,5% pour tout le continent et de 14,5% pour l'Afrique subsaharienne. Les indications relevées dans cinq pays de l'Asie du Sud-Est et trois pays du Moyen Orient signalent une chute de la productivité de plus de 20% du fait de la dégradation des sols. Cependant, la dégradation des terres par l'érosion est inquiétante au Mali et dans le reste de la zone soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest sur les productions agricoles (par exemple les céréales le coton, etc...), l'utilisation domestique des ressources en eau, la navigabilité sur les cours d'eau.

Au Mali, les études sur l'érosion ont beaucoup porté sur l'analyse globale à l'échelle terroir villageois (Bah, 1992), le flux solide des cours d'eau et la dégradation spécifique (4 à 47 t.km-2.an⁻¹) à l'échelle petits bassins versants (Droux, 1999), la quantification de l'érosion hydrique en fonction des types de sol, de leur occupation et des pratiques culturales (Diallo, 2000) sur parcelle de 100 m, varie de 1,2 à 3,9 t.ha⁻¹.an⁻¹ sous jachère et augmente sur parcelle labourée (environ 19 t.ha⁻¹.an⁻¹) et le travail minimum du sol permet de maintenir l'érosion à un niveau plus faible (5,8 à 7,4 t.ha⁻¹.an⁻¹).

De façon générale, les recherches sur l'érosion des sols en Afrique de l'Ouest ont mis l'accent sur les études à l'échelle parcelle en vue d'une meilleure gestion des agrosystèmes. Elles n'ont pas suffisamment insisté sur l'origine des sédiments qui est pourtant d'une grande importance dans la compréhension du fonctionnement d'un bassin versant et le développement d'outils

d'aide à la décision pour la gestion environnementale et en particulier la GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau). Dans cette perspective l'utilisation des radio-isotopes environnementaux s'avère une démarche intéressante (Walling et Quine, 1991; Appleby et Olfield, 1992; Bonté, 1999; Bonté, 2000; Bouhlassa *et al.*, 2000; Diarra *et al.*, 2002). Il est déjà établi que ces méthodes sont utilisables dans le contexte malien (Bonté 2000; Diarra *et al.* 2002). En effet, il ne s'agit plus seulement de quantifier l'érosion mais aussi de connaître l'origine, le devenir des sédiments et les interactions des particules du sol (argile et matière organique) avec les activités des radio isotopes.

Le ^{137}Cs retombé au sol avec les précipitations est rapidement et très fortement adsorbé sur les particules de sol. Sa mobilité est donc très limitée et son exportation par les cultures est négligeable. Sauf dans le cas de bioturbations importantes dans le sol, le ^{137}Cs est très peu mobile ou n'est pas mobile (Bonté, 1996).

De par ses propriétés, la distribution spatiale du ^{137}Cs dans l'environnement reflète les mouvements des particules du sol, et apparaît donc particulièrement adaptée à cette étude portant sur son interaction avec la matière organique du sol.

Materiel Et Methode

Présentation du site d'étude.

La présente étude a été conduite au Mali, la zone soudanienne est comprise entre les isohyètes 700 et 1 300 mm. L'année est répartie entre une période pluvieuse (fin mai à octobre) et une période sèche (novembre à mai). Le régime pluviométrique est de type unimodal. La zone est caractérisée par une agriculture extensive grâce à la forte anthropisation. De ce fait, les sols sont dégradés suite à l'érosion. Le sous bassin versant (Figure 1) retenu pour cette étude est situé dans la région écologique de Bougouni et dans l'agroécosystème de Bélékoni au Mali avec une superficie de 11.63 km² et une position géographique de 11°16.802 N ; 7°05.131 W.

Matériel

Césium 137. Le césium est le 55e élément de la classification périodique de Mendeleïev. Sa configuration électronique le dote d'une grande réactivité potentielle. Sa masse atomique est variable de 125 à 145. Seul l'isotope stable ^{133}Cs existe dans la nature. Le ^{137}Cs est l'un de ses isotopes les plus courants. Il provient de la fission de l'uranium 235, de l'uranium 238 et autres matières fissibles (Bernard *et al.*, 1998). Le ^{137}Cs instable se désintègre en ^{137}mBa , d'une période de 2,57 minutes. Celui-ci produit du ^{137}Ba stable avec émission d'un rayon gamma d'une énergie de 661.66 keV ; c'est ce rayonnement qui permet d'identifier et de quantifier le ^{137}Cs . Cette émission gamma le rend facile d'utilisation et permet des mesures précises sur l'échantillon brut de sol.

Matière organique. La matière organique constituée de débris végétaux et animaux, contribue à la structuration du sol. Dans les sols tropicaux, elle se trouve dans des pourcentages massiques faibles variant de 1 à 5 %. Malgré cette quantité minime, elle est très importante dans le fonctionnement de l'écosystème. Pour les microorganismes saprophytes, elle constitue le substrat. La capacité d'échange cationique de la matière

organique très élevée fait qu'elle a une forte influence sur la capacité à retenir les éléments chimiques dans le sol.

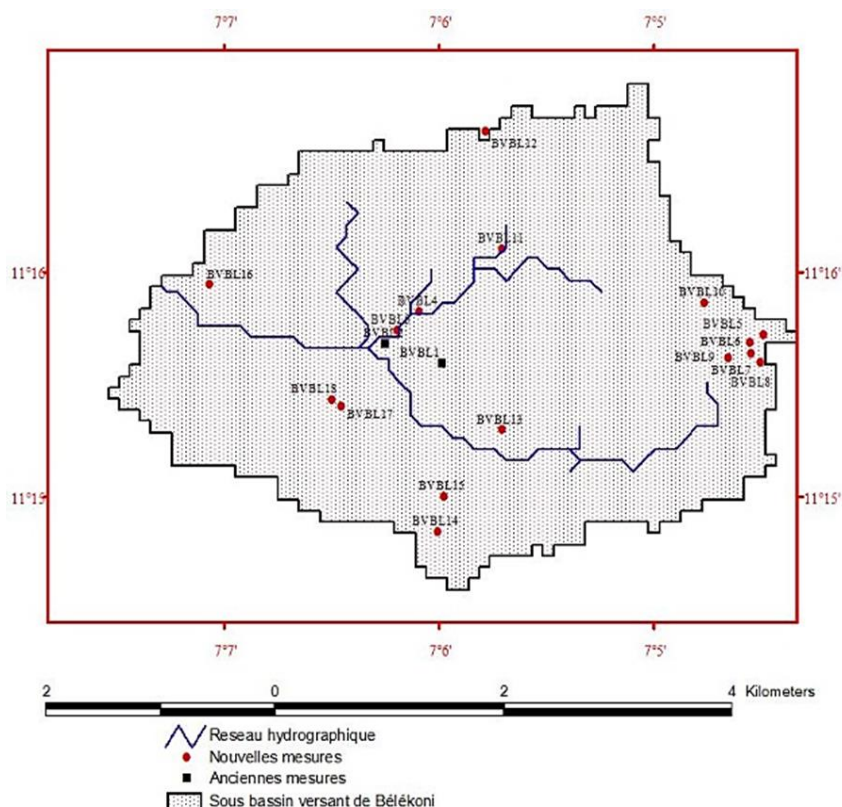


Figure 1. Sous bassin versant de Bougoula et les sites d'étude

Méthode

Origine du césium

Il n'y a pas de source naturelle de ^{137}Cs et son origine est connue : il provient exclusivement d'essais des bombes thermonucléaires dans l'atmosphère (Ritchie et Mac Henry, 1990). La première introduction du ^{137}Cs dans l'atmosphère date du 16 juillet 1945 lors du premier essai nucléaire dans le désert du nouveau Mexique, près d'Alamogordo. Durant les trente années qui ont suivi, environ 800 essais atmosphériques annoncés ont été conduits par les Etats Unis, l'URSS, le Royaume Unis, la France, la République de Chine, et l'Inde. Les retombées des isotopes ne sont devenues significatives à l'échelle globale, qu'à partir de 1952, date à partir de laquelle les bombes deviennent thermonucléaires (Figure 16). Dès lors, les engins utilisés au cours de ces tests sont suffisamment puissants pour propulser les débris radioactifs dont le césium, jusque dans la stratosphère (Bonté, 1992). Ils s'y sont homogénéisés pour ne retomber que graduellement au sol avec les précipitations, sur l'ensemble de la surface terrestre. Le maximum de retombées a été enregistré en 1963. Selon Playford *et al.*, 1990 l'hémisphère nord a reçu plus de retombées puisque la plupart des essais nucléaires atmosphériques y ont eu lieu (Figure 2).

Les retombées radioactives ont ensuite fortement diminué suite au traité d'interdiction des essais atmosphériques de 1963. A l'échelle régionale, l'importance des retombées sur un territoire est proportionnelle aux précipitations totales annuelles.

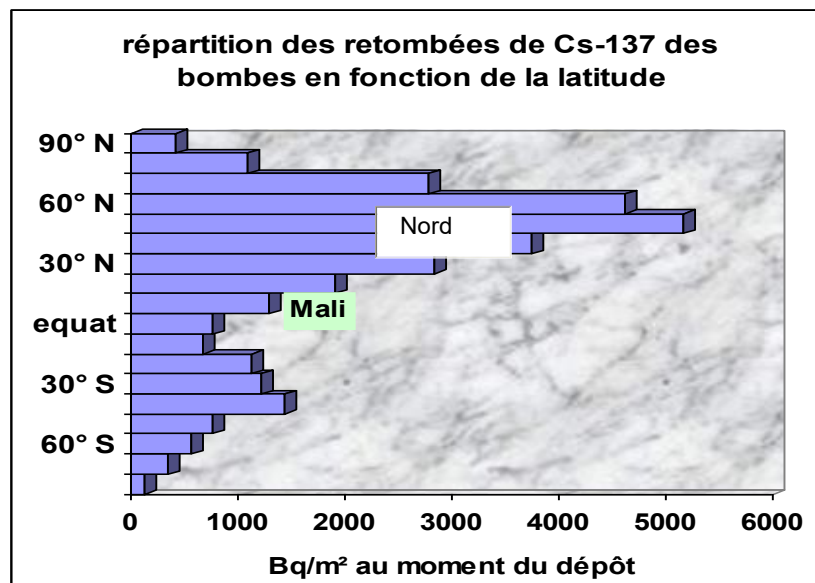


Figure 2. Répartition des retombées de ^{137}Cs des bombes

En raison des faibles échanges entre l'hémisphère nord, lieu de la majorité des essais de bombes nucléaires, et l'hémisphère sud, les retombées dans l'hémisphère sud ont été beaucoup plus faibles.

D'autre part, les échanges entre la stratosphère et la troposphère sont maximum pour les moyennes latitudes (entre 30 et 65° N ou S) et minimum aux basses latitudes (aux environs de l'équateur). Ainsi, les retombées dans ces régions où se situe le Mali (hémisphère nord mais basse latitude) sont beaucoup moins importantes que celles sur la latitude moyenne dans l'hémisphère nord.

Critères de choix

Les critères de choix du ^{137}Cs sont : la période radioactive, le type de rayonnement, l'affinité de l'élément vis à vis des particules de sol et son devenir dans le sol. La grande affinité du ^{137}Cs est illustrée par sa forte adsorption par les particules du sol et leur faible désorption. Ainsi, on peut suivre les particules dans leur mouvement et obtenir des informations sur leur provenance et les processus en jeu lors des épisodes radioactifs (Wallbrink et Murray, 1993). Les caractéristiques propres à chaque isotope radioactif, dans le sol, sont son profil de pénétration (souvent en relation avec sa période et son affinité vis à vis des particules), son mode d'entrée (intrinsèque ou atmosphérique). La période radioactive permet d'intégrer une dimension temporelle aux études de dynamique des particules. Le césium ^{137} , émetteur gamma, a une période radioactive suffisamment longue pour être détectés entre la phase d'échantillonnage et celle de mesure. Cette période est longue (750 jours) par rapport à

l'échelle de temps de l'étude (Bonté, 2000). Enfin, en ce qui concerne le type de rayonnement, les émetteurs gamma (rayonnement le plus pénétrant) sont préférés aux émetteurs alpha et bêta pour leur facilité de détection et d'analyse ((Baskaran *et al.*, 1993).

Prélèvement des échantillons. Le carottier Eijkelkamp a été utilisé pour les prélèvements d'échantillons de sol. Il est composé d'un moteur à marteau pilon qui frappe sur la tête du carottier dont l'extrémité inférieure est terminée par l'ogive. L'ogive entraîne le carottier en profondeur sous la force de frappe du marteau pilon. Un levier permet de faire ressortir le carottier. Après chaque extraction le carottier est couché sur le sol, il est ouvert, ce qui permet de faire immédiatement une description de la carotte, de la photographier et de la sectionner en tronçon d'échantillons à l'aide d'un couteau. Chaque tronçon est clairement identifié dans un sac plastique, et, tous les tronçons d'une même carotte sont ensuite regroupés dans un sac. Le carottier a permis d'obtenir des carottes de 20 à 80 cm de longueur dans un tube qui autorise un repérage des différents horizons.

Conditionnement et analyse gamma des échantillons. L'intégralité des échantillons prélevés a été bien conservée. Dans l'estimation du bilan de ^{137}Cs , il est en effet très important de connaître précisément le poids de sol prélevé par unité de surface. Le type de carottier utilisé permet de s'assurer que la surface prélevée est toujours la même (diamètre intérieur : 90 mm, soit une section de 63.6 cm²), un grand soin est donc pris pour ne pas perdre de terre entre le prélèvement et la pesée au laboratoire.

Au laboratoire, les échantillons ont été séchés à l'air libre, puis pesés et tamisés à 2 mm. Une partie (environ 100 g par échantillon) de cette fraction inférieure à 2 mm a été amenée en France au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement pour la détermination de l'activité spécifique en ^{137}Cs . Après le traitement au laboratoire, les échantillons sont transférés dans des boîtes de comptage, les isotopes radioactifs sont détectés par spectrométrie gamma, technique de mesure directe sans préparation chimique.

L'estimation de l'activité en ^{137}Cs (passage du nombre de photons à l'activité en Bq.kg⁻¹) se fait à partir d'un étalonnage du rendement de la chaîne de comptage par comparaison avec un sol standard dont on connaît parfaitement l'activité en ^{137}Cs . Plusieurs sols standards sont utilisés pour vérification, mais le standard de référence choisi pour le rendement en ^{137}Cs est AIEA-375.

Le pourcentage de perte de ^{137}Cs , A, est calculé par comparaison du bilan de ^{137}Cs par unité de surface à une valeur de référence, correspondant au bilan de ^{137}Cs qu'on devrait avoir en l'absence de tout mouvement de sol (ni gain, ni perte). Le bilan de ^{137}Cs étant obtenu à partir de l'activité spécifique et du poids de chaque sous-échantillon.

$$\text{Bilan de } ^{137}\text{Cs} = (A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) / S = \text{Bq} / \text{m}^2$$

$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$ = Somme des produits de l'activité spécifique de ^{137}Cs par le poids du tronçon d'échantillon de sol.

S = surface de la carotte

Détermination de la matière organique: Le taux de la matière organique est obtenu à partir

de la teneur en carbone avec la méthode Anne au laboratoire d'Agropédologie de l'IPR/IFRA de Katibougou.

Matière organique en % = $1.724 \times \%C$

Tendance du ^{137}Cs et la matière organique. L'activité spécifique du ^{137}Cs obtenue est comparée avec le taux de matière organique. A l'aide du logiciel Excel, la corrélation est définie.

Resultats et Discussions

Tableau 1. Matière organique et ^{137}Cs des sols peu épais sur cuirasse

N	Sites	Matière organique %	^{137}Cs Bq/m
1	BVBL1	1,60	1088,34
2	BVBL14	0,48	296,00
3	BVBL5	1,75	2602,00
4	BVE3	0,82	495,00
5	BVE4	1,11	572,00

D'après les résultats au tableau 1, on enregistre les mêmes dynamiques envers les taux de matière organique et les activités du ^{137}Cs . Une perte ou gain en quantité de matière organique correspond aussi à une perte ou gain en activité de ^{137}Cs . Sur ces sites les gains peuvent s'expliquer par l'existence de micro dépressions sur le plateau cuirassé. Dans le cas du site 1, l'accumulation de matière organique semble résulter de l'érosion aratoire. Par contre sur le site 3, localisé dans une jachère d'environ 40 ans, l'accumulation de matière nettement importante peut s'expliquer par la morphodynamique naturelle caractérisant le plateau cuirassé : il s'agit d'une dépression locale d'environ 100 m de diamètre qui reçoit les eaux de ruissellement et leur charge solide des surfaces voisines à l'intérieur même du modelé cuirassé. Nous pouvons considérer que les constats faits aux sites 1 et 3 sont caractéristiques des plateaux cuirassés (leur organisation microtopographique en particulier) mais ne reflètent pas les situations générales de ces modelés.

Tableau 2. Matière organique et ^{137}Cs des sols épais sur Long glacis

N	Sites	Matière organique %	^{137}Cs Bq/m
1	BVE6	0,68	371,00
2	BVBL9	1,03	307,00
3	BVBL10	1,03	406,00
4	BVBL12	0,3	423,00
5	BVBL18	0,6	506,00
6	BVBL15	0,24	159,00
7	BVBL17	0,3	351,00
8	BVE2	0,9	829,00
9	BVBL6	1,2	428,00
10	BVBL8	1,00	660,00
11	BVE5	0,90	303,00

Les teneurs en matière organique et les activités du ^{137}Cs des sites étudiés sur glaciais d'épandage (Tableau 2) montrent en très grande partie les mêmes tendances comme aux sols peu épais sur cuirasse. Nous remarquons que sur chacun des sites, la diminution ou l'augmentation du taux de matière organique correspond aussi à une perte ou à un gain des activités du ^{137}Cs . Cette dynamique érosive est assez importante et contribue considérablement à la baisse de la fertilité des sols de long glaciais qui sont les plus cultivés dans le bassin versant. Cependant, elle semble refléter l'organisation topographique du glaciais et les propriétés des sols :

- la pente longue et rectiligne du glaciais, même si elle faible (1 à 2 %), favorise le ruissellement dans le contexte de forte agressivité climatique caractérisant la zone bioclimatique soudano-sahélienne;
- la pauvreté des horizons de surface en argile et en matière organique ne favorise pas la formation d'agrégats et le maintien d'une bonne structure dans les sols de bas glaciais en zone soudanienne. Diallo et Kéita (2001) trouvent que 37% de ces horizons sont complètement déstructurés, 24 % sont instables, 24 % sont à faible risque de déstructuration et seulement 15% sont stables. Il s'en suit un risque élevé d'érosion.

Dans les dépressions du sous bassin versant (Tableau 3); on note que 2 sites (BVL11 et BVBL7) se distinguent nettement des autres par les tendances. Cette dynamique est compréhensive puisque le site BVBL7 perçoit différents apports de fumure organique par les producteurs qui semble améliorer le taux de matière organique malgré que la zone a subi avant une érosion. La tendance contraire s'est produite en BVBL11 qui est une dépression où la matière organique semble être diluée par lessivage. Les autres sites sont favorables à l'accumulation des particules et pour l'ensemble du modelé, on a une perte ou un gain de matière organique correspond à la même tendance en activité de ^{137}Cs .

Les sites en perte de matière organique ou de ^{137}Cs semblent correspondre à des points de dépression où l'inondation actuelle est de faible épaisseur et particulièrement aléatoire. Le labour de ces sites favorise un départ massif de particules en début de saison qui n'est pas compensé par une inondation relativement prolongée.

Les sites en gain sont représentatifs de la dynamique générale des dépressions du bassin versant. Leur localisation au bas de la toposéquence favorise l'accumulation des matériaux arrachés en amont sur les glaciais cuirassés et les longs glaciais.

Tableau 3. Matière organique et ^{137}Cs des sols épais de Dépression

N	Sites	Matière organique %	^{137}Cs Bq/m
1	BVBL2	1,51	2228,57
2	BVBL11	1,12	1840
3	BVBL13	0,84	2052,00
4	BVE1	0,70	726,00
5	BVBL3	0,94	1310,00
6	BVBL4	0,86	912,00
7	BVBL7	1,14	41,61

Conclusion

Les teneurs en matière organique et en ^{137}Cs dans les couches de surface sont très bien corrélées ($r^2=0,77$) comme le montre la Figure 3. Ce résultat ne contredit pas celui de Mabit *et al.*, 2007. Ces résultats confirment les idées de Squire (1966), Baes *et al.* (1999).

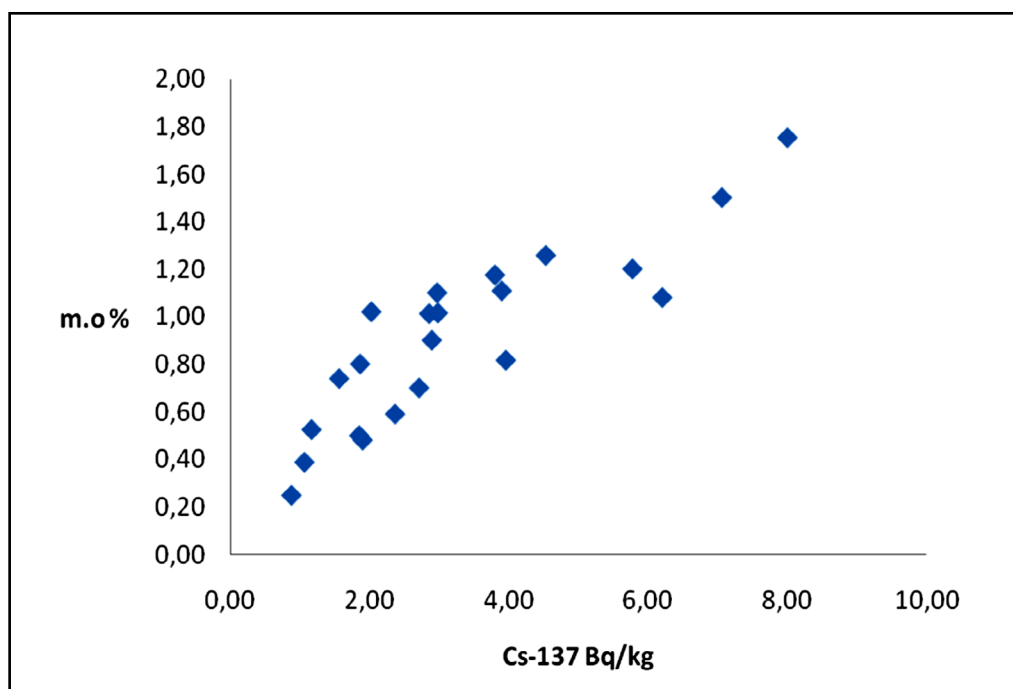


Figure 3. Relation entre matière organique et ^{137}Cs dans la couche superficielle (0-20 cm)

Les teneurs en CEC et en ^{137}Cs dans les horizons de surfaces sont très bien corrélées ($r = 0,77$) comme le montre la Figure 3. Dans cette étude, on note une plus forte activité du ^{137}Cs dans les dépressions où elle peut atteindre 7 Bq/kg (plus de 2000 Bq/m²). Ces points montrent aussi les plus fortes valeurs de matière organique (plus de 1,5 %). Par contre on observe une faible teneur de ^{137}Cs dans les sols de glacis d'épandage (moins de 600 Bq/m²) qui présentent aussi de faibles valeurs de matière organique (moins de 1%). Cela n'est pas surprenant puisque les dépressions sont des lieux de réception et d'accumulation de sédiments fins, à l'opposé des glacis d'épandage qui perdent énormément la matière organique par ruissellement et à l'érosion en nappe.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout le personnel du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) à Gif sur Yvette en France pour les analyses, la Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali pour le carottier et les populations de Bougoula pour leur disponibilité et leur soutien. This paper is a contribution to the 2018 Sixth African Higher Education Week and RUFORUM Biennial Conference.

References

- Appleby, P.G. and Olfield, F. 1992. Application of lead-210 to sedimentation studies. pp. 731-778. In: Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences. Ivanovich, R.S. (Ed.), Clarendon Press, Oxford.
- Baeza, A., Del Rio, M., Jimenez, A., Miro, C. et Paniagua, J. 1995. Relative sorption of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soil: influence of particle size, organic matter content and pH. *Radiochimica Acta* 68: 135-140.
- Bah, A.S. 1992. Les problèmes d'érosion hydrique et les stratégies de mise en valeur des sols au Mali sud : étude du cas d'une zone libérée d'onchocercose, le terroir de Fonsébougou. Thèse, Université de Bordeaux III en géographie des espaces tropicaux. 637 pp.
- Baskaran, M., Coleman, C.H. et Santschi, P.H. 1993. Atmospheric depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb at Galveston and College Station, Texas. *Journal of Geophysical Research* 98: 20555-20571.
- Bernard, C., Mabit, L., Wicherek, S. et Laverdière, M.R. 1998. Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from caesium-137 data. *Journal of Environmental Quality* 27: 1178-1183.
- Bonté, P. 1992. Les retombées de la radioactivité anthropique comme outil de l'étude de l'environnement terrestre. Rapport de fin de contrat du Secrétariat Général de la Défense National, SGDN/STS/VST/3 26: 79.
- Bonté, P. 1996. Radioactivité et Science de la Terre, Clefs C.E.A. 34: 56-62.
- Bonté, P. 1999. Evaluation radio-isotopique de l'érosion et du transport sédimentaire en zones soudano-sahéliennes au Mali. Rapport de mission AIEA. Référence n ER44.
- Bonté, P. 2000. Evaluation radio-isotopique de l'érosion et du transport sédimentaire en zones soudano-sahéliennes au Mali. Collection « Etudes et Rapports Gihrex », Fond documentaire IRD, 32 av. Henri Varagnat, France : 26p + annexes.
- Bouhlassa, S., Moukhchane, M. and Aichi, A. 2000. Estimates of soil erosion of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica* 35 (3): 239-249.
- Diallo, D. et Kéita, D. 2001. Etude de l'état structural de l'horizon superficiel du sol de bas glacié de la zone de savane du Sud du Mali. *Revue Malienne de Sciences et de Technologie* 5: 4-16.
- Diarra, S., Orange, D. et Bonté, P. 2002. Fonctionnement hydrosédimentologique du lac Débo : le rôle du bourgou. pp. 315-328. In: Orange, D., Arfi, R., Kuper, M., Morand, P. et Poncet, Y. (Eds.). Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales. Colloques et séminaires, Ed IRD, Paris.
- Droux, J.P. 1999. Hydrologie et flux de matières solidesparticulaires et dissoutes sur petits bassins versants du bassin du fleuve Niger au Mali (bassins versants du Doufing, de Djitiko et de Bélékoni). Thèse, Université Louis Pasteur-Strasbourg 304pp.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. In: Lal, A., Kimble, J., Levine, E. and Stewart, B. A. (Eds.), Soil Management and Greenhouse Effect. Advances in Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Mabit, L., Bernard, C. et Laverdière, M.R. 2007. Etude 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.

- Maes, E., Iserentant, A., Herbauts, J. et Delvaux, B. 1999. Influence of the nature of clay minerals on the fixation of radiocaesium traces in an acid brown earth-podzol weathering sequence. *European Journal of Soil Science* 50: 117-125.
- Playford, P.A., Lewis, G.N.J. et Carpenter, R.C. 1990. Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1990, Rapport du Department of Environment, D.O.E./R.A.S./92.015, 27pp.
- Ritchie, J.C. and Mc Henry, J.R. 1990. Application of Radioactive Fallout Caesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns : A review. *Jour. Environ. Qual.* 19 : 215-233.
- Squire, H. 1966. Behaviour of ^{137}Cs in soil and pastures: a long term experiment. *Radiation Botany* 6: 413-423.
- Wallbrink, P.J. et Murray, A.S. 1993. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes. *Hydrological Processes* 7: 297-304.
- Walling, D.E. et Quine, T.A. 1991. Use of ^{137}Cs measurements- to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *Journal of Soil Science* 42: 147-165.