

Étude, à travers deux cas, des risques d'ensablement des réservoirs hydroélectriques des hautes terres de Madagascar, par l'utilisation des radio-isotopes ^{210}Pb et le ^{137}Cs

Heritiana N. RAVOSON^{1*}, Martin RASOLONIRINA¹, Asivelo F. SOLONJARA¹, Naivo RABESIRANANA¹, RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA¹ et Vololontsoa I. ANDRIAMIHANGOARISOA²

¹ Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN - Madagascar),
BP 4279 Antananarivo, 101, Madagascar

² Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA), Madagascar

* Correspondance, courriel : tinah_ravoson@yahoo.fr

Résumé

L'énergie hydroélectrique est la source d'énergie renouvelable la plus exploitée à Madagascar. En 2011, elle a assuré 54 % de la production d'énergie électrique du pays. Cette richesse énergétique est menacée par le changement climatique et la dégradation de l'environnement. L'ensablement est l'un des risques majeurs. Ainsi, en concertation avec l'équipe de la JIRAMA, deux barrages des hautes terres de Madagascar ont été étudiés : Mandraka et Antelomita. La technique utilise les radio-isotopes de l'environnement (^{210}Pb et le ^{137}Cs) associés aux processus de sédimentation dans les deux réservoirs de barrages. Les deux radio-isotopes permettent de tracer la géochronologie rétrospective des couches de sédiment déposé, de moyen-terme (~50 ans) pour le ^{137}Cs au long-terme (~150 ans) pour le ^{210}Pb . Le prélèvement a été fait en 2012. Pour chaque site, deux carottes de sédiment ont été prélevées. Pour déterminer les pics gamma de basse énergie du ^{210}Pb (à 46,5 keV) et du ^{137}Cs (à 661,6 keV), un spectromètre gamma de type N, de marque ORTEC a été utilisé. Le temps de comptage de chaque échantillon a été fixé à 24 heures. Les mesures ont été réalisées à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar).

En plus, des analyses granulométriques et des matières organiques ont été effectuées au Laboratoire du département URED / DASTE, Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN-Maroc). Dans cette étude, nous avons choisi le modèle à flux constant et à sédimentation constante (CF-CS : Constant Flux, Constant Sedimentation) pour déterminer la chronologie correspondante. Au cas où il y a une discontinuité sur la courbe de décroissance, le profil est divisé en deux parties, et le modèle CF-CS est appliqué séparément sur les parties supérieure et inférieure pour obtenir la chronologie correspondante. Les résultats sont alors validés par la position du pic du ^{137}Cs dans les carottes. En moyenne, 0,70 cm.a⁻¹ de sédiments est déposés dans le réservoir de Mandraka, contre 0,90 cm.a⁻¹ pour celui d'Antelomita. Vue les résultats obtenus, le réservoir hydroélectrique d'Antelomita nécessite un suivi de près par rapport à celui de Mandraka. Si on veut pérenniser ces infrastructures, il faudrait maintenir et protéger la végétation du bassin versant pour Mandraka. Tandis que, le cas d'Antelomita nécessite des mesures de protection en limitant le flux de migration dans le bassin versant, ou en améliorant la gestion des terres par des méthodes conservatrices.

Mots-clés : ^{210}Pb , ^{137}Cs , sédimentation, barrage, Antelomita, Mandraka.

Abstract**Silting risk assessment of two Madagascar highland hydroelectric reservoirs, using ^{210}Pb and ^{137}Cs radioisotopes**

Hydroelectric power is the main source of renewable energy in Madagascar. In 2011, it ensures the 54 % of the country's electricity production. This energy wealth is threatened by climate change and environmental degradation. Siltation is one of the major risks. So, in concertation with the JIRAMA team, two dams in the highlands of Madagascar were selected : Mandraka and Antelomita. The technique uses environmental radioisotopes (^{210}Pb and ^{137}Cs) associated with sedimentation processes. These radioisotopes make it possible to study the retrospective geochronology of deposited sediment layers, in medium-term (-50 years) for ^{137}Cs to long-term (-150 years) for ^{210}Pb . The sampling was done in 2012. For each site, two sediment cores have been collected. In order to determine the gamma peaks of ^{210}Pb (at 46.5 keV) and ^{137}Cs (at 661.6 keV), a gamma spectrometer with ORTEC N type detector was used. The counting time was set to 24 hours. The measurements were performed at the Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). In addition, analyses of particle size and organic matter rates were performed at the Laboratory of the URED / DASTE Department, Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNSTEN-Maroc). In this study, the Constant Flux, Constant Sedimentation (CF-CS) model was applied to determine the corresponding chronology. If there is a discontinuity of decay curve in depth profile, the profile is divided into two parts, and the CF-CS model is applied separately from the top to bottom of the sediment core in order to obtain the corresponding chronology. The results are then validated by the position of the maximum ^{137}Cs peak in the cores. On average, 0.70 cm.yr^{-1} of sediment is deposited in the Mandraka reservoir, compared to 0.90 cm.yr^{-1} for Antelomita. The results show that Antelomita reservoir requires a close follow-up compared to Mandraka. For a sustainable use of those infrastructures, it would be necessary to maintain and to protect the vegetation of the catchment area for Mandraka. While for Antelomita case requires protective measures for limiting the migration flux within the watershed, or for improving land management by conservative methods.

Keywords : ^{210}Pb , ^{137}Cs , sedimentation, dam, Antelomita, Mandraka.

1. Introduction

L'énergie hydroélectrique est la source d'énergie renouvelable la plus exploitée à Madagascar. En 2011, elle a assuré 54 % de la production d'énergie électrique du pays [1]. Il existe actuellement 12 centrales hydroélectriques réparties dans la grande île. La puissance fournie est de l'ordre de 115 MW répartie sur les 3 réseaux interconnectés d'Antananarivo, de Toamasina et de Fianarantsoa [2]. Le Réseau Interconnecté RI-Tanà représente les 68 % de la consommation nationale d'électricité. Avec une puissance installée de 172 MW, 94 MW proviennent des 6 centrales hydroélectriques de Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA) et 61 MW des 3 centrales thermiques. Les deux centrales hydrauliques les plus importantes sont Andekaleka (58 MW) et Mandraka (24 MW) [3]. Cependant, 660 sites potentiels hydroélectriques sous exploités sont répertoriés dans la grande île. Théoriquement, leur capacité s'élève à 7 800 MW [4]. Cette richesse énergétique est menacée par le changement climatique et la dégradation de l'environnement. L'envasement est l'un des risques majeurs. La connaissance des taux de sédimentation permettent de considérer les moyens d'accroître la durée de vie des réservoirs [5]. De ce fait, une attention particulière mérite d'être attribuée aux moins aux sites qui sont déjà exploités par la société JIRAMA pour assurer une utilisation pérenne de ces barrages. Pour faire un suivi historique d'un processus environnemental (sédimentation, pollution, métaux lourds, pesticides, historique des couvertures du milieu, etc.), la datation radiométrique est l'une des techniques communément

utilisées. Suivant l'échelle du temps à considérer, il y a un ou plusieurs radio-isotopes utilisables. Cette méthode utilise la décroissance radioactive dans le milieu ou le système à étudier. Le ^{210}Pb et le ^{137}Cs ont été utilisés depuis plusieurs dizaines d'années pour déterminer la vitesse de sédimentation dans les rivières, lacs, estuaires ou milieux marins [6]. Ils peuvent tracer l'historique, allant de 50 ans passés pour le ^{137}Cs à 150 ans passés pour le ^{210}Pb [7]. Ce présent travail a pour objectif de tester pour la première fois la technique des radio-isotopes de l'environnement $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs dans deux potentiels barrages hydroélectriques de Madagascar. Cette technique peut déterminer le taux et la vitesse de sédimentation ainsi de comparer les effets des couvertures végétales, les climats des deux bassins versant sur les résultats obtenus. Les résultats trouvés pourraient être bénéfiques à la prise de décision selon le programme de prévention de la société.

2. Matériel et méthodes

2-1. Radio-isotope ^{210}Pb

Le ^{210}Pb est un radio-isotope purement naturel, issu de la désintégration de l'uranium-238. Dans le sédiment, les origines du radio-isotope proviennent de deux composantes différentes telles que le ^{210}Pb supporté et le ^{210}Pb en excès [8]. La première composante est intrinsèque aux particules et en équilibre séculaire avec le ^{226}Ra . Tandis que la deuxième composante provient de l'atmosphère suite à l'émanation du ^{222}Rn gazeux. Une fois déposée à la surface, le ^{210}Pb en excès se fixe rapidement et fortement aux particules fines du sol et elles ne sont pas remplacées après leur désintégration. La retombée à la surface terrestre est essentiellement à l'aide de la pluie ou de la déposition sèche (*Figure 1*).

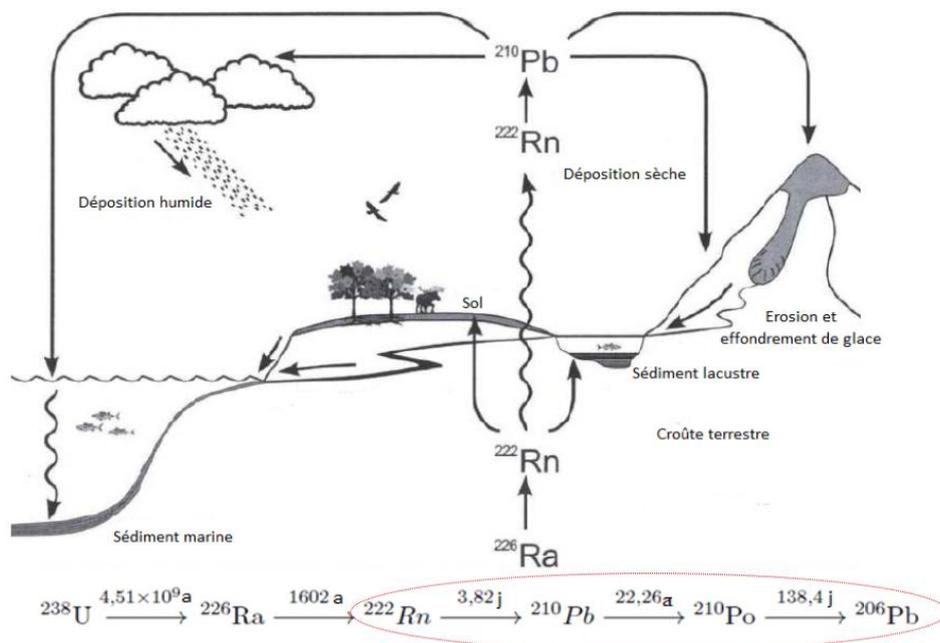


Figure 1 : Cycle global du ^{210}Pb dans l'environnement : source, transport, dépôt et redistribution [9].
(D'après N. Preiss et al.)

L'activité du ^{210}Pb en excès est donc obtenue par la différence entre l'activité du ^{210}Pb total et celle du ^{226}Ra . Elle décroît avec le temps selon la loi de décroissance radioactive. En se basant sur des modèles mathématiques qui prédisent la distribution du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en profondeur, il est possible de donner l'âge d'une couche sédimentaire et d'estimer le taux de sédimentation [10 - 12].

2-2. Modèle à flux constant et à sédimentation constante

Le ^{210}Pb a été utilisé comme outil de datation pour la première fois par Goldberg en 1963. Il a été utilisé pour la datation des glaces, des sédiments lacustres [13] et des sédiments marins [14]. A partir de la décroissance radioactive du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans la colonne de sédiment, des modèles mathématiques permettent de déterminer l'âge des couches ainsi que la vitesse de sédimentation. Le modèle à flux constant et à sédimentation constante (CF-CS : Constant Flux, Constant Sedimentation) est l'un des modèles de base parmi ceux développés durant les dernières décennies [15]. Les conditions pour son application sont : i) un taux de sédimentation constant avec un flux de déposition de ^{210}Pb constant ; ii) il n'y a pas de phénomènes de ré-suspension à l'interface eau-sédiment ; et iii) il n'y a pas de mobilisation post-déposition du ^{210}Pb ou de redistribution horizontale des sédiments [16]. A partir de la loi de décroissance radioactive, son profil logarithmique est une droite continue en fonction de la profondeur. Si m est la masse sèche cumulée du sédiment (g.cm^{-2}) au-dessus de la profondeur $x(\text{cm})$, l'âge correspondant à cette profondeur est donné par relation suivante :

$$t = \frac{m}{r} \quad (1)$$

En se basant aux hypothèses précédemment, l'activité du ^{210}Pb en excès le long du profil est donnée par la **Formule** suivante :

$$C(m) = C(0)e^{-\lambda \frac{m}{r}} \quad (2)$$

avec, $C(0) = P/r$: concentration du ^{210}Pb en excès à la surface du sédiment (Bq.g^{-1}) ; $C(m)$: concentration du ^{210}Pb en excès à la profondeur x (Bq.g^{-1}) ; λ : constante de désintégration du ^{210}Pb (0,03114 désintégration par an) ; m : masse cumulée du sédiment (g.cm^{-2}) ; r : taux d'accumulation sédimentaire ($\text{g.cm}^{-2}.a^{-1}$) ; x : profondeur (cm) ; t : âge (an) ; P : flux

L'avantage de ce modèle est : i) simple à utiliser, ii) de ne pas être sensible aux petites variations et ii) robuste pour les prévisions globales à long terme.

2-3. Validation croisée par le ^{137}Cs

Indépendamment du plomb, la chronologie obtenue peut être validée par un ou plusieurs radio-traceurs artificiels, comme le ^{137}Cs . Ce dernier est d'origine anthropique et provient des essais militaires ou des rejets des centrales nucléaires. Depuis la période des essais nucléaires, sa répartition globale est marquée par un pic d'activité maximale en 1963, année de l'application du traité sur l'interdiction des essais nucléaires atmosphériques [17]. La ponctualité de cet apport est utilisée pour faire un marquage temporel [18]. La datation au ^{137}Cs s'appuie alors sur la mise en évidence des horizons sédimentaires qui présentent des teneurs maximales en césium [19, 20].

2-4. Description des sites d'études

Parmi les centrales hydroélectriques existantes, deux sites ont été sélectionnés : Antelomita et Mandraka. Ces sont les deux sites proches de la capitale et qui contribuent d'une façon non négligeable à son alimentation électrique (**Figure 2**).



Figure 2 : Localisation des sites d'étude (Fond de carte FTM)

La centrale hydroélectrique de Mandraka est située dans une zone à relief accidenté et montagneux, avec une végétation dense. Le terrain est de granite décomposé et sain. Elle a été construite en 1954. Cette centrale est la deuxième source hydroélectrique de la JIRAMA après celle d'Andekaleka. Le réservoir du barrage est alimenté par le lac Mantasoa et des sources d'eau provenant des nappes phréatiques de son bassin versant. La centrale hydroélectrique d'Antelomita a été construite en 1913. Elle est la plus ancienne centrale de la JIRAMA et composée de deux barrages hydroélectriques : Antelomita I et Antelomita II, distants l'un et l'autre de 1500 mètres. Les deux réservoirs sont alimentés par le lac de Tsiacompaniry et d'autres sources dans son bassin versant. Le relief est vallonné et moins accidenté que celle de la Mandraka. Des diverses utilisations de terres se trouvent aux alentours de deux barrages tels que les surfaces cultivées, non cultivées, couvertes de forêt et dénudées de végétation.

2-5. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons a été fait en 2012. Pour chaque site, deux carottes de sédiment ont été prélevées. Les échantillons ont été pris en amont du barrage et des côtés opposés du réservoir (**Figure 3**). Les carottes ont été extraites à l'aide d'un percuteur motorisé, avant d'être sectionnées en tranche. Pour Mandraka, les profondeurs des carottes sont de 48 cm pour M1 et de 51 cm pour M2. Comme les sédiments sont caillouteux, les carottes ont été découpées par tranche de 4 cm. Pour Antelomita, les profondeurs des carottes sont de 47 cm pour A1, et de 60 cm pour A2. Les deux carottes ont été découpées par tranche de 2 cm [21]. Les découpages des échantillons ont été effectués sur terrain pour éviter les perturbations des carottes de sédiments pendant le transport au laboratoire [22]. Les échantillons découpés sont ensuite mis dans des sachets en plastiques bien codés et transportés au laboratoire afin de procéder aux préparations et aux analyses.



Figure 3 : Vue satellitaire des deux réservoirs hydroélectriques et les points de prélèvement

2-6. Préparation des échantillons

Les échantillons sont pesés puis séchés à l'aide d'une étuve, d'une température de 80°C. Après séchage, chaque échantillon est broyé manuellement à l'aide d'un mortier pilon. Ils sont ensuite tamisés à travers d'une maille de 2 mm, avant d'être mis dans des porte-échantillons cylindriques en polyéthylène de 100 cm³. Les porte-échantillons sont fabriqués en matériau très étanches et efficaces pour éviter la fuite du gaz de ²²²Rn. Pour atteindre l'équilibre séculaire entre le ²²⁶Ra et ses descendants, les échantillons sont fermés hermétiquement et stockés pendant au moins trois semaines avant de procéder aux analyses.

2-7. Analyse par spectrométrie gamma

Etant donné que les deux radio-traceurs sont des émetteurs gamma, leurs activités ont été déterminées par spectrométrie gamma [23]. L'équipement permet donc de mesurer les activités du ²¹⁰Pb (à 46,5 keV) et du ¹³⁷Cs (à 661,6 keV). Le ²²⁶Ra est déterminé à partir de ses descendants ²¹⁴Pb (à 295 keV et à 352 keV) et ²¹⁴Bi (à 609,3 keV) [24]. L'activité du ²¹⁰Pb_{ex} est obtenu par la soustraction des activités du ²¹⁰Pb total et du ²²⁶Ra [25, 26]. Les analyses ont été effectuées à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). Pour pouvoir déterminer les pics gamma de basse énergie ²¹⁰Pb (46,5 keV), un spectromètre gamma de type N, de marque ORTEC a été utilisé. Le temps de comptage de chaque échantillon a été fixé à 24 heures.

2-8. Analyse granulométrique et des matières organiques

En plus des mesures des activités, autres paramètres pertinentes ont été analysés tels que la granulométrie et les matières organiques. Ces deux paramètres ont été analysés au département URED / DASTE du Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN-Maroc). Pour séparer le fragment des grains de sol < 62,5 μm (argile et limon) avec les > 62,5 μm (sable), le *Mastersizer Laser 2000* a été utilisé. Pour déterminer le taux des matières organiques, une quantité chacune de 5 grammes a été mise dans un four électrique, d'une température de 600°C pendant 16 heures. Ainsi, ce taux des matières organiques est obtenu à partir des masses avant et après l'incinération, par la relation suivante :

$$OM \quad (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

où, M_1 et M_2 sont respectivement les masses de l'échantillon avant et après le passage au four.

3. Résultats et discussion

3-1. Profils de la granulométrie et des matières organiques

La **Figure 4** montre les distributions en profondeur de la granulométrie et des matières organiques pour les quatre carottes de sédiment. Les deux sites présentent une nette différence de granulométrie et des matières organiques. Pour le cas de Mandraka, la moyenne des grosses particules ($> 62,5 \mu\text{m}$) dans les carottes M1 et M2 sont respectivement de 92 % et 93 %. Ce qui veut dire que les particules fines sont seulement de 8 % et 7 % respectivement. La fluctuation des taux dans les premiers 30 cm de profondeur peut être expliquée par la turbulence de l'eau et les phénomènes physiques de ces points. En effet, le niveau de turbulence élevée pourrait fournir des informations erronées ou moins fiables des taux de sédimentation [27]. Pour Antelomita, les valeurs moyennes des particules fines sont de 38 % et 36 % pour A1 et A2. Les résultats montrent un comportement similaire dans les premiers 20 cm de profondeur. Ainsi, le sédiment du réservoir d'Antelomita contient plus de particule fine et de matière organique que celui de Mandraka. En ce qui concerne les taux de matières organiques, des cas similaires à la granulométrie sont remarqués. Les sédiments de Mandraka contiennent des taux inférieurs à ceux d'Antelomita. La fluctuation des taux des matières organiques se trouvent généralement aux 30 premiers centimètres de profondeur. Ces résultats ne peuvent pas être dus seulement à la topographie du milieu. La couverture végétale joue aussi un rôle très important afin de protéger la surface du sol comme le cas de Mandraka. Par contre, celui d'Antelomita, la couverture végétale est moins dense due à la déforestation. L'accroissement du nombre de population vivant dans le bassin versant et la pratique de la culture sur brûlis aggrave la situation. Ce genre de pratique agricole traditionnelle ne conserve nullement le sol et entraîne un fort dépôt sédimentaire en aval du réservoir.

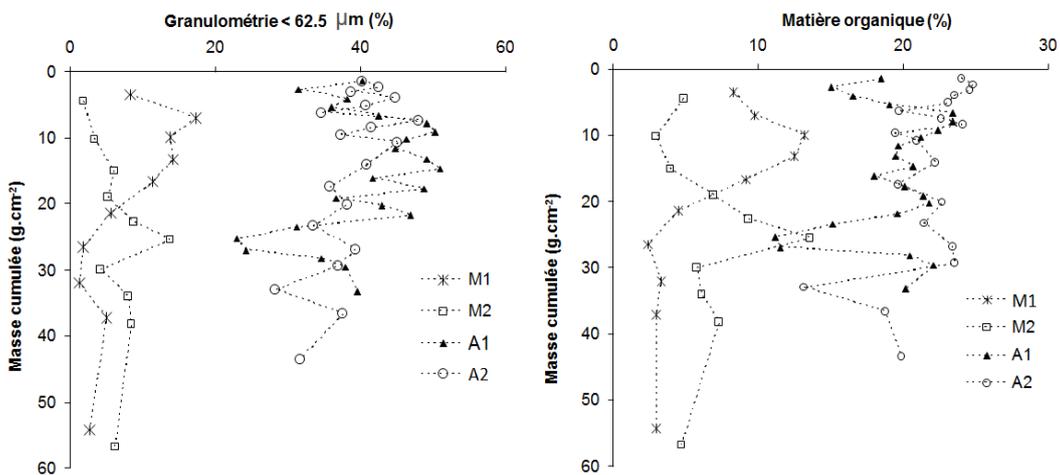
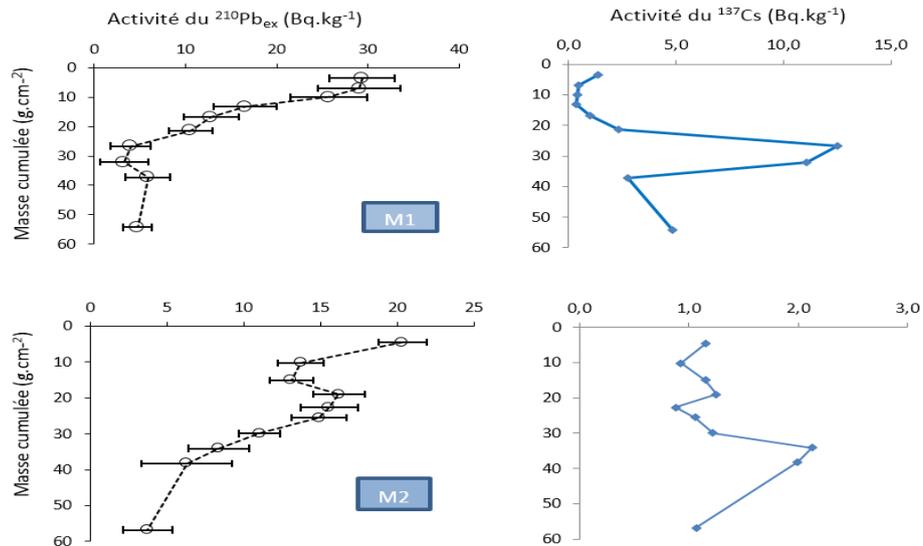


Figure 4 : Distribution en profil des taux de la granulométrie et des matières organiques

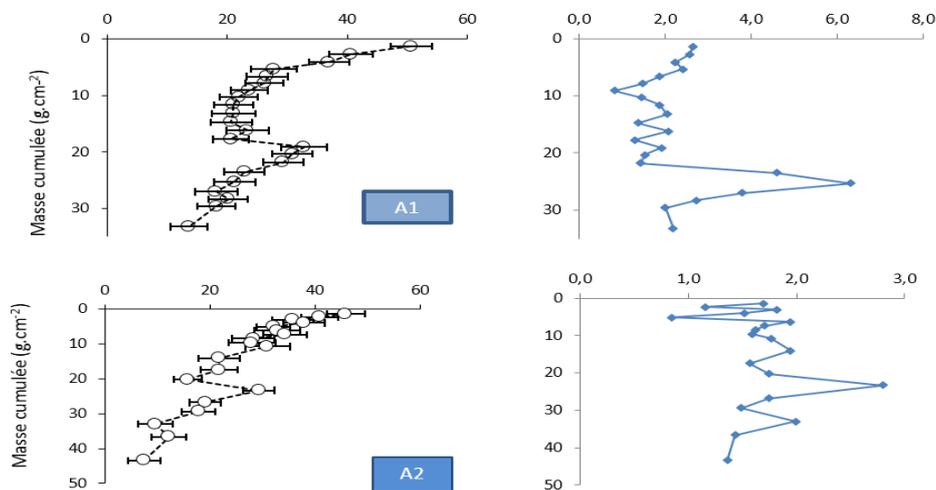
3-2. Profils des radio-traceurs

La **Figure 5** récapitule les distributions en profondeur des activités du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et du ^{137}Cs mesurés dans les carottes de sédiments. Les activités maximales se trouvent généralement à la couche supérieure de la carotte. Pour le cas de Mandraka, les activités à la surface du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sont de $29 \pm 4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et de $20 \pm 2 \text{ Bq.kg}^{-1}$ respectivement pour les points M1 et M2. Le point M1 présente une décroissance en exponentielle de l'activité suivant la profondeur. Tandis que cette décroissance en exponentielle est perturbée par un pic de $16 \pm 2 \text{ Bq.kg}^{-1}$ correspondant à une profondeur cumulée de 20 g.cm^{-2} (12 à 16 cm de profondeur) pour le point M2. Cette décroissance discontinue peut s'expliquer par le fait qu'il y a un changement brusque de sédiment

déposé dans le passé. Pour le cas d'Antelomita, le comportement des activités du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sur les deux points de prélèvement est similaire. Les discontinuités de la fonction décroissante en exponentielle sont claires et nettes pour les deux points. Le point A1 présente deux pics d'activité de $51 \pm 3 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et de $23 \pm 4 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Tandis que le point A2, les activités sont de $47 \pm 4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $31 \pm 4 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Cette similarité de comportement peut être aussi confirmée par les granulométries et les taux de matières organiques. Ce changement brusque de déposition du sédiment montre plus de confiance en comparaison le cas du Mandraka. Contrairement au $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, les activités maximales du ^{137}Cs se trouvent en dessous de la surface. Ces activités maximales correspondent à la date de 1963 sur laquelle le niveau de concentration du Cs-137 libéré dans l'atmosphère est maximum.



a) Site de Mandraka



b) Site d'Antelomita

Figure 5 : Profils des radio-traceurs sur les deux sites

3-3. Application du modèle flux constant et taux de sédimentation constant (CF-CS)

Le choix du modèle dépend du comportement des activités du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Dans cette étude, les distributions en profondeur des activités remplissent les hypothèses du modèle flux constant et taux de sédimentation constant (CF-CS) pour déterminer la chronologie de déposition. Comme les profils du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sont divisés en

deux parties, le modèle CF-CS est appliqué séparément. Ainsi, les deux pentes de la courbe indiquent le changement du taux de sédimentation rétrospectif. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Valeurs et historiques de la sédimentation de deux sites

Site	Période	Taux de sédimentation (g.cm ⁻² .a ⁻¹)	Vitesse moyenne de sédimentation (cm.a ⁻¹)	Année de changement
Mandraka M1	Passé	0,68	0,67	-
Mandraka M2	Passé éloigné	0,73	0,75	1986
	Passé récent	0,72	0,59	
Antelomita A1	Passé éloigné	0,51	0,70	1975
	Passé récent	0,64	0,95	
Antelomita A2	Passé éloigné	0,48	0,6	1963
	Passé récent	0,64	1,1	

Pour Mandraka, les résultats de deux points M1 et M2 montrent un passé globalement uniforme. Même si M2 semble être séparé en deux périodes, les valeurs de taux de sédimentation ne varient pas d'une façon significative. Les taux de sédimentation sont de 0,68 g.cm⁻².a⁻¹ pour M1 et de 0,72 g.cm⁻².a⁻¹ à 0,73 g.cm⁻².a⁻¹ pour M2. La variation de la vitesse de sédimentation en M2 serait alors due à une fluctuation de la densité ou de la composition granulométrique. En moyenne, cette vitesse de sédimentation est de 0,67 cm.a⁻¹ pour M1 et de 0,73 cm.a⁻¹ pour M2. La moyenne globale de la vitesse de sédimentation du site de Mandraka est ainsi estimée à 0,70 cm.a⁻¹. Pour Antelomita, les deux points de prélèvement montrent des historiques différents. Cela peut expliquer par le fait que les prélèvements ont été effectués dans des endroits peu profonds. Ces endroits sont plus sensibles non seulement à l'effet des courants, mais aussi aux effets de translocation et de redistribution horizontale. Mais dans tous les cas, les résultats montrent une aggravation de la situation. Les taux de sédimentation ainsi que les vitesses augmentent dans le passé récent. Les résultats du point A1 montrent que les taux de sédimentation varient de 0,51 g.cm⁻².a⁻¹ à 0,64 g.cm⁻².a⁻¹ correspondant respectivement aux vitesses de sédimentation de 0,70 cm.a⁻¹ à 0,95 cm.a⁻¹. Tandis que ceux du point A2 varient de 0,48 g.cm⁻².a⁻¹ à 0,64 g.cm⁻².a⁻¹ correspondant respectivement aux vitesses de sédimentation de 0,6 cm.a⁻¹ à 1.1 cm.a⁻¹.

Dans l'ensemble du site, la vitesse moyenne de sédimentation est estimée à 0,90 cm.a⁻¹. En comparaison de deux sites d'étude, les taux de sédimentation trouvés à Mandraka sont supérieurs à ceux d'Antelomita. Contrairement aux vitesses de sédimentation, le site d'Antelomita montre une valeur moyenne supérieure par rapport à celle de Mandraka. L'explication peut être due à la différence des caractéristiques des deux sédiments. En raison de la forte dégradation du bassin versant d'Antelomita, les sédiments sont plus riches en particules fines dans laquelle les matières organiques sont plus concentrées. Le sédiment devient moins dense. Tout cela entraîne une augmentation relative de la vitesse de sédimentation. D'une manière générale, les résultats montrent que le site de Mandraka présente une situation stable au cours du temps. La conservation de la couverture végétale peut l'expliquer en grande partie. Néanmoins, ce site nécessite une petite amélioration de l'aménagement. Pour Antelomita, les résultats montrent une augmentation du phénomène d'ensablement. Cela est dû à la dégradation d'origine anthropique de son bassin versant. La datation de la déposition du sédiment est obtenue à partir de l'Équation 1. En outre, la profondeur dans laquelle l'activité du ¹³⁷Cs est maximale, correspond les années 1963 à 1964. Les résultats obtenus sont donnés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Ages obtenus par le radio-traceur ^{137}Cs et le modèle CF-CS

Code	Profondeur (cm)	Age par le Cs-137 (activité maximale du ^{137}Cs)	Age par le model CF-CS
M1	28	1963 - 1964	1965
M2	32	1963 - 1964	1965
A1	36	1963 - 1964	1962
A2	36	1963 - 1964	1963

Les résultats montrent que les datations obtenues par les deux radio-traceurs sont relativement identiques en tenant compte des incertitudes. Ces incertitudes sont généralement dues à la précision du découpage de la carotte, à la préparation de l'échantillon et à la mesure. Ceux-ci montrent que les deux radio-isotopes sont complémentaires. Pour donner un sens à ces valeurs obtenues, nous avons extrait des résultats des études similaires dans d'autres régions du monde, en particulier en Afrique. Ces résultats sont récapitulés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Résultats des études similaires ailleurs

Pays	Site d'étude	Vitesse de sédimentation ($\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)	Référence
Egypte	Delta de Nile	0,22 - 0,27	Gu et al. 2011 [28]
Afrique du sud	Mkuze	0,25 - 0,50	Humphries, M.S., et al. 2010 [29]
Thaïlande	Rivière Bang Pakong	0,46 - 0,69	Voravit C et al. 1996 [30]
Suisse	Lac Genève / Lac Bourget	0,33 / 0,4	Benjamin Alric, 2013 [31]

En comparaison, les valeurs obtenues sont deux à trois fois supérieures aux celles trouvées ailleurs. Cela explique que les résultats de l'étude sont relatifs aux conditions géomorphologiques de la haute terre malgache. De plus, le climat est tropical, avec des orages intenses durant la saison de pluie. Ce qui entraîne parfois l'érosivité de pluie élevée. Le sol est très sensible à l'érosion car le type de sol est généralement ferrallitique avec un facteur d'érodibilité élevé. La topographie aggrave aussi la situation surtout le cas de Mandraka. Quant à Antelomita, la couverture végétale peut être la cause principale. En effet, le réservoir d'Antelomita a donc besoin un suivi de près par rapport à celui de Mandraka. La pérennisation de cette infrastructure nécessite de faire des dragages périodiques et d'inverser la pression humaine sur le bassin. Ceux-ci peuvent être limités le flux de migration vers le bassin, ou amélioré la gestion des terres par des méthodes conservatrices.

4. Conclusion

A Madagascar, le phénomène de l'érosion de sol est très remarqué surtout dans la partie haute terre malgache. Ceci résulte à la déposition énorme de la quantité de sédiment au fond des réservoirs des barrages hydroélectriques du pays. Depuis quelques années, l'équipe de l'INSTN-Madagascar a menée une étude en utilisant une nouvelle technique novatrice pour déterminer le taux et la vitesse de sédimentation déposée. Cette technique est encore nouvelle et n'a jamais été testée dans le pays. Elle est basée à l'utilisation des radio-isotopiques de l'environnement ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ et ^{137}Cs). Ainsi, plusieurs modèles peuvent être utilisés dans cette technique. Le choix du modèle dépend de la distribution en profondeur du sédiment de ces

radio-isotopes. Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle CF-CS. Les résultats obtenus montrent que la technique des radio-isotopes de l'environnement est appliquée avec succès par rapport aux mécanismes de sédimentation à Madagascar. Ces résultats donnent des vitesses de sédimentation moyennes de 0,70 cm.a⁻¹ pour Mandraka et de 0,90 cm.a⁻¹ pour d'Antelomita. Pour les quatre carottes prélevées, les datations sont aussi déterminées et ensuite validées par le radio-isotope ¹³⁷Cs. En outre, les analyses des taux de granulométrie et des matières organiques ont été effectuées. Les résultats montrent aussi que les taux des particules fines et des matières organiques sont similaires dans les deux carottes de même site. Par contre, d'un site à l'autre, ces résultats sont totalement différents car le sédiment d'Antelomita est plus riche aux deux paramètres supplémentaires. Une nette élévation de cette vitesse a été trouvée à Antelomita. Ceci montre que la topographie et le niveau de précipitation ne sont pas le seul facteur responsable à l'arrachement de la surface de sol. La couverture végétale joue aussi un rôle très important pour atténuer la déposition du sédiment.

Remerciements

Nos vifs remerciements vont adressés aux personnels de la société JIRAMA pour ses contributions aux divers moyens et à la facilitation de l'accès aux sites. Nous remercions également le Centre National de l'Energie des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) Maroc pour les analyses des autres paramètres pertinents (granulométrie et matière organique). Nos sincères remerciements vont aussi adressés à l'INSTN-Madagascar, en l'occurrence de l'équipe du Département Analyses et Techniques Nucléaires, pour l'appui logistique et financier.

Références

- [1] - RAPPORT WWF, Diagnostique du secteur énergie à Madagascar, (2012)
- [2] - RAPPORT FINAL, Evaluation environnementale préalable du plan de redressement de JIRAMA phase I 2006-2007. E1403, Vol. 3, (2006)
- [3] - MISSIONS ECONOMIQUES, Fiche de synthèse. L'électricité à Madagascar, (2007), <http://storage.canalblog.com/26/40/38838/19276979.pdf>
- [4] - EDBM (Economic Development Board of Madagascar), Infrastructure : Madagascar, l'île aux réserves d'énergie (2012), <http://www.edbm.gov.mg/fr/Informations-economiques/Secteurs/Infrastructure-Madagascar-l'ile-aux-reserves-d'energie>
- [5] - J. B. LARONNE, Sedimentation et barrages : Implications geomorphologiques, économiques et environnementales du comblement des reservoirs : Relations avec les extractions de matériaux fluviaux, *Amenagement Nat.*, 136 (2000b) 101 - 112
- [6] - P. G. APPLEBY, Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review. *The Holocene*, 18 (1) (2008) 83 - 93
- [7] - T. ZALEWSKAA, J. WOROŃA, B. DANOWSKAA, M.SUPLIŃSKAB, Temporal changes in Hg, Pb, Cd and Zn environmental concentrations in the southern Baltic Sea sediments dated with ²¹⁰Pb method. P 33, *Oceanologia*, 57 (2015) 32 - 43
- [8] - V. L. B. DE SOUZA, K. R. G. RODRIGUES, E. H. PEDROZA, R. T. DE MELO, V. L. DE LIMA, C. A. HAZIN, M. G. O. DE ALMEIDA and R. K. DO NASCIMENTO, Sedimentation rate and ²¹⁰Pb sediment dating at Apipucos reservoir, Recife, Brazil. *Sustainability*, ISSN 2071 - 1050, 4 (2012) 2419 - 2429, doi:10.3390 / su4102419

- [9] - N. PREISS, M.-A. MELIERES, & M. POURCHET, A compilation of data on ^{210}Pb concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 101 (D22) (1996) 28847 - 28862, <http://dx.doi.org/10.1029/96JD01836>
- [10] - F. MONNA, J. LANCELOT, M. BERNAT, H. MECARDIER, Taux de sédimentation Sédiment Lagune Géochronologie ^{210}Pb dans l' étang de Thau à partir des données géochronologiques, géochimiques et des repères stratigraphiques. *Oceanologica Acta*, 20 (4) (1997) 627 - 638
- [11] - M. BENMANSOUR, L. MABIT, P. N. OWENS, S. TARJAN, D. E. WALLING, The use of excess ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) as a soil and sediment tracer. IAEA-TEC-DOC-1741. Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, (2014)
- [12] - J. M. ABRIL, Difficulties in interpreting fast mixing in the radiometric dating of sediments using ^{210}Pb and ^{137}Cs . *J Paleolimnol*, 30 (4) (2003) 407 - 414
- [13] - S. KRISHNASWAMY, D. LAL, J. M. MARTIN, M. MEYBECK, Geochronology of lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 11 (1971) 407 - 414
- [14] - M. KOIDE, K. BRULAND, E. D. GOLDBERG. ^{228}Th / ^{232}Th and ^{210}Pb geochronologies in marine and lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37 (1973) 1171 - 1187
- [15] - E. D. GOLDBERG, Geochronology with lead-210 in radioactive dating, IAEA, Vienna, (1963) 121 - 131 p.
- [16] - UNSCEAR 2000, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, vol. I : Sources. United Nations sales publication E.00.IX.3, New York, (2000)
- [17] - M. BENMANSOUR, A. LAISSAOUI, S. BENBRAHIM, M. IBN MAJAH, A. CHAFIK, P. P. POVINEC, Distribution of anthropogenic radionuclides in Moroccan coastal waters and sediments. *Radioactivity in the environment* © (2006) Elsevier Ltd. VOLUME 8 ISSN 1569-4860/DOI 10.1016/S1569-4860(05)08009-5
- [18] - P. BONTE, S. SOGON, M. MEYBECK, Marqueurs radioactifs et matières en suspension. Page 2. Thème 6 - Particules - Radio-isotopes environnementaux
- [19] - J. N. SMITH, Why should we believe ^{210}Pb sediment geochronologies? *Journal of Environmental Radioactivity*, 55 (2001) 121 - 123
- [20] - V. PUTYRSKAYA, E. KLEMT, S. REOLLIN, M. ASTNER, H. SAHLI, Dating of sediments from four Swiss prealpine lakes with ^{210}Pb determined by gamma spectrometry : progress and problems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 145 (2015) 78 - 94
- [21] - Z. HAMZAH, S. D. RIDUAN and A. SAAT, Determination of sediment profile for ^{210}Pb , Pb, U and Th from Sultan Abu Bakar dam due to soil erosion from Highland agriculture area, Cameron Highlands, Malaysia. *American Journal of Environmental Sciences*, 7 (3) (2011) 263 - 268
- [22] - M. WOSZCZYK, G. POREBA, L. MALINOWSKI, ^{210}Pb , ^{137}Cs and ^7Be in the sediments of coastal lakes on the polish coast : Implications for sedimentary processes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 169 - 170 (2017) 174 - 185
- [23] - L. MABIT, M. BENMANSOUR, D. E. WALLING, Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (12) (2008) 1799 - 1807
- [24] - N. RABESIRANANAA, M. RASOLONIRINAA, A. F. SOLONJARAA, H. N. RAVOSON, RAOELINA ANDRIAMBOLOLONAA, L. MABIT, Assessment of soil redistribution rates by ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in a typical Malagasy agricultural field. *Journal of Environmental Radioactivity*, 152 (2016) 112 - 118
- [25] - G. GILMORE, JD HEMINGWAY, Practical Gamma-Ray spectrometry (New York : Wiley), (1995)
- [26] - Y. TRABELSI et al., Recent sedimentation rates in Garaet El Ichkeul Lake, NW Tunisia, as affected by the construction of dams and a regulatory sluice. *J Soils Sediments*, 12 (2012) 784 - 796, DOI 10.1007/s11368-012-0496-y

- [27] - M. BASKARAN, J. NIX, C. KUYPER, N. KARUNAKARA, Problems with the dating of sediment core using excess ^{210}Pb in a freshwater system impacted by large scale watershed changes. *Journal of Environmental Radioactivity*, 138 (2014) 355 - 368
- [28] - J. W. GU, Z. Y. CHEN, A. SALEM, Post-Aswan dam sedimentation rate of lagoons of the Nile delta, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 64 (7) (2011) 1807 - 1813, <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-0983-2>
- [29] - M. S. HUMPHRIES, A. KIDNESS, WN. ELLERY, JC HUGHES, CR BENITEZ-NELSON. ^{137}Cs and ^{210}Pb derived sediment accumulation rates and their role in the long-term development of the Mkuze River floodplain, South Africa. *Geomorphology*, 119 (2010) 88 - 96
- [30] - C. VORTACIT, M. PHAITHOON, Pb-210 Radiometric Dating of estuarine sediments from the eastern coast of Thailand., *J. Sc.Soc*, 22 (1996) 313 - 324
- [31] - BENJAMIN et al., Local forcings affect Lake Zooplankton vulnerability and response to climate warming. *Ecology*, 94 (2013) 2767 - 2780, <http://dx.doi.org/10.1890/12-1903.1>