

# EVALUATION ET ANALYSE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DANS LE BARRAGE-RESERVOIR DE SELINGUE

**LAVAL Myriam**, Université Jean-Moulin (Lyon 3)

**FERRY Luc**, IRD-UMR G-Eau-361, Montpellier

**COULIBALY N'Tjie**, Direction Nationale de l'Hydraulique, Bamako

**MARTIN Didier**, IRD-UMR G-Eau-361, Montpellier

**MUTHER Adine**, IRD-UMR G-Eau-361, Montpellier

**MIETTON Michel**, Université Jean-Moulin (Lyon 3)

## Résumé

Les dynamiques hydromorphogéniques au sein des bassins versants de l'Ouest africain constituent des phénomènes complexes que l'étude des processus de sédimentation au niveau des retenues permet d'appréhender et de mesurer. La présente étude met en lumière la faiblesse du comblement de la retenue de Sélingué (Mali), contrairement aux estimations antérieures à la construction du barrage, par constitution d'une nouvelle carte topographique du réservoir. Arrivant en complément des travaux sur la dégradation spécifique des bassins versants et les transports solides, elle permet une nouvelle évaluation de la capacité de stockage de la retenue ainsi que la détermination du rôle de facteurs tels que le couvert végétal ou encore l'occupation humaine dans ces processus.

**Mots clés :** Sankarani, barrage de Sélingué, topographie, dynamique sédimentaire

## Abstract

*Hydromorphogenic dynamics within the West African watershed areas are complex phenomena that can be understand and measured through the study of sedimentation processes in the reservoirs. This study highlights the limited sedimentation of the Sélingué reservoir (Mali), in contrast to previous estimates for the dam building, by the construction of a new topographic map of the reservoir. Used in addition to studies on specific degradation of watersheds and sediment transport, it allows a new assessment of the reservoir storage capacity and a determination of the role of factors such as vegetation cover or human occupation in these processes.*

**Key words :** Sankarani, Sélingué dam, topography, sedimentary dynamics

## INTRODUCTION

Dans un monde où le nombre d'habitants est estimé par l'ONU à 9 milliards à l'horizon 2050, la gestion des ressources naturelles, et plus particulièrement de l'eau, devient un enjeu majeur pour les sociétés humaines. Dans les zones subtropicales, où la répartition des précipitations est très irrégulière, cette gestion se trouve de fait complexifiée et d'autant plus nécessaire au développement économique et aux besoins quotidiens des populations. L'une des réponses de ces dernières décennies à l'aléa climatique est la construction de barrages sur de nombreux fleuves et rivières, notamment en Afrique subtropicale, dans le but de créer des réservoirs permettant une disponibilité plus régulière de la ressource en eau à des fins d'irrigation et de production hydro-électrique. Or ces ouvrages hydrauliques ne sont pas sans poser certaines questions en termes d'impacts environnementaux (Mc Allister et *al.*, 2001), économiques (Barbier et *al.*, 2009), culturels (Cremin, 2009) mais aussi et surtout de durabilité (WCD, 2000).

Sur ce dernier point, le rapport régional « Afrique » du Forum mondial de l'eau de 2006 (Mexique) souligne l'importance des phénomènes d'envasement au niveau mondial, avec un taux moyen annuel de perte de volume des réservoirs de 0.5% à 1% du fait de la sédimentation, exacerbée en Afrique principalement, comme le montrent les travaux de Remini et *al.* (2003) en Afrique du Nord. Or, les auteurs du rapport UNESCO 2006 rappellent l'aspect limité du nombre de sites potentiels de construction de barrages dans cette région du monde.

La question du comblement des retenues artificielles est de fait soulevée très tôt, en Afrique subtropicale notamment, par des chercheurs comme Grésillon et *al.* (1981) ou Mietton (1986) pour le Burkina Faso. Les mesures d'ensablement sont alors essentiellement basées sur des sondages manuels « longs, parfois périlleux » ou des levés topographiques comparés sur des petits réservoirs pouvant saisonnièrement s'assécher (Mietton, 1986). Ainsi, à l'heure actuelle, si les recherches se sont axées sur les problématiques d'érosion spécifique des bassins versants en zone soudanienne (Droux et *al.*, 2003), l'évaluation des dynamiques de sédimentation peut être complétée et mise à jour, d'autant qu'elle bénéficie désormais de progrès techniques importants.

Dans ce cadre, l'étude de la dynamique sédimentaire de la retenue de Sélingué, au sud-ouest du Mali, présente plusieurs enjeux essentiels. En effet, cette retenue artificielle mise en eau en 1982, située sur le Sankarani, affluent de rive droite du Niger supérieur guinéen et malien (figure 1), soulève nombre de questionnements en termes de gestion, voire des conflits d'usage

pour les différents acteurs (Kupper et *al.*, 2000), tous tributaires d'une estimation de vitesse d'envasement non mise à jour depuis 1973 (Nations Unies, 1973).

## **1. LE CADRE THÉORIQUE ET GÉOGRAPHIQUE**

### **1.1. Problématique de recherche**

L'étude de la dynamique sédimentaire de la retenue de Sélingué s'inscrit alors dans des objectifs à plusieurs échelles. Il s'agit tout d'abord d'évaluer avec précision la capacité de stockage en eau de la retenue sur le long terme, en prenant en compte la dynamique d'envasement, afin de fournir des éléments précis et solides pour une gestion de la ressource par les acteurs concernés. Pour cela, il s'est avéré nécessaire d'opérer une mise à jour des données élaborée en 1964 par ITALCONSULT, bureau d'étude italien auteur des études préliminaires à la construction du barrage de Sélingué, et complétée en 1973 par les Nations Unies<sup>1</sup>, d'autant plus que la cote maximale de remplissage du barrage est passée de 347 m à 349 m en 2001, en vue d'augmenter la capacité du réservoir.

De manière subsidiaire, l'évaluation de la sédimentation de la retenue de Sélingué est à envisager comme un indicateur de la dégradation spécifique du bassin versant du Sankarani et du Balé, son affluent principal, permettant de mieux estimer les facteurs conditionnant ces dynamiques sédimentaires.

De fait, cet article s'appuie sur une recherche réalisée en 2008 par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), l'université Lyon 3 (J. Moulin) et la DNH-Mali (Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali) ; recherche s'inscrivant dans le cadre du projet « Niger-Loire : gouvernance et culture » coordonné par l'UNESCO et bénéficiant du soutien de l'Union Européenne dans le cadre de l'appel à projet Facilite ACP-UE pour l'Eau.

En outre, cette étude s'adresse aux différents gestionnaires de la retenue tels que EDM (Energie du Mali) et la DNH-Mali, mais aussi l'ODRS (Office de Développement Rural de Sélingué) et l'Office du Niger, tous membres du Comité de Gestion de la retenue qui cherche à répondre à quatre objectifs principaux : la production d'hydro-électricité, l'irrigation, l'amélioration de la navigation sur le fleuve Niger par le soutien des étiages et le développement de la pêche.

Il s'agit de vérifier l'estimation de l'évolution de la capacité de stockage du réservoir élaborée par ITALCONSULT (1964) puis reprise et complétée par les Nations Unies (1973) avec comme hypothèse un ensablement de la

---

<sup>1</sup> Carlo Lotti est l'auteur des deux rapports, pour ITALCONSULT en 1964, puis pour les Nations Unies en 1973.

retenue jusqu'à la cote 337,5 m en 57 ans, soit 1 500 000 m<sup>3</sup> de sédiments déposés par an dans le réservoir (Nations Unies, 1973). Cette donnée a été obtenue par une extrapolation à partir de mesures de turbidité sur le site (10 échantillonnages de MES en 1971 en amont de Sélingué) et des données collectées sur le Niandan, à Baro, par NEDECO<sup>2</sup> en 1959.

## **1.2. Contexte géographique de la zone d'étude**

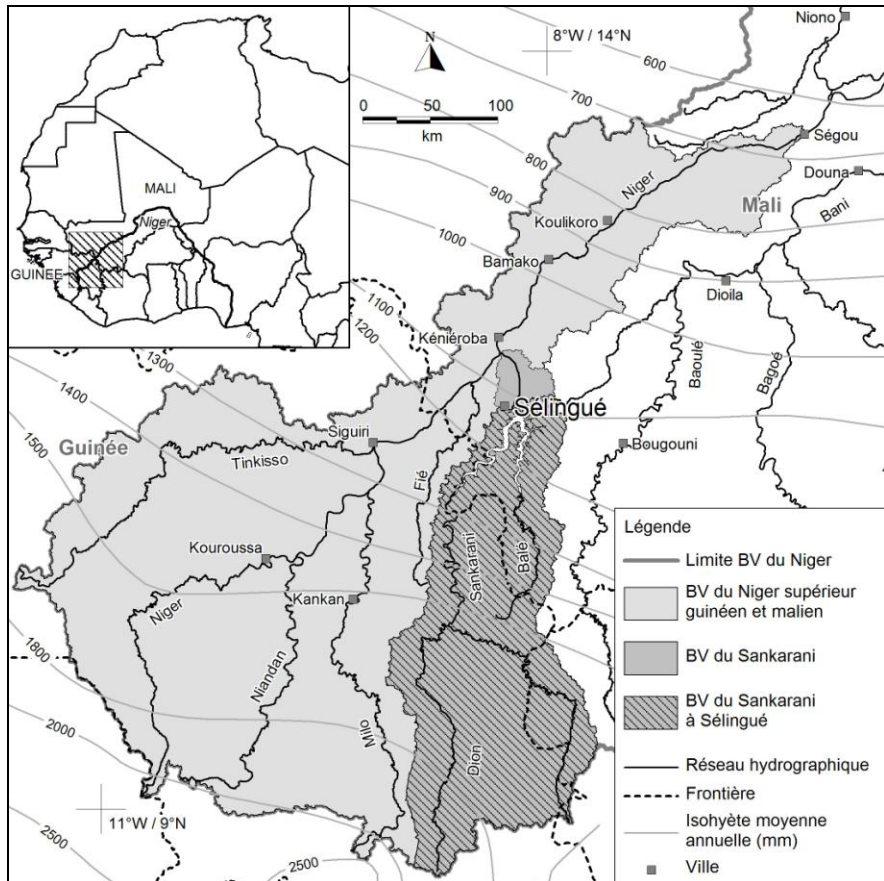
Le barrage de Sélingué est situé sur le Sankarani, affluent de rive droite du Niger, à 150 km environ au sud-ouest de la ville de Bamako. Son bassin versant, composé de deux sous-bassins principaux, celui du Sankarani à l'ouest et celui du Balé à l'est, couvre une superficie de 32 140 km<sup>2</sup>, soit 25% du bassin du Niger supérieur guinéen et malien. A sa cote maximale d'exploitation (349 m), le barrage contient un réservoir d'environ 100 km de longueur, d'une superficie de 460 km<sup>2</sup> et d'une capacité de 2,7 milliards de m<sup>3</sup>. Sa profondeur maximale est de 22 m au pied du barrage (Laval, 2008).

Le bassin versant s'inscrit dans une région de climat tropical contrasté, marqué par une saison sèche d'octobre à mai et une saison humide concentrant l'essentiel des précipitations annuelles, qui s'élèvent à 1 200 mm en moyenne (période 1921-1996), (Droux et *al.*, 2003). A l'échelle du bassin versant du Sankarani, dont la retenue de Sélingué constitue l'exutoire, la densité du couvert végétal, facteur influant sur la rétention d'eau, le ruissellement et l'érosion, décroît du sud au nord. La végétation est essentiellement composée de savanes de climat soudanien (arbustives et arborées), de savanes claires et de forêts de climat soudano-guinéen. Le substrat du bassin versant du Sankarani et du Balé s'inscrit dans le craton précambrien inférieur et moyen (DNGM, 1987), formant un relief peu accidenté essentiellement constitué de buttes et collines.

---

<sup>2</sup> Netherlands Engineering Consultants

Figure 1 : Localisation du bassin versant du Sankarani et du barrage de Sélingué et précipitations moyennes interannuelles.



D'après Ferry *et al.*, 2012, et L'Hôte et Mahé, 1996

Avec 10 à 20 habitants par km<sup>2</sup> en moyenne (Ferry *et al.*, 2012), le bassin versant du Sankarani est peu peuplé. La population du bassin se concentre principalement sur les abords du lac, pratiquant la pêche, l'élevage extensif et l'agriculture de décrue. Cette occupation relativement faible est toutefois source de dégradations importantes aux abords immédiats de la retenue.

## **2. METHODOLOGIE**

### **2.1. La collecte de données sur site**

#### **2.1.1. Observations bathymétriques**

L'évaluation de la hauteur du toit des vases est passée en premier lieu par l'acquisition de données bathymétriques du lac (données de profondeur), soit manuellement à la sonde ou à la mire graduée, soit par enregistrement de profils bathymétriques transversaux (tous les 500 m environ, depuis le barrage jusqu'aux extrémités sud de la retenue) et longitudinaux. Vingt-neuf jours de terrain ont permis la réalisation de 427 enregistrements bathymétriques, soit 732 km de profils et 4 163 points GPS, dont 3 015 de mesures ponctuelles de profondeur.

Les enregistrements bathymétriques ont été réalisés au moyen de profileurs de courant de type « Acoustic Doppler Current Profiler » (ADCP) Work Horse et Rio Grande utilisés comme écho-sondeurs, et installés sur des embarcations pneumatiques motorisées. L'ADCP, couplé à un micro-ordinateur, joue à la fois un rôle d'émetteur d'ondes et de récepteur. Les ondes ultrasonores émises (« pings ») sont réfléchies soit par le fond soit par les particules en suspension dans l'eau et reviennent au capteur avec des fréquences différentes. Ces différences de fréquence permettent de définir la profondeur du fond et des particules, mais aussi leur vitesse de déplacement ainsi que celle de l'embarcation (par rapport au fond). L'ADCP, également équipé d'un compas, permet ainsi d'obtenir des enregistrements de profondeurs en fonction des déplacements (profil bathymétrique) par l'intermédiaire du logiciel Win River®.

Le début et la fin de chaque profil bathymétrique ont été géo-référencés au moyen de GPS Garmin 60. La validité des profondeurs enregistrées a été fréquemment vérifiée par des mesures ponctuelles réalisées manuellement (largage d'une bouée pendant le profil puis mesure de la profondeur à la sonde graduée). Ces données ont été complétées en zone de faible navigabilité par des mesures ponctuelles de profondeur à la mire et par plus de trois mille points de berge ; observations également géo-référencées au moyen de GPS Garmin 60. Enfin, la valeur de hauteur d'eau de la retenue lue à l'échelle limnimétrique du barrage a été attribuée à chacune des informations bathymétriques collectées.

#### **2.1.2. Prélèvements sédimentaires**

Des prélèvements sédimentaires ont été réalisés au moyen d'une benne à sédiments lors de la campagne d'observation bathymétrique afin de déterminer la texture des matériaux de fond et éventuellement leur origine.

Douze échantillons sédimentaires ont été prélevés en différents points des anciennes vallées fluviales du Sankarani et du Balé et trois en amont de la digue de Pontaga. L'ensemble des mesures collectées sur le terrain sont présentées en figure 2.

## **2.2. Le traitement des données**

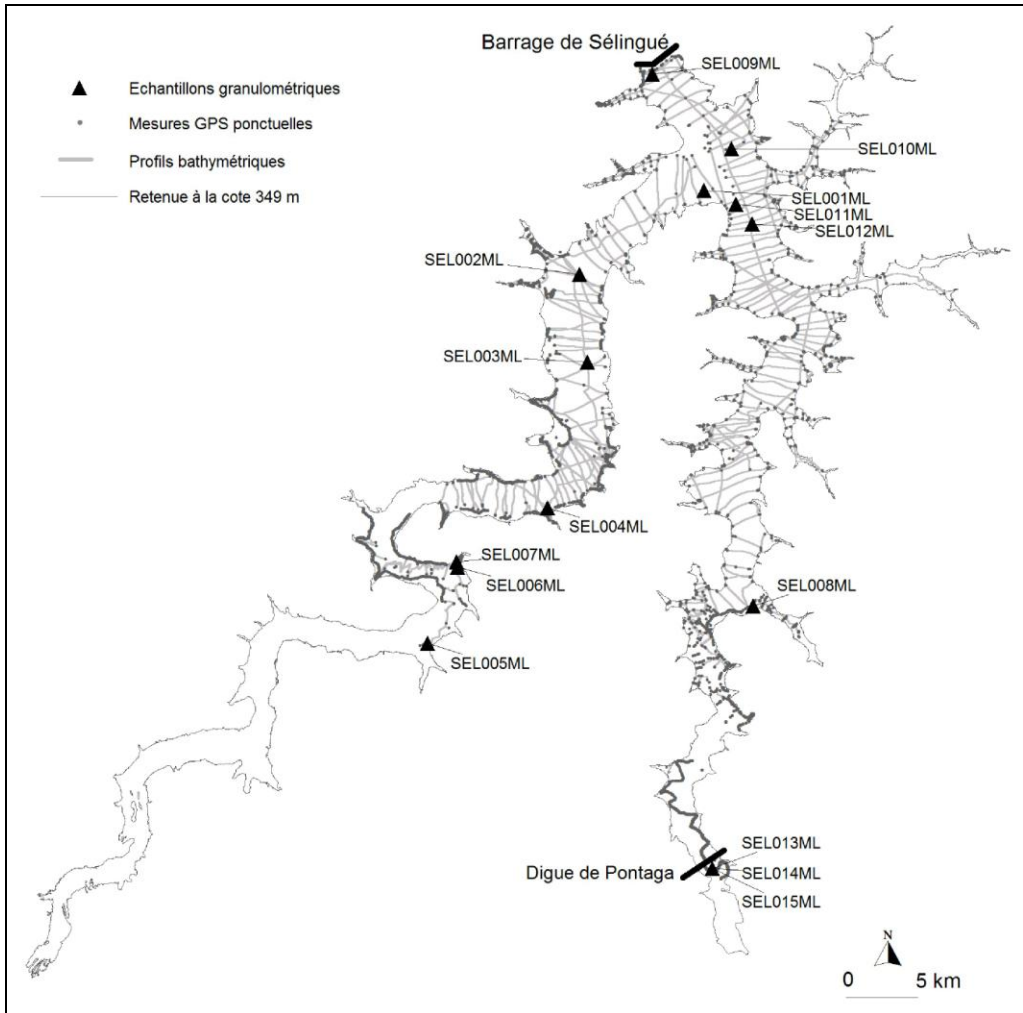
Après vérification, les observations bathymétriques collectées sur le terrain (enregistrements et mesures ponctuelles) ont été converties dans un même référentiel altimétrique et mises en forme afin d'être importées dans un Système d'Information Géographique (SIG, logiciel Mapinfo®). Ainsi, la table du SIG comporte 681 476 points altimétriques, principalement issus des enregistrements bathymétriques réalisés au moyen des ADCP.

Le traitement des données comporte également le calage géographique sous Mapinfo® des cartes topographiques de la cuvette produite en 1964 par ITALCONSULT. Ce travail s'est avéré délicat et a montré des distorsions sur les anciennes cartes.

## **2.3. La restitution graphique**

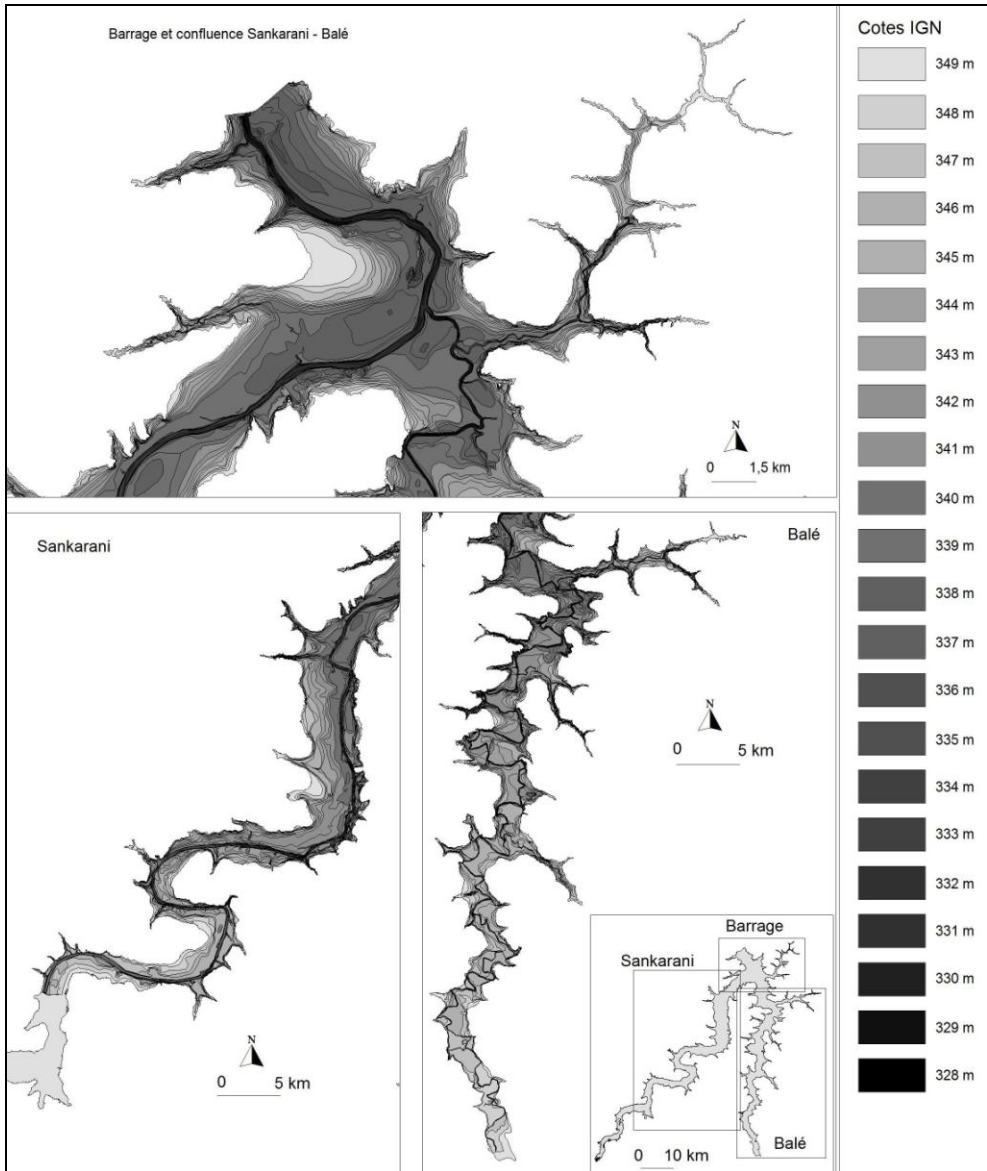
Le contour du lac à la cote 349 a été obtenu à partir d'une image Google Earth® de 2008. Sur cette base les courbes de niveau de la retenue entre 328 m et 348 m ont été tracées par interpolation linéaire entre les points altimétriques issus des observations bathymétriques. La densité des observations n'a pas permis un tracé automatique au moyen d'un logiciel de géostatistique et, parfois, le tracé de ces courbes a fait l'objet d'une interprétation. Une représentation de la carte topographique de la retenue est donnée en figure 3.

Figure 2 : Localisation des mesures réalisées par l'IRD en 2008



Source : IRD, 2008

Figure 3 : Carte topographique de la retenue de Sélingué



#### 2.4. Limites méthodologiques

Il convient d’abord de rappeler les approximations que comportent les études préliminaires. En premier lieu, la méthode de réalisation de la carte topographique de 1964, par interprétation de photographies aériennes (lecture stéréoscopique), comporte une marge d’erreur non négligeable. En outre, le

document accompagnant les cartes ITALCONSULT ne précise ni le nombre de relevés altitudinaux effectués *in situ*, ni la manière dont fut prise en compte l'épaisseur de la canopée. Ne disposant pas des photographies aériennes de l'époque, nous ne pouvons déterminer l'importance de la couverture forestière et de savane de l'époque. Toutefois la fréquence des bois morts présents dans tous les secteurs de la retenue, dépassant parfois 10 m de haut, fournit un indice sur le couvert végétal antérieur à la mise en eau du barrage. Or, si l'épaisseur du couvert végétal, qui peut varier de 0 à plus de 10 m, n'est pas prise en compte de manière précise, cela implique des inexactitudes de plusieurs mètres dans le tracé de la carte topographique.

En second lieu, la carte produite par ITALCONSULT est incomplète : les courbes de niveau sont tronquées à l'extrémité sud de la retenue, sur le Sankarani. De fait, au-delà de ce point, aucune comparaison n'a pu être faite entre les deux cartes topographiques.

Troisième point critique : la carte produite par ITALCONSULT ne présente pas les courbes de niveau au-dessus de la cote altimétrique 347, tandis que le niveau maximal de la retenue s'élève depuis 2001 à 349 m. Ces deux faits entraînent une difficulté d'évaluation des phénomènes sédimentaires dans les « estuaires lacustres » du Sankarani et du Balé.

Enfin, l'étude préliminaire réalisée par les Nations Unies en 1973, qui apporterait certainement d'autres éléments utiles à cette recherche, n'a pas pu être consultée dans son intégralité.

Par ailleurs, la présente étude est également en butte à plusieurs difficultés méthodologiques, lors des campagnes de collecte de données d'abord et ensuite lors du traitement de ces dernières. En effet, d'un point de vue technique, plusieurs obstacles ont pu gêner localement la mesure bathymétrique : les arbres morts ennoyés, parfois invisibles et extrêmement dangereux pour le matériel, les filets des pêcheurs, les végétaux flottants, l'interdiction par les autorités militaires de pratiquer des mesures sur la berge guinéenne du lac. Ces divers facteurs ont rendu difficile la collecte de données au niveau des « estuaires » notamment, malgré les mesures faites à la mire.

En outre, l'acquisition des profils bathymétriques a été limitée par la hauteur d'eau dans le barrage (inférieure à 348 m dès le mois de février). Ainsi, les courbes de niveau 347, 348 et 349 m restent de tracé incertain.

Enfin, le maillage de base des observations bathymétriques, où les profils sont distants les uns des autres de 500 m en moyenne, pourrait être resserré, particulièrement au niveau de la confluence Sankarani/Balé, où les principaux phénomènes de sédimentation sont susceptibles de se produire.

## **2.5. La granulométrie des échantillons**

Les échantillons prélevés sur le terrain ont d'abord été préparés, par séchage, quartage puis tamisage à 2 mm pour les éléments les plus grossiers. Les éléments les plus fins sont analysés par une granulométrie laser (LS230 Module fluide BECKMAN COULTER). Pour chaque échantillon, il est alors édité une fiche granulométrique des caractéristiques texturales.

## **3. RESULTATS**

### **3.1. Un envasement quasi inexistant de la retenue**

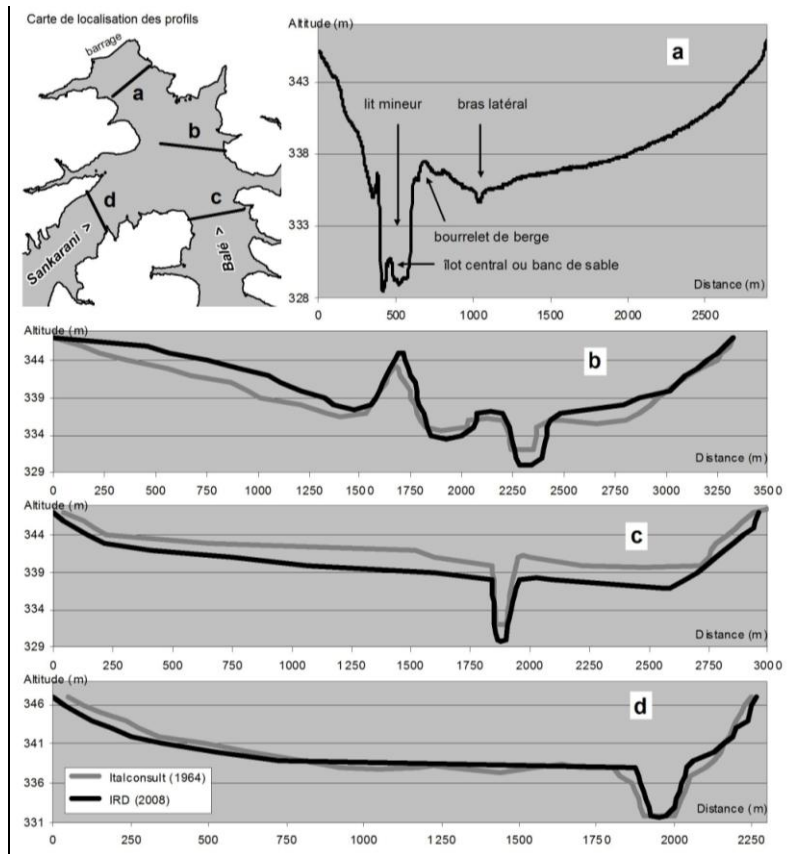
L'examen de quatre profils transversaux situés sur la partie centrale de la retenue (figure 4-a et figure 4-b) ainsi que sur ses deux bras principaux (Balé, figure 4-c et Sankarani, figure 4-d) ne montre aucun comblement significatif de la retenue, notamment au niveau des zones les plus profondes où les phénomènes de sédimentation, s'ils existent, sont davantage susceptibles de se produire.

De manière générale, les profils topographiques issus des enregistrements bathymétriques réalisés en 2008, illustrés par la figure 4-a, montrent que les formes d'origine sont parfaitement conservées. On y repère encore très distinctement les plaines alluviales, les lits mineurs aux bords abrupts ainsi que leurs îles ou leurs bancs de sable, les bourrelets de berge, les chenaux secondaires et les petits affluents. Soulignons que, dans certains secteurs, les anciennes forêts galeries ont pu être détectées. Ces seuls éléments permettent de conclure qu'il n'y a pas eu de comblement significatif de la retenue depuis sa mise en eau en 1982.

La superposition de trois profils transversaux réalisés à partir des cartes d'ITALCONSULT (1964) et de Laval/IRD (2008) sur des sections identiques (figure 4-b, figure 4-c, figure 4-d) montrent également la permanence des formes préexistantes. Cette superposition révèle des résultats contradictoires avec : (b) une altitude des parties latérales plus importante en 2008 qui traduirait des accumulations sédimentaires - (c) des niveaux globalement moins importants en 2008 difficilement explicables - (d) peu de différence entre les profils de 1964 et de 2008. Soulignons que sur les trois profils, les cotes minimales du lit mineur sont systématiquement plus faibles en 2008. Le tracé de la carte topographique de 1964 par photo-interprétation en serait à l'origine (partie en eau non sondée et forte végétation sur les berges). Par ailleurs, les distorsions des cartes topographiques de 1964 et les déformations liées au type de support (papier), constatées lors de leur calage géographique, laissent supposer une localisation légèrement différente des profils et par conséquent des écarts altimétriques pouvant être relativement importants. Enfin, comme nous le verrons plus loin, l'écart probable d'environ 0,60 m

entre le référentiel altimétrique de 1964 et celui de 2008 ne peut donner qu'un résultat qualitatif à l'analyse comparative des profils. Malgré ces quelques imprécisions et des incertitudes, la persistance des reliefs, notamment le non comblement des anciens chenaux, permet d'infirmer l'hypothèse d'un comblement significatif de la retenue.

Figure 4 : Comparaison diachronique de profils transversaux de la retenue de Sélingué



Source : IRD, 2008

L'analyse des courbes hauteurs/surfaces (H/S) et hauteurs/volumes (H/V) de la retenue (figure 5, ci-dessous) d'ITALCONSULT (1964), de Carlo Lotti/SOFRELEC<sup>3</sup> (2001) et de l'IRD (2008) conforte les résultats précédents. Les informations partielles données dans les rapports d'étude d'ITALCONSULT et de Carlo Lotti/SOFRELEC, rendent cependant cette analyse relativement délicate et demandent que l'on s'y attarde. L'analyse repose sur cinq courbes produites à des dates différentes (tab. I et fig. 5).

<sup>3</sup> Courbe hauteurs/surfaces utilisée par EDM.

Tableau I : Inventaire des courbes hauteurs/surfaces et hauteurs/volumes disponibles

Courbes hauteurs/surfaces		Année	Gamme d'altitude (m)
(1)	ITALCONSULT	1964	336-347
(4)	IRD	2008	327-349
Courbes hauteurs/volumes			
(5)	ITALCONSULT	1964	336-347
(6)	Carlo Lotti/SOFRELEC	2001	340-349
(7)	IRD	2008	327-349

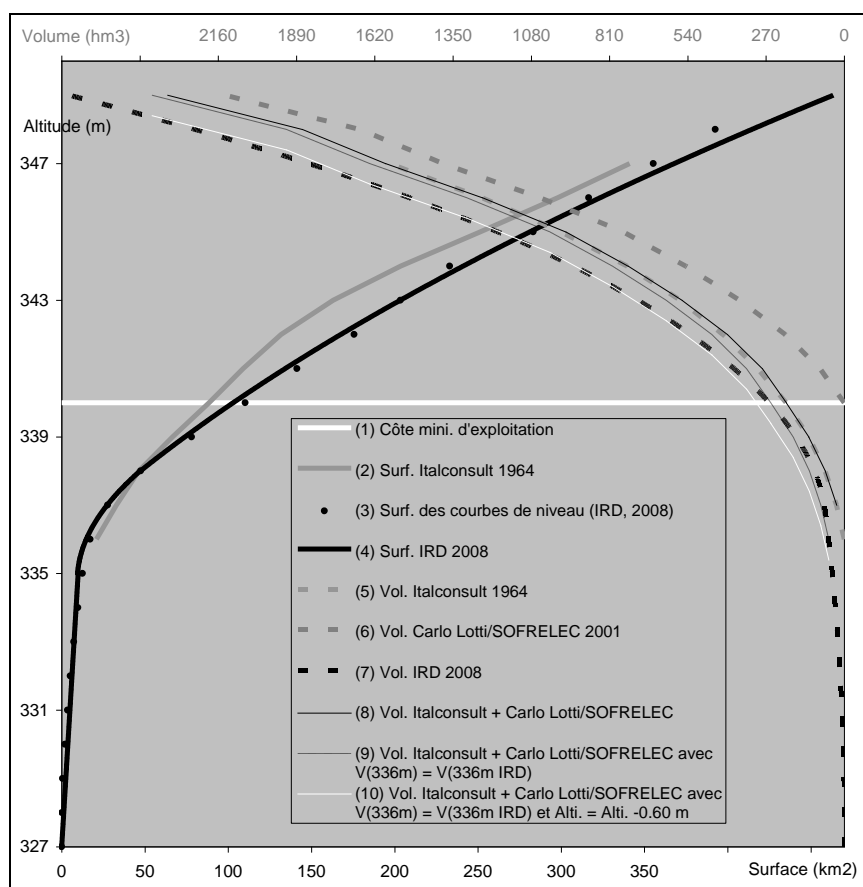
Les courbes H/S d'ITALCONSULT (1) et de l'IRD (4) - cette dernière lissée - ont été construites à partir de la surface de chacune des courbes de niveau des cartes topographiques de 1964 et de 2008. Notons que les surfaces données par la courbe de l'IRD sont systématiquement supérieures à celles de la courbe d'ITALCONSULT à partir de 338 m. La surestimation par ITALCONSULT de l'altitude des niveaux les plus bas (lit mineur, berges et talweg fortement boisés), serait à mettre en relation avec l'élaboration de la carte topographique par photo-interprétation. Les courbes H/V (5 et 7), déduites de ces dernières montrent des volumes plus importants en 1964 qu'en 2008, tout comme la courbe de Carlo Lotti/SOFRELEC de 2001 (6), ce qui est évidemment difficile à admettre.

En attribuant à la série des valeurs de la courbe H/V de Carlo Lotti/SOFRELEC (6) les valeurs de la courbe H/V d'ITALCONSULT (5), pour les niveaux inférieurs ou égaux à 340 m, les deux courbes se chevauchent parfaitement (5 et 8). La courbe H/V de Carlo Lotti/SOFRELEC (6), utilisée par EDM pour l'exploitation de la retenue, est donc identique à celle d'ITALCONSULT, mais ne prend en compte que le volume utile du réservoir (altitude > 340 m). Cette nouvelle courbe H/V « ITALCONSULT + Carlo Lotti/ SOFRELEC » (8) montre, comme la courbe H/V initiale (5), des volumes très inférieurs à ceux de la courbe H/V IRD de 2008 (7).

En supposant qu'aucun comblement significatif du réservoir ne soit intervenu depuis 1964, la courbe H/V « ITALCONSULT + Carlo Lotti/SOFRELEC » (8) peut être réévaluée en prenant comme volume de fond le volume donné par la courbe H/V IRD de 2008 à la cote 336 m. La courbe H/V ainsi recalculée (9) se situe encore très en deçà de la courbe H/V de l'IRD de 2008 (7). Ce décalage pourrait être expliqué par une modification du référentiel altimétrique entre 1964 et 2008, plus précisément entre 1964 et l'installation de l'échelle limnimétrique du barrage ; installation qui a

probablement eu lieu en 1981/1982, avant la mise en eau de la retenue<sup>4</sup>. En imposant à la courbe H/V "ITALCONSULT + Carlo Lotti/ SOFRELEC + IRD" (9) une correction altimétrique de -0,60 m, la courbe H/V obtenue (10) est pratiquement identique à la courbe H/V de l'IRD de 2008 (7), notamment au-dessus de la cote 341 m. Entre les cotes 337 m et 341 m, l'écart entre les deux courbes serait à attribuer au mode opératoire utilisé par ITALCONSULT lors de l'élaboration de la carte topographique de 1964 (voir précédemment).

Figure 5 : Interprétation des courbes hauteurs-surfaces et hauteurs-volumes de la retenue de Sélingué établies par ITALCONSULT (1964), Carlo Lotti /SOFRELEC et l'IRD (2008)



<sup>4</sup> Les observations de hauteur d'eau faites à la station limnimétrique du barrage ne montrent aucun décrochement depuis 1982.

Avec pour hypothèse majeure un décalage du référentiel altimétrique entre 1964 et 2008, l'examen des courbes H/S et H/V ne montre pas ou peu de modification de la capacité du réservoir et par conséquent aucun comblement sédimentaire marqué. Soulignons que la confirmation d'un décalage du référentiel altimétrique entre 1964 et 2008 serait lourde de conséquence puisqu'elle remettrait en question la gestion actuelle du réservoir. Il conviendrait que des observations de terrain complémentaires soient réalisées, notamment en ce qui concerne le calage de l'échelle limnimétrique par rapport au barrage et à sa cote maximale d'exploitation.

### **3.2. Un scénario de comblement erroné**

L'estimation de la vitesse d'envasement de la retenue faite par Carlo Lotti dans le rapport des Nations Unies de 1973, va à l'encontre des résultats précédents. Selon l'auteur, les sédiments accumulés dans le barrage devraient atteindre la cote 337,5 m, 57 ans après la mise en eau du barrage. Ce résultat est issu d'un calcul simpliste basé sur une accumulation sédimentaire se faisant de manière régulière à partir du pied du barrage. Dans la réalité, les processus de comblement sont beaucoup plus complexes et interviennent sur tout le réservoir et principalement dans les zones les plus à l'amont (à l'exutoire des rivières).

En prenant la valeur de  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sédiments arrivant chaque année dans la retenue, valeur donnée par Carlo Lotti, et en considérant que les apports sédimentaires s'accumulent de manière régulière au pied du barrage, ce qui comme il a été indiqué précédemment est inexact, le niveau des sédiments aurait du atteindre la cote 334,78 m en 2008 (26 ans après la mise en eau du barrage) avec un volume déposé de  $39 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Or, la cote minimale de la retenue observée au pied du barrage en 2008 était proche de 327 m ; niveau équivalent à celui donné par ITALCONSULT en 1964 (« *la cote moyenne du fond est de 328 mètres* »). On peut donc considérer que l'estimation alarmiste faite par Carlo Lotti est erronée.

### **3.3. La faiblesse de l'érosion spécifique du bassin versant**

La mise en perspective des caractéristiques texturales de chaque échantillon et leur site de prélèvement (tableau II), permettent plusieurs constats.

Tableau II : Synthèse texturale des 15 échantillons prélevés dans la retenue entre le 11 et le 18 avril 2008

Echantillon	Argile	Limons	Sables	Définition (selon le diagramme textural de Jamagne)	Lieu de prélèvement
SEL 002	39.7	59.9	0.4	Argile limoneuse	Ancien lit mineur des deux rivières, en amont éloigné et en aval de la confluence
SEL 003	36.4	63.58	0.02	Argile limoneuse	
SEL 006	32.8	49.5	17.9	Argile limoneuse	
SEL 009	32.6	62.3	4.9	Argile limoneuse	
SEL 0015	36.7	62.5	0.8	Argile limoneuse	Amont de la digue de Pontaga (Balé), échantillons récoltés à sec
SEL 0014	30.8	68.3	0.9	Argile limoneuse	
SEL 0013	29.4	67.2	3.4	Limon argileux	
SEL 007	20.1	70	9.9	Limon argileux	Berges des deux rivières
SEL 0012	27.2	72.7	0.1	Limon argileux	Amont immédiat de la confluence, ancien lit mineur des deux rivières
SEL 001	25	38.7	36.3	Limon sablo-argileux	
SEL 0011	26.5	54.1	19.4	Limon argilo-sableux	Berges des deux rivières, à faible profondeur
SEL 008	11	50	39	Limon sableux	
SEL 0010	0.7	0.7	98.6	Sable	Butte résiduelle enoyée (aval confluence)
SEL 005	0.6	0.95	98.45	Sable	Aval immédiat d'un affluent des deux rivières, ancien lit mineur
SEL 004	1.8	4.8	93.4	Sable	

Les échantillons prélevés dans l'ancien lit mineur des rivières, à l'aval immédiat d'un affluent (SEL004ML, SEL005ML), présentent une texture essentiellement sableuse (Laval, 2008). Le diamètre moyen de cette fraction minérale est compris entre 200  $\mu$  et 2000  $\mu$ . Ces sables ont deux origines possibles, potentiellement conjointes : soit ils sont issus de l'action érosive des affluents du Sankarani et du Balé aux abords immédiats du lac, ou bien ce sont des alluvions du lit mineur, préexistantes à l'ennoiement. Il est à noter toutefois que ces alluvions relativement grossières sont nécessairement issues de dynamiques d'érosion locales, affectant les abords de la retenue et de ses affluents.

En effet, les échantillons prélevés à proximité des berges, en zone de très faible profondeur, présentent de même une fraction grossière

conséquente, bien qu'inférieure (50 à 200 $\mu$ ) et davantage mélangée à des argiles et limons.

A ce titre, les échantillonnages effectués à l'amont immédiat de la confluence, dans l'ancien lit mineur des deux rivières, présentent une prédominance (environ de deux tiers) des fractions limoneuse et sableuse. Cette proportion d'éléments moyens à grossiers confirme que le site de la confluence, par la masse d'eau immobile qu'elle représente, joue un rôle de frein aux déplacements des particules les plus grossières.

L'échantillon prélevé à l'aval immédiat de la confluence (SEL010ML) fait figure d'exception : principalement sableux, il a été prélevé au niveau du sommet d'une ancienne butte<sup>5</sup> (préexistante au barrage). Il semble que ce type très grossier d'alluvions soit le résultat de l'érosion du substrat originel.

Au contraire, dans les anciens lits mineurs du Sankarani et du Balé se concentrent, bien qu'en quantités relativement faibles, des dépôts de particules extrêmement fines (argiles limoneuses, entre 2 $\mu$  et 50 $\mu$ ). Ces sédiments fins, piégés dans les parties les plus basses et les plus incisées de la retenue, sont majoritairement issus (comme l'indique leur taille) d'un transport sur de longues distances à l'échelle du bassin versant, et sont mis en mouvement lors de pluies peu violentes et de crues mineures. Ils s'intègrent dans une dynamique sédimentaire de temps long (Droux *et al.*, 2003), du fait des très faibles courants dans la retenue.

Enfin, les échantillons récoltés à sec en amont de la digue de Pontaga (en vue de déterminer le rôle de celle-ci dans la dynamique sédimentaire en amont du Balé), sont des argiles limoneuses en profondeur et des limons argileux en surface.

De prime abord, la digue permettant le passage d'une route au niveau de Pontaga nous est apparue comme un obstacle possible au déplacement de sédiments venus de l'amont. Toutefois, un entretien avec le chef du village de Pontaga nous a appris que l'eau qui envahit la plaine en amont de la digue ne vient que très rarement d'un débordement de la rivière à ce niveau là. La plupart du temps, elle provient de la remontée du lac par les plaines d'inondation, au niveau de passages aménagés à cet effet dans la digue.

De fait, la digue ne constitue pas un obstacle contre lequel les sédiments viennent s'accumuler. Le chef du village, habitant ici depuis plus de 70 ans, n'a pas observé d'exhaussement du niveau de la plaine depuis son arrivée dans le village. L'hypothèse de départ, qui pose la digue comme piège à sédiments, est donc invalidée.

---

<sup>5</sup> Cette butte est nettement visible sur le profil de la figure 4-a, entre 1500 m et 1750 m.

## 4. DISCUSSION

Les faibles dynamiques d'accumulations de sédiments dans le réservoir de Sélingué s'expliquent par l'interaction de plusieurs facteurs. Les apports dans une retenue à l'exutoire d'un bassin versant sont d'abord conditionnés par les caractéristiques spécifiques de ce dernier (superficie, relief, couvert végétal, type de sols, occupation du sol, etc.), ainsi que par des facteurs pluviométriques (hauteur, fréquence, intensité, durée des précipitations, etc.).

### 4.1. Des caractéristiques géologiques et pédologiques du bassin versant de la retenue limitant les processus d'érosion

En premier lieu, le bassin versant du Sankarani se caractérise par une grande superficie, de 34 000 km<sup>2</sup> (soit un quart du bassin versant du Niger guinéen et malien), et de faibles pentes longitudinales moyennes, de l'ordre de 0.68 m/km. Ce relief globalement peu accidenté, qui se présente comme un facteur de limitation de l'érosion, s'inscrit dans le craton précambrien ouest-africain.

La moitié sud du bassin versant est constituée de granito-gneiss du Précambrien inférieur (2,5 milliards d'années), (carte photo-géologique de Yanfolila, au 1/200 000, produite par la DNGM, 1987). Il s'agit de granites dominants qui ont été soumis à un métamorphisme intense avec écrasement et recristallisation ayant conduit à des gneiss dans de très nombreux cas. Lorsque ces granites affleurent, ils subissent une altération caractéristique en boules (Brunet-Moret et *al.*, 1986).

La partie nord du bassin du Sankarani est quant à elle essentiellement constituée de formations du Précambrien moyen (Birrimien), représentées par des roches plus ou moins métamorphosées, allant des schistes argileux aux micaschistes. Au-dessous d'une couche d'altération plus ou moins épaisse, ces roches sont rigoureusement imperméables.

Les terrains birrimiens sont l'objet d'un processus d'altération conduisant à la formation de carapace évoluant en cuirasse lorsqu'elles sont mises à l'affleurement. Cette cuirasse se présente sous un aspect scoriacé dur et imperméable.

Dans ce contexte géologique, les horizons A, qui contiennent les particules mobilisables, sont le plus souvent inexistantes. Les cuirasses ne fournissent que peu de sédiments, même en période de fortes pluies tropicales.

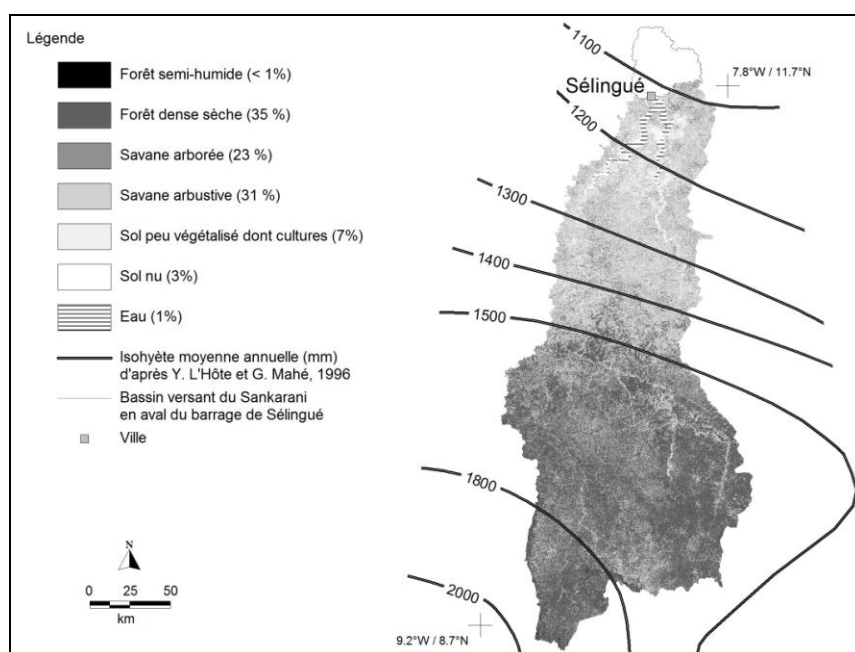
De fait, aux abords immédiats de la retenue, comme dans le reste du bassin versant, les socles rocheux présentent des caractéristiques de résistance particulière aux différents agents d'érosion. Dans tous les cas, les processus de dégradation de ces roches sont extrêmement longs à l'échelle des temps

géologiques. Ils ne peuvent constituer un facteur d'envasement notoire et rapide de la retenue, dont la mise en eau remonte à un quart de siècle.

#### 4.2. Un couvert végétal protecteur

A l'échelle du bassin versant du Sankarani, comme dans bien des contrées de l'Afrique de l'Ouest, une remarquable zonation latitudinale en relation avec le gradient pluviométrique fait se succéder différentes formations végétales, d'autant plus reconnaissables que, comme on le verra, la faible pression démographique a peu modifié ce bel ordonnancement. L'extrémité sud du bassin touche à peine, aux latitudes soudano-guinéennes, les formations de forêts semi-humides (moins de 1% de la superficie du bassin), recevant près de 2 m de précipitations en moyenne interannuelle. Mais l'essentiel du bassin correspond au faciès sud-soudanien typique de la forêt dense sèche (35%), davantage affectée toutefois dans la moitié nord du bassin où elle est remplacée par des savanes arborées (23%) puis arbustives (31%), ces dernières typiques des paysages soudaniens (fig. 6). Quoiqu'il en soit, on peut dire que plus de la moitié du bassin est pénestable du point de vue de l'hydrodynamique de surface et ceci quelle que soit l'agressivité potentielle des précipitations.

Figure 6 : Couverture végétale sur le bassin versant et précipitations moyennes interannuelles



D'après les données de D. Ruelland *et al.*, 2008, et L'Hôte et Mahé, 1996

La faiblesse du ruissellement élémentaire et plus encore de l'érosion associée, du fait du piégeage des particules, explique en très grande partie les faibles processus de colmatage dans la retenue, ce facteur étant lui-même en corrélation étroite avec la faible densité de population.

#### **4.3. Une occupation humaine limitée, mais facteur de fragilisation des sols**

La densité du couvert végétal, importante sur la majeure partie du bassin du Sankarani, est néanmoins plus faible aux abords immédiats du lac, du fait d'une densité de population plus élevée.

La densité moyenne actuelle de la population dans la région de Sélingué est de 10 à 20 habitants par km<sup>2</sup> (Ferry *et al.*, 2012). L'augmentation de la population autour de la retenue entre 1976 et 1998 (de l'ordre de 60%) correspond davantage à l'arrivée de pêcheurs bozos venus du delta intérieur du Niger qu'à l'augmentation de la population d'agriculteurs (ODRS, 2003), ce qui tend à limiter son impact sur la dégradation des sols.

De plus, seules les berges du lac sont propices à la culture, lorsque l'eau se retire en saison sèche. Les rares espaces cultivés présents autour du lac sont des casiers de culture de décrue.

Au contraire, l'activité pastorale engendre sur les abords du lac une forte dégradation du milieu, par la pratique des feux de brousse pendant la saison sèche, afin de provoquer une petite repousse de graminées pour le bétail.

De même, l'activité aurifère, souvent pratiquée de manière artisanale par les habitants de la région, contribue fortement à la dégradation végétale et géomorphologique de certains secteurs du bassin. Les orpailleurs extraient la terre des trous creusés dans le sol, la chargent dans des calebasses et vont la laver dans une rivière à proximité et parfois même directement dans le lac. Toutes ces pratiques (fouille, extraction, transport, lessivage) entraînent d'une part une dégradation majeure du substrat, mais aussi un apport direct de sédiments dans le lac et ses affluents.

#### **4.4. Un contexte hydro-météorologique pourtant agressif**

Le bassin versant du Sankarani est, dans sa plus grande partie, sous l'influence du climat soudano-guinéen, passant progressivement vers le nord au climat soudanien (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Il s'agit de deux variantes du climat tropical caractérisé par une saison sèche de novembre à mai, et une saison humide de juin à octobre.

La pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1951-1989 s'élève à 1370 mm sur le bassin versant du Sankarani. La région de Sélingué

proprement dite reçoit quant à elle en moyenne un peu moins de 1 100 mm de pluie par an. Toutefois, l'action érosive des précipitations dépend davantage de l'agressivité des pluies que du volume total précipité. L'agressivité d'une pluie se mesure par son intensité (volume précipité / durée). Or, au niveau du bassin du Sankarani, les précipitations journalières correspondent principalement à des averses dont la durée excède rarement 24h. On distingue deux types d'averses :

- les averses à caractère de tornades, dont l'intensité maximale peut varier entre 40 et 100 mm/h et dure entre 5 et 30 minutes. La traîne de la tornade présente une intensité moindre (de 15 à 30 mm/h diminuant progressivement) mais une durée plus longue (de 30 minutes à 2 heures). Ces averses de forte intensité ont, dans le milieu soudano-guinéen, un impact limité du fait de la densité du couvert végétal.
- les averses à caractère continu, appelées « pluies de mousson ». Ces dernières durent plusieurs heures, avec des intensités moyennes modérées, les pointes n'excédant que rarement 80 mm/h (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

Ainsi, malgré les pluies occasionnelles d'intensité élevée, la faible densité de population et le caractère limité de la mise en culture concourent à réduire de manière significative l'érosion à l'échelle du bassin, ce qui expliquerait en grande partie la très faible présence de sédiments dans la retenue de Sélingué.

Toutefois, il s'avère impossible au terme de cette étude de fournir des données de grande précision sur le volume exact de sédiments cumulés dans le réservoir, du fait de plusieurs limites méthodologiques.

## CONCLUSION

En conclusion, l'accumulation sédimentaire prévue par les Nations Unies en 1973 ne s'est pas produite, et se présente même comme un phénomène marginal.

Les phénomènes d'accumulation sédimentaire dans la retenue sont faibles, voire imperceptibles, 32 ans après sa mise en eau. Les marges d'erreurs induites envisagées ne suffisent pas à rendre ce résultat incertain.

En outre, les données surfaciques et volumiques concernant la retenue ont été actualisées. Or la connaissance de la capacité réelle (et actuelle) de la retenue à ses différents niveaux de remplissage est indispensable aux multiples gestionnaires, afin de concilier leurs divers intérêts et de mettre en place une gestion concertée de la ressource. En outre, la très faible vitesse d'envasement du barrage est une excellente nouvelle pour les utilisateurs et les gestionnaires de la retenue, pour qui cette ressource est vitale, mais elle

constitue de même un défi puisqu'elle conduit à repenser la gestion de la ressource en eau et de l'aménagement pour les divers usages.

### **Remerciements**

Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre du projet « Niger-Loire : gouvernance et culture » ; projet piloté par l'UNESCO et bénéficiant du soutien de la Commission Européenne, que les auteurs tiennent à remercier.

### **BIBLIOGRAPHIE**

BARBIER (B.), YACOUBA (H.), MAÏGA (A.H.), MAHE (G.) et PATUREL (J.E.), 2009. « Le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l'Ouest : les perspectives et les enjeux ». *In Géocarrefour*, n° 84-1-2/2009, pp. 31-41.

BRUNET-MORET (Y.), CHAPERON (P.), LAMAGAT (J.P.), MOLINIER (M.), 1986. *Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome 1 : Niger Supérieur*, collection Monographies hydrologiques, 396 p.

CREMIN (E.), 2009. « Les temples de l'Inde moderne » : un grand barrage dans un lieu saint de la Narmada (Madhya Pradesh) ». *In Géocarrefour*, vol 84-1-2/2009, pp. 83-92.

Direction Nationale de la Géologie et des Mines (DNGM), 1987- *Carte photogéologique du Mali occidental au 1/200 000, secteur de Yanfolila*. Bamako.

DROUX (J. P.), MIETTON (M.), OLIVRY (J.C.), 2003. « Flux de matières particulières en suspension en zone de savane soudanienne : l'exemple de trois bassins versants maliens représentatifs ». *In Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 9, n°2, pp 99-110.

FERRY (L.), MUTHER (N.), COULIBALY (N.), MARTIN (D.), MIETTON (M.), CISSÉ COULIBALY (Y.), OLIVRY (J.C.), PATUREL (J.E.), BARRY (M.A.), YENA (M.), 2012. *Le fleuve Niger de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien. Les grands traits des régimes hydrologiques*. IRD, UNESCO, 50 p.

FERRY (L.), MIETTON (M.), MUTHER (N.), MARTIN (D.), COULIBALY (N.), LAVAL (M.), BASSELOT (F.X.), CISSÉ COULIBALY (Y.), COLLIERIE (M.), DE LA CROIX (K.), OLIVRY (J.C.), 2012. « Extraction de sable et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali) ». *In Géomorphologie : relief, processus, environnement*, à paraître n° 3, septembre 2012.

GRESILLON (J. M.), REEB (J.), 1981. « Eléments pour l'appréciation des dépôts solides dans les barrages de Haute Volta. Contribution à l'étude des petits barrages ». In *Bulletin technique n° 5 de l'Ecole Inter-Etats de l'Equipement Rural, EIER*, Ouagadougou, Burkina Faso, 6 p.

ITALCONSULT, 1964. *Etude préliminaire du barrage réservoir de Sélingué*. Rome, 6 volumes.

KUPPER (M.), HASSANE (A.), ORANGE (D.), CHOHN-KUPPER (A.), SOW (M.), 2000. « Régulation, utilisation et partage des eaux du fleuve Niger. Impact de la gestion des aménagements hydrauliques sur l'Office du Niger et le delta intérieur du Niger au Mali ». In *Colloques et séminaires*, IRD, Paris, pp 411-430.

LAVAL (M.), 2008. *Etude bathymétrique de la dynamique sédimentaire dans le barrage réservoir de Sélingué sur la Sankarani (Mali)*. Mémoire de Master 2 Recherche interface nature-sociétés, Université Lyon 3 – IRD de Bamako, 97 p.

L'HOTE (Y.) et MAHE (G.), 1996. *Carte des précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) de l'Afrique de l'ouest et centrale au 1/6000000*. ORSTOM Editions, Paris.

Mc ALLISTER (D.E.), CRAIG (J.F.), DAVIDSON (N.), DELANY (S.), SEDDON (M.), 2001. *Biodiversity impacts of large dams*. IUCN, UNEP, UNF, 47 p.

MIETTON (M.), 1986. « Les données de l'érosion sur bassins-versants au Burkina Faso (ex Haute-Volta) » in *Revue de géographie alpine* n° 74-1-2, pp 119-127.

NATIONS UNIES, 1973. *Reconnaissance sur le site du barrage de Sélingué sur le fleuve Sankarani (Mali), Rapport final, Annexe 2 Hydrologie*. Carlo Lotti & Co., Rome.

Netherlands Engineering Consultants (NEDECO), 1959. *River studies and recommendations on improvement on Niger and Benue*. Amsterdam, 1000 p. and maps.

Office de Développement Rural de Sélingué (ODRS), SNC-LAVALIN, 2003. *Etude du bilan environnemental du barrage de Sélingué – Phase 2 : Suivi des indicateurs d'impact*. 142 p.

REMINI (W.), REMINI (B.), 2003. « La sédimentation dans les barrages d'Afrique du Nord » in *Larhyss Journal*, n°2, pp 45-54.

RUELLAND (D.), DEZETTER (A.), PUECH (C.), ARDOUIN-BARDIN (S.), 2008. « Long-term monitoring of landcover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modeling ». In *West Africa. International Journal of Remote Sensing* n° 29, pp. 3533-3551.

UNESCO, 2006. *Rapport régional Afrique du 4<sup>ème</sup> forum mondial de l'eau*. Mexique, p 37.

World Commission on Dams (WCD), 2000. *Dams and development: a new framework for decision –making*. WCD, London, 356 p.