



Faiblesse de la sédimentation dans le
barrage-réservoir de Sélingué
(Mali-Guinée)
Témoin de la stabilité des savanes
sud-soudaniennes à l'échelle d'un
grand bassin versant très peu
anthropisé

Luc Ferry, Michel Mietton,
Kenji Fujiki, Myriam Laval,
N'Tjie Coulibaly, Nadine Braquet,
Didier Martin



G-Eau Working Paper/Rapport de Recherche No. 5a

Faiblesse de la sédimentation dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali-Guinée) Témoin de la stabilité des savanes sud-soudaniennes à l'échelle d'un grand bassin versant très peu anthropisé

Luc Ferry, Michel Mietton, Kenji Fujiki, Myriam Laval, N'Tjie Coulibaly,
Nadine Braquet, Didier Martin

Publication Janvier 2018

Ferry, L.; Mietton, M.; Fujiki, K.; Laval, M.; Coulibaly, N.; Braquet, N.; Martin, D.. 2018. Faiblesse de la sédimentation dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali-Guinée). Témoin de la stabilité des savanes sud-soudaniennes à l'échelle d'un grand bassin versant très peu anthropisé. G-Eau Working Papers No.5a. Montpellier, France.

<http://www.g-eau.net/>

Copyright 2018, by G-Eau. All rights reserved. G-Eau encourages the use of its material provided that the organization is acknowledged and kept informed in all such instances.

Les auteurs

Luc Ferry, Nadine Braquet, Didier Martin

Institut de Recherche pour le Développement (IRD). UMR G-Eau. 361, rue JF Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France.

Michel Mietton, Kenji Fujiki, Myriam Laval

Université Lyon III, CNRS UMR 5600 CRGA. 18, rue Chevreul, 69362 Lyon Cedex 07, France.

N'Tjie Coulibaly

Direction Nationale de l'Hydraulique. Square Patrice Lumumba, BP 66, Bamako, Mali.

Résumé

Les dynamiques hydromorphogéniques au sein des bassins versants 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, Guinée), contrairement aux estimations antérieures à la construction du barrage, par constitution d'une nouvelle carte topographique du réservoir permettant une réévaluation de sa capacité de stockage. Arrivant en complément de nombreux travaux sur la dégradation spécifique de grands bassins versants généralement hétérogènes, elle permet, sur un grand bassin remarquablement homogène par sa couverture végétale, une appréciation originale du fonctionnement hydrodynamique d'un milieu bioclimatique donné, le caractère primordial de facteurs tels que le couvert végétal ou son corollaire l'occupation humaine dans ces processus.

Mots clés

Profils bathymétriques, sédimentation, réservoir, dégradation spécifique, climat sud-soudanien, forêts denses sèches, savanes, densité de population, barrage de Sélingué, bassin-versant du Sankarani, Mali, Guinée

Remerciements

Les travaux présentés s'appuient sur une recherche réalisée en 2008 par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), l'Université Lyon3 J. Moulin (UMR 5600) et la DNH-Mali (Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali) 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.

1 Introduction

Face à une pression anthropique et une demande en eau sans cesse croissantes, avec 9 milliards d'habitants dans le monde à l'horizon 2050 et une augmentation de la demande en eau estimée de 2 à 3% par an au cours des prochaines décennies (International Commission on Large Dams, 2015), les barrages-réservoirs ont constitué et constituent encore aujourd'hui une réponse pour assurer les besoins quotidiens des populations ; ces barrages visant essentiellement à assurer la fourniture d'énergie hydro-électrique et d'eau à fins d'irrigation ou domestique. Au sein des barrages-réservoirs se distinguent les grands barrages, qui ont une hauteur minimale de 15 mètres. La base de données la plus complète (International Commission on Large Dams, 2015) signale l'existence, dans le monde, de 58 266 barrages pour une capacité de réservoir agrégée théorique de 15956 km³. Ce sont les barrages les plus volumineux qui représentent la part la plus importante du stockage en eau dans le monde. Ainsi, les 633 très grands réservoirs recensés par Vörösmarty *et al.* (1997), d'une capacité au moins égale à 0,5 km³ (soit 500 millions de m³), comprennent à eux seuls 60% du stockage artificiel d'eau dans le monde.

Sur un plan géographique, l'Afrique subsaharienne a ses spécificités face à la problématique des grands barrages :

- (1) D'abord, face à un aléa climatique tropical ou subtropical marqué par une répartition très irrégulière des précipitations, les barrages-réservoirs permettent d'assurer une disponibilité plus régulière de l'eau. Cette répartition inégale des précipitations, sensible à l'échelle intra-annuelle, l'est également à l'échelle interannuelle : en Afrique de l'Ouest en particulier, la seconde moitié du XXe siècle est marquée par des épisodes sévères de sécheresse climatique (Paturel *et al.*, 2011).
- (2) Ensuite, du fait d'une croissance importante de la population et des besoins agricoles, domestiques et énergétiques dans un contexte de pays en développement, les barrages-réservoirs apparaissent comme un vecteur potentiel de développement socio-économique.
- (3) Enfin, les grands barrages-réservoirs africains sont généralement plus jeunes, avec un âge moyen de 40 ans contre 50 à l'échelle mondiale (Wisser *et al.*, 2013), et plus volumineux. avec de très grands réservoirs, dont la capacité est en moyenne deux à sept fois plus importante que sur les autres continents, avec la seule exception nord-asiatique (Vörösmarty *et al.*, 1997).

La construction des grands barrages a connu un pic au cours des années 1960 et 1970, avec 150 km³ de capacité agrégée construits par an, avant de chuter jusqu'à se stabiliser à 15 km³ au cours des années 2000 (Wisser *et al.*, 2013). La chute des financements s'explique par la remise en cause des grands barrages, pour des raisons relatives à leur durabilité et aux externalités négatives qu'ils impliquent ; des préoccupations d'ordre environnemental (Mulholland *et al.*, 1982 ; Mc Allister *et al.*, 2001 ; Vörösmarty *et al.*, 2003 ; Parekh, 2004 ; Amegashie *et al.*, 2011 ; Wisser *et al.*, 2013), social et culturel (World Commission on Dams, 2000 ; Cremin, 2009), mais aussi économique (Manatunge *et al.*, 2009 ; Barbier *et al.*, 2009 ; Richter *et al.*, 2010) ont en effet émergé dans les années 1990, et demeurent prégnantes aujourd'hui encore dans la recherche et le débat public (Alhassan, 2009 ; Moore *et al.*, 2010). Mais si les barrages-réservoirs voient leur durabilité remise en cause, ce n'est pas seulement du fait de ces externalités négatives mais aussi et surtout pour leur durée de vie, commandée et limitée par la sédimentation (Palmieri *et al.*, 2001) qui est ici notre objet d'étude. Les barrages-réservoirs contrôlent en effet de larges portions des bassins versants à l'échelle mondiale, et interceptent de fait une part non négligeable des sédiments mobilisés par l'érosion (Syvitski *et al.*, 2005 ; Walling, 2006) : cette part demeure difficile à mesurer du fait de nombreuses incertitudes (Walling, 2012) ; toutefois, d'après Vörösmarty *et al.* (1997), de 16% à 25% de la matière en suspension serait interceptée, dans le monde, par les barrages-réservoirs. Cette interception entraîne des pertes annuelles de la capacité théorique des réservoirs qui font l'objet d'estimations très variables à l'échelle mondiale : la plus connue est celle fournie par la World

Commission on Dams (2000) qui donne un intervalle de pertes annuelles compris entre 0,5% et 1%. Les estimations du modèle de simulation de transferts sédimentaires développé par Wisser *et al.* (2013) donnent des valeurs inférieures : le modèle, appliqué à 6399 grands réservoirs d'une capacité totale théorique de 5990 km³, exprime des pertes annuelles moyennes de 0,64% par réservoir, mais de 0,13% si la moyenne est pondérée par la capacité de chaque réservoir. Subséquemment, d'après Wisser *et al.* (2013), 5% de la capacité théorique des réservoirs a été perdue, par sédimentation, à l'échelle mondiale ; cette valeur monte à 10% chez d'autres auteurs (White, 2001).

Ces estimations à l'échelle mondiale doivent être affinées aux conditions locales, très variables, et appellent donc à des études de cas sur sites. Les analyses de comblement sédimentaire au sein des réservoirs et plus largement des rythmes de sédimentation au sein des grands bassins versants ont été regroupées pour l'ensemble de l'Afrique par Vanmaercke *et al.* (2014). Ces données demeurent relativement rares, aujourd'hui encore, en Afrique subsaharienne, à l'exception du Burkina Faso et du Mali mais sur de petits bassins versants (Mietton, 1986 ; Droux *et al.*, 2003). Ces évaluations appellent à être approfondies, en bénéficiant des progrès techniques importants qui ont été faits dans l'analyse du comblement sédimentaire des réservoirs.

2 Problématique de recherche

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'étude présentée dans cet article qui porte sur la dynamique sédimentaire du réservoir du barrage de Sélingué, au sud-ouest du Mali. Il s'agit d'une retenue mise en eau en 1982, sur le Sankarani, affluent de rive droite du Niger supérieur guinéen et malien (figure 1). L'étude de la retenue vise à répondre à plusieurs interrogations qui s'inscrivent à différentes échelles :

- (1) Il s'agit tout d'abord d'évaluer avec précision la capacité de stockage en eau de la retenue en prenant en compte la dynamique de sédimentation sur le long terme afin de fournir des éléments précis et solides pour une gestion de la ressource par les acteurs concernés, qui ne peuvent s'appuyer sur aucune estimation récente de la sédimentation. Pour cela, il s'est avéré nécessaire d'opérer une mise à jour des données élaborées en 1964 par Italconsult, bureau d'étude italien auteur des études préliminaires à la construction du barrage de Sélingué, complétées en 1973 par les Nations Unies ; cette mise à jour est d'autant plus nécessaire que la cote maximale de remplissage du barrage est passée de 348,5 m à 349 m en 1998, en vue d'augmenter la capacité du réservoir (Touré, 2004).
- (2) Il s'agit ensuite de vérifier a posteriori la pertinence des estimations de vitesse de sédimentation élaborées par Italconsult (1964) puis par les Nations Unies (1973), estimations émettant l'hypothèse d'une sédimentation de la retenue jusqu'à la cote 337,5 m en 57 ans, soit 1 500 000 m³ de sédiments déposés par an dans le réservoir (Nations Unies, 1973).

A ce titre, cette étude s'adresse aux différents gestionnaires de la retenue tels que EDM (Energie du Mali) et la DNH-Mali (Direction Nationale de l'Hydraulique du 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. Ces quatre objectifs peuvent déboucher sur des conflits d'usage entre les acteurs du barrage (Kupper *et al.* 2000), ce qui appelle une connaissance d'autant plus fine du fonctionnement du réservoir et de sa capacité, elle-même fonction de la vitesse de sédimentation.

- (3) De manière plus fondamentale, 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, un de ses principaux affluents, permettant de mieux cerner les facteurs conditionnant ces dynamiques sédimentaires. Le bassin versant du Sankarani est un objet d'étude d'autant plus

intéressant que sa couverture végétale est homogène, composé pour neuf dixièmes de savanes boisées et forêts denses sèches, et permet donc d'illustrer de façon représentative, sur un bassin de grande taille, la vitesse de sédimentation dans un milieu bioclimatique donné, ici la savane sud-soudanienne.

3 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 (Figure 1). C'est, aujourd'hui, le seul grand barrage de la partie amont du bassin du Niger supérieur guinéen et malien, bien que de nombreux autres projets soient à l'étude (Mahe *et al.*, 2011). Le bassin versant du Sankarani à Sélingué couvre une superficie de 32 140 km², 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 km² et d'une capacité de 2,7 milliards de m³ (voir en annexes). Sa profondeur maximale est de 22 m au pied du barrage (IRD, 2008 ; Laval, 2008).

Le bassin versant du Sankarani s'inscrit dans une région de climat tropical, marqué par une saison sèche d'octobre à mai et une saison humide concentrant l'essentiel des précipitations annuelles, qui s'élèvent dans ce domaine sud-soudanien à 1370 mm en moyenne sur la période 1951-1989 ; le bassin versant s'inscrivant entre les isohyètes 1100 mm dans la région de Sélingué et 2000 mm à l'extrême-sud. Ce rythme tropical se retrouve dans un régime hydrologique contrasté, avec de hautes eaux (moyennes des débits moyens journaliers supérieurs à 800 m³/s) de mi-août à mi-septembre, et des basses eaux prolongées et très creusées de novembre à mi-juillet, le plus souvent inférieurs à 200 m³/s, pour la période avant-barrage 1964-1980. Sur cette station du Sankarani, située à 1 kilomètre en aval du barrage, l'influence de ce dernier se fait évidemment sentir depuis 1982, du fait d'un turbinage constant, par écrêtement des crues (du moins avant le remplissage du réservoir) et soutien des étiages, et aussi par un retard d'un mois (mi-juillet/mi-août) du début de la crue, lié au remplissage du réservoir (Figure 2).

A l'échelle du bassin, dont la retenue de Sélingué constitue l'exutoire, la densité du couvert végétal croît rapidement du nord au sud, composée essentiellement de savanes soudanaises, arbustives et arborées, de savanes boisées ou forêts denses sèches sud-soudanaises, et à l'extrême-sud de forêts soudano-guinéennes (Figure 3). 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.

Avec une densité moyenne de 11 habitants par km², le bassin versant du Sankarani est très peu peuplé. La population du bassin se concentre principalement sur les bords du lac, pratiquant la pêche, l'élevage extensif et l'agriculture de décrue. Cette occupation est toutefois potentiellement source de dégradations aux abords immédiats de la retenue.

Figure 1 : Localisation du bassin versant du Sankarani et du barrage de Sélingué (d'après Ferry et al., 2012b) et précipitations moyennes interannuelles (d'après L'Hôte et Mahé, 1996).

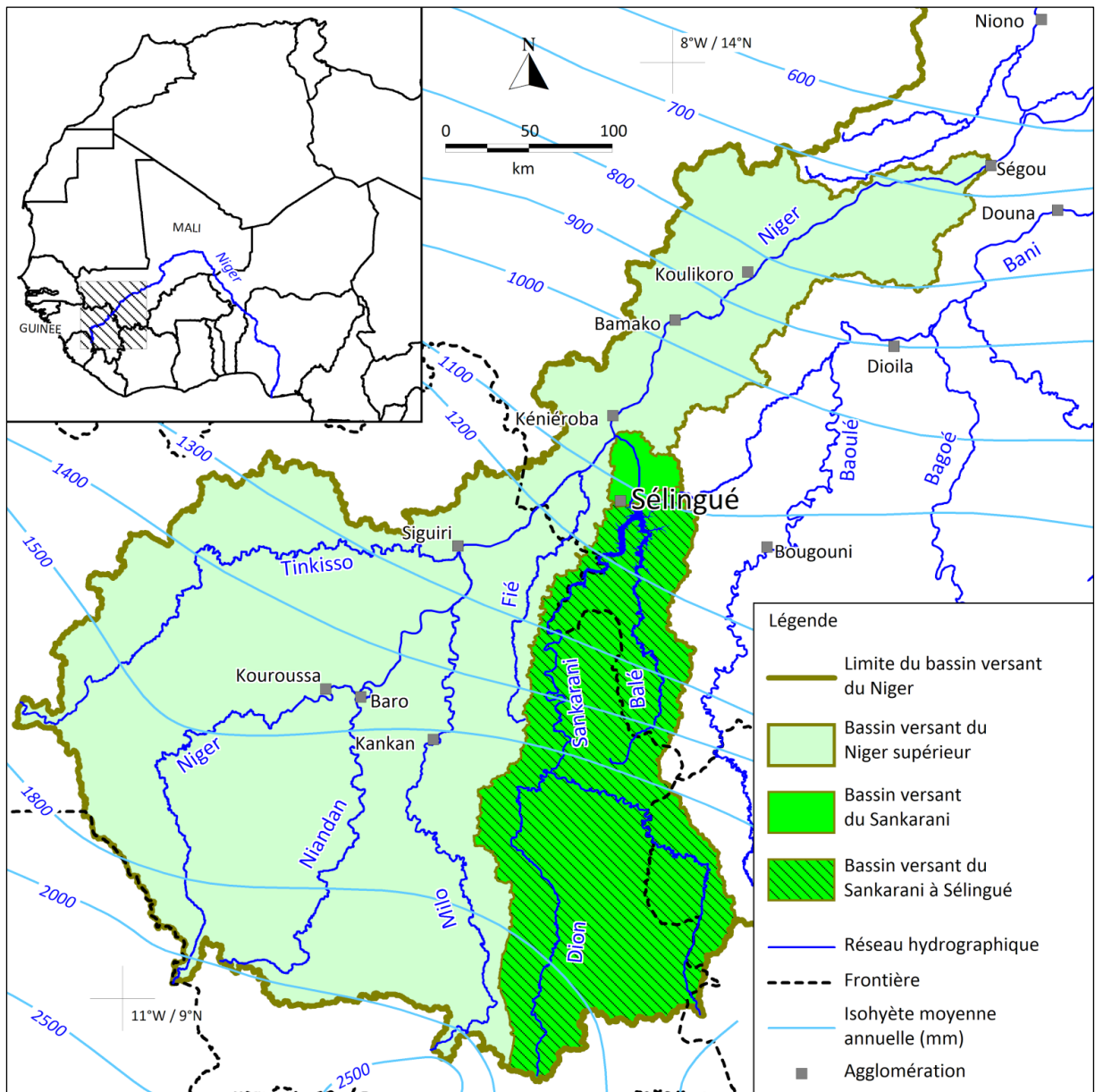


Figure 2 : Débits moyens journaliers et exemples de débits maximums journaliers à Sélingué avant (régime naturel) et après construction du barrage – Volume moyen du réservoir (hm³)

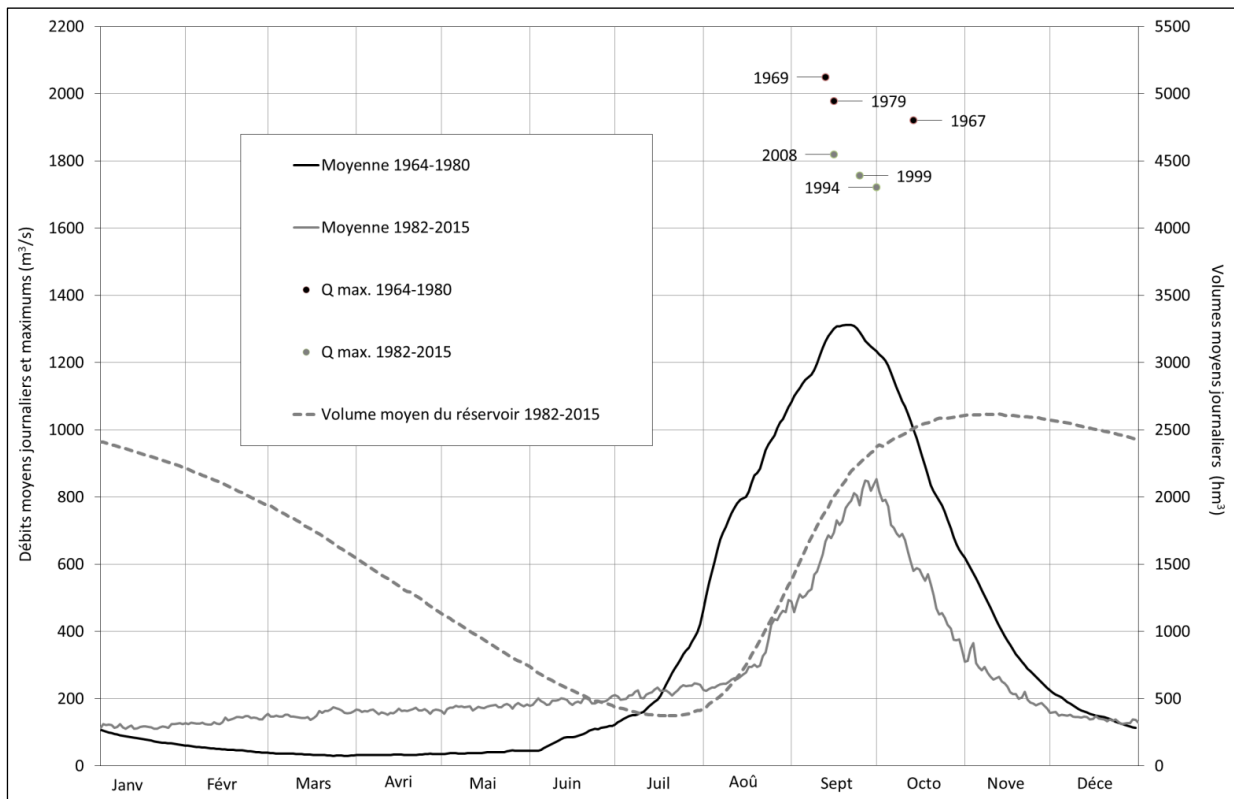
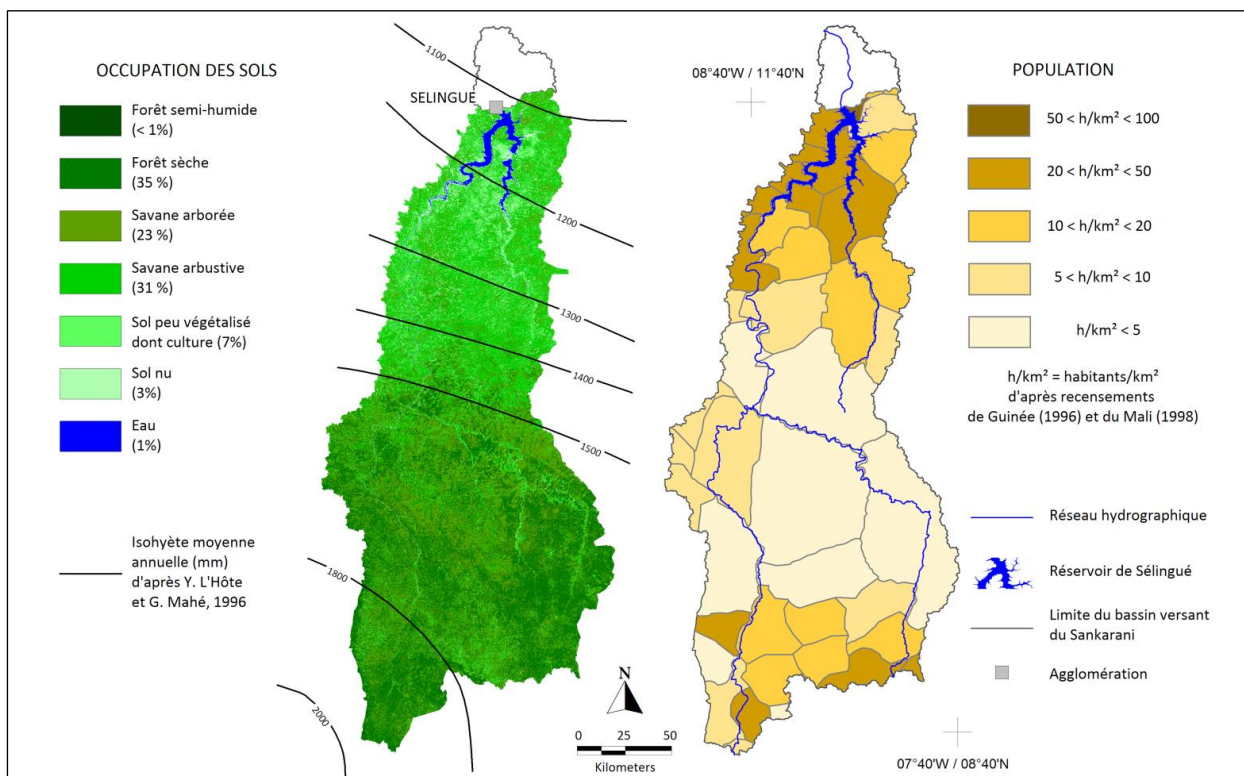


Figure 3 : Occupation des sols, précipitations moyennes interannuelles et population sur le bassin versant du Sankarani (d'après les données de D. Ruelland et al., 2008, L'Hôte et Mahé, 1996, et recensements généraux des populations de Guinée (1996) et Mali (1998)).



4 Méthodologie

Après un rappel des différentes méthodes de mesures du comblement des réservoirs, la méthodologie retenue ici est développée, précisant le choix de sondages bathymétriques, leur densité mais aussi leurs limites.

4.1 La collecte des données bathymétriques

Les travaux existants visant à mesurer la sédimentation des réservoirs s'appuient sur des méthodes très diverses, parmi lesquelles :

- (1) L'étude topographique des retenues (Haregeweyn *et al.*, 2012), qui consiste à établir une carte bathymétrique du réservoir à une date donnée et à comparer cette dernière à une carte précédemment établie afin d'établir par différence le volume de sédiments déposés dans un intervalle de temps connu.
- (2) L'étude de la charge sédimentaire à l'entrée et à la sortie d'un réservoir, par l'intermédiaire de stations de jaugeage. Elle présente l'inconvénient de ne mesurer qu'une matière en suspension, et non la charge de fond (Jansson, 1988). Cette mesure est en outre plus ou moins discontinue dans le temps et peut ne pas être effective au moment des transports de crue les plus efficaces. Dans le cadre de notre étude, la mesure supposerait des jaugeages en entrée non pas sur un seul cours d'eau mais sur deux (Balé et Sankarani, ce dernier en position frontalière !)
- (3) L'étude par télédétection permet quant à elle de déterminer l'évolution de l'étendue d'eau entre deux dates, à un même niveau de remplissage (Goel *et al.*, 2002) et d'en déduire l'évolution de la sédimentation.
- (4) La mise en place de fosses à échantillons réparties uniformément au fond du réservoir, qui permet de mesurer le remplissage des fosses entre deux dates et la composition des sédiments (Ermias *et al.*, 2006).

Ces méthodes peuvent être combinées : par exemple, Roca (2012) combine sondages bathymétriques et données issues de stations de jaugeage pour l'étude du barrage de Tarbela au Pakistan. Les résultats obtenus par l'une ou l'autre méthode peuvent ensuite être extrapolés à d'autres réservoirs non observés directement, par l'intermédiaire de modèles *ad hoc*, comme ont pu le faire Wisser *et al.* (2013) ou Minear et Kondolg (2009).

Pour la présente étude, c'est la première méthode qui a été retenue, du fait que c'est une méthode bien documentée, très tôt décrite par Eakin (1936) mais qui a bénéficié de progrès technologiques récents importants ; aux sondages manuels ont succédé en effet des techniques sophistiquées, fondées sur des échosondages permettant de dresser de véritables profils bathymétriques (Dunbar *et al.*, 1999). C'est une méthode plus précise et moins aléatoire que les jaugeages de débits solides en suspension puisque la charge de fond est également prise en compte et qu'elle permet de considérer sur un temps long la mesure de la sédimentation, intégrant mieux ainsi les discontinuités de transfert des sédiments et les variations consécutives interannuelles significatives du taux de dégradation spécifique (Vanmaercke *et al.*, 2012). Enfin, à l'inverse de la télédétection, elle permet de prendre en compte les parties les plus basses qui restent en eau, les plus intéressantes pour l'évaluation de la sédimentation.

A Sélingué, 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 échosondeurs 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 en suspension 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.

Vingt-neuf jours de terrain ont permis la réalisation de 427 enregistrements bathymétriques, soit 732 km de profils transversaux (tous les 500 m environ) et longitudinaux (Figure 4) et la collecte de 4163 points GPS, dont 3015 de mesures ponctuelles de profondeur.

Figure 4 : Localisation des profils réalisés par l'IRD en 2008 (IRD, 2008).

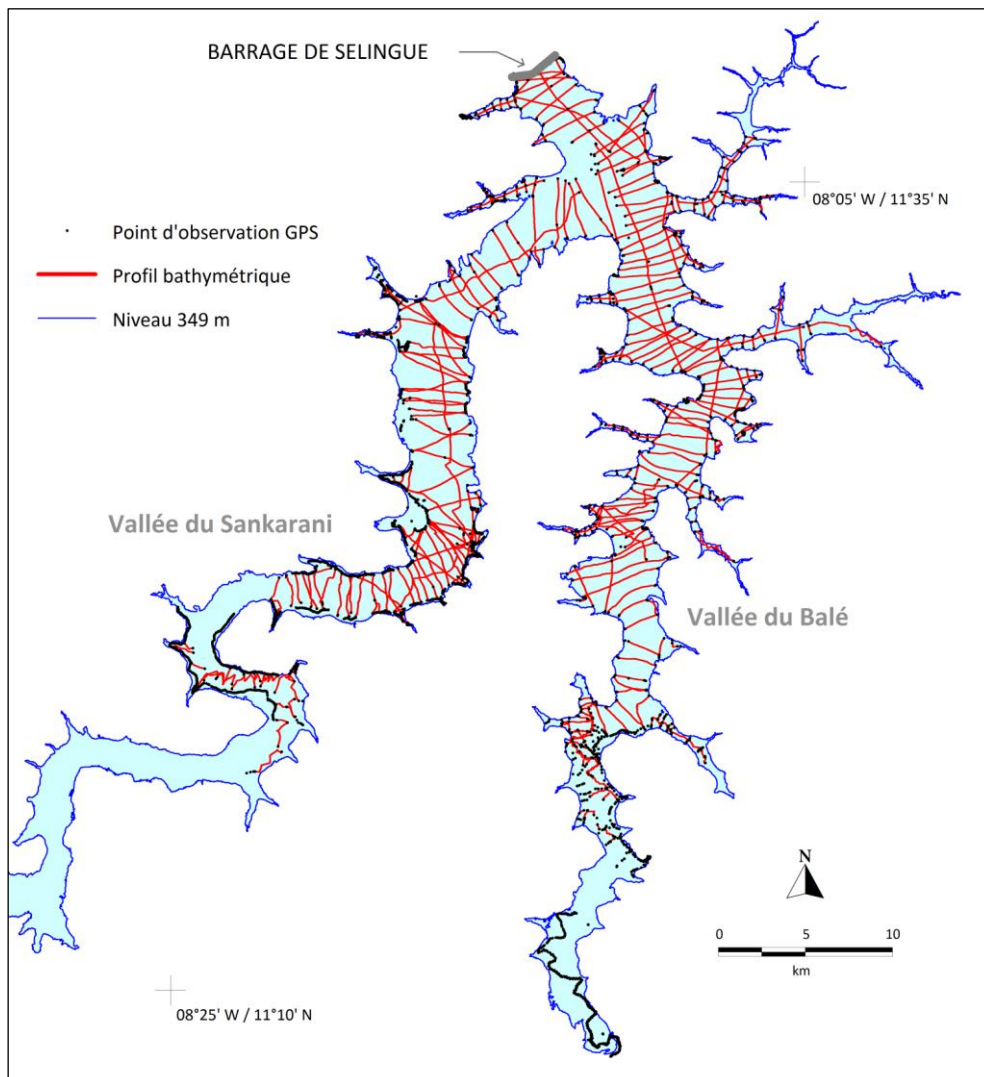
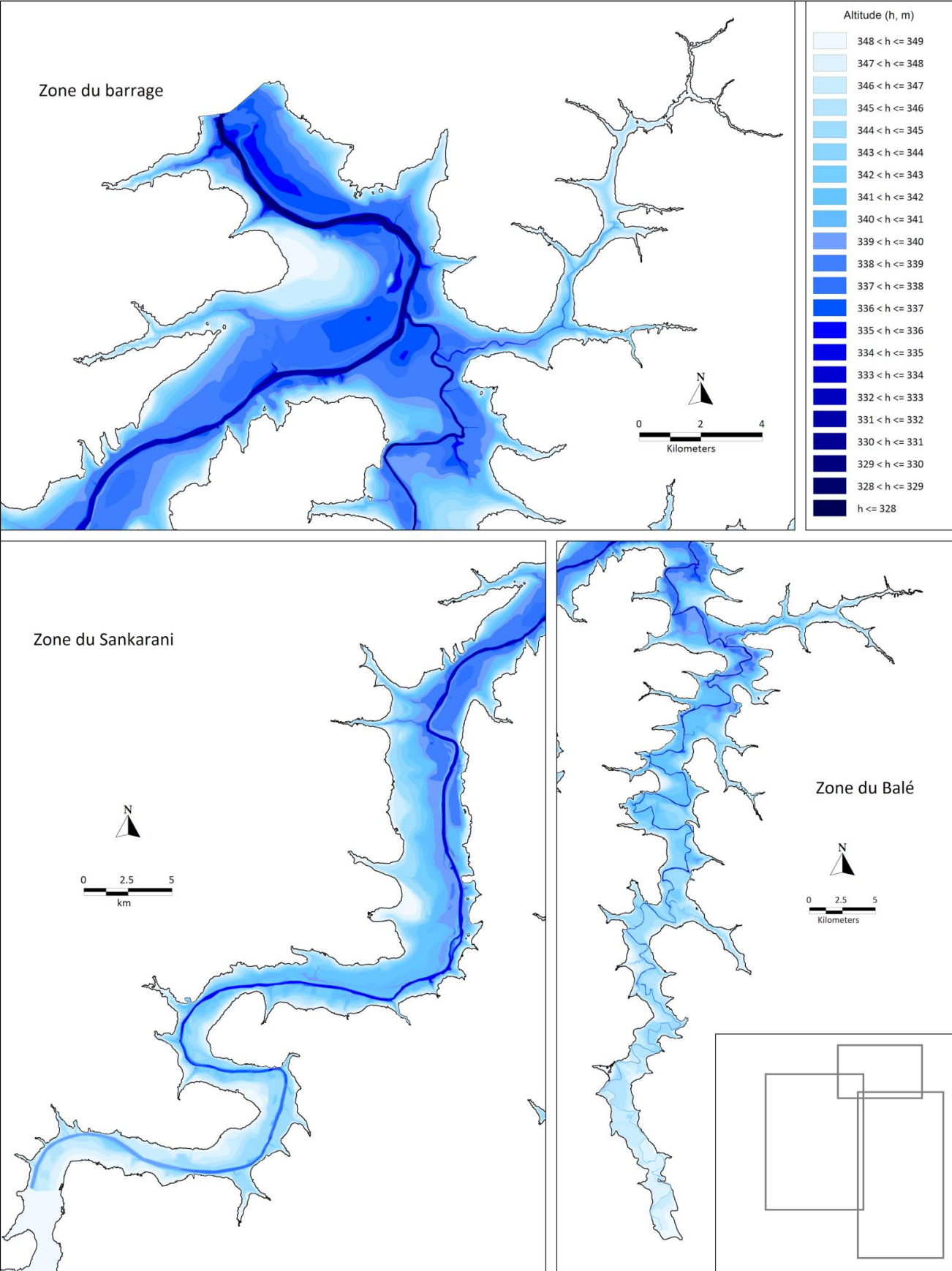


Figure 5 : Topométrie de la retenue de Sélingué (IRD, 2008)



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 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 5. Cette figure de la topographie contemporaine du réservoir a été comparée aux cartes topographiques de la cuvette produites en 1964 par Italconsult.

4.2 Les limites et les points forts méthodologiques

Il convient d'abord de rappeler les approximations que comportent les études préliminaires d'Italconsult. En premier lieu, la méthode de réalisation de la carte topographique de 1964, par interprétation stéréoscopique de photographies aériennes, 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 a pu être prise en compte l'épaisseur de la canopée. Ne disposant pas des photographies aériennes de l'époque, l'importance de la couverture forestière et de savane de l'époque ne peut être déterminée. Toutefois, la fréquence des arbres morts, dépassant parfois de 10 m au-dessus du plan d'eau, fournit un indice quant à la présence d'un couvert végétal arboré (forêt-galerie) antérieurement à la mise en eau du barrage. Deuxième point critique : la carte produite par Italconsult ne présente pas les courbes de niveau au-dessus de la cote altimétrique 347 m, tandis que le niveau maximal de la retenue s'élève depuis 1998 à 349 m. Enfin, l'extrapolation de la vitesse de sédimentation dans le réservoir de Sélingué faite par les Nations Unis en 1973, en complément des résultats d'Italconsult de 1964, n'a été établie qu'à partir de 10 mesures de matières en suspension sur des échantillons prélevés en amont du réservoir de Sélingué et aussi de données collectées par Nedeco sur le Niandan (Figure 1), à Baro en 1959 (sur un autre bassin versant et à environ 200 kilomètres du barrage de Sélingué).

La présente étude a également rencontré des difficultés tant au niveau des campagnes de collecte de données que lors de leur traitement. En effet, d'un point de vue technique, divers obstacles ont pu gêner localement la bathymétrie : arbres morts ennoyés, parfois invisibles et extrêmement dangereux pour le matériel, filets des pêcheurs, végétaux flottants (bourgou), insécurité du fait de l'interdiction par les autorités militaires de pratiquer des mesures sur la berge guinéenne du lac. En outre, l'acquisition des profils bathymétriques a été limitée par le niveau de l'eau dans le barrage (altitude inférieure à 348 m dès le mois de février). Ainsi, les courbes de niveau 347, 348 et 349 m ont un tracé relativement moins précis.

A l'inverse, on peut mettre en lumière la résolution très fine de cette étude pour un réservoir aussi vaste : la densité de points obtenue est en effet remarquable par rapport à la grande taille du réservoir (15 points de mesure bathymétrique par hectare pour un réservoir de 460 km²). La littérature internationale nous renseigne de fait rarement à propos de la densité de points obtenus (De Araújo et al., 2006; Soler-López, 2001). A notre connaissance, les seuls travaux qui s'appuient sur une densité de points supérieure portent sur des réservoirs de petite taille : par exemple 71 points par hectare pour l'étude très fine d'Haregeweyn et al. (2012) sur un réservoir de 51 hectares (1000 fois plus petit que Sélingué) en Ethiopie ; entre 7 et 23 points par hectare pour des réservoirs de taille comprise entre 35 et 105 hectares pour l'étude d'Adwubi et al. (2009) au Ghana.

5 Résultats

Soulignons tout d'abord que la gestion hydraulique du barrage ne modifie en rien la sédimentation dans le réservoir puisqu'il n'y a pas de vanne de fond

5.1 Un comblement quasi inexistant de la retenue

L'examen de quatre profils transversaux situés sur la partie centrale de la retenue (Figure 6-a et Figure 6-b) ainsi que sur ses deux bras principaux (Balé, Figure 6-c et Sankarani, Figure 6-d) ne montre aucun comblement significatif de la retenue, notamment au niveau des zones les plus profondes où les phénomènes de sédimentation, s'ils existaient, seraient davantage susceptibles de se produire.

De manière plus générale, les profils topographiques issus des enregistrements bathymétriques réalisés en 2008, illustrés par la Figure 6-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 d'avancer 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 l'IRD (2008) sur des sections identiques (Figure 6-b, Figure 6-c, Figure 6-d) montrent également la permanence des formes préexistantes. Cette superposition révèle aussi des résultats dissemblables suivant les profils avec en (b) : un niveau des parties latérales plus élevé en 2008 qu'en 1964, ce qui traduit une accumulation sédimentaire ; en (c) : des niveaux globalement moins élevés en 2008, ce qui est difficilement explicable ; en (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. L'imprécision du tracé de la carte topographique de 1964 serait liée aux limites de la photo-interprétation puisque la partie en eau n'a pas été sondée et que les berges étaient fortement végétalisées. 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 de possibles écarts altimétriques. 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'une dimension qualitative à l'analyse comparative des profils. Malgré ces quelques imprécisions, la persistance des reliefs, notamment le non comblement des anciens chenaux, permet d'infirmer l'hypothèse d'un comblement significatif de la retenue.

L'analyse des courbes hauteurs/surfaces (H/S) et hauteurs/volumes (H/V) de la retenue (figure 7) d'Italconsult (1964), de EDM¹ (non datée) et de l'IRD (2008) conforte les résultats précédents. Les informations partielles données dans le rapport d'étude d'Italconsult et par EDM rendent cependant cette analyse relativement délicate.

Cette dernière repose dans un premier temps sur cinq courbes produites à des dates différentes (Tableau 1 et Figure 7).

¹ Courbe actuellement utilisée par EDM (Electricité Du Mali)

Figure 6 : Comparaison diachronique de profils transversaux de la retenue de Sélingué (IRD, 2008).

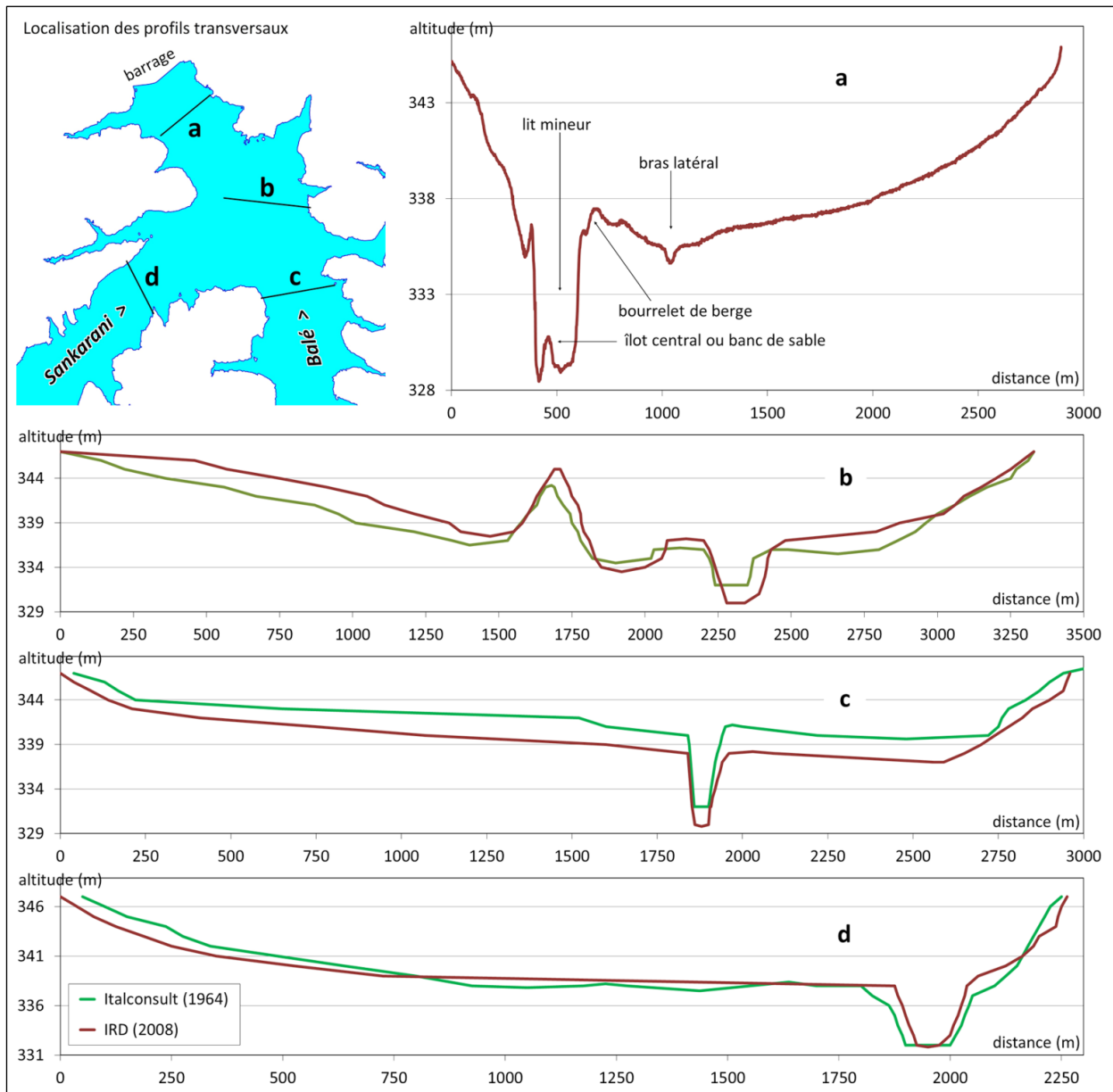


Tableau 1 : Inventaire des courbes hauteurs/surfaces et hauteurs/volumes disponibles.

Courbes hauteurs/surfaces		Année	Gamme d'altitude (m)
(2)	Italconult	1964	336-347
(4)	IRD	2008	327-349
Courbes hauteurs/volumes			
(5)	Italconult	1964	336-347
(6)	EDM	actuelle	340-349
(7)	IRD	2008	327-349

Les courbes H/S d'Italconult (2) et de l'IRD (4) - cette dernière lissée - ont été construites à partir 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 talwegs 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 des précédentes, montrent des volumes moins importants en 1964 qu'en 2008 ; de même pour la courbe de EDM (6), ce qui est évidemment difficile à admettre.

En attribuant à la série des valeurs de la courbe H/V de EDM (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 EDM (6), utilisée 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 + EDM » (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 1982 (date de mise en eau du réservoir), la courbe H/V « Italconsult + EDM » (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) est très proche de la courbe H/V IRD de 2008 (7) entre 336 m et 340 m mais se situe en-deçà au-dessus de 340 m. En imposant à la courbe H/V "Italconsult + EDM + IRD" (9) une correction altimétrique de -0,60 m au-dessus de 340 m, la courbe H/V obtenue (10) est pratiquement identique à la courbe H/V de l'IRD de 2008 (7). Aucune explication n'a pu être trouvée quant à ce décalage qui peut être liée simplement à une erreur de retranscription des informations de base ou, comme c'est le cas relativement fréquent dans ces analyses topométriques, à 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 retenue².

Si l'on retient l'hypothèse majeure d'un décalage du référentiel altimétrique entre 1964 et 2008, l'examen des courbes H/S et H/V ne montre pas ou que très peu de modification de la capacité du réservoir et par conséquent aucun comblement sédimentaire marqué.

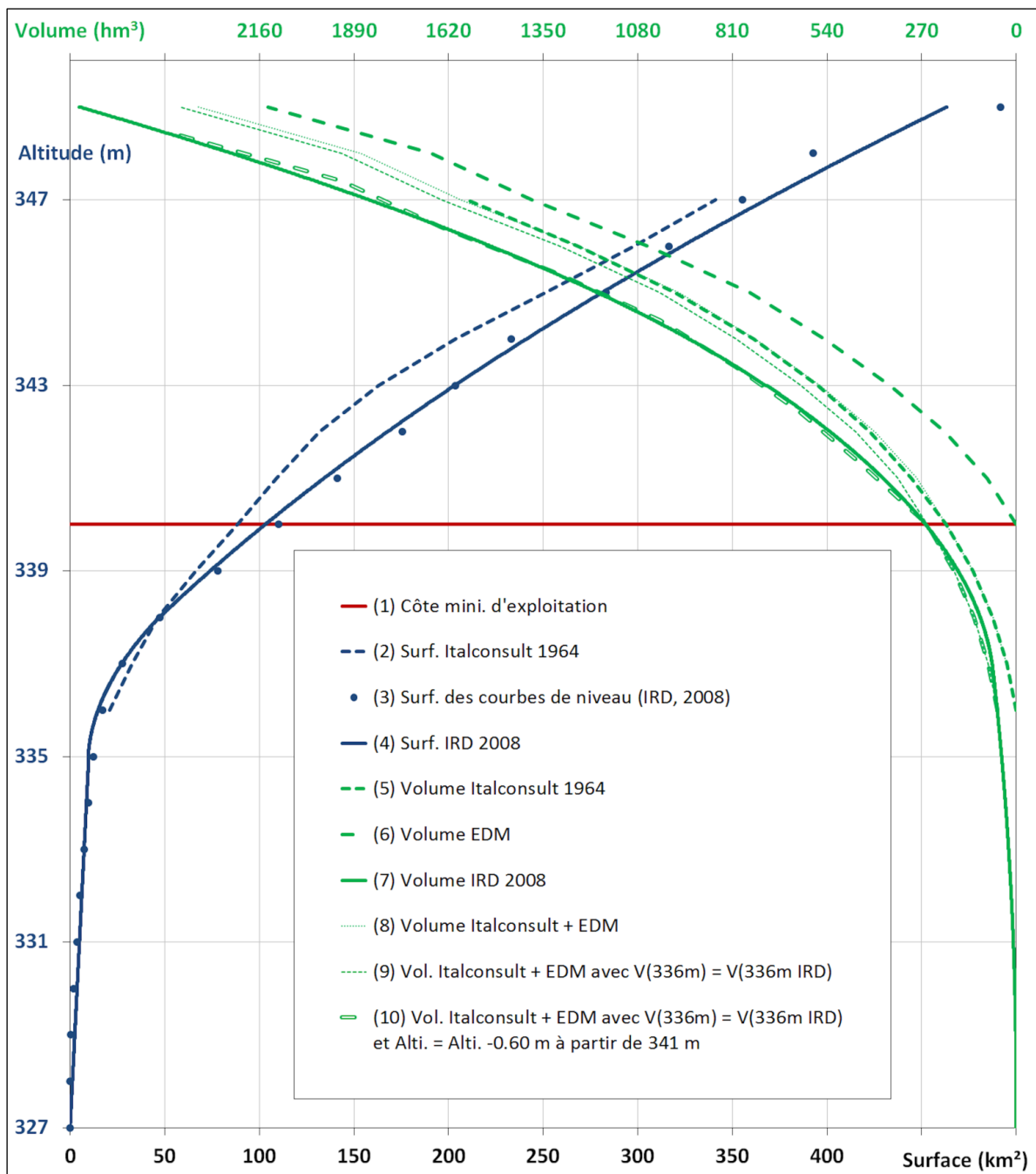
Soulignons que la confirmation d'un décalage du référentiel altimétrique entre 1964 et 2008 serait lourde de conséquence puisqu'elle remettrait en question la gestion actuelle du réservoir. Il conviendrait que des observations de terrain complémentaires soient réalisées, notamment en ce qui concerne le calage de l'échelle limnimétrique par rapport au barrage et à sa cote maximale d'exploitation.

5.2 Une interprétation antérieure erronée

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 présentés ci-dessus. 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 même principalement dans les zones les plus à l'amont (du fait d'un effet de frein au débouché des rivières dans le réservoir).

² Les observations de hauteur d'eau faites à la station limnimétrique du barrage ne montrent aucun décrochement depuis 1982.

Figure 7 : Courbes hauteurs-surfaces et hauteurs-volumes de la retenue de Sélingué établies par Italconsult (1964), EDM (sans date) et l'IRD (2008).



En reprenant la valeur donnée par Carlo Lotti de $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments arrivant chaque année dans la retenue, et en considérant que les apports sédimentaires s'accumulent de manière régulière au pied du barrage - ce qui est comme indiqué précédemment - inexact, le niveau des sédiments aurait dû 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 faite par Carlo Lotti en 1973 est erronée.

6 Discussion

Les faibles dynamiques d'accumulation de sédiments dans le réservoir de Sélingué doivent être mises en perspective à une échelle plus large et comparées à celles observées dans d'autres réservoirs, à l'échelle mondiale et à l'échelle de la zone sud-soudanienne en Afrique subsaharienne, afin de cerner les facteurs qui jouent un rôle décisif sur notre site d'étude.

6.1 Les vitesses de comblement observées dans le monde et en Afrique sud-soudanienne

A l'échelle mondiale, de très nombreux travaux ont cherché à quantifier des rythmes de sédimentation dans les réservoirs, et à en identifier les facteurs explicatifs. Les comparaisons entre réservoirs doivent être cependant prises avec beaucoup de recul : outre les différences méthodologiques rappelées précédemment, il faut souligner que les résultats portant sur la vitesse de sédimentation peuvent être exprimés de diverses façons : en volumes globaux déposés au fond des réservoirs, en termes de dégradation spécifique rapportée à la taille du bassin versant, en pourcentage de pertes de la capacité du réservoir. Cette évaluation de la perte de la capacité est la plus pertinente pour les gestionnaires et les donneurs d'ordre, car elle permet de connaître *in fine* la durée de vie utile du réservoir. Toutefois, la définition même de la durée de vie utile est variable selon les auteurs (Lajczak, 1996 ; Adwubi *et al.*, 2009 ; Haregeweyn *et al.*, 2012), ce qui rend les comparaisons d'autant plus ardues.

En outre, réduire la sédimentation à un pourcentage de perte annuelle est par ailleurs hasardeux car il conduit à l'impression, trompeuse, d'un comblement linéaire : or, la sédimentation varie, non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps. A court terme, les événements exceptionnels peuvent faire varier considérablement les volumes déposés dans un réservoir d'une année sur l'autre (Chanson, 1998 ; Ben Mammou et Louati, 2007 ; Boun Heng, 2013). A plus long terme, selon les évolutions climatiques ou les changements de mode d'occupation des sols, les rythmes sédimentaires évoluent également (Morris and Fan, 1998) : à titre d'exemple, le taux de comblement sédimentaire du barrage de Djorf Torba en Algérie a doublé entre 1986 et 2008, suite à la sécheresse des années 1990 qui a diminué la couverture végétale et dégradé les sols. Or, cette variabilité temporelle est difficile à apprécier et à quantifier : d'une part, la sédimentation associée à un événement exceptionnel est difficile à mesurer pour des raisons techniques (White, 1990) ; d'autre part, les évolutions de long terme sont également difficiles à appréhender, par déficit de longues périodes d'observation (Chanson, 1998).

En tenant compte de ces réserves, les comparaisons spatiales permettent néanmoins d'apprécier la variabilité de la sédimentation des réservoirs dans le monde, exprimée en % annuel de capacité perdue. Dans les régions tempérées, il faut citer le travail mené au Japon, portant sur 922 barrages-réservoirs, qui a mis en évidence des pertes moyennes annuelles de 0,24%, avec une moyenne haute de 0,42% dans la région de Chubu située sur des lignes tectoniques (Sumi, 2006) ; ce travail demeure exceptionnel dans son exhaustivité dans la mesure où il peut s'appuyer sur l'obligation légale imposée aux gestionnaires de mesurer le comblement chaque année pour les réservoirs dont la capacité théorique dépasse 1 million de m³ (Kashiwai, 2005). Dans les régions tropicales, les pertes sont généralement plus élevées : à Porto Rico, sur 14 réservoirs de taille moyenne (1 à 56 millions de m³), les pertes varient de 0,2 à 1,7% à l'échelle annuelle (Soler-López, 2001) ; à Java (Indonésie), une étude (Boun Heng, 2013) portant sur 12 réservoirs de taille moyenne (quelques dizaines de millions de m³ de capacité), les pertes varient de 0,58% pour le réservoir de Lahor à 4,14% pour le réservoir de Sengguruh.

Sur l'Afrique plus spécifiquement, l'Afrique du Nord, l'Ethiopie et le Rift (Remini et Remini, 2003 ; Remini *et al.*, 2009 ; Shahin, 1993) se distinguent par leur vitesse élevée de comblement. Dans d'autres régions d'Afrique, il existe peu de données portant directement sur la capacité perdue par sédimentation : il faut néanmoins citer les travaux d'Adwubi *et al.* (2009) sur quatre réservoirs récents au Ghana, dans un milieu de savane soudanienne localement très érodé, avec une durée de

vie utile variant de 22 à 190 ans (pertes annuelles comprises entre 0,5% et 4,5%), et l'étude de Sichingabula (1997) sur 66 petits réservoirs du sud de la Zambie, avec une durée de vie comprise entre 200 et 5100 ans (pertes comprises entre 0,02% et 0,5%). Pour obtenir d'autres éléments de comparaison, il faut de fait se reporter sur les données issues des études de dégradation spécifique, exprimées en $m^3/km^2/an$ ou en $t/km^2/an$: celles-ci illustrent des valeurs relativement faibles pour l'Afrique sub-saharienne, du moins pour le domaine sud-soudanien. La carte, dressée par Jansson (1988), et recensant les différentes mesures d'érosion spécifique menées à l'échelle mondiale, témoigne ainsi d'une érosion spécifique généralement inférieure à $10 t/km^2/an$ dans la zone sud-soudanienne de l'Afrique de l'Ouest. Cette carte est confirmée par l'état des lieux plus récent tenu par Vanmaercke *et al.* (2014) : en Afrique, les différences régionales permettent d'illustrer un panel de valeurs allant de 0,2 à $15700 t/km^2/an$, avec des maximums situés en Afrique du Nord (région de l'Atlas) et sur le Grand Rift africain, et des valeurs basses dans les bassins versants d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique centrale (inférieures à $60 t/km^2/an$). Une valeur proche de $50 t/km^2/an$ se retrouve à l'échelle d'un grand bassin, dans le lac Volta au Ghana (Akrasi, 2005). Des valeurs similaires ou inférieures mais basées sur les seules charges en suspension se retrouvent en aval du barrage de Sélingué sur le Niger moyen (Picouet *et al.*, 2000).

6.2 Les facteurs conditionnels d'une quasi absence de sédimentation dans le réservoir de Sélingué

Les facteurs conditionnels de la sédimentation d'un réservoir sont bien connus : les uns relatifs aux caractéristiques climatiques, physiques et d'occupation humaine du bassin versant (Holeman, 1968 ; Walling et Webb, 1996 ; Morris et Fan, 1998 ; Balthazar *et al.*, 2013), les autres liés aux caractéristiques du réservoir lui-même (Brune, 1953 ; Chanson, 1998 ; Lewis *et al.*, 2013 ; Kashiwai, 2005).

- L'état de stabilité morphologique du bassin versant du Sankarani est d'abord conditionné par la faiblesse de son peuplement (densité moyenne de 11 hab./km^2), elle-même liée à des causes premières d'ordre historique (sociétés à pouvoir moins centralisé qu'en domaine soudano-sahélien) et sanitaire (endémies plus nombreuses : onchocercose, maladie du sommeil) puis à des modalités de mise en valeur différentes d'un pays à l'autre (importance de la culture cotonnière au Mali à la même latitude dans le haut bassin du Bani). Ce constat n'est donc pas contradictoire avec le fait que d'autres régions sud-soudaniennes, hors du bassin du Niger, comme le cercle de Sikasso (Traore, 1978 ; Tappan et Mc Gahuey, 2007) au Mali, représentent des secteurs où l'occupation de l'espace est beaucoup plus marquée. Mais, même en période de dégradation climatique comme celle des années 70 et 80, la vulnérabilité de ces territoires sud-soudaniens ne doit pas être globalement assimilée à celle des confins soudano-sahéliens, où l'on a une « surcharge » beaucoup plus homogène dans l'espace en hommes et en bétail.
- Le corollaire de ce sous-peuplement est le maintien d'un couvert végétal climacique protecteur. A l'échelle du bassin versant du Sankarani, comme dans le bassin du Niger supérieur de façon plus générale, une remarquable zonation latitudinale en relation avec le gradient pluviométrique fait se succéder différentes formations végétales, d'autant plus reconnaissables que la faible pression démographique a très 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%) et de savanes arborées (23%), davantage affectées toutefois dans l'extrême nord du bassin, à proximité du réservoir, où elles sont remplacées par des savanes arbustives (31%), ces dernières typiques des paysages nord-soudaniens.

La densité de la population autour du réservoir est un peu plus élevée, de l'ordre de 20 habitants par km^2 (Ferry *et al.*, 2012a) mais l'augmentation de l'occupation 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 une installation d'agriculteurs (ODRS, 2003), ce qui tend à limiter son impact sur la dégradation des sols. De plus, seules les berges mêmes 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. Seule l'activité pastorale engendre aux abords du lac une dégradation du milieu par le piétinement du bétail et par la pratique des feux de brousse pendant la saison sèche.

- L'absence de sédimentation constitue un résultat d'importance puisque l'on retrouve là, à l'échelle d'un grand bassin versant, homogène du point de vue de sa couverture climacique, une quasi stabilité fréquemment mise en lumière à l'échelle des parcelles expérimentales (Roose, 1980 ; Mietton, 1988 ; Ruelland et *al.*, 2008).

D'autres facteurs jouent dans le même sens : la faiblesse des pentes longitudinales moyennes de l'ordre de 0.68 m/km, la nature des sols ferrugineux, puissamment cuirassés et libérant peu d'éléments fins lorsque les horizons indurés se retrouvent en surface. Mais leur rôle n'est que subsidiaire puisque ces mêmes caractéristiques ne suffisent pas à enrayer une dégradation spécifique sensiblement plus élevée en région nord-soudanienne. En revanche, cette absence de transfert solide ne s'apparente pas à une absence de ruissellement élémentaire au long des versants. En effet, les courbes de remplissage en eau du réservoir, remarquablement identiques d'une année sur l'autre, montrent que ce dernier n'est pas affecté et se remplit relativement rapidement, en deux mois environ, dans la deuxième moitié de l'hivernage (Figure 2).

Le rôle du couvert végétal naturel est d'autant plus remarquable que son caractère protecteur suffit à effacer l'agressivité potentielle des précipitations qui va en se renforçant du Sahel vers le domaine guinéen, comme le montre l'évolution de l'indice annuel moyen d'agressivité des pluies de Wischmeier (Roose, 1980).

7 Conclusion

Ce travail de recherche met en lumière l'absence de sédimentation significative au sein du réservoir du barrage de Sélingué ; il présente à ce titre, dans sa méthode et ses résultats, un intérêt certain.

En premier lieu, l'étude illustre le comportement en termes d'érosion spécifique d'un bassin versant en milieu sud-soudanien. En effet, le réservoir de Sélingué présente l'avantage exceptionnel d'être à l'exutoire d'un bassin versant étonnamment homogène compte tenu de sa superficie, à l'inverse d'une majorité des grands bassins versants étudiés à l'échelle mondiale, beaucoup plus hétérogènes (Ambroise, 1998) et anthropisés, peu représentatifs de ce fait d'une formation climacique donnée. A Sélingué, le bassin versant peu anthropisé est au contraire composé à 90% de savanes et forêts denses sèches, avec une très faible proportion de sols nus (2,6%) ou cultivés (7,3%). Cet article permet donc de traduire réellement le comportement en terme d'érosion d'un milieu bioclimatique, en l'occurrence le domaine sud-soudanien. Il corrobore ce qui a été déjà démontré à une échelle beaucoup plus fine, celle de la parcelle expérimentale, à savoir le caractère pénestable de ce milieu en l'absence d'une forte pression anthropique. Cette stabilité est liée, on le rappelle, à l'existence d'un double écran arbres-herbacées, ces dernières (graminées hautes et basses) jouant certainement un rôle prépondérant vis-à-vis de l'érosion pluviale et du ruissellement. Seuls les feux de brousse, particulièrement les feux tardifs, vulnérabilisent ces milieux mais leur effet à l'échelle d'un grand bassin versant est relativement limité du fait des discontinuités de transfert. Parmi l'ensemble des facteurs conditionnels de l'érosion hydrique, le couvert végétal et son corollaire, l'occupation du sol, apparaît ici comme le facteur essentiel.

En second lieu, il permet de mettre à jour, 26 ans après la mise en eau du réservoir (2008-1982), les estimations préliminaires faites précédemment sur le comblement du réservoir. Il se fonde pour ce faire sur des sondages bathymétriques d'une grande précision et des profils cumulés de plus de 700 kilomètres. Cette mise à jour des données permet d'infirmer les prédictions des Nations Unies faites

en 1973. L'accumulation sédimentaire envisagée n'a pas eu lieu et les marges d'erreurs induites par la méthodologie suivie ne suffisent pas à rendre ce résultat incertain.

Enfin, ce travail permet d'informer les multiples gestionnaires sur la capacité réelle et actuelle de la retenue à ses différents niveaux de remplissage, l'évaluation de la sédimentation étant associée à une actualisation des données surfaciques et volumiques de la retenue. Cette connaissance est indispensable pour concilier les intérêts divers des différents gestionnaires, et notamment pour résoudre des conflits d'usage entre irrigants et producteurs d'électricité.

8 Bibliographie

Adwubi A, Amegashie B, Agyare W, Tamene L, Odai S, Quansah C, Vlek P. 2009. Assessing sediment inputs to small reservoirs in Upper East region, Ghana. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 14: 279–287. DOI: 10.1111/j.1440-1770.2009.00410.x

Akrasi S. 2005. The assessment of suspended sediment inputs to Volta Lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 10: 179–186. DOI: 10.1111/j.1440-1770.2005.00272.x

Alhassan H. 2009. Butterflies vs. hydropower: Reflections on large dams in contemporary Africa. *Water Alternatives* 2: 148–160.

Ambroise B. 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. *Processus, Facteurs, Modèles*. Editions H.G.A., Bucharest.

Amegashie B, Quansah C, Agyare W, Tamene L, Vlek P. 2011. Sediment-bound nutrient export from five small reservoir catchments and its implications for the Sudan savannah zone of Ghana. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 16: 61–76. DOI: 10.1111/j.1440-1770.2011.00459.x

Balthazar V, Vanacker V, Girma A, Poesen J, Golla S. 2013. Human impact on sediment fluxes within the Blue Nile and Atbara River basins. *Geomorphology* 180-181: 231–241. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.10.013

Barbier B, Yacouba H, Maïga AH, Mahé G, Paturel JE. 2009. Le retour des grands investissements hydrauliques en Afrique de l'Ouest. *Géocarrefour* 1-2/2009: 31–41. DOI: 10.4000/geocarrefour.7205

Ben Mammou A, Louati M. 2007. Evolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. *Revue des sciences de l'eau* 20: 201–210. DOI: 10.7202/015813ar

Boun Heng M. 2013. La sédimentation dans les lacs de barrage à Java, Indonésie. *Processus, rythmes et impacts*. Ph.D. Thesis in geography. Université Paris I - Panthéon - Sorbonne, Paris.

Brune G. 1953. Trap efficiency of reservoirs. *Transactions American Geophysical Union* 34: 407–418. DOI: 10.1029/TR034i003p00407
Chanson H. 1998. Extreme reservoir sedimentation in Australia: a review. *International Journal of Sediment Research* 13: 55–63.

Cremin E. 2009, Les temples de l'Inde moderne » : un grand barrage dans un lieu saint de la Narmada (Madhya Pradesh). *Géocarrefour* 1-2/2009: 83–92. DOI: 10.4000/geocarrefour.7252

De Araújo J, Güntner A, Bronstert A. 2006. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. *Hydrological Sciences Journal* 51: 157–170. DOI: 10.1623/hysj.51.1.157

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

Droux P, Mietton M, Olivry JC. 2003. Flux de matières particulaires en suspension en zone de savane soudanienne : l'exemple de trois bassins versants maliens représentatifs. *Géomorphologie* 9: 99–110. DOI: 10.3406/morfo.2003.1172

Dunbar JA, Allen PM, Higley PD. 1999. Multifrequency acoustic profiling for water reservoir sedimentation studies. *Journal of Sedimentary Research* 69: 521-527. DOI: 10.2110/jsr.69.518

Eakin H. 1936. Silting of reservoirs (Technical Bulletin No. 524). United States Department of Agriculture, Washington DC.

- EDM (Electricité du Mali). Undated. Usine hydroélectrique de Sélingué. Cote et Volume utile du réservoir d'après courbes Carlo Lotti et Sofrelec. (Non publié / Unpublished)
- Ermias A, Solomon A, Alemu E. 2006. Small-scale reservoir sedimentation rate analysis for a reliable estimation of irrigation schemes economic lifetime (A case study of Adigudom area, Tigray, northern Ethiopia). Presented at the International Sediment Initiative Conference. Khartoum.
- Ferry L, Muther N, Coulibaly N, Martin D, Mietton M, Cissé Coulibaly Y, Olivry JC, Paturel JE, Barry MA, Yena M. 2012 a. Le fleuve Niger de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien. Les grands traits des régimes hydrologiques. IRD, UNESCO, Montpellier.
- Ferry L, Mietton M, Muther N, Martin D, Coulibaly N, Laval M, Basselot FX, Cissé Coulibaly Y, Collierie M, De la Croix K, Olivry JC. 2012 b. Extraction de sable et tendance à l'incision du Niger supérieur (Mali). *Géomorphologie* 18: 351–368. DOI: 10.4000/geomorphologie.9966
- Goel M, Jain S, Agarwal P. 2002. Assessment of sediment deposition rate in Bargi reservoir using digital image processing. *Hydrological Sciences Journal* 47: 81–92. DOI: 10.1080/02626660209493024
- Haregeweyn N, Melesse B, Tsunekawa A, Tsubo M, Meshesha D, Babulo Balana B. 2012. Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia). *Journal of Soils and Sediments* 12: 291–305. DOI: 10.1007/s11368-011-0447-z
- Holeman J. 1968. The sediment yield of major rivers of the world. *Water Resources Research* 4: 737–747. DOI: 10.1029/WR004i004p00737
- International Commission on Large Dams. 2015. Register of dams - General Synthesis [WWW Document]. URL: http://www.icoldcigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp, vu le 22 mai 2015
- IRD (Institut de Recherche pour le Développement). 2008. Campagne bathymétrique sur le barrage-réservoir de Sélingué. 13 février – 18 avril 2008. (Non publié / Unpublished)
- ITALCONSULT (Editor: Lotti C.) 1964. Etude préliminaire du barrage réservoir de Sélingué. Rome.
- Jansson M. 1988. A global survey of sediment yield. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* 70: 81–98. DOI: 10.2307/521127
- Kashiwai J. 2005. Reservoir sedimentation and sediment management in Japan. In Technical Memorandum. Public Works Research Institute, Tsukuba, 240–250.
- Kupper M, Hassane A, Orange D, Chohin-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, 411-430.
- Lajczak A. 1996. Reservoir sedimentation problems in the Vistula River basin, Poland. In Proceedings of the Exeter Symposium. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives, IAHS Publications, Exeter, 501–511.
- Laval M. 2008. Etude bathymétrique de la dynamique sédimentaire dans le barrage réservoir de Sélingué sur la Sankarani (Mali). M.Sc. Thesis in geography. Université Lyon III, IRD, Lyon.
- Lewis S, Bainbridge Z, Kuhnert P, Sherman B, Henderson B, Dougall C, Cooper M, Brodie J. 2013. Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical settings: a case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia. *Water Resources Research* 49: 1017–1029. DOI: 10.1002/wrcr.20117
- L'Hôte Y, Mahe G. 1996. Carte des précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989) de l'Afrique de l'ouest et centrale au 1/6000000. Editions de l'ORSTOM, Paris.
- McAllister D, Craig J, Davidson N, Delany S, Seddon M. 2001. Biodiversity impacts of large dams. IUCN, UNEP, UNF.
- Mahé G, Liéno G, Bamba F, Paturel JE, Adeaga O, Descroix L, Mariko A, Olivry JC, Sangaré S, Ogilvie A, Clanet JC. 2011, Le fleuve Niger et le changement climatique au cours des 100 dernières années. In Proceedings of symposium JH02 held during IUGG2011 in Melbourne. Hydro-climatology: variability and change, Melbourne, IAHS Publications, 131–137.
- Manatunge J, Priyadarshana T, Nakayama M, 2009. Environmental and social impacts of reservoirs: issues and mitigation. In *Oceans and Aquatic Ecosystems, Volume 1*. UNESCO-EOLSS, Oxford, 212–255.

- Mietton M. 1986. Les données de l'érosion sur bassins-versants au Burkina Faso (ex Haute-Volta). *Revue de Géographie Alpine* 74: 119–127. DOI: 10.3406/rga.1986.2633
- Mietton M. 1988. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. Ph.D. thesis, Université Grenoble 1, Editec, Caen.
- Miner J, Kondolf G. 2009. Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: a case study of California. *Water Resources Research* 45: W12502. DOI: 10.1029/2007WR006703
- Moore D, Dore J, Gyawali D. 2010. The World Commission on Dams+ 10: revisiting the large dam controversy. *Water Alternatives* 3: 3–13.
- Morris G, Fan J. 1998. Reservoir sedimentation handbook. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. Mc Graw-Hill, New York.
- Mulholland P, Elwood J. 1982. The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle. *Tellus* 34: 490–499. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1982.tb01837.x
- Nations Unies (Editor: Lotti C.) 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.
- 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.
- Palmieri A, Shah F, Dinar A. 2001. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management* 61: 149–163. DOI: 10.1006/jema.2000.0392
- Parekh P. 2004. A preliminary review of the impact of dam reservoirs on carbon cycling. International Rivers Network, Berkeley, California.
- Paturel JE, Boubacar I, L'Aour-Cres A, Mahé G. 2011. Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20ème siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale, *Hydrological Sciences Journal* 55: 1281–1288. DOI: 10.1080/02626667.2010.527846
- Remini B, Leduc C, Hallouche W. 2009. Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse* 20: 96–103. DOI: 10.1684/sec.2009.0172
- Remini W, Remini B. 2003. La sédimentation dans les barrages d'Afrique du Nord. *Larhyss Journal* 2: 45–54.
- Richter B, Postel S, Revenga C, Scudder T, Lehner B, Churchill A, Chow M. 2010. Lost in development's shadow: the downstream human consequences of dams. *Water Alternatives* 3: 14–42.
- 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. *Journal of Remote Sensing* 29: 3533–3551. DOI: 10.1080/01431160701758699
- Roca M. 2012. Tarbela dam in Pakistan. Case study of reservoir sedimentation. In *Proceedings of the 6th International Conference on Fluvial Hydraulics*. San José.
- Roose EJ. 1980. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Ph.D. Thesis, Université d'Orléans, ORSTOM Paris, Orléans.
- Shahin M. 1993. An overview of reservoir sedimentation in some African river basins. In *Proceedings of the Yokohama Symposium. Sediment problems: strategies for monitoring, prediction and control*, IAHS Publications, Yokohama, 93–100.
- Sichingabula H. 1997. Problems of sedimentation in small dams in Zambia. In *Proceedings of the Rabat Symposium. Human Impact on Erosion and Sedimentation*, IAHS Publications, Rabat, 251–259.
- Soler-López L. 2001. Sedimentation survey results of the principal water supply reservoirs of Puerto Rico. In *Proceedings of the 6th Caribbean Islands Water Resources Congress*. Mayagüez.
- Sumi T. 2006. Reservoir sediment management measures and necessary instrumentation technologies to support them. Presented at the 6th Japan-Taiwan joint seminar on natural hazard mitigation, Kyoto.

- Tappan G, McGahuey M. 2007. Tracking environmental dynamics and agricultural intensification of southern Mali. *Agricultural Systems* 94: 38-51. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.07.011
- Touré S. 2004. Gestion concertée des eaux de la retenue de Sélingué. Salon International de l'Eau (SIDEAU), DNH-Mali.
- Traore M. 1978. L'accumulation démographique et l'intensification de l'occupation de l'espace dans le Mali méridional. In *Maîtrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale. Logique paysanne et rationalité technique. Actes du colloque de Ouagadougou (4-8 décembre 1978)*, CNRSTORSTOM Paris, 119–123.
- Vanmaercke M, Poesen J, Broeckx J, Nyssen J. 2014. Sediment yield in Africa. *Earth-Science Reviews* 136: 350–368. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.004
- Vanmaercke M, Poesen J, Radoane M, Govers G, Ocaoglu F, Arabkhedri M. 2012. How long should we measure? An exploration of factors controlling the inter-annual variation of catchment sediment yield. *Journal of Soils and Sediments* 12: 603–619. DOI: 10.1007/s11368-012-0475-3
- Vörösmarty C, Meybeck M, Fekete B, Sharma K. 1997. The potential impact of neo-Castorization on sediment transport by the global network of rivers. In *Proceedings of the Rabat Symposium. Human Impact on Erosion and Sedimentation*, IAHS Publications, Rabat, 261–273.
- Vörösmarty C, Meybeck M, Fekete B, Sharma K, Green P, Syvitski J. 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change* 39: 169–190. DOI: 10.1016/S0921-8181(03)00023-7
- Walling D. 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* 79: 192–216. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.019
- Walling D. 2012. The role of dams in the global sediment budget. In *Proceedings of a symposium held at the Institute of Mountain Hazards and Environment. Erosion and Sediment Yields in the Changing Environment*, IAHS Publications, Chengdu, 3–11.
- Walling D, Webb W. 1996. Erosion and sediment yield: a global overview. In *Proceedings of the Exeter Symposium. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*, IAHS Publications, Exeter, 3–19.
- White R. 2001. *Evacuation of sediments from reservoirs*. Thomas Telford, London. White S. 1990. The influence of tropical cyclones as soil eroding and sediment transporting events. An example from the Philippines. In *Proceedings of the Fiji Symposium. Research needs and applications to reduce erosion and sedimentation in tropical steepplands*, IAHS Publications, Suva, 259–269.
- Wisser D, Frohling S, Hagen S, Bierkens M. 2013. Beyond peak reservoir storage? A global estimate of declining water storage capacity in large reservoirs. *Water Resources Research* 49: 1–8. DOI: 10.1002/wrcr.20452
- World Commission on Dams. 2000. *Dams and development. A framework for decision making*. Earthscan, London.

9 Annexes

9.1 Barème décimétrique altitude(m) / surface (km²) (IRD, 2008)

m	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
327	(0.0)									
328	1.2	1.3	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3
329	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4	3.6
330	3.7	3.8	3.9	4.1	4.2	4.3	4.4	4.6	4.7	4.8
331	4.9	5.0	5.2	5.3	5.4	5.5	5.7	5.8	5.9	6.0

332	6.2	6.3	6.4	6.5	6.7	6.8	6.9	7.0	7.1	7.3
333	7.4	7.5	7.6	7.8	7.9	8.0	8.1	8.3	8.4	8.5
334	8.6	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.4	9.5	9.6	9.7
335	9.9	9.7	10.0	10.3	10.7	11.2	11.8	12.4	13.1	13.9
336	14.7	15.7	16.6	17.7	18.9	20.1	21.4	22.7	24.2	25.7
337	27.2	28.9	30.6	32.4	34.3	36.2	38.3	40.3	42.5	44.7
338	47.0	49.8	52.4	55.0	57.7	60.3	63.0	65.7	68.5	71.2
339	74.0	76.8	79.6	82.5	85.4	88.3	91.2	94.1	97.1	100.0
340	103.0	106.1	109.1	112.2	115.3	118.4	121.5	124.7	127.9	131.1
341	134.3	137.5	140.8	144.1	147.4	150.7	154.1	157.4	160.8	164.3
342	167.7	171.2	174.7	178.2	181.7	185.2	188.8	192.4	196.0	199.7
343	203.3	207.0	210.7	214.5	218.2	222.0	225.8	229.6	233.4	237.3
344	241.2	245.1	249.0	252.9	256.9	260.9	264.9	269.0	273.0	277.1
345	281.2	285.3	289.5	293.6	297.8	302.0	306.3	310.5	314.8	319.1
346	323.4	327.8	332.1	336.5	340.9	345.4	349.8	354.3	358.8	363.3
347	367.9	372.4	377.0	381.6	386.3	390.9	395.6	400.3	405.0	409.7
348	414.5	419.3	424.1	428.9	433.8	438.7	443.5	448.5	453.4	458.4
349	463.3									

9.2 Barème décimétrique altitude(m) / volume (hm3) (IRD, 2008)

M	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
327	(0.0)									
328	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0
329	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	3.1	3.4
330	3.8	4.1	4.5	4.9	5.3	5.7	6.1	6.6	7.1	7.5
331	8.0	8.6	9.1	9.6	10.2	10.8	11.4	12.0	12.6	13.3
332	13.9	14.6	15.3	16.0	16.8	17.5	18.3	19.0	19.8	20.7
333	21.5	22.3	23.2	24.1	25.0	25.9	26.8	27.7	28.7	29.7
334	30.7	31.7	32.7	33.8	34.8	35.9	37.0	38.1	39.2	40.4
335	41.5	42.7	43.9	45.1	46.3	47.6	48.8	50.1	51.4	52.7
336	54.0	55.4	56.7	58.1	59.5	60.9	62.3	63.7	65.2	66.7
337	68.2	70.7	73.0	75.7	78.6	81.9	85.4	89.3	93.4	97.8
338	102.5	107.5	112.8	118.4	124.3	130.5	137.0	143.7	150.8	158.1
339	165.8	173.7	182.0	190.5	199.3	208.4	217.8	227.5	237.5	247.8
340	258.4	269.2	280.4	291.8	303.6	315.6	328.0	340.6	353.5	366.7
341	380.2	394.0	408.1	422.5	437.2	452.2	467.4	483.0	498.8	515.0
342	531.4	548.2	565.2	582.5	600.1	618.0	636.2	654.7	673.5	692.6
343	711.9	736.1	756.3	777.0	798.2	819.7	841.7	864.2	887.0	910.3
344	934.1	958.2	982.8	1007.9	1033.4	1059.3	1085.6	1112.4	1139.6	1167.2
345	1195.3	1223.8	1252.7	1282.1	1311.9	1342.1	1372.8	1403.9	1435.4	1467.4
346	1499.8	1532.6	1565.9	1599.6	1633.7	1668.3	1703.3	1738.7	1774.6	1810.9
347	1847.6	1884.8	1922.4	1960.4	1998.9	2037.8	2077.1	2116.9	2157.1	2197.8
348	2238.8	2280.3	2322.3	2364.6	2407.4	2450.7	2494.3	2538.4	2583.0	2627.9
349	2673.4									