



HAL
open science

Analyse spatiotemporelle de la dynamique fluviale d'un cours d'eau sahélo-soudanien entre 1967 et 2007. Le cas du Yamé au pays Dogon (Mali, Afrique de l'Ouest)

Aline Garnier, Simon Dufour, Laurent Lespez, Sébastien Caillault, Daniel Delahaye

► To cite this version:

Aline Garnier, Simon Dufour, Laurent Lespez, Sébastien Caillault, Daniel Delahaye. Analyse spatiotemporelle de la dynamique fluviale d'un cours d'eau sahélo-soudanien entre 1967 et 2007. Le cas du Yamé au pays Dogon (Mali, Afrique de l'Ouest). *Revue Internationale de Géomatique*, 2014, 24 (3), pp.279-306. 10.3166/rig.24.279-306 . hal-01200578

HAL Id: hal-01200578

<https://hal.science/hal-01200578v1>

Submitted on 6 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Analyse spatiotemporelle de la dynamique fluviale d'un cours d'eau sahélo-soudanien entre 1967 et 2007

Le cas du Yamé au pays Dogon (Mali, Afrique de l'Ouest)

**Aline Garnier^{1,3}, Simon Dufour², Laurent Lespez³
Sébastien Caillault⁴, Daniel Delahaye¹**

1. LETG Caen – Géophen, Université de Caen Basse-Normandie
Esplanade de la Paix, 14032 Caen cedex, France

aline.garnier@unicaen.fr ; daniel.delahaye@unicaen.fr

2. LETG Rennes-Costel, Université Rennes
2, place du Recteur Henri le Moal, 35043 Rennes cedex, France

simon.dufour@uhb.fr

3. UMR 8591 CNRS, Université Paris-Est Créteil
61, av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France

laurent.lespez@u-pec.fr

4. ESO Angers, UMR 6590 CNRS, Agrocampus
2 rue André le Notre, 49045 Angers, France

sebastien.caillault@agrocampus-ouest.fr

RÉSUMÉ. En Afrique de l'Ouest, les études menées sur les systèmes fluviaux sont rares et ont principalement été conduites à petite échelle en intégrant le rôle du climat comme le seul facteur intervenant dans la dynamique de ces milieux. Les travaux présentés ici concernent la dynamique fluviale récente d'un petit bassin versant de 4400 km², celui du Yamé (pays Dogon, Mali). Nous proposons une méthode d'analyse semi-automatique diachronique permettant de caractériser le fonctionnement actuel et de quantifier les ajustements morphologiques du système fluvial entre 1967 et 2007 ; période qui fut entrecoupée d'années de sécheresse au Sahel. Elle s'appuie sur la définition d'une typologie morphologique des différents styles fluviaux contemporains établie à partir d'un découpage en tronçons homogènes et du calcul de variables et d'indices. Cette étude révèle, (1) pour la période actuelle, une diversité longitudinale du système fluvial et (2) pour les dernières décennies, une réponse hétérogène du bassin versant suite à une modification des variables de contrôle d'origine climatique (sécheresse) et anthropique (pression démographique...).

ABSTRACT. In West Africa, studies on fluvial systems dynamics are rare and mainly conducted at the small scale to highlight the role of the climatic changes as single driver. This study

aims to analyse the recent fluvial system dynamics of the small catchment (4400km²) of the Yamé river (Pays Dogon, Mali). To characterize the current fluvial pattern and to quantify the morphological adjustments of the river between 1967 and 2007 (period which was intercepted by dry years in the Sahel), we propose a reproducible methodology using a semi-automatic diachronic analysis. This methodology is based on a typology of fluvial styles derived from the division of the valley floor into homogeneous sections and the calculation of morphological variables and indices. This study shows: (1) for the current period, a longitudinal diversity of the river system and (2) for the past decades, a heterogeneous response of the watershed according to a change of forcing: climatic (drought) and anthropogenic (demographic pressure ...).

MOTS-CLÉS : système fluvial, discontinuité longitudinale, SIG, sécheresse, anthropisation, Sahel, étude diachronique, indicateurs géomorphologiques, images satellitaires.

KEYWORDS: fluvial system, longitudinal discontinuity, GIS, drought, human impact, Sahel, diachronical study, geomorphological indicators, satellite images.

1. Introduction

Les crises climatiques et les changements de mode d'occupation du sol sont considérés comme les principaux facteurs de contrôle des apports liquides et solides dont dépend le système fluvial. En réponse à ces changements, le système fluvial s'adapte en ajustant sa forme en plan (style fluvial) ou en long (incision/aggradation). Celle-ci peut être extrêmement complexe avec une variabilité spatiotemporelle considérable (Knox, 1983). En effet, les variables internes propres au bassin versant induisent une discontinuité longitudinale des modifications du système fluvial (Schumm, 2005). Dans l'étude de l'évolution des processus géodynamiques et des formes qui en résultent, il est nécessaire de prendre en compte la nature géologique, les héritages géomorphologiques, la végétation ou encore l'occupation du sol qui diffèrent de l'amont vers l'aval du bassin versant.

Sur le moyen terme, la reconstitution de l'histoire des systèmes fluviaux au moyen de documents anciens est une pratique classique en géographie (Bravard, 1987 ; Peiry, 1988 ; Salvador, 1991 ; Miramont *et al.*, 1998 ; Arnaud-Fassetta et Fort, 2004...). Depuis quelques années, l'émergence de nouvelles techniques a largement contribué à l'amélioration de ces études, dites géo-historiques, et a notamment amélioré la mesure quantitative des évolutions (Gurnell *et al.*, 2003). Malgré cela, en Afrique de l'Ouest, peu d'études diachroniques ont été développées sur les dynamiques récentes de systèmes fluviaux sahéliens. Seules quelques unes se sont intéressées à l'évolution du couvert végétal au cours des dernières décennies (Ruellan *et al.*, 2008, 2011). Pourtant, la reconstitution des dynamiques fluviales récentes représente un enjeu scientifique majeur en Afrique de l'Ouest dans la mesure où, le Sahel, a fait l'objet de crises de sécheresses importantes dans les années 1970-1980. En effet, ces années ont enregistré un déclin significatif du volume des précipitations et de la saison humide. La moyenne annuelle de la

pluviométrie a baissé de plus de 30 % pour la région sahélienne et les isohyètes se sont déplacées vers le sud de 150 à 250 km suivant la zone concernée (L'Hôte et Mahé, 1996). Cette crise a fait l'objet d'un intérêt particulier de la part des climatologues afin de comprendre la variabilité spatio-temporelle des précipitations et plus largement de la ZITC dont elles dépendent (Charney, 1975 ; Lamb, 1978 ; Nicholson, 1980 ; Janicot, 1992 ; Leroux, 1995 ; Lebel *et al.*, 1997, 2008). Les répercussions sur la ressource en eau ont aussi été étudiées par les hydrologues (Bricquet *et al.*, 1997). Les variations du régime hydrologique des grands fleuves ont été privilégiées (Picouet, 1999 ; Andersen *et al.*, 2005 ; Amogu, 2009 ; Amogu *et al.*, 2010 ; Mamadou, 2012) ainsi que celles du niveau des lacs, des mares et des aquifères (Favreau *et al.*, 2008). Andersen *et al.* (2005) soulignent qu'en général, un déficit de 10 à 30 % des précipitations entraîne un déficit de 20 à 60 % des débits des rivières. Les débits des fleuves Sénégal et Gambie ont diminué de près de 60 % au cours de la période 1971-1989 alors que les précipitations annuelles ne baissaient que de 25 % (Mahé et Olivry, 1995). Le Lac Tchad enregistre aussi de façon significative les périodes de sécheresses des années 1970-1980 puisque sa superficie inondée est passée de 25 000 km² dans les années 1950 à seulement 1 700 km² depuis 1973 (Lemoalle *et al.*, 2010). A l'aval du delta intérieur du Niger, le lac Faguibine a vu sa superficie diminuer de près de la moitié entre 1974 et 1982 (Courel, 1985). En revanche, même si quelques études hydrologiques ont été menées sur des bassins versants soudano-sahéliens de plus petite taille (Mahé et Paturel, 2009), aucune étude géomorphologique ne s'est intéressée à la réponse morphogène des systèmes fluviaux à cette crise climatique. C'est pourquoi, nous proposons de reconstituer les dynamiques récentes d'un système fluvial soudano-sahélien, celui du Yamé au Mali. L'objectif est de comprendre les modalités de réponse du système fluvial suite à la modification des conditions environnementales du bassin versant, entre 1967 à 2007, période qui fut entrecoupée d'années très sèches et pour lesquelles nous disposons d'une documentation précise. Cette étude consiste à analyser les temporalités de ces changements pour l'ensemble du bassin versant afin de voir l'étendue spatiale des transformations. Observe-t-on un synchronisme amont-aval de la réponse du système fluvial face au changement des conditions environnementales du bassin versant ? Ou au contraire, l'hétérogénéité spatio-temporelle des réponses permet-elle de révéler des spécificités locales à chaque tronçon ? Il s'agit ainsi de déterminer le poids des facteurs internes et externes qui s'exerce sur chaque tronçon selon la localisation au sein du bassin versant.

Ce travail propose une méthodologie reproductible de cartographie de l'évolution récente d'un système fluvial par l'analyse d'objets géographiques par des photographies aériennes et d'images satellitaires dans un environnement SIG associée à des approches morphologiques issues de l'étude classique des dynamiques fluviales (Gurnell *et al.*, 2003). Dans un premier temps, la méthode permet de préciser les discontinuités longitudinales du Yamé et de caractériser les différents styles fluviaux contemporains de la vallée. Dans un deuxième temps, une quantification des évolutions du système fluvial de 1967 à 2007 est réalisée pour l'ensemble de la vallée. Au final, la comparaison de nos résultats avec les données

climatiques (précipitations) et anthropiques (évolution démographique) donne des clés pour expliquer les métamorphoses passées.

2. Site d'étude et données disponibles

2.1. La vallée du Yamé

Le secteur d'étude concerne la vallée du Yamé, un cours d'eau de 137 km de long localisé en zone soudano-sahélienne au sud-est du Mali, en Afrique de l'Ouest (figure1).

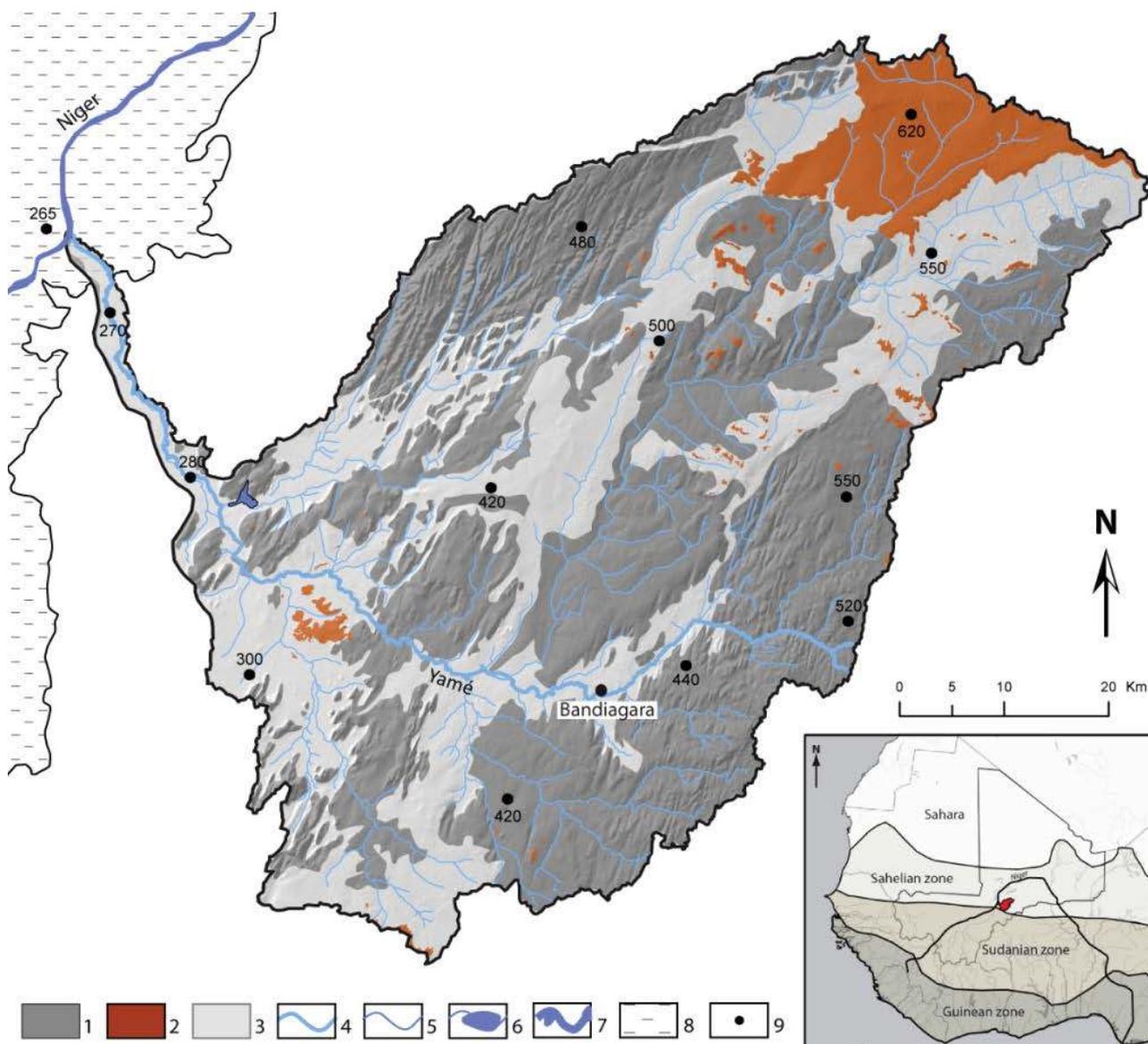


Figure 1. Présentation du secteur d'étude 1 : Grès ; 2 : buttes latéritiques ; 3 : formations quaternaires ; 4 : cours d'eau principal (Yamé) ; 5 : cours d'eau secondaire ; 6 : Lac permanent ; 7 : fleuve Niger ; 8 : plaine alluviale du Niger ; 9 : point coté

Cet affluent de rive droite du fleuve Niger prend sa source sur le plateau gréseux du pays Dogon dont il est le cours d'eau principal. D'Est en Ouest, il traverse trois unités paysagères différentes : le plateau de Bandiagara, massif gréseux qui plonge doucement sous les glacis d'accumulation qui sont eux-mêmes recouverts par les alluvions du delta intérieur du Niger à l'aval de la vallée du Yamé. Avec une moyenne pluviométrique annuelle de 537 mm/an, le bassin versant du Yamé est soumis à un climat sahélo-soudanien caractérisé par une alternance entre une saison sèche qui dure 9 mois, d'octobre à juin, et une saison humide de 3 mois, de juillet à septembre. Ainsi, le régime hydrologique du Yamé est caractérisé par une forte irrégularité, reflétant la saisonnalité des précipitations. Pendant la saison sèche, la plus grande partie du cours d'eau est à sec. Au contraire, pendant la saison humide les pluies intenses sous forme d'orages génèrent, de l'amont à l'aval du Yamé, des flux liquides et solides véhiculés par une vitesse élevée. Par la topographie, la nature et la fréquence des écoulements, il est possible de distinguer au sein de la plaine alluviale, trois unités géomorphologiques (figure 2). Le *chenal* correspond au lit de hautes-eaux limité par ses berges. En période de décrue, il comprend un lit mineur et secondairement des bancs émergents et des mares résiduelles. Il est généralement à sec pendant la saison sèche. La *très basse terrasse*, surélevée de quelques décimètres à quelques mètres par rapport au chenal, est inondée systématiquement par les crues débordantes annuelles. Elle comporte également des mares temporaires. La *basse terrasse* domine la très basse terrasse et le chenal de plusieurs mètres (2-3 m) par un talus. Elle permet l'expansion des crues lors des épisodes plus rares et correspond à la zone d'expansion maximale des crues connues.

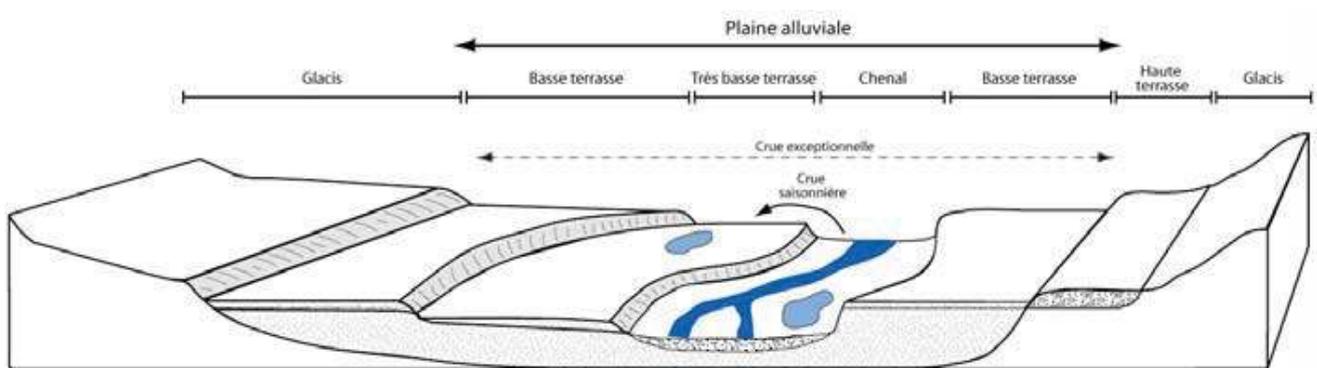


Figure 2. Différentes unités géomorphologiques identifiées dans la vallée du Yamé

Avec des densités élevées dépassant par endroits 600 hab/km² (Thibaud, 2005) alors que seulement 22 % des terres sont cultivables en raison de l'omniprésence des affleurements gréseux, les populations se sont adaptées, en développant des pratiques culturelles élaborées et diversifiées. Dans les zones où l'eau est permanente, c'est-à-dire à l'amont du Yamé et près du lac de Bandiougou, dans la basse vallée, les dogons ont développé une activité maraîchère irriguée. Dans le reste de la vallée où le Yamé s'assèche pendant la saison sèche, on pratique une agriculture, dite pluviale avec la culture du mil, qui est permise par le seul apport

des précipitations. Enfin, à l'aval, dans le delta intérieur du Niger, les caractéristiques hydro-géomorphologiques particulières qui s'illustrent par l'immersion de la plaine alluviale pendant plusieurs mois, permettent le développement de la riziculture. Ainsi, la diversité tant naturelle que des pratiques et modes d'occupation du sol font de la vallée du Yamé un terrain d'étude caractéristique des systèmes fluviaux soudano-sahéliens.

2.2. Données disponibles

2.2.1. Les images

Le tableau 1 présente les caractéristiques des données en termes de date, de résolution spectrale et spatiale ainsi que le secteur disponible.

*Tableau 1. Synthèse des images disponibles pour le bassin versant du Yamé.
En grisé, les images qui ont été utilisées pour cette étude*

Nature	Mission	Date	Résolution	Spectre/Émulsion	Secteur disponible	Source
Photo aérienne	AOF 1952/20	02/01/52	5 m	Panchromatique N&B	Basse vallée et aval	Université de Rouen
Image satellite	Corona-KH4B-1102	10/12/67	2,5 m	Panchromatique N&B	Ensemble de la vallée	USGS ©
Photo aérienne	AO 891/500	1971	5 m	Panchromatique N&B	Aval	Université de Rouen
Photo aérienne	?	1986	5 m	Panchromatique N&B	Amont	Université de Rouen
Image satellite	Landsat 5 TM	13/12/90	30 m	Multispectral	Ensemble de la vallée	USGS ©
Image satellite	Landsat 7 ETM+	16/10/01	15 m	Panchromatique Multispectral	Ensemble de la vallée	USGS ©
Image satellite	Spot 5	08/11/07	2,5 m	Multispectral	Ensemble de la vallée	Université d'Angers

Les clichés aériens verticaux issus des missions coloniales (AOF) qui datent de 1952 sont les documents disponibles les plus anciens. Cependant, ceux-ci n'ont pas

été retenus car ils ne couvrent pas l'ensemble de la vallée. Ainsi, nous avons privilégié l'utilisation des images satellitaires qui concernent l'ensemble de la zone étudiée. Des images avec des résolutions variables ont été utilisées, allant des images Landsat 5 et 7 qui ont une résolution de 30*30 mètres (1990, 2001) à celles à très haute résolution (SPOT 5, 2007) en passant par des clichés des satellites espions américains (Corona, 1967) (tableau 1). Ces dernières ont une résolution au sol de 2,5*2,5 mètres comme les images SPOT-5 dans le mode panchromatique, ce qui permet de les utiliser afin de procéder à une analyse quantitative de l'évolution du système fluvial entre 1967 et 2007. Si les images Landsat 5 et 7 dont la résolution est nettement inférieure (15*15 mètres pour la panchromatique de 2001 et 30*30 mètres pour celle de 1990) ne peuvent être utilisées que pour une analyse qualitative des ajustements morphologiques du Yamé, elles sont cependant utiles pour affiner la période de métamorphose du système fluvial. Ainsi, l'analyse spatiale et temporelle de l'évolution de la forme en plan du Yamé s'appuie sur l'étude de quatre séries d'images de 1967 à 2007 (tableau 1). Une attention particulière a été portée sur la date des images. Ainsi, celles choisies ont toutes été prises entre le mois d'octobre et le mois de décembre, période qui se situe juste après la saison des pluies, au début de la saison sèche. Ainsi, la plupart des chenaux sont encore en eau ce qui facilite leur identification. Pour compléter ces données, un modèle numérique de terrain (SRTM) avec une résolution spatiale de 90*90 mètres a été utilisé notamment pour réaliser le profil en long et calculer la pente de la vallée du Yamé.

2.2.2. Les données climatiques et anthropiques

Afin de connaître le contexte climatique local et de pouvoir discuter ensuite des facteurs de contrôle à l'origine des métamorphoses du système fluvial, nous avons utilisé les données pluviométriques de 1950 à 2007, issues de la FAO. Seule l'année 2004 n'est pas disponible (figure 3).

À partir de ces données, il est possible de distinguer trois périodes différentes :

- entre 1950 et 1966, la moyenne pluviométrique atteint 631 mm/an, soit près de 100 mm de plus que la moyenne 1950-2003 qui est de 537 mm/an. Ainsi, cette phase caractérise une *période* « *humide* » par rapport à la moyenne sur l'ensemble de la période concernée (1950-2003).

- la période suivante, entre 1967 et 1987, témoigne au contraire d'une *période* « *sèche* » avec une moyenne pluviométrique de seulement 429 mm/an. Sur les vingt années qui constituent cette période, seules cinq années ont une moyenne pluviométrique identique ou supérieure à celle de 1950-2003. En outre, 1968 et 1974 enregistrent un total annuel de pluies inférieur à 200 mm.

- la troisième période (1987-2007), avec 532 mm/an, indique une moyenne pluviométrique proche de celle de 1950-2003 et représente alors une *période* « *moyenne* ».

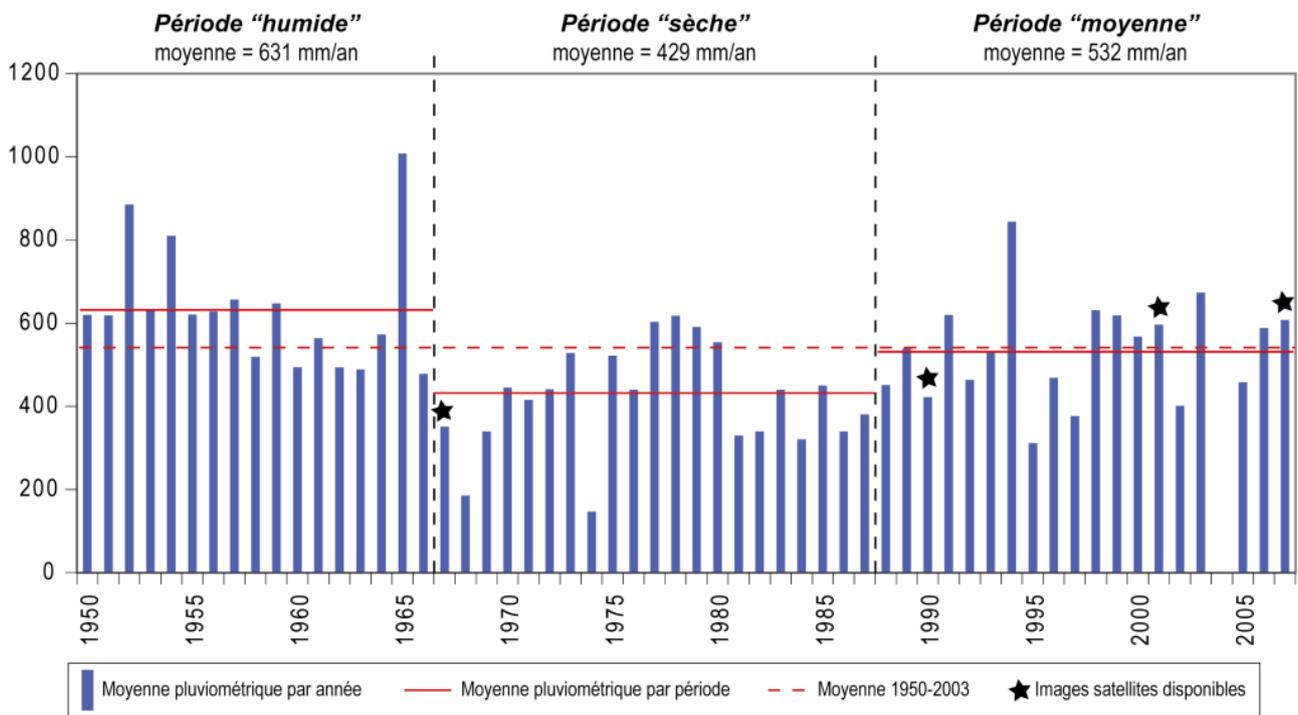


Figure 3. Moyennes pluviométriques de Bandiagara entre 1950 et 2007

Ainsi, nous avons à notre disposition quatre séries d'images satellitaires de 1967, 1990, 2001 et 2007 qui nous permettent de caractériser le système fluvial avant et après les années de sécheresses. Enfin, nous disposons aussi de données sur les dynamiques démographiques de la région depuis les années 1970. Depuis l'indépendance du Mali, quatre campagnes de recensements ont été réalisées : en 1976, 1987, 1998 et dernièrement, en 2009. Nous avons choisi d'étudier l'évolution de la population à partir des données concernant à la fois le cercle de Mopti et de Bandiagara puisque le bassin versant du Yamé est localisé sur ces deux cercles.

3. Méthodologie et démarche

La méthodologie est basée sur la délimitation et le calcul d'objets géographiques en format vecteur dans un environnement SIG. Cette méthodologie a été développée en géomorphologie fluviale afin de caractériser les discontinuités longitudinales d'un système fluvial actuel (Piégay, 1996 ; Dufour, 2005 ; Rollet, 2007 ; Wiederkehr *et al.*, 2010 ; Alber et Piégay, 2011 ; Leviandier *et al.*, 2012 ; Rollet *et al.*, 2013). Dans le cadre de cette étude, nous reproduisons cette méthode pour un système fluvial soudano-sahélien et avec une démarche diachronique (figure 4).

3.1. Établir une typologie des styles fluviaux

Notre objectif est de réaliser une typologie des styles fluviaux et des variables de contrôle qui influencent ces styles à ces différentes échelles. Jusqu'à aujourd'hui, la détection de seuils et de tronçons homogènes a été faiblement développée, la

délimitation des styles fluviaux d'un cours d'eau étant souvent subjective et basée principalement sur des estimations visuelles et graphiques (Astrade et Bravard, 1999 ; Gurnell *et al.*, 2000). Des travaux récents menés à l'échelle du réseau hydrographique ont développé des approches statistiques d'identification des discontinuités comme le changement de style (Wiederkehr *et al.*, 2010 ; Alber et Piégay, 2011 ; Leviandier *et al.*, 2012 ; Wiederkehr, 2012).

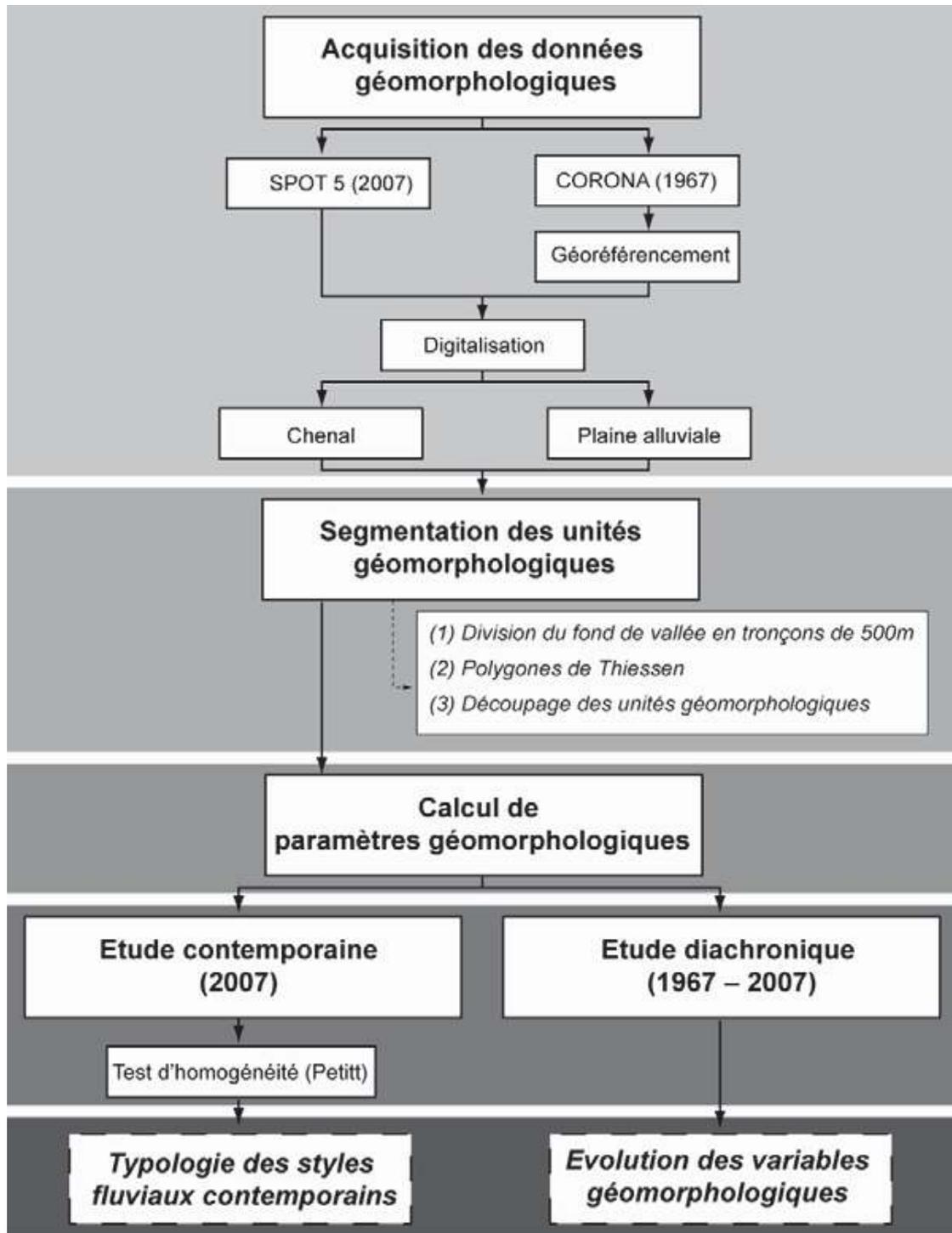


Figure 4. Organigramme méthodologique synthétisant la démarche utilisée

La méthode s'appuie sur 1) la digitalisation d'unités géomorphologiques significatives du fonctionnement du système fluvial pour l'ensemble de la vallée ; 2) une segmentation longitudinale automatique par segments élémentaires de 500m de long ; 3) le calcul, pour chacun de ces segments, de variables et d'indices à partir des unités géomorphologiques préalablement délimitées. 4) Le calcul d'indices pour chacune de ces entités a permis d'identifier tout au long du Yamé des tronçons homogènes d'un point de vue hydro-géomorphologique et caractéristiques d'un style fluvial particulier (figure 4).

3.1.1. Digitalisation des unités géomorphologiques pour l'ensemble de la vallée

En tenant compte de la spécificité du système fluvial et de son fonctionnement saisonnier, deux unités géomorphologiques ont été vectorisées : le chenal et la plaine alluviale (figure 2). Ces unités géomorphologiques ont été choisies car elles permettent de calculer des métriques et des indices statistiques mais aussi car elles sont facilement identifiables sur le terrain et sur les images satellitaires. En effet, cette étape nécessite l'utilisation d'images avec des résolutions spatiales fines afin de pouvoir identifier les limites entre les différentes unités géomorphologiques. La résolution des images SPOT-5 combinée à un choix de visualisation appropriée permet de discerner clairement les unités géomorphologiques et paysagères. Si les limites du chenal sont facilement identifiables à partir des images satellitaires avec des chenaux en eau et des bancs sableux délimités par des berges végétalisées, celles de la plaine alluviale sont plus complexes à déterminer. Cependant, le corridor alluvial identifié tout le long du Yamé apparaît être sur le terrain, être un bon marqueur des limites de l'espace potentiellement inondable. La mise en place d'un SIG a permis d'étendre cette étude à l'ensemble de la vallée grâce à un travail de photo-interprétation et de télédétection. En revanche, les images disponibles n'ont pas permis de bien différencier la basse terrasse de la très basse terrasse (figure 2). Ainsi, cette dernière unité géomorphologique n'a pas été utilisée dans cette étude.

3.1.2. Segmentation du cours d'eau

Afin de caractériser les différents styles fluviaux d'amont en aval de la vallée, nous avons voulu définir la variabilité longitudinale des deux variables précédemment digitalisées : le chenal et le fond de vallée. La première opération consiste à segmenter le cours d'eau en unités spatiales identiques. Au total, le Yamé a été segmenté en 240 tronçons de 500 m chacun. Cette taille a été choisie de manière empirique car elle n'est ni trop grande pour mélanger plusieurs styles fluviaux ni trop petite pour marquer des changements significatifs entre les tronçons. Cette segmentation a été réalisée à partir du logiciel ESRI Arcgis 10© et des outils Spatial Analyst et ArcHydroTools. Elle comporte trois étapes principales (figure 5).

– une ligne tracée au centre du fond de vallée est divisée en segments de longueurs égales (500m). Ces segments sont ensuite convertis en points localisés sur de la ligne (A).

– à partir de ces points, des polygones de Thiessen ont été créés (B). Ces derniers sont formés autour de chaque point par les bissectrices perpendiculaires aux lignes reliant deux points voisins.

– ensuite, les deux couches vectorielles (fond de vallée et chenal) ont été découpées suivant la géométrie des polygones de Thiessen (C).

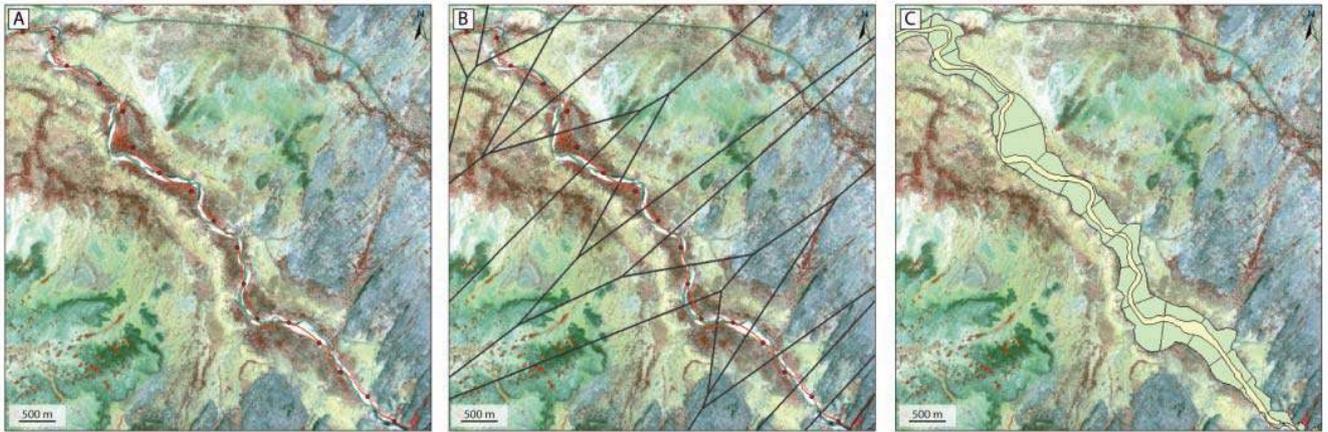


Figure 5. Méthode réalisée pour la segmentation du cours d'eau en unités spatiales de 500m de long. (Image Spot-5 de 2007 – Composition colorée standard) (Band 1 = bleu ; Band 2 = vert ; Band 3 = rouge)

3.1.3. Identification des tronçons homogènes à partir de variables géomorphologiques

Cinq paramètres géomorphologiques ont été calculés pour les 240 unités spatiales de la vallée du Yamé à partir de deux vecteurs digitalisés précédemment (chenal et plaine alluviale) (figure 6).

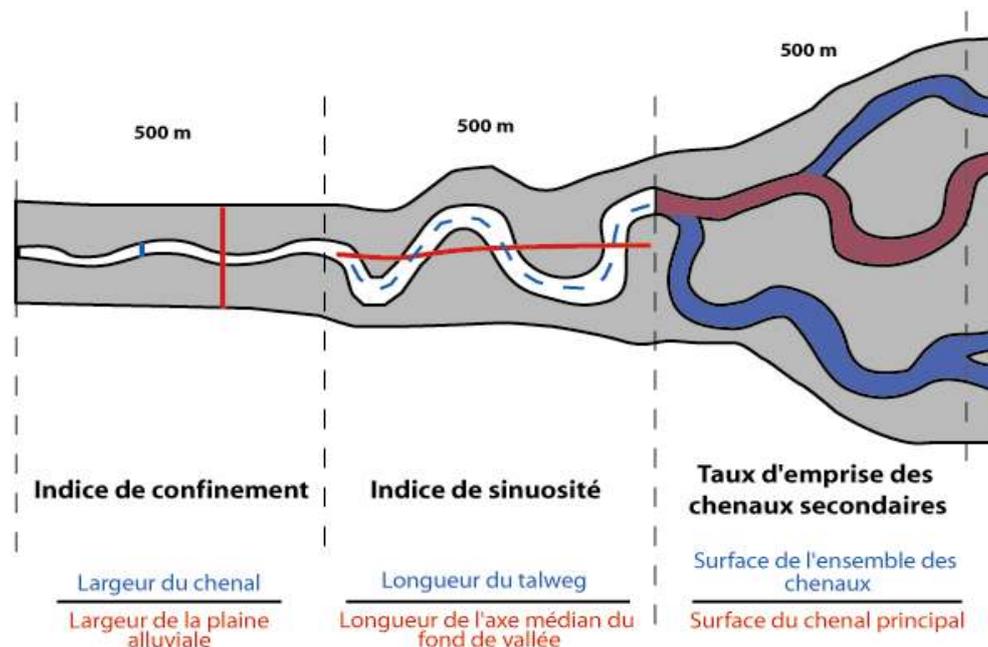


Figure 6. Calcul des paramètres géomorphologiques

– La *largeur moyenne du chenal*.

– La *largeur moyenne de la plaine alluviale*.

– L'*indice de confinement* (largeur du chenal/largeur de la plaine alluviale), qui donne des indications sur la possibilité de déplacement latéral du chenal (Wiederkehr *et al.*, 2010). Selon Brierley et Fryirs, (2005) le degré de confinement d'une vallée est le principal facteur de contrôle différenciant les processus géomorphologiques le long du cours d'eau.

– L'*indice de sinuosité* tel que défini par Leopold et Wolman (1957) (longueur du talweg/longueur de l'axe médian du fond de vallée).

– Le *taux d'emprise des chenaux secondaires* (surface de l'ensemble des chenaux/surface du chenal principal).

Ces paramètres morphologiques, notamment la largeur du chenal et la forme en plan (sinuosité), sont particulièrement sensibles à l'évolution des conditions hydrologiques et sédimentaires (Knighton, 1984). Ils représentent alors un indicateur fiable des changements du système fluvial. L'identification de tronçons géomorphologiquement homogènes a été réalisée sur la base d'un seul paramètre particulièrement structurant, l'indice de confinement (Brierley et Fryirs, 2005). Ces discontinuités au sein des séries longitudinales de paramètres géomorphologiques ont été identifiées par un test de rupture de Pettitt (Pettitt, 1979). Ce test d'homogénéité, basé sur celui de Mann Whitney, est conçu à l'origine pour distinguer deux échantillons au sein des chroniques temporelles de données climatiques ou hydrologiques. Il est employé par les hydrogéomorphologues afin de caractériser des seuils, des ruptures au sein du système fluvial à partir de variables morphologiques (Rollet, 2007 ; Wiederkehr *et al.*, 2010 ; Alber et Piégay, 2011 ; Leviandier *et al.*, 2012).

La statistique de ce test ($U_{d,N}$) considère que pour chaque unité spatiale d , avec une valeur entre 1 et N , les deux séquences longitudinales successives (X_i et X_j) pour $i=1$ à d et pour $j=d+1$ à N appartiennent à la même population. La valeur testée est le maximum de $U_{d,N}$. L'hypothèse nulle de ce test est l'absence de rupture dans la série X_i de N données (Pettitt, 1979). Il a été calculé avec le logiciel X1Stat© et appliqué sur l'indice de confinement. Le test de Pettitt, calculé à partir de ce paramètre, indique huit ruptures majeures le long de la vallée du Yamé ($p < 5\%$) (figure 7). On observe une assez bonne correspondance entre les seuils mis en avant par le test de Pettitt à partir de l'indice de confinement et la variabilité longitudinale des autres paramètres morphologiques (figure 7).

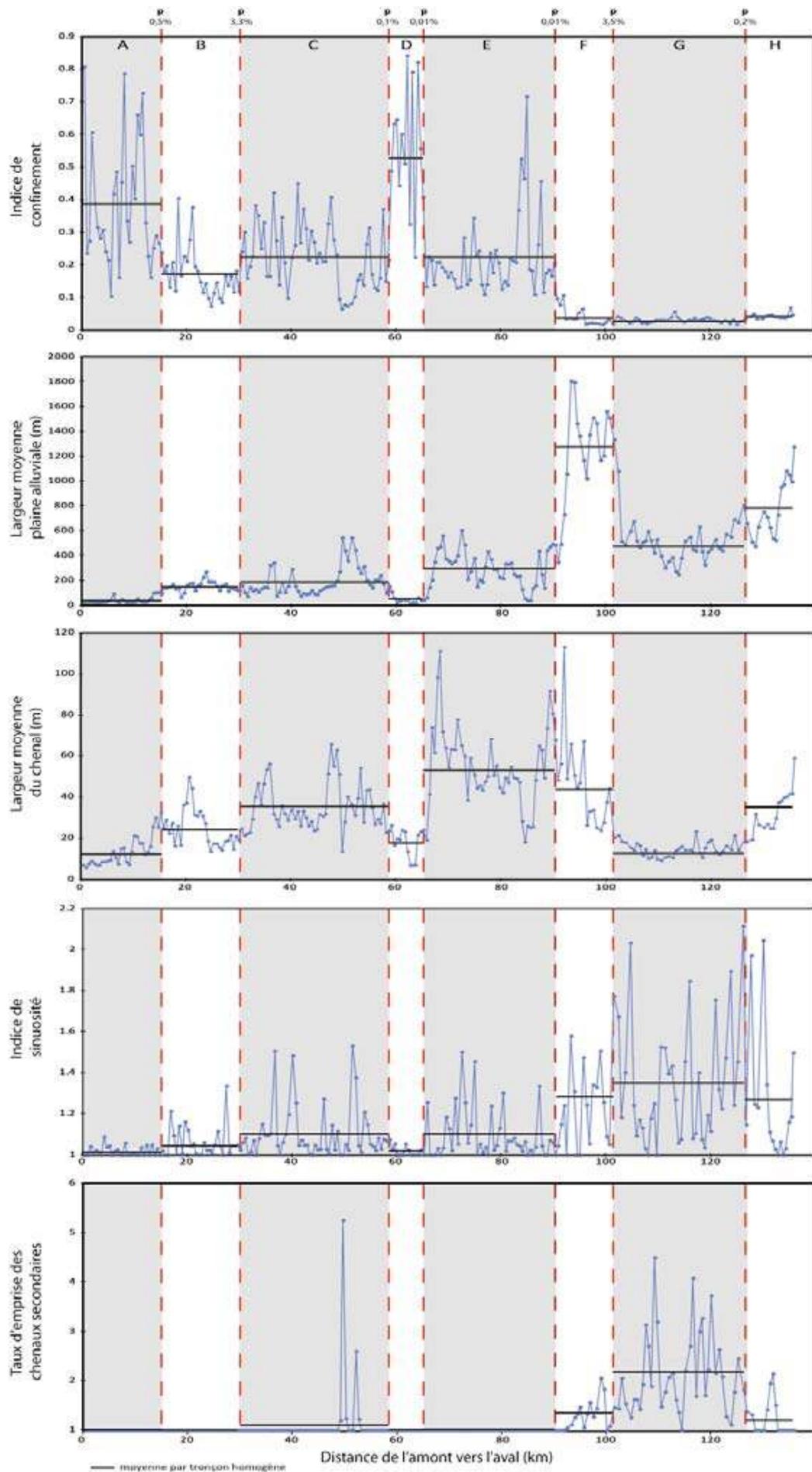


Figure 7. Variabilité longitudinale des 5 paramètres géomorphologiques. Les limites de chacun des tronçons (A-H) ont été identifiées à partir du test de Pettitt réalisé sur l'indice de confinement

3.2. Méthode d'analyse de l'évolution en plan entre 1967 et 2007

Afin d'étudier l'évolution de la forme en plan du Yamé au cours des cinquante dernières années, une analyse quantitative de variables morphologiques a été menée pour 1967 afin de la comparer à celle de 2007. La première étape a été de géoréférencer les images Corona à partir de l'image Spot-5 (référentiel cartographique : WGS 1984 UTM 30N). Afin de limiter la marge d'erreur dans le géoréférencement de ces images liée à la déformation de la photographie et la qualité du recalage, nous avons essayé de choisir des points près du cours d'eau et de les multiplier (entre 30 et 50 points par image). Les images Landsat sont, quant à elles, déjà géoréférencées. La délimitation du chenal et des défluent du Yamé ont permis de procéder au calcul des indices de sinuosité et du taux d'emprise des chenaux secondaires. La couche vectorielle correspondant à la surface du chenal a été segmentée par tronçons élémentaires de 500m de linéaire suivant le même patron que celui utilisé pour l'étude contemporaine. Ainsi, il est possible de comparer exactement la même entité spatiale du Yamé entre 1967 et 2007.

4. Résultats

4.1. Description des styles fluviaux contemporains

La méthodologie a permis de dissocier huit tronçons différents regroupant des segments élémentaires avec des caractéristiques morphologiques semblables. On remarque cependant que certains tronçons distants ont des caractéristiques morphologiques semblables (figure 7). C'est le cas des tronçons A et D qui sont tous deux caractérisés par un indice de confinement élevé et par des valeurs faibles pour les autres indices. Il en est de même pour les tronçons C et E dont les valeurs des indices sont similaires. À partir de cette analyse statistique, six styles possédant des caractéristiques hydro-géomorphologiques spécifiques ont été identifiés (figures 8 et 9).

Style fluvial 1 : il est caractérisé par un indice de confinement élevé qui révèle une largeur moyenne de fond de vallée relativement restreinte. De même, ce tronçon indique une sinuosité quasiment nulle. Ce style fluvial peut être défini comme un *chenal unique rectiligne encaissé dans les grès*.

Style fluvial 2 : ce type présente un indice de confinement plus faible. Le grès est nettement moins prédominant au sein du paysage pour ce tronçon fluvial alors que la sinuosité du cours d'eau est plus élevée. Ainsi, ce type est caractéristique d'un *chenal unique faiblement sinueux encaissé dans les glacis*.

Style fluvial 3 : il est caractérisé par un indice de confinement moyen et un chenal large. L'indice de sinuosité est légèrement plus élevé que pour le type précédent. Ce tronçon fluvial est proche d'un *chenal unique sinueux, à large bande active, encaissé dans les formations superficielles de glacis*.

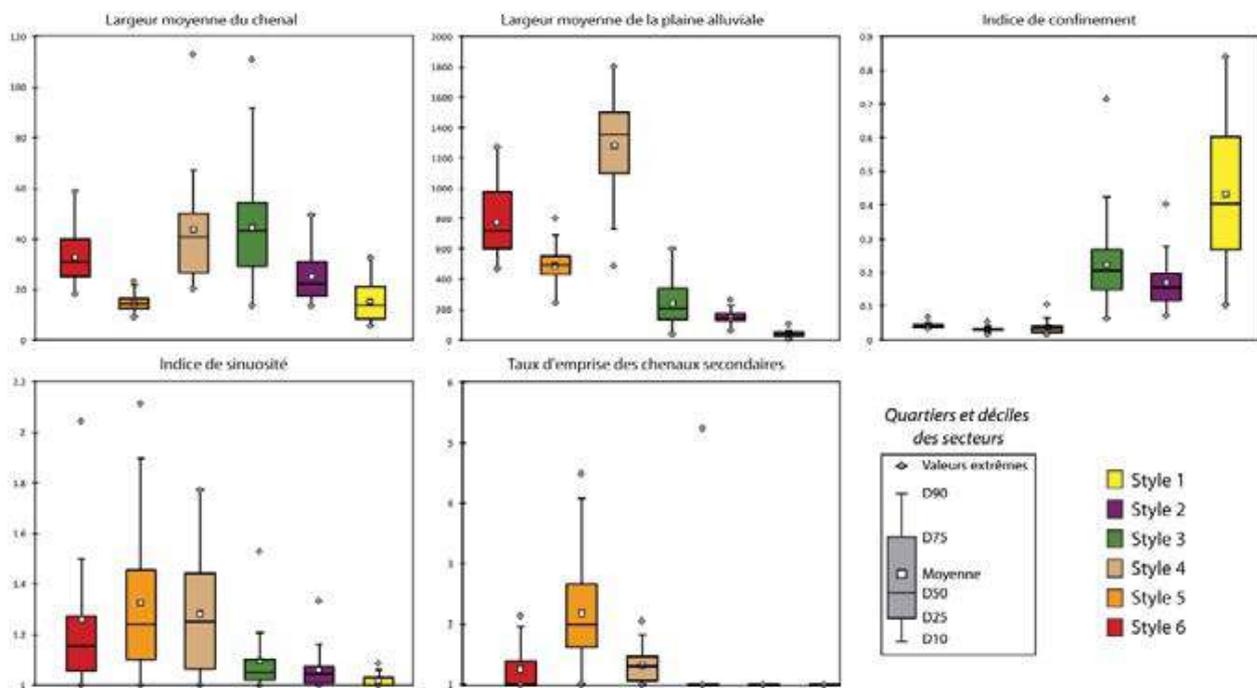


Figure 8. Caractéristiques géomorphologiques des 6 styles fluviaux identifiés

Style fluvial 4 : ce type correspond à une plaine alluviale très large ce qui explique que la valeur de l'indice de confinement soit faible. Ce tronçon est marqué par une multiplicité des chenaux à sinuosité relativement élevée. Ainsi, le style fluvial de ce tronçon peut être défini comme *plusieurs chenaux sinueux au sein d'une large plaine alluviale faiblement incisée dans les glacis*.

Style fluvial 5 : il témoigne d'un rétrécissement à la fois de la plaine alluviale et de la bande active. Ainsi, l'indice de confinement est toujours très faible. En revanche, l'indice de sinuosité et le taux d'emprise des chenaux secondaires sont élevés. Ce type a été décrit comme un *lit anastomosé composé de chenaux multiples méandriformes dans une plaine alluviale faiblement incisée dans les glacis*.

Style fluvial 6 : ce type est caractérisé par une augmentation de la largeur de la plaine alluviale et de la bande active. L'indice de confinement est faible au contraire de l'indice de sinuosité et le taux d'emprise des chenaux secondaires. Ils indiquent des *chenaux multiples sinueux à méandres et des zones humides associées à la plaine alluviale du Niger*.

4.2. La dynamique récente du système fluvial suite à la crise des années 1970-1980

La comparaison des indices géomorphologiques pour les mêmes tronçons entre 1967 et 2007 indique une évolution de la forme en plan du système fluvial notable avec des transformations importantes, notamment dans la moyenne vallée (figure 10).

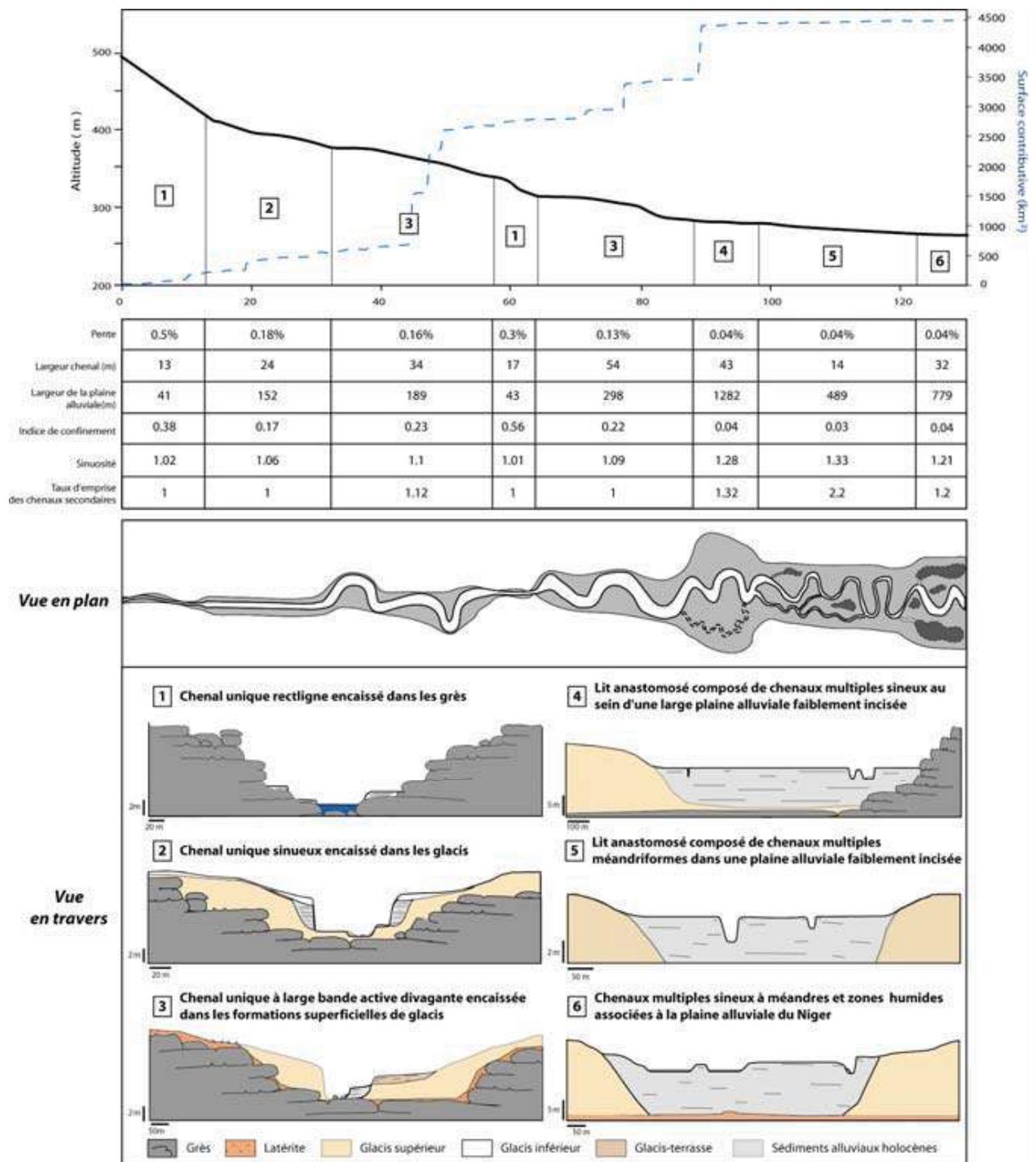


Figure 9. Vues longitudinale, en plan et en travers des six styles fluviaux de la vallée du Yamé

4.2.1. Une évolution longitudinalement homogène ?

La figure 10 présente l'évolution de la largeur moyenne du chenal, de l'indice de sinuosité et du taux d'emprise des chenaux secondaires pour chacun des segments élémentaires de 500 m de long entre 1967 et 2007. Les limites définies pour le système actuel entre les différents tronçons ont été superposées.

D'une manière générale, on observe que ces différentes variables et indices ont évolué de manière hétérogène de l'amont vers l'aval. Même si la largeur du chenal semble augmenter pour l'ensemble des tronçons, son évolution est plus ou moins

marquée selon les tronçons. En revanche, l'indice de sinuosité et le taux d'emprise des chenaux secondaires présentent de fortes variations selon les tronçons.

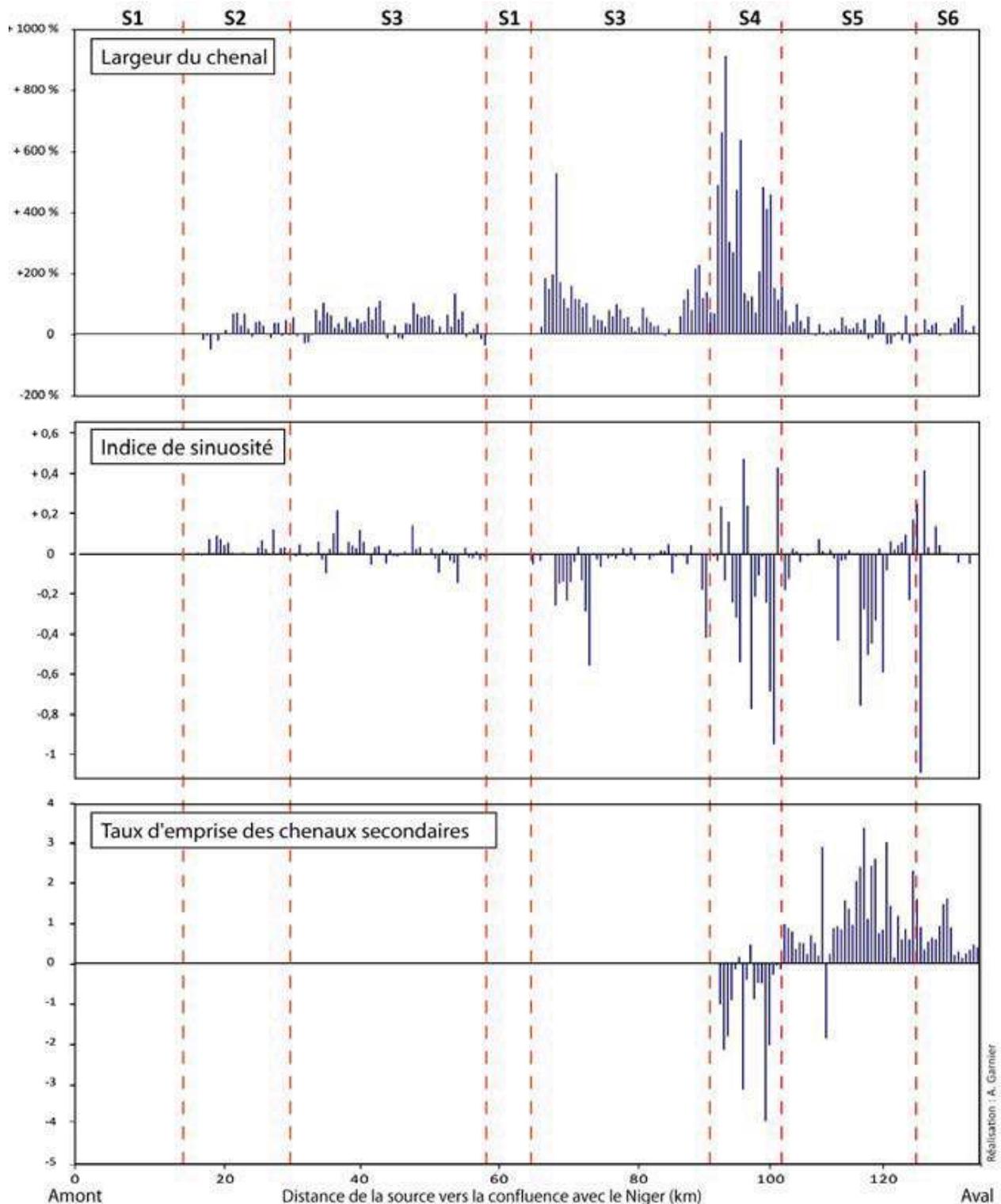


Figure 10. Évolution longitudinale des principaux indices entre 1967 et 2007

Le style 1 (S1) ne présente qu'une faible évolution de l'ensemble des indices. Cela est dû notamment au tracé du chenal confiné dans les anfractuosités du grès qui empêchent toute mobilité latérale et verticale à cette échelle de temps.

Le style 2 (**S2**) indique d'une manière générale une augmentation de la largeur du chenal atteignant +13 % en moyenne. Cependant quelques tronçons témoignent d'une diminution de plusieurs mètres de la largeur du chenal. Enfin, l'indice de sinuosité augmente très légèrement (+0,02 en moyenne).

Le style 3 (**S3**) est caractérisé par une augmentation importante de la largeur du chenal qui atteint +60 % en moyenne. Cette augmentation est particulièrement bien marquée pour les tronçons qui se situent juste après la traversée de barres gréseuses où la largeur du chenal augmente de 100 à 200 %. Un tronçon enregistre notamment une augmentation importante de + de 500 %. De même, ces tronçons sont significatifs d'une réduction de l'indice de sinuosité plus importante par rapport aux autres puisqu'ils diminuent de 0,1 à 0,55. En 1967, alors que quatre tronçons enregistrent des valeurs supérieures à 1,5, en 2007, seul un tronçon enregistre une valeur de cet ordre.

Le style 4 (**S4**) témoigne d'une augmentation importante de la largeur du chenal pour l'ensemble des tronçons puisqu'elle atteint en moyenne +336 %. Un tronçon enregistre même une augmentation de plus de 900%. En revanche, l'indice de sinuosité évolue de manière hétérogène même si dans l'ensemble, il diminue fortement avec -0,15. Ces résultats suggèrent le passage d'un chenal méandriforme à un chenal sinueux. Enfin, on observe aussi une réduction importante de l'emprise spatiale des chenaux secondaires avec en moyenne une baisse de 0,98 du taux pour ce tronçon.

Le style 5 (**S5**) enregistre une légère augmentation de la largeur de la bande active (+24 % en moyenne) et une réduction notoire de l'indice de sinuosité (-0,09 en moyenne). Au contraire du tronçon précédent, le taux d'emprise des chenaux secondaires augmente quasiment pour l'ensemble des tronçons avec en moyenne +1,13.

Le dernier style (**S6**) enregistre les mêmes ajustements avec une augmentation de la largeur du chenal (22 % en moyenne) et du taux d'emprise des chenaux secondaires (+0,6 en moyenne). En revanche, l'indice de sinuosité évolue différemment selon les segments élémentaires mais sur l'ensemble de ce style, il augmente légèrement atteignant +0,03 en moyenne.

Ainsi, on remarque que les ajustements morphologiques récents concernent principalement la moyenne vallée (style 3) et la basse vallée du Yamé (styles 4 et 5). Cela nous indique que des variables locales interviennent dans l'évolution du style fluvial. Ils sont liés principalement à la géomorphologie puisque les tronçons S1 et S2, situés à l'amont dans une vallée confinée par les grès et les glaciés, ne présentent pas de changements significatifs. En revanche, les tronçons semi ou non confinés où les contraintes latérales locales sont faibles, enregistrent des modifications morphologiques notables sur le court et moyen terme. De même, ces tronçons sont caractérisés par un apport hydrologique et sédimentaire important en raison du nombre important d'affluents qu'ils concentrent. Ils enregistrent plus nettement les

modifications environnementales qui affectent le bassin versant, qu'elles soient d'origine climatique ou anthropique.

4.2.2. Une évolution continue dans le temps ?

Les styles S3, S4 sont caractérisés par une évolution importante de la géométrie du système fluvial entre 1967 et 2007. Afin de connaître le déroulement de ces ajustements, nous avons étudié de manière qualitative l'origine de ces changements et tenté de savoir s'ils ont évolué de manière brutale ou croissante tout au long des dernières décennies et ainsi, de préciser les facteurs qui sont responsables de ces changements. L'objectif est de caractériser l'évolution de certains tronçons à différentes dates : 1967, 1990, 2001 et 2007.

Pour le *style 3*, on observe depuis 1967, une modification significative de la forme en plan du Yamé, notamment pour les tronçons situés après la traversée des barres gréseuses avec une augmentation de la largeur du chenal (30 m à 65 m en moyenne) et une forte diminution de l'indice de sinuosité qui atteint en moyenne 1,32 en 1967 contre 1,17 en 2007. Cependant, cette évolution n'est pas continue sur l'ensemble de la période. En effet, nous observons deux périodes distinctes (figure 11).

Entre 1967 et 1990, la largeur du chenal augmente légèrement mais la forme en plan du chenal demeure stable, marquée par une sinuosité relativement élevée. En revanche, en 2001, on remarque un changement important dans la géométrie du chenal avec une augmentation de la largeur du chenal mais surtout la réduction de la sinuosité du chenal. Ce processus se poursuit ensuite jusqu'en 2007 et même aujourd'hui où le chenal apparaît encore plus large et rectiligne.

Ainsi, la chronologie de l'évolution en plan du Yamé pour ce tronçon indique que l'ajustement de ce dernier s'est principalement déroulé à partir de 1990.

L'autre tronçon du Yamé qui a connu l'ajustement morphologique le plus spectaculaire depuis 1967 est le *style 4*, localisé à l'amont de la basse vallée, au niveau du lac de Bandiougou et où les derniers affluents se jettent dans le Yamé. Entre 1967 et 2007, la largeur du chenal est passée de 14 m à 58 m en moyenne alors que l'indice de sinuosité diminue de 1,43 à 1,28. A partir de l'image satellite de 1990, il est possible de cartographier les limites du lac de Bandiougou.

Entre 1967 et 1990, le chenal principal change de trajectoire alors que l'on observe une modification des limites du lac. Même si ces deux clichés ont été pris à la même période (10 et 13 décembre) et que les précipitations sont quasiment équivalentes pour ces deux années, la superficie du lac a décliné passant de 1,75 km² en 1967 à 1,67 km² en 1990. On remarque également une augmentation de la végétation rivulaire du lac scindant peu à peu le lac en trois parties bien distinctes.

En 2001, le chenal principal, désormais bien établi à l'est de la vallée, possède une géométrie assez semblable à celle de 1990. En revanche, les limites du lac ont fortement évolué. En effet, alors que ce cliché a été pris au mois d'octobre soit deux mois plus tôt et au cours d'une année qui fut plus humide (596 mm contre 422 mm

pour l'année 1990), la surface du lac a diminué de 25 % (1,30 km²). En 2007, on observe une augmentation importante de la largeur du chenal du Yamé alors que la sinuosité du chenal principal est proche de celle de 2001. Enfin, la superficie du lac continue de diminuer (1,07 km²) mais cela peut être expliqué par la période de prise de vue de ce cliché qui, cette fois-ci, est plus tardive d'un mois (novembre).

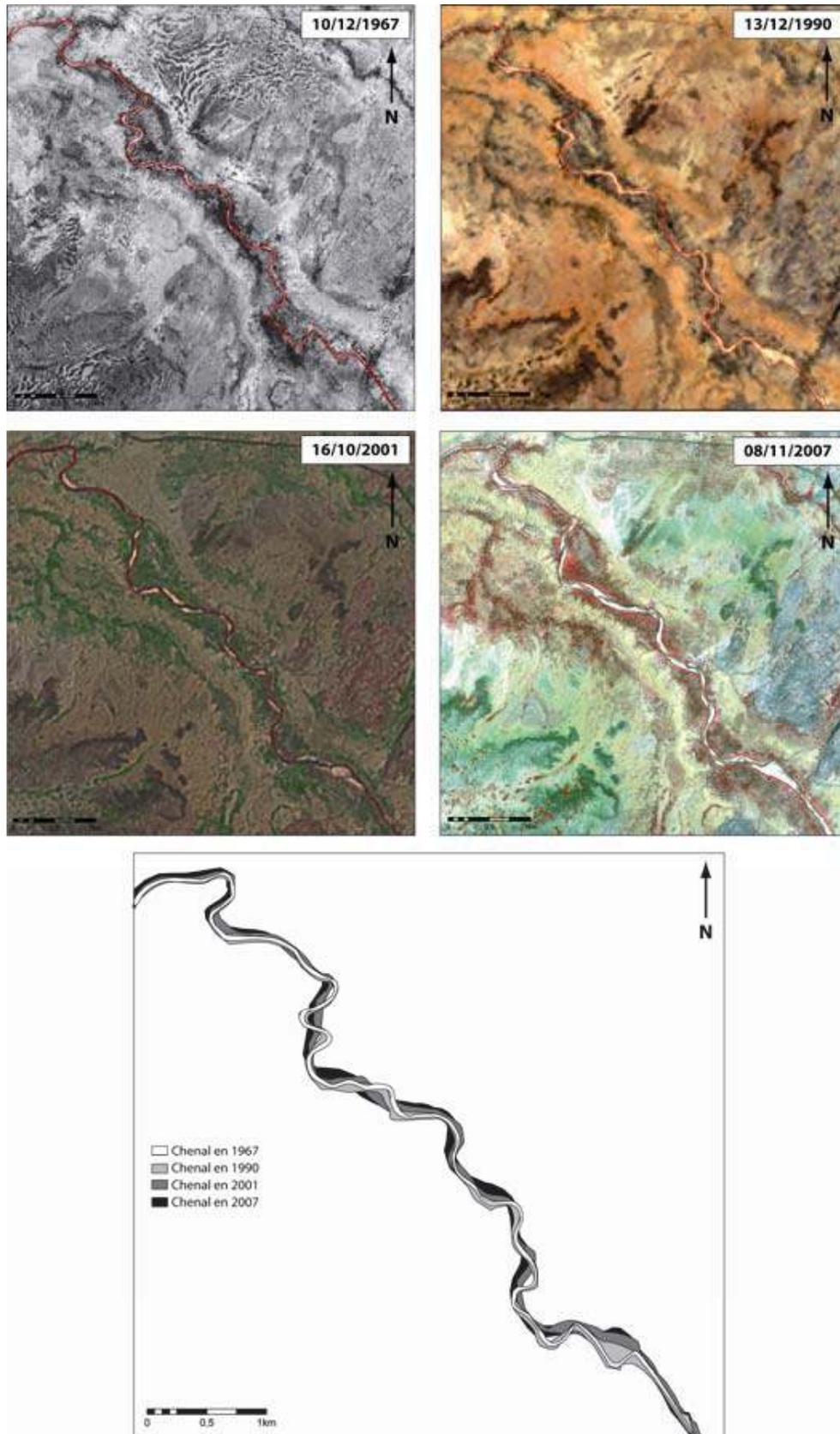


Figure 11. Évolution de certains tronçons du style 3 entre 1967 et 2007

Ainsi, pour ce tronçon, la transformation significative du Yamé se déclenche avant 1990 et donc plus tôt que pour le style 3. En revanche, comme pour ce dernier, les années 90 marquent un changement de style fluvial. De même, c'est au cours de cette période que la superficie du lac diminue le plus fortement.

5. Discussion des facteurs de contrôles intervenant dans la métamorphose récente du système fluvial

Au cours de ces quatre dernières décennies, le Yamé a connu des modifications morphologiques dans sa moyenne et sa basse vallée (styles 3, 4 et 5). Il est possible pour les deux tronçons étudiés de schématiser l'évolution du système fluvial au travers de deux variables : la largeur du chenal principal et l'indice de sinuosité. Au cours de cette période, on observe pour les deux tronçons une augmentation du premier paramètre et une réduction du second.

Cependant, cette évolution n'est pas constante et trois phases peuvent être définies (figure 12) : une première phase, entre 1967 et 1990 avec un style à méandre, une deuxième phase entre 1990 et 2001 qui est une période transitoire où la largeur du chenal augmente fortement alors que l'indice de sinuosité diminue.

Enfin, depuis les années 2000, le nouveau style fluvial se stabilise avec un chenal sinueux et des méandres plus rares. Les facteurs susceptibles d'expliquer un changement dans les entrées sédimentaires et liquides sont multiples. L'élargissement du chenal ainsi que la réduction de la sinuosité est la réponse apportée du système fluvial à une augmentation relative de la charge sédimentaire (Bravard et Petit, 1997). Ce processus peut être à l'origine d'une fragilisation des versants sous contrôle climatique et/ou anthropique. Dans la vallée du Yamé, il semble probable que les deux facteurs aient été combinés. La comparaison de l'évolution du système fluvial pour les tronçons 3 et 4 du Yamé, au cours des cinquante dernières années, avec celle des précipitations pour la station de Bandiagara (figure 12B) et de la croissance démographique pour la région apporte des arguments à la discussion (figure 12C).

Les changements morphologiques du Yamé entre 1967 et 2007 reflètent une augmentation des apports liquides et solides. Cette évolution est particulièrement marquée pour les styles 3 et 4, qui se situent à la charnière entre la zone de transfert des sédiments et la zone d'accumulation, là où le chenal est latéralement peu confiné et les affluents plus nombreux. On observe pour cette période, à la fois un élargissement du chenal et une baisse de l'indice de sinuosité notamment à partir des années 1990. Cela traduit une augmentation de la charge sédimentaire qui transite des versants vers le cours d'eau. Ce processus peut trouver son origine des crises de sécheresses des années 1970-1980 qui ont fortement appauvri le couvert végétal du bassin versant, comme pour l'ensemble de la zone sahélo-soudanienne. Cependant, la vallée du Yamé est un espace fortement convoité en raison de sa nature géologique qui permet un approvisionnement en eau tout au long de l'année par

l'aquifère des grès, même lors des épisodes de sécheresse. Ainsi, au cours des années 1970-1980, la vallée du Yamé a vraisemblablement représenté une zone refuge temporaire ou permanente, notamment pour les pasteurs venant du nord. La population a augmenté de 21 % entre 1976 et 1987. Selon les témoignages des habitants originaires des villages situés dans la moyenne vallée, l'élargissement du chenal à cet endroit (figure 11) serait dû à la présence de plus en plus importante des éleveurs peuls dans la région au cours de ces dernières décennies.

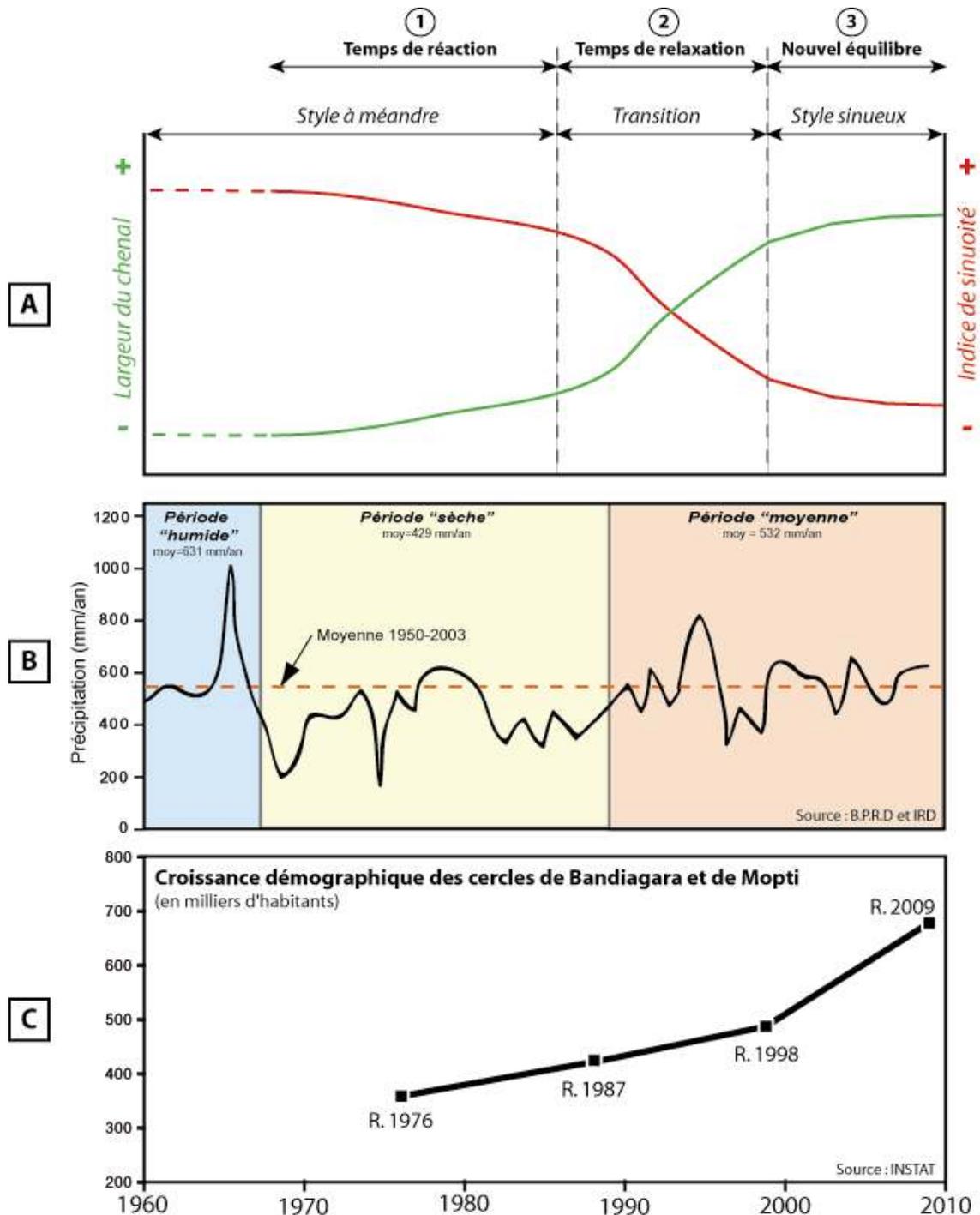


Figure 12. Schéma de l'ajustement fluvial de la vallée du Yamé (A) en relation avec l'évolution des précipitations (B) et la croissance démographique au cours des cinq dernières décennies (C)

Cela se traduit par un accroissement du cheptel et de la pression sur la végétation des berges du cours d'eau et sur le fond de vallée. La surfréquentation des berges engendre une dégradation de la ripisylve et ainsi une érosion des berges. Celle-ci est particulièrement importante lors des crues exceptionnelles. Pendant la saison humide, les arbres tombent et les berges s'effondrent favorisant chaque année le recul de ces dernières. Ensuite, la charge grossière est expulsée au gré des crues saisonnières lorsque le système fluvial devient plus actif au cours des années 1990.

De la même manière, on a pu observer une nette diminution de la superficie du lac de Bandiougou dès les années 1980-1990, ainsi qu'une augmentation de la végétation hygrophile sur les marges du lac. Si la raison climatique peut être aussi avancée, elle semble cependant moins déterminante que le facteur anthropique. En effet, le lac est aujourd'hui soumis à une pression accrue de la part des habitants des villages situés aux alentours, qui y ont développé le maraîchage de manière intensive. Cette activité locale relativement récente a connu son réel développement à partir des années 1980 avec l'utilisation des motopompes comme principal outil d'irrigation. Aujourd'hui, tous les maraîchers en sont munis ce qui permet d'accroître la surface cultivée. Ainsi, la diminution de la superficie du lac et la prolifération d'espèces invasives sur les marges sont dues principalement à l'intensification de l'agriculture irriguée avec la généralisation de l'utilisation de la motopompe.

Cette étude permet de créer un modèle de la réponse du système fluvial à la modification des variables de contrôle. Les trois périodes qui décomposent le temps de réponse d'un système fluvial suite à une modification des variables de contrôle (Brunsden, 1980), peuvent être identifiés (figure 12) :

(1) *le temps de réaction* : c'est le temps nécessaire au système fluvial pour ajuster sa morphologie aux nouvelles variables de contrôle. Dans la vallée du Yamé, cette phase située entre la fin des années 1960 et 1990, se manifeste par une modification des conditions environnementales du bassin versant avec une dégradation du couvert végétal sur les interfluves mais surtout dans la plaine alluviale. Celle-ci est le résultat de la diminution des précipitations et de la pression exercée par les populations d'éleveurs et d'agriculteurs. Même si des échanges latéraux opèrent à l'échelle du tronçon, aucune modification du système fluvial n'est réellement enregistrée.

(2) *le temps de relaxation* : la période nécessaire pour que les changements morphologiques du système fluvial établissent un nouvel équilibre. Dans la vallée du Yamé, le temps de relaxation dure une dizaine d'année. On observe une augmentation progressive de la largeur du chenal alors que l'indice de sinuosité diminue. Cette adaptation progressive des conditions morphologiques du système fluvial suggère un transfert des flux longitudinaux qui fait suite à un retour vers des conditions climatiques « normales ».

(3) *le temps à partir duquel un nouvel équilibre est maintenu.* À partir de 2001, on observe peu de changements ce qui témoigne de la stabilité du nouveau style fluvial.

Ces résultats sont en accord avec les études hydrologiques menées sur des bassins versants soudano-sahéliens, situés au nord de l'isohyète 750 mm (Mahé et Paturel, 2009). Les résultats suggèrent, depuis la fin des années 1970, une augmentation des coefficients d'écoulement des cours d'eau malgré une baisse généralisée des précipitations. Il est possible, comme pour le bassin versant du Yamé, d'y associer une origine climatique mais aussi anthropique. En effet, on remarque une diminution du couvert végétal depuis les années 1950 au Sahel et particulièrement entre 1975 et 1992 (Leblanc *et al.*, 2008). L'accroissement de la population a nécessité l'extension de la surface cultivée mais aussi un besoin en bois domestique conséquent (Leblanc *et al.*, 2008). Ce changement du mode d'occupation du sol a participé à l'augmentation des coefficients d'écoulement mais aussi à l'arrivée des pics de crue un mois plus tôt que d'habitude, au mois d'août (Mahé et Paturel, 2009). Ils résultent d'un accroissement du ruissellement hortonien par le refus d'infiltration suite à l'encroûtement des sols devenus imperméables en raison de l'absence de végétation (Valentin *et al.*, 2004). Le même scénario semble être à l'origine de l'augmentation des flux liquides et solides dans le bassin versant du Yamé

6. Conclusion et perspectives

Dans un environnement où les données disponibles sur l'hydrologie d'un cours d'eau sont rares voire absentes, la méthodologie appliquée dans cette étude prend toute sa mesure. L'approche naturaliste de terrain associée à un travail de géomatique permet d'acquérir une bonne connaissance du fonctionnement du système fluvial et de délimiter à partir d'indices statistiques les différents styles fluviaux. Ainsi, pour la vallée du Yamé, cette méthode semi quantitative a permis de caractériser de manière quantitative les évolutions longitudinales du système fluvial et d'identifier six styles fluviaux différents. Le calcul de variables géomorphologiques par segment élémentaire de 500 m à partir d'images satellitaires plus anciennes, les images Corona de 1967, a permis de comprendre l'évolution du système fluvial en réponse aux périodes de sécheresse des années 1970-1980. Les résultats, comparés à ceux de 2007, indiquent une évolution longitudinale très diversifiée de l'amont vers l'aval du bassin versant, ce qui témoigne du poids des facteurs internes dans l'évolution du système fluvial.

L'utilisation d'autres images satellitaires, comprises entre ces deux périodes nous ont permis de préciser, de manière qualitative, les temporalités de ces évolutions. Elles révèlent une évolution en trois temps. La première concerne le temps de réaction situé entre la fin des années 1960 jusqu'au début des années 1990. On observe un changement des conditions environnementales du bassin versant sans réaction notable du système fluvial. Entre 1990 et le début des années 2000, qui

marque une période de retour vers des conditions plus humides, le système fluvial réagit, c'est la phase de relaxation. Enfin, c'est réellement à partir des années 2000 que la géométrie du cours d'eau ne change plus, indiquant ainsi un nouvel équilibre.

La comparaison de ces résultats avec les données climatiques et anthropiques disponibles à l'échelle locale suggère que l'augmentation de la charge sédimentaire au sein du cours d'eau semble être le résultat d'une fragilisation des versants sous contrôle à la fois climatique et anthropique. En effet, si les phases de sécheresse ont eu un impact certain sur les milieux soudano-sahéliens, l'augmentation de la pression anthropique, notamment de la part des éleveurs qui ont trouvé refuge sur le plateau gréseux, semble avoir été un facteur aggravant. L'accroissement de la population dans le bassin versant du Yamé, qu'elle concerne des agriculteurs ou des éleveurs, a en effet, contribué à appauvrir la végétation des versants et de la ripisylve et à déstabiliser les berges.

Ainsi, cette étude apporte de nouvelles connaissances sur le fonctionnement des systèmes soudano-sahéliens contemporains et sur les réponses de ces derniers lors de changements climatiques et anthropiques. De même, elle met en évidence qu'une diminution des précipitations ne suppose pas forcément une diminution des flux liquides dans le bilan hydrologique et encore moins une diminution du ruissellement et de l'érosion des sols.

Cependant afin de comprendre la dynamique morphogène des systèmes fluviaux en réponse à des changements environnementaux, il serait nécessaire de comparer ces résultats avec d'autres bassins versant dont les conditions environnementales sont différentes. Il serait intéressant de mener ce type d'étude sur des bassins versants localisés dans des zones climatiques plus arrosées, en zone soudanienne par exemple, ou alors sur des bassins versants dont la densité de population est moindre. Néanmoins, afin de vérifier les conditions de transposition et de généralisation des méthodes, il serait nécessaire d'utiliser des images avec de plus hautes résolutions et notamment un modèle numérique de terrain avec une meilleure précision ce qui permettrait d'automatiser la délimitation du fond de vallée (Wiederkehr *et al.*, 2010). Cela permettrait aussi d'affiner la reconnaissance des autres unités géomorphologiques telles que la très basse terrasse et d'approfondir la compréhension des systèmes fluviaux contemporains.

Bibliographie

- Alber A., Piégay H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, vol. 125, n° 3, p. 343-360.
- Amogu O., Descroix L., Yéro K.S., Le Breton E., Mamadou I., Ali A., Vischel T., Bader J.C., Moussa I.B., Gautier E., Boubkraoui S., Belleudy P. (2010). Increasing River Flows in the Sahel. *Water*, vol. 2, n° 2, p. 170-199.

- Amogu O. (2009). *La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger: méthodes expérimentales et modélisation*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble.
- Andersen I., Dione O., Jarosewich-Holder M., Olivry J.C. (2005). *The Niger River Basin. A Vision for Sustainable Management*. Golitzen, K.G. (Eds.), Directions in Development, The World Bank, Washington DC, USA.
- Arnaud-Fassetta G., Fort M. (2004). La part respective des facteurs hydroclimatiques et anthropiques dans l'évolution récente (1956-2000) de la bande active du Haut Guil, Queyras, Alpes françaises du Sud. *Méditerranée*, vol. 1-2, p. 143-156.
- Astrade L., Bravard J.P. (1999). Energy gradient and geomorphological processes along a river influenced by neotectonics (the Saône River, France). *Geodinamica Acta*, vol.12, n° 1, p. 1-10.
- Bravard J.P. (1987). *Le Rhône du Léman à Lyon*. La Manufacture, Lyon.
- Bravard J.P., Petit F. (1997). *Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial*. Librairie Armand Colin, Paris.
- Bricquet J.P., Bamba F., Mahe G., Toure M., Olivry J.C. (1997). Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, vol. 10, n° 3, p. 321-337.
- Brierley G.J., Fryirs K.A. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*, Blackwell Publications, Oxford, UK.
- Brunsdon, D. (1980). Applicable models of long term landform evolution. *Zeitschrift für Geomorphologie*, suppl. 36, p.16-26.
- Charney J.G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 101, n° 428, p. 193-202.
- Courel M.F. (1985). *Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*. Thèse de doctorat d'État. Université Paris 1, publié par le Centre scientifique IBM-France.
- Dufour S. (2005). *Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône)*. Thèse de doctorat de Géographie, Université de Lyon 3.
- Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., Boulain N. (2009). *Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review*. *Water Resources Research*, vol. 45.
- Gurnell A.M., Peiry J.-L., Petts G.E. (2003). Using historical data in fluvial Geomorphology, *Tools in fluvial geomorphology*, Kondolf G.M., Piégay H. (Eds.), Wiley, p. 77-101.
- Gurnell A., Petts G., Harris N., Ward J., Tockner K., Edwards P., Kollmann J. (2000). Large wood retention in river channels: the case of the Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, n° 3, p. 255-275.
- Janicot S. (1992). Spatiotemporal variability of West African rainfall. Part I: regionalizations and typings. *Journal of Climate*, vol. 5, p. 489-511.

- Knighton A.D. (1984). *Fluvial forms and processes*. Edward Arnold, London.
- Knox J.C. (1983). Responses of river systems to Holocene climates. *Late Quaternary Environments of the United States*, vol. 2, p. 26-41.
- L'Hôte Y., Mahé, G. (1996). *Afrique de l'ouest et centrale. Carte des précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989)*. ORSTOM, Paris.
- Lamb P. J. (1978). Large-scale Tropical Atlantic surface circulation patterns associated with Subsaharan weather anomalies. *Tellus*, vol. 30, n° 3, p. 240-251.
- Lebel T., Taupin J.D., D'Amato N. (1997). Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel: 1. General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology*, vol. 188-189, p. 74-96.
- Lebel T., Cappelaere B., Galle S., Hanan N., Kergoat L., Levis S., Vieux B., Descroix L., Gosset M., Mougin E., Peugeot C., Seguis L. (2009). AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: an overview. *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 1, p. 3-13.
- Leblanc M.J., Favreau G., Massuel S., Tweed S.O., Loireau M., Cappelaere B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* vol. 61, n° 3-4, p. 135-150.
- Lemoalle J., Bader J. C., Leblanc M., Sedick A. (2010). L'évolution récente du Lac Tchad: contexte général et données de base. *Actes du Forum Mondial pour le Développement Durable « Pour la sauvegarde du Lac Tchad », 31 octobre 2010*.
- Leopold L.B., Wolman M.G. (1957). River channel patterns: braided, meandering, and straight. U.S Geological Survey, Professional Paper 282B, p. 39-45.
- Leroux M. (1995). La dynamique de la grande sécheresse sahélienne. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 70, n° 3, p. 223-232.
- Leviandier T., Alber A., Le Ber F., Piégay H. (2012). Comparison of statistical algorithms for detecting homogeneous river reaches along a longitudinal continuum. *Geomorphology*, vol. 138, n° 1, p. 130-144.
- Mahé G., Paturel J.E. (2009). 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers, *Comptes Rendus Geosciences*, vol. 341, n° 7, p. 538-546.
- Mahé G., Olivry J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, vol. 61, p. 109-117.
- Mamadou I. (2012). *La dynamique des koris et l'ensablement de leur lit et de celui du fleuve Niger dans la région de Niamey*. Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne et Université de Niamey.
- Miramont C., Jorda M., Pichard G. (1998). Évolution historique de la morphogénèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne: l'exemple de la Moyenne Durance (France du sud-est). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 52, n° 3, p. 381-392.
- Nicholson S.E. (1980). The nature of rainfall fluctuations in subtropical West-Africa. *Monthly Weather Review*, vol. 109, p. 2191-2208.

- Peiry J.L. (1988). *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Lyon 3.
- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.
- Picouet C. (1999). *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé, le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- Rollet A.J., Piégay H., Bornette G., Dufour S., Persat H. (2013). Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river-bed downstream of dams in restoration perspectives: application of a multicriteria, hierarchical, and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications*. Sous presse.
- Rollet A.J. (2007). *Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage: le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de doctorat, Université de Lyon 3.
- Ruelland D., Tribotte A., Puech C., Dieulin C. (2011). Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, n° 6, p. 1747-1777.
- Ruelland D., Dezetter A., Puech C., Ardoin-Bardin S. (2008). Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n° 12, p. 3533-3551.
- Salvador P.G. (1991). *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère*. Thèse de doctorat de Géographie, Université de Lyon 3.
- Schumm S.A. (2005). *River variability and complexity*. Cambridge University Press.
- Thibaud B. (2005). Enjeux spatiaux entre Peuls et Dogon dans le Mondoro (Mali). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, vol. 16, p. 165-174.
- Valentin C., Rajot J.L., Mitja D. (2004). Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agriculture, ecosystems and environment* vol. 104, n°2, p. 287-302.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H. (2010). Localisation et caractérisation semi-automatique des géomorphosites fluviaux potentiels. Exemples d'applications à partir d'outils géomatiques dans le bassin de la Drôme (France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, vol. 2, p. 175-188.
- Wiederkehr E. (2012). *Apport de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques. Élaboration d'indicateurs appliqués au bassin du Rhône*. Thèse de doctorat de l'École normale supérieure de Lyon.