

# L'utilisation d'images satellites multi-échelles pour l'estimation des impacts des aménagements hydro-agricoles sur les superficies inondables en aval. Le cas du barrage de Talo et des plaines du Pondori au Mali

---

DIARRA Balla\*

## Résumé

Au Mali, à cause de la sécheresse de ces dernières décennies, les populations se sont réfugiées dans les zones humides et leurs alentours où leurs cultures ont de meilleures chances de maturation. Mais la baisse continue de la pluviométrie allait bientôt affecter l'hydraulicité des cours d'eau et donc ces zones humides. L'installation d'ouvrages de retenue d'eau permet cependant d'améliorer l'hydraulicité sur un tronçon et favoriser ainsi la submersion naturelle de certaines plaines. Mais l'implantation d'ouvrages de retenue d'eau sur ces cours d'eau provoque de plus en plus de conflits entre populations partageant les mêmes ressources en eaux. A la base de ces conflits plusieurs inquiétudes notamment la crainte d'une diminution des superficies naturellement inondables à l'aval qui constituent très souvent les seuls espoirs de récolte pour les populations. Ces inquiétudes, lors de la construction du barrage de Talo sur le fleuve le Bani, furent les causes d'un long conflit entre l'Etat malien et les populations de Djenné en aval du barrage. Dans cette étude il s'est donc agi de mesurer les impacts du barrage de Talo sur les superficies inondables dans le Pondori. Ces superficies inondées étant fonction du niveau de la crue du fleuve le Bani, il fallait d'abord mesurer les impacts du barrage sur ces niveaux. Pour atteindre ces objectifs, des données pluviométriques et hydrologiques ont été acquises pour l'étude du comportement actuel du Bani et des impacts possibles du barrage. Des cartes et des images satellites l'ont été pour l'estimation des superficies inondables avant et après la construction du barrage. Globalement, l'étude a montré que, même si des retenues importantes sont effectuées en année déficitaire à très déficitaire (de 70 à 110 cm), c'est surtout en année de pluviométrie moyenne que les retenues peuvent affecter l'inondation des plaines du Pondori.

**Mots-clés :** installations hydro-agricoles, impacts, les surfaces inondées, images satellites, le barrage de Talo, Mali.

---

\* Géographe, ISFRA – Université de Bamako – MALI.

## Abstract

In Mali, because of the dryness of these last decades, the populations took refuge on the wetlands and their neighbourhoods where their cultures have better chances of maturation. But the continuous fall of pluviometry was going soon to affect the hydraulicity of the rivers and thus these wetlands. The installation of works of water reserve however makes it possible to improve the hydraulicity on a section and to thus support the natural immersion of certain plains. But the establishment of works of water reserve on these rivers causes more and more conflicts between populations sharing the same water resources. With the base of these conflicts several concerns in particular the fear of a reduction in the naturally easily flooded surfaces to the downstream which very often constitute the only hopes of harvest for the populations. These concerns, during the construction of the dam Talo on the river Bani, were the causes of a long conflict between the Malian State and the populations of Djenné downstream from the stopping. In this study it was thus a question of measuring the impacts of the dam Talo on the easily flooded surfaces in Pondori. These flooded surfaces being a function of the level of raw river Bani, it was initially necessary to measure the impacts of the stopping on these levels. To achieve these goals, of the rainfall and hydrological records were acquired for the study of the current behaviour of Bani and the possible impacts of the stopping. Charts and satellite images were it for the estimate of the easily flooded surfaces before and after the construction of the stopping. All in all, the study showed that, even if significant reserves are carried out in overdrawn to very overdrawn year (from 70 to 110 cm), it is especially in year of average pluviometry that reserves can affect the flood of the plains of Pondori.

**Keywords:** hydro-agricultural installations, impacts, flooded surfaces, satellite images, Talo dam, Mali.

## Introduction

Le Mali, vaste pays continental situé presque entièrement dans la zone tropicale nord, connaît des cycles de sécheresse de plus en plus longs et rapprochés. Cette situation affecte durement les cultures pluviales (90 % des cultures du Mali) et entraîne l'insécurité alimentaire partout dans le pays. Les populations se sont alors réfugiées sur les zones humides et leurs alentours où les cultures ont de meilleures chances de maturation. Mais la baisse continue de la pluviométrie se traduira bientôt, sur l'hydrographie du Mali, par une perte d'hydraulicité importante. On estime en effet que si les pluies ont chuté d'environ 25 % ces trente dernières années, les écoulements l'ont fait de plus de 50 % (Mahé, 2001 ; Diarra *et al.*, 2006). Sans entrer dans les débats sur les causes de cette énorme différence, on comprend clairement que l'inondation par submersion naturelle de beaucoup de plaines est devenue impossible, du moins très aléatoire. Mais si l'on ne peut rien contre la baisse de la pluviométrie, on peut améliorer l'hydraulicité d'un tronçon de fleuve par l'installation d'ouvrages de retenue d'eau, permettant l'inondation, cette fois en submersion artificielle, de certaines plaines. Ce que l'Etat malien et beaucoup de populations riveraines de cours d'eau ont entrepris depuis le début des années de sécheresse. Mais l'implantation d'ouvrages de retenue d'eau sur ces cours d'eau, qu'elle soit l'œuvre de l'Etat ou des populations elles-mêmes, provoquent de plus en plus de conflits dont certains conduisent à des morts d'hommes. A la base de ces conflits plusieurs inquiétudes parmi lesquelles la crainte d'une diminution des superficies naturellement inondables à l'aval. Presque systématiquement en effet, les populations en aval des ouvrages de retenue d'eau pensent que ceux-là entraînent forcément une diminution des quantités d'eau arrivant en aval dans les conditions naturelles et donc par conséquent une diminution des surfaces naturellement inondées.

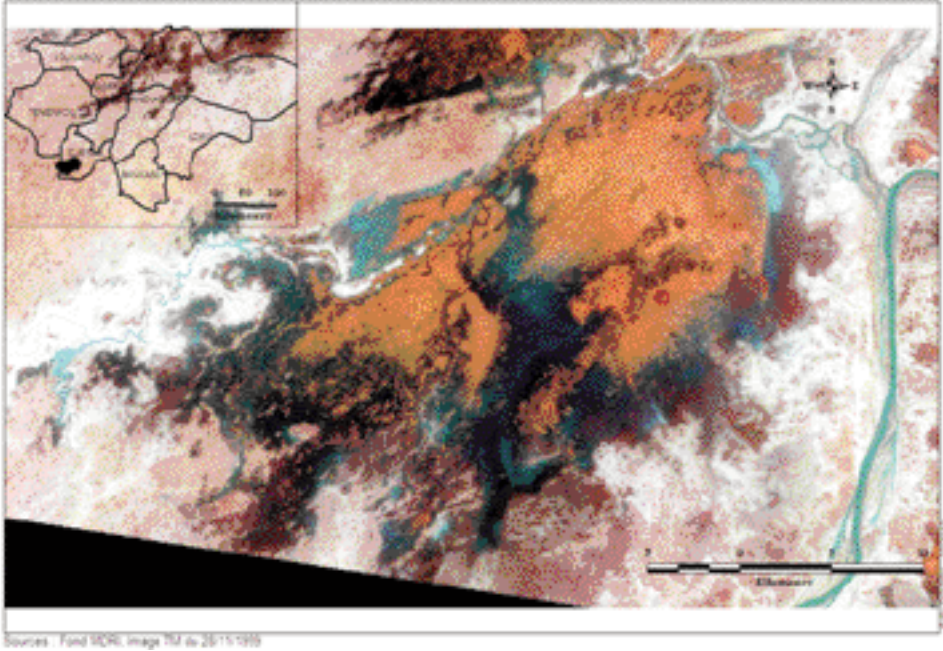
Ces inquiétudes se sont justement fait jour, lors de la construction du seuil de Talo sur le fleuve le Bani et furent les causes d'un long conflit entre l'Etat malien et les populations de Djenné en aval du seuil. Celles-ci craignaient en effet que l'installation du seuil de Talo n'entraîne une diminution importante des surfaces inondables dans les plaines du Pondori qui constituent les seuls espoirs de récolte pour elles.

Cependant, malgré l'intensité et la durée du conflit, aucune évaluation cartographique grandeur nature n'a été menée pour confirmer ou infirmer les inquiétudes exprimées. Seules des simulations cartographiques, à partir de mesures limnimétriques ont été faites pour estimer les impacts surfaciques du barrage. De plus ces études n'ont concerné qu'une petite portion, soit 150 hectares, du casier de Bougoula à 45 km en amont de Djenné (David N. et Gallier F., 2002).

Or, par ailleurs, la recherche de l'autosuffisance alimentaire dans un contexte de déficit pluviométrique nécessite une plus grande maîtrise de l'eau, c'est-à-dire l'installation d'ouvrages de retenue. Il devient donc urgent d'étudier de façon scientifique les différentes inquiétudes soulevées par les aménagements hydro-agricoles. En ce qui concerne cette étude il s'est agi de mesurer, à partir d'images de sources et d'échelles différentes, les impacts du seuil de Talo sur les superficies inondables dans le Pondori. Mais les superficies inondées étant fonction du niveau de la crue du fleuve le Bani, il fallait d'abord mesurer les impacts du seuil sur ces niveaux.

## Matériels et méthodes

La zone d'étude est celle des plaines du Pondori dans le Cercle de Djenné (cf. carte). Ces plaines, qui font partie du delta central du fleuve Niger, sont cependant bien individualisées et sont surtout plutôt inondées par les crues du Bani<sup>1</sup>. Elles se situent à l'ouest, sud-ouest de la ville de Djenné et concernent une surface d'inondation d'environ 70 000 hectares en année de bonne pluviométrie.



**Carte :** Le Pondori et son emplacement dans la Région de Mopti

Se situant presque entièrement dans le delta, le Cercle de Djenné est une zone de plaines dont l'inondation fait vivre les populations. Le climat est de type soudano-sahélien avec, ces dernières années, une forte tendance vers le sahélien. L'hydrographie est composée, pour l'ensemble du Cercle, du Niger et du Bani. Pour les plaines du Pondori, qui nous concernent dans cette étude, le Bani est l'élément hydrographique principal. Le Cercle de Djenné appartient à la Région administrative de Mopti.

## Les données utilisées et les traitements appliqués

### Les données hydrologiques

Pour l'analyse de l'hydrologie du Bani avant et après barrage il nous fallait des données hydrologiques décennales. En effet l'évolution du niveau de la crue concerne des intervalles de temps qui ne peuvent se compter qu'en jours. Ces données ont

<sup>1</sup> Au contraire des autres plaines du delta qui sont inondées par la crue du fleuve Niger.

été obtenues auprès des services techniques chargés de les recueillir. Elles concernent les stations de Douna, en amont du seuil, et celle de Bénény Kégny (dans la suite BÉNÉNY KEGNY), première station de mesure des écoulements après le seuil et surtout le seul qui ait été installé avant que le fleuve n'entre dans les plaines du Pondori c'est-à-dire dans notre terrain d'étude. C'est pour ces raisons que les données de cette station sont analysées pour l'évaluation des impacts hydrologiques du barrage et, par conséquent, des impacts surfaciques dans le Pondori. En plus des données de ces deux stations, celles de la station de Sofara, en aval de la zone d'étude, sont entrées parfois dans les traitements pour la compréhension de certains paramètres.

Ces données ont fait l'objet d'un ensemble de traitements statistiques qui ont permis d'obtenir les impacts hydrologiques possibles du barrage sur les niveaux de crue.

## **Les années d'analyse et les documents cartographiques**

### **Les années d'analyse**

Les critères de choix des années sont les suivants : il nous fallait d'abord une année excédentaire, une autre moyenne et une troisième déficitaire et ce tant au plan hydraulique qu'au plan pluviométrique. En plus de cela, pour les années choisies il devrait exister des images au moment des pics de crue afin de pouvoir évaluer les surfaces maximales inondées. Les années 1999, 2001 et 2002 répondent respectivement à ces critères. L'année 1954 intervient dans l'analyse dans le but essentiellement de permettre une comparaison entre la situation de l'inondation des plaines du Pondori entre les séries excédentaire (1952 à 1973) et déficitaire (1974 à nos jours).

### **Les documents cartographiques utilisés**

Les documents cartographiques utilisés ont été de plusieurs types. L'exercice avait pour but soit de permettre une complémentarité, soit de vérifier le degré de précision de certaines évaluations.

#### **– Les images SPOT VÉGÉTATION**

L'instrument VEGETATION embarqué en 1998 sur Spot\_4 puis en 2002 sur Spot\_5, est un instrument multispectral (4 bandes spectrales dont trois dans le bleu et une dans le moyen infrarouge) prenant des images à une résolution constante de 1 km sur toute la largeur d'une scène de 2250 km. Couvrant quotidiennement la quasi totalité des terres émergées, ses bandes spectrales permettent un suivi efficace de la végétation et de l'eau.

Les produits Spot VG sont présentés soit sous forme de produit primaire (P) soit sous forme de produits de synthèse :

- synthèses journalières (S1) avec 1 à 3 prises de vue par pixel ;
- synthèses décennales (S10) avec 5 à 30 prises de vue par pixel.

Les produits de synthèse ont l'avantage de couvrir les possibles vides entre produits primaires de la même zone. C'est donc essentiellement avec les synthèses décennales que nous avons travaillé. Ces produits sont particulièrement indiqués pour le

suivi des phénomènes spatiaux très changeant (eau, végétation) pour lesquels ils ont été conçus puisqu'ils existent sur toute l'année tous les 10 jours. Nous disposons ainsi, pour les trois années choisies, d'images décennales c'est-à-dire permettant l'estimation, par décennie, de surfaces inondées ; ces dernières peuvent ensuite être mises en corrélation avec des niveaux décennaux de crue. Cet exercice a permis par la suite d'effectuer d'autres calculs statistiques en vue d'évaluer les impacts des baisses possibles des niveaux de crue sur les superficies inondables.

– Les images Thematic Mapper (TM)

L'instrument TM des satellites Landsat 4 et 5 permet de prendre des images dans 7 bandes spectrales (3 dans le visible, 1 proche infrarouge, 2 moyen infrarouge et 1 infrarouge thermique) avec une résolution spatiale de 30 m. Par rapport à celles de Spot VG, les images TM, à cause de cette finesse géométrique et de cette richesse spectrale, permettent donc une plus grande précision dans la délimitation des affectations des sols, dans notre cas les zones inondées du Pondsori.

Qu'il s'agisse des données SPOT\_VG ou Landsat, nous n'avons eu à faire aucun traitement de géoréférencement : toutes existaient déjà dans un référentiel cartographique rigoureux et donc s'intégraient immédiatement dans les SIG. Les traitements ont d'abord concerné le rehaussement de contraste pour l'extraction des parties concernant les zones de l'étude. Ensuite des compositions colorées ont été fabriquées en vue de l'interprétation visuelle des modes d'occupation des sols. Enfin, les opérations d'interprétation visuelle ont été faites soit directement à l'écran dans un SIG, soit sur tirages papier grand format.

– La carte topographique au 1/500000 (planche de San)

Ce document cartographique, qui couvre toute la zone, date de 1954 c'est-à-dire une des années de très forte hydraulité. Son interprétation permet donc d'estimer les surfaces inondées des plaines concernées pendant ces années.

Ce document a d'abord été numérisé sur scanner grand format puis redressé géométriquement avec utilisation de points de calage sur un logiciel SIG. Enfin la délimitation des surfaces inondées a été faite directement sur écran.

## Critique des données utilisées

Les données hydrologiques mais surtout pluviométriques comportent parfois des relevés manquants. C'est ainsi que pour les stations pluviométriques du bassin du Bani pour lesquelles des données ont été obtenues, rares sont celles qui sont complètes jusqu'à 2002. La station de Massigui s'arrête ainsi bizarrement à 1986 ! Mais c'est surtout pour les données hydrologiques que de telles défaillances pouvaient être source d'ennuis. Certes elles ont aussi des trous comme à la station de Bénény Kégné où les mois de juin à décembre 2000 sont sans relevé. Mais c'est pratiquement le seul cas jusqu'en 2002. Nous obtenons ainsi une série presque complète de 1952 à 2002.

Quant aux documents cartographiques et particulièrement les images satellites, le

problème se situe au niveau de la résolution spatiale pour l'interprétation des contours des surfaces inondées. En télédétection spatiale, la résolution spatiale est pour l'image ce qu'est l'échelle pour la carte. Elle fait donc référence à une fonction qui transforme le réel observé en une représentation réduite et fixe un seuil en deçà duquel certains objets ne seront pas représentés. Ainsi pour les images SPT\_VG, par exemple, toute étendue inondée de moins d'un km<sup>2</sup> sera difficilement vue puisque la résolution spatiale de ces images est justement de 1 km<sup>2</sup>. Ceci peut donc être source d'imprécision au moment de l'interprétation car la décision de « passer le trait » peut relever de critères pas totalement objectifs. Les estimations effectuées peuvent en pâtir surtout quand les surfaces concernées ne sont pas très grandes.

Fort heureusement les surfaces que nous tentons d'estimer se chiffrent en dizaines de milliers de km<sup>2</sup> ; par ailleurs, nous disposons d'images Landsat TM de grande résolution spatiale (30 m x 30 m) qui nous permettent de faire les redressements nécessaires en cas de doute.

En conclusion, le panel de documents dont nous disposons permet une bonne estimation des superficies réellement inondées aux différentes dates choisies, c'est-à-dire selon différents niveaux de crue. Les corrélations obtenues aideront à comprendre la relation surfaces inondées - niveaux de crue, et par la suite de caractériser les impacts surfaciques de l'influence - quelle qu'elle soit - du barrage sur les niveaux de crue.

## **Spécifications du seuil et méthode de calcul de ces impacts sur les niveaux d'eau à l'aval**

### **Spécifications du seuil**

Les spécifications du barrage de Talo ont beaucoup évolué depuis les premières études ; ce sont ces modifications qui ont permis de prendre en compte les inquiétudes exprimées par les populations à l'aval. Les spécifications qui nous concernent sont ci-après listées (sources : AGRER, 1997 ; Etudes complémentaires, 2004) :

- l'ouvrage ne prélève que si le débit entrant à Douna est supérieur à 50 m<sup>3</sup>/s ;
- 75 % du débit entrant sont restitués à l'aval ;
- la vanne peut restituer jusqu'à 150 m<sup>3</sup>/s au moment du remplissage ;
- le volume du réservoir est de 175,6 millions de m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>) ;
- le canal principal à un débit n'excédant pas 100 m<sup>3</sup>/s ;
- le canal principal est fermé au moment du remplissage du réservoir ;
- le seuil déverse à 274,35 mètres ;
- la partie déversante a une largeur de 276 mètres ;
- des lâchés de 5m<sup>3</sup>/s sont prévus pour soutenir le débit d'étiage en aval ;

Il faut compléter les retenues ainsi faites par les quantités évaporées.

---

<sup>2</sup> Attention il y a des exceptions importantes à cette affirmation dues notamment aux capacités de réflexion des objets, à leur contraste intrinsèque d'avec le milieu. Mais ce n'est pas le lieu de développer de tout cela.

## Méthode adoptée pour l'estimation des impacts sur le Bani à Bénény Kégný

Pour le calcul des prélèvements à effectuer en vue du remplissage du réservoir, les conditions suivantes sont imposées au logiciel pour traduire les principes de gestion du barrage, tel qu'ils ont été arrêtés :

- si  $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ , la quantité retenue  $R = Q * 25 \%$  ( $Q =$  débits entrant à Douna) ;
- si la somme  $(Q - 25 \%) > 150 \text{ m}^3/\text{s}$ , alors  $R$  est porté à  $Q - 150$
- $R = 0$  si le seuil déverse c'est-à-dire si la somme des retenues décadaires, à compter de l'année hydrologique, dépasse  $175,6 \text{ Mm}^3$ , autrement dit si le réservoir est plein.

A ces retenues doivent cependant être ajoutées les quantités évaporées et/ou consommées par le canal principal<sup>3</sup>.

La somme, par décade, de ces différentes retenues est soustraite des valeurs des écoulements à BÉNÉNY KEGNY dans la situation sans seuil. On estime ainsi ce que seraient à peu près les valeurs restituées à BÉNÉNY KEGNY après la construction du seuil.

On obtient donc, après les calculs, deux séries décadaires : l'une constituée par les chiffres des écoulements à BÉNÉNY KEGNY dans la situation sans seuil ; l'autre constituée par les chiffres des écoulements dans la situation avec seuil. Ces chiffres sont ensuite convertis en hauteurs d'eau afin de connaître la baisse occasionnée sur le niveau de la crue par le seuil. C'est en effet le niveau de la crue qui détermine l'importance des surfaces inondées dont l'analyse est le cœur de la problématique de cette étude.

### Estimation de la relation « $H = f(Q)$ » à BÉNÉNY KEGNY

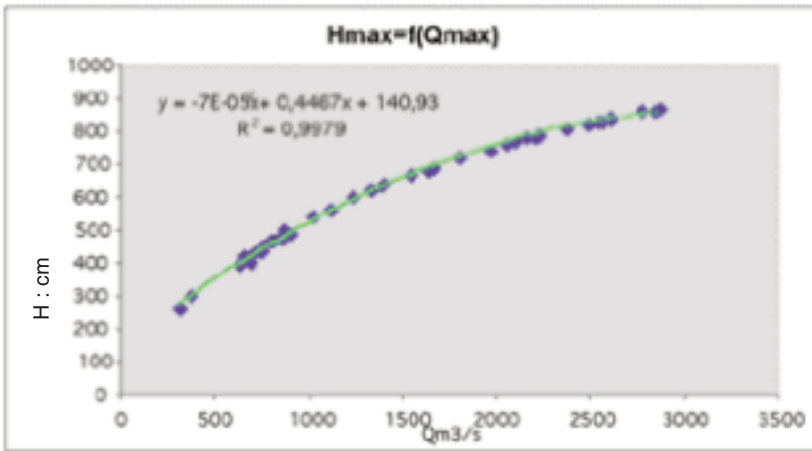
Nous n'avons pu obtenir les formules des courbes de régression entre  $H$  et  $Q$  à la DNHE<sup>4</sup>. Les anciennes, qui ont été utilisées notamment par AGRER, sont d'ailleurs jugées inadaptées à la situation actuelle. Puisque nous disposons de données de débits et de hauteurs d'eau fournies par la DNHE, il ne nous restait qu'à établir nous-mêmes les relations statistiques qui les relient en utilisant la méthode des régressions.

Il faut préciser que l'esprit des régressions est de voir la nature des relations qui peuvent exister entre les variables mesurées sur la même population d'individus ou sur le même phénomène. On suppose en effet que les individus d'une population ayant la même histoire de vie, ont forcément des caractéristiques corrélées. Les débits et les hauteurs atteints par les eaux d'un cours d'eau la même année, répondent à cette exigence. Ces deux paramètres entretiennent d'ailleurs une relation mathématique<sup>5</sup>. C'est pourquoi nous obtenons presque toujours une bonne régression, comme le montrent le graphique ci-après construit sur la série 1952-2002.

<sup>3</sup> Nous reprenons sur ces points les estimations fournies dans les études de faisabilité réalisées par le bureau d'études belge AGRER.

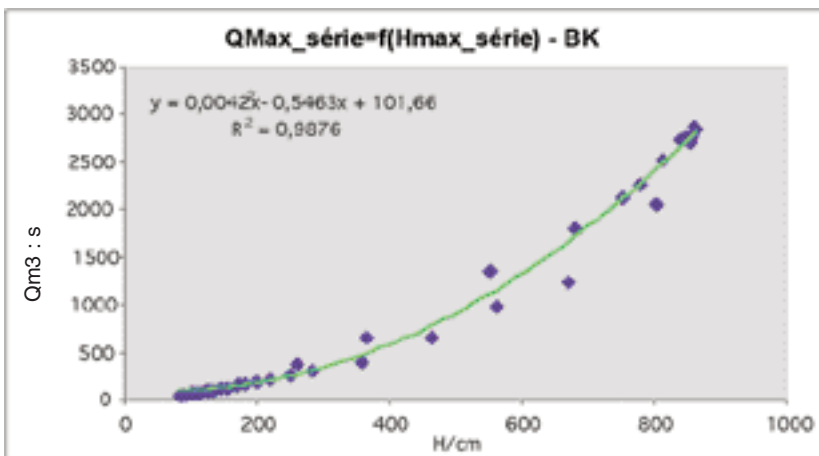
<sup>4</sup> DNHE = Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Énergie, structure dont relève la collecte des données hydrologiques au Mali.

<sup>5</sup> Cf. Jean DEMANGEOT, 1990 : les milieux « naturels » du globe, Masson.



**Graphique 1 :** Courbe de régression entre hauteurs et débits annuels maxi du Bani à BÉNÉNY KEGNY de 1952 à 2002.

Or pour la construction du limnigramme ci-dessous, nous constituons des séries annuelles théoriques pour nous approcher d'un type de situation annuelle donnée. Par exemple pour l'année la plus excédentaire en absolu, nous constituons une série « valeurs maximales atteintes », où nous reprenons, pour chaque décade, la plus grande valeur de crue obtenue du début à la fin de la série chronologique. Les séries ainsi constituées, celle des débits et celle des hauteurs d'eau, n'ont donc pas, pour une décade donnée, des valeurs de la même année, en raison de la forte variabilité interannuelle des écoulements. En procédant donc ainsi, nous détruisons en quelque sorte la relation mathématique qui lie les hauteurs aux débits et les rapports à tel endroit et à telle date ; la relation statistique est donc affectée non seulement par les erreurs de mesure mais encore par la procédure de constitution des jeux de données. Ceci conduit à une plus grande dispersion du nuage de points comme on peut le constater sur le graphique ci-après construit dans ces conditions (exemples des séries maximales).



**Graphique 2 :** Courbe de régression entre débits et hauteurs mensuels moyens du Bani à BÉNÉNY KEGNY de 1952 à 2002

On constate effectivement une plus grande dispersion des points autour de leur tendance, par rapport à ce qu'on obtenait avec les valeurs annuelles. Mais cette dispersion n'empêche pas une très bonne corrélation, comme le montrent les valeurs du R<sup>2</sup>. Ce sont donc ces équations qui ont été utilisées pour passer des débits aux hauteurs d'eau.

## Les résultats

### Les impacts du seuil sur les niveaux de crue à Bénény Kégný

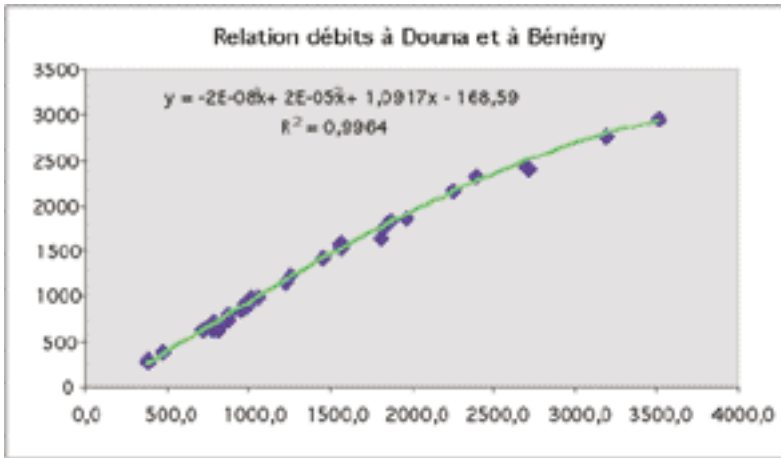
#### Relations entre les hauteurs d'eau à Douna, Bénény Kégný et Sofara

Pour parler des impacts d'un barrage amont sur les eaux en aval, il faut déjà apprécier le degré de relation entre les eaux en amont et en aval du barrage. Les graphiques ci-dessous en donnent une idée, d'une part entre Douna et BÉNÉNY KEGNY, d'autre part entre BÉNÉNY KEGNY et Sofara (les deux localités entre lesquelles se situe Djenné).

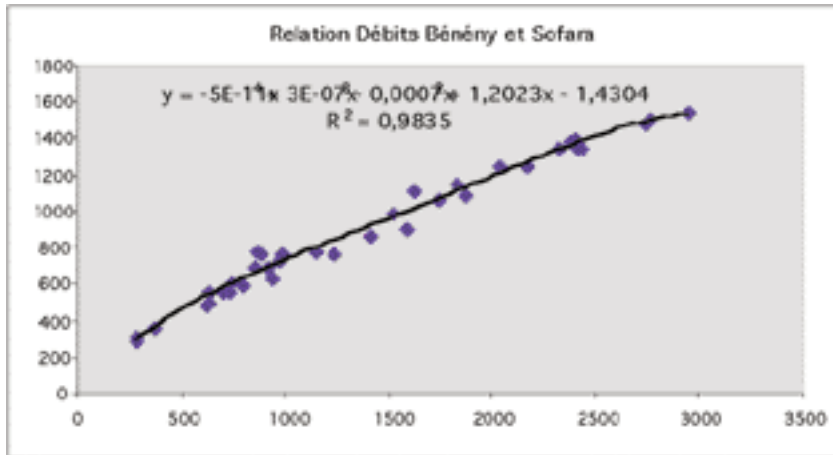
La première remarque est que, quel que soit le graphique, la relation est loin d'être linéaire. Ce qui signifie que d'autres facteurs (amortissement des eaux, évaporation, eaux souterraines) influent sur la détermination des niveaux d'eau en aval.

La relation est plus forte entre Douna et BÉNÉNY KEGNY qu'entre cette localité et Sofara comme l'attestent les coefficients de détermination (cf. graphiques ci-dessous). Si, pour tester la capacité prévisionnelle de cette relation, on applique la formule estimée aux débits mesurés à Douna, on obtient pour BÉNÉNY KEGNY des valeurs théoriques qui représentent de 90 à 100 % des valeurs mesurées ; si on applique la formule calculée aux données de BÉNÉNY KEGNY, on obtient pour Sofara des valeurs théoriques qui, en pourcentage, vont de 90 à seulement 95,5 % des valeurs mesurées. Ceci vient corroborer le fait que, à Sofara (et aussi à Djenné, mais dans de plus faibles proportions), les eaux du Bani sont soutenues par celles du Niger notamment à partir d'octobre et novembre.

Toutes les relations restent cependant très robustes à en juger par le niveau du coefficient de détermination très proche, dans les deux cas, de 1 (valeur maximale). Ceci autorise à se fonder sur les données d'une station, en l'occurrence celles de BÉNÉNY KEGNY, pour étudier une situation dans l'autre localité, en l'occurrence Djenné.



**Graphique 3** : Relation débits du Bani à Douna et BÉNÉNY KEGNY



**Graphique 4** : Relation débits du Bani à BÉNÉNY KEGNY et Sofara.

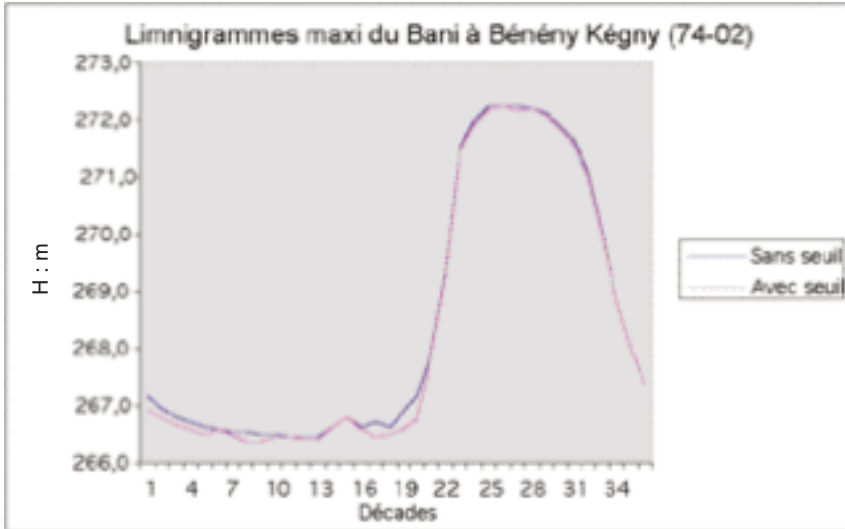
### Les impacts hydrologiques probables à BÉNÉNY KEGNY

Il s'agit des résultats dans les situations de crues maximales (fréquence de 0,01 environ) et moyenne (fréquence de 0,5 environ). Nous présenterons également les résultats pour les valeurs minimales (fréquence = 1).

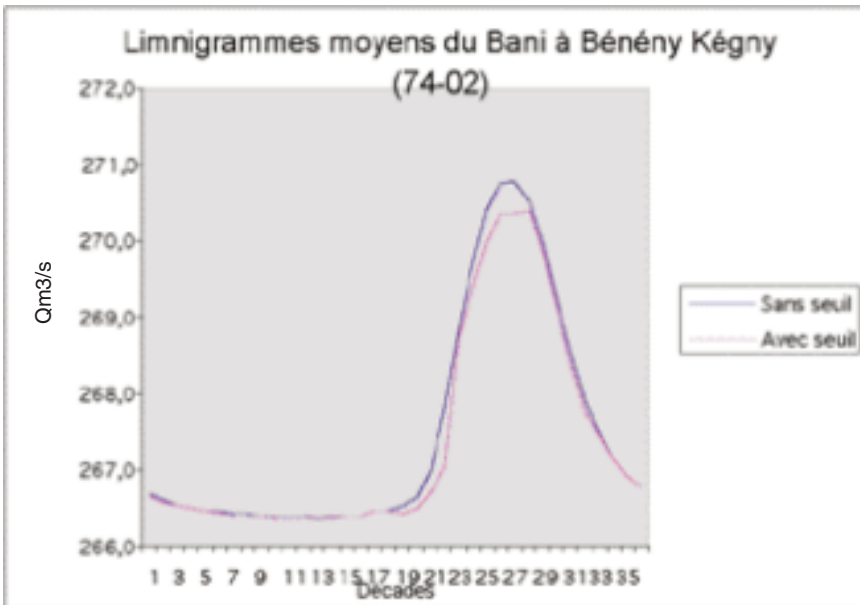
En plus des trois années choisies par l'étude, la période 1974 à 2002 a été particulièrement analysée.

- la période 1974 à 2002 : Elle se caractérise, en ce qui concerne notamment l'hydraulicité, par une baisse généralisée des valeurs, parfois largement en dessous de la moyenne (cf. supra) ; il en résulte évidemment une baisse des surfaces inondables en submersion naturelle. Les informations relatives à cette période semblent donc plus représentatives de la situation actuelle. C'est pourquoi nous avons choisi d'analyser cette période avec une attention particulière.

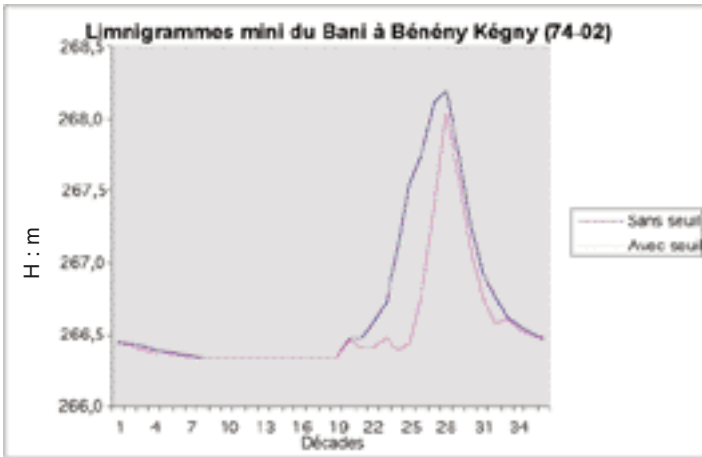
Les années choisies pour l'étude : 1999 (année excédentaire), 2001 (année moyenne) 2002 (année déficitaire) : les superficies maximales inondées ont déjà été estimées sur images satellites pour chacune de ces années. Elles fournissent la situation de référence, la situation sans barrage pour trois niveaux d'hydraulicité. On pourra donc aussi estimer, avec l'équation de régression obtenue plus haut, ce que ces superficies pourraient être avec les différentes retenues occasionnées par le bar-



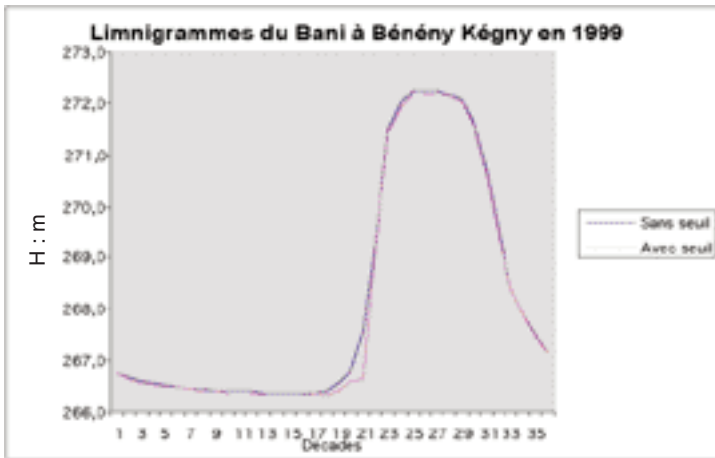
**Graphique 5 :** Limnigrammes maxi du Bani à BÉNÉNY KEGNY de 1974 à 2002.



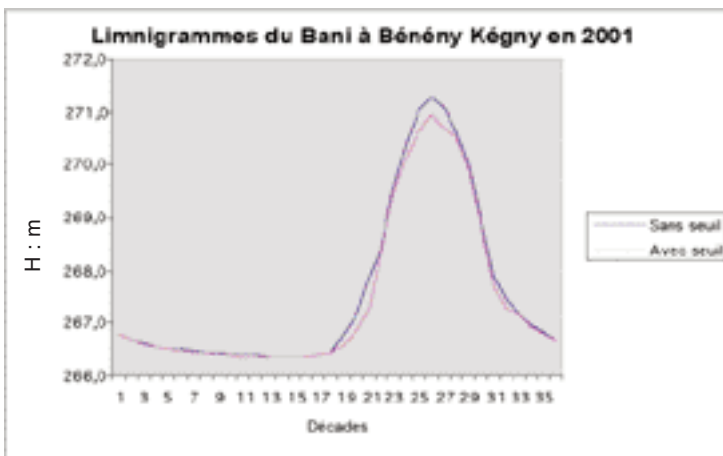
**Graphique 6 :** Limnigrammes moyens du Bani à BÉNÉNY KEGNY de 1974 à 2002.



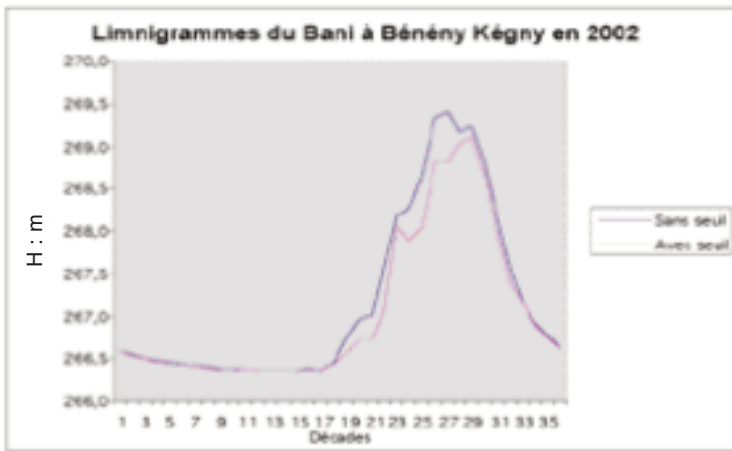
**Graphique 7 :** Limnigrammes mini du Bani à BÉNÉNY KEGNY de 1974 à 2002.



**Graphique 8 :** Limnigrammes du Bani à BÉNÉNY KEGNY en 1999.



**Graphique 9 :** Limnigrammes du Bani à BÉNÉNY KEGNY en 2001.



**Graphique 10 :** Limnigrammes du Bani à BÉNÉNY KEGNY en 2002.

rage.

En année de pluviométrie excédentaire, l'impact du barrage sur les niveaux d'eau à Bénény Kégnny se manifeste seulement au début de l'année hydrologique, pendant les 2ème et 3ème décades de juillet exactement. Le seuil déverse entièrement dès cette période et la crue se rattrape rapidement sur le tronçon aval du fleuve. Le graphique des maxima des séries 1952-2002 et 1974-2002, ainsi que celui de l'année 1999, montrent bien ce fait. Les pertes occasionnées par l'évaporation, et surtout par l'ouvrage de prise, ne semblent consommer qu'une infime partie de la crue. La retenue de début d'année n'a pas d'impact ni sur le début, ni sur le pic des eaux à Djenné puisque leur montée ici ne débute que durant la deuxième décade du mois d'août (cf. supra). Quentin SIX (2003), qui a travaillé sur la modélisation de différents barrages sur le Niger et ses affluents, aboutit à ce même constat à la différence près (qu'il souligne d'ailleurs) qu'il n'avait pas intégré la consommation due au canal principal et à l'évaporation.

En année déficitaire à très déficitaire, les retenues effectuées par le barrage, et ce jusqu'en fin septembre, vont de 70 à 110 cm. Une bonne partie de l'eau est donc retenue. Mais cette situation pose la question même de la gestion des eaux du Bani une telle année. On voit bien sur le graphique que les niveaux maxima à BÉNÉNY KEGNY n'atteignent pas 269,5 mètres. Or le niveau zéro de cette station est : 265,89 mètres. Cela signifie qu'en aucun moment en 2002 et encore moins sur la série de minima construite, les eaux du Bani n'ont atteint 400 cm de plus de hauteur. Or ce niveau maximum de crue à Bénény Kégnny n'occasionne qu'une faible inondation dans le Pondori, l'altitude minimale moyenne des plaines qui est d'environ 270 mètres n'étant atteinte à aucun moment.

C'est en année moyenne que la question des retenues du barrage peut se poser avec la plus grande importance. La retenue de début d'année est toujours perceptible. Mais les retenues qui risquent d'influer directement sur les eaux en aval et par conséquent sur les superficies inondables, sont celles occasionnées par le canal

principal. Celles-ci se situent en des moments où l'eau arrive, pour parler de ce qui concerne cette étude, dans les plaines du Pondori. En effet de la 3<sup>e</sup> décennie du mois d'août à la 3<sup>e</sup> décennie de septembre, on constate une baisse de 30 à 40 cm. Cette réalité transparait non seulement sur les données de l'année 2001, mais aussi sur la série moyenne construite (cf. graphiques 6 et 9 ci-dessus)<sup>6</sup>.

### Estimation des superficies inondables en fonction des hauteurs d'eau dans la situation sans seuil

Il nous faut ici examiner les corrélations entre les niveaux de crue et l'importance des surfaces inondées, dans les plaines du Pondori essentiellement. L'interprétation visuelle des limites des surfaces inondées dans le Pondori sur les images SPOT VG nous a permis d'obtenir des estimations de superficies inondées<sup>7</sup>. Ces chiffres et les hauteurs décennales maximales du Bani à BÉNÉNY KEGNY en différentes années sont consignés dans le tableau I ci-après.

Ce tableau permet donc d'analyser les superficies inondées dans le Pondori dans la situation actuelle, sans barrage. La recherche de corrélation entre ces superficies et les hauteurs d'eau a été faite avec les niveaux décennales maxima atteints par le Bani à BÉNÉNY KEGNY les mêmes années. Ce sont en effet les valeurs maximales qui conditionnent l'importance de l'inondation, beaucoup plus que les niveaux moyens.

Années	Crue en cm	Superficies inondées / ha	Sources superficies
2002	359	20000	Spot_VG
2001	527	42730	Spot_VG
1998	632	60320	Spot_VG
1999	697	73570	Spot_VG
1954	858	105900	Carte IGN

**Tableau I :** Crues maximales décennales atteintes à BÉNÉNY KEGNY et surfaces décennales maximales inondées dans le Pondori.

En faisant le rapport entre les hauteurs maximales de crue en 2001 et 1999 on obtient la baisse relative du niveau de l'eau à BÉNÉNY KEGNY entre les deux dates. Le même rapport peut être fait entre 2002 et 1999 etc.

Nous avons ainsi :

$527/697 = 0,76$  ou 76 %. La perte d'hydraulicité de 2001 par rapport à 1999 est

<sup>6</sup> Nadège D, 2003, avait abouti à peu près aux mêmes écarts limnimétriques à Bénény Kégné.

<sup>7</sup> Ces chiffres ont été vérifiés et corrigés le cas échéant avec les images Landsat TM les années pour lesquelles celles-ci sont disponibles. L'exercice a plutôt montré que les différences ne sont pas énormes.

de 24 %.

$359/697 = 0,52$  ou 52 %. La perte d'hydraulicité de 2002 par rapport à 1999 est de 48 %.

Le rapport des surfaces inondées dans le Pondori entre 2001 et 1999 est :

$42730/73570 = 0,58$ . La perte de surface inondée par rapport à 1999 est de 42 %.

Entre 2002 et 1999, la baisse de superficie est :

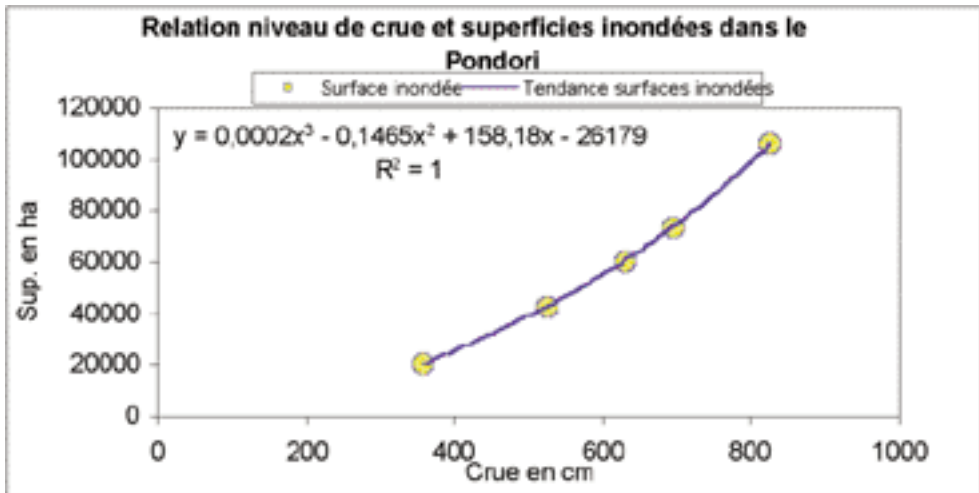
$20000/73570 = 0,27$  soit une perte de superficie de 73 %.

Une interprétation simpliste de ces rapports conduit à écrire qu'une baisse de la crue d'environ 25 % à BÉNÉNY KEGNY entraîne une baisse des superficies inondées d'environ 40 % dans le Pondori ; une baisse de la crue d'environ 50 % entraîne une baisse des superficies inondées de près de 75 %. Plus rigoureusement, ces rapports montrent qu'une baisse du niveau d'eau conduit à une baisse plus importante de surfaces inondées. Les rapports entre les deux variables, mesurées en pourcentage, paraissent être de l'ordre du simple au double.

Pourtant, bien que la relation entre les variables niveau de la crue et superficies inondées semble très robuste, il n'y a pas de linéarité entre elles. Ainsi entre 2002 et 2001 on a :

- rapport entre les niveaux maximum de crue :  $359/527 = 0,68$  soit une perte d'hydraulicité de 32 % ;
- rapport entre superficies inondées dans le Pondori aux deux dates :  $20000/42730 = 0,47$  soit une baisse d'environ 53 %.

Il faut donc approfondir l'analyse de ces résultats si l'on veut prédire avec une précision suffisante l'effet d'une baisse due à des ouvrages d'aménagement. Il s'agit,



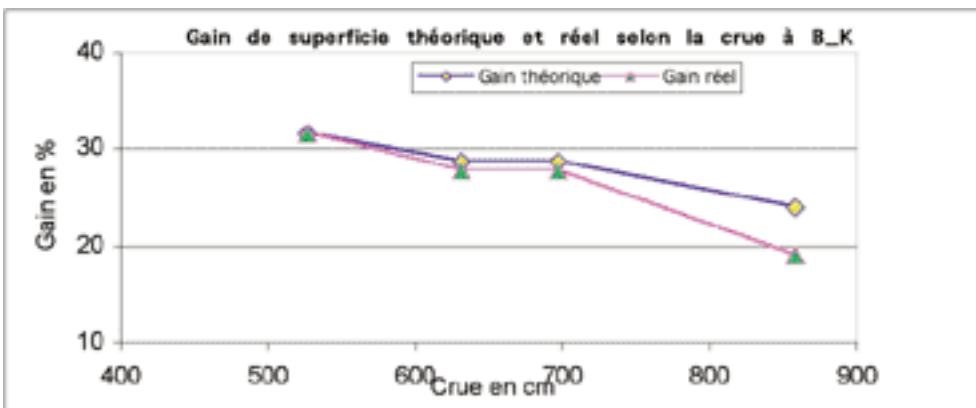
**Graphique 11** : Relation niveau de la crue à BÉNÉNY KEGNY et superficies inondables dans le Pondori

dans cette perspective, de trouver, à partir des informations existantes sur les deux variables, une formule de régression qui permettrait de prédire les superficies inondées selon différents niveaux de crue. Le graphique 15 ci-après nous donne ces paramètres de régression.

Le graphique 11 montre une corrélation très robuste<sup>8</sup> entre les deux variables comme l'atteste le coefficient de détermination. Le type de relation, polynomiale, qui les lie, signifie que les variables (déterminante aussi bien que déterminée) n'évoluent pas au même rythme à tous les moments de leur dynamique. La courbe de tendance peut avoir donc un ou plusieurs creux ou bosses dus aux changements de rythme.

Ainsi le rythme d'évolution de l'inondation, après un bond rapide à partir du niveau d'eau « zéro », ralentit au fur et à mesure que les plaines sont inondées. Le tableau ci-après et le graphique qui l'accompagne, obtenus à partir des valeurs réelles cal-

Années	H_maxi à BK	Sup. mesurées sur images	Sup. estimées par le modèle	Gain en % sur sup. estimées	Gain réel
2002	359	20000	21085,5		
2001	527	42730	45081,3	31,7	31,7
1998	632	60320	64510,3	28,7	27,8
1999	697	73570	79366,5	28,8	27,7
1954	858	105900	129092,3	23,9	19



**Graphique 12 :** Gain de superficie réel et théorique selon les crues 1998, 1999, 2001 et 2002.

culées sur les images, s'ils montrent cette tendance, sont un peu hésitants à cause du petit nombre des données.

**Tableau II :** Comparaison des valeurs réelles et théoriques de superficies inondables dans le Pondori selon différentes crues maximales à BÉNÉNY KEGNY.

<sup>8</sup> MARIE J., 2000, qui a estimé les surfaces inondables dans l'ensemble du delta du Niger à partir de l'échelle de Mopti, trouve une corrélation similaire entre niveaux d'eau et surfaces inondables.

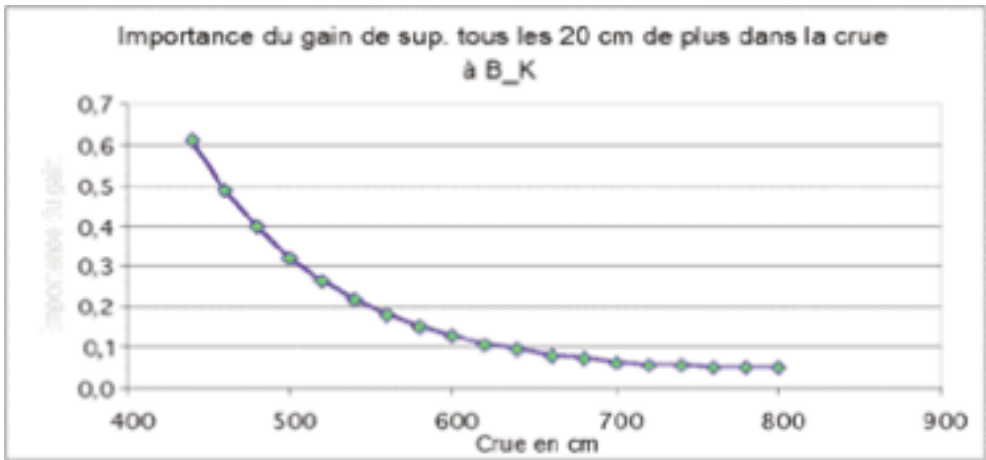
Nous avons donc approfondi cette analyse un peu plus en calculant, avec différents niveaux de crue de 20 cm en 20 cm, les superficies qui pourraient être inondées dans

Crue en cm	Superficies théoriques/ha	% sup. $t_0$ /sup. $t_{n+1}$	Gain en superficie %	Importance du gain en %
400	26495,0			
420	29204,3	90,7	9,3	
440	31971,3	91,3	8,7	0,6
460	34814,5	91,8	8,2	0,5
480	37748,3	92,2	7,8	0,4
500	40787,0	92,5	7,5	0,3
520	43945,1	92,8	7,2	0,3
540	47236,9	93,0	7,0	0,2
560	50676,9	93,2	6,8	0,2
580	54279,5	93,4	6,6	0,2
600	58059,0	93,5	6,5	0,1
620	62029,9	93,6	6,4	0,1
640	66206,5	93,7	6,3	0,1
660	70603,3	93,8	6,2	0,1
680	75234,7	93,8	6,2	0,1
700	80115,0	93,9	6,1	0,1
720	85258,7	94,0	6,0	0,1
740	90686,1	94,0	6,0	0,1
760	96393,7	94,1	5,9	0,1
780	102413,9	94,1	5,9	0,0
800	108755,0	94,2	5,8	0,0

le Pondori. Ces valeurs sont théoriques bien sûr puisqu'elles sont calculées à l'aide



**Graphique 13 :** Gain estimés de superficies inondables dans le Pondori en fonction du niveau de la crue à BÉNÉNY KEGNY.



**Graphique 14 :** Importance du gain de superficie inondable dans le Pondori tous les 20 cm dans la crue à BÉNÉNY KEGNY.

du modèle de régression obtenu.

**Tableau III :** Valeurs théoriques de l'inondation dans le Pondori selon la hauteur de la crue (pas de 20 cm) à BÉNÉNY KEGNY

Avec ces données, nous pouvons obtenir les graphiques suivants :

Le graphique 13 confirme qu'il n'y a pas une linéarité dans la progression de l'inondation : elle croît à taux décroissant lorsque la crue augmente. Une hauteur de crue supplémentaire de 20 cm augmente plus les surfaces inondées lorsque la crue est faible que lorsque la crue est plus forte. On ne trouve donc pas le même pourcentage de gain de superficie inondée pour tous les 20 cm supplémentaires de crue. Il faut bien remarquer avec ce graphique que les surfaces inondées augmentent avec la hauteur de crue mais que le pourcentage d'augmentation diminue et finit par se tasser. Trois moments peuvent être constatés dans l'évolution de la crue et des superficies inondées :

- jusqu'à 500 cm le gain se situe entre 9,2 et 7,5 % de la superficie précédente ;
- de 520 à 640 cm, le gain se situe entre 7,3 et 6,5 % ;
- au-delà de 640, le gain se situe entre 6,4 et 5,8 %.

L'information majeure donnée par ce graphique est que, à partir de la situation à sec, l'eau recouvre d'abord de grandes surfaces à un rythme rapide. Mais ce rythme diminue avec la montée des eaux et s'annule quasiment au-delà de 640 cm à l'échelle de Bénény Kégny.

Le graphique 14 traduit mieux cette remarque en montrant l'importance relative du gain d'un niveau de crue à l'autre. On peut y remarquer que l'importance du gain baisse rapidement de 0,1 en 0,1 jusqu'à 500 cm. Le rythme de la baisse diminue beaucoup après 620 cm et se stabilise à des valeurs proches de zéro au-delà de 660 cm. L'augmentation du niveau de crue n'apporte dès lors que très peu d'inondation

de superficie ; seul le niveau en hauteur de l'eau augmente.

Ces deux graphiques sont importants dans la réponse à la question de savoir si une éventuelle baisse du niveau de crue due au barrage influe ou non sur les superficies inondées. On voit bien que le problème est majeur pour des crues n'atteignant pas 520 cm de hauteur maximale à BÉNÉNY KEGNY. A 440 cm de hauteur maximale de crue, une perte de 20 cm peut entraîner une diminution relativement importante des superficies inondées. En année excédentaire par contre, avec plus de 650

Années	Crue en mètres	Côtes atteintes en m
2002	3,59	269,48
2001	5,27	271,16
1998	6,32	272,21
1999	6,97	272,86
1954	8,58	274,17

NB : la côte de l'échelle zéro à BÉNÉNY KEGNY est : 265,89 mètres

cm de hauteur maximale, une baisse de 20 cm est relativement peu importante. Le barrage pourrait même jouer favorablement par la diminution des espaces en eau libre. Le tableau ci-après nous aide à comprendre cette non linéarité de la progression de l'inondation.

**Tableau IV :** Niveaux décennaires maxima de la crue et côtes altimétriques atteintes

Les mesures altimétriques (cf. carte IGN de San au 1/500000) montrent que l'altitude de la presque totalité des plaines du Pondori se situe entre 271 et 272,5 mètres. Leur recouvrement par les eaux ne commence donc que quand les côtes de crue dépassent les 271,5 mètres. A partir de cette hauteur, le taux de recouvrement des plaines par les eaux s'accélère et finit par se stabiliser au-delà de 272,5 m. Les niveaux supplémentaires de crue ne servent plus qu'à élever le niveau de l'eau dans les plaines et accessoirement à submerger les parties hautes non encore atteintes.

## Estimation des superficies inondables dans la situation avec seuil

Nous travaillerons essentiellement sur l'année 2001 c'est-à-dire sur la situation moyenne où le problème se pose avec une certaine importance.

Nous avons relevé plus haut que le gain de superficie dû à un gain donné de hauteur d'eau (par exemple 20 cm), variait avec le niveau de la crue. Plus ce niveau est élevé, moins le gain de superficie est important (cf. graphique 13). Pour tenir comp-

te de cette relation non linéaire, nous devons faire le calcul à partir de chaque hauteur de crue, en considérant pour chacune la situation sans seuil puis la situation

Décades 2001	Hauteur sans seuil en cm	Superficies théoriques en ha	Hauteur avec seuil en cm	Superficies théoriques en ha	Pertes probables dues au seuil en ha (C3-C5)	Pertes probables en %
Août_3	450	33382,5	420	29204,3	4178,2	12,5
Sept_1	510	42350,2	470	36269,2	6081,0	14,4
Sept_2	540	47236,9	510	42350,2	4886,7	10,3
Sept_3	520	49945,1	480	37748,3	6196,8	14,1
Moyenne	505,0	41564,8	470,0	36269,2	5295,6	12,7

avec seuil, en utilisant la [obscur] relation robuste que nous avons établie entre niveaux d'eau et superficies inondables. Ce calcul est fait pour chaque décade concernée ; il donne le pourcentage de baisse par décade. Ses résultats sont consignés dans le tableau ci-après.

**Tableau V** : Evaluation des pertes probables de superficies dues au seuil en année moyenne à BÉNÉNY KEGNY (2001).

On voit bien que pour une même baisse, 30 cm par exemple, le pourcentage de perte de superficie peut varier de façon significative en fonction du niveau atteint par les eaux : 12,5 à 10,3 % dans le cas présent. Si l'on se contente de travailler sur les valeurs moyennes, on sous-estime considérablement la baisse : une variation du niveau d'eau de seulement 10 cm ne fait varier les superficies inondables que d'environ 0,3 %. En réalité, la perte moyenne sur les superficies moyennes inondables durant les quatre décades est de 12,7 % soit environ 5300 ha (sur 41 565 ha) pour une baisse moyenne de 35 cm.

## Conclusion

Le cheminement méthodologique poursuivi ici pour évaluer les superficies inondables selon différents niveaux de crue aboutit certes à de bons résultats. Mais il nécessite qu'un certain nombre de conditions soient réunies :

- D'abord la disponibilité d'un grand nombre d'images satellites. En effet les estimations de superficies inondables se font par rapport au niveau de la crue. Or celui-ci peut varier sensiblement d'une décade à l'autre voire d'un jour à l'autre. Il faut donc au moins des images décennales si l'on veut faire une estimation significative de la relation niveaux de crue – superficies inondables.
- Ensuite il faut qu'il y ait des statistiques sur les niveaux maxima de crue aux dates des images disponibles. En effet ce sont les niveaux de crue maximum qui expliquent le mieux les superficies inondées<sup>9</sup>.
- Enfin si les estimations à effectuer portent sur de trop grandes superficies, les

<sup>9</sup> Voir aussi à cet effet Marie J., 2000.

images pouvant les couvrir d'un tenant ne peuvent être que des images de petite résolution comme les images SPOT VEGETATION. Du coup se pose le problème de la justesse de l'interprétation des limites de l'inondation c'est-à-dire donc de la justesse des superficies estimées. Ceci peut être source d'erreurs graves dans les cas d'estimation des impacts surfaciques d'aménagements hydro-agricoles.

## Bibliographie

**AGRER, HASCONING, GID, HND (2004)** : Etudes complémentaires du Programme de mise en valeur des plaines du Moyen Bani. PMB – Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche, plusieurs volets dont volet hydrologique 59 pages.

**AGRER (2000)** : Actualisation de l'avant-projet détaillé de première phase, plaines de Woloni et de Touga. MDRE / DNAER / PMB

**AGRER (1997)** : Projet de mise en valeur du moyen Bani : études complémentaires d'optimisation du seuil de Talo. Rapport final. 37 p + annexes.

**AGRER (1987)** : Etude de faisabilité du projet d'aménagement du seuil de Talo et des plaines de San. Rapport hydrologique définitif. 83 p.

**BOURGEOIS J.L. (2000)** : Un barrage qui menace le plus grand monument d'Afrique noire, la destruction des terres irrigables pourrait entraîner la famine. La lutte pour le salut de Djenné est internationale. Presse Release, 5 p.

**DAVID N. (2001)** : Evaluation des impacts du barrage de Talo sur l'environnement et les systèmes de production à l'aval. Mémoire de DESS, Université de Toulouse, 73 p.

**GALLIER F. (2001)** : Analyse du projet de barrage de Talo et prévision des conséquences sur les systèmes de production ruraux du Djennéri. Mémoire de DEA. Orléans, 120 p.

**HEDESELSKABET (1995)** : Etude d'impact sur l'environnement, cas du Projet de mise en valeur des plaines du Bani, Mali. Rapport définitif. MDRE / DENCONSULT / BAD. 119 p.

**KUPER M. (2001)** : Le barrage de Talo : impact sur le delta intérieur du Niger. In Djenné Patrimoine Informations numéro 10.

**MAHÉ G. (2001)** : Evolution des ressources en eau sur le bassin du Bani et à Djenné. In Djenné Patrimoine Informations numéro 10.

**MARIE J. (2000)** : DELMASIG : Hommes, milieux, enjeux spatiaux et fonciers dans le Delta Intérieur du Niger (Mali). Volume I, Tomes 1, 2 et 3. Mémoire pour l'habilitation à diriger des recherches. Université de Paris X - Nanterre.

**Secrétariat Général – MDRE (09/2002)** : Programme de mise en valeur des plaines du moyen Bani (PMB) – Phase I : Rapport d'information générale. SG-MDRE, 23 pages.