

ACTUALISATION DE RESULTATS DU POGR CONCERNANT LE SOUTIEN DE LA CRUE DU FLEUVE SENEGAL PAR LE BARRAGE DE MANANTALI

J. C. Bader, IRD, UMR G-EAU

07/05/2014

Résumé

En exploitant la monographie hydrologique du fleuve Sénégal récemment mise à jour, on actualise ici certains résultats du POGR concernant les modalités du soutien de la crue du fleuve Sénégal par le barrage de Manantali : détermination d'hydrogrammes objectifs de crue en fonction d'objectifs de superficie de cultures de décrue ; calage et exploitation du modèle de propagation permettant de calculer le débit à lâcher du barrage pour atteindre un hydrogramme objectif à Bakel ; évaluation de l'impact du barrage de Manantali sur les superficies potentielles annuelles de cultures de décrue, qui peuvent être considérées comme un bon indicateur de l'étendue de l'inondation du lit majeur dans la vallée.

Les données utilisées sont les suivantes :

- Séries complètes des cotes moyennes journalières observées (complétées par des valeurs reconstituées) aux échelles de stations situées dans le lit mineur du fleuve (Bakel, Matam, Salde, Podor) sur la période 1903-2000
- Séries des cotes moyennes journalières dans le lit mineur du fleuve Sénégal aux échelles de Salde et Bakel pour le régime naturel d'écoulement sur la période 1987-2011, constituées de valeurs intégralement reconstituées.
- Cotes moyennes journalières absolues observées sur 10 cuvettes réparties sur le lit majeur dans la vallée, sur la période 1997-2000
- Superficies inondées sur chacune des 10 cuvettes et sur l'ensemble du lit majeur entre Matam et Dagana, mesurées à partir d'images satellitaires datant de 1986, 1987, 1988, 1992, 1997, 1998 et 1999
- Superficies de cultures de décrue pratiquées annuellement entre 1946 et 1999 entre Matam et Dagana, sur la rive gauche, la rive droite ou les deux rives du fleuve
- Etalonnage de la station de Bakel, permettant de traduire les cotes en débit par la méthode du gradient limnimétrique
- Résultats publiés dans la monographie actualisée du fleuve Sénégal, concernant la modélisation de propagation des débits entre Manantali et Bakel

Pour définir des hydrogrammes objectifs de crue, les opérations effectuées visent à : 1) produire une série complète de valeurs sur la période 1946-2000 pour la superficie annuelle de cultures de décrue pratiquées sur le lit majeur entre Matam et Dagana ; 2) relier ces superficies aux niveaux caractéristiques de crue du fleuve

Sénégal à Bakel ; 3) exploiter ces relations pour définir des hydrogrammes objectifs de crue en fonction des objectifs de cultures de décrue ; 4) positionner les hydrogrammes objectifs dans l'année, pour que le soutien de crue entraîne le moins possible de perte de production d'énergie au barrage ; 5) caractériser de façon statistique les objectifs de cultures de décrue et les hydrogrammes de crue associés, par rapport au régime observé. Le détail des opérations est résumé ci-dessous :

- Pour chacune des 10 cuvettes observées :
 - Calage du modèle de propagation de Lamagat entre les cotes d'une station sur le lit mineur (préviseur) et les cotes H dans la cuvette (prévisande), sur la période 1997-1999. Ce modèle décrit la propagation par deux fonctions de la cote préviseur, qui donnent respectivement la cote prévisande et le temps de propagation.
 - Obtention d'une série complète de cotes moyennes journalières absolues H sur la période 1946-2000, constituée des valeurs observées de 1997 à 2000 et de valeurs reconstituées à partir des cotes à la station du lit mineur grâce au modèle de propagation précédent.
 - Calcul de la relation entre cote absolue H (série complète de valeurs observées et reconstituées sur la période 1946-2000) et la superficie inondée S (valeurs mesurées entre 1986 et 1999).
 - Calcul de la superficie inondée maximale annuelle S_m pour chaque année de la période 1946-2000, à partir de la cote maximale annuelle traduite grâce à la relation précédente.
- Calcul de la superficie totale S_{mv} ayant été inondée sur le lit majeur entre Matam et Dagana, pendant chacune des crues annuelles de 1986 à 1988, 1992 et 1997 à 1999, à partir des superficies mesurées par imagerie satellitaires et corrigées pour tenir compte des non coïncidences entre dates de prise de vue et de passage du pic de crue (corrections déduites des rapports constatés sur les cuvettes entre superficie maximale et superficie mesurée).
- Calcul de relation entre superficie inondée maximale annuelle S_{mc} sur l'ensemble des 10 cuvettes et superficie totale inondée S_{mv} sur l'ensemble du lit majeur, à partir des valeurs obtenues ci-dessus pour les années 1986 à 1988, 1992 et 1997 à 1999.
- Obtention de la série complète de superficie totale inondée annuelle S_{mv} sur le lit majeur entre Matam et Dagana sur la période 1946-2000, constituée des 7 valeurs mesurées entre 1986 et 1999 et de valeurs reconstituées à partir des superficies inondées maximales annuelles S_{mc} sur l'ensemble des 10 cuvettes grâce à la relation ci-dessus.
- Pour chaque rive du fleuve :
 - calcul de relation entre superficie totale inondée annuelle S_{mv} sur l'ensemble du lit majeur (série complète sur la période 1946-2000, obtenue ci-dessus) et superficie annuelle de cultures de décrue sur cette rive (statistiques agricoles : 17 valeurs de SCd sur la période 1957-1996 pour la rive droite et 36 valeurs de SCg sur la période 1946-1999 pour la rive gauche).
 - obtention d'une série complète de superficie annuelle de cultures de décrue sur la période 1946-2000, constituée des valeurs connues

(statistiques agricoles) et de valeurs reconstituées à partir des superficies inondées maximales annuelles Smv sur l'ensemble du lit majeur grâce à la relation ci-dessus.

- Obtention d'une série complète de superficie annuelle de cultures de décrue SCv sur les deux rives du fleuve entre Matam et Dagana sur la période 1946-2000 à partir des valeurs observées (statistiques agricoles : 18 valeurs sur la période 1957-1997), complétées par la somme des superficies annuelles de cultures de décrue sur chacune des deux rives (séries complètes obtenues ci-dessus).
- Calcul de relation moyenne entre la superficie totale inondée annuelle Smv sur l'ensemble du lit majeur et la superficie annuelle des cultures de décrue SCv sur les deux rives du fleuve entre Matam et Dagana (séries complètes obtenues ci-dessus pour la période 1946-2000, constituées de valeurs observées et de valeurs reconstituées).
- Obtention d'une nouvelle série complète sur la période 1946-2000 de superficie annuelle de cultures de décrue sur les deux rives, entièrement estimée à partir de la superficie totale annuelle inondée, grâce à la relation ci-dessus. Cette série SCv(Smv) est ensuite utilisée à la place de la série SCv obtenue plus haut (à partir de valeurs observées et de valeurs reconstituées par somme des superficies sur chaque rive), pour faciliter la détermination de certaines relations à partir de nuages de points moins dispersés, sans conséquence importante sur les résultats.
- Calcul de relation entre la superficie des cultures de décrue SCv(Smv) sur l'ensemble du lit majeur et la moyenne Hb des N plus fortes cotes observées durant l'année dans le fleuve Sénégal à l'échelle de Bakel, pour différentes valeurs de N comprises entre 6 et 60 jours. Ces relations Hb(SCv) sont exploitées pour déterminer une fonction Hb(N) pour différentes valeurs caractéristiques de SCv(Smv) comprises entre 40000 et 80000 ha.
- Pour chaque valeur caractéristique de superficie SCv de cultures de décrue comprise entre 40000 et 80000 ha, détermination d'un hydrogramme objectif de crue pour le fleuve Sénégal à Bakel :
 - Détermination des cotes H0 d'un limnigramme de crue à Bakel, dont les 25 plus fortes valeurs sont compatibles avec les 25 premières valeurs de la fonction Hb(N). Cette pointe de crue de 25 jours est précédée d'une montée rapide des cotes et suivie d'une baisse assez rapide, par souci d'économie en eau. Sa durée correspond au temps de submersion nécessaire pour qu'un sol accumule une réserve en eau suffisante pour le développement d'une culture de décrue sur le lit majeur du Sénégal.
 - Traduction des cotes H0 du limnigramme obtenu en débits, à l'aide de l'étalonnage de la station de Bakel. L'hydrogramme objectif de crue ainsi obtenu est alors censé garantir une submersion de 25 jours sur une certaine partie du lit majeur du fleuve, suffisamment étendue pour permettre -en moyenne selon les années- d'y pratiquer des cultures de décrue sur la superficie SCv retenue.
 - Calage temporel de l'hydrogramme objectif de crue, déterminé en tenant compte des apports de la Falémé et du Bakoye pour que le soutien de crue nécessite le moins possible de volume lâché non turbiné à Manantali.

- Calcul de relation entre le niveau maximal annuel H_{max} du fleuve Sénégal dans le lit mineur à Salde et Podor et la superficie SC_v des cultures de décrue, à partir des séries complètes sur la période 1946-2000.
- Détermination des temps de retour, en régime observé, de la superficie de cultures de décrue retenue comme objectif et du niveau maximal annuel correspondant dans le fleuve à Salde et Podor

La réalisation opérationnelle du soutien de crue consiste à lâcher du barrage de Manantali un débit suffisant pour que le débit du Sénégal à Bakel atteigne l'hydrogramme objectif de crue. Le débit à lâcher est déterminé à l'aide d'un modèle de propagation utilisé sur deux biefs, qui donne successivement : 1- le débit du Sénégal à Kayes en fonction de la somme des débits du Bafing à Manantali et du Bakoye à Oualia ; 2- le débit du Sénégal à Bakel en fonction de la somme des débits du Sénégal à Kayes et de la Falémé à Gourbassy. Avant d'être exploités en temps réel, les résultats du modèle de propagation subissent une correction calculée à partir des erreurs de modélisation récentes (écarts entre débit observé et débit prévu par le modèle de propagation), selon le principe de la "boucle fermée".

Le modèle décrit la propagation des débits naturels entre l'amont et l'aval de chaque bief à l'aide de deux fonctions g et f , qui donnent respectivement le temps de propagation sur le bief et le débit aval à partir du débit amont. La différence entre ce débit aval et le débit amont, ainsi calculée pour le régime naturel, peut être interprétée comme le débit des apports intermédiaires sur le bief. Il suffit de l'additionner au débit amont réel pour obtenir le débit aval en régime artificiel, le temps de propagation étant alors lui-même calculé directement avec la fonction g à partir du débit amont réel.

Le calage du modèle, qui définit les fonctions g et f , est effectué sur les débits observés aux stations citées par intervalles élémentaires de valeurs du débit amont. En régime naturel, il consiste à déterminer pour chacun de ces intervalles le temps de propagation qui minimise l'erreur type de la corrélation linéaire entre débit amont et débit aval. Ce temps de propagation, la moyenne des débits de l'amont sur l'intervalle et la moyenne des débits correspondants à l'aval (décalés du temps de propagation) déterminent alors un point élémentaire pour les barèmes des fonctions g et f . Ces barèmes sont ainsi déterminés progressivement en faisant glisser l'intervalle de débit amont analysé, jusqu'à couverture complète des valeurs de débit observées. Une adaptation de la méthode permet de caler le modèle en exploitant à la fois les débits du régime naturel observés avant 1987 et ceux du régime artificiel observé ensuite jusqu'en 2012.

Pour évaluer l'impact du barrage de Manantali sur les superficies potentielles annuelles de cultures de décrue, on commence par établir une relation permettant d'évaluer cette superficie en fonction du maximum annuel d'un indicateur basé sur le limnigramme de crue du fleuve Sénégal à l'échelle de Bakel. Pour chaque jour j de la période de crue, cet indicateur est égal à une combinaison linéaire à coefficients constants de 1) : la moyenne des cotes des jours j à $j+24$, et 2) : du maximum de la cote moyenne sur 6 jours glissants situés parmi les jours j à $j+24$.

La relation est ensuite appliquée sur la période 1944-2011 en utilisant d'abord le limnigramme de la station de Bakel correspondant au régime d'écoulement observé, et en utilisant ensuite celui qui correspond au régime naturel (constitué à partir de 1987 de cotes entièrement reconstituées). Les résultats obtenus permettent d'analyser l'évolution des superficies potentielles de cultures de décrue résultant de l'évolution naturelle des crues, ainsi que l'impact de la gestion du barrage de Manantali sur ces superficies.

En conclusion, les nouveaux hydrogrammes objectifs de crue du Sénégal à Bakel sont, pour une même superficie associée de cultures de décrue, très proches des hydrogrammes déterminés par le POGR. Leurs débits sont toutefois légèrement plus élevés. L'hydrogramme associé à 50000 ha de cultures, qui culmine désormais à 2257 m³/s, présente ainsi une augmentation de 5% sur le débit maximal et 4% sur le volume.

Le calage du modèle de propagation utilisé dans le calcul du débit à lâcher présente lui aussi quelques différences avec les résultats du POGR, qui correspondent essentiellement, pour chacun des deux biefs (de Manantali et Oualia jusqu'à Kayes, et de Kayes et Gourbassy jusqu'à Bakel), à une légère augmentation du débit aval donné par la fonction f. Cette augmentation se situe entre 1 et 4% pour un débit amont supérieur à 400 m³/s pour le modèle amont, et entre 1 et 3% pour un débit amont supérieur à 2400 m³/s pour le modèle aval.

L'analyse des superficies potentielles annuelles de cultures de décrue permet de distinguer les trois périodes successives suivantes pour le régime naturel d'écoulement : 1945-1975, grandes superficies, de 103573 ha en moyenne ; 1976-1993, petites superficies, de 39976 ha en moyenne ; 1994-2011, superficies assez grandes, de 83341 ha en moyenne. Trois périodes successives peuvent également être distinguées pour l'impact du barrage de Manantali sur ces superficies, en fonction des objectifs de gestion pris compte :

- De 1987 à 1991, la mise en eau progressive du réservoir et les tests des organes d'évacuation du barrage s'accompagnent d'un soutien d'étiage modéré et d'un soutien de crue épisodique. Par rapport au régime naturel de cette période, il en résulte une diminution systématique des superficies, de 13675 ha en moyenne.
- De 1992 à 2003, le barrage réalise un soutien d'étiage assez fort et soutient la crue du fleuve Sénégal chaque année, sauf en 1999 et en 2003 où il contribue au contraire de façon très efficace à écrêter de trop fortes crues pour en limiter les effets catastrophiques. Par rapport au régime naturel, les superficies potentielles annuelles résultantes de cultures de décrue sont globalement diminuées de façon modérée (5243 ha en moyenne), mais parfois légèrement augmentées
- De 2004 à 2011, le barrage qui régularise fortement le débit du Bafing pour le soutien d'étiage et surtout la production hydroélectrique ne réalise aucun soutien de crue. Il permet au contraire en 2007, 2009, 2010 et 2011 d'écrêter de trop fortes crues. Il en résulte une diminution forte et systématique de la superficie potentielle annuelle de cultures de décrue (26331 ha en moyenne), par rapport au régime naturel. Néanmoins, cette superficie reste la plupart du temps assez forte grâce à l'inondation provoquée par les apports des affluents naturels arrivant à l'aval de Manantali, sauf en 2004 et surtout 2006.

Contexte et objectifs

Entre 1998 et 2005, l'IRD a réalisé pour l'OMVS le Programme d'Optimisation de Gestion des Réservoirs (POGR), consacré entre autres à la définition de modalités optimales pour le soutien de la crue du fleuve Sénégal par le barrage de Manantali. L'objectif de ce soutien consiste à produire à la station de Bakel une crue annuelle suffisante pour inonder le lit majeur de la vallée située à l'aval, au grand bénéfice des cultures traditionnelles de décrue, de l'équilibre environnemental et de la recharge des nappes phréatiques. Le POGR a ainsi défini pour le soutien de crue des hydrogrammes objectifs à Bakel, censés permettre la pratique des cultures de décrue sur certaines superficies dans la vallée, tout en nécessitant le moins de volume lâché à partir de Manantali, en particulier de volume non turbiné. Parmi ces hydrogrammes, l'OMVS a retenu comme objectif celui qui permet de pratiquer en moyenne 50000 ha de cultures de décrue sur des terrains inondés pendant 25 jours sur le lit majeur du fleuve entre Matam et Dagana. Choisi pour grever le moins possible la production d'énergie au barrage, cet objectif très limité correspond à une crue dépassée environ six années sur sept sur la période 1903-2000. Le POGR a enfin défini les modalités de réalisation opérationnelle du soutien de crue, qui consistent à calculer le débit à lâcher du barrage pour réaliser l'hydrogramme objectif à Bakel, à l'aide du modèle de propagation de Lamagat qui doit être adapté de façon particulière pour le régime artificiel.

Parmi les données utilisées par le POGR pour déterminer les hydrogrammes objectifs de crue, quelque-unes ont été recalculées récemment par l'IRD à l'occasion de la mise à jour de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal (reconstitution de cotes non observées dans le lit mineur à certaines stations de la vallée). Cela justifie un nouveau calcul des hydrogrammes objectifs, effectué ici en suivant la démarche du POGR et décrit en détail pour le rendre facilement vérifiable et reproductible.

Les travaux effectués pour la monographie ont également conduit à réviser le calage du modèle de propagation de Lamagat entre Manantali et Bakel. On présente ici ce nouveau calage, après avoir rappelé le principe de l'adaptation du modèle au régime artificiel.

Liste des variables utilisées

H (cm NG) : niveau de plan d'eau dans une cuvette du lit majeur

Hb(N) (cm) : moyenne des N plus fortes cotes de l'année à l'échelle de Bakel

Hm (cm NG) : valeur maximale annuelle du niveau H dans une cuvette

Hp(N) (cm) : valeur de la plus forte cote de rang N de l'année à l'échelle de Bakel

Hmax (cm) : cote maximale annuelle à une échelle placée dans le lit mineur du fleuve

H0 (cm) : cote à l'échelle de Bakel définissant un limnigramme objectif

Q0 (cm) : débit à l'échelle de Bakel définissant un hydrogramme objectif simplifié

S (ha) : superficie inondée dans une cuvette du lit majeur

SCd (ha) : superficie de cultures de décrue sur la rive droite entre Matam et Dagana

SCg (ha) : superficie de cultures de décrue sur la rive gauche entre Matam et Dagana

SCv (ha) : superficie de cultures de décrue sur les deux rives entre Matam et Dagana

Sm (ha) : maximum annuel de superficie S inondée sur une cuvette

Smc (ha) : somme des superficies inondées maximales annuelles Sm des 10 cuvettes
Smv (ha) : superficie totale ayant été inondée sur le lit majeur entre Matam et Dagana

Calage du modèle de propagation de Lamagat entre cotes dans le lit mineur et cotes dans le lit majeur

Données utilisées

- niveau du fleuve dans le lit mineur aux stations de Matam, Salde, Podor (cotes moyennes journalières observées depuis 1903 jusque 2010, 2003 et 2010 respectivement, complétées par des valeurs reconstituées dans le cadre de la mise à jour de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal)
- niveau du fleuve dans les cuvettes du lit majeur de Podor, Leqseiba, Donaye, Wawa, Aéré Goléré, Ouro Diallo, Pété, Ouloum Néré, Mbakhna et Nabadji (cotes moyennes journalières observées en 1997, 1998 et 1999)

La position des stations est indiquée sur la carte n° 1

Méthode et résultats

Le modèle de propagation de Lamagat (Lamagat 1983, 1987, 1990 ; Lamagat et al 1993 ; Morel Seytoux et al 1993) permet de relier avec un décalage de temps D le signal X2 d'une station prévisande au signal X1 d'une station préviseur, grâce à deux fonctions f et g définies ainsi, en notant le temps t :

$$D(t) = g(X1(t))$$

$$X2(t+D(t)) = f(X1(D(t)))$$

Le calage de ces fonctions sur les données observées repose sur le découpage de l'échantillon des valeurs de X1 en intervalles élémentaires, qui sont décalés progressivement des faibles vers les fortes valeurs avec un recouvrement partiel des intervalles successifs. Sur chaque intervalle, on détermine le décalage de temps D qui minimise l'erreur type de la régression linéaire entre les valeurs X1(t) situées dans l'intervalle, et les valeurs X2(D+t). On conserve alors ce temps D ainsi que les valeurs moyennes de X1(t) et X2(t+D), qui définissent pour cet intervalle un point (X1,D) pour le barème de la fonction g, et un point (X1, X2) pour le barème de la fonction f. Les deux barèmes sont ainsi alimentés progressivement à mesure du glissement de l'intervalle analysé, jusqu'à ce que l'étendue complète des valeurs observées de X1 ait été parcourue. Ce modèle permet donc de décrire la propagation de l'écoulement entre deux stations observées, indifféremment en termes de cote ou de débit.

On conserve ici les résultats de calage du modèle de propagation publiés par POGR(2000), qui donnent sous forme de barème la cote NG dans le lit majeur et le temps de propagation en fonction de la cote à l'échelle (et non pas la cote NG comme indiqué par erreur par POGR(2000)) dans le lit mineur. Ces barèmes doivent toutefois être extrapolés pour permettre l'utilisation du modèle sur toutes les données de la période 1946-2000. Les extrapolations sont réalisées ici de façon à reproduire du mieux possible –sans pouvoir toutefois éviter quelques légères différences- celles qui avait été utilisées (mais non explicitées) par le POGR, et qui peuvent être déduite des résultats publiés dans le tableau 7 de POGR(2001-B).

Le cas du modèle de propagation donnant les cotes NG dans la cuvette de Mbakhna à partir des cotes à l'échelle de Matam est particulier. On adopte pour ce modèle un paramétrage sous forme de fonction polynôme, basé sur le barème donné par POGR(2000) à l'exclusion du point le plus haut, manifestement non utilisé par le POGR. Ce paramétrage permet de reproduire assez bien la relation déduite du tableau 7 de POGR(2001-B) pour cette station.

La figure 1 et le tableau 1 présentent les barèmes du modèle de propagation et leurs extrapolations en dehors du domaine de mesure.

Calcul de la relation entre niveau de plan d'eau et superficie inondée pour chaque cuvette

Données utilisées

Pour chaque cuvette, on dispose (tableau 2) des données suivantes publiées dans les tableaux 2 et 3 de POGR (2001-B) :

- Superficie inondée S mesurée à partir de prises de vues satellitaires effectuées pendant les crues de 1986, 1987, 1988, 1992, 1997, 1998 et 1999
- Niveau de plan d'eau H simultané à chaque prise de vue, correspondant soit à des observations effectuées sur le terrain de 1997 à 1999, soit à des valeurs reconstituées par modèle de propagation (tab. 1 et fig. 1) à partir des cotes aux échelles sur le lit mineur.

Résultats

Pour chaque cuvette, une relation entre H et S est établie en calant une fonction polynôme sur les données ci-dessus (fig. 2). Cette relation est conforme aux résultats produits dans les tableaux 4 et 7 bis de POGR(2001-B), sauf pour les cuvettes suivantes :

- Podor : la relation $S(H)$ présentée dans le tableau 4 et effectivement utilisée dans le tableau 7 bis de POGR(2001-B) s'écarte légèrement de la fonction polynôme de degré 2 calée ici sur l'échantillon $H-S$ disponible. Cet écart (fig. 2A), également constaté avec des fonctions polynômes de degrés différents, est inexpliqué.
- Ouro Diallo : le constat est le même que pour la cuvette de Podor. Mais l'écart de résultat (fig. 2F) s'explique cette fois par la prise en compte ici d'un point $H-S$ supplémentaire, présent dans le tableau 2 de POGR(2001-B) mais non retenu pour établir le barème $S(H)$ présenté dans le tableau 4 de cette même étude.
- Wawa : le barème de la relation $S(H)$ présenté dans le tableau 4 de POGR(2001-B) coïncide en moyennes et hautes eaux avec la fonction polynôme de degré 3 calée ici. Mais il s'en écarte de façon inexpliquée pour les cotes inférieures à 500 cm NG et présente même une superficie décroissante en fonction de la cote pour les très basses eaux, ce qui est bien sûr impossible dans la réalité. La relation $S(H)$ utilisée dans le tableau 7 bis de POGR(2001-B), identique en basses eaux à celle du tableau 3 de cette même étude mais très différente pour les cotes supérieures à 500 cm NG, est quant à elle complètement différente de la fonction polynôme calée ici (fig. 2D). Ces différences importantes de résultats sont non inexpliquées.

Pour les besoins de l'analyse effectuée plus loin sur la période 1946-2000, les courbes S(H) établies doivent être extrapolées pour des valeurs de H supérieures à celles des points H-S observés. Faute d'information supplémentaire, les fonctions polynômiales optimisées par la méthode des moindres carrés sur les observations sont conservées pour ces extrapolations, conformément au POGR. Il en va de même pour l'extrapolation inférieure effectuée pour la station de Wawa, qui annule la superficie S pour une cote H de 127 cm NG à Wawa, correspondant à une cote de 219 cm à l'échelle de Podor, pour laquelle le débit du fleuve en régime permanent non influencé par Diama s'élève à 424 m³/s. Les mesures de superficie réalisées par cheminement GPS en 1997 et 1998 (POGR(1999-A)), bien que non utilisés par POGR(2001-B) car jugés peut-être trop imprécises, indiquent que la superficie S s'annule probablement en dessous d'une cote assez élevée à Wawa. Une superficie d'environ 42 ha seulement a en effet été mesurée par cette méthode pour une cote de 215 cm NG (valeurs lues sur la figure 2.3.4 de POGR(1999-A)). Cette information s'accorde avec la forte inflexion de la courbe S(H) extrapolée vers le bas (fig. 2).

Calcul de la superficie inondée maximale annuelle sur les cuvettes

Données utilisées

- Cotes maximales annuelles Hm observées sur les cuvettes entre 1997 et 2000 (tableau 3), tirées de la base de données hydrométriques de l'OMVS.
- Cotes maximales annuelles Hmax dans le lit mineur du fleuve aux stations de Podor, Salde et Matam pour les années 1946 à 2000 (tab. 3), constituées de valeurs observées et de quelques valeurs reconstituées (calculs effectués dans le cadre de l'actualisation de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal). La plupart des valeurs sont identiques à celles qui figurent dans le tableau 7 de POGR(-B). Mais certaines différences sont toutefois constatées, qui concernent surtout des cotes reconstituées (Salde : 1946 à 1951, 1973, 1979, 1981, Matam : 1994) mais aussi, et de façon inexplicable, quelques cotes réellement observées (Podor : 1976, 1984, 1999, 2000 ; Salde : 1976, 1987 ; Matam : 1955, 1981, 1990, 1992).

Méthode et résultats

Le modèle de propagation entre lit mineur et lit majeur (tab. 1 et fig. 1) est utilisé pour reconstituer les valeurs non observées de cote maximale annuelle Hm dans les cuvettes, à partir des cotes maximales annuelles Hmax dans le lit mineur. On dispose donc ensuite pour chaque cuvette d'une série complète de cotes maximales annuelles Hm sur la période 1946-2000, constituée de valeurs observées et de valeurs reconstituées (tab. 3). Du fait des différences mentionnées plus haut au sujet des valeurs de Hmax, les séries obtenues pour Hm présentent elles aussi quelques différences avec les valeurs contenues dans les tableaux 7 et 7 bis de POGR(2001-B), ces dernières étant par ailleurs toutes reconstituées à partir des cotes Hmax sur le lit mineur.

Enfin, les cotes maximales annuelles Hm sont traduites grâce aux relations S(H) de chaque cuvette en superficies inondées maximales annuelles Sm, dont les valeurs présentent, comme pour Hm, certaines différences avec celles du tableau 7 bis de

POGR(2001-B), les plus fortes concernant la cuvette de Wawa. Les valeurs de Sm sont données dans le tableau 3, ainsi que leur somme Smc sur l'ensemble des cuvettes.

Calcul de la relation entre superficies inondées maximales annuelles sur l'ensemble des 10 cuvettes et sur l'ensemble du lit majeur entre Matam et Dagana

Données utilisées

- Superficie inondée maximale annuelle Smc sur l'ensemble des 10 cuvettes, calculée plus haut pour chaque année de la période 1946-2000 (tab. 3).
- Superficie inondée maximale annuelle Smv sur l'ensemble du lit majeur entre Matam et Dagana pour les années 1986, 1987, 1988, 1992, 1997, 1998 et 1999 (Tab. 3), évaluées à partir d'images satellitaires par l'IRD lors du POGR. D'après le chapitre 3.2 de POGR(2001-B), les valeurs mesurées sur ces images pour l'inondation de tout le lit majeur ont été corrigées pour palier le fait que la date de chaque prise de vue ne coïncide pas exactement avec celle du pic de crue, qui varie par ailleurs de façon non négligeable entre Matam et Dagana. Le principe de ces corrections a consisté à comparer chaque superficie inondée S mesurée sur une cuvette à partir d'une image satellitaire, à la superficie maximale annuelle Sm de cette même cuvette pour l'année concernée, calculée par la méthode présentée plus haut. Cette comparaison a permis d'établir un rapport Sm/S, par lequel la portion de superficie Smv mesurée sur l'image pour tout le lit majeur a été multipliée pour évaluer sa valeur sur l'image au moment du passage du pic de crue. Les rapports du POGR ne donnent malheureusement pas plus de détails sur ces corrections, en particulier sur les valeurs des rapports Sm/S utilisées.

Résultats

Comme le montre la figure 3, la relation donnant la superficie inondée maximale annuelle sur l'ensemble du lit majeur entre Matam et Dagana (Smv) en fonction de celle de l'ensemble des 10 cuvettes (Smc) diffère légèrement de celle qui avait été établie lors du POGR. Ceci découle des différences obtenues sur les valeurs de Smc, surtout en 1988 et 1999.

Calcul des valeurs non mesurées et obtention d'une série complète de superficie totale inondée annuelle sur le lit majeur entre Matam et Dagana

La relation Smv(Smc) déterminée ci-dessus est utilisée pour calculer Smv à partir de la série complète des valeurs de Smc (tab. 3) sur la période 1946-2000. Les résultats obtenus sont conservés pour les années sans valeur observée. On obtient ainsi pour la période 1946-2000 une série complète de superficies totales inondées annuelles Smv entre Matam et Dagana, constituée de valeurs mesurées pour les années 1986 à 1988, 1992 et 1997 à 1999, et de valeurs reconstituées pour les autres années (tab. 3).

Calcul de la relation entre superficie totale inondée annuelle sur le lit majeur entre Matam et Dagana et la superficie annuelle de cultures de décrue. Obtention d'une série complète de superficie annuelle de cultures de décrue

Données utilisées

- Série complète sur la période 1946-2000 de superficie totale inondée annuelle Smv sur le lit majeur entre Matam et Dagana, obtenue ci-dessus (tab. 3)
- Valeurs publiées dans POGR(2001-B), de la superficie annuelle des cultures de décrue pratiquées entre Matam et Dagana sur la rive gauche du fleuve (SCg), sur la rive droite (SCd) et sur les deux rives (SCv). Ces valeurs (tab. 4) proviennent des statistiques agricoles produites par différents organismes.

Méthode et Résultats

Les données ci-dessus sont utilisées pour caler par la méthode des moindres carrés une relation polynômiale entre Smv et SCd, ainsi qu'entre Smv et SCg (fig. 4). Quelques données sont éliminées avant d'effectuer ce calage, car elles correspondent à des points peu représentatifs, trop éloignés du reste de l'échantillon. Ces données éliminées sont toutefois moins nombreuses que celles qui avaient été écartées dans les analyses du POGR. Ainsi, les données de 1985 et 1991 pour la rive droite et de 1984 pour la rive gauche, éliminées lors du POGR, sont utilisées ici. Les légères différences d'échantillon utilisé, ajoutées aux différences mentionnées plus haut concernant d'autres résultats, aboutissent à des relations moyennes SCd(Smv) et SCg(Smv) légèrement différentes de celles publiées par POGR(2001-B).

Les relations SCd(Smv) et SCg(Smv) sont utilisées pour reconstituer les valeurs non observées de SCd et SCg, à partir de la série complète des superficies inondées Smv. On obtient ainsi pour SCd comme pour SCg une série complète sur la période 1946-2000, constituée de valeurs observées et de valeurs reconstituées (tab. 4). Enfin, une série complète sur la même période est obtenue pour la superficie SCv cultivée sur les deux rives (tab. 4), en reconstituant les valeurs non observées par la somme de SCd et SCg. Cette série complète peut alors être reliée à la superficie inondée Smv par une fonction moyenne constituée de deux tronçons (fig. 5), qui passe au milieu d'un nuage de points assez dispersés. Cette dispersion s'explique en partie par l'imprécision inévitable de certaines données (en particulier les statistiques agricoles) et par la méthode adoptée (extrapolation de certaines relations en dehors du domaine observé, hypothèses simplificatrices). Mais elle est due également au fait que les superficies cultivées en décrue ne dépendent pas que de l'inondation du lit majeur. D'autres facteurs peuvent en effet intervenir, tels que la disponibilité de main d'œuvre ou la date de la crue ainsi que sa durée. On constate enfin que la superficie des cultures de décrue augmente rapidement en fonction de la superficie inondée, tant que cette dernière est inférieure à 110000 ha environ. Au-delà, l'augmentation est moins rapide.

Calcul de la relation entre la superficie des cultures de décrue et la moyenne des cotes caractéristiques de crue du Sénégal à Bakel

Données utilisées

- Série complète sur la période 1946-2000 de superficie annuelle SCv de cultures de décrue entre Matam et Dagana. Plutôt que la série constituée de valeurs observées et de valeurs reconstituées par sommation des superficies de rive droite et de rive gauche (elles-mêmes constituées de valeurs observées et de valeurs reconstituées à partir des superficies inondées Smv), on utilise ici comme lors du POGR une série de valeurs de SCv (dernière colonne du tableau 4) calculées à partir de la série complète des superficies inondées Smv par la relation moyenne SCv(Smv) (fig. 5). Ceci permet de caler des relations à partir de nuages de points moins dispersés, sans toutefois modifier les résultats de façon importante.
- Valeur moyenne Hb(N) pour chaque année de la période 1946-2000, des N plus fortes cotes observées (de façon consécutive ou non) à l'échelle de Bakel, pour des durées N de 6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 et 60 jours (tab.5).

Résultats

Pour chacune des valeurs de N ci-dessus, la relation moyenne Hb(SCv) est représentée par une fonction polynôme de degré 3, calée par la méthode des moindres carrés (fig.6).

Ces fonctions moyennes Hb(SCv) sont ensuite utilisées pour calculer les valeurs de Hb correspondant à des valeurs de SCv incrémentées de 5000 ha entre 40000 et 80000 ha, pour les durées N listées ci-dessus. Les résultats obtenus, regroupés par valeur de SCv, permettent de caler pour chacune d'entre elles une relation moyenne Hb(N) sous forme de fonction polynôme de degré 5 (fig. 7).

Calcul d'un limnigramme de crue du Sénégal à Bakel en fonction de la superficie de cultures de décrue

Le calcul est basé sur l'utilisation des fonctions Hb(N) déterminées ci-dessus (fig.7) pour des superficies SCv de cultures de décrue comprises entre 40000 et 80000 ha. Pour une valeur de SCv donnée, la fonction Hb(N) correspondante permet de calculer la moyenne Hb des N plus fortes cotes journalières pour des valeurs de N incrémentées de 1 entre 6 et 60 jours.

De façon arbitraire, les 6 plus fortes cotes moyennes journalières du limnigramme (Hp(1) à Hp(6)) sont fixées égales à Hb(6). Les plus fortes cotes de rangs supérieurs (Hp(N) pour N compris entre 7 et 60) sont ensuite déterminées successivement par la relation suivante :

$$Hp(N) = N \times Hb(N) - (N-1) \times Hb(N-1)$$

On dispose alors des 60 plus fortes cotes moyennes journalières du limnigramme (Hp(N) pour N compris entre 1 et 60). Selon le classement chronologique de ces valeurs, plusieurs limnigrammes de cote H0 peuvent être construits. Les règles

adoptées ici pour faire ce classement, conformes à celles qui avaient été définies par le POGR, peuvent se résumer ainsi :

- Le limnigramme débute et se termine par la cote 0 cm, à laquelle le débit s'annule d'après l'étalonnage actuel de la station.
- A partir de la cote 0 cm au jour 1 ($H_0(1) = 0$), la cote H_0 est croissante jusqu'au jour 7 où elle atteint la plus forte cote du limnigramme ($H_0(7) = H_p(1) = H_b(6)$). Cette croissance rapide, retenue dans l'optique de minimiser le volume écoulé, est définie en adoptant les cotes suivantes pour les jours 5 et 6 : $H_0(5) = H_p(21)$; $H_0(6) = H_p(13)$. La cote des jours 2 à 4 est déterminée par interpolation linéaire entre $H_0(1)$ et $H_0(5)$.
- Du jour 7 au jour 12, la cote H_0 reste constante et égale à $H_p(1)$ et $H_b(6)$.
- Du jour 13 au jour 29, la cote décroît suffisamment lentement pour assurer que les 25 plus fortes cotes du limnigramme obtenu sont bien conformes aux valeurs de $H_p(1)$ à $H_p(25)$. Ceci conduit à retenir les valeurs suivantes : $H_0(N) = H_p(N-6)$ pour N compris entre 13 et 18 ; $H_0(N) = H_p(N-5)$ pour N compris entre 19 et 25 ; $H_0(N) = H_p(N-4)$ pour N compris entre 26 et 29.
- A partir du jour 30, on impose une décroissance linéaire accélérée entre la cote $H_0(29)$ et la cote $H_0(41) = 0$ cm, le jour 41 marquant de façon arbitraire la fin du limnigramme de crue. Ce faisant, le limnigramme obtenu respecte bien les 25 premières valeurs de H_p (ainsi donc que celles de H_b), mais pas les suivantes. Ce choix, effectué encore une fois dans l'optique de minimiser le volume écoulé, se justifie par une considération d'ordre agronomique. Il est en effet généralement admis qu'une culture de décrue peut réussir sur le lit majeur du fleuve, si elle est pratiquée sur un terrain qui a accumulé une réserve en eau suffisante grâce à une submersion d'au moins 25 jours. On fait donc ici l'hypothèse que le respect des 25 premières valeurs de H_b suffit pour permettre la pratique des cultures de décrue sur la superficie attendue, le respect des valeurs suivantes de H_b n'étant pas jugé nécessaire.

Pour chaque valeur de superficie Scv de cultures de décrue incrémentée de 5000 ha entre 40000 et 80000, le tableau 6 donne les valeurs de cotes H_b , H_p et H_0 obtenues pour les jours N compris entre 1 et 41. Dans ce tableau, la cote H_0 définit le limnigramme objectif de crue à l'échelle de Bakel, associé à chaque superficie Scv de cultures de décrue. Ces limnigrammes objectifs sont présentés sur la figure 8.

Définition d'hydrogrammes objectifs de crue du Sénégal à Bakel en fonction de la superficie de cultures de décrue visée.

Les cotes H_0 des limnigrammes objectifs (fig.8) sont enfin traduites en débit Q grâce à l'étalonnage actuel de la station de Bakel, qui est non bijectif et basé sur la méthode du gradient limnimétrique. Par souci de simplification, on ne retient que les débits Q des jours 1, 5, 7, 12, 13, 29 et 41 ainsi calculés pour définir des hydrogrammes objectifs simplifiés de débit Q_0 , dont les autres valeurs sont obtenues par interpolation linéaire entre ces points pivots.

Chaque hydrogramme objectif de crue ainsi obtenu est donc censé garantir une submersion de 25 jours sur une certaine partie du lit majeur du fleuve,

suffisamment étendue pour permettre -en moyenne selon les années- d'y pratiquer des cultures de décrue sur une superficie SCv donnée. Encore faut-il pour atteindre cet objectif de cultures que l'inondation arrive au bon moment, et en particulier qu'elle ne soit pas trop tardive. Les semis doivent en effet intervenir suffisamment tôt pour permettre un bon développement des cultures avant l'arrivée de la saison froide.

Le calage temporel de l'hydrogramme objectif est basé sur les résultats produits par le POGR (annexe 3.5 de POGR(1999-B)), qui fixent au 22 août le premier jour de l'hydrogramme objectif, avec un débit maximal atteint dès le 28 août. Ces résultats sont obtenus pour un hydrogramme objectif dit "ORSTOM1" (0 m³/s le jour 1, 2500 m³/s du jour 7 au jour 12 ; 0 m³/s le jour 56), très proche de l'hydrogramme objectif calculé ici pour une superficie SCv de 65000 ha, sauf pour la fin de décrue (débit supérieur pour les jours 30 à 55). L'analyse, basée sur les données de la période 1973-1997, consiste à examiner selon la date de début de palier de l'hydrogramme objectif, le volume qui aurait dû être lâché chaque année du barrage de Manantali pour réaliser cet objectif, et en particulier la part de ce volume qui aurait dû être lâchée sans pouvoir être turbinée (capacité des turbines : 600 m³/s). Les calculs sont faits en tenant compte des débits observés sur le Bakoye à Oualia et la Falémé à Gourbassy, et en adoptant un schéma simplifié pour la propagation des débits depuis ces stations et Manantali jusqu'à Bakel (délai de 3 jours et pas d'apports intermédiaires). Pour chaque année, une dépense minimale en eau non turbinée, associée à une date optimale de l'hydrogramme de crue, peut ainsi être déterminée. Pour chaque autre date adoptée pour le début de crue, la différence entre la dépense obtenue et la dépense minimale de l'année est alors considérée comme un gaspillage d'eau provoqué par le positionnement non optimal de l'hydrogramme de crue. L'analyse statistique (fig. 9) montre qu'un début de palier d'hydrogramme de crue positionné au 28 août permet de minimiser ce gaspillage. Ce positionnement de l'hydrogramme objectif de crue, qui minimise donc les pertes de production électrique entraînées par le soutien de crue, procure par ailleurs une inondation suffisamment précoce pour convenir aux cultures de décrue. C'est donc celui qui est préconisé par le POGR. Il conviendrait de reproduire l'analyse ci-dessus pour définir le positionnement idéal de chacun des hydrogrammes objectifs définis ici, en exploitant les nouvelles données recueillies après 1997 et tenant compte des caractéristiques définitives de turbines installées, connues de façon imprécise à l'époque du POGR. En attendant, le positionnement optimal défini par le POGR est conservé pour ces hydrogrammes objectifs (tab. 7).

Suite aux travaux du POGR, c'est l'hydrogramme de crue défini par le POGR pour permettre de faire 50000 ha de cultures de décrue sur des terrains inondés 25 jours, qui a été retenu par l'OMVS comme objectif de soutien de crue. Mais en pratique, aucun soutien de crue n'a été réalisé depuis 2003 à partir du barrage de Manantali, soit parce-que le stock d'eau disponible fin août dans le réservoir était jugé insuffisant pour réaliser cette opération, soit parce qu'aucun débit lâché spécifique n'était nécessaire pour atteindre l'objectif. Quoi qu'il en soit, un hydrogramme supérieur ou égal à l'objectif, parfois légèrement décalé en temps, a été obtenu la plupart du temps à Bakel grâce aux apports naturels dans le fleuve à l'aval du barrage, essentiellement par la Falémé et le Bakoye.

Les hydrogrammes objectifs obtenus ici sont très proches de ceux qui sont déterminés par le POGR, avec des débits toutefois légèrement plus élevés (fig. 10). Par rapport aux résultats du POGR, le débit maximal augmente ainsi de 5%, 7% et 8% et le volume total de 4%, 6% et 8%, pour les hydrogrammes objectifs associés respectivement à 50000, 60000 et 70000 ha de cultures de décrue sur des terrains inondés 25 jours.

L'hydrogramme objectif associé à 50000 ha de cultures de décrue est donc très peu modifié par les présents résultats.

Calcul de relation entre le niveau maximal annuel du fleuve dans le lit mineur de la vallée et la superficie des cultures de décrue

Données utilisées

- Niveau maximal annuel H_{max} du fleuve dans le lit mineur aux échelles de Salde et Podor : séries complètes sur la période 1946-2000, constituée de valeurs observées et de quelques valeurs reconstituées (tab. 3). La station de Podor étant située dans la zone de remous du barrage de Diama, y compris pendant le passage de la crue lorsque celle-ci est très faible, on est amené corriger de -24 cm et -30 cm les niveaux maximaux observés à cette station en 1987 et 1990. Ainsi diminuées du rehaussement provoqué par Diama, les cotes maximales annuelles à Podor sont mieux représentatives de l'inondation sur le lit majeur entre Matam et Dagana.
- Superficie SC_v de cultures de décrue effectuées sur le lit majeur entre Matam et Dagana : série complète sur la période 1946-2000 (dernière colonne du tableau 4), constituée de valeurs calculées à partir des superficies inondées Sm_v par la relation moyenne $SC_v(Sm_v)$ présentée sur la figure 5. C'est pour établir des relations à partir de nuages de points peu dispersés, que ces valeurs sont utilisées à la place des valeurs observées de SC_v , complétées par la somme des valeurs de SC_g et SC_d (elles mêmes observées et complétées à partir de Sm_v). Ce choix a peu d'influence sur les résultats obtenus (voir fig. 11 et 12).

Résultats

Les figures 11 et 12 montrent les relations établies entre le niveau maximal annuel observé H_{max} (à Salde et Podor respectivement) et la superficie SC_v des cultures de décrue. Ces relations sont assez étroites, du fait que le limnigramme du fleuve à Salde et surtout Podor présente une crue annuelle fortement laminée depuis Bakel, dont le niveau maximal est assez représentatif de l'étendue de l'inondation sur le lit majeur.

Analyse fréquentielle

La fonction de répartition des superficies SC_v de cultures de décrue sur la période 1946-2000 (fig. 13) montre qu'une superficie de 50000 ha est non atteinte à la fréquence de 0.275 ou 0.266, selon que l'on considère la série (avant dernière colonne du tableau 4) des valeurs observées de SC_v , complétées par la somme des valeurs de SC_d et SC_g (elles mêmes observées et complétées à partir de Sm_v), ou la série (dernière colonne du tableau 4) des valeurs de SC_v entièrement reconstituées à partir de Sm_v .

Par ailleurs, les relations $SC_v(H_{max})$ présentées sur les figures 11 et 12 montrent qu'une superficie SC_v de 50000 ha de cultures de décrue correspond à une cote maximale annuelle H_{max} de 752 cm et 411 cm aux échelles de Salde et Podor respectivement. D'après les fonctions de répartition de H_{max} (fig. 13), ces cotes sont

non atteintes à des fréquences de 0.272 et 0.297 respectivement sur la période 1946-2000, et de 0.173 et 0.187 sur la période 1903-2000.

Ces résultats montrent que les 50000 ha de cultures de décrue correspondent à un objectif très limité associé à une faible crue, dépassée entre 2 années sur 3 et 3 années sur 4 sur la période 1946-2000, et entre 4 années sur 5 et 5 années sur 6 sur la période 1903-2000.

Modèle de propagation des débits entre Manantali et Bakel. Rappel de l'adaptation au régime artificiel et calage actualisé

Principes du modèle et de son utilisation en temps réel pour le soutien de crue

Le modèle de propagation de Lamagat, dont le principe est expliqué plus haut, permet de décrire la propagation des écoulements entre deux stations observées. Ses conditions d'utilisation sont celles des modèles d'onde diffusive (termes d'accélération négligeables devant les autres termes dans les équations de Saint Venant), avec des apports intermédiaires négligeables entre les deux stations, ou sinon assez corrélés aux débits de la station amont.

En régime naturel, l'écoulement des cours d'eau sur le bassin amont du fleuve Sénégal est entièrement lié aux pluies de mousson, caractérisées par une très forte saisonnalité. Les apports intermédiaires entre deux stations sont de ce fait assez corrélés aux débits de la station amont, ce qui permet d'utiliser le modèle avec d'assez bons résultats. Entre Manantali et Bakel, on utilise les deux sous-modèles suivants dans lesquels le débit amont Q_{1n} et le débit aval Q_{2n} sont respectivement définis ainsi :

- Sous-modèle amont : Q_{1n} = somme des débits naturels du Bafing à Manantali et du Bakoye à Oualia ; Q_{2n} = débit naturel du Sénégal à Kayes
- Sous-modèle aval : Q_{1n} = somme des débits naturels du Sénégal à Kayes et de la Falémé à Gourbassy ; Q_{2n} = débit naturel du Sénégal à Bakel

Chaque sous-modèle est alors défini par deux fonctions f et g calées sur les données observées, qui donnent le débit naturel aval Q_{2n} et le délai de propagation D en fonction du débit naturel amont Q_{1n} :

$$D = g(Q_{1n}(t))$$

$$Q_{2n}(t+D) = f(Q_{1n}(t))$$

En première approximation, la différence entre $Q_{2n}(t+D)$ et $Q_{1n}(t)$ peut être interprétée comme le débit des apports intermédiaires $Q_i(t+D)$ entre les deux stations :

$$Q_i(t+D) = Q_{2n}(t+D) - Q_{1n}(t) = f(Q_{1n}(t)) - Q_{1n}(t)$$

En régime artificiel, dans lequel les apports intermédiaires n'ont pas de raison d'être corrélés au débit Q_1 observé à l'amont, le sous-modèle doit être adapté de la façon suivante pour estimer le débit aval Q_2 :

$$T = g(Q_1(t))$$

$$Q_2(t+D) = Q_1(t) + Q_i(t+D) = Q_1(t) + f(Q_{1n}(t)) - Q_{1n}(t)$$

Avant d'être utilisés en temps réel, les résultats du modèle de propagation subissent une correction calculée à partir des erreurs de modélisation récemment observées

(écarts entre les valeurs prévues par le modèle et les valeurs observées du débit à l'aval), selon le principe de la boucle fermée qui exploite une certaine persistance (ou autocorrélation) de ces erreurs. Une erreur récente de modélisation est ainsi calculée en moyennant les N plus récentes erreurs observées depuis 10 jours, pondérées chacune par l'inverse de son ancienneté. On multiplie enfin cette erreur récente par un facteur de pondération K inférieur à 1 pour obtenir le facteur correctif que l'on soustrait au débit aval prévu par le modèle de propagation. Les valeurs utilisées pour N et K sont les suivantes : N=1 et K=0.8 dans le logiciel Progeman (POGR(2001-A, annexe 3) ; N=10 et K=0.9 pour le modèle amont et 0.93 pour le modèle aval, dans le logiciel Previcru produit parallèlement à la mise à jour de la monographie.

Le débit à lâcher pour le soutien de crue est déterminé par encadrements successifs. On calcule ainsi pour chaque valeur testée un débit modélisé corrigé résultant à Bakel, jusqu'à ce que ce dernier coïncide au mieux avec l'hydrogramme objectif retenu à cette station, en temps et en valeur.

Calage du modèle

Le calage des fonctions f et g sur les données du régime naturel, dont le principe est décrit plus haut, peut être adapté pour le régime artificiel, ce qui permet de le baser sur un maximum de données pour le rendre plus fiable. La procédure consiste alors à déterminer par la méthode habituelle la fonction g(Q1) donnant le temps de propagation D, puis à calculer le débit des apports intermédiaires $Q_i(t+D)$ donnés par $Q_2(t+D)-Q_1(t)$, à déterminer une relation moyenne h entre le débit naturel amont $Q_{1n}(t)$ et le débit intermédiaire $Q_i(t+D)$ et à en déduire la fonction f(Q1n) par la somme $Q_{1n} + h(Q_{1n})$.

Les fonctions f et g peuvent ainsi être calées sur la période 1967-2012 pour le modèle amont et 1954-2012 pour le modèle aval, en exploitant des données observées en régime naturel jusqu'en 1986 et en régime artificiel par la suite. Les résultats obtenus, publiés dans la monographie hydrologique du fleuve Sénégal récemment mise à jour, sont présentés dans les tableaux 8 et 9. Par rapport aux résultats du POGR, obtenus à partir de données antérieures à 2001, on constate que les fonctions f actualisées sont légèrement plus élevées pour les fortes valeurs de débit amont (fig. 15).

Comparaison des superficies de cultures de décrue entre le régime naturel et le régime observé. Effet du soutien de crue

Données utilisées

- Chroniques des cotes moyennes journalières dans le lit mineur du fleuve aux échelles de Bakel et Salde (de 1946 à 1986 : régime naturel observé ; de 1987 à 2011 : régime influencé observé et régime naturel reconstitué), tirées de la base de données associée à la mise à jour de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal.
- Chroniques des superficies annuelles de cultures de décrue pour la période 1946-2011 :
 - SCv : avant dernière colonne du tableau 4. Valeurs observées (statistiques agricoles) complétées par des valeurs reconstituées par la

somme des superficies cultivées en rive droite (SCd) et en rive gauche (SCg), elles-mêmes constituées de valeurs observées complétées par des valeurs reconstituées en fonction de la superficie inondée S_{mv} par les relations moyennes entre ces variables (fig. 4)

- $SC_v = f(S_{mv})$: dernière colonne du tableau 4. Valeurs calculées en fonction de la superficie inondée S_{mv} , à partir de la relation moyenne établie entre ces deux variables (fig. 5)

Relations donnant la superficie des cultures de décrue en fonction du limnigramme de crue dans le lit mineur à Salde et à Bakel

Comme il est montré plus haut, la superficie de cultures de décrue est reliée de façon assez étroite à la valeur maximale annuelle H_{max} de la cote moyenne journalière du fleuve à l'échelle de Salde (fig. 11).

Les données disponibles permettent par ailleurs d'établir pour différentes valeurs de N (6, 10, 15, ...60 jours) une relation moyenne entre la moyenne $H_b(N)$ des N plus fortes cotes moyennes journalières de l'année relevées à l'échelle de Bakel et la superficie de cultures de décrue SC_v évaluée en fonction de la superficie inondée S_{mv} . Les relations obtenues, inverse des relations présentées sur la figure 6, sont présentées sur la figure 16. Ces relations sont utilisées de la façon suivante, pour calculer la superficie annuelle de cultures de décrue à partir des cotes du fleuve à Bakel :

- Pour chaque jour j de l'année :
 - calcul d'une cote $H_{0b}(25)$, égale à la moyenne des cotes journalières des jours j à $j+24$
 - calcul d'une cote $H_{0b}(N)$ liée, égale à la valeur maximale de la moyenne des cotes journalière des jours $j+x$ à $j+x+N-1$ pour x compris entre 0 et $25-N$. Cette cote $H_{0b}(N)$ liée est calculée pour N égal à 6, 10, 15, et 20 jours.
 - Traduction de la cote $H_{0b}(25)$ et des cotes $H_{0b}(N)$ liées en valeurs de superficies de cultures de décrue ($SC_{0v}(25)$ et $SC_{0v}(N)$) grâce aux relations moyennes établies sur la période 1946-2000 entre H_b et SC_v (fig. 16)
 - Calcul d'une valeur unique SC_{0v} de cultures de décrue par combinaison linéaire des valeurs de $SC_{0v}(25)$ et $SC_{0v}(N)$ par la formule suivante dans laquelle les facteurs $K(6)$ à $K(25)$ sont des constantes définies plus bas :

$$SC_{0v} = K(6) \times SC_{0v}(6) + K(10) \times SC_{0v}(10) + K(15) \times SC_{0v}(15) + K(20) \times SC_{0v}(20) + K(25) \times SC_{0v}(25)$$

- Détermination de la superficie annuelle de cultures de décrue SC_v , égale au maximum annuel des valeurs journalières de SC_{0v}

En pratique, les coefficients $K(6)$ à $K(25)$ sont déterminés de façon à minimiser l'erreur type des superficies annuelles obtenues par rapport aux valeurs observées complétées de SC_v (avant dernière colonne du tableau 4) sur la période 1946-2000. Le jeu de paramètres optimal ainsi obtenu est le suivant :

$$K(6) = 0.51873 ; K(10) = K(15) = K(20) = 0 ; K(25) = 0.48127.$$

Superficies potentielles annuelles de cultures de décrue évaluées à partir des limnigrammes de crue à Salde et Bakel, pour le régime d'écoulement observé

La superficie potentielle annuelle de cultures de décrue est calculée à partir de la cote maximale annuelle du fleuve à l'échelle de Salde, grâce à la relation représentée sur la figure 11. Les valeurs ainsi obtenues pour le régime d'écoulement observé (naturel jusqu'en 1986 puis influencé par Manantali) sont très proches des valeurs de SCv modélisées à partir des superficies inondées (fig. 17A et B), et assez proches des valeurs observées complétées de SCv (fig. 17A et C), par rapport auxquelles elles présentent une erreur type de 8798 ha (coefficient de Nash = 0.949) sur la période 1946-2000.

Les relations représentées sur la figure 16 sont utilisées suivant la méthode décrite plus haut pour calculer les superficies potentielles annuelles de cultures de décrue à partir des limnigrammes de crue observés à l'échelle de Bakel. Les valeurs ainsi obtenues sont légèrement moins précises que les valeurs calculées à partir des cotes maximales observées à Salde. Elles restent quand-même assez proches des valeurs de SCv modélisées à partir des superficies inondées (fig. 18 A et B), ainsi que des valeurs observées complétées de SCv (fig. 18 A et C), par rapport auxquelles elles présentent une erreur type de 9666 ha (coefficient de Nash = 0.938) sur la période 1946-2000.

Les résultats obtenus à partir des cotes observées à Salde et à Bakel sont cohérents entre eux (fig. 19) et donnent des valeurs moyennes très proches pour la superficie de cultures de décrue : 85834 ha et 84266 ha respectivement sur la période 1944-1986 ; 61104 ha et 60130 ha respectivement sur la période 1987-2011

Superficies potentielles annuelles de cultures de décrue évaluées à partir des limnigrammes de crue à Salde et Bakel, pour le régime d'écoulement naturel

La méthode décrite ci-dessus est appliquée aux limnigrammes naturels du fleuve à Salde et Bakel, pour obtenir des superficies potentielles annuelles de cultures de décrue pour le régime d'écoulement naturel. Dans les deux cas, les superficies obtenues à partir de 1987 sont globalement plus élevées qu'en régime observé (fig. 20 et 21). Elles présentent cependant entre elles des différences plus importantes qu'en régime observé, faisant apparaître de surcroît un léger biais puisque les superficies calculées à partir de Salde sont globalement un peu plus élevées que les superficies calculées à partir de Bakel (fig. 22), avec des valeurs moyennes de 80010 ha et 73808 ha respectivement sur la période 1987-2011.

Les cotes reconstituées à partir de 1987 pour le régime naturel sont probablement moins fiables pour la station de Salde que pour celle de Bakel, compte tenu du mode de calcul de ces cotes par modèle de propagation utilisé de l'amont vers l'aval. Vu les différences de résultats constatées, on prend donc le parti de n'exploiter pour le régime naturel de 1987 à 2011, que les superficies de cultures de décrue calculées à partir des cotes naturelles reconstituées à Bakel.

Trois périodes successives peuvent être distinguées depuis 1945 pour les superficies potentielles de cultures de décrue associées au régime naturel d'écoulement du fleuve Sénégal (fig. 21 et 23) :

- 1945-1975 : moyenne = 103573 ha ; supérieure à 50000 ha 30 années sur 31.
- 1976-1993 : moyenne = 39976 ha ; supérieure à 50000 ha 4 années sur 18

- 1994-2011 : moyenne = 83341 ha ; supérieure à 50000 ha 17 années sur 18

Modifications de superficie potentielle annuelle de cultures de décrue entraînées par la gestion du barrage de Manantali

Trois périodes successives peuvent être distinguées depuis le début d'exploitation du barrage de Manantali en 1987, pour les impacts de l'ouvrage sur l'inondation annuelle du lit majeur du fleuve dans la vallée et les superficies potentielles de cultures de décrue associées (fig. 24) :

- De 1987 à 1991, le réservoir de Manantali est rempli progressivement jusqu'à atteindre son niveau de débordement. Toutefois, le barrage soutient les étiages de façon modérée et d'assez forts débits sont également lâchés à certains moments en période de crue, probablement pour limiter la vitesse de remplissage du réservoir et tester les organes d'évacuation du barrage. Dans la plupart des cas, ces débits ne sont manifestement pas destinés à soutenir la crue du fleuve Sénégal, sauf peut-être en 1988 et 1991 où ils contribuent de façon non négligeable à l'inondation du lit majeur dans la vallée. Pendant cette période transitoire, la mise en eau progressive du réservoir entraîne chaque année une diminution de la superficie potentielle de cultures de décrue par rapport au régime naturel, de 13675 ha en moyenne.
- De 1992 à 2003, le soutien des étiages est systématique et renforcé par rapport à la période précédente. Des débits spécifiques sont par ailleurs lâchés chaque année pour soutenir la crue du fleuve Sénégal, sauf en 1999 et en 2003 où le barrage doit au contraire stocker le maximum d'eau pendant la crue pour limiter les effets catastrophiques d'une trop forte inondation dans la vallée, ce qui conduit à ces deux reprises à remplir le réservoir au-delà de sa limite de débordement. Grâce au soutien de crue, la superficie potentielle annuelle de cultures de décrue reste supérieure à 50000 ha la plupart du temps, et à 40000 ha dans tous les cas. Elle est toutefois inférieure chaque année à celle du régime naturel (diminution moyenne de 5243 ha), sauf en 1993, 1994 et 2000 où elle est au contraire légèrement supérieure.
- De 2004 à 2011, la gestion du barrage de Manantali qui est consacrée à la production hydroélectrique et au soutien d'étiage, ne réalise aucun soutien de crue. Il en résulte une très forte régularisation du débit du Bafing, qui reste toujours inférieur à 450 m³/s à la sortie du barrage au lieu de dépasser 2500 m³/s en régime naturel. Cette régularisation permet d'écrêter très efficacement certaines crues trop fortes dans le fleuve en 2007, 2009, 2010 et 2011, sans que la limite de débordement soit atteinte dans le réservoir. Elle entraîne par rapport au régime naturel une diminution forte et systématique de la superficie potentielle annuelle de cultures de décrue, de 26331 ha en moyenne. Sauf en 2004 et en 2006, où elle s'élève à moins de 30000 et 15000 ha respectivement, cette superficie demeure malgré tout assez élevée la plupart du temps, grâce aux apports conséquents des affluents naturels arrivant à l'aval de Manantali (principalement Bakoye et Falémé), qui suffisent à eux seuls pour provoquer une inondation importante du lit majeur du fleuve dans la vallée.

Références

- Lamagat, J.P. (1983) Analyse de la vitesse de propagation des crues. Application à la prévision des crues et des étiages : delta central du Niger, modèle provisoire de propagation. Bondy, ORSTOM, 42 p multigr.
- Lamagat J.P. (1987) Modèle de propagation des crues du Niger entre Koulikouro et Niamey. Niamey, ORSTOM, 93 p muligr.
- Lamagat J.P. (1990) Analyse de la vitesse de propagation des ondes de crues. In : The state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa. Proceedings of the Sahel Forum (1989/02/18-23). Urbana : International Water Ressources, 291-305.
- Lamagat, J.P., Morel-Seytoux, H.J., Albergel J. (1993) Analyse de la propagation des ondes de crue. *Hydrol. Continent.* 8(2) 113-137
- Morel-Seytoux, H.J., Fahmy, H., Lamagat, J.P. (1993) A composite hydraulic and statistical flow-routing method, *Water Resour. Res.* 29(2), 413-418
- POGR, 1999-A. Phase 2, tome 3. Mise en eau du lit majeur. Juin 1999
- POGR, 1999-B. Phase 2, synthèse. Octobre 1999
- POGR, 2000. Rapport intérimaire, annexe F, juin 2000.
- POGR, 2001-A. Phase 3. Synthèse. Juin 2001
- POGR, 2001-B. Phase 3. Crue artificielle et cultures de décrue. Synthèse finale, décembre 2001

T (jour)	Podor ech. (cm)	Podor pl. (cm NG)	T (jour)	Podor ech. (cm)	Leqseiba (cm NG)	T (jour)	Podor ech. (cm)	Donaye (cm NG)	T (jour)	Podor ech. (cm)	Wawa (cm NG)	T (jour)	Salde ech. (cm)	Pété (cm NG)
5	210	257	9	210	304	0	210	147	1	210	106	3	200	810
5	264	275	9	357	306	0	283	243	1	250	200	3	222	812
5	275	285	9	367	313	0	286	247	1	275	257	3	236	812
5	294	290	9	378	322	0	290	253	1	282	274	3	244	813
5	307	289	9	392	334	0	299	264	1	296	305	3	256	814
5	319	289	9	397	339	0	308	274	1	304	327	4	264	814
5	326	290	8	409	344	0	321	288	1	311	343	5	273	814
5	335	294	7	416	346	0	335	305	1	322	374	8	286	814
5	346	301	6	426	349	0	345	316	1	334	400	8	300	814
5	359	304	5	440	356	0	360	333	1	343	417	8	310	815
5	371	309	5	448	360	1	372	348	1	358	447	9	321	815
5	381	314	5	458	367	0	379	357	1	368	465	10	330	816
5	391	323	5	467	376	1	390	373	1	377	476	11	340	816
4	399	329	4	478	386	0	398	385	1	389	495	13	346	816
3	413	339	4	487	397	0	412	404	1	396	506	16	356	817
3	418	343	4	495	406	0	418	411	1	410	526	16	366	818
2	423	349	2	502	414	0	423	419	1	416	532	17	376	819
2	434	362	1	510	422	0	434	431	0	423	540	18	387	820
2	441	370	1	524	440	0	442	440	0	434	553	18	391	821
1	458	392	1	544	466	0	458	460	0	442	560	19	404	822
0	467	402	1	551	476	0	467	471	-1	458	574	19	410	823
0	478	413	0	553	478	0	478	484	-1	467	586	20	425	824
0	487	423	0	556	481	-1	487	495	-2	478	598	20	446	825
0	495	430	0	600	541	-2	495	503	-2	487	608	21	457	826
0	502	437	0	690	661	-2	502	511	-3	495	614	20	466	826
0	510	445				-3	510	519	-4	502	620	20	470	827
1	524	458				-4	524	533	-5	510	627	19	479	827
1	544	478				-4	544	553	-6	524	640	19	486	828
1	551	486				-4	551	560	-6	544	658	18	492	829
2	553	488				-4	553	562	-6	551	668	15	503	829
2	600	534				-4	600	607	-6	553	670	13	510	830
2	690	623				-4	690	698	-7	556	673	12	522	830
									-7	570	689	12	532	831
									-7	690	811	12	546	831
												12	553	832
												13	560	832
												13	581	832
												13	584	833
												13	602	833
												13	607	834
												13	618	835
												13	627	836
												13	638	837
												12	649	838
												11	655	839
												11	669	840
												11	676	842
												11	682	843
												11	693	846
												10	703	849
												10	719	852
												10	729	856
												10	738	859
												9	747	862
												8	758	866
												8	764	869
												8	771	872
												7	778	880
												7	788	888
												6	806	896
												6	820	906
												6	832	917
												6	843	928
												6	850	935
												5	855	941
												5	860	948
												5	869	955
												4	885	971
												4	1070	1156

Tableau 1 : calage du modèle de propagation entre lit mineur et lit majeur (noir : valeurs tirées de POGR(2000) ; rouge : extrapolations).

T (jour)	Salde ech. (cm)	Aere Golere (cm NG)	T (jour)	Salde ech. (cm)	Ouloum Nere (cm NG)	T (jour)	Salde ech. (cm)	Ouro Diallo (cm NG)	T (jour)	Matam ech. (cm)	Mbakhna (cm NG)	T (jour)	Matam ech. (cm)	Nabadji (cm NG)
0	450	676	2	450	693	1	450	702	6	632	1147	5	229	1091
0	572	750	2	527	740	1	528	711	6	636	1147	5	234	1091
0	633	786	2	540	748	1	582	717	6	646	1151	5	239	1093
0	638	789	2	547	755	1	602	722	6	652	1152	5	250	1095
0	642	791	2	558	761	2	609	726	6	664	1159	5	260	1095
0	646	795	2	569	770	2	621	738	6	683	1172	6	268	1095
0	662	804	2	578	775	2	633	749	6	689	1177	11	284	1092
0	662	804	2	583	779	2	638	754	6	699	1192	12	294	1091
0	666	808	2	592	785	2	649	768	6	707	1193	12	307	1093
0	683	819	2	603	795	2	656	777	6	714	1199	12	313	1094
0	687	821	2	609	796	2	664	786	6	724	1214	12	325	1080
0	704	834	2	630	816	2	675	801	6	729	1216	12	332	1080
0	714	837	2	636	822	2	680	807	6	737	1218	12	341	1079
1	733	845	2	647	831	2	691	818	6	749	1234	12	348	1079
1	743	853	2	657	838	2	704	827	7	769	1251	12	363	1088
2	751	861	2	662	844	2	716	835	8	785	1255	12	379	1093
3	759	866	2	676	858	2	729	843	8	790	1258	12	395	1093
3	765	873	2	676	860	2	738	849	8	794	1263	11	403	1091
3	772	880	2	689	872	2	748	857	8	803	1275	11	407	1096
3	783	891	2	704	891	2	757	865	7	812	1284	10	414	1093
3	792	900	2	712	896	2	765	872	6	831	1299	9	423	1088
3	810	918	2	729	916	2	773	879	5	836	1308	7	436	1093
3	824	931	1	735	923	2	783	888	5	838	1313	7	447	1104
3	836	942	1	747	936	2	796	898	4	879	1400	6	454	1109
3	842	947	1	757	948	3	806	906				6	465	1113
3	848	952	1	765	954	3	817	915				6	472	1115
3	855	958	0	774	964	3	831	928				5	481	1115
3	864	966	0	785	976	3	843	939				5	492	1114
3	870	972	0	796	990	3	850	945				5	506	1115
3	873	974	-1	807	1001	3	855	950				5	514	1119
3	875	976	-1	817	1012	3	860	955				5	528	1124
3	880	980	-1	833	1029	3	869	963				5	539	1128
4	889	988	-1	844	1040	3	885	979				5	550	1135
4	898	996	-1	849	1046	3	898	993				4	554	1138
4	902	1001	-2	856	1053	3	902	997				4	562	1144
4	905	1004	-2	861	1058	3	905	1000				4	570	1148
4	908	1008	-2	872	1070	3	908	1004				3	580	1156
4	950	1050	-2	890	1088	3	940	1037				3	595	1166
4	1070	1167	-2	898	1096	3	1070	1171				3	606	1176
			-2	902	1099							3	620	1188
			-2	905	1102							3	630	1199
			-2	908	1105							3	636	1206
			-2	912	1109							3	645	1214
			-2	950	1150							3	652	1222
			-2	1070	1279							3	665	1233
												3	684	1249
												3	688	1254
												3	697	1262
												3	704	1269
												3	711	1277
												3	726	1290
												3	732	1295
												3	741	1299
												3	749	1304
												3	766	1318
												3	783	1333
												3	789	1333
												3	795	1343
												3	804	1354
												3	812	1364
												3	830	1382
												3	835	1389
												3	838	1393
												3	841	1395
												3	846	1398
												3	1070	1640

Tableau 1 (suite) : calage du modèle de propagation entre lit mineur et lit majeur (noir : valeurs tirées de POGR(2000) ; rouge : extrapolations).

année	Podor		Leqseiba		Donaye		Wawa		Aere Golere		Ouro Diallo		Pete		Ouloum Néré		Mbakhna		Nabadji	
	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S
1986					389	156	515	1791			855	2144	832	340	934	4259	1168	113	1236	178
1987	205	1.5					267	1224	723	164	713	106	825	293					1092	33
1988	417	1444	386	2311	489	610	585	2548	925	1769	918	3674	921	1154	1047	6197	1228	270	1256	250
1992	307	398	306	111	357	57	445	1523	799	397	946	4032			891	3273	1268	384	1348	415
1997	332	699			424	210	481	1803	837	1100	827	1152					1150	60	1179	119
1997	332	699			424	210	554	1903			855	2094							1200	181
1997	335	659			377	101	513	1604	728	240	713	210	834	188	667	579	1164	96	1096	58
1998	382	1171	395	2512	444	415			882	1167	877	2690	906	848						
1998	439	1465			518	820	608	2542	974	2127	956	4202	952	1464						
1999	482	1959	474	4278	567	1357	684	3882	961	2189	956	4768	957	1650	1044	6333	1225	270	1276	281
									1012	2729	1009	5740								

Tableau 2 : Superficie inondée S (ha) mesurée par imagerie satellitaire et niveau de plan d'eau simultané H (cm NG) pour les cuvettes suivies sur le lit majeur, d'après le POGR. Les différences par rapport au tableau n°3 de POGR(2001-B) sont en grisé.

année	lit mineur			cuvettes du lit majeur																				lit majeur vallée Smv	
	Podor	Salde	Matam	Podor		Leqseiba		Donaye		Wawa		Aere Goléré		Ouro Diallo		Pété		Ouloum Néré		Mbakhna		Nabadji			Somme
	Hmax	Hmax	Hmax	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm		Smc
1946	572	908	870	507	2237	503	5095	580	1526	691	4053	1008	2670	1004	5744	994	2299	1105	7590	1353	617	1424	597	32426	218091
1947	545	894	860	479	1947	467	4217	554	1196	659	3398	992	2473	989	5296	980	2024	1092	7294	1341	583	1413	569	28998	192387
1948	530	878	828	464	1794	448	3730	539	1034	645	3148	978	2301	972	4827	964	1733	1076	6936	1305	484	1380	489	26477	174120
1949	515	857	815	450	1654	428	3250	524	889	632	2926	960	2082	952	4292	944	1402	1054	6458	1290	445	1367	459	23856	155687
1950	668	1025	1000	601	3365	631	8284	676	3321	788	7008	1123	4349	1125	9861	1111	5339	1231	10742	1534	1112	1564	1013	54394	406109
1951	585	954	896	519	2376	521	5535	593	1704	704	4366	1054	3293	1051	7238	1040	3336	1154	8764	1385	704	1452	671	37988	261873
1952	580	930	900	514	2322	514	5366	588	1634	699	4243	1030	2961	1027	6439	1016	2769	1128	8138	1390	717	1456	683	35272	240166
1953	533	880	831	467	1824	452	3827	542	1065	648	3194	980	2320	974	4883	966	1768	1078	6980	1308	493	1383	497	26852	176800
1954	640	1000	970	574	3014	594	7361	647	2680	760	5985	1099	3961	1099	8894	1086	4578	1204	10024	1488	988	1532	907	48393	350733
1955	639	986	928	573	3002	593	7328	646	2659	759	5951	1085	3751	1084	8373	1072	4178	1189	9633	1428	822	1486	769	46467	333601
1956	650	1013	950	584	3138	607	7690	657	2898	770	6334	1112	4160	1112	9391	1099	4966	1218	10395	1458	905	1510	840	50717	371821
1957	627	980	930	561	2857	577	6932	634	2416	747	5558	1079	3663	1078	8154	1066	4012	1182	9467	1431	830	1489	775	44665	317856
1958	647	1019	986	581	3100	603	7591	654	2831	767	6228	1117	4254	1118	9624	1105	5151	1224	10568	1513	1054	1549	963	51365	377782
1959	604	978	928	538	2588	546	6174	611	1996	724	4870	1077	3634	1076	8082	1064	3958	1180	9412	1428	822	1486	769	42306	297653
1960	527	870	810	461	1765	444	3634	536	1004	643	3103	972	2224	964	4610	956	1597	1068	6756	1285	431	1362	446	25569	167670
1961	640	1008	965	574	3014	594	7361	647	2680	760	5985	1107	4083	1107	9198	1094	4815	1213	10252	1481	967	1526	890	49246	358419
1962	580	933	879	514	2322	514	5366	588	1634	699	4243	1033	3002	1030	6536	1019	2837	1132	8215	1364	647	1434	622	35423	241360
1963	537	860	821	471	1864	457	3956	546	1108	652	3257	962	2112	955	4370	948	1467	1057	6522	1297	463	1373	472	25593	167837
1964	654	1017	962	588	3188	613	7822	661	2988	774	6479	1115	4223	1116	9546	1103	5089	1222	10510	1476	955	1523	880	51679	380686
1965	663	1031	986	596	3301	625	8119	671	3199	783	6815	1129	4444	1131	10100	1117	5531	1237	10918	1513	1054	1549	963	54445	406587
1966	608	967	927	542	2634	552	6306	615	2065	728	4984	1067	3476	1065	7690	1053	3666	1168	9113	1427	819	1485	766	41517	290998
1967	647	1011	943	581	3100	603	7591	654	2831	767	6228	1110	4129	1110	9313	1097	4905	1216	10337	1448	879	1503	817	50132	366472
1968	438	786	747	367	934	355	1429	436	316	557	2059	894	1387	890	2819	886	676	977	4910	1225	266	1303	324	15119	98399
1969	558	928	849	493	2090	484	4622	567	1350	675	3710	1028	2934	1025	6374	1014	2724	1126	8087	1327	546	1401	540	32976	222302
1970	532	879	801	466	1814	450	3795	541	1055	647	3179	979	2311	973	4855	965	1751	1077	6958	1275	404	1350	421	26542	174586
1971	558	917	846	493	2090	484	4622	567	1350	675	3710	1017	2787	1013	6024	1003	2486	1114	7808	1324	537	1398	532	31945	214419
1972	320	655	582	289	399	305	198	287	0	368	1438	800	611	776	809	839	317	837	2562	1113	0	1157	103	6437	47798
1973	442	792	730	371	970	357	1478	440	336	560	2088	900	1445	895	2920	890	710	985	5056	1211	229	1293	306	15538	101000
1974	589	941	903	523	2420	526	5670	596	1762	708	4468	1041	3112	1038	6800	1027	3022	1140	8423	1394	729	1459	692	37097	254682
1975	515	853	813	450	1654	428	3250	524	889	632	2926	956	2042	948	4188	939	1323	1050	6372	1288	440	1365	454	23538	153487
1976	385	722	656	318	580	328	759	366	76	489	1667	840	913	839	1797	853	402	908	3671	1158	82	1225	192	10139	68603
1977	381	711	657	314	556	325	674	360	60	482	1644	836	879	832	1673	851	384	895	3466	1159	84	1226	193	9613	65577
1978	413	759	702	339	728	345	1184	405	198	529	1864	866	1129	867	2329	867	499	950	4397	1189	168	1267	259	12754	83990
1979	341	674	596	298	453	306	207	312	0	413	1490	813	704	800	1151	841	331	856	2848	1120	0	1167	114	7296	52522
1980	438	776	744	367	934	355	1429	436	316	557	2059	884	1292	882	2636	878	594	966	4702	1222	259	1301	320	14541	94830
1981	442	771	679	371	970	357	1478	440	336	560	2088	879	1246	877	2543	872	544	961	4600	1173	125	1245	222	14152	92449
1982	371	706	634	309	524	316	468	347	24	469	1600	835	867	828	1615	850	378	892	3415	1144	44	1204	161	9096	62623
1983	233	533	466	265	259	304	162	177	0	160	440	726	181	712	94	831	279	744	1357	1060	0	1113	59	2830	28626

année	lit mineur			cuvettes du lit majeur																				lit majeur vallée Smv	
	Podor	Salde	Matam	Podor		Leqseiba		Donaye		Wawa		Aere Goléré		Ouro Diallo		Pété		Ouloum Néré		Mbakhna		Nabadji			Somme
	Hmax	Hmax	Hmax	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm	Hm	Sm		Smc
1984	232	477	400	265	257	304	161	176	0	158	413	692	35	705	40	827	261	709	981	1039	0	1092	41	2189	25334
1985	397	729	667	328	647	339	1032	384	128	507	1747	843	937	843	1875	856	421	916	3810	1165	102	1235	206	10905	73050
1986	402	748	685	331	673	341	1083	390	149	515	1782	858	1060	857	2138	862	467	937	4177	1177	136	1250	231	11896	82520
1987	289	566	487	289	396	305	185	252	0	290	1301	746	282	715	126	832	283	768	1640	1068	0	1114	60	4274	37000
1988	482	851	799	417	1357	391	2319	489	610	602	2524	955	2022	946	4136	936	1287	1048	6330	1273	398	1348	416	21400	148700
1989	400	757	705	330	663	340	1063	388	141	512	1768	865	1118	865	2294	866	492	948	4370	1191	174	1270	264	12347	81554
1990	248	485	406	270	286	304	168	197	0	195	795	697	54	706	47	828	265	714	1032	1041	0	1095	43	2691	27908
1991	373	711	660	310	530	318	509	349	31	471	1608	836	879	832	1673	851	384	895	3466	1161	90	1229	197	9366	64161
1992	380	717	631	314	553	324	653	358	56	481	1638	838	896	836	1742	852	392	902	3573	1142	39	1200	156	9698	60725
1993	393	716	666	325	627	335	933	378	110	501	1718	838	893	835	1732	851	390	901	3554	1165	101	1234	205	10262	69309
1994	504	851	792	439	1553	416	2942	513	793	622	2779	955	2022	946	4136	936	1287	1048	6330	1267	380	1338	395	22619	147186
1995	519	870	802	453	1690	434	3378	528	926	635	2984	972	2224	964	4610	956	1597	1068	6756	1276	407	1352	424	24996	163634
1996	370	701	673	309	521	315	448	346	20	467	1597	832	844	825	1557	848	371	887	3334	1169	114	1240	214	9019	62187
1997	429	776	696	351	815	351	1317	428	283	557	2062	884	1292	882	2636	866	494	966	4702	1185	156	1261	249	14006	92000
1998	504	867	805	439	1552	418	2989	518	833	630	2902	969	2189	961	4535	952	1530	1065	6685	1280	416	1352	424	24056	146000
1999	563	914	850	500	2165	491	4791	572	1411	681	3830	1014	2748	1013	6021	1014	2713	1111	7727	1316	515	1404	546	32467	221000
2000	445	802	738	386	1088	359	1515	448	374	572	2190	894	1385	899	3019	891	721	1002	5389	1218	246	1288	297	16224	105290

Tableau 3 : cotes maximales annuelles de plan d'eau aux stations du lit mineur (Hmax (cm échelle)) et dans les cuvettes (Hm (cm NG)), et superficies inondées maximales annuelles (ha) Sm dans chacune des 10 cuvettes, Smc dans l'ensemble des 10 cuvettes et Smv sur tout le lit majeur entre Matam et Dagana (noir gras : valeurs observées (Hm, Hmax) ou mesurées de façon indirecte (Smv) ; bleu : cotes reconstituées sur lit mineur ; rouge : cotes reconstituées dans les cuvettes à partir des cotes dans le lit mineur, par modèle de propagation (tab.1 et fig. 1) ; vert : superficies Sm calculées à partir des cotes Hm par les relations H-S de chaque cuvette (fig. 2) ; violet : superficie Smv calculée à partir de Smc par la relation Smv(Smc) (fig. 3) ; surlignage gris : différence par rapport aux valeurs du tableau 7 bis de POGR(2001-B), comprise entre 1 et 10 cm pour les cotes et entre 3% et 10% pour les superficies ; surlignage jaune : différence par rapport aux valeurs du tableau 7 bis de POGR(2001-B), supérieure à 10 cm pour les cotes et à 10% pour les superficies)

année	valeurs observées (statistiques agricoles)			valeurs observées et reconstituées			SCv=f(Smv)
	SCd	SCg	SCv	SCd	SCg	SCv	
1946		62400		40880	62400	103280	101826
1947		65000		37543	65000	102543	95511
1948				34880	57301	92181	90699
1949				31940	53887	85827	85572
1950		74100		52240	74100	126340	131505
1951		69100		45499	69100	114599	111346
1952		59200		43372	59200	102572	106822
1953		54100		35286	54100	89386	91422
1954		80900		51073	80900	131973	125814
1955		62600		50369	62600	112969	123534
1956		86700		51712	86700	138412	128284
1957	49450	75550	125000	49450	75550	125000	121224
1958				51848	76433	128281	128914
1959				48329	68592	116921	117958
1960				33880	56188	90068	88936
1961		50000		51334	73813	125147	126757
1962				43498	64950	108448	107081
1963		58900		33907	58900	92807	88982
1964		69000		51908	69000	120908	129211
1965		79000		52243	79000	131243	131543
1966		69600		47865	69600	117465	116808
1967		85600		51573	85600	137173	127692
1968		50500		21125	50500	71625	63233
1969		55300		41381	55300	96681	102810
1970	40900	62200	103100	40900	62200	103100	90825
1971				40432	62597	103029	100957
1972	3000	10700	13700	3000	10700	13700	23208
1973	26300	55900	82200	26300	55900	82200	65298
1974		60109		44829	60109	104938	109890
1975			30000	31572	53430	85001	84942
1976	10500	18900	29400	10500	18900	29400	39627
1977	3700	11700	15400	3700	11700	15400	37236
1978	18300	38600	56900	18300	38600	56900	51806
1979			14000	10563	17329	14000	26931
1980		30035	30000	20365	30035	50400	60401
1981		34306	66000	19852	34306	66000	58511
1982		16066		13037	16066	29103	34903
1983		5810	17000	4374	5810	17000	8133
1984		0	16000	3484	0	16000	5550
1985	24500	21040	45540	24500	21040	45540	43144
1986	38700	76949	115649	17685	31622	49307	50717
1987	24080			6570	8504	15074	14631
1988	24088	32387	56475	24088	52369	76457	83524
1989	22217	37507	59724	22217	37507	59724	49876
1990	7365			7365	2960	10325	7569
1991	14337	9090	23427	14337	9090	23427	36117
1992	11612			11612	21590	33202	33439
1993	15595	44200	59795	15595	44200	59795	40186
1994	24720	41264	65984	24720	41264	65984	83117
1995	34405			34405	55448	89853	87816
1996	15940	31374	47314	15940	31374	47314	34558
1997			37872	19776	35440	37872	58233
1998				30274	51765	82039	82741
1999	27857	58585	86442	41132	58585	99717	102319
2000				22563	40249	62812	68705

Tableau 4 : Superficie annuelle de cultures de décrue (ha) pratiquées entre Matam et Dagana sur la rive gauche (SCg), la rive droite(SCd) et les deux rives du fleuve (SCv). En noir : valeurs observées tirées des statistiques agricoles compilées par le POGR ; en rouge : valeur SCd reconstituée à partir de la superficie inondée Smv ; en bleu : valeurs SCg reconstituées à partir de Smv; en vert ; valeurs SCv reconstituées en sommant SCd et SCv ; en violet : valeurs SCv entièrement reconstituées à partir de Smv par la relation moyenne SCv(Smv) décrite sur la figure 5 ; en grisé : statistiques agricoles non conservées

année	durée N (jours)											
	6	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1946	1056	1040	1022	1004	981	964	950	938	927	918	910	902
1947	1066	1055	1037	1012	984	960	941	926	911	896	881	865
1948	967	959	950	935	914	894	878	863	846	826	806	787
1949	993	980	951	922	890	864	844	825	803	782	762	742
1950	1257	1250	1240	1227	1214	1204	1195	1180	1166	1151	1135	1118
1951	1144	1123	1076	1039	1010	988	971	954	939	927	914	902
1952	1120	1108	1076	1044	1019	995	976	957	939	920	899	879
1953	1038	1017	986	955	924	897	874	854	836	817	801	786
1954	1225	1219	1213	1195	1167	1140	1119	1099	1082	1067	1053	1041
1955	1127	1116	1107	1098	1089	1082	1074	1068	1062	1056	1050	1043
1956	1190	1186	1183	1179	1170	1147	1121	1099	1079	1060	1041	1024
1957	1174	1165	1134	1111	1093	1079	1066	1055	1046	1036	1026	1017
1958	1276	1256	1225	1196	1162	1135	1114	1095	1076	1059	1045	1031
1959	1159	1142	1128	1119	1105	1083	1064	1046	1021	992	965	939
1960	931	901	880	867	855	844	835	827	818	808	797	785
1961	1245	1237	1219	1194	1166	1138	1113	1090	1071	1054	1038	1019
1962	1062	1056	1043	1033	1024	1016	1002	980	960	940	920	901
1963	988	960	938	918	903	890	879	868	858	849	840	830
1964	1244	1229	1216	1203	1190	1176	1154	1127	1096	1065	1036	1008
1965	1242	1227	1210	1195	1181	1169	1157	1146	1134	1115	1093	1074
1966	1161	1148	1131	1110	1090	1070	1049	1028	1007	987	970	952
1967	1183	1177	1165	1155	1148	1138	1124	1108	1094	1078	1063	1046
1968	858	834	788	753	723	697	677	660	646	634	624	614
1969	1005	995	981	966	953	939	923	909	896	884	873	862
1970	941	924	909	896	883	872	863	855	848	839	830	815
1971	1056	1037	998	971	952	936	924	913	901	888	874	856
1972	585	569	558	551	544	538	530	522	513	504	495	488
1973	809	782	760	742	726	711	698	686	675	665	653	640
1974	1179	1160	1117	1077	1038	1003	974	944	917	892	868	846
1975	1002	980	934	894	868	847	827	808	789	769	751	736
1976	674	659	636	621	610	601	592	584	577	570	563	557
1977	678	659	646	634	624	614	602	589	575	561	547	534
1978	759	742	724	705	687	673	663	653	645	637	631	625
1979	610	596	580	566	553	541	530	521	512	503	494	486
1980	824	797	761	732	709	691	675	661	647	633	620	605
1981	728	710	697	684	671	662	654	647	640	635	628	618
1982	679	669	653	627	608	593	579	565	552	539	526	513
1983	482	473	460	448	438	431	425	420	416	413	409	404
1984	427	424	420	417	414	412	409	407	404	402	399	396
1985	692	675	658	643	632	624	617	608	598	587	577	567
1986	750	732	704	679	658	639	624	608	593	577	561	547
1987	502	494	484	475	465	457	450	442	435	428	422	416
1988	944	923	891	853	820	793	763	731	704	680	657	636
1989	796	779	758	738	715	695	676	659	641	623	607	592
1990	436	432	428	425	420	415	409	404	399	394	390	386
1991	737	710	688	668	651	634	616	598	582	568	556	546
1992	706	702	695	684	649	605	572	545	522	504	487	472
1993	753	717	691	668	633	600	573	550	530	514	499	487
1994	909	905	893	880	861	838	819	802	787	772	755	740
1995	956	948	938	915	892	872	854	834	815	797	775	756
1996	780	731	699	669	644	621	598	574	553	535	519	506
1997	804	784	761	741	721	698	678	659	640	622	605	589
1998	971	947	921	901	883	854	825	798	770	742	715	691
1999	1080	1056	1029	1006	983	964	946	930	916	900	884	869
2000	882	864	838	803	768	737	709	686	664	644	627	611

Tableau 5 : moyenne Hb(N) des N plus fortes cotes moyennes journalières de l'année à l'échelle de Bakel, pour différentes valeurs de N et pour chaque année de la période 1946-2000

SCv	40000			45000			50000			55000			60000			65000			70000			75000			80000		
N	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0	Hb	Hp	H0
1	709	709	0	740	740	0	769	769	0	798	798	0	826	826	0	853	853	0	880	880	0	907	907	0	933	933	0
2	709	709	142	740	740	148	769	769	154	798	798	159	826	826	165	853	853	171	880	880	177	907	907	183	933	933	190
3	709	709	285	740	740	296	769	769	307	798	798	318	826	826	330	853	853	342	880	880	354	907	907	367	933	933	380
4	709	709	427	740	740	444	769	769	461	798	798	478	826	826	495	853	853	513	880	880	531	907	907	550	933	933	570
5	709	709	570	740	740	592	769	769	614	798	798	637	826	826	660	853	853	683	880	880	708	907	907	734	933	933	760
6	709	709	625	740	740	651	769	769	677	798	798	703	826	826	729	853	853	754	880	880	781	907	907	808	933	933	835
7	703	673	709	734	703	740	764	732	769	793	760	798	821	789	826	848	816	853	875	844	880	902	872	907	928	900	933
8	698	664	709	729	693	740	759	722	769	788	750	798	815	778	826	843	806	853	870	833	880	897	861	907	924	889	933
9	694	656	709	724	684	740	754	713	769	782	740	798	810	768	826	838	795	853	865	823	880	892	850	907	919	878	933
10	689	648	709	719	676	740	749	703	769	777	731	798	805	758	826	832	785	853	859	812	880	886	840	907	913	868	933
11	685	640	709	715	667	740	744	694	769	772	721	798	800	748	826	827	775	853	854	801	880	881	829	907	908	857	933
12	680	632	709	710	659	740	739	686	769	767	712	798	795	738	826	822	764	853	849	791	880	876	818	907	903	846	933
13	676	625	673	706	651	703	734	677	732	762	703	760	789	729	789	817	754	816	844	781	844	871	808	872	898	835	900
14	672	618	664	701	643	693	729	669	722	757	694	750	784	719	778	811	745	806	838	771	833	865	797	861	893	825	889
15	668	611	656	697	636	684	725	660	713	752	685	740	780	710	768	808	735	795	833	761	823	860	787	850	887	815	878
16	664	604	648	692	628	676	720	652	703	748	677	731	775	701	758	801	726	785	828	751	812	855	778	840	882	805	868
17	660	597	640	688	621	667	716	644	694	743	668	721	770	692	748	796	717	775	823	742	801	850	768	829	877	795	857
18	656	590	632	684	613	659	711	637	686	738	660	712	765	684	738	791	708	764	818	733	791	845	759	818	872	786	846
19	652	583	618	680	606	643	707	629	669	734	652	694	760	676	719	787	700	745	813	724	771	840	750	797	867	777	825
20	648	576	611	676	599	636	703	621	660	729	644	685	756	668	710	782	691	735	808	716	761	835	742	787	862	769	815
21	645	570	604	672	592	628	699	614	652	725	637	677	751	660	701	777	683	726	803	708	751	830	734	778	857	760	805
22	641	563	597	668	585	621	694	607	644	721	629	668	747	652	692	773	676	717	799	700	742	825	726	768	853	753	795
23	637	556	590	664	578	613	690	600	637	716	622	660	742	645	684	768	668	708	794	693	733	821	718	759	848	745	786
24	634	550	583	660	571	606	686	593	629	712	615	652	738	638	676	764	661	700	790	686	724	816	711	750	843	738	777
25	630	543	576	656	564	599	682	586	621	708	608	644	734	631	668	759	654	691	785	679	716	812	705	742	839	732	769
26	626	537	563	652	558	585	678	579	607	704	601	629	729	624	652	755	647	676	781	672	700	807	698	726	834	725	753
27	623	530	556	649	551	578	674	572	600	700	594	622	725	617	645	751	641	668	777	666	693	803	692	718	830	719	745
28	619	524	550	645	545	571	670	566	593	696	588	615	721	611	638	747	635	661	772	660	686	799	686	711	826	713	738
29	616	518	543	641	538	564	667	560	586	692	582	608	717	605	631	743	629	654	768	654	679	795	680	705	822	708	732
30	612	512	498	638	532	517	663	553	537	688	575	557	713	599	578	739	623	600	764	648	622	791	675	646	818	702	671
31	609	506	453	634	526	470	659	547	488	684	570	506	709	593	525	735	617	545	760	642	566	787	669	587	814	697	610
32	606	501	407	631	521	423	655	542	439	680	564	456	705	587	473	731	611	491	757	637	509	783	664	528	810	692	549
33	602	495	362	627	515	376	652	536	390	677	558	405	702	581	420	727	606	436	753	632	453	779	659	470	807	687	488
34	599	490	317	624	510	329	648	530	342	673	553	355	698	576	368	723	601	382	749	627	396	776	654	411	803	682	427
35	596	485	272	620	504	282	645	525	293	669	547	304	694	571	315	720	595	327	745	621	339	772	649	352	799	677	366
36	592	480	226	617	499	235	641	520	244	666	542	253	691	566	263	716	590	273	742	616	283	768	644	294	796	672	305
37	589	475	181	614	494	188	638	515	195	662	537	203	687	561	210	712	585	218	738	611	226	765	639	235	792	667	244
38	586	471	136	610	490	141	635	510	146	659	532	152	684	556	158	709	580	164	735	606	170	761	634	176	789	662	183
39	583	466	91	607	485	94	631	506	98	656	528	101	680	551	105	706	575	109	731	601	113	758	629	117	785	657	122
40	580	462	45	604	481	47	628	501	49	652	523	51	677	546	53	702	571	55	728	596	57	755	624	59	782	652	61
41	577	459	0	601	477	0	625	497	0	649	518	0	674	541	0	699	566	0	725	591	0	751	618	0	779	647	0

Tableau 6 : cotes caractéristiques de crue (Hp(N) : plus forte cote moyenne journalière de rang N ; Hb(N) : moyenne des cotes Hp de rang 1 à N) associées aux superficies SCv de cultures de décrue exprimées en hectare, et cotes H0 classées en ordre chronologique définissant les objectifs de limnigramme de crue correspondants. Toutes les cotes sont exprimées en cm et relatives à l'échelle de la station de Bakel

SCv (ha)		40000		45000		50000		55000		60000		65000		70000		75000		80000	
N	date	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0	Q	Q0
1	22-août	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	23-août	106	336	113	365	121	394	129	424	137	456	145	489	154	523	164	559	174	596
3	24-août	347	672	370	729	394	788	419	848	446	911	473	977	503	1046	534	1118	568	1193
4	25-août	721	1008	789	1093	862	1181	940	1273	1024	1367	1113	1466	1210	1569	1314	1676	1427	1789
5	26-août	1344	1344	1458	1458	1575	1575	1697	1697	1823	1823	1954	1954	2091	2091	2235	2235	2385	2385
6	27-août	1582	1646	1718	1781	1853	1916	1989	2050	2124	2183	2261	2317	2398	2456	2536	2604	2675	2760
7	28-août	1948	1948	2105	2105	2257	2257	2403	2403	2544	2544	2680	2680	2821	2821	2973	2973	3135	3135
8	29-août	1870	1925	2015	2079	2156	2228	2293	2372	2428	2512	2560	2647	2700	2788	2852	2940	3018	3104
9	30-août	1870	1903	2015	2053	2156	2199	2293	2341	2428	2479	2560	2614	2700	2755	2852	2907	3018	3072
10	31-août	1870	1880	2015	2028	2156	2171	2293	2310	2428	2447	2560	2581	2700	2721	2852	2874	3018	3041
11	01-sept	1870	1858	2015	2002	2156	2142	2293	2279	2428	2414	2560	2547	2700	2688	2852	2841	3018	3009
12	02-sept	1836	1836	1976	1976	2113	2113	2248	2248	2382	2382	2514	2514	2655	2655	2809	2809	2978	2978
13	03-sept	1668	1668	1799	1799	1929	1929	2059	2059	2191	2191	2323	2323	2458	2458	2599	2599	2757	2757
14	04-sept	1652	1634	1783	1762	1913	1889	2043	2017	2173	2146	2304	2276	2437	2409	2573	2548	2724	2704
15	05-sept	1616	1600	1744	1725	1871	1849	1998	1975	2125	2101	2254	2229	2385	2360	2519	2498	2664	2651
16	06-sept	1581	1566	1705	1688	1829	1810	1953	1932	2078	2056	2205	2183	2334	2312	2467	2447	2605	2598
17	07-sept	1547	1532	1668	1651	1789	1770	1910	1890	2032	2012	2157	2136	2284	2263	2415	2397	2550	2545
18	08-sept	1509	1498	1626	1613	1742	1730	1859	1847	1978	1967	2099	2089	2223	2214	2351	2346	2484	2492
19	09-sept	1446	1463	1556	1576	1667	1690	1778	1805	1892	1922	2008	2042	2128	2166	2252	2295	2383	2439
20	10-sept	1421	1429	1529	1539	1637	1650	1747	1763	1860	1878	1975	1995	2094	2117	2218	2245	2347	2386
21	11-sept	1391	1395	1496	1502	1602	1610	1709	1720	1819	1833	1932	1949	2050	2068	2172	2194	2301	2332
22	12-sept	1361	1361	1463	1465	1567	1570	1672	1678	1780	1788	1892	1902	2007	2019	2128	2144	2256	2279
23	13-sept	1332	1327	1432	1428	1533	1530	1636	1635	1742	1743	1852	1855	1966	1971	2086	2093	2213	2226
24	14-sept	1303	1293	1400	1391	1499	1491	1601	1593	1705	1699	1814	1808	1927	1922	2046	2042	2172	2173
25	15-sept	1271	1259	1366	1354	1462	1451	1561	1551	1663	1654	1770	1761	1881	1873	1999	1992	2124	2120
26	16-sept	1215	1224	1306	1316	1399	1411	1495	1508	1595	1609	1700	1714	1810	1825	1927	1941	2051	2067
27	17-sept	1191	1190	1281	1279	1373	1371	1469	1466	1569	1565	1674	1668	1785	1776	1902	1891	2027	2014
28	18-sept	1164	1156	1252	1242	1343	1331	1438	1423	1538	1520	1642	1621	1753	1727	1870	1840	1995	1961
29	19-sept	1122	1122	1205	1205	1291	1291	1381	1381	1475	1475	1574	1574	1679	1679	1789	1789	1907	1907
30	20-sept	938	1029	1007	1105	1080	1184	1155	1266	1234	1352	1316	1443	1403	1539	1495	1640	1593	1749
31	21-sept	778	935	838	1004	900	1076	966	1151	1034	1229	1106	1312	1182	1399	1263	1491	1348	1590
32	22-sept	637	842	683	904	733	968	788	1036	845	1106	907	1181	972	1259	1041	1342	1115	1431
33	23-sept	523	748	558	803	594	861	631	921	674	983	722	1049	775	1119	832	1193	894	1272
34	24-sept	416	655	444	703	473	753	504	806	537	861	572	918	608	979	646	1044	692	1113
35	25-sept	320	561	341	603	364	646	387	691	413	738	439	787	468	839	499	895	532	954
36	26-sept	234	468	250	502	266	538	284	576	302	615	322	656	343	699	365	746	390	795
37	27-sept	160	374	171	402	182	431	194	460	207	492	220	525	234	560	250	597	266	636
38	28-sept	98	281	105	301	111	323	119	345	126	369	135	394	143	420	153	447	163	477
39	29-sept	49	187	52	201	56	215	59	230	63	246	67	262	72	280	77	298	82	318
40	30-sept	15	94	16	101	17	108	18	115	19	123	21	131	22	140	24	149	25	159
41	01-oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
volume (hm3)		3743	3996	4032	4306	4322	4617	4615	4932	4913	5252	5217	5579	5534	5919	5869	6279	6227	6671

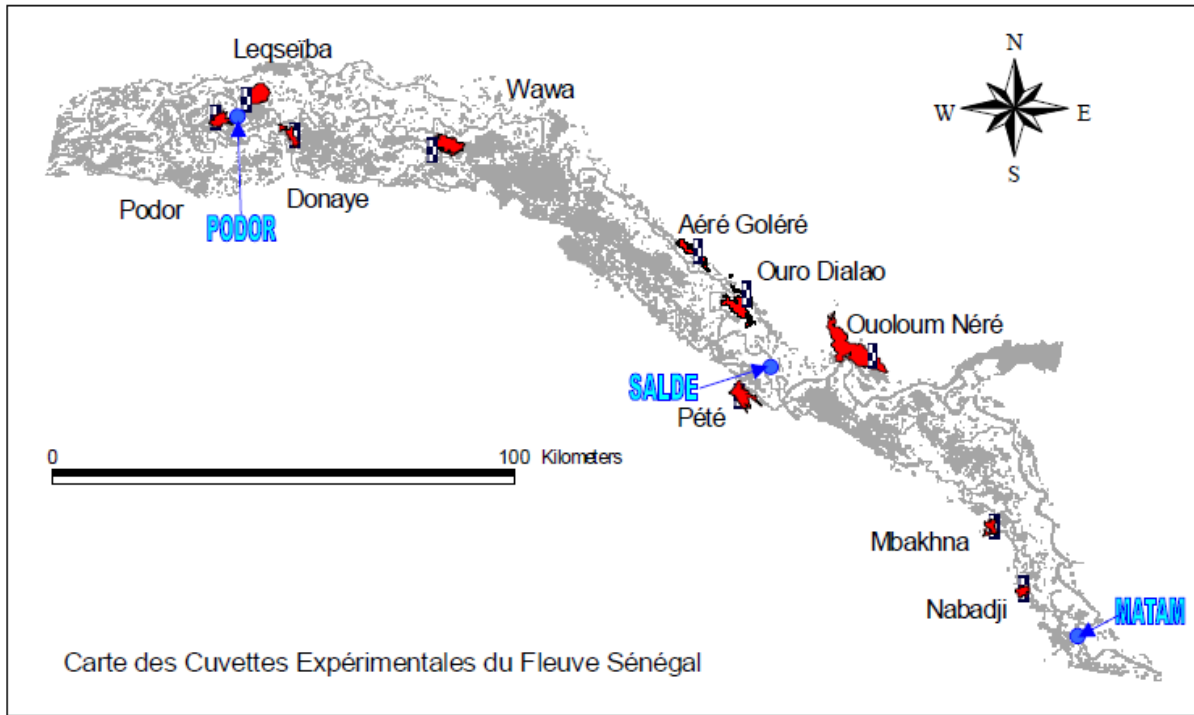
Tableau 7 : hydrogrammes objectifs de crue associés à différentes superficies de cultures de décrue (Q : débit obtenu par traduction des cotes des limnigrammes objectifs de crue; Q0 : hydrogrammes simplifiés, avec débits interpolés entre les points pivots signalés en gras)

Q1n	0	10	15	19	34	45	56	66	84	112	139	162	276	435	618
Q2n	0	10	15	19	34	46	58	69	87	118	147	172	303	491	707
D	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.4	3.0	2.6	2.0	2.0	2.0	1.7	1.5	1.5
Et	24	25	25	25	26	26	29	32	37	44	50	53	62	80	99
Q1n	780	934	1083	1223	1368	1521	1696	1856	2108	2384	2797	3014	3205	3516	
Q2n	900	1082	1258	1425	1596	1777	1985	2175	2472	2799	3292	3559	3801	4208	
D	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.5	
Et	115	129	163	195	222	233	244	245	247	253	218	206	195	177	

Tableau 8 : calage du modèle de propagation amont donnant le débit naturel Q2n (m³/s) du Sénégal à Kayes, son erreur type Et (m³/s) et le temps de propagation D (jour) en fonction de la somme Q1n (m³/s) des débits naturels du Bafing à Manantali et du Bakoye à Oualia

Q1n	0	42	48	89	177	369	617	813	1026	1212	1609	2038
Q2n	0	41	47	90	182	386	649	860	1090	1292	1725	2195
D	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
Et	21	27	28	33	45	59	87	98	119	150	171	241
Q1n	2464	2829	3205	3673	4032	4436	4867	5205	5637	6381	7500	9000
Q2n	2667	3074	3495	4025	4434	4896	5394	5787	6293	7172	8516	10356
D	1.1	1.1	1.2	1.6	2.1	2.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Et	278	294	340	478	554	579	605	633	670	685	709	741

Tableau 9 : calage du modèle de propagation aval donnant le débit naturel Q2n (m³/s) du Sénégal à Bakel, son erreur type Et (m³/s) et le temps de propagation D (jour) en fonction de la somme Q1n (m³/s) des débits naturels du Sénégal à Kayes et de la Falémé à Gourbassy



Carte n° 1 : position des stations hydrométriques sur le lit mineur et le lit majeur du fleuve. Source : POGR

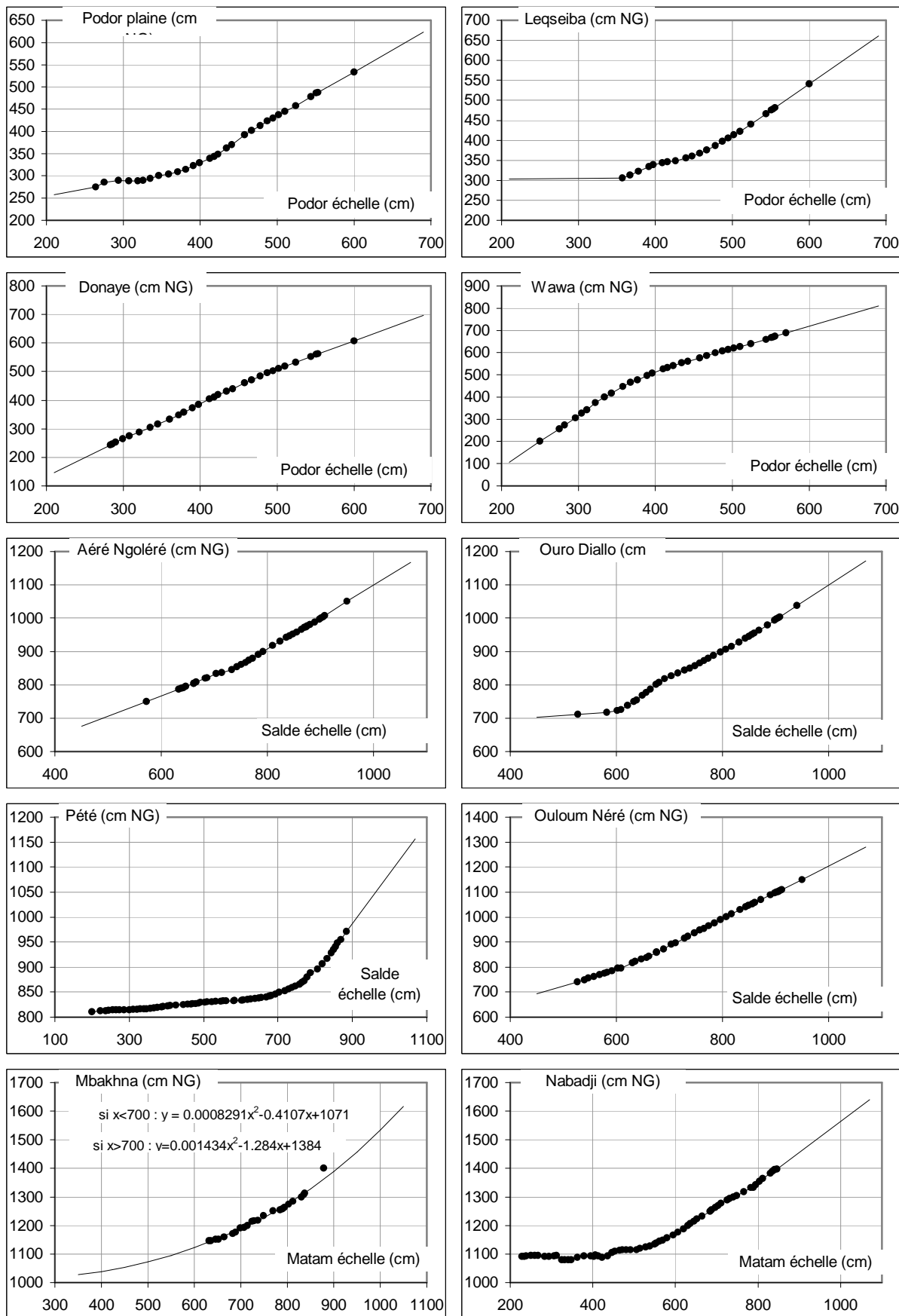


Figure 1 : calage du modèle de propagation de Lamagat (période 1997-1999) entre la cote du fleuve aux échelles du lit mineur et la cote NG dans les cuvettes du lit majeur (points : résultats du calage ; lignes : relations utilisées dans l'application du modèle)

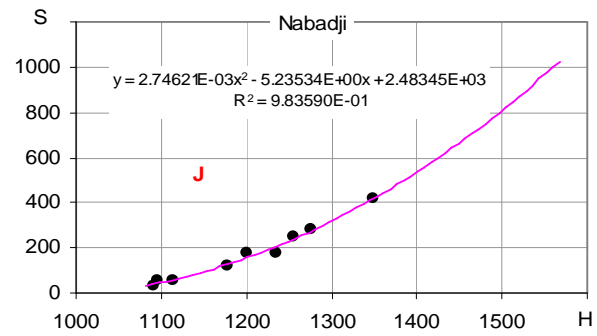
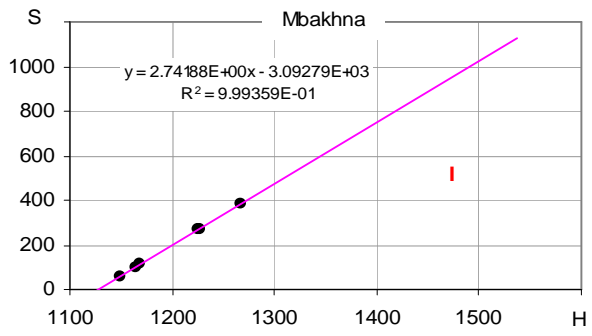
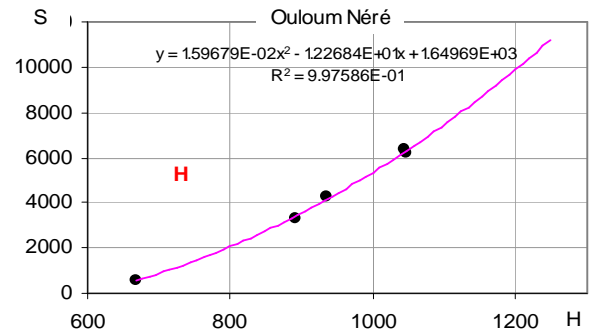
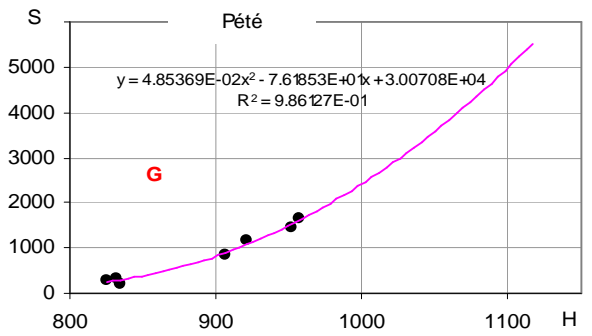
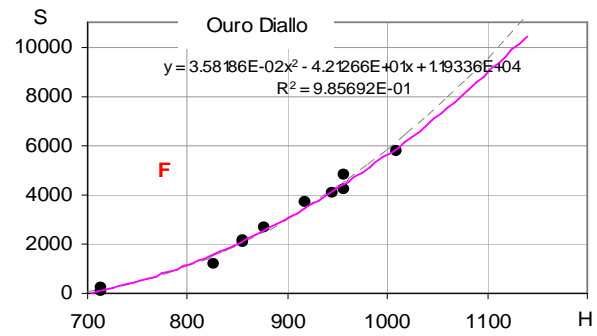
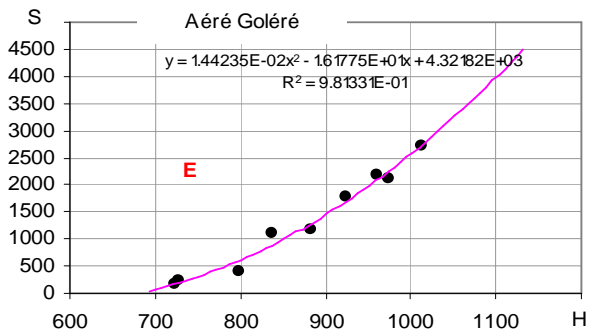
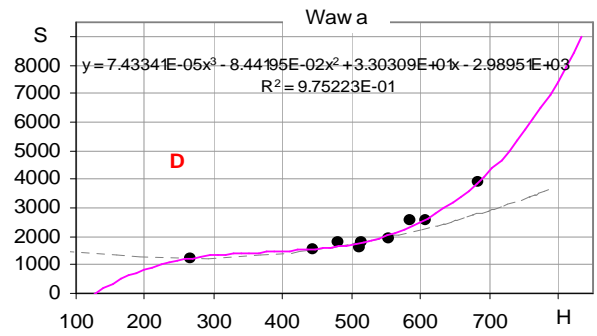
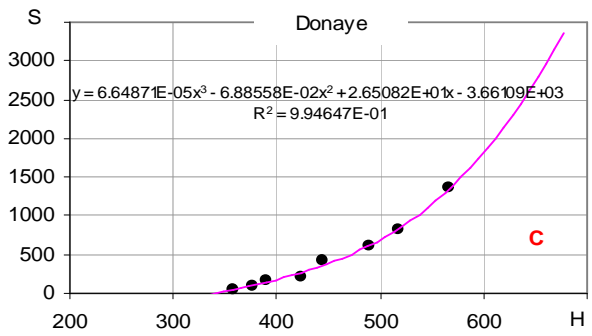
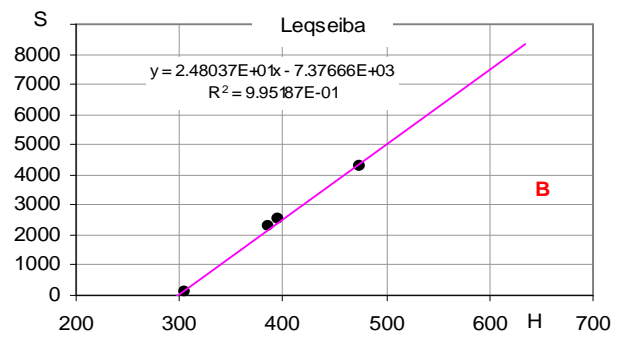
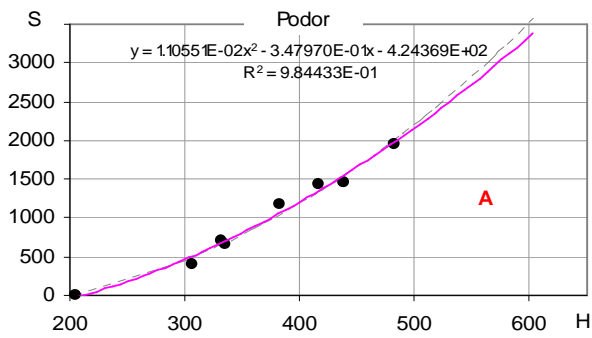


Figure 2 : relation entre le niveau de plan d'eau H (cm NG) et la superficie inondée S (ha) pour chaque cuvette (points : observé ; lignes rouges : relations établies ; lignes pointillées : relations différentes utilisées dans le tab. 7 bis de POGR(2001-B))

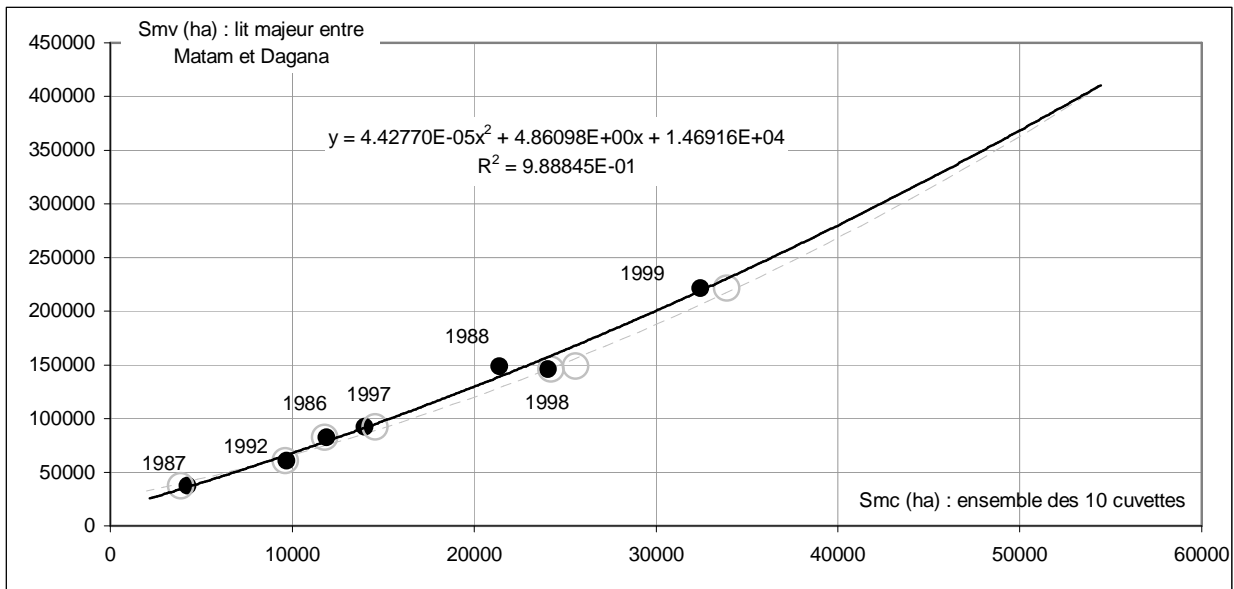


Figure 3 : relation moyenne entre les valeurs maximales annuelles de superficie inondée sur l'ensemble des 10 cuvettes (Svc) et sur l'ensemble du lit mineur entre Matam et Dagana (Smv), établie sur les années 1986 à 1988, 1992 et 1997 à 1999 (grisé : valeurs et relation tirées du tableau 5 de POGR(2001-B)).

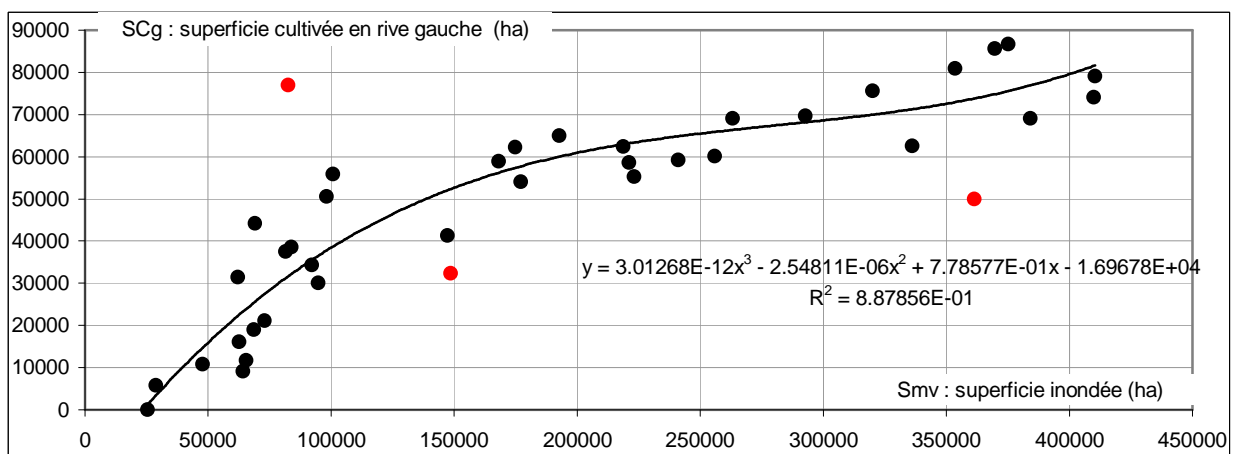
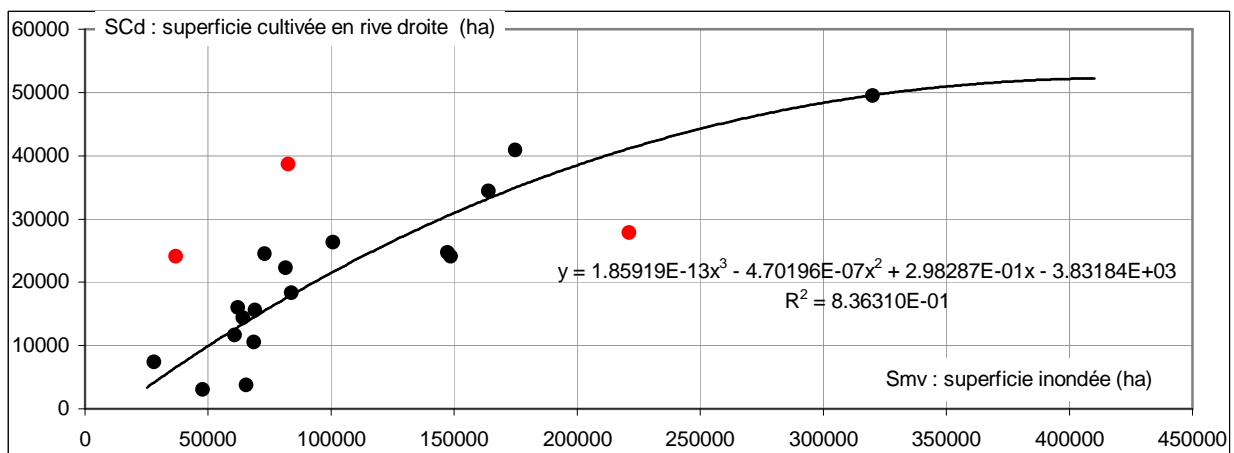


Figure 4 : relation entre superficie inondée maximale annuelle Svc et superficie des cultures de décrue sur les rives droite (SCd) et gauche (SCg) du fleuve entre Matam et Dagana sur la période 1946-2000. En rouge : points non conservés.

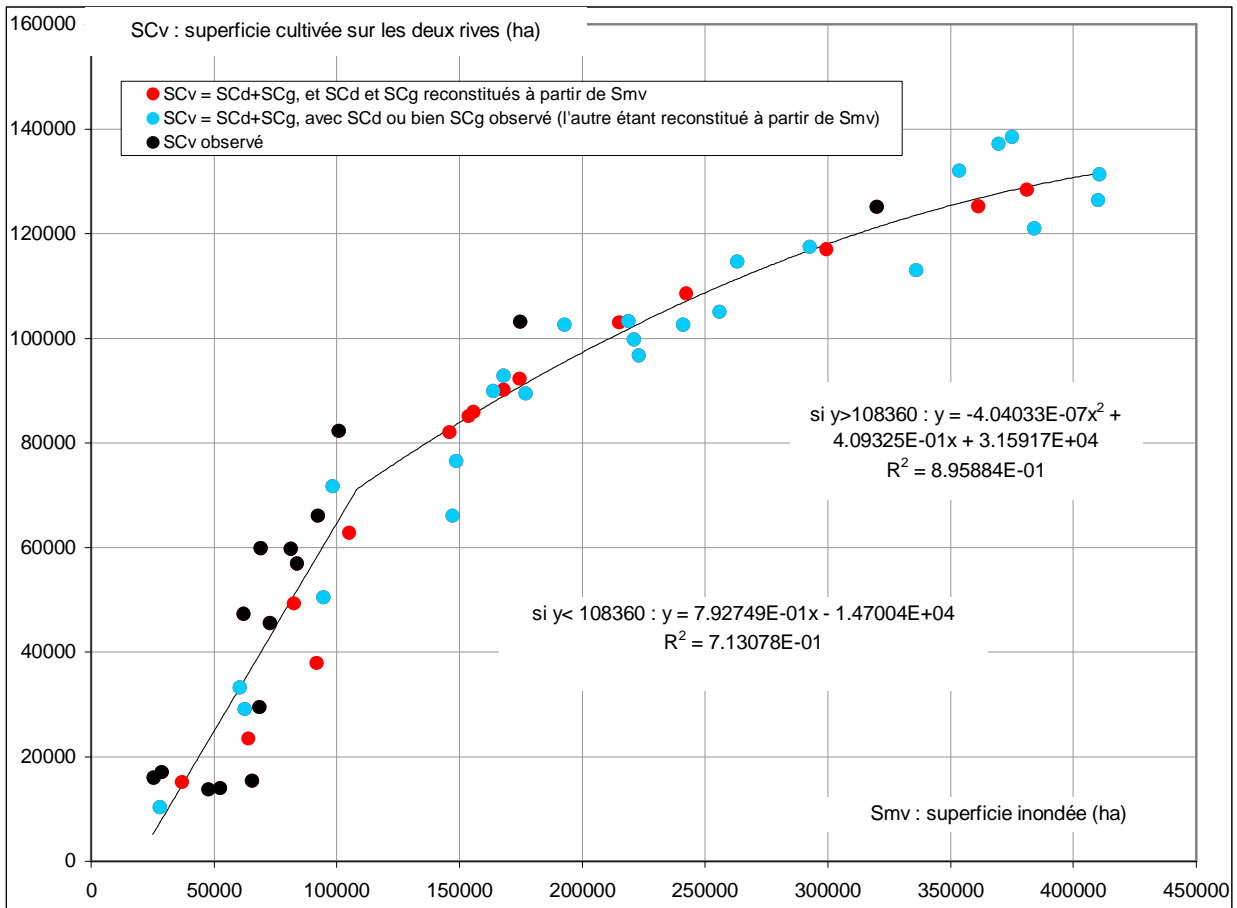


Figure 5 : relation entre superficie inondée maximale annuelle Smv et superficie SCv des cultures de décrue sur les deux rives du fleuve entre Matam et Dagana, sur la période 1946-2000

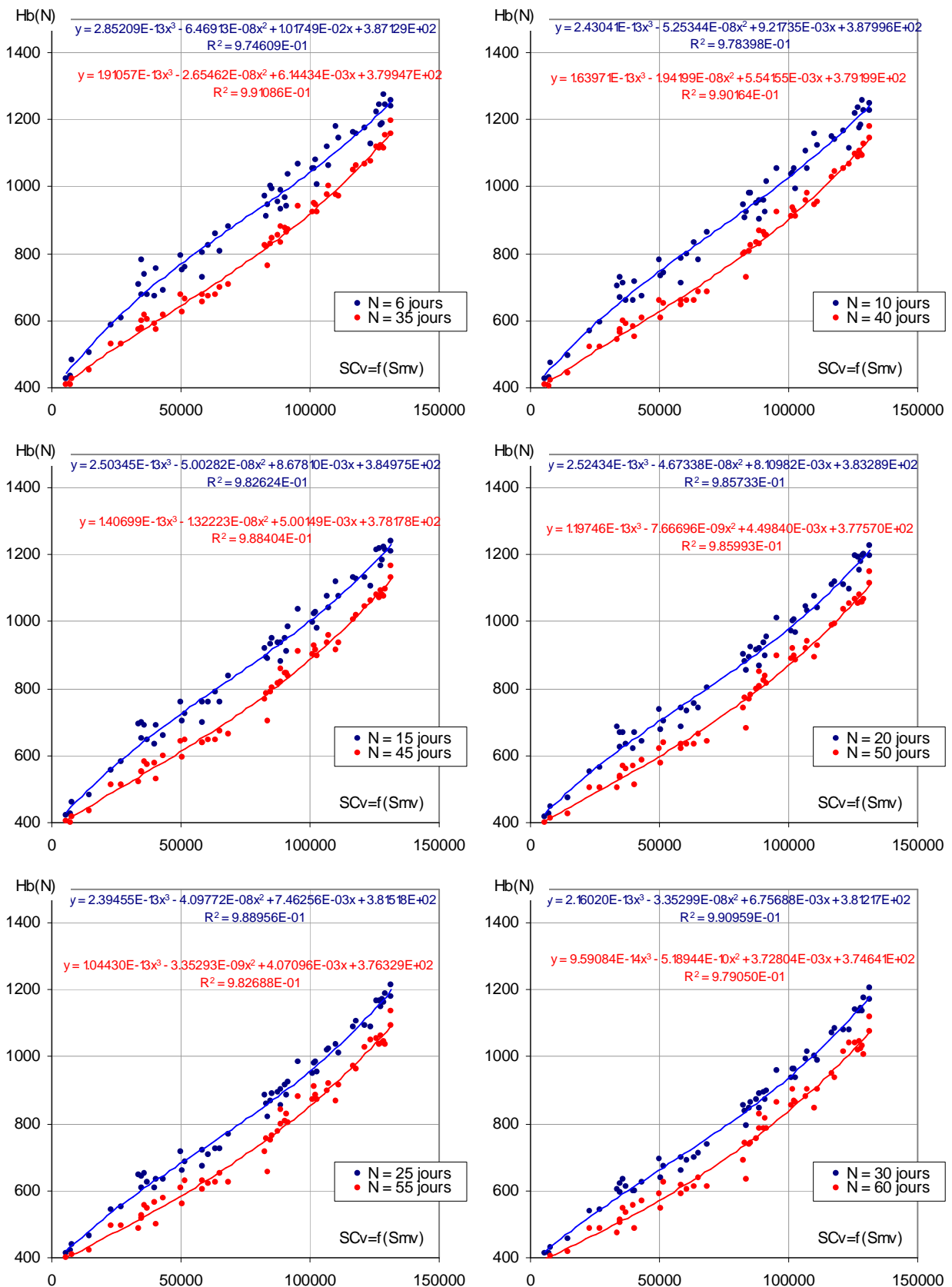


Figure 6 : relation entre la superficie de cultures de décrue SCv (évaluée en fonction de la superficie inondée Smv) exprimée en hectares, et la moyenne $Hb(N)$ des N plus fortes cotes moyennes journalières de l'année relevées à l'échelle de Bakel, sur la période 1946-2000

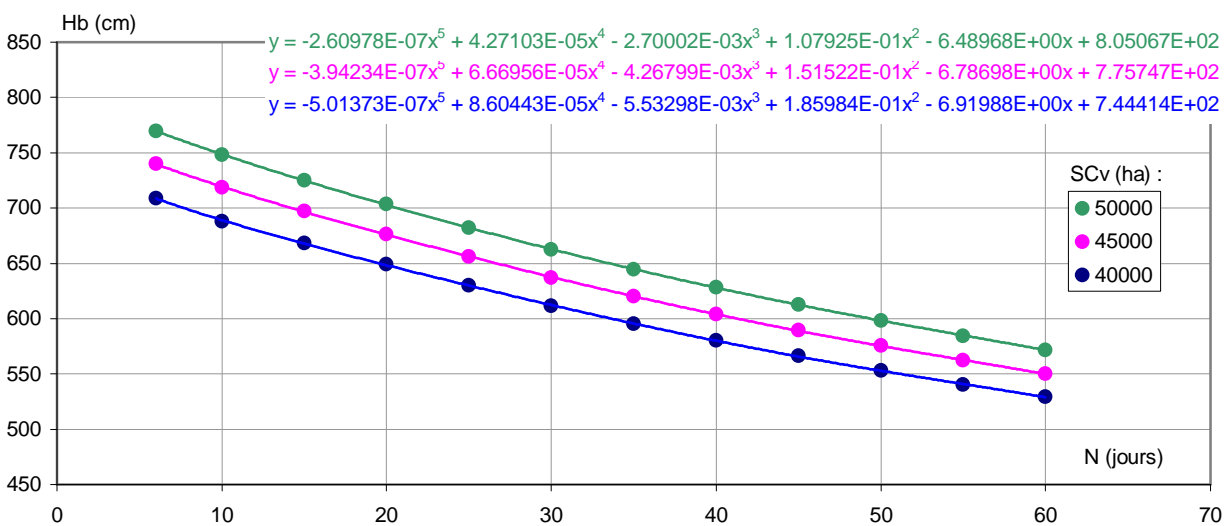
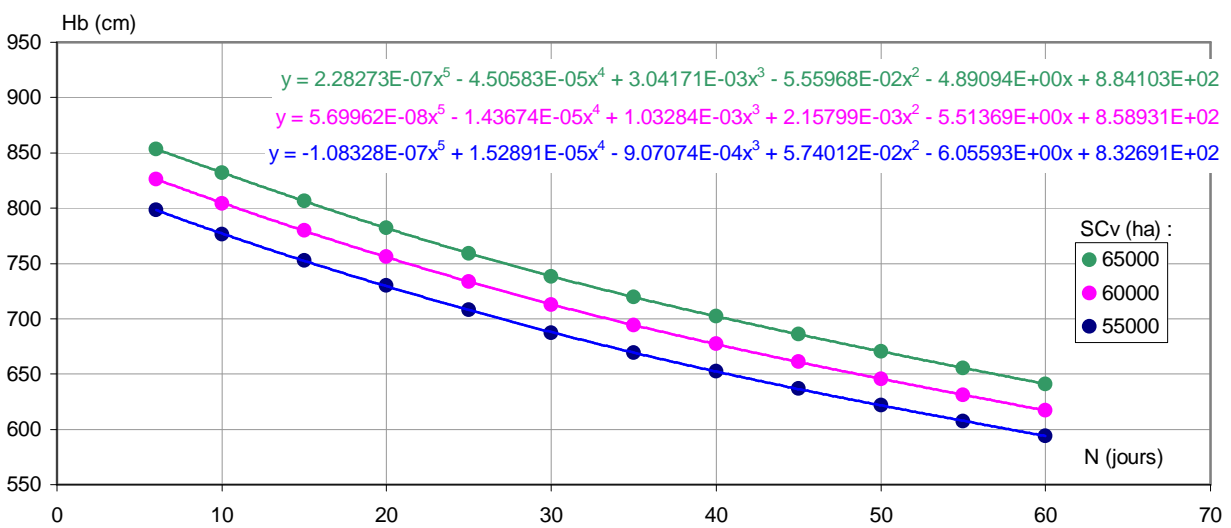
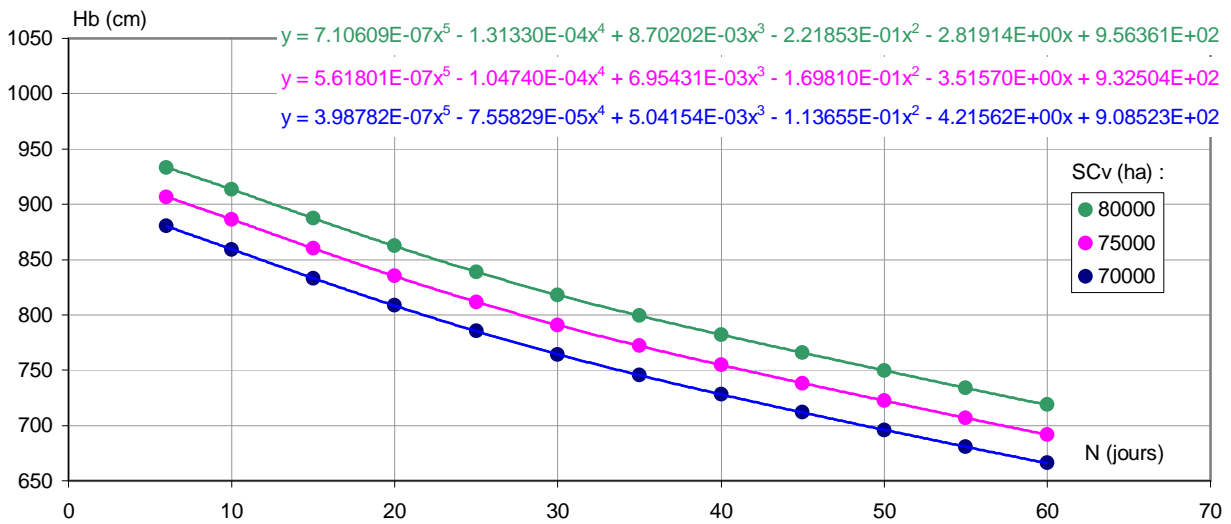


Figure 7 : moyenne Hb des N plus fortes cotes de l'année observées à l'échelle de Bakel en fonction de la durée N, pour différentes valeurs de superficie SCv de cultures de décrue entre Matam et Dagana

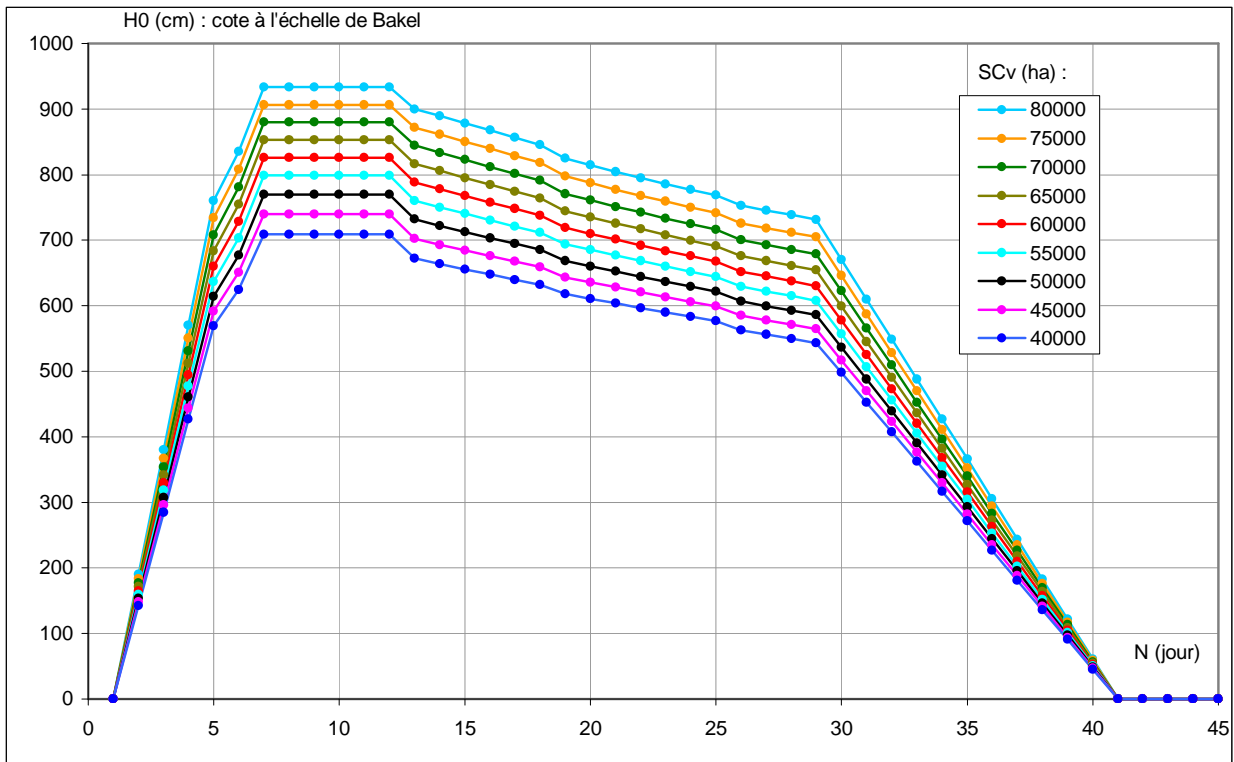


Figure 8 : limnigrammes objectifs de crue définis à l'échelle du fleuve Sénégal à Bakel, associés à différentes superficies moyennes de cultures de décrue SCv comprises entre 40000 et 80000 ha

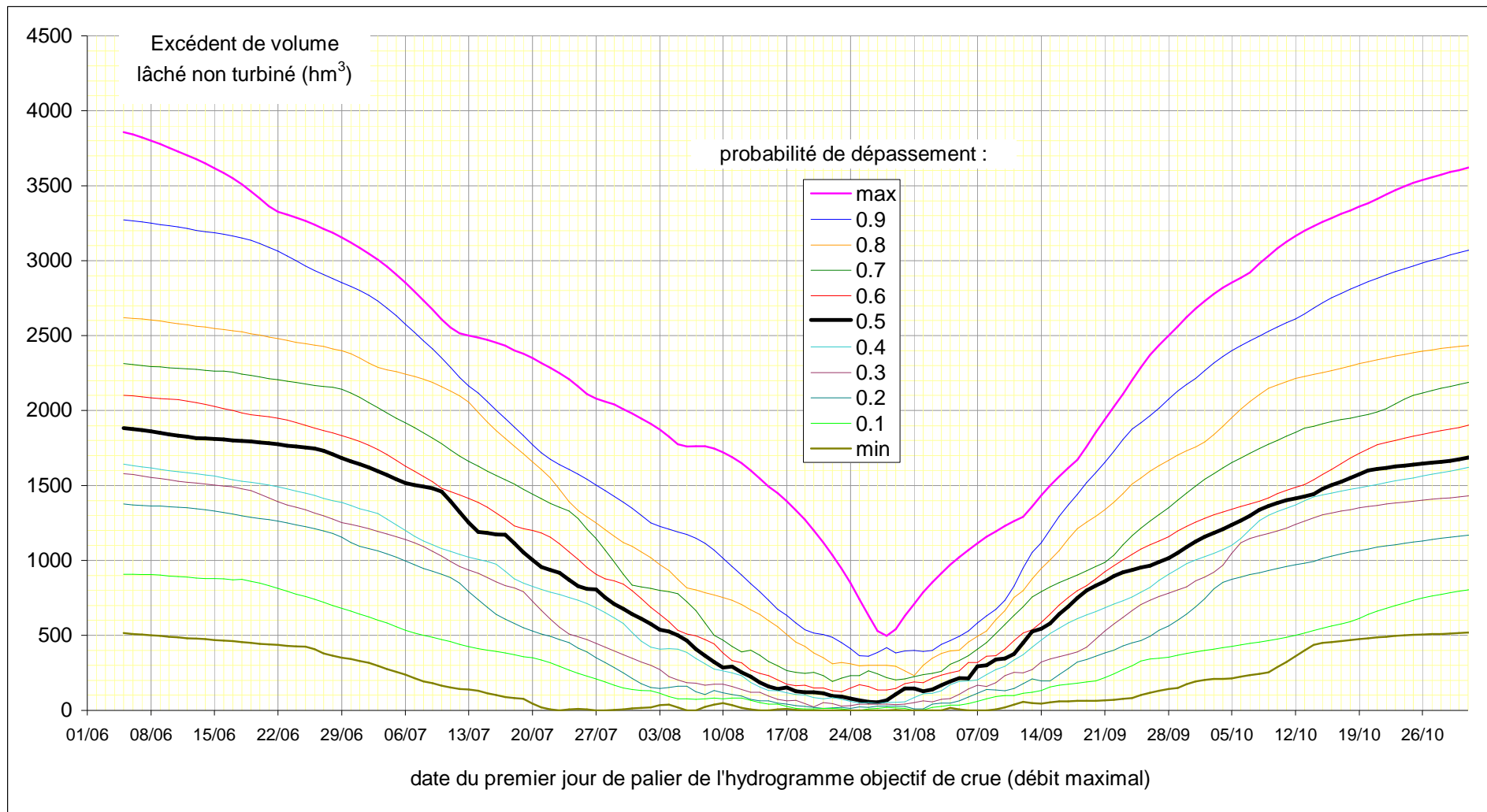


Figure 9 : Excédent de volume lâché non turbiné (par rapport à sa valeur minimale de l'année obtenue par positionnement optimal de l'hydrogramme objectif), en fonction de la date du premier jour de palier à 2500 m³/s de l'hydrogramme objectif "ORSTOM1". Fonction de répartition sur la période 1973-1997

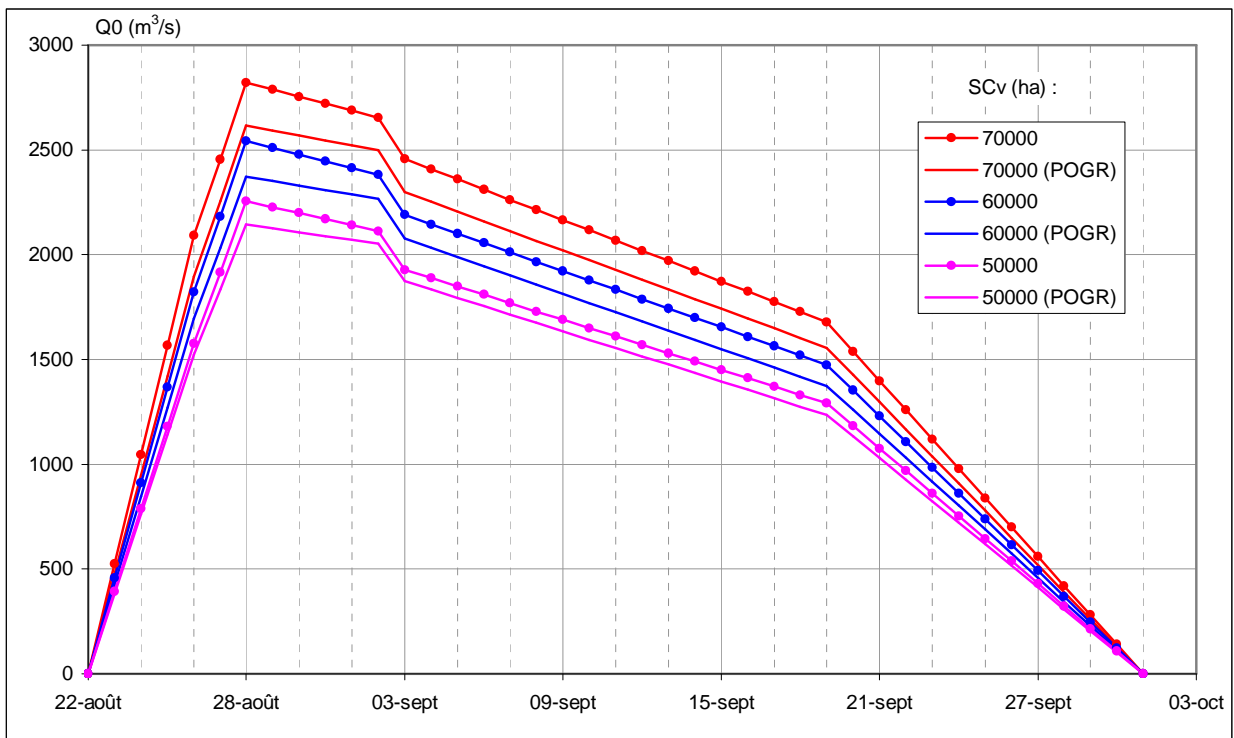


Figure 10 : hydrogrammes objectifs de crue associés à des superficies SCv de cultures de décrue de 50000, 60000 et 70000 ha. Comparaison des résultats obtenus avec ceux du POGR

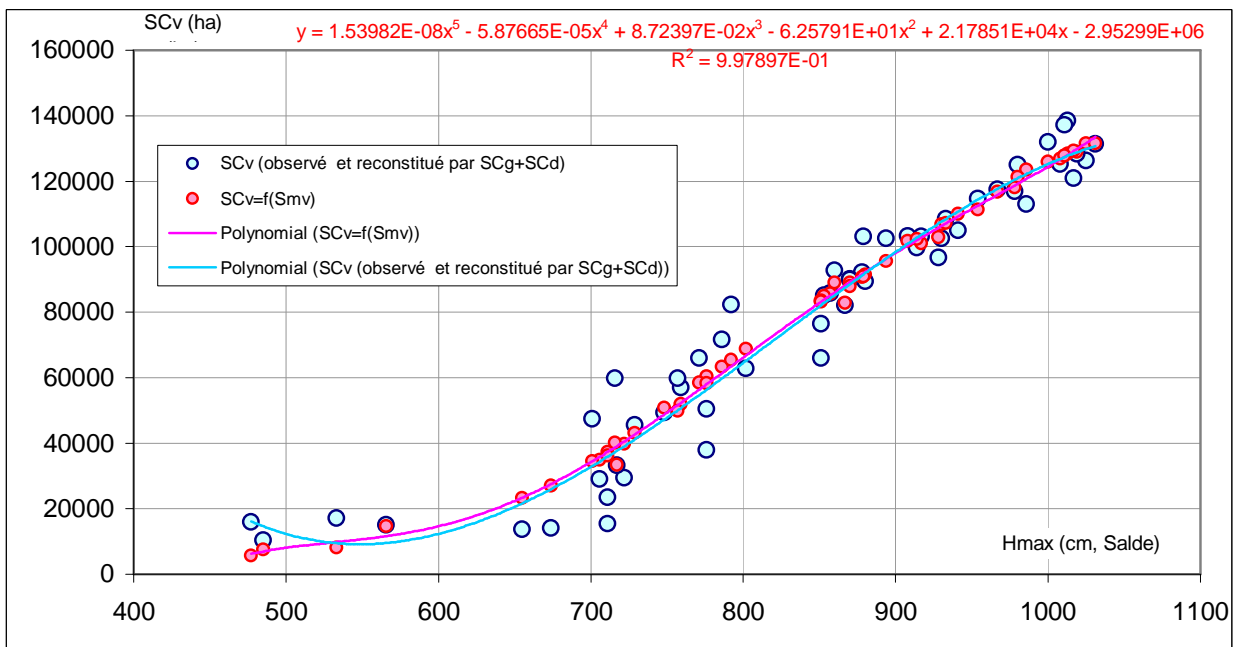


Figure 11 : relation entre la cote journalière maximale annuelle Hmax observée dans le fleuve Sénégal à l'échelle de Salde et la superficie des cultures de décrue pratiquées entre Matam et Dagana, sur la période 1946-2000

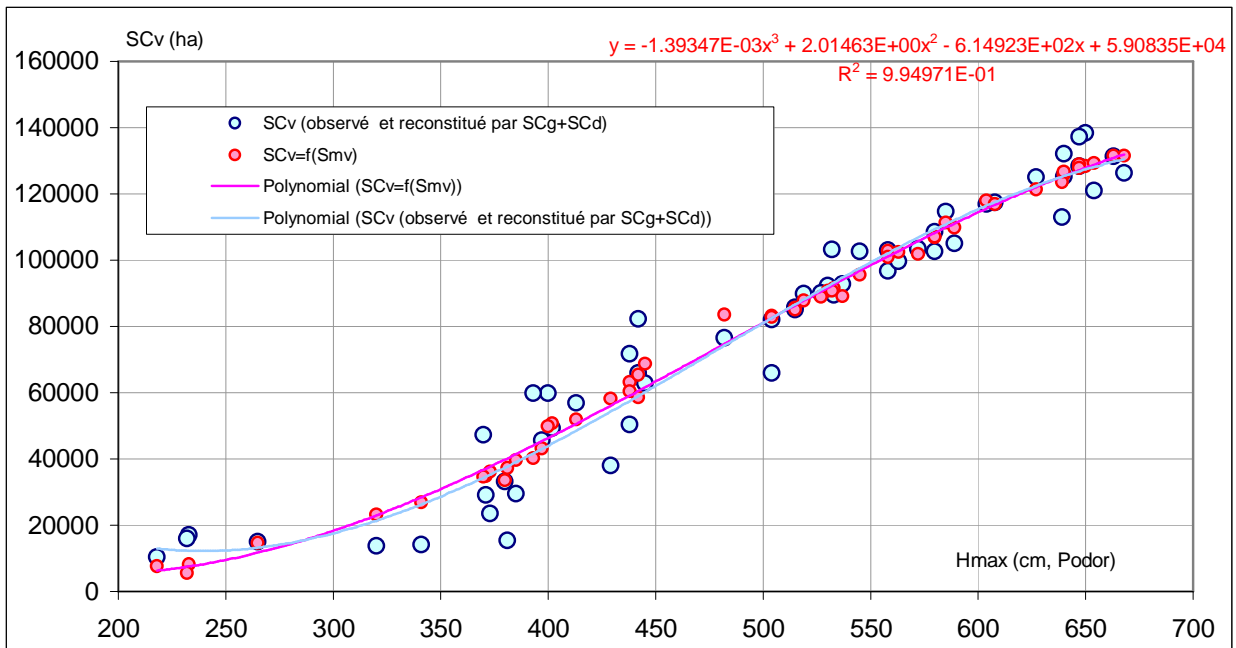


Figure 12 : relation entre la cote journalière maximale annuelle H_{max} observée dans le fleuve Sénégal à l'échelle de Podor et la superficie des cultures de décrue pratiquées entre Matam et Dagana, sur la période 1946-2000

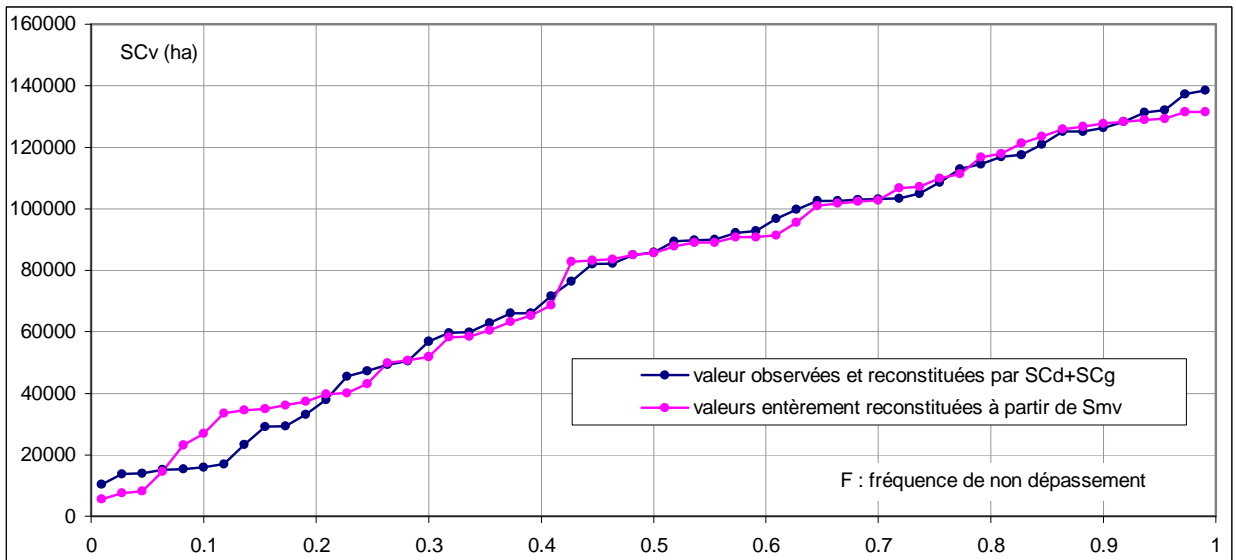


Figure 13 : fonction de répartition sur la période 1946-2000 de la superficie SC_v de cultures de décrue, pour la série des valeurs observées et reconstituées par la somme de SCd et SCg (elles-mêmes observées et reconstituées à partir de Smv), et pour la série des valeurs entièrement reconstituées à partir de Smv.

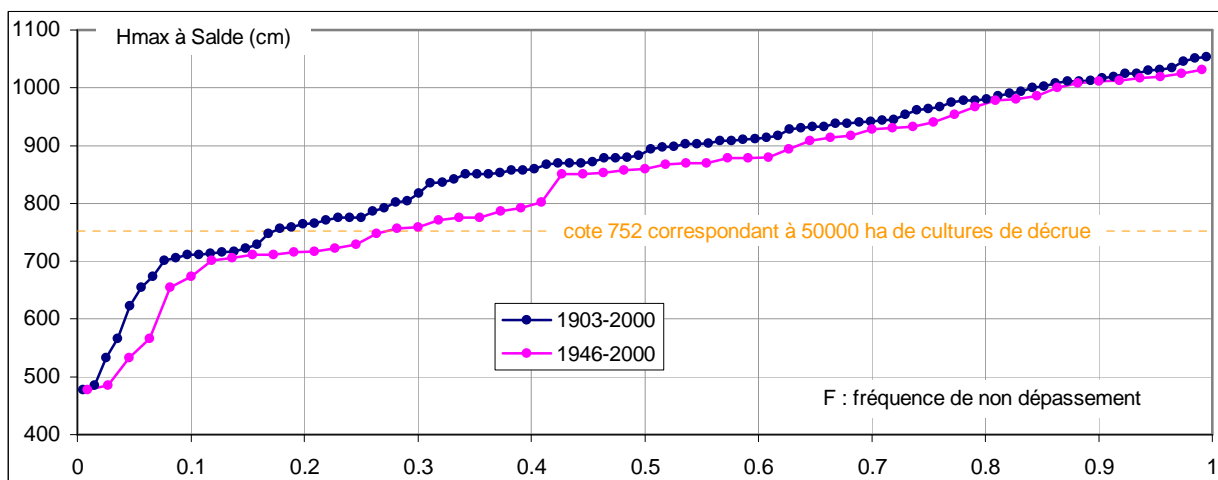
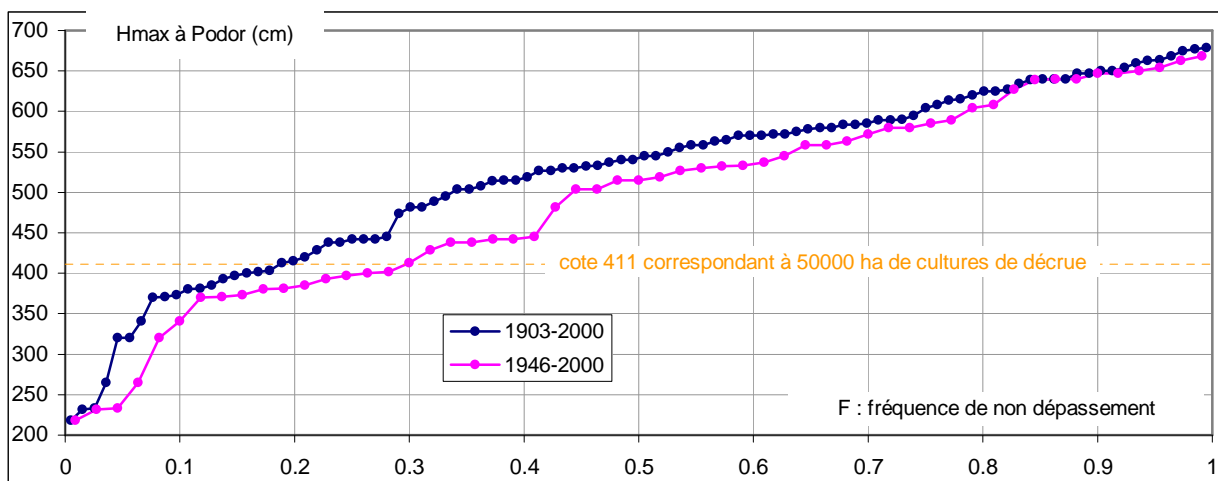


Figure 14 : fonctions de répartition de la cote journalière maximale annuelle dans le lit mineur du fleuve Sénégal aux échelles de Podor et Salde sur les périodes 1946-2000 et 1903-2000 (cotes à Podor corrigées de -24 et -30 cm en 1987 et 1990 pour supprimer le rehaussement provoqué par le barrage de Diama)

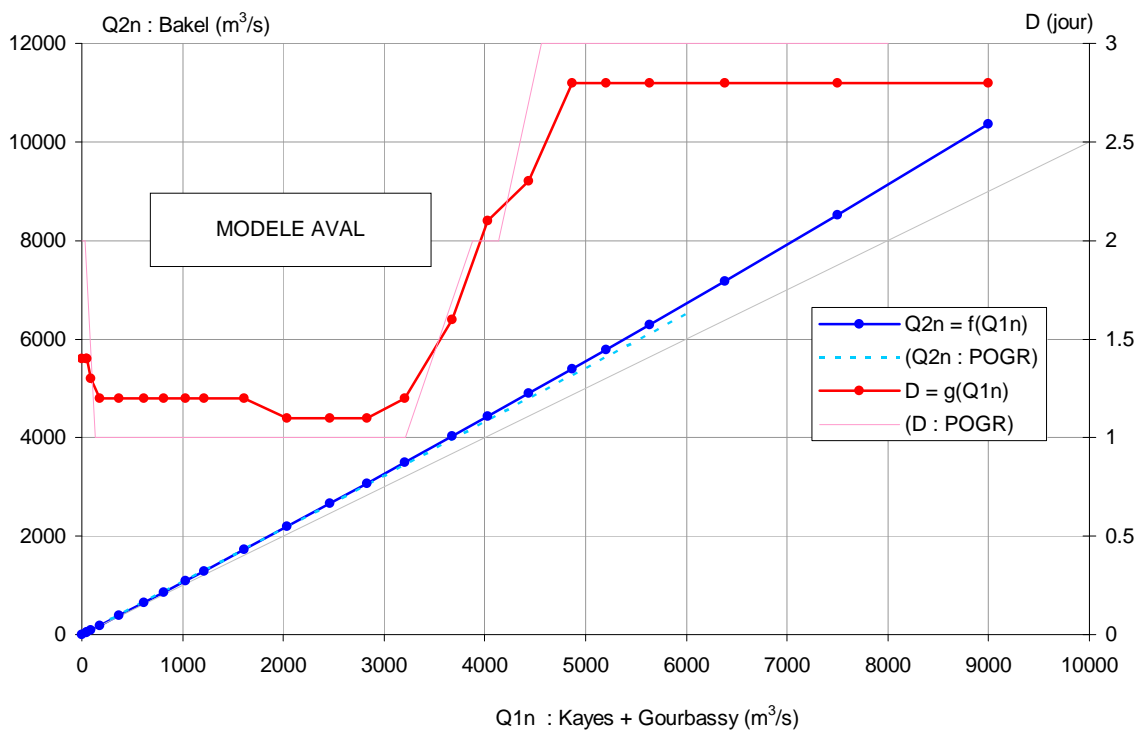
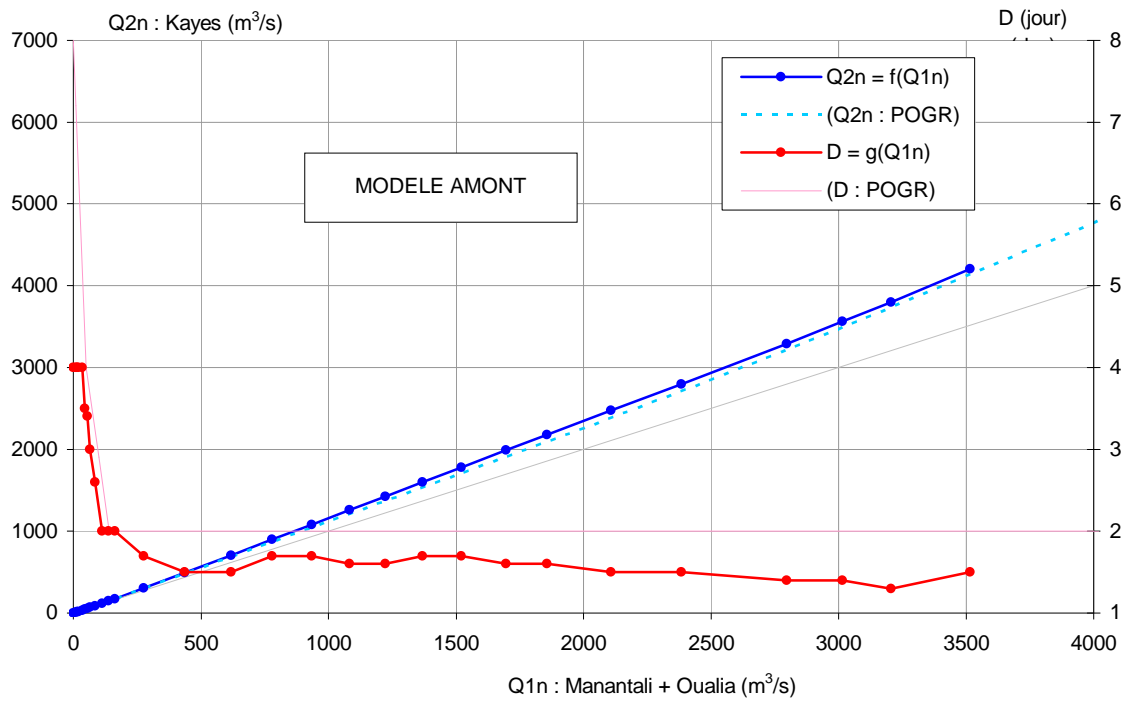


Figure 15 : fonctions f et g du modèle de propagation de Lamagat calées entre Manantali, Oualia et Kayes (sous-modèle amont) et entre Kayes, Gourbassy et Bakel (sous-modèle aval). Comparaison avec les résultats du POGR

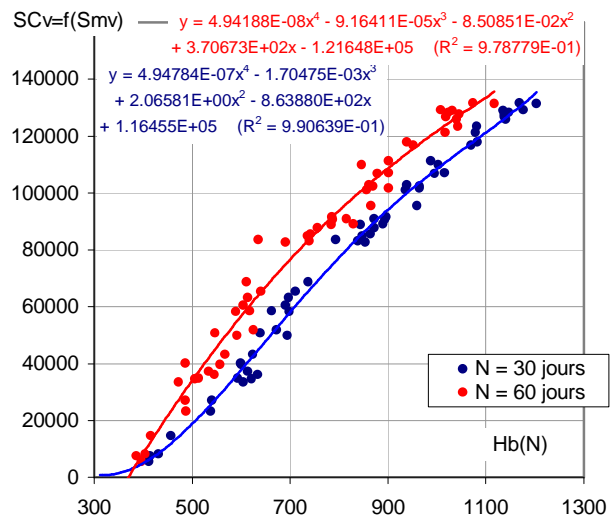
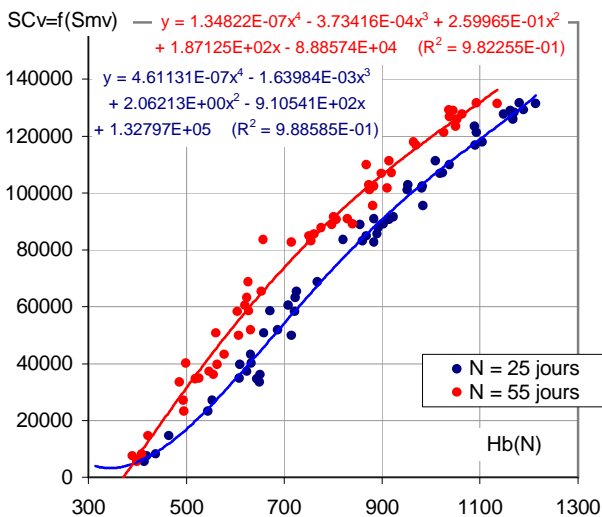
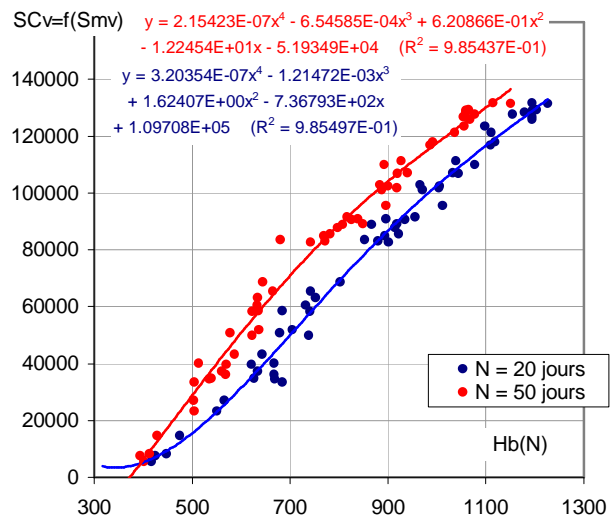
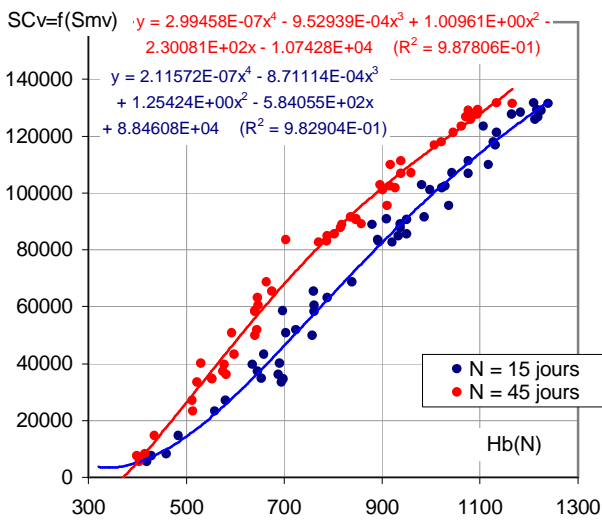
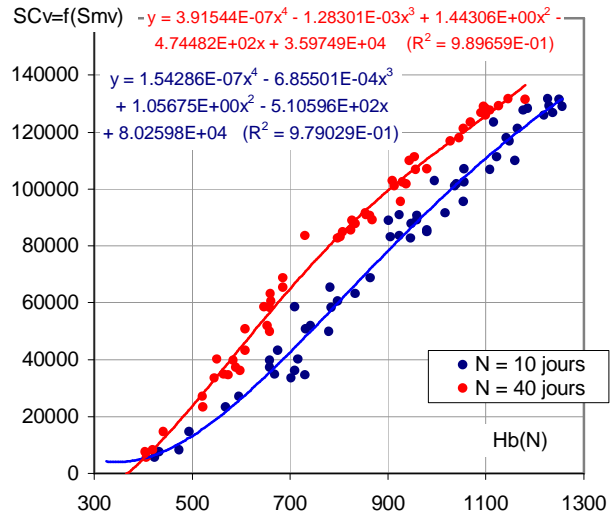
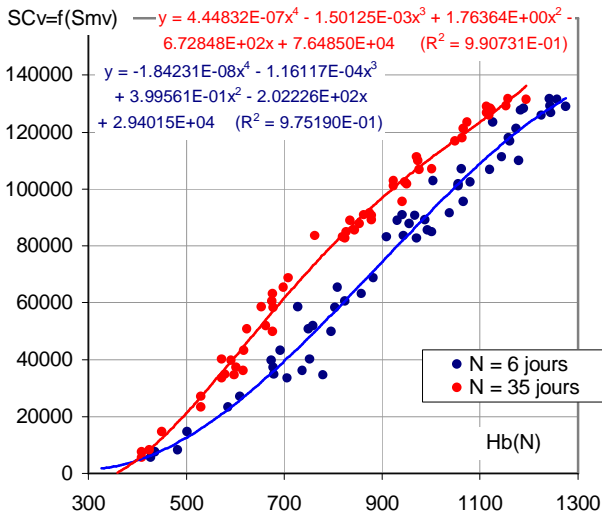


Figure 16 : relation entre la moyenne Hb(N) des N plus fortes cotes moyennes journalières de l'année relevées à l'échelle de Bakel (cm) et la superficie de cultures de décrue SCv (évaluée en fonction de la superficie inondée Smv) exprimée en hectares, sur la période 1946-2000

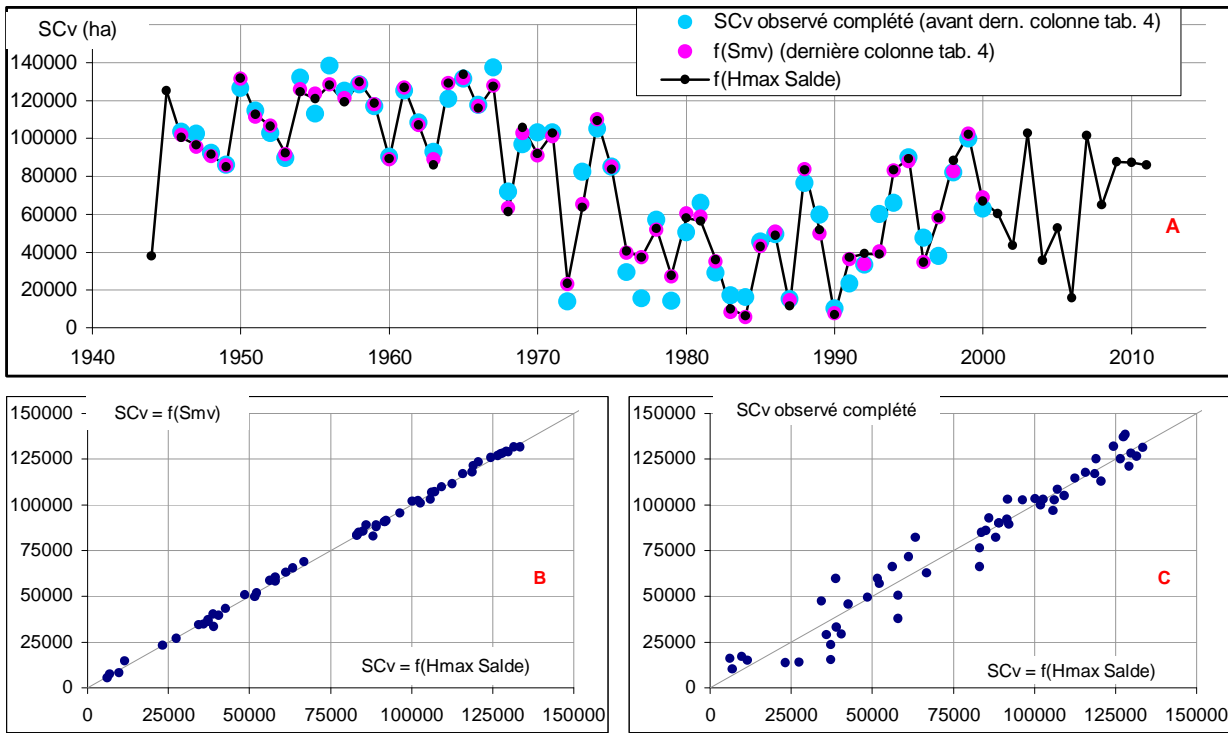


Figure 17 : superficie annuelle de cultures de décrue évaluée à partir de la cote maximale annuelle Hmax du fleuve à l'échelle de Salde pour le régime observé. Evolution (période 1944-2011) et comparaison avec la superficie observée SCv et la superficie évaluée à partir de la superficie maximale inondée Smv (période 1946-2000)

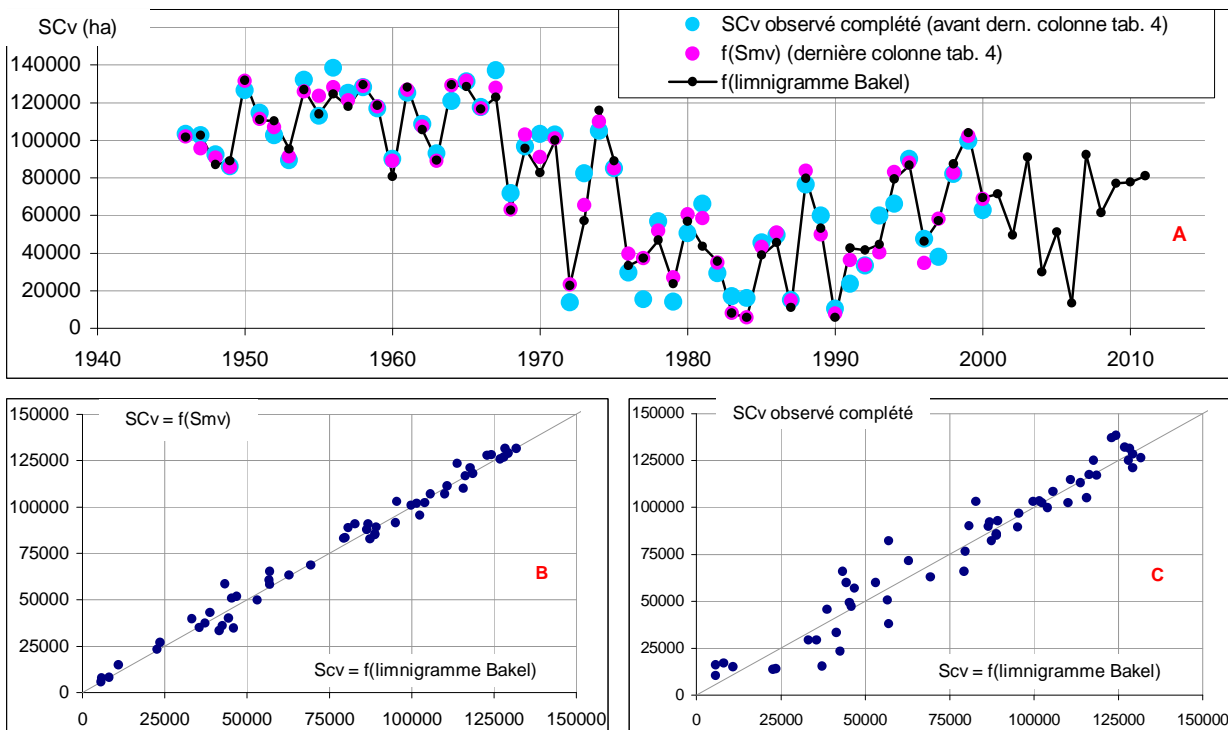


Figure 18 : superficie annuelle de cultures de décrue évaluée à partir des cotes du fleuve Sénégal à l'échelle de Bakel pour le régime observé. Evolution (période 1944-2011) et comparaison avec la superficie observée SCv et la superficie évaluée à partir de la superficie maximale inondée Smv (période 1946-2000)

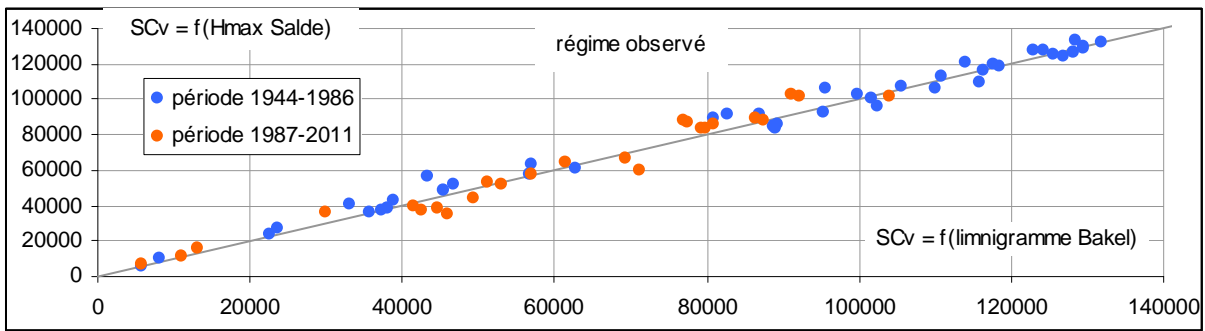


Figure 19 : comparaison des superficies annuelles de cultures de décrue calculées à partir des limnigrammes de crue à Bakel et à Salde, pour le régime observé

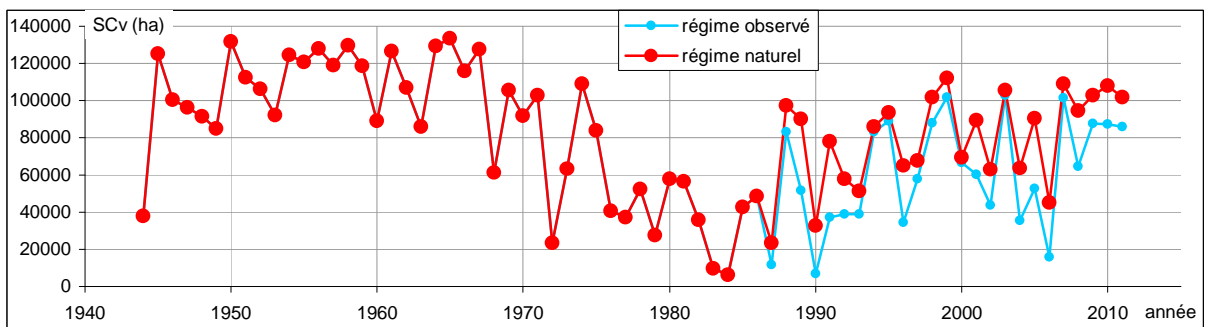


Figure 20 : Comparaison des superficies annuelles de cultures de décrue calculées à partir des cotes maximales du Sénégal à Salde, pour le régime d'écoulement observé et le régime naturel

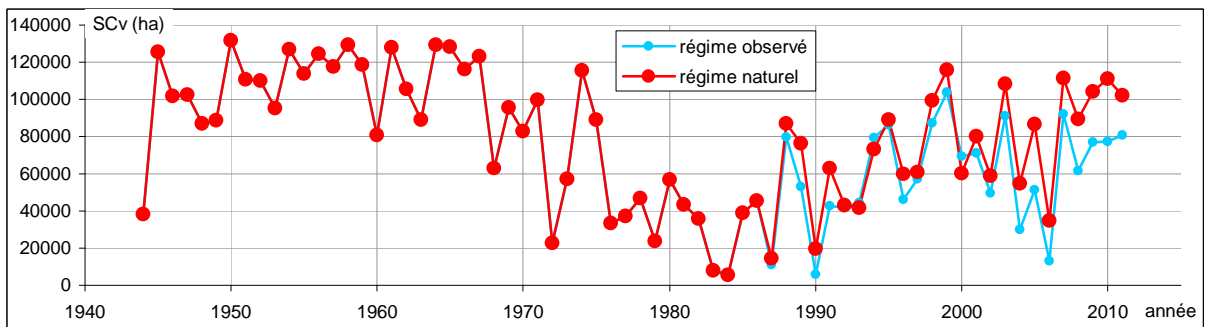


Figure 21 : Comparaison des superficies annuelles de cultures de décrue calculées à partir des limnigrammes de crue du Sénégal à Bakel, pour le régime d'écoulement observé et le régime naturel

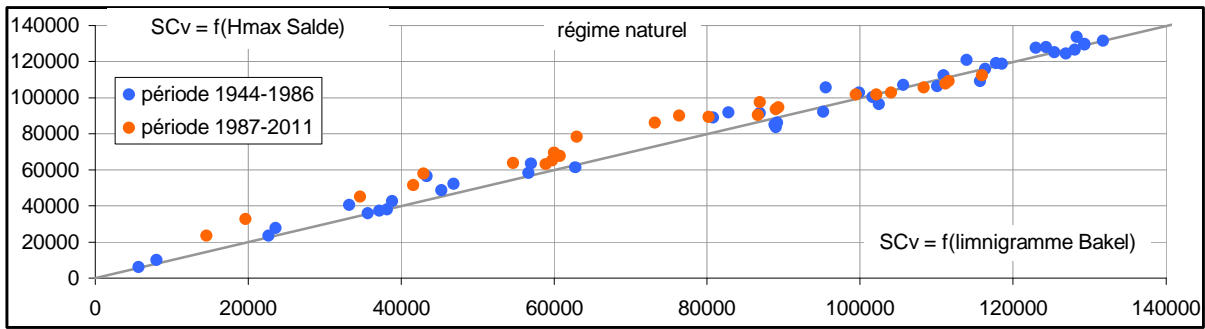


Figure 22 : comparaison des superficies annuelles de cultures de décrue calculées à partir des limnigrammes de crue à Bakel et à Salde, pour le régime naturel

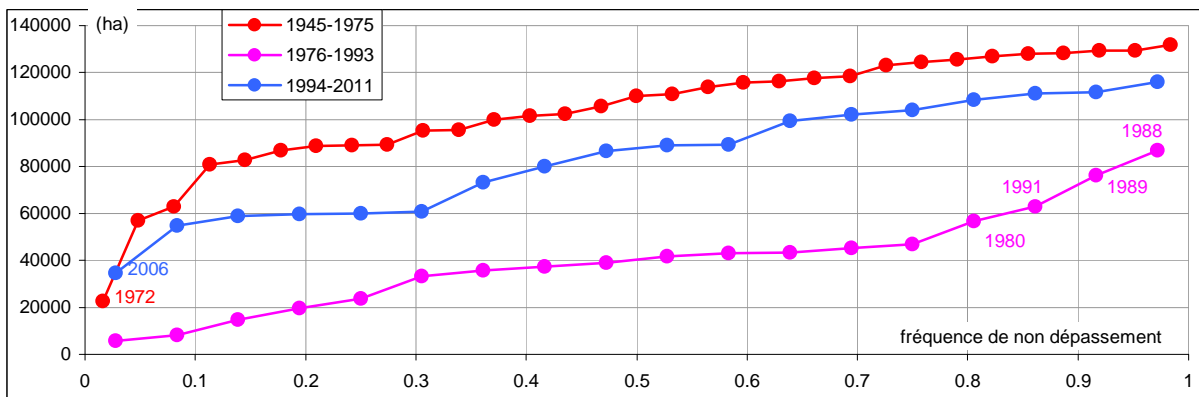


Figure 23 : fonction de répartition de la superficie potentielle annuelle de cultures de décrue associée au régime naturel d'écoulement du fleuve Sénégal, sur les périodes 1945-1975, 1976-1993 et 1994-2011

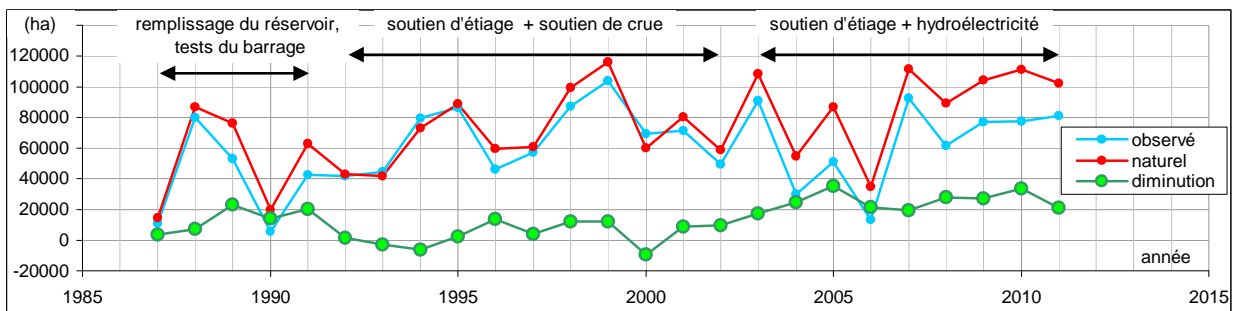


Figure 24 : évolution sur la période 1987-2011 de la superficie potentielle annuelle de cultures de décrue en régime naturel et régime observé, et de la diminution de cette superficie causée par le barrage de Manantali (différence entre les deux superficies précédentes)