



Mise à jour du modèle  
hydrologique du lac Tchad  
Données, paramètres et implémentation

Jean-Claude Bader  
Jacques Lemoalle

G-eau



## G-Eau Working Paper No. 7

### Mise à jour du modèle hydrologique du lac Tchad Données, paramètres et implémentation

Jean-Claude Bader et Jacques Lemoalle

Bader, J.-C. and Lemoalle, J. 2018. Mise à jour du modèle hydrologique du lac Tchad. Données, paramètres et implémentation G-EAU Working Paper/Rapport de Recherche No.7. Montpellier, France. <http://www.g-eau.net/>

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

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Données concernant le débit du Chari à N'Djamena (régime naturel observé) .....</b>	<b>6</b>
2.1	Nouvelles séries de valeurs observées disponibles au pas de temps journalier .....	6
2.1.1	Série A : débits journaliers du 10/06/1933 au 25/09/2008 .....	6
2.1.2	Série B : débits journaliers du 01/01/2000 au 31/12/2015 .....	7
2.1.3	Constitution d'une série C la plus complète possible de débits moyens journaliers observés	7
2.2	Reconstitution de valeurs manquantes de débit moyen journalier .....	8
2.2.1	Reconstitution par modèle de propagation des débits.....	8
2.2.2	Reconstitution par modèle de tarissement.....	9
2.2.3	Reconstitution par interpolation.....	10
2.2.4	Reconstitution par hydrogramme annuel moyen interannuel adapté.....	10
2.3	Comparaison de la nouvelle chronique de débit obtenue ici avec l'ancienne chronique complétée en 2010 pour alimenter en entrée le modèle hydrologique du lac Tchad .....	11
<b>3</b>	<b>Données concernant les précipitations sur le lac (régime observé) .....</b>	<b>11</b>
3.1	Précipitations annuelles P1 évaluées par méthode de Thyssen.....	12
3.2	Précipitations annuelles P2 évaluées à partir des relations annuelles entre latitude et précipitation .....	12
3.3	Précipitations annuelles P3 produites par le CRU sur des demi-degrés carrés inclus dans le lac	13
3.4	Conclusion concernant les données de précipitations .....	14
<b>4</b>	<b>Données concernant le niveau du lac (régime naturel observé) .....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Fichiers Excel de préparation des chroniques de flux utilisables en entrée du modèle du lac Tchad.....</b>	<b>15</b>
5.1	Chroniques journalières de débit.....	15
5.1.1	Feuille "Données débit" .....	15
5.1.2	Feuille "calculs Chari" .....	15
5.1.3	Feuille "calculs Komadougou" .....	16
5.1.4	Feuille "calculs El Beid" .....	16
5.1.5	Feuille "résultats" .....	17
5.2	Chroniques journalières d'intensité de pluie et d'évaporation .....	17
<b>6</b>	<b>Nouveau calage des paramètres du modèle hydrologique du lac Tchad.....</b>	<b>19</b>
6.1	Justification du nouveau calage .....	19
6.2	Nouveau calage des paramètres.....	19
<b>7</b>	<b>Nouvelle implémentation du modèle hydrologique du lac Tchad sous Excel .....</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Références.....</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>Tableaux.....</b>	<b>23</b>
<b>10</b>	<b>Figures.....</b>	<b>26</b>

## Résumé

Le modèle hydrologique du lac Tchad utilise en entrée des chroniques de flux au pas de temps journalier (débit des cours d'eau tributaires, intensité de précipitations et de pertes par évaporation) pour simuler l'évolution du niveau, du volume et de la superficie de plan d'eau pour chaque partie du lac (cuvette sud, archipel et cuvette nord), ainsi que les débits échangés entre ces zones et perdus par infiltration et débordement. Par rapport aux données de base utilisées pour la publication du modèle dans *Hydrological sciences Journal* en 2011, de nouvelles données désormais disponibles permettent une meilleure description des flux (période étendue, pas de temps plus fin) et des niveaux dans le lac (période étendue). Ajoutées à une révision de la méthode utilisée pour l'évaluation des précipitations sur chaque partie du lac, ces nouvelles données justifient un nouveau calage des paramètres du modèle.

*Nouvelles données de débit* : au lieu des seuls débits moyens mensuels disponibles de 1953 à 2010 (à partir desquels étaient reconstitués des débits moyens journaliers), on dispose désormais pour le Chari à N'Djamena de deux chroniques de débit au pas de temps journalier couvrant les périodes 1933 à 2008 et 2000 à 2015. L'analyse montre que la première consiste en valeurs moyennes journalières et la seconde en valeurs instantanées. L'utilisation de ces séries permet d'obtenir une série la plus complète possible de débits moyens journaliers observés à la station, dont les données manquantes sont reconstituées ici par diverses méthodes (propagation de débit depuis certaines stations sur le Logone, modèle de tarissement, interpolation, hydrogramme annuel moyen interannuel adapté). On obtient ainsi une série complète de débits moyens journaliers pour la période du 01/01/1933 au 30/04/2016, constituée de 78% de valeurs observées et 22% de valeurs reconstituées. Les moyennes mensuelles calculées à partir de cette chronique journalière sont identiques en quasi-totalité, sur la période commune, aux débits moyens mensuels anciennement utilisés comme données de base pour le modèle.

*Nouvelle évaluation des précipitations sur le lac* : on ne disposait jusqu'à présent que des précipitations annuelles  $P$  observées de 1948 à 1989 à différents postes situés dans la région du lac, à partir desquelles des précipitations annuelles  $P1$  étaient calculées par méthode de Thyssen pour la partie sud et pour la partie nord du lac. Les deux séries obtenues étaient ensuite étendues après 1989 à partir de leurs corrélations constatées avec les débits moyens annuels du Chari à N'Djamena, avant d'être utilisées pour reconstituer les précipitations mensuelles suivant une répartition saisonnière moyenne interannuelle observée. L'analyse montre que compte tenu de la répartition des postes et du fort gradient nord sud de la pluviométrie dans la région, la méthode de Thyssen sous-estime sensiblement les précipitations annuelles calculées sur chaque partie du lac. Ces dernières font l'objet ici d'une nouvelle évaluation  $P2$ , basée sur les relations annuelles entre latitude et précipitations aux postes ainsi que sur la répartition des superficies selon la latitude. Les valeurs  $P2$  obtenues, supérieures en moyenne à  $P1$  (33% pour la partie sud et 26% pour la partie nord sur la période 1951-1989), sont elles-mêmes légèrement inférieures en moyenne aux précipitations  $P3$  produites par le CRU pour deux demi degrés carrés représentatifs des parties sud et nord du lac. Disponibles gratuitement au pas de temps mensuel, complètes et quasiment à jour depuis 1901, les valeurs de  $P3$  sont assez bien corrélées au pas de temps annuel avec les valeurs de  $P2$  sur la période 1948-1989. Leur utilisation peut être préconisée pour alimenter en entrée le modèle du lac Tchad, moyennant une légère correction permettant d'équilibrer en moyenne leurs valeurs annuelles avec celles de  $P2$ , qui sont basées sur les observations au sol et donc jugées comme fiables.

*Nouvelles données de niveau observé dans la cuvette nord* : en plus des niveaux observés à Nguigmi de 1967 à 1973, utilisés pour le calage du modèle publié en 2011, on dispose désormais de nouvelles observations du niveau dans la cuvette nord pour les années 1973 à 1977, concernant les stations de Kindjéria et Malamfatori. Ces deux séries, cohérentes avec celle de Nguigmi en 1973 et présentant des valeurs plus basses à Kindjéria qu'à Malamfatori à partir de novembre 1974, montrent que le modèle sous-estime l'abaissement du niveau dans la cuvette nord de septembre 1974 à 1977.

*Aide à la préparation des chroniques de flux utilisées en entrée du modèle* : deux fichiers Excel ([préparation des débits en entrée du modèle lac Tchad.xls](#) et [préparation des pluies en entrée du modèle lac Tchad.xls](#)) sont élaborés pour faciliter la production et la mise à jour de chroniques journalières de débit des tributaires (Chari+El Beid, Komadougou), d'intensité de pluie sur deux parties du lac (sud et nord) et d'évaporation à partir des données disponibles. Les données de base utilisées pouvant être connues à un pas de temps supérieur (mensuel ou annuel) et pouvant contenir des lacunes, les fichiers permettent d'obtenir des chroniques journalières complètes moyennant certains calculs automatisés de reconstitution de données, dont les méthodes sont décrites.

*Nouveau calage des paramètres du modèle* : plus précises que les anciennes, les nouvelles chroniques de flux élaborées peuvent être utilisées en entrée du modèle, ce qui modifie de façon importante certains apports (+37% et +24% en moyenne sur la période 1956-2009 pour les pluies sur la partie sud et sur la partie nord) et de façon non négligeable les apports totaux (+4% en moyenne sur la période 1956-2009). Les nouvelles données disponibles (niveaux à Kindjéria et Malamfatori) montrent par ailleurs la nécessité pour le modèle de simuler des niveaux moins élevés dans la cuvette nord pour les années 1974 à 1977. Un nouveau calage des paramètres du modèle est donc effectué en prenant en compte l'ensemble des données disponibles pour évaluer les sorties (niveaux, superficie), avec l'utilisation des nouvelles chroniques de flux en entrée. Par rapport aux valeurs calées en 2010, les principales modifications concernent les paramètres caractérisant la rugosité hydraulique de la zone d'échanges entre cuvette sud et cuvette nord, et surtout l'intensité moyenne des pertes par infiltration, qui augmente de 155% en passant de 103 mm/an à 262 mm/an. Avec le modèle utilisant les nouvelles versions de paramètres et de flux en entrée, l'infiltration modélisée représente désormais 10.7% en moyenne des flux entrants pour le régime naturel simulé sur la période 1956-2010, au lieu de 4.5% avec les versions de 2010. Les niveaux modélisés sont légèrement modifiés, essentiellement avec un abaissement moyen de 18.5 cm dans la cuvette sud et 20.6 cm dans l'archipel avant novembre 1973, et de 21.3 cm dans la cuvette nord avant novembre 1981. Bien qu'un peu mieux représenté, l'abaissement important du niveau observé dans la cuvette nord de 1974 à 1977 reste sous-estimé par le modèle.

*Nouvelle implémentation du modèle sous Excel* : le nouveau fichier [Modèle Tchad J.xls](#) permet de choisir facilement le jeu de paramètres et de chroniques de flux à utiliser (nouvelle version ou version de 2010) et de tester l'impact d'éventuels apports supplémentaires de débit dans le Chari (transferts inter bassins) ou de modification des pertes par évaporation. Les résultats du modèle (niveaux, volumes, superficies, débits) sont édités sous forme de chroniques journalières et de chroniques de différents indicateurs (valeurs minimales, maximales et moyennes annuelles).

## 1 Introduction

---

Les observations hydrologiques de terrain concernant le lac Tchad et son bassin versant sont particulièrement lacunaires dans les années récentes. Afin de donner aux gestionnaires des outils d'analyse et de décision, un modèle hydrologique du lac Tchad a été élaboré à partir des données disponibles. Plusieurs versions successives ont été développées pour parvenir à la présente version J (Bader 2018) qui bénéficie d'une révision critique des données de terrain.

Un premier modèle, principalement destiné à évaluer l'impact des prélèvements dans le lac par les grands périmètres irrigués nigériens sur les berges du lac a été proposé par Vuillaume (1981). Son domaine d'application se limitait à un état de lac Tchad moyen (constitué d'un seul plan d'eau) avant la sécheresse de 1972-73 qui s'est traduite par une diminution du niveau de l'eau et passage à un état de Petit lac Tchad, avec deux cuvettes principales, nord et sud, séparées par l'exondation du haut fond de la Grande Barrière (Magrin et al. 2015).

Pour cet état de Petit lac Tchad, qui perdure depuis 1973, une première version semi-quantitative avait été proposée pour informer les populations de l'importance de la crue à venir dans la cuvette nord du lac (Lemoalle 1991). Différentes versions du modèle hydrologique du lac ont par la suite été proposées, où l'évolution du niveau et la surface des différentes cuvettes plus ou moins individualisées a été évaluée en fonction des données disponibles (Lemoalle et al. 2008, Bader et al. 2011, Lemoalle et al. 2012). Une évaluation de la précédente version a été donnée par Bouchez et al. (2016). La présente version (version J) intègre les précisions apportées par les analyses plus détaillées des données présentées ci-dessous.

## 2 Données concernant le débit du Chari à N'Djamena (régime naturel observé)

---

### 2.1 Nouvelles séries de valeurs observées disponibles au pas de temps journalier

Lors de la mise au point du modèle hydrologique du lac Tchad publié en 2011, les seules données disponibles concernant le débit du Chari étaient des valeurs moyennes mensuelles. La chronique de débits moyens journaliers utilisée en entrée du modèle avait alors été obtenue par interpolation linéaire entre ces valeurs moyennes mensuelles affectées arbitrairement au milieu de chaque mois.

On dispose désormais pour le Chari à N'Djamena de deux nouvelles séries A et B de débit au pas de temps journalier, à partir desquelles on souhaite élaborer une série la plus complète possible de débit moyen journalier.

#### 2.1.1 Série A : débits journaliers du 10/06/1933 au 25/09/2008

Cette série présente plusieurs très longues périodes sans lacune (du 01/07/1938 au 19/05/1945 ; du 26/04/1954 au 31/12/1979 ; du 01/12/1982 au 18/02/2004), en dehors desquelles les lacunes sont plus ou moins fréquentes :

- avant août 1936, toutes les dates sauf les 1, 10 et 20 de chaque mois ;
- étiages en 1937 et 1939 ;
- fins d'étiages en 1945 et 1946 ;
- quasiment toute la période du 12/02/1947 au 04/06/1953, hormis les montées et pointes de crue de 1948, 1949 et 1950 ;
- étiage 1954 ;
- intégralité de la période du 01/01/1980 au 30/11/1982 ;

- nombreuses périodes de lacunes plus ou moins longues et concernant à la fois des crues et des étiages, à partir du 19/02/2004.

Le contrôle graphique de l'hydrogramme montre très peu d'invéraisemblances dans la série A :

- 20/10 au 13/11/1935 : valeurs constantes à éliminer ;
- 29 au 31/07/1937, 23/03/1940, 16 au 24/09/1944, 09 et 10/03/1987, 22 et 23/10/1987, 14 au 16/02/1989, 16 au 18/11/1989, 23 au 25/09/1990 : débits trop bas à éliminer ;
- 17 et 18/03/1985, 28 et 29/01/1987 : valeurs trop élevées à éliminer ;
- valeurs du 16 au 30/07/2005 dupliquées sur la période du 16 au 30/07/2006 (valeurs à éliminer en 2006).

### **2.1.2 Série B : débits journaliers du 01/01/2000 au 31/12/2015**

Avec des valeurs datées à 12H chaque jour, les hydrogrammes des séries A et B se superposent presque parfaitement sur la période commune du 01/01/2000 au 25/09/2008 (ce qui montre que les deux séries sont très probablement obtenues à partir des mêmes données de base), avec toutefois un léger retard de la série A par rapport à la série B d'environ 5 heures. Après analyse, ce décalage s'explique par le fait que la série A contient des débits moyens journaliers alors que la série B contient des débits instantanés observés avant midi. L'utilisation de ces derniers, datés à 7H, permet en effet de calculer des débits moyens journaliers qui coïncident quasi parfaitement et du mieux possible avec la série A (écart quadratique moyen de 2.9 m<sup>3</sup>/s, au lieu de 5.3 m<sup>3</sup>/s si les débits de la série B sont considérés comme des débits moyens journaliers).

La série B présente de nombreuses périodes lacunaires, pour certaines desquelles figurent des données dans la série A. Ces données de la série A, probablement reconstituées, sont parfaitement plausibles sur les courtes périodes. Sur des périodes plus longues (par exemple du 12 au 21/10/2002, du 22/01 au 04/04/2002 et du 01/08 au 22/08/2006), ces valeurs manifestement calculées par simple interpolation linéaire mériteraient d'être remplacées par des reconstitutions plus précises.

Enfin, les seules invraisemblances évidentes constatées sur la série B concernent la duplication des données du 17 au 31 juillet de l'année 2005 sur l'année 2006 comme pour la série A.

### **2.1.3 Constitution d'une série C la plus complète possible de débits moyens journaliers observés**

Compte tenu de ce qui précède, on élabore une série C de débits moyens journaliers en utilisant les débits suivants, hors valeurs aberrantes éliminées :

- débits moyens journaliers directement tirés de la série A, pour la période du 10/06/1933 au 01/01/2000 ;
- débits moyens journaliers calculés par méthode des trapèzes à partir des débits instantanés de la série B datés à 7H chaque jour, pour la période du 02/01/2000 au 30/12/2015.

De 1933 à 2008, les seules pointes de crue absentes de la série C concernent les années 1935, 1947, 1951, 1980, 1981, 1982, 2006 et 2008.

La présence de nombreuses lacunes dans la série B, y-compris de très courte durée, montre que cette série (et donc aussi la série C à partir du 02/01/2000) ne comporte probablement que des valeurs de débit observées.

La présence de quelques valeurs aberrantes évidentes dans la série A entre les années 1937 et 1990 permet de penser que celle-ci ne comporte probablement aucune longue période de données entièrement reconstituées pendant ces années. Il serait en effet illogique que ces

valeurs aberrantes n'aient pas été éliminées avant la mise en œuvre des modèles nécessaires pour effectuer de telles reconstitutions (par exemple, modèles hydrologiques de propagation de débit ou de tarissement). De plus, les irrégularités quasi-systématiques constatées sur la décroissance des débits entre décembre et la fin de la période de tarissement sont incompatibles avec des données qui auraient été reconstituées sur de longues périodes par modèle de tarissement, celles-ci se trahissant forcément par un hydrogramme très lisse.

Si la présence de longues périodes de valeurs reconstituées dans la série A paraît donc peu probable, la présence de valeurs reconstituées sur de courtes périodes dans cette série, très probable à partir de l'année 2000 d'après la comparaison avec la série B, ne peut être exclue pour les années antérieures. Cependant, si elles existent sur la période 1933-1999, ces courtes reconstitutions effectuées possiblement par interpolation ne posent a priori aucun problème car elles sont probablement très proches de la réalité, compte tenu des variations lentes du débit du Chari, dont l'hydrogramme ne montre aucune anomalie flagrante.

Sans grand risque a priori et jusqu'à plus ample informé, on considérera donc tous les débits de la série C comme des débits moyens journaliers observés.

## **2.2 Reconstitution de valeurs manquantes de débit moyen journalier**

Les valeurs manquantes dans la série C de débit moyen journalier sont reconstituées ci-dessous par différentes méthodes pour obtenir une série complète du 01/01/1933 au 30/04/2016.

### **2.2.1 Reconstitution par modèle de propagation des débits**

Pour chacune des stations de Gana (Logone Gana), Katoa et Bongor situées à l'amont de N'Djamena sur le Logone, on dispose de deux chroniques de débit au pas de temps journalier dont les noms se différencient par les suffixes "CM" ou "Chad". Manifestement, ces deux chroniques dont les périodes lacunaires sont quasi-identiques sont obtenues à partir des mêmes données de niveau traduites en débits par des étalonnages différents, car leurs valeurs sont reliées par deux (pour Gana et Katoa) ou quatre (pour Bongor) fonctions croissantes successives. Parmi ces données qui couvrent les périodes 1953-2009 à Gana et 1948-2008 à Bongor, et dont on ne connaît pas l'unité, on élimine des valeurs douteuses ou aberrantes aux dates suivantes :

Gana Chad : 21/11/1955, 31/07 au 19/09/1969, 01/10 au 30/12/1980, 02/09 au 01/11/2008 ;

Gana CM : 21/11/1955, 23/07/1965, 31/07 au 19/09/1969, 01/10 au 30/12/1980, 01/06/2006 au 31/10/2006 ;

Bongor Chad : 01 au 31/07/1983.

Le modèle de propagation de Lamagat est ensuite calé avec chacune des trois séries ainsi obtenues, utilisée comme débit prévisseur  $Q1$ , pour reproduire du mieux possible avec les fonctions  $f$  et  $g$  suivantes le débit prévisseur  $Q2$  du Chari à N'Djamena (série C) :

$$D(T) = g(Q1(T))$$

$$Q2(T+D(T)) = f(Q1(T))$$

avec  $T$  le temps et  $D$  le délai de propagation entre la station prévisseur et la station prévisseur.

Le paramétrage du modèle établi respectivement à partir des séries de Gana Chad, Gana CM et Bongor Chad est représenté sur les figures 1 à 3, pour des périodes où il apparaît comme homogène et pendant lesquelles il peut être utilisé pour reconstituer des débits manquants dans la série C de N'Djamena.

Pour une période donnée de débits manquants, la reconstitution consiste à utiliser les débits calculés par le modèle de propagation, auxquels est appliquée si possible une correction tenant compte : 1- des erreurs du modèle constatées juste avant et/ou juste après la période lacunaire à reconstituer ; 2- de l'autocorrélation des ces erreurs, constatée sur l'ensemble de la période modélisée. Le principe de la correction est expliqué dans la monographie hydrologique du fleuve Sénégal publiée en 2015 par les éditions de l'IRD.

Les débits du Chari à N'Djamena reconstitués par modèle de propagation à partir des séries de Gana Chad, Gana CM et Bongor Chad (1642, 159 et 710 valeurs respectivement) sont visibles sur l'hydrogramme de la figure 5 (points orange, bleus et noirs).

### 2.2.2 Reconstitution par modèle de tarissement

Entre le 15 novembre et le 15 juin de l'année suivante, l'écoulement du Chari à N'Djamena suit la plupart du temps un régime de tarissement caractérisé par la décroissance régulière du débit. L'analyse de ce régime est effectuée sur la période 1950-2015 à partir des débits observés de la série C, dont on calcule ainsi le taux  $K$  de variation journalière en exprimant le temps  $T$  en jour :

$$K(T+1.5) = (Q(T+3)/Q(T))^{1/3}$$

Seules sont conservées les valeurs de  $K(T+1.5)$  inférieures ou égales à 1 et calculées à partir de débits  $Q$  tous observés, supérieurs à 10 m<sup>3</sup>/s et décroissants ou constants aux temps  $T$ ,  $T+1$ ,  $T+2$  et  $T+3$ .

On remarque que le taux  $K(T+1.5)$  évolue légèrement en fonction de la saison ou du débit. La relation moyenne entre  $K(T+1.5)$  et  $Q(T+1.5)=(Q(T+1)+Q(T+2))/2$ , représentée sur la figure 4, s'exprime ainsi avec un coefficient d'efficacité ( $NSE=1-(\text{erreur type}/\text{écart type})^2$ ) de 0.186 sur 8698 valeurs, en notant  $\text{Log}$  le logarithme décimal :

$$K = h(Q) = \min (0.992636 ; 0.011952(\text{Log}(Q))^5 - 0.127595(\text{Log}(Q))^4 + 0.524887(\text{Log}(Q))^3 - 1.044741(\text{Log}(Q))^2 + 1.014473\text{Log}(Q) + 0.590243)$$

En période de tarissement, l'évolution assez lente et régulière du débit permet de reconstituer les débits manquants sans grand risque sur d'assez longues périodes. On fait ces reconstitutions en appliquant dans le sens chronologique l'une des trois méthodes suivantes pour chaque période lacunaire succédant à un débit  $Q$  connu au temps  $T_{ant}$  en période de tarissement :

- **La méthode 1** peut être appliquée dans tous les cas. Elle utilise simplement la relation  $K=h(Q)$  ci dessus et donne des débits reconstitués  $Q1r$  vérifiant :

$$Q1r(T_{ant}+1) = Q(T_{ant}) \times h(Q(T_{ant}))$$

$$Q1r(T+1) = Q1r(T) * h(Q1r(T)) \quad \text{pour } T > T_{ant}$$

- **La méthode 2** peut être appliquée uniquement si le débit  $Q$  connu au temps  $T_{post}$  marquant la fin de période lacunaire se situe dans la même période de tarissement que le temps  $T_{ant}$  (avec  $T_{post}-T_{ant}$  inférieur ou égal à 180 jours). Dans l'hypothèse d'un taux  $K$  constant de décroissance journalière du débit entre les temps  $T_{ant}$  et  $T_{post}$  (modèle de tarissement classique), cette méthode donne des débits reconstitués  $Q0r$  vérifiant :

$$Q0r(T) = Q(T_{ant}) \times (Q(T_{post})/Q(T_{ant}))^{((T-T_{ant})/(T_{post}-T_{ant}))} \quad \text{pour } T_{ant} < T < T_{post}$$

- **La méthode 3**, qui peut s'appliquer dans les mêmes conditions que la méthode 2, est basée sur l'hypothèse que l'erreur de modélisation du débit reconstitué  $Q1r$  varie linéairement entre le temps  $T_{ant}$  (où elle est nulle) et le temps  $T_{post}$  (où elle vaut  $Q1r(T_{post})-Q(T_{post})$ ). Une correction est alors apportée au débit  $Q1r$  pour tenir compte de cette erreur et obtenir un débit  $Q1rc$  qui vérifie :

$$Q1rc(T) = Q1r(T) + (Q(T_{post}) - Q1r(T_{post})) \times (T - T_{ant}) / (T_{post} - T_{ant}) \quad \text{pour } T_{ant} < T < T_{post}$$

Pour chaque période lacunaire, la méthode retenue est choisie sur la base de l'expérience de l'hydrologue, au vu du graphique des différents hydrogrammes observés et reconstitués superposés, et avec la possibilité de n'en retenir aucune. Les effectifs totaux de débits reconstitués par modèle de tarissement sont les suivants entre le 01/01/1933 et le 30/04/2016 : 1169, 193 et 688 pour les méthodes 1, 2 et 3 respectivement. Ces débits reconstitués sont visibles sur la figure 5 (points verts).

### 2.2.3 Reconstitution par interpolation

Pour chaque période lacunaire située entre les dates  $T1$  et  $T2$  pour lesquelles le débit est connu (avec  $T1 < T2$  ou  $T2 < T1$ ), les débits manquants peuvent être reconstitués par interpolation à l'aide d'un polynôme du temps de degré 1, 2 ou 3. Celui-ci relie  $Q(T1)$  à  $Q(T2)$  et peut en outre respecter la tangente  $Q'(T1)$  s'il est de degré 2, ainsi que la tangente  $Q'(T2)$  s'il est de degré 3, quand ces tangentes sont connues. Ces polynômes s'expriment ainsi :

$$Q(T) = D \times T^3 + C \times T^2 + B \times T + A$$

$$D = (Q'(T1) + Q'(T2) - 2(Q(T2) - Q(T1)) / (T2 - T1)) / (T1 - T2)^2$$

$$C = (Q'(T1) - (Q(T2) - Q(T1)) / (T2 - T1) - D \times (2T1^2 - T2 \times T1 - T2^2)) / (T1 - T2)$$

$$B = Q'(T1) - 3 \times D \times T1^2 - 2 \times C \times T1$$

$$A = Q(T1) - D \times T1^3 - C \times T1^2 - B \times T1$$

avec  $D$  nul pour un polynôme de degré 2, et avec  $D$  et  $C$  nuls et  $Q'(T1)$  remplacé par  $(Q(T2) - Q(T1)) / (T2 - T1)$  pour un polynôme de degré 1.

Les reconstitutions par interpolation ne sont retenues que sur des périodes lacunaires relativement courtes. Pour chacune de ces périodes, le choix du degré du polynôme ou le rejet de tous est effectué au vu des différents hydrogrammes observés et reconstitués superposés, comme pour la méthode précédente.

Le nombre de débits reconstitués par interpolation s'élève à 476, 190 et 445 pour des degrés de polynômes égaux à 1, 2 et 3 respectivement. Ces débits sont visibles sur la figure 5 (points magenta).

### 2.2.4 Reconstitution par hydrogramme annuel moyen interannuel adapté

À ce stade des reconstitutions, il subsiste 371 lacunes dans la série des débits moyens journaliers sur la période 1950-2015. Cette série quasi-complète permet de calculer un hydrogramme annuel moyen, correspondant pour chacun des 365 jours d'une année non bissextile au débit moyen de ce jour sur la période 1950-2015. Les 1076 lacunes subsistant dans la série du 01/01/1933 au 30/04/2016 sont finalement reconstituées à partir de cet hydrogramme moyen  $Q_{moy}$ , auquel est éventuellement appliqué un terme correctif (additif ou multiplicatif, au choix) variant linéairement sur chaque période lacunaire. Pour chaque période lacunaire encadrée par des débits connus aux dates  $T_{ant}$  et  $T_{post}$ , le terme correctif additif  $C_{add}$  et le terme correctif multiplicatif  $C_{mul}$  permettent de raccorder sans rupture artificielle les débits reconstitués aux débits connus. Justifiés comme pour les méthodes précédentes par une certaine persistance des erreurs de modélisation, ils s'expriment ainsi :

$$C_{add} = ((Q(T_{ant}) - Q_{moy}(T_{ant})) \times (T_{post} - T) + (Q(T_{post}) - Q_{moy}(T_{post})) \times (T - T_{ant})) / (T_{post} - T_{ant})$$

$$C_{mul} = ((T_{post} - T) \times Q(T_{ant}) / Q_{moy}(T_{ant}) + (T - T_{ant}) \times Q(T_{post}) / Q_{moy}(T_{post})) / (T_{post} - T_{ant})$$

Du 01/01/1933 au 30/04/2016, le nombre de débits reconstitués par l'hydrogramme annuel moyen de la période 1950-2015 s'élève à 160 sans correctif, 141 avec correctif additif et 775 avec correctif multiplicatif. Ces débits reconstitués sont visibles sur la figure 5 (points marron). La série complète de débits moyens journaliers finalement obtenue pour la période du 01/01/1933 au 30/04/2016 comporte 6767 valeurs reconstituées par les diverses méthodes, soit 22 % de l'effectif total.

L'analyse statistique des débits moyens journaliers complets du Chari à N'Djamena sur la période 1950-2015 donne les hydrogrammes moyen et iso-fréquence annuels représentés sur la figure 6. On remarque la grande régularité de l'hydrogramme annuel moyen (maximum : 2688 m<sup>3</sup>/s le 25 octobre ; minimum : 95 m<sup>3</sup>/s le 30 avril), ainsi que la date du débit maximal annuel qui varie en moyenne selon l'ampleur de la crue : plus la crue est forte, plus le débit maximal est tardif (par exemple : 1620 m<sup>3</sup>/s le 16 octobre en décennal sec et 4044 m<sup>3</sup>/s le 5 novembre en décennal humide).

### **2.3 Comparaison de la nouvelle chronique de débit obtenue ici avec l'ancienne chronique complétée en 2010 pour alimenter en entrée le modèle hydrologique du lac Tchad**

Comme il est dit plus haut, les valeurs de débit moyen journalier utilisées en entrée du modèle hydrologique du lac Tchad étaient jusqu'à maintenant obtenues par interpolation linéaire entre des débits moyens mensuels (valeurs observées complétées par quelques valeurs reconstituées) positionnés au 16 de chaque mois sur la période de mai 1953 à avril 2011. Cette ancienne série de débits moyens mensuels est comparée ici à la nouvelle série de moyennes mensuelles obtenue à partir des débits moyens journaliers complets observés et reconstitués décrits plus haut (série C).

La figure 7 montre que ces deux séries sont quasiment semblables sur leur période commune. Leurs principales différences concernent les années 1980 à 1982 et 2008 à 2011 (comportant de nombreuses valeurs reconstituées dans l'ancienne série), mais seules les années 1981 et 1982 montrent des différences significatives pour les valeurs maximales annuelles de débit moyen mensuel. Ces résultats montrent que l'ancienne chronique de données de base (débits moyens mensuels utilisés pour la mise au point du modèle) et la nouvelle (série C de débits moyens journaliers observés) proviennent pour l'essentiel des mêmes observations de niveau du Chari, traduites par les mêmes étalonnages.

Outre les quelques différences évoquées ci-dessus et la période couverte beaucoup plus longue, la nouvelle série de débit journalier diffère essentiellement de l'ancienne par une description beaucoup plus fine de l'évolution des débits, qui contrairement à l'ancienne respecte parfaitement les volumes écoulés. L'utilisation de la nouvelle chronique de débit moyen journalier du Chari à la place de l'ancienne en entrée du modèle peut donc entraîner quelques différences de résultats.

## **3 Données concernant les précipitations sur le lac (régime observé)**

---

Le modèle hydrologique du lac Tchad utilise en entrée des chroniques de précipitations mensuelles différenciées pour la cuvette nord et la partie sud (cuvette sud + archipel). Jusqu'à présent, celles-ci sont obtenues à partir de précipitations annuelles auxquelles sont appliquées les répartitions saisonnières moyennes interannuelles décrites dans "Hydrologie du lac Tchad" (Olivry et al, 1996) :

- à Bol pour la partie sud : de novembre à avril : 0% ; mai : 2% ; juin : 4% ; juillet : 22% ; août : 55% ; septembre : 15% ; octobre : 2% ;
- à Nguigmi pour la partie nord : de novembre à avril : 0% ; mai : 3% ; juin : 3% ; juillet : 26% ; août : 58% ; septembre : 8% ; octobre : 0%.

### 3.1 Précipitations annuelles P1 évaluées par méthode de Thyssen

Jusqu'à présent, les données de base utilisées par le modèle pour décrire les précipitations annuelles sur les deux parties du lac étaient obtenues en appliquant la méthode de Thyssen (fig. 8) aux données publiées par Olivry et al (1996) : pluies annuelles observées de 1948 à 1989 à différents postes situés dans la région du lac. Compte tenu des données disponibles et de la répartition géographique des postes, les précipitations sur le lac étaient ainsi obtenues en attribuant les poids suivants aux données des différents postes :

- pour la cuvette nord : 49.2% pour Nguigmi, 31.3% pour Bol et 19.5% pour Gueskerou sur la période 1948-1977 ; 63.1% pour Nguigmi et 36.9% pour Bol sur la période 1978-1989 ;
- pour la partie sud : 89.9% pour Bol, 4.3% pour Massakori, 3.8% pour N'Djamena et 2% pour Maiduguri.

Les lames précipitées annuelles  $P1_{sud}$  et  $P1_{nord}$  ainsi obtenues pour chaque année  $i$  entre 1948 et 1989 avaient ensuite été complétées à partir de 1990 par des données reconstituées à l'aide des deux relations suivantes, où  $Q$  désigne le débit moyen annuel du Chari à N'Djamena (de mai année  $i$  à avril année  $i+1$ ) :

$$P1_{sud} = -5.805 \times 10^{-5} Q^2 + 0.3280Q + 50.88 \quad (R^2 = 0.46 \text{ sur période } 1953-1989)$$

$$P1_{nord} = -3.435E-04 P1_{sud}^2 + 9.707E-01 P1_{sud} - 1.968E+01 \quad (R^2 = 0.77 \text{ sur période } 1951-1989)$$

Appliqués sur les latitudes des postes pluviométriques, les coefficients de Thyssen mentionnés plus haut attribuent une latitude moyenne de 13.39° à la partie sud du lac et de 13.86° (période 1948-1977) ou 13.96° (période 1978-1989) à la partie nord. Ces valeurs étant nettement supérieures aux latitudes des barycentres de ces zones (resp. 13.08° et 13.75°, fig. 9), la méthode de Thyssen risque donc d'attribuer des pluies trop septentrionales à chaque zone. Or la pluviométrie moyenne interannuelle présente dans la région un fort gradient nord-sud avec des isohyètes orientés quasiment est-ouest, ce que confirme la figure 10. Par conséquent, les précipitations évaluées par méthode de Thyssen risquent d'être sous-évaluées sur chaque partie du lac.

### 3.2 Précipitations annuelles P2 évaluées à partir des relations annuelles entre latitude et précipitation

Les lames précipitées annuelles  $P$  publiées par Olivry et al (1996) pour différents postes de la région (Maiduguri, N'Djamena, Massakori, Bol, Moussoro, Mao et Nguigmi) sont reliées chaque année  $i$  par régression linéaire à la latitude  $Lat$  des postes (respectivement 1.83, 12.14, 13.00, 13.47, 13.64, 14.12 et 14.25° nord) :

$$P(i, Lat) = A(i) \times Lat + B(i)$$

Avec un  $R^2$  supérieur à 0.6 la plupart des années (fig. 11b), ces régressions présentent un coefficient multiplicateur  $A$  toujours négatif (fig. 11a) qui traduit la décroissance moyenne systématique des pluies annuelles du sud vers le nord. Appliquées aux latitudes des différents postes, elles permettent de reconstituer pour ceux-ci des pluies annuelles  $P2$  qui reproduisent les valeurs observées  $P$  avec un  $NSE$  assez élevé pour la plupart des stations sur la période 1948-1989 (0.87 pour Maiduguri, 0.85 pour N'Djamena, 0.58 pour Massakory, 0.52 pour Bol, 0.55 pour Moussoro, 0.33 pour Mao et 0.75 pour Nguigmi).

Remarque : si on établit les régressions ci-dessus en ajoutant la station de Gueskerou aux sept stations déjà utilisées, on constate que les pluies  $P2$  obtenues pour Gueskerou reproduisent mal les pluies  $P$  observées à cette station, avec un NSE de -0.27. Pour la suite des calculs, on conserve donc les paramètres  $A$  et  $B$  (fig. 11a) des régressions obtenues (remarquablement liés entre eux (fig 11c)), sans tenir compte des données de Gueskerou.

Pour éviter le biais mentionné plus haut pour la méthode de Thyssen, on estime les pluies annuelles  $P2$  sur les deux parties du lac pour chaque année  $i$  en tenant compte de la dépendance de la pluviométrie vis-à-vis de la latitude, ainsi que de la fonction de répartition  $X$  des superficies selon la latitude (fig. 9) :

$$P2_{nord}(i) = \sum_{Lat=12.8^{\circ}}^{Lat=14.5^{\circ}} Xn(Lat) \times (A(i) \times Lat + B(i))$$

$$P2_{sud}(i) = \sum_{Lat=12.2^{\circ}}^{Lat=13.6^{\circ}} Xs(Lat) \times (A(i) \times Lat + B(i))$$

Comme prévu,  $P2$  est globalement plus élevé que  $P1$  sur chaque partie du lac (fig. 12 et 13), avec les valeurs moyennes suivantes sur la période 1951-1989 :  $P2_{sud} = 411$  mm;  $P1_{sud} = 310$  mm;  $P2_{nord} = 305$  mm;  $P1_{nord} = 243$  mm. **On peut donc en conclure que les lames précipitées mensuelles utilisées jusqu'à présent en entrée du modèle du lac Tchad, basées sur les valeurs annuelles  $P1$ , sous-estimaient probablement en moyenne les intensités de pluie sur le lac d'environ 100 mm/an (soit 24%) sur la partie sud et 62 mm/an (soit 20%) sur la partie nord.**

### 3.3 Précipitations annuelles $P3$ produites par le CRU sur des demi-degrés carrés inclus dans le lac

On dispose pour la période 1901-2015 des lames précipitées mensuelles  $P3m$  calculées par le CRU sur deux demi-degrés carrés représentés sur la figure 8. Les lames précipitées annuelles  $P3$  sont calculées à partir des lames mensuelles  $P3m$  de chacun :

- $P3_{nord}$  pour le demi-degré carré nord, qui est entièrement inclus dans la partie nord du lac et dont le centre (13.75° N, 13.75°E) se situe à la même latitude que le barycentre de cette partie (fig. 9) ;
- $P3_{sud}$  pour le demi-degré carré sud, qui est presque entièrement inclus dans la partie sud du lac et dont le centre (13.25° N, 14.75°E) se situe 0.17° plus au nord que le barycentre de cette partie (fig. 9).

Vu la position de ces demi-degrés carrés et l'orientation régionale des isohyètes, on devrait avoir approximativement  $P3_{nord}$  égal à  $P2_{nord}$  et  $P3_{sud}$  légèrement plus faible que  $P2_{sud}$ . Or les figures 12 et 13 montrent que  $P3_{nord}$  et  $P3_{sud}$ , certes très cohérents avec  $P2_{nord}$  et  $P2_{sud}$ , sont globalement plus élevés que ceux-ci. Les valeurs moyennes suivantes sont obtenues sur la période 1948-1989 :  $P2_{sud} = 409$  mm;  $P3_{sud} = 436$  mm;  $P2_{nord} = 303$  mm;  $P3_{nord} = 355$  mm. Les lames précipitées annuelles  $P3$  surestiment donc probablement en moyenne de 27 mm (soit 7%) les pluies sur la partie nord et de 52 mm (soit 17%) les pluies sur la partie sud, si l'on suppose que  $P2$  évalue du mieux possible ces pluies à partir des données observées aux postes. Cette tendance des données du CRU à surestimer légèrement les pluies est confirmée par leur comparaison avec les données des stations de Bol et Massakori : alors que le demi-degré carré sud se situe presque entièrement plus au nord que Massakori (fig. 8) et devrait donc présenter une pluie moyenne inférieure à celle de cette station,  $P3_{sud}$  est légèrement supérieur à  $P(\text{Massakori})$  sur la période 1951-1989 (moyennes respectives : 438 et 433 mm/an) ; alors que le demi-degré carré nord se situe entièrement plus au nord que Bol (fig. 8) et devrait donc présenter une pluie moyenne

nettement inférieure à celle de cette station,  $P3_{nord}$  est globalement supérieur à  $P(Bol)$  sur la période 1951-1989 (moyennes respectives : 355 et 293 mm/an).

### 3.4 Conclusion concernant les données de précipitations

Le pas de temps mensuel et la très longue extension des séries  $P3$  du CRU quasiment à jour (1901-2015), leur obtention gratuite ainsi que leur assez bonne corrélation au pas de temps annuel avec  $P2$  sur la période 1948-1989 ( $R^2 = 0.83$  pour la partie sud et  $R^2 = 0.78$  pour la partie nord) présentent un grand intérêt pour l'utilisation de  $P3_{nord}$  et  $P3_{sud}$  en entrée du modèle du lac à la place de  $P1_{nord}$  et  $P1_{sud}$ . On peut cependant préconiser une légère correction préalable de ces données pour annuler en moyenne leur tendance à surestimer les pluies sur le lac. Les corrections à effectuer sont déduites des relations entre les valeurs annuelles  $P3$  et  $P2$  représentées sur les figures 14 et 15 pour les parties sud et nord du lac. Les lames précipitées mensuelles corrigées  $P3mc_{sud}$  et  $P3mc_{nord}$  à utiliser comme données de base pour générer les intensités pluviométriques en entrée du modèle seraient alors les suivantes :

$$P3mc_{sud}(i, j) = P3m_{sud}(i, j) \times \left( 0.8107 + 55.2326 \left/ \sum_{j=1}^{j=12} P3m_{sud}(i, j) \right. \right)$$

$$P3mc_{nord}(i, j) = P3m_{nord}(i, j) \times \left( 0.7246 + 46.1444 \left/ \sum_{j=1}^{j=12} P3m_{nord}(i, j) \right. \right)$$

avec  $P3m_{sud}(i, j)$  la pluie mensuelle du mois  $j$  de l'année  $i$  donnée par le CRU pour le demi degré carré sud centré sur 13.25° N, 14.75°E et  $P3m_{nord}(i, j)$  la pluie mensuelle du mois  $j$  de l'année  $i$  donnée par le CRU pour le demi degré carré nord centré sur 13.75° N, 14.75°E.

## 4 Données concernant le niveau du lac (régime naturel observé)

En plus des cotes observées à la station de Nguigmi de 1967 à 1973, qui avaient pu être utilisées pour la mise au point du modèle hydrologique du lac Tchad publié en 2011, on dispose désormais des cotes observées aux stations de Kindjéria et MalamFatori de 1973 à 1977, qui décrivent elles aussi l'évolution du niveau dans la cuvette nord du lac.

Ces deux nouvelles chroniques sont parfaitement cohérentes à quelques centimètres près sur leur période commune (juillet à septembre 1973) avec celle de Nguigmi, si on les réfère aux altitudes IGN de zéro d'échelle mentionnées par Olivry et al (1996) : 274.18 m à Kindjéria et 270.98 m à Malamfatori. Mais les données de Malamfatori et surtout celles de Kindjéria montrent que le modèle surestime sensiblement le niveau de plan d'eau dans la cuvette nord sur la période de septembre 1974 à octobre 1977 (fig. 16). On remarque par ailleurs une divergence importante des cotes entre les deux stations sur cette période, pouvant correspondre éventuellement à une déconnexion des plans d'eau ou à un problème de calage des échelles. On notera à ce sujet que d'après Olivry et al (1996), le limnigramme du premier semestre 1975 est entièrement reconstitué pour Kindjéria (sur la base des dates de retour de l'eau dans la région) et qu'à partir du 29/08/1975 les observations de cette station correspondent à un nouveau limnigraphe installé à environ 1 km de l'ancienne installation. Jusqu'à plus ample informé, on considérera les chroniques de niveau observé à Kindjéria et Malamfatori, malgré leurs discordances, comme représentatives dans leur totalité du niveau de l'eau dans la cuvette nord.

## 5 Fichiers Excel de préparation des chroniques de flux utilisables en entrée du modèle du lac Tchad

---

### 5.1 Chroniques journalières de débit

Le but du fichier nommé "**préparation des débits en entrée du modèle lac Tchad.xls**" est l'élaboration et la mise à jour de trois chroniques de débit moyen journalier concernant le Chari, l'El Beid et la Komadougou, basées sur des chroniques de données à différents pas de temps saisies pour ces trois cours d'eau et sur d'éventuelles reconstitutions automatiques de données manquantes.

#### 5.1.1 Feuille "Données débit"

Les données disponibles (observées ou précédemment reconstituées) doivent être saisies dans cette feuille :

- débits moyens journaliers pour le Chari à N'Djamena (si possible avec codes d'origine)
- débits moyens mensuels pour le Chari à N'Djamena, l'El Beid et la Komadougou.

Dans cette même feuille doivent être saisies certaines options concernant le choix de la méthode utilisée pour reconstituer des débits moyens journaliers à partir des débits moyens mensuels. Les hydrogrammes représentés sur la partie droite de la feuille peuvent guider le choix de ces options.

Les différentes méthodes utilisées pour la reconstitution de données manquantes (mensuelles pour Komadougou et El Beid; journalières pour les trois cours d'eau) sont détaillées ci-dessous pour chaque cours d'eau.

#### 5.1.2 Feuille "calculs Chari"

Cette feuille produit une chronique de débit moyen journalier pour le Chari à N'Djamena, basée sur les données journalières saisies dans la feuille "Données débit", dont les lacunes sont éventuellement reconstituées par une des méthodes suivantes selon les options choisies dans la feuille "Données débit".

**La première méthode**, qui est la plus précise (voir plus bas), consiste à utiliser l'hydrogramme moyen de la période 1950-2015 (fig. 6), dont chaque débit journalier ( $Q_{moy}(i,j)$  pour le jour  $j$  du mois  $i$ ) est éventuellement corrigé par un facteur multiplicatif  $KO$  pour respecter des données de débit moyen mensuel quand celles-ci existent. Le facteur  $KO$  évolue linéairement entre le 1er et le 15 du mois et entre le 15 et le dernier jour  $N$  du mois, selon la logique ci-dessous :

Soit  $R(k,i)$  l'hydraulicité du mois  $i$  de l'année  $k$ , définie par  $R(k,i) = Q_{mens}(k,i)/Q_{mensmoy}(i)$  où  $Q_{mens}(k,i)$  est le débit moyen mensuel connu du mois  $i$  de l'année  $k$  et  $Q_{mensmoy}(i)$  la valeur moyenne mensuelle de  $Q_{moy}(i,j)$  (c'est à dire la valeur moyenne interannuelle du débit moyen du mois  $i$ ). Quand  $Q_{mens}(k,i)$  n'est pas connu, l'hydraulicité  $R(k,i)$  du mois  $i$  est supposée égale à 1.

Pour chaque débit à reconstituer (jour  $j$  du mois  $i$  de l'année  $k$ ), un débit intermédiaire  $Q1(k,i,j)$  est obtenu ainsi :

$$Q1(k,i,j) = Q_{moy}(i,j) \times K(k,i,j)$$

où  $K(k,i,j)$  est un facteur correctif qui varie linéairement du jour 1 au jour 15 puis du jour 15 au dernier jour  $N(i)$  du mois  $i$  de l'année  $k$ , et dont la valeur moyenne pendant le mois  $i$  de l'année  $k$  est égale à  $R(k,i)$ . Ce facteur correctif est défini ainsi pour vérifier ces propriétés :

$$K(k,i,1) = K(k,i-1,N(i-1)) = [R(k,i-1)+R(k,i)]/2$$

$$K(k,i,15) = (2N(i) \times R(k,i) - 15K(k,i,1) - (N(i)-14) \times K(k,i,N(i))) / (N(i)-1)$$

$$K(k,i,j) = K(k,i,1) + (K(k,i,15) - K(k,i,1)) \times (j-1) / 14 \quad \text{pour } j \text{ entre 2 et 14}$$

$$K(k,i,j) = K(k,i,15) + (K(k,i,N) - K(k,i,15)) \times (j-15) / (N(i)-15) \quad \text{pour } j \text{ entre 16 et } N(i)-1$$

Les débits reconstitués  $Q(k,i,j)$  basés sur  $Qmoy(i,j)$  et respectant le débit mensuel connu  $Qmens(k,i)$  sont obtenus ainsi :

$$\begin{aligned} Q(k,i,j) &= Q1(k,i,j) \times Qmens(k,i) / (\sum Q1(k,i,j) / N(i)) \\ &= Qmoy(i,j) \times K(k,i,j) \times Qmens(k,i) / (\sum (Qmoy(i,j) \times K(k,i,j)) / N(i)) \\ &= Qmoy(i,j) \times KO(k,i,j) \end{aligned}$$

avec  $KO(k,i,j) = K(k,i,j) \times Qmens(k,i) / (\sum (Qmoy(i,j) \times K(k,i,j)) / N(i))$ .

**Les deux autres méthodes** de reconstitution des débits moyens journaliers manquants du Chari consistent à utiliser uniquement les valeurs connues de débit moyen mensuel, de l'une ou l'autre des façons suivantes :

- les valeurs moyennes mensuelles sont affectées au jour 15 des différents mois, entre lesquels les débits moyens journaliers sont évalués par interpolation linéaire. Cette méthode moins précise que la précédente (voir plus bas) reproduit un hydrogramme de forme assez proche de la réalité, mais dont les valeurs moyennes mensuelles ne respectent pas exactement les débits moyens mensuels connus;
- les valeurs moyennes mensuelles sont utilisées en marches d'escalier : le débit moyen journalier est supposé chaque jour égal au débit moyen mensuel. Moins précise que les deux précédentes (voir ci-dessous), cette méthode respecte par principe les débits moyens mensuels connus, mais avec un hydrogramme de forme assez artificielle.

**Les trois méthodes** proposées pour reconstituer des débits moyens journaliers du Chari à N'Djamena à partir des débits moyens mensuels produisent les  $NSE$  suivants par rapport à la série complète de débits journaliers sur la période 1950-2015, de la plus précise à la moins précise :

- reconstitution à partir de l'hydrogramme annuel moyen (période 1950-2015) corrigé en fonction des débits moyens mensuels connus :  $NSE = 0.99700$
- reconstitution par interpolation linéaire entre débits moyens mensuels connus affectés au 15 de chaque mois :  $NSE = 0.99070$
- reconstitution à partir des débits moyens mensuels connus considérés en marches d'escalier :  $NSE = 0.96351$

### 5.1.3 Feuille "calculs Komadougou"

Chaque lacune de débit moyen mensuel est d'abord remplacée par la moyenne interannuelle de débit moyen mensuel du mois concerné (avant 1978 : moyenne sur la période de mai 1963 à décembre 1971 ; à partir de 1978 : moyenne sur la période de mai 1984 à mars 2000).

Les débits moyens journaliers sont ensuite intégralement reconstitués à partir de la série complète des débits moyens mensuels. En fonction des options choisies dans la feuille "Données débit", la méthode utilisée consiste à faire des interpolations linéaires entre débits mensuels affectés au 15 de chaque mois, ou à utiliser ceux-ci en marches d'escalier.

### 5.1.4 Feuille "calculs El Beid"

Chaque débit moyen mensuel manquant est d'abord reconstitué ainsi :

- sur la période de mai 1953 à avril 1969 (période partiellement observée), on prend la valeur moyenne interannuelle  $Q_{mensmoy}$  du débit moyen mensuel du mois concerné (évaluée sur les observations de mai 1953 à avril 1969), multiplié par un facteur  $K$  vérifiant :
  - de mars à août,  $K = 1$
  - de septembre à février (hors décembre, toujours observé),  $K = Q_{mens}(décembre)/Q_{mensmoy}(décembre)$ , avec  $Q_{mens}(décembre)$  le débit moyen mensuel observé de décembre
- en dehors de la période de mai 1953 à avril 1969, le débit moyen mensuel  $Q(i)$  reconstitué pour le mois  $i$  vaut  $Q_{mensmoy}(i) \times Q_{annuel}/Q_{annuelmoy}$  où  $Q_{annuelmoy}$  est la valeur moyenne interannuelle du débit (évaluée sur les observations de mai 1953 à avril 1969) et où  $Q_{annuel}$  est le débit moyen annuel de mai à avril estimé à partir de celui du Chari à N'Djamena ( $Q_{annuel}(\text{Chari})$ ) par la relation suivante (fig.17), calée sur les séries complètes de la période 1953-1968 :

$$Q_{annuel} = 0.000004475(Q_{annuel}(\text{Chari}))^{2.236} \quad (16 \text{ points, NSE} = 0.724)$$

Les débits moyens journaliers sont ensuite intégralement reconstitués à partir de la série complète des débits moyens mensuels. En fonction des options choisies dans la feuille "Données débit", la méthode utilisée consiste à faire des interpolations linéaires entre débits mensuels affectés au 15 de chaque mois, ou à utiliser ceux-ci en marches d'escalier.

### 5.1.5 Feuille "résultats"

Cette feuille donne les chroniques de débits moyens journaliers observés et reconstitués obtenues pour le Chari à N'Djamena, la Komadougou et l'Elbeid, à partir d'une date libre de choix. Chaque débit journalier est exprimé en  $\text{hm}^3/\text{jour}$  et associé à une courte description de son origine. Le nombre cumulé des lacunes subsistant est indiqué, pour permettre d'éviter d'utiliser des séries lacunaires de données en entrée du modèle du lac Tchad.

## 5.2 Chroniques journalières d'intensité de pluie et d'évaporation

Le but du fichier nommé "[préparation des pluies en entrée du modèle lac Tchad.xls](#)" est l'élaboration de deux chroniques d'intensité de pluie au pas de temps journalier concernant respectivement la partie sud et la partie nord du lac Tchad, ainsi que l'élaboration d'une chronique d'intensité d'évaporation au pas de temps journalier concernant la partie sud.

La feuille "**données et options**" permet de saisir deux types de données concernant les précipitations, si possible avec description de leur origine, ainsi qu'un type de données concernant les pertes par évaporation sur la partie sud du lac :

- chroniques de lames précipitées mensuelles  $P3$  du CRU décrites plus haut, concernant le demi degré carré sud et le demi degré carré nord, centrés respectivement sur 13.25N 14.75E et 13.75N 13.75E. Ces chroniques complètes sur la période 1901-2015 peuvent en principe être mise à jour facilement ;
- chroniques de lames précipitées annuelles  $P2$  décrites plus haut pour la partie sud et la partie nord du lac, obtenues pour chaque partie à partir de la répartition de la surface en fonction de la latitude et à partir des relations annuelles moyennes entre latitude et pluie (établies à partir des données aux stations). Ces chroniques établies sur la période 1948-1989 ont peu de chances de pouvoir être complétées ;
- valeur moyenne interannuelle de lame évaporée pour chaque mois de l'année, considérée valable chaque année. En pratique, on utilise les moyennes interannuelles

mesurées à Bol entre 1965 et 1977 par évapotranspiromètre Thornthwaite, données par Olivry et al (1996).

Cette feuille permet également de choisir des options concernant la méthode utilisée pour l'obtention des chroniques journalières d'intensité de pluie et d'évaporation à partir des données saisies :

- choix de  $P3$  ou  $P2$  comme chronique prioritaire de données, complétée si nécessaire par l'autre chronique ;
- choix de corriger ou non les données de  $P3$  (selon le mode de correction présenté plus haut, destiné à éviter en moyenne la surestimation des pluies par  $P3_{sud}$  et  $P3_{nord}$ , constatée par rapport à  $P2_{sud}$  et  $P2_{nord}$  sur la période 1948-1989). La correction de  $P3_{sud}$  ou  $P3_{nord}$  est appliquée uniquement sur les années présentant des données mensuelles complètes d'avril à novembre.
- choix d'obtenir les chroniques journalières d'intensité de pluie (exprimée en mm/mois), soit par interpolation linéaire entre valeurs de précipitation mensuelle affectées aux 15 des mois, soit à partir de ces valeurs considérées en marches d'escalier. Ce choix s'applique également au mode de calcul de la chronique journalière d'intensité d'évaporation à partir des lames évaporées mensuelles.
- date de début souhaitée pour les chroniques journalières d'intensité de pluie et d'évaporation

**La feuille "calculs"** élabore les chroniques journalières d'intensité de pluie à partir des données de lame précipitée et des options saisies dans la feuille "données et options".

Pour obtenir des pluies mensuelles, les pluies annuelles  $P2$  sont distribuées suivant les répartitions moyennes interannuelles données par Olivry et al (1996) pour Bol (partie sud : 0% de novembre à avril, 2.0% en mai, 3.6% en juin, 22.5% en juillet, 55% en août, 15.3% en septembre, 1.6% en octobre) et pour Nguigmi (partie nord : 0% de novembre à avril, 3.3% en mai, 2.8% en juin, 26.4% en juillet, 58.5% en août, 8.5% en septembre, 0.5% en octobre).

Les précipitations mensuelles  $P3$  et  $P2$  sont ensuite combinées en fonction de la priorité choisie, pour obtenir des chroniques les plus complètes possibles de précipitations mensuelles sur la partie sud et la partie nord. Ces chroniques sont enfin utilisées pour élaborer les chroniques journalières d'intensité de pluie selon la méthode choisie.

La chronique journalière d'intensité d'évaporation est calculée de la même façon dans cette feuille, à partir des lames évaporées mensuelles moyennes interannuelles.

**La feuille "résultats"** donne enfin les chroniques journalières d'intensité de pluie et d'évaporation utilisables en entrée du modèle du lac Tchad, avec l'indication pour la pluie de l'origine de chaque valeur et du nombre de lacunes cumulé depuis le début des chroniques (attention : les chroniques destinées à être utilisées en entrée du modèle du lac ne doivent pas comporter de lacune, la première lacune rencontrée imposant la date de fin de modélisation).

## 6 Nouveau calage des paramètres du modèle hydrologique du lac Tchad

### 6.1 Justification du nouveau calage

Les résultats du modèle hydrologique du lac Tchad publiés en 2011 dans le Journal des Sciences Hydrologiques sont obtenus avec un jeu de paramètres dont les valeurs ont été fixées à partir d'observations pour deux d'entre eux (altitude des seuils :  $HCO_{sa} = 279.30$  m et  $HCO_{sn} = 279.00$  m), alors que pour les sept autres ( $AO_{sa}$ ,  $A1_{sa}$ ,  $AO_{sn}$ ,  $A1_{sn}$ ,  $ZR$ ,  $H1_a$  et  $I$ ) ces valeurs ont été optimisées pour que le modèle reproduise au mieux sur la période 1970-1990 les données observées suivantes :

- niveau dans la cuvette sud à Kalom, observé à la station et déduit des observations à la station de Kirinawa (données disponibles de 1973 à 1984) ;
- niveau dans l'archipel mesuré à Berim (données disponibles de 1956 à 2008) ;
- niveau dans la cuvette nord mesuré à Nguigmi (données disponibles de 1967 à 1973) ;
- superficie de plan d'eau dans la cuvette nord, mesuré à partir d'images satellitaires (données disponibles de 1987 à 2001).

Le modèle ainsi calé et utilisé avec les chroniques de flux entrants élaborées en 2010 reproduit assez correctement l'ensemble de ces données observées, y compris en dehors de la période de calage 1970-1990. Il reproduit également assez bien la chronique de niveau dans la cuvette sud établie par mesures satellitaires (Topex poseidon) sur la période 1992-2005, non exploitée pour le calage des paramètres. Mais à partir de septembre 1974, il surestime malheureusement de façon sensible les niveaux observés à Malamfatori et surtout Kindjeria dans la cuvette nord, qui sont désormais disponibles (fig. 16).

Par ailleurs, comparées aux versions de 2010, les nouvelles chroniques de débit (basées sur des observations journalières pour le Chari) et de pluie (basées sur les données corrigées du CRU) décrites plus haut modifient de façon non négligeable les flux totaux entrant dans le lac, avec un accroissement moyen de  $1.22 \text{ km}^3/\text{an}$  soit 3.9 % sur la période 1956-2009 (tableau 1). Cet accroissement est essentiellement dû à la nouvelle évaluation des pluies sur le lac par une méthode plus précise que la méthode de Thyssen anciennement utilisée, qui introduisait un biais du fait de la répartition des postes et du fort gradient nord-sud de la pluviométrie.

Les nouvelles données de niveau observé dans la cuvette nord, qui sont mal reproduites par le modèle calé en 2010, ainsi que la nouvelle version des chroniques de flux qui modifient sensiblement certaines données utilisées en entrée du modèle, justifient un nouveau calage des paramètres du modèle.

### 6.2 Nouveau calage des paramètres

Le modèle est utilisé avec les nouvelles chroniques de flux en entrée (version 2018). Parmi celles-ci, les chroniques journalières d'intensité de pluie et de pertes par évaporation sont obtenues par interpolation entre les valeurs mensuelles affectées au 15 de chaque mois.

Comme pour le précédent calage, les niveaux de seuil  $HCO_{sa}$  entre cuvette sud et archipel et  $HCO_{sn}$  entre cuvette sud et cuvette nord restent fixés respectivement à 279.30 m et 279.00 m. Les sept autres paramètres ( $AO_{sa}$ ,  $A1_{sa}$ ,  $AO_{sn}$ ,  $A1_{sn}$ ,  $ZR$ ,  $H1_a$  et  $I$ ) sont optimisés avec le solveur d'Excel pour maximiser la moyenne des  $NSE$  concernant les quatre variables suivantes, avec une simulation initialisée au 01/01/1956 (cote uniforme dans le lac, égale à 282.64 m) :

- $H_s$  (niveau dans la cuvette sud, 506 valeurs observées à Kalom et Kirinawa de 1973 à 1984 et mesurées par satellite de 1992 à 2005) ;
- $H_a$  (niveau dans l'archipel, 885 valeurs observées à Bérim de 1956 à 2008) ;
- $H_n$  (niveau dans la cuvette nord, 273 observations à Nguigmi de 1967 à 1973, Kindjeria de 1973 à 1977 et Malamfatori de 1973 à 1977);
- $S_n$  (superficie de plan d'eau dans la cuvette nord, 105 valeurs mesurées par satellite de 1986 à 2001).

Le nouveau jeu de valeurs optimisées pour ces paramètres est donné dans le tableau 2. Par rapport aux valeurs calées en 2010, les nouveaux paramètres sont inchangés ou peu modifiés pour  $AO_{sn}$ ,  $A1_{sn}$ ,  $ZR$  et  $H1_a$ .

Les paramètres  $AO_{sn}$  et  $A1_{sn}$  subissent des modifications plus importantes, qui équivalent à une modification du coefficient de Strickler sur le chenal théorique entre nord et sud pouvant aller de -24% à +36% selon l'épaisseur de lame d'eau moyenne modélisée dans ce chenal.

Mais le changement le plus important concerne l'intensité d'infiltration  $I$ , qui augmente de 155% en passant de 0.281 mm/j (soit 103 mm/an) à 0.718 mm/j (soit 262 mm/an). Cette différence est principalement due à la pluviométrie plus importante caractérisant la nouvelle série de flux entrant. Mais elle s'explique aussi par la prise en compte des niveaux observés de 1973 à 1977 dans la cuvette nord, qui entraînent un niveau modélisé globalement plus bas dans cette partie du lac, avec donc une diminution de la superficie. La diminution des pertes par évaporation qui en découle doit logiquement être compensée elle aussi par une augmentation de l'infiltration.

Alors qu'elle ne représentait en moyenne que 4.5% des flux entrants avec les paramètres et flux de 2010, l'infiltration modélisée représente 10.7% des flux entrants avec les paramètres et flux de 2018 (tableau 3).

La précision moyenne des niveaux et superficie modélisés est décrite dans le tableau 4 pour le modèle utilisé avec les versions de jeux de paramètres et flux de 2010 et de 2018. Par rapport au modèle utilisant les versions de 2010 de paramètres et flux, le modèle utilisant les versions de 2018 présente des performances peu modifiées pour les niveaux dans la cuvette sud et l'archipel, légèrement moins bonnes pour la superficie de plan d'eau dans la cuvette nord et globalement meilleures pour le niveau dans la cuvette nord (moins bons par rapport aux niveaux observés à Nguigmi et meilleurs par rapport aux niveaux observés à Kindjéria et Malamfatori, fig. 16 et 16 bis).

Par rapport aux versions de 2010 des paramètres et flux, l'utilisation des versions de 2018 dans le modèle entraîne les principales modifications suivantes pour les variables en sortie :

- le niveau modélisé dans la cuvette sud est globalement abaissé avant novembre 1973, en moyenne de 18.5 cm (fig. 18)
- le niveau dans l'archipel est globalement abaissé avant novembre 1973, en moyenne de 20.6 cm (fig. 18)
- le niveau modélisé dans la cuvette nord est globalement abaissé avant novembre 1981, en moyenne de 21.3 cm (fig. 19).
- l'abaissement important du niveau dans la cuvette nord de 1974 à 1977 est légèrement mieux représenté mais demeure encore sous-estimé par le modèle.

## 7 Nouvelle implémentation du modèle hydrologique du lac Tchad sous Excel

---

La nouvelle implémentation du modèle sous Excel (fichier [Modèle Tchad J.xls](#)) réalise exactement les mêmes calculs que la version initiale dont les résultats ont été publiés en 2011. La seule nouveauté concerne l'interface utilisateur, qui offre les possibilités suivantes regroupées dans une unique feuille :

- saisie des conditions initiales du calcul (date, niveau dans chacune des trois parties du lac) ;
- choix du jeu de paramètres du modèle (version 2010 ou version 2018) ;
- saisie des chroniques journalières de flux utilisées en entrée du modèle (somme des débits du Chari et de l'El Beid ; débit de la Komadougou ; intensité de pluie sur la partie sud du lac ; intensité de pluie sur la cuvette nord ; intensité d'évaporation sur la partie sud du lac). En pratique, le jeu de données de 2010 (du 01/05/1954 au 30/04/2011) et celui de 2018 (du 01/01/1934 au 30/04/2016) sont sauvegardés dans une feuille protégée du fichier et peuvent être placés l'un comme l'autre dans la feuille d'interface pour leur utilisation en entrée du modèle ;
- saisie d'un facteur multiplicatif s'appliquant à toutes les valeurs journalières d'intensité d'évaporation sur la partie sud, contenues dans la chronique de données utilisées en entrée du modèle ;
- saisie d'un hydrogramme annuel d'apports supplémentaires s'additionnant au débit du Chari en entrée du modèle, sous forme de 12 valeurs de débit moyen mensuel. Cet hydrogramme, à partir duquel des débits moyens journaliers sont générés automatiquement par interpolation linéaire entre valeurs affectées au milieu des mois ou sous forme de marches d'escalier (au choix), permet de simuler d'éventuels transferts d'eau depuis le bassin de l'Oubangui, identiques pour toutes les années ;
- saisie de valeurs observées de niveau et de superficie de plan d'eau, destinées à être comparées aux variables en sortie du modèle

Les résultats suivants sont par ailleurs édités dans la feuille d'interface :

- chroniques journalières de niveau, volume et superficie de plan d'eau modélisés pour chaque partie du lac ;
- chroniques journalières de débit modélisé : débordant vers le Bahr el Gazal et échangés entre la cuvette sud et les autres parties du lac ;
- performances du modèle évaluées par comparaison (*NSE*) des valeurs modélisées et des valeurs observées de niveaux et superficie, sur une période libre de choix ;
- chroniques des valeurs minimales annuelles de niveau et de superficie modélisés sur chaque partie du lac, calculées sur une partie de l'année libre de choix ;
- chroniques des valeurs maximales annuelles de niveau et de superficie modélisés sur chaque partie du lac, calculées sur une partie de l'année libre de choix ;
- chronique des durées annuelles d'assèchement de la cuvette nord (nombre de jours où la superficie de plan d'eau est inférieure à un seuil fixé librement)
- chroniques des valeurs moyennes annuelles de débit modélisés correspondant aux différents flux (apports des tributaires, précipitations, évaporation, infiltration, stockage, débordement), calculées sur une partie de l'année libre de choix ;

- valeurs moyennes interannuelles calculées sur une période libre de choix, pour chacune des chroniques de valeurs annuelles citées ci-dessus.

## 8 Références

---

- Bader J-C. 2018. Modèle hydrologique du lac Tchad, version J IRD/G-Eau, Montpellier, 27/06/2018
- Bader J-C., Lemoalle J., Leblanc M. 2011. Modèle hydrologique du Lac Tchad. *Hydrological Sciences Journal* 56(3): 411-425.
- Bouchez, C., J. Goncalves, P. Deschamps, C. Vallet-Coulomb, B. Hamelin, J.-C. Doumnang, and F. Sylvestre. 2016. Hydrological, chemical, and isotopic budgets of Lake Chad: a quantitative assessment of evaporation, transpiration and infiltration fluxes. *Hydrology and Earth System Science* 20: 1599-1619
- Lemoalle J. 1991. The hydrology of Lake Chad during a drought period / Eléments d'hydrologie du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). *FAO Fisheries Reports* 445: 54-61.
- Lemoalle J., Bader J-C. & Leblanc M. 2008. The variability of Lake Chad: hydrological modelling and ecosystem services. World Water Congress, Montpellier 2008, [www.iwra.org/congress/2008/index.php?searchabstract=lemoalle&page=abstract\\_list&SubmitSearchAbstract=Search](http://www.iwra.org/congress/2008/index.php?searchabstract=lemoalle&page=abstract_list&SubmitSearchAbstract=Search)
- Lemoalle J., Bader J-C., Leblanc M., Sedick A. 2012. Recent changes in Lake Chad: observations, simulations and management options (1973-2011). *Global and Planetary Change* 80-81: 247-254.
- Magrin, G., Lemoalle J., Pourtier R. (eds). 2015. Atlas du lac Tchad, *Passages, Numéro spécial* 183, 1-229.
- Vuillaume, G. 1981. Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du Lac Tchad. *Cah. ORSTOM, Hydrol.* 18(1): 23-72.

## 9 Tableaux

Tableau 1 : Flux entrants et sortant sur le lac Tchad sur la période 1956-2009. Comparaison des valeurs moyennes interannuelles obtenues à partir des chroniques de valeurs journalières élaborées en 2010 et en 2018

	apports des précipitations				évaporation	apports des cours d'eau		apports
	cuvette sud et archipel		cuvette nord		cuvette sud	Chari + El Beid	Komadougou	totaux
	(mm/an)	(km <sup>3</sup> /an)	(mm/an)	(km <sup>3</sup> /an)				
version 2010	277,87	1,888	220,19	1,416	2168	27,427	0,501	31,232
version 2018	400,71	2,582	298,43	1,759	2168	27,610	0,501	32,452
écart	122,84	0,694	78,24	0,343	0	0,183	0,000	1,220
écart relatif	0,442	0,368	0,355	0,242	0,000	0,007	0,000	0,039

Note: Dans les deux cas, les intensités journalières de pluie et d'évaporation sont obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs mensuelles affectées au 15 de chaque mois. Le débit moyen des précipitations est calculé par le modèle du lac (avec les paramètres calés pour les données utilisées), par intégration des produits de superficies de plan d'eau par intensité de pluie. Le niveau modélisé avec les paramètres et données de 2018 étant légèrement inférieur en moyenne au niveau modélisé avec les paramètres et données de 2010, l'augmentation relative des précipitations de la version de 2018 par rapport à celles de la version de 2010 est légèrement moins importante en débit (km<sup>3</sup>/an) qu'en intensité (mm/an).

Tableau 2 : Paramètres du modèle hydrologique du lac Tchad.

domaine	échanges sud-archipel			échanges sud-nord			cuvette nord	archipel	infiltration
paramètre	altitude de seuil			altitude de seuil			épaisseur de réservoir sol	altitude de fond	intensité
symbole	$HCO_{sa}$	$A1_{sa}$	$AO_{sa}$	$HCO_{sn}$	$A1_{sn}$	$AO_{sn}$	ZR	$H1_a$	I
unité	m	m <sup>-1/6</sup> s <sup>-1</sup>	m <sup>5/6</sup> s <sup>-1</sup>	m	m <sup>-1/6</sup> s <sup>-1</sup>	m <sup>5/6</sup> s <sup>-1</sup>	m	m	mm/j
version 2010	279.30	111.356	0	279.00	-9.81	241.88	1.209	277.711	0.281
version 2018	279.30	106.406	0	279.00	22.90	184.02	1.091	277.686	0.718

Note: Comparaison des versions de 2010 (valeurs calées sur la période 1970-1990 avec les anciennes chroniques de flux entrants) et de 2018 (valeurs calées sur la période 1956-2008 avec les nouvelles chroniques de flux entrants et avec prise en compte des cotes observées à Kindjéria et Malamfatori dans la cuvette nord)

Tableau 3 : bilan des flux modélisés moyens sur le lac Tchad sur la période du 01/06/1956 au 31/05/2010, obtenus avec le modèle utilisant les versions de 2010 et 2018 des jeux de paramètres et flux.

version des paramètres et données de flux		apports			pertes			stockage
		cours d'eau	pluie	total	évaporation	infiltration	débordement	
2010	valeur (hm <sup>3</sup> /jour)	76.01	9.05	85.05	84.99	3.80	0.10	-3.85
	pourcentage des apports totaux	89.4%	10.6%	100.0%	99.9%	4.5%	0.1%	-4.5%
2018	valeur (hm <sup>3</sup> /jour)	76.57	11.88	88.45	82.60	9.45	0.06	-3.66
	pourcentage des apports totaux	86.6%	13.4%	100.0%	93.4%	10.7%	0.1%	-4.1%

Note : Le flux stocké est égal à (volume final – volume initial)/(temps final – temps initial) et sa valeur moyenne interannuelle peut être calculée indifféremment par moyenne des valeurs journalières sur toute la période (comme pour les autres variables) ou simplement par sa formule appliquée avec le temps initial et le temps final de la période. La somme des flux sortants (évaporation, infiltration et débordement) et du flux stocké représente bien sûr 100% des flux entrants (cours d'eau et pluie)

Tableau 4 : comparaison des performances du modèle pour la reproduction des niveaux et superficies observées sur le lac Tchad, selon les jeux de paramètres et de données de flux utilisés

variable (niveau (m) ou superficie (km <sup>2</sup> ))		observations			modèle					
		période	effectif	écart type	paramètres : 2010 flux : 2010		paramètres : 2010 flux : 2018		paramètres : 2018 flux : 2018	
erreur type	NSE				erreur type	NSE	erreur type	NSE		
archipel (m)	Bérim	1956-2008	885	1.425	0.399	0.922	0.462	0.895	0.384	0.927
cuv. sud (m)	Kalom	1973-1884	150	0.523	0.223	0.818	0.247	0.777	0.238	0.793
	satellite	1992-2005	356	0.595	0.311	0.727	0.319	0.713	0.315	0.720
	ensemble	1973-2005	506	0.587	0.288	0.760	0.299	0.740	0.294	0.748
cuv. nord (m)	Nguigmi	1967-1973	97	0.988	0.313	0.900	0.377	0.855	0.498	0.746
	Kindjéria	1973-1977	92	0.872	1.363	-1.444	1.880	-3.653	1.156	-0.758
	Malamfatori	1973-1977	84	0.622	0.850	-0.864	1.387	-3.971	0.667	-0.151
	ensemble	1967-1977	273	2.135	0.939	0.806	1.354	0.598	0.822	0.852
cuv. nord (km <sup>2</sup> )	satellite	1986-2001	105	2018	892	0.804	877	0.811	944	0.781

## 10 Figures

Figure 1 : paramètres du modèle de propagation de Lamagat donnant le débit  $Q_2$  du Chari à N'Djamena en fonction du débit  $Q_1$  du Logone à Gana Chad, calés sur la période de mai 1975 à 2009

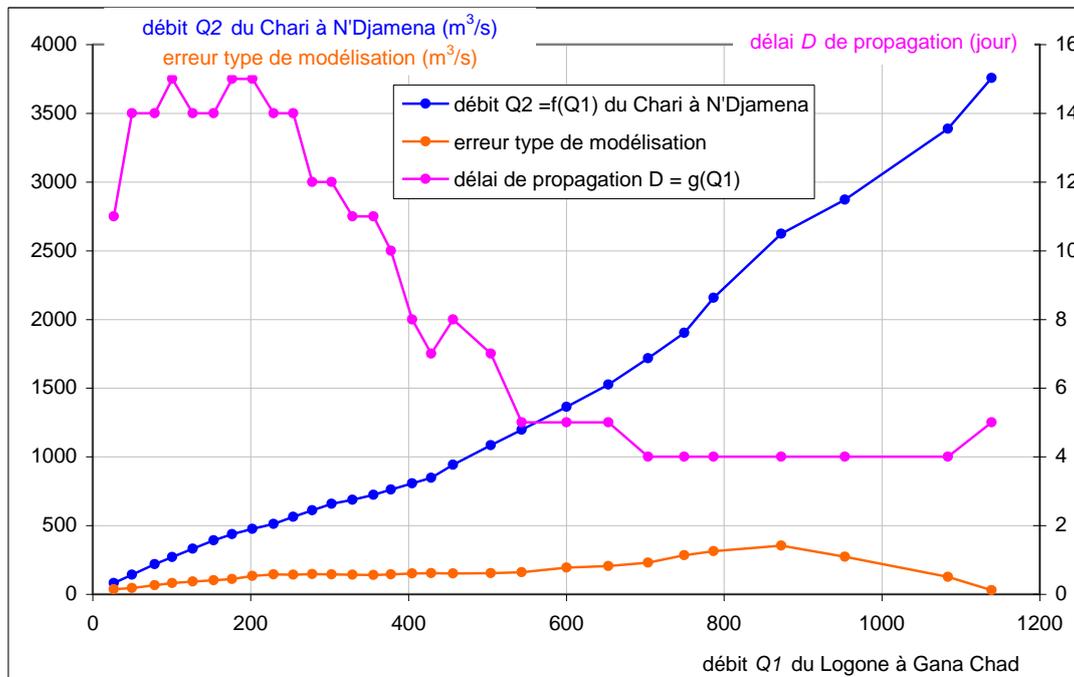


Figure 2 : paramètres du modèle de propagation de Lamagat donnant le débit  $Q_2$  du Chari à N'Djamena en fonction du débit  $Q_1$  du Logone à Gana CM, calés sur la période de mai 1975 à 2009

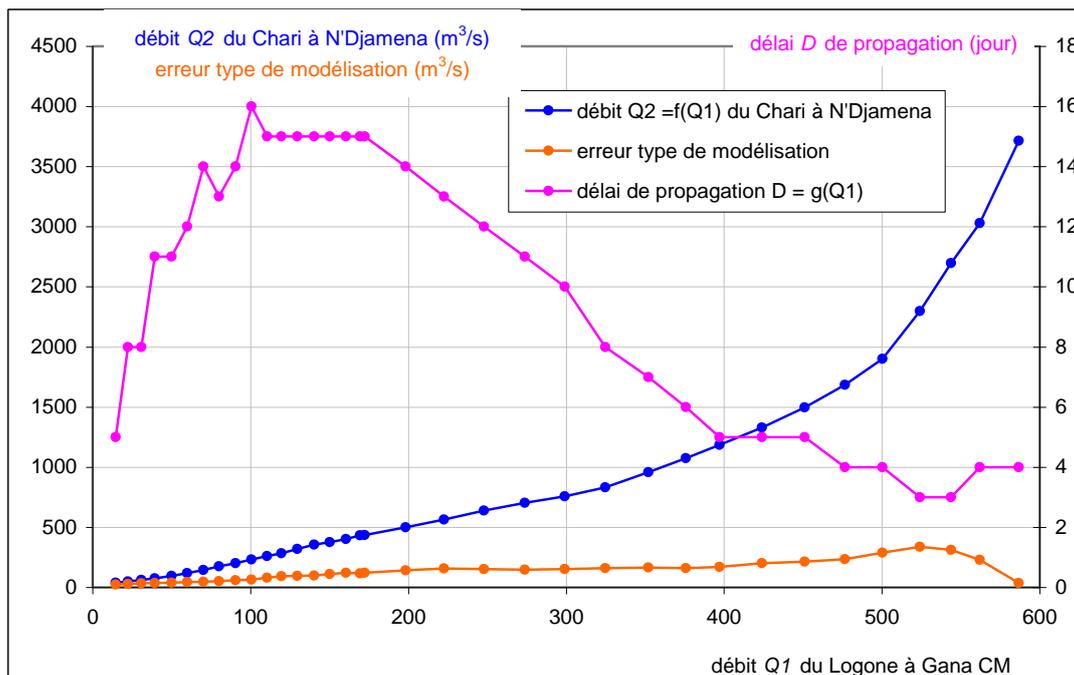


Figure 3 : paramètres du modèle de propagation de Lamagat donnant le débit  $Q_2$  du Chari à N'Djamena en fonction du débit  $Q_1$  du Logone à Bongor Chad, calés sur la période de 1950 à avril 1968

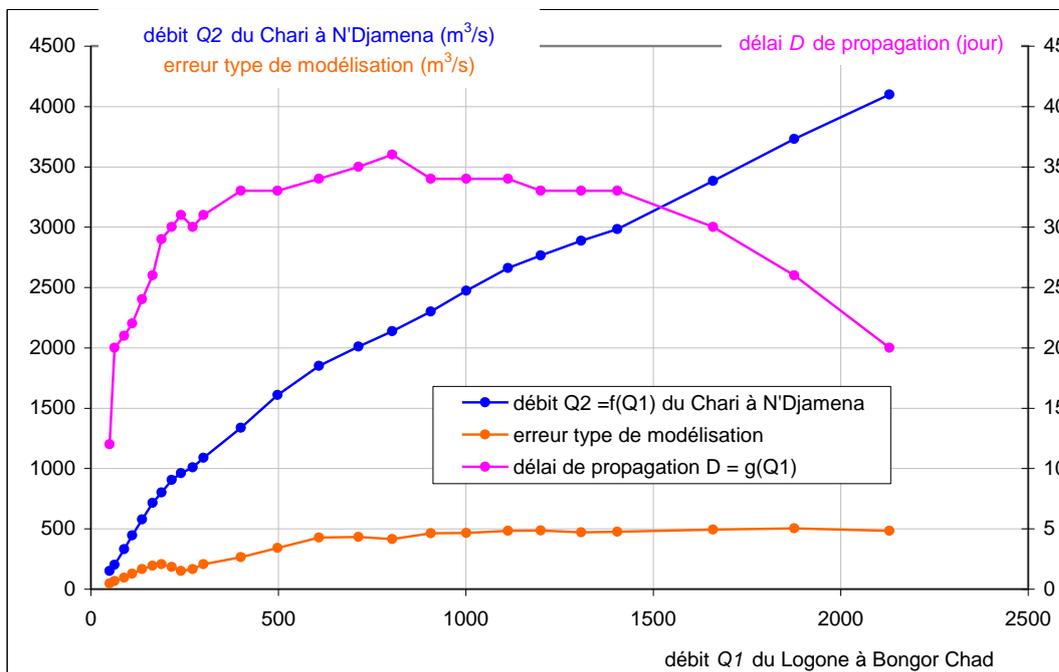
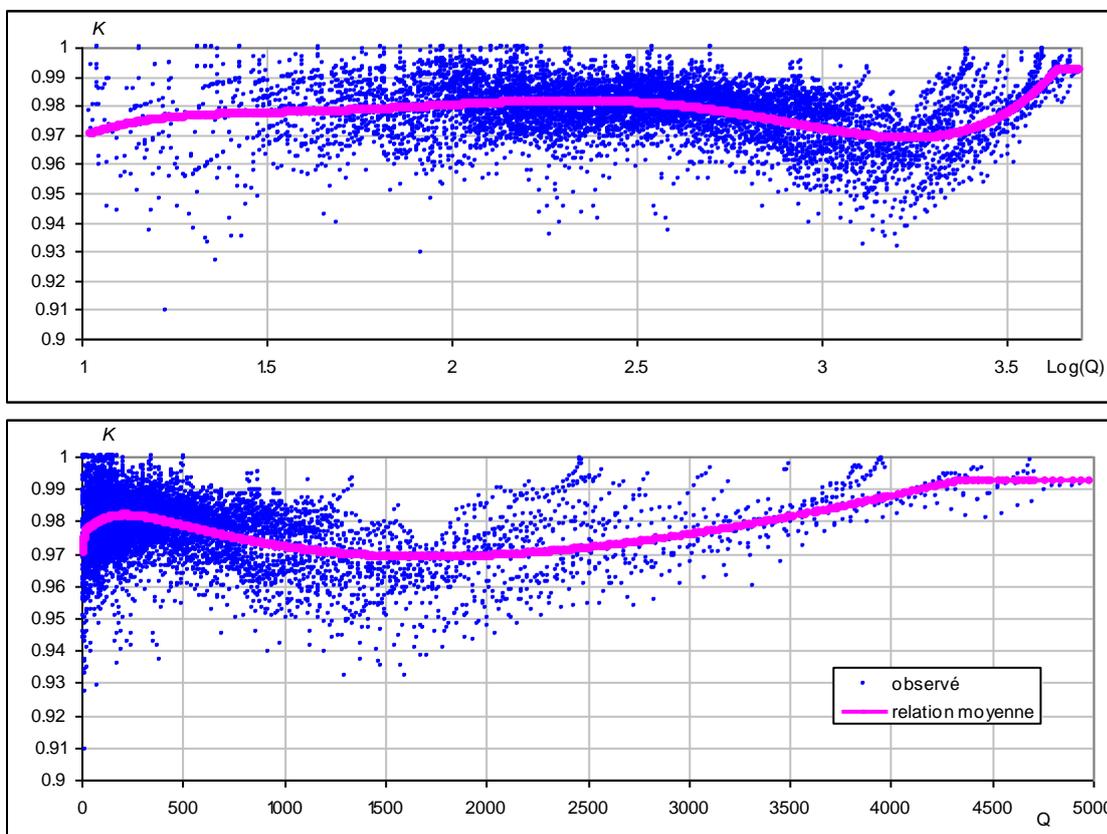
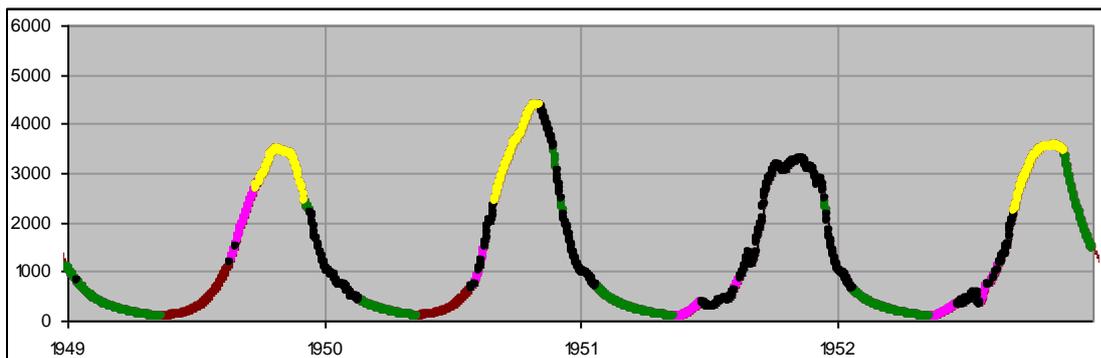
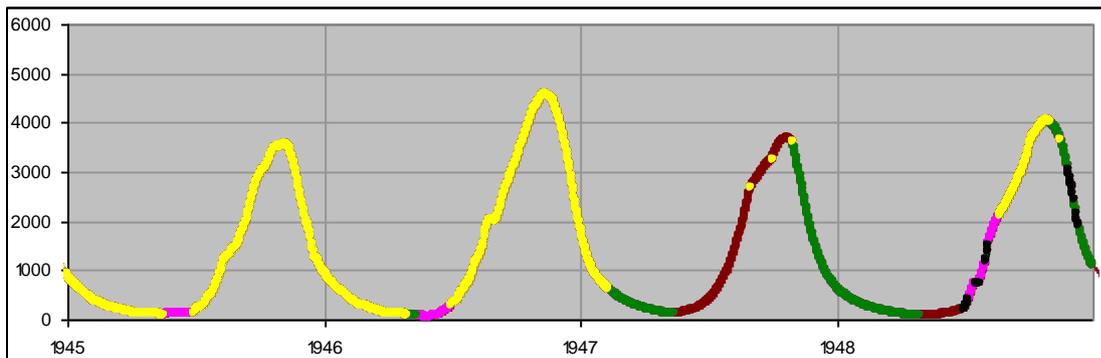
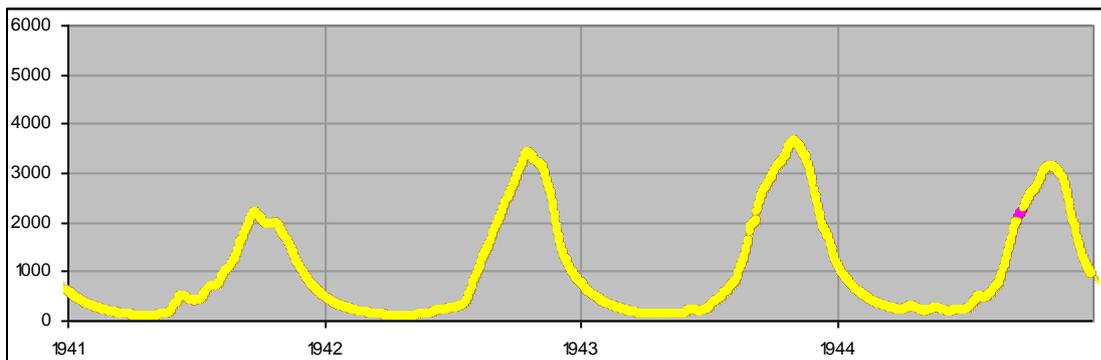
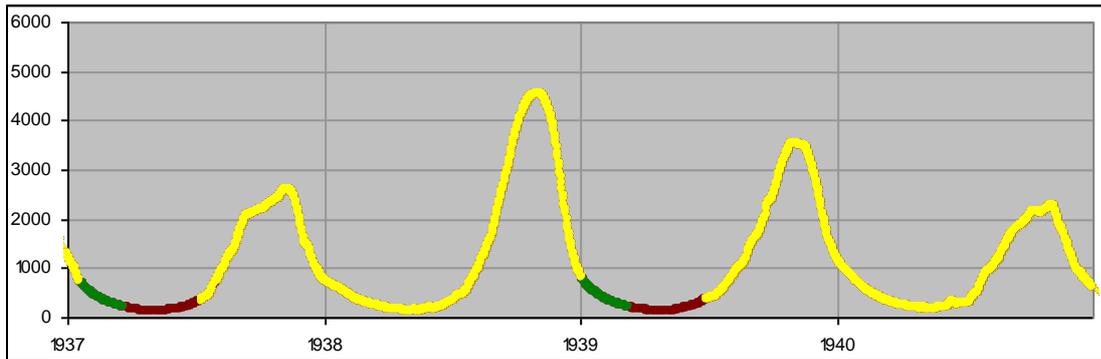
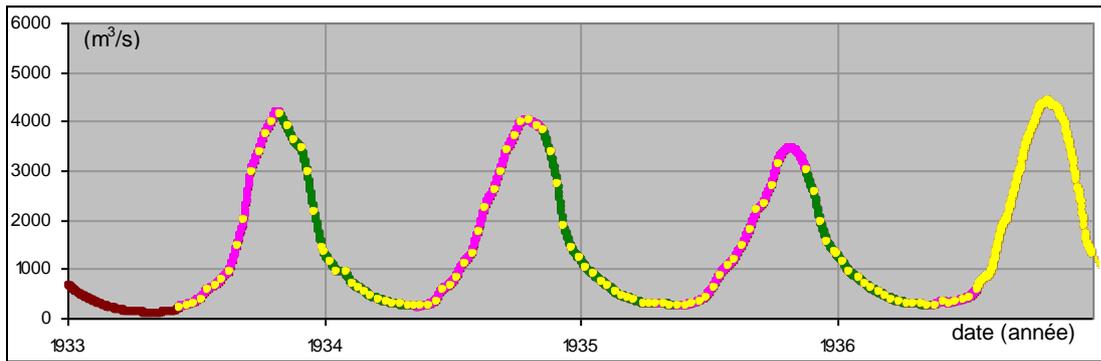
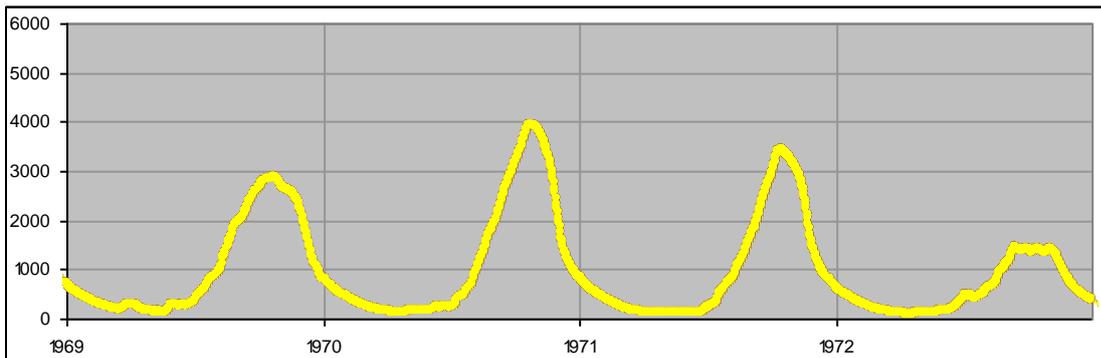
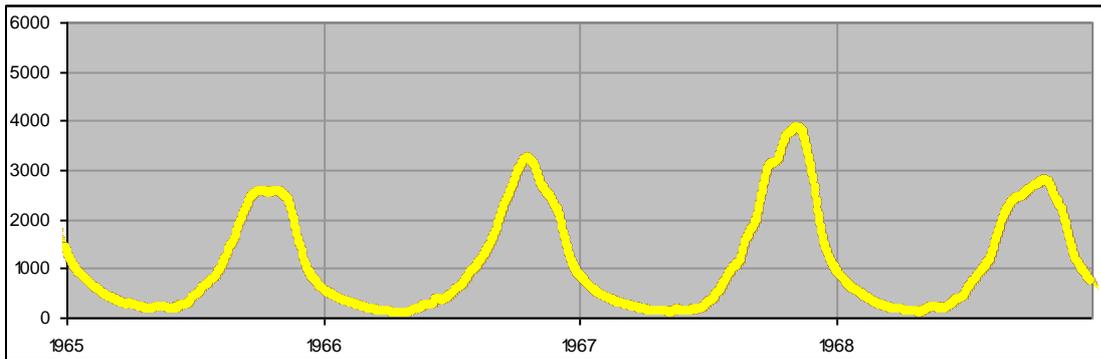
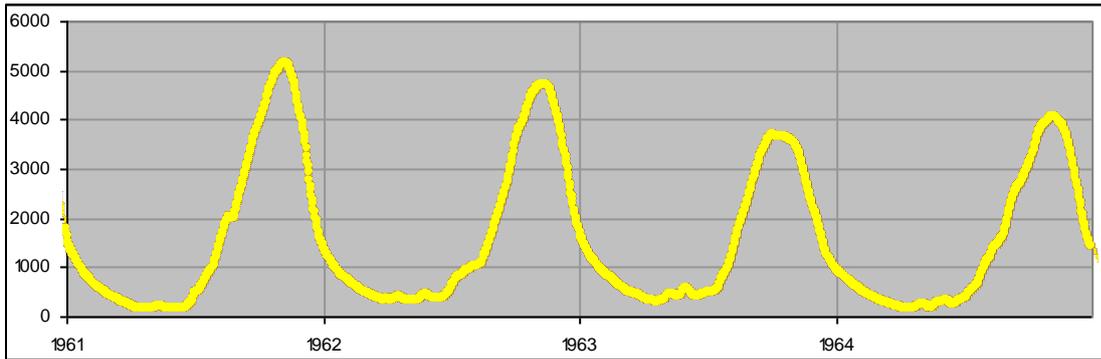
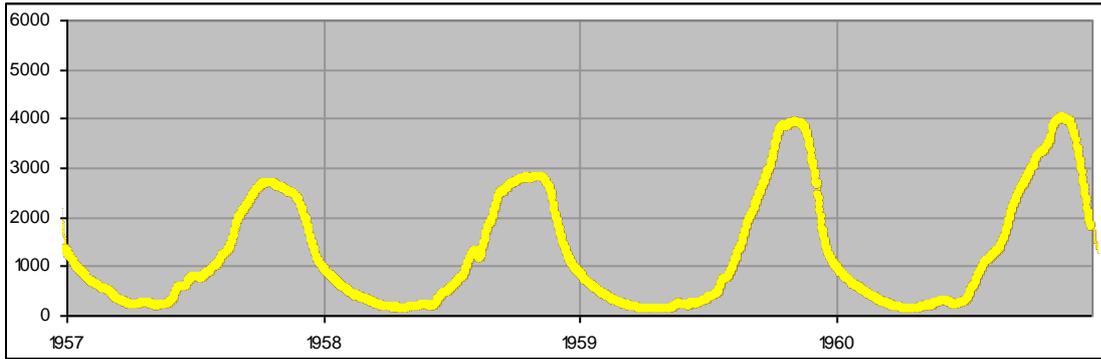
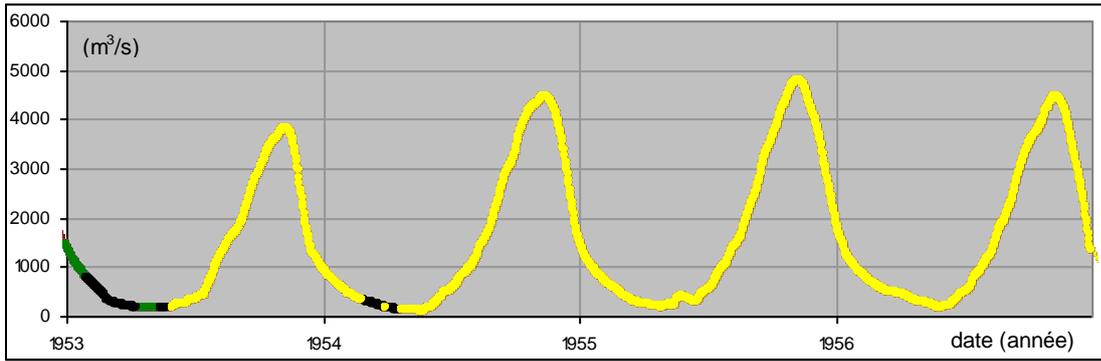
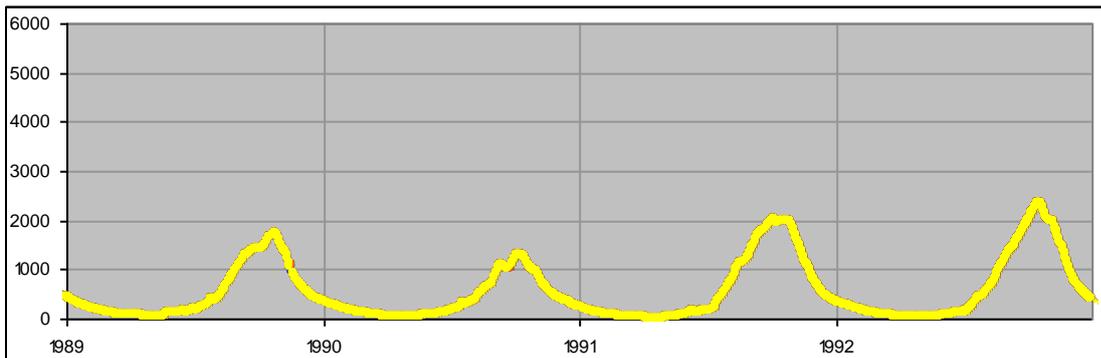
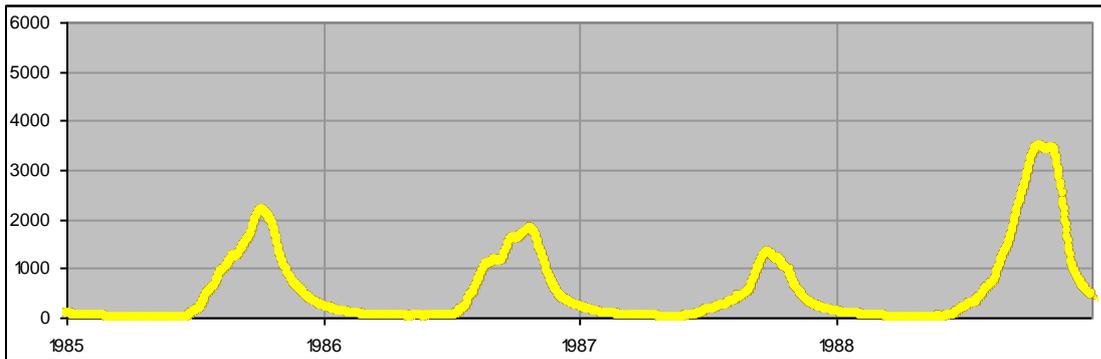
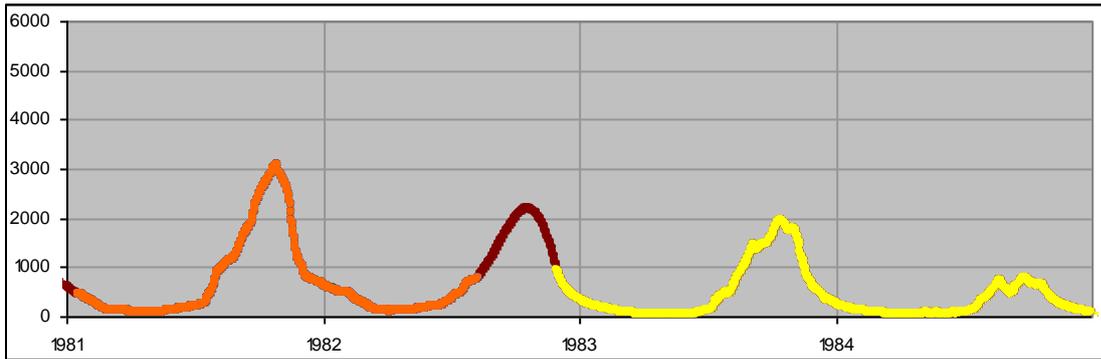
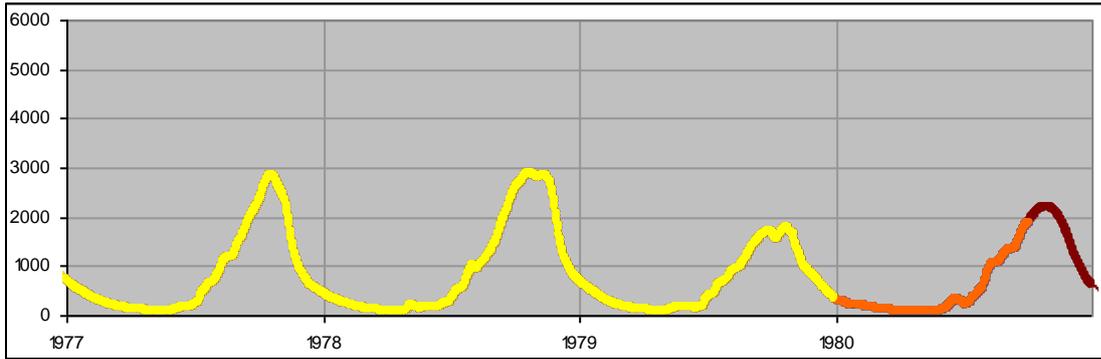
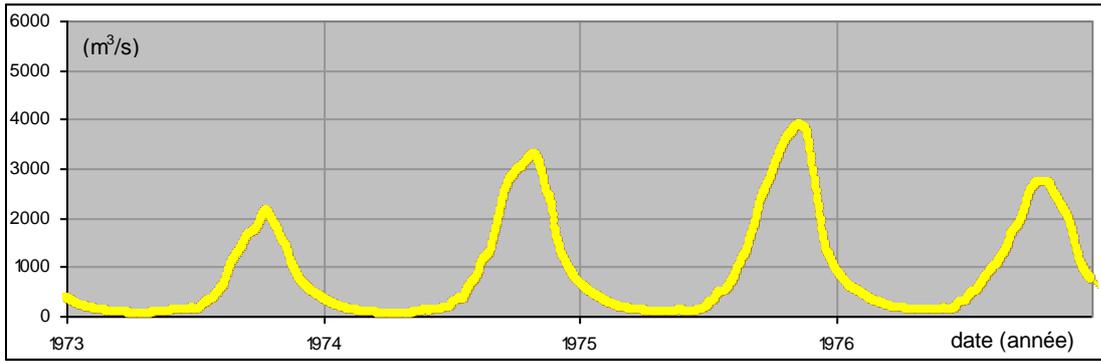


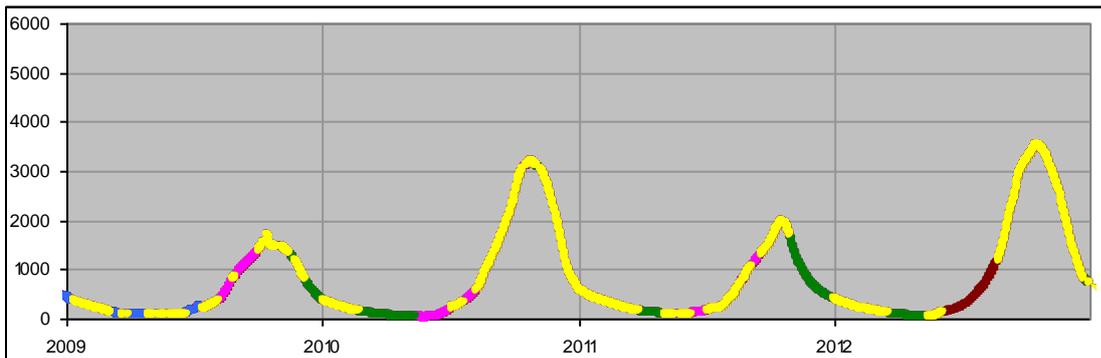
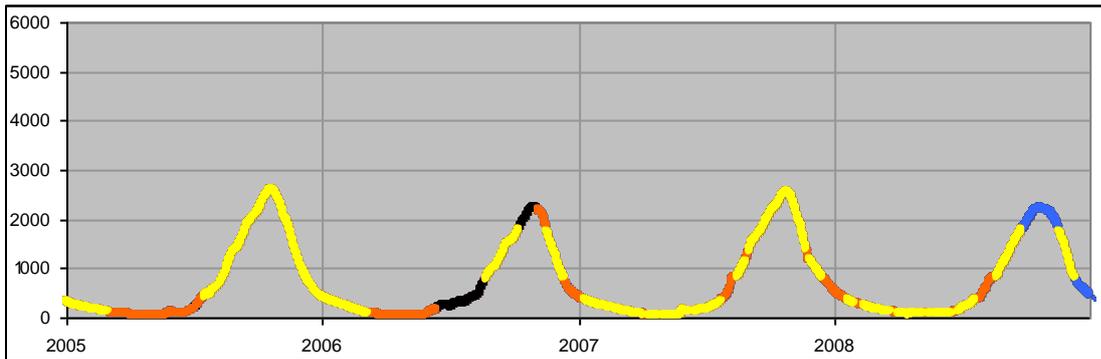
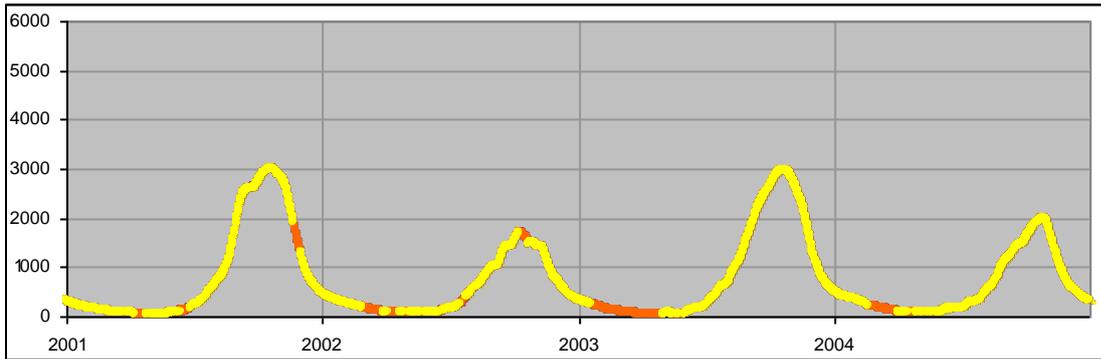
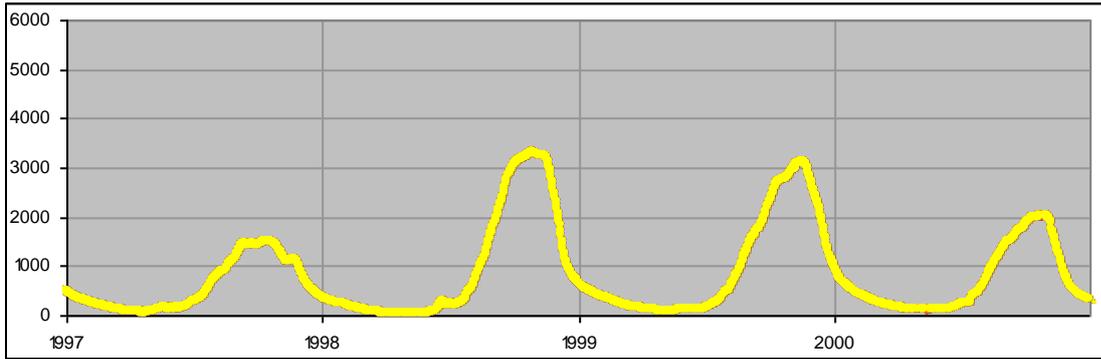
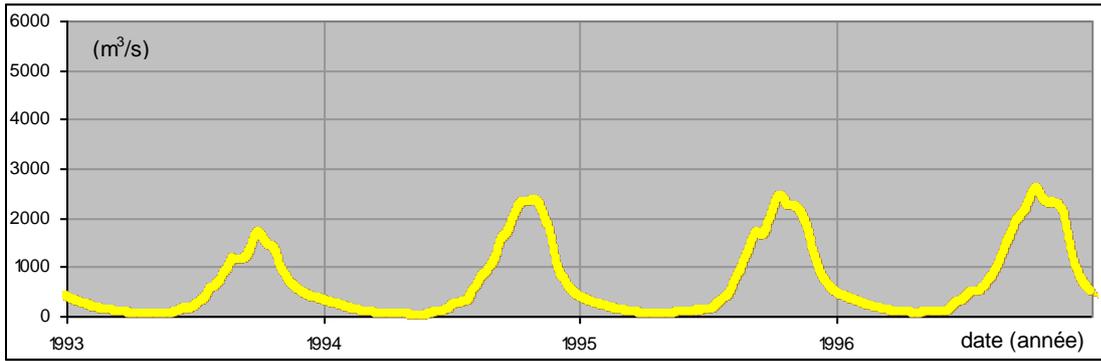
Figure 4 : relation entre le débit  $Q(T+0.5)$  du Chari à N'Djamena ( $m^3/s$ ) et son taux journalier de variation  $K(T+0.5)=(Q(T+3)/Q(T))^{1/3}$  sur la période du 15 novembre au 15 juin de 1950 à 2015, pour  $K$  observé inférieur ou égal à 1 et avec  $T$  le temps exprimé en jour











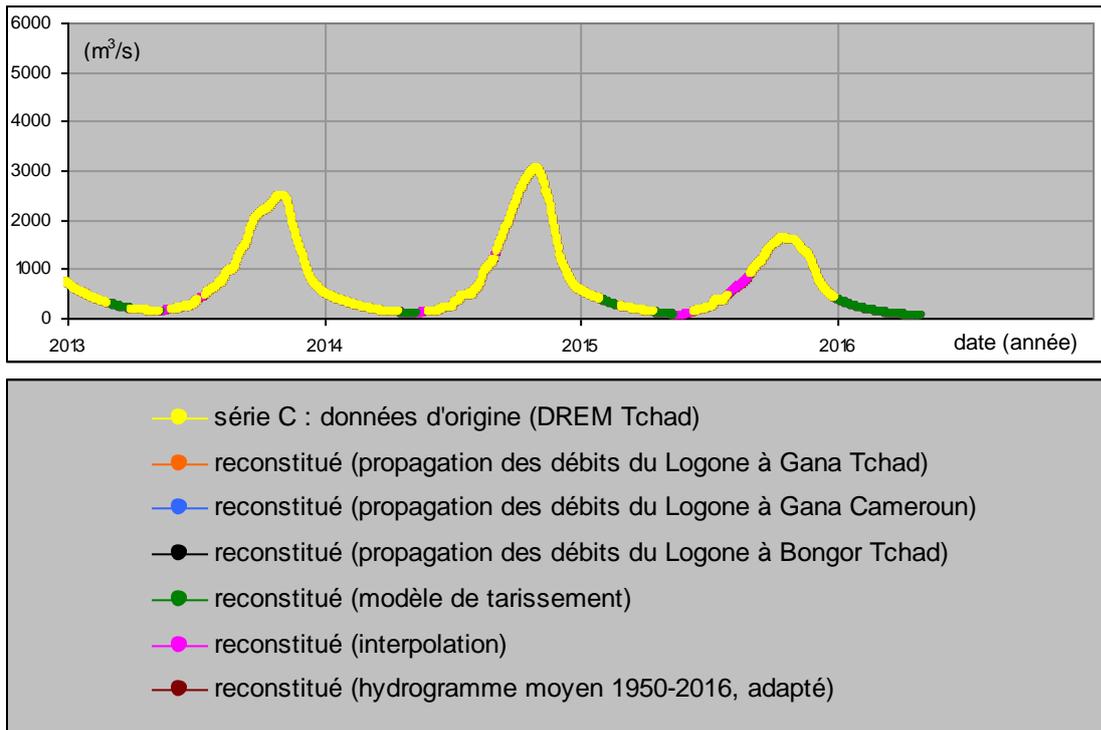


Figure 5 : débit du Chari à N'Djamena du 01/01/1933 au 30/04/2016 (moyennes journalières, valeurs observées et reconstituées)

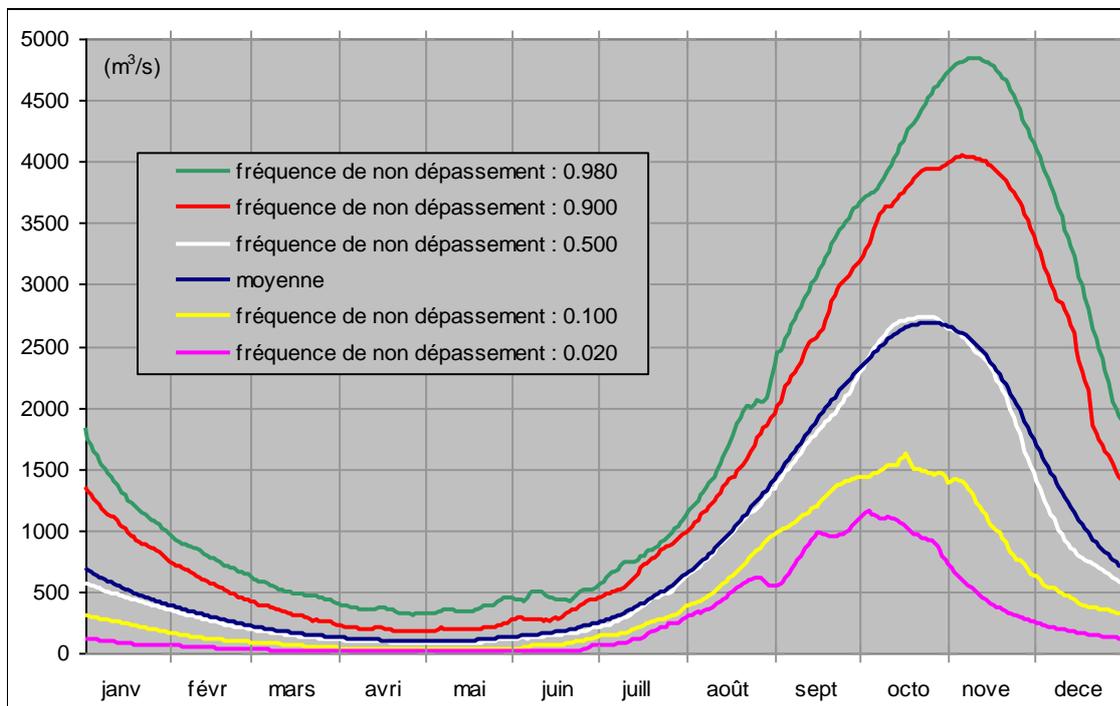


Figure 6 : hydrogramme annuel moyen et isofréquence du Chari à N'Djamena sur la période du 01/01/1950 au 31/12/2015 (basé sur série complète de débits moyens journaliers observés (83%) et reconstitués (17%))

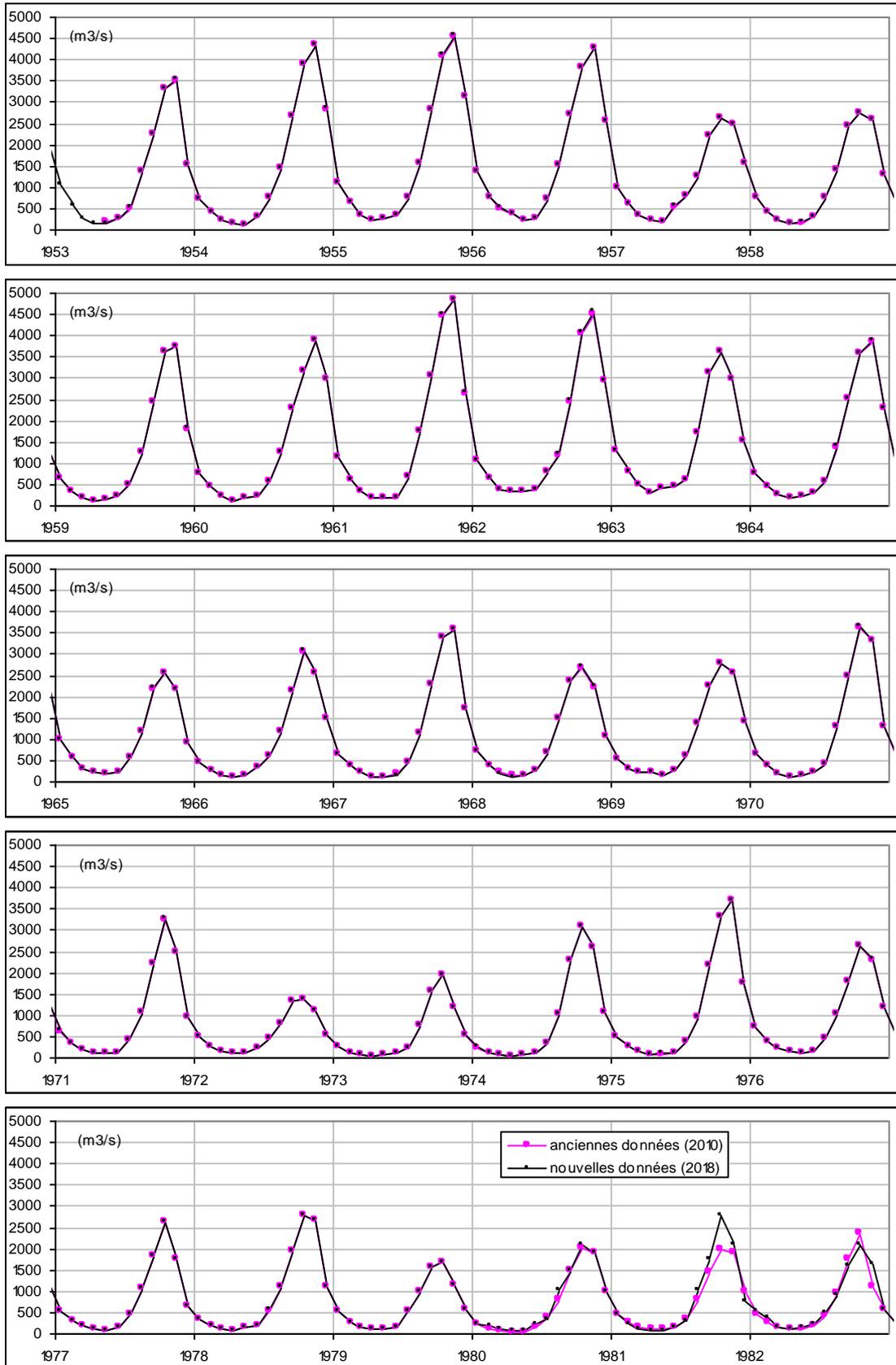


Figure 7 : comparaison des débits moyens mensuels : ancienne série (utilisée en 2010 pour générer par interpolation linéaire les débits utilisés en entrée du modèle hydrologique du Lac

Tchad) et nouvelle série (calculée à partir de la chronique complète des débits moyens journaliers obtenue ici)

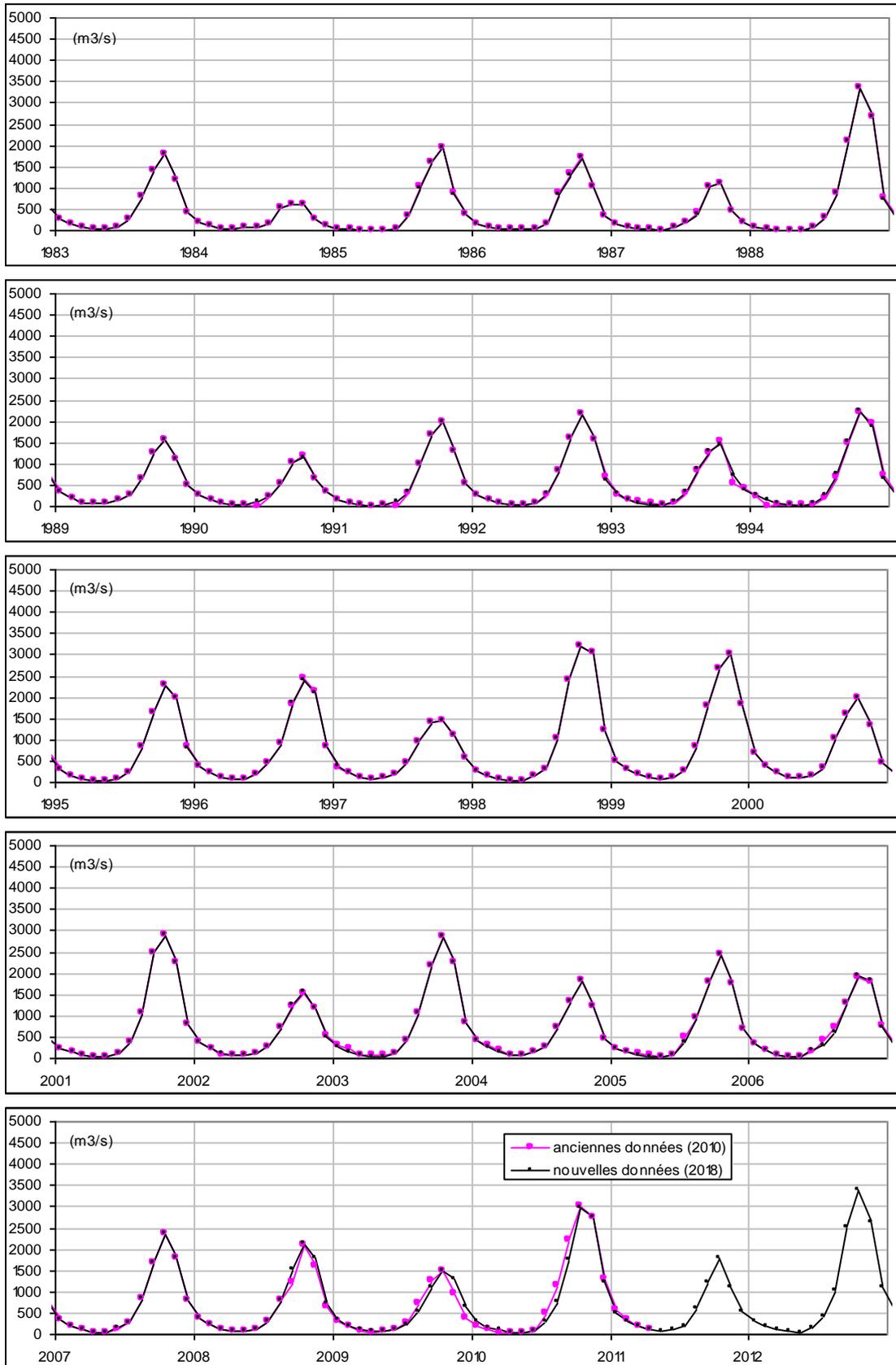


Figure 7 (fin)

Figure 8 : carte schématique des parties nord et sud du lac Tchad (limites bleues), avec les polygones de Thysse (mauve) associés aux postes pluviométriques (points rouges) et les demi degrés carrés pour lesquels on dispose des données pluviométriques du CRU

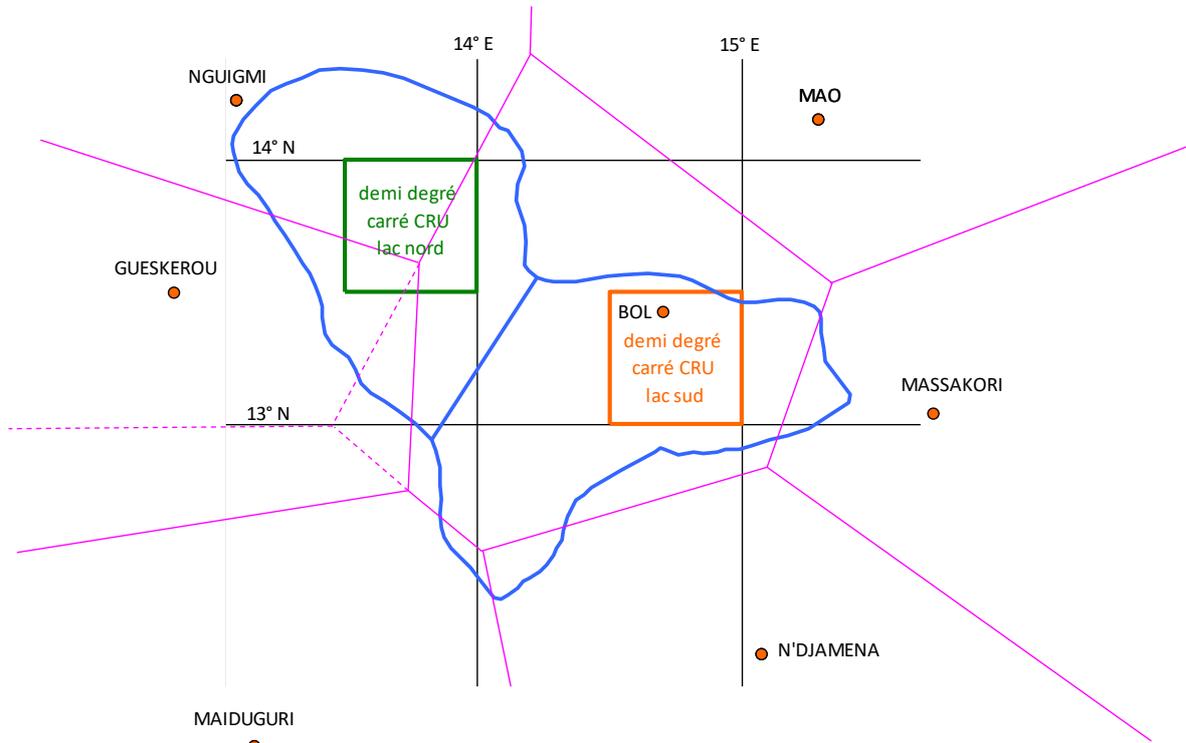


Figure 9 : répartition de la superficie par bandes de latitude pour la partie nord et la partie sud du lac Tchad ( $\sum X = 1$  pour chaque partie)

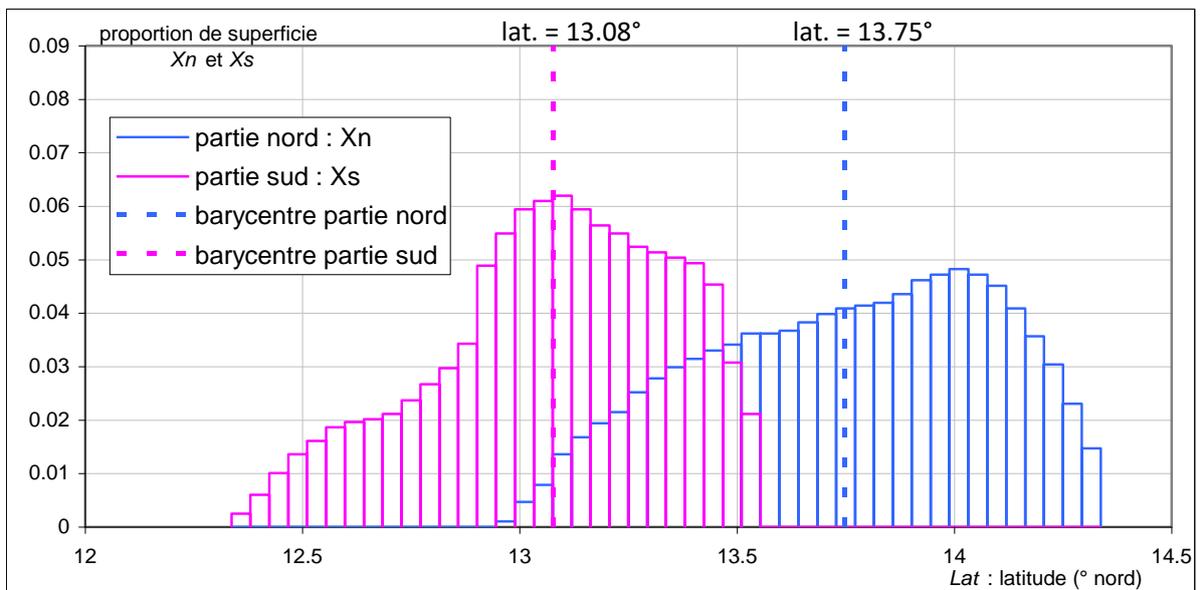


Figure 10 : relation entre précipitation annuelle (valeur moyenne sur la période 1951-1977) et latitude pour les postes pluviométriques situés dans la région du lac Tchad

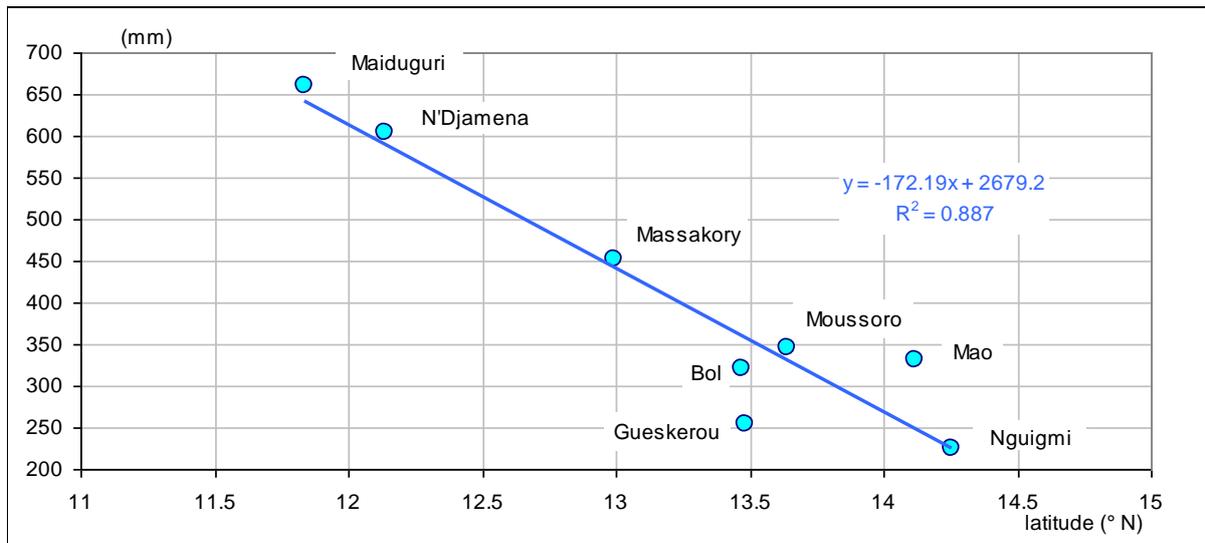


Figure 11 : coefficients  $A$ ,  $B$  (a) et  $R^2$  (b) de la régression  $P = A \times Lat + B$  entre la latitude  $Lat$  (degrés nord décimaux) et la lame précipitée annuelle  $P$  (mm), établie chaque année de la période 1948-1989 à partir des précipitations publiées par Olivry et al (1996) pour les postes pluviométriques de la région du lac Tchad (hormis Gueskerou), et relation moyenne entre  $A$  et  $B$  (c)

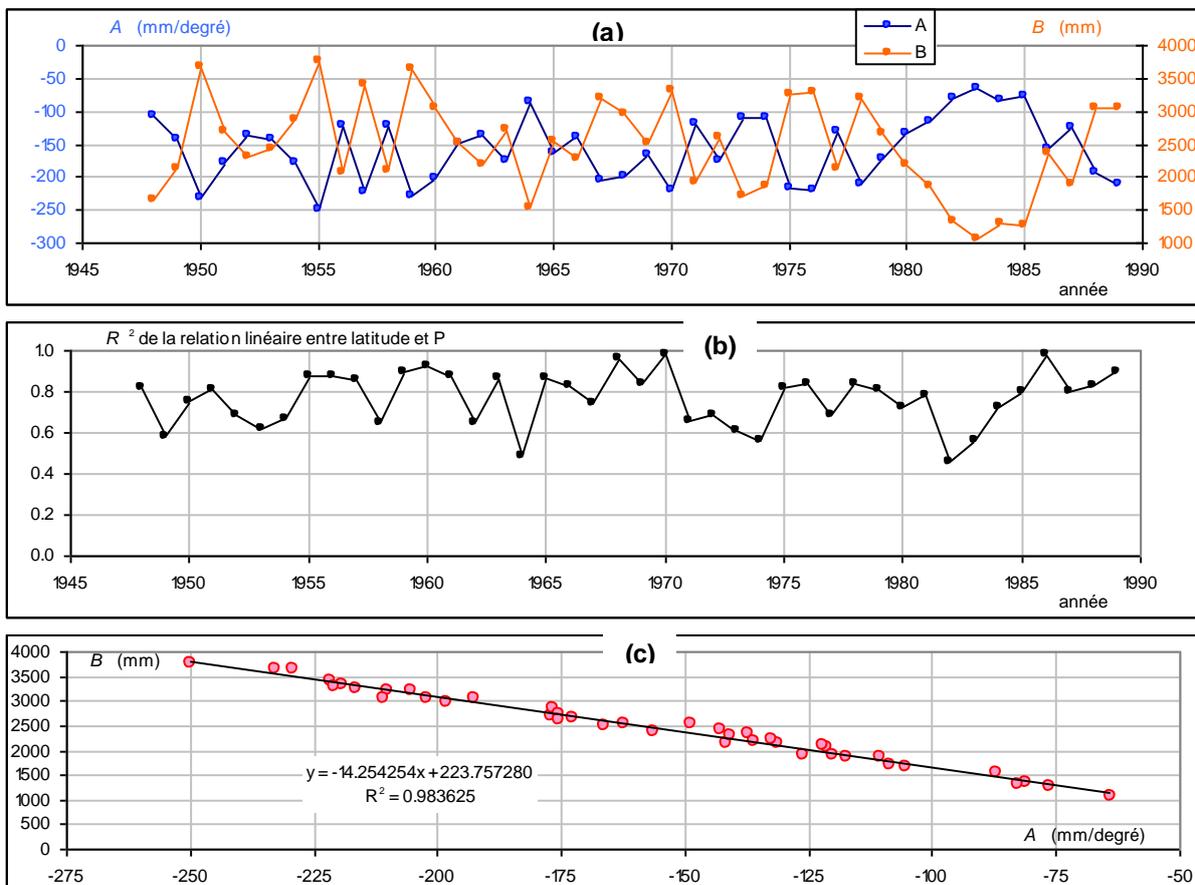


Figure 12 : comparaison des chroniques de lame précipitées annuelles  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  sur la partie sud du lac Tchad, période 1948-1989

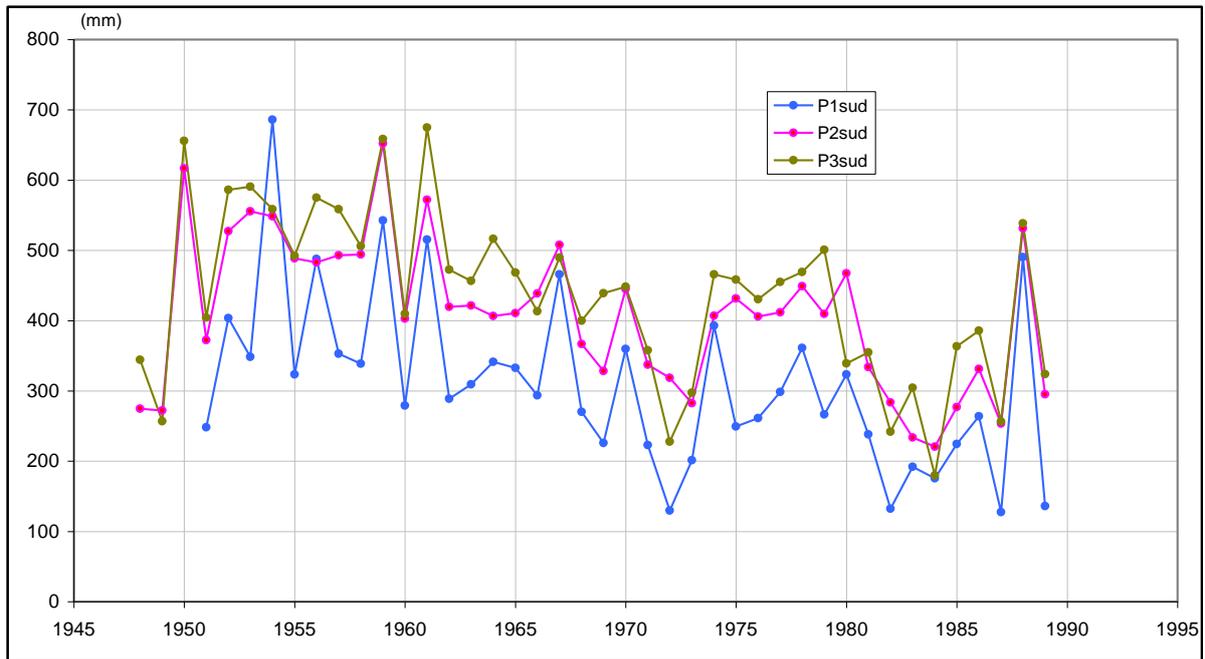


Figure 13 : comparaison des chroniques de lame précipitées annuelles  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  sur la partie nord du lac Tchad, période 1948-1989

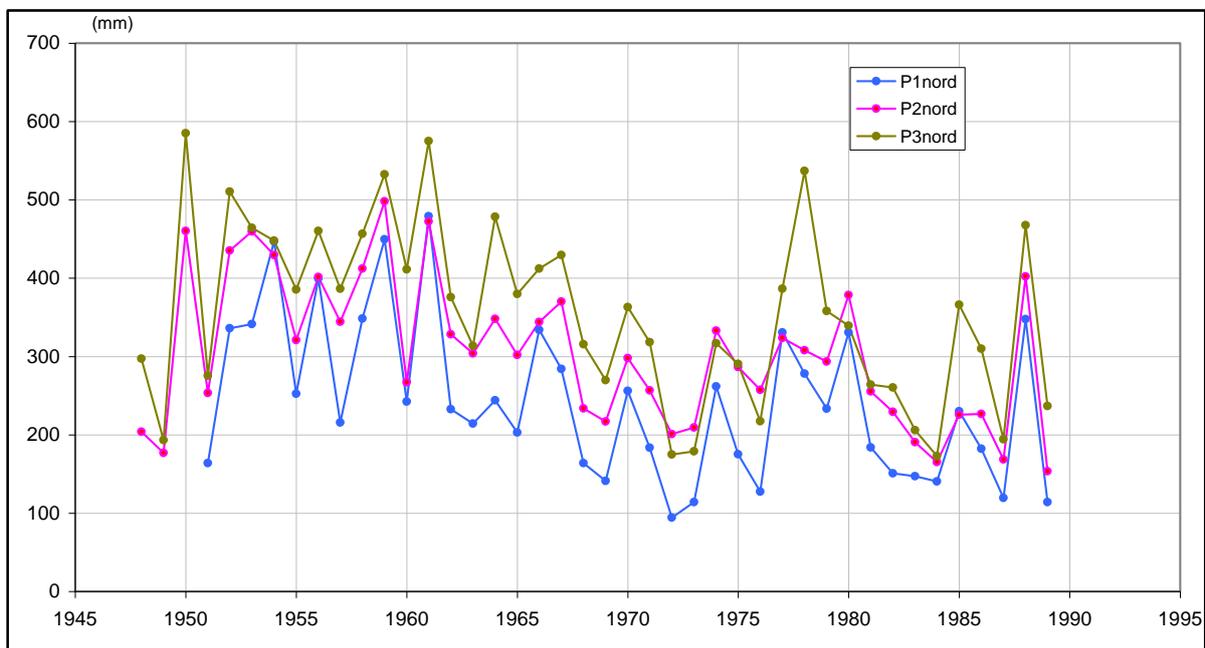


Figure 14 : relation moyenne (période 1948-1989) entre les lames précipitées annuelles  $P3_{sud}$  (produites par le CRU) et  $P2_{sud}$  (calculées à partir des observations aux stations, en tenant compte des gradients annuels de pluviométrie et de la répartition des surfaces suivant la direction nord-sud) pour la partie sud du lac

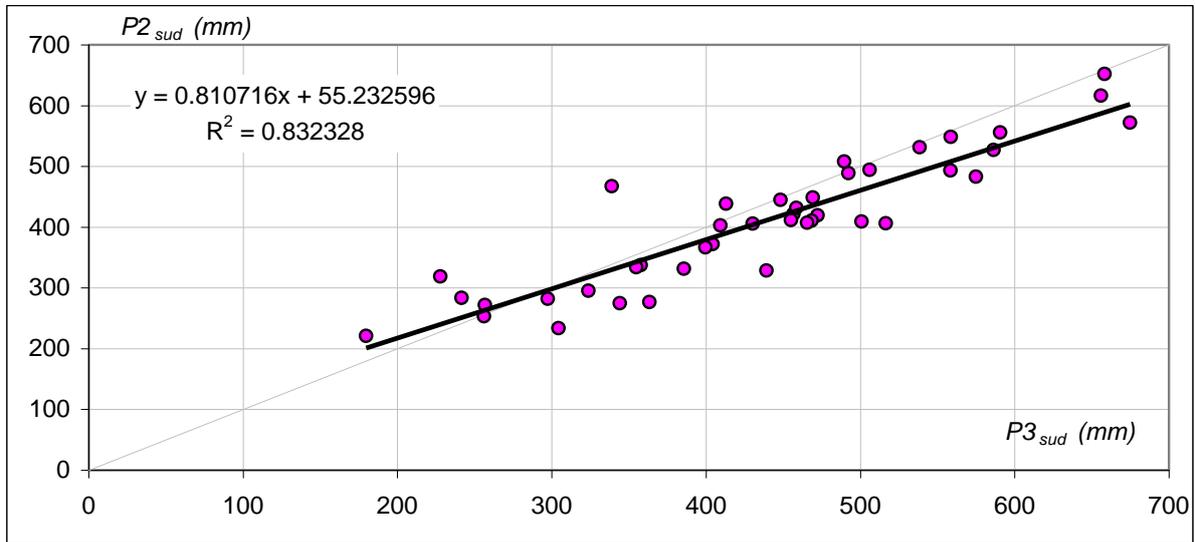


Figure 15 : relation moyenne (période 1948-1989) entre les lames précipitées annuelles  $P3_{nord}$  (produites par le CRU) et  $P2_{nord}$  (calculées à partir des observations aux stations, en tenant compte des gradients annuels de pluviométrie et de la répartition des surfaces suivant la direction nord-sud) pour la partie nord du lac

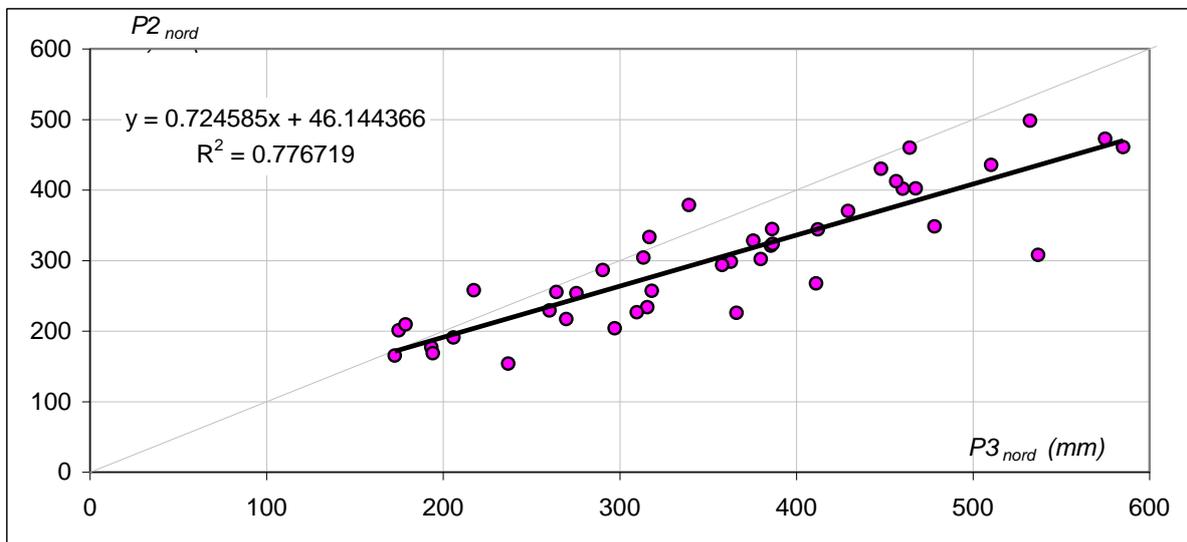


Figure 16 : niveau de plan d'eau dans la cuvette nord. Comparaison des valeurs modélisées (modèle utilisant les chroniques de flux en entrée et les paramètres de la version de 2010) et des valeurs observées à Nguigmi, Kindjéria et Malamfatori

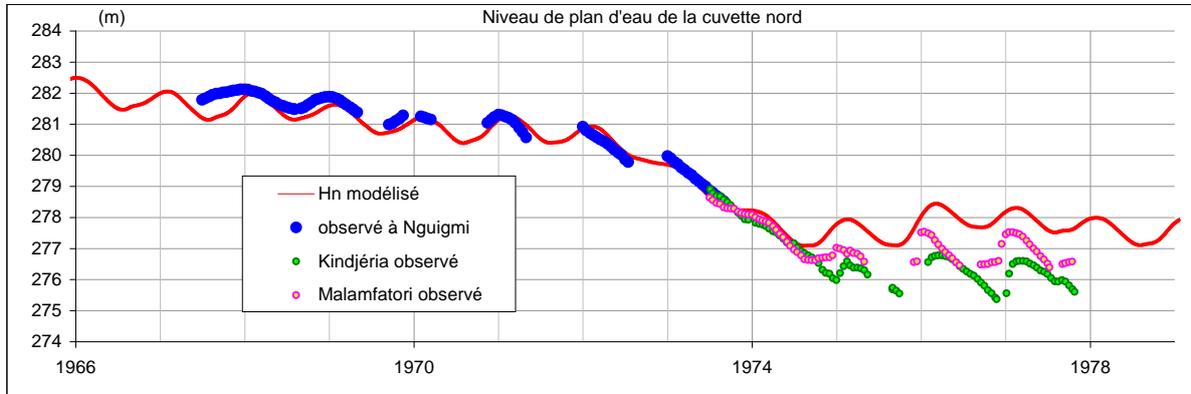


Figure 16-bis : niveau de plan d'eau dans la cuvette nord. Comparaison des valeurs modélisées (modèle utilisant les chroniques de flux en entrée et les paramètres de la version de 2018) et des valeurs observées à Nguigmi, Kindjéria et Malamfatori

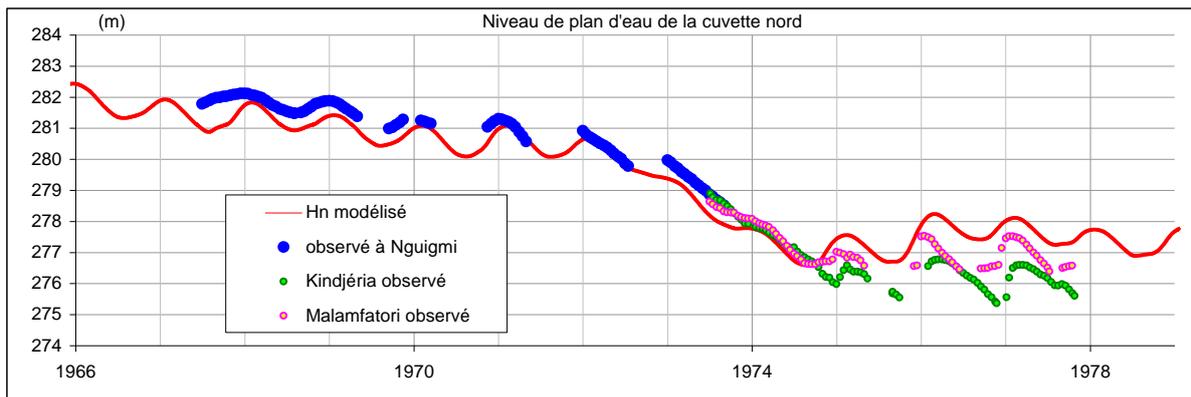


Figure 17 : relation moyenne entre  $Q_{annuel}(\text{Chari})$  et  $Q_{annuel}$ , débits moyens annuels de mai à avril du Chari à N'Djamena et de l'El Beid à Fotokol, basée sur les données complètes (observées et reconstituées) de mai 1953 à avril 1968

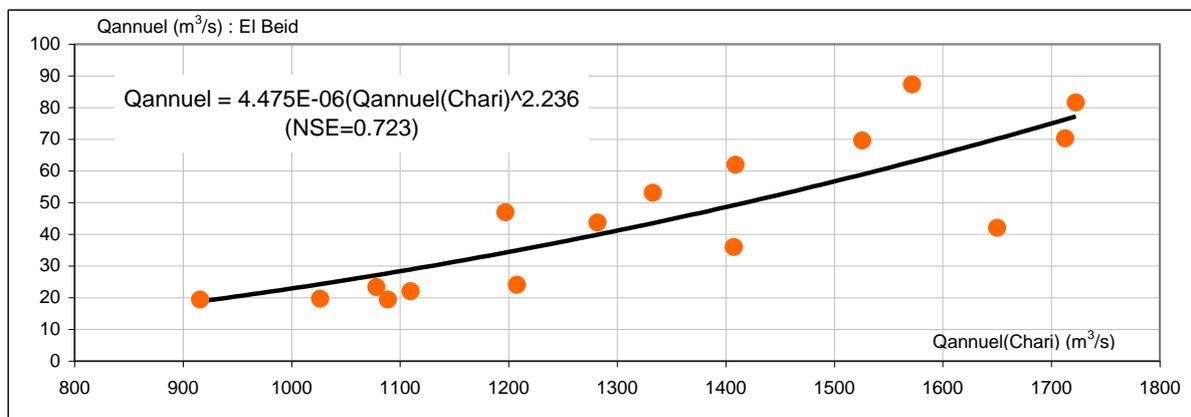


Figure 18 : comparaison des niveaux observés et modélisés dans la cuvette sud et l'archipel, pour le modèle utilisant les jeux de paramètres et de flux entrants de 2010 et de 2018

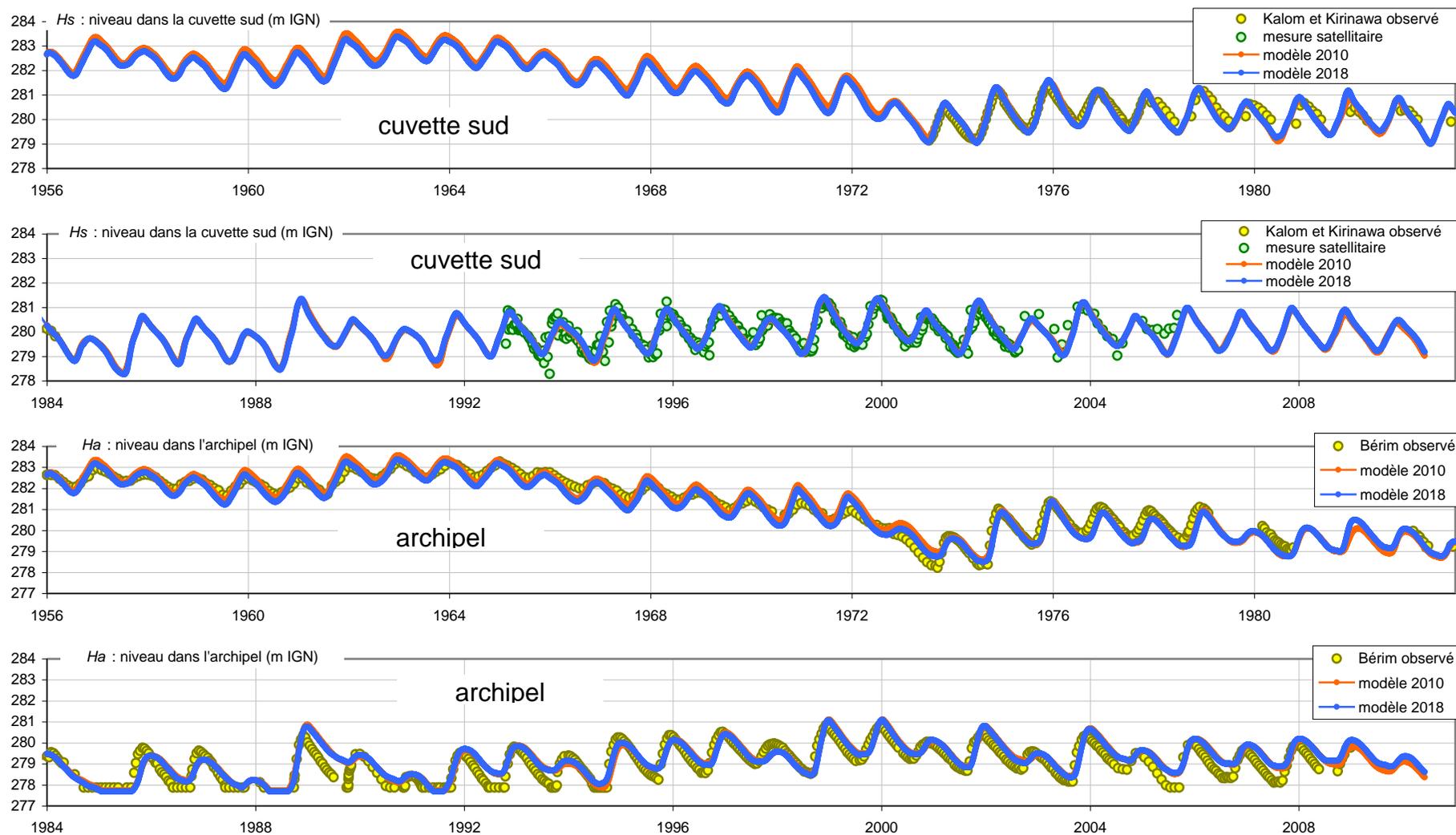


Figure 19 : comparaison des niveau et superficie de plan d'eau observés et modélisés dans la cuvette nord, pour le modèle utilisant les jeux de paramètres et de flux entrants de 2010 et de 2018

