

NOTE CONCERNANT LE NIVEAU DU LAC TCHAD EN REGIME D'APPORTS STABILISE ET LA PROFONDEUR DU LAC

JC Bader, les 08/04/2010 et 23/12/2010

RESUME

L'objectif de cette note consiste à analyser la variation annuelle du niveau du lac Tchad pour différents scénarios d'apports stabilisés (ie reproduits à l'identique chaque année). On détermine dans un premier temps l'hydrogramme caractéristique annuel du Chari à Ndjamena pour différentes valeurs de volume annuel écoulé. Chacun de ces hydrogrammes est ensuite utilisé pour définir un scénario d'apport stabilisé, dont l'effet sur le lac Tchad est simulé avec le modèle hydrologique de Bader et al (2010). Chaque scénario entraîne le lac vers un état asymptotique, dans lequel l'évolution annuelle du niveau de chaque cuvette se répète à l'identique chaque année. En fonction du volume annuel apporté par le Chari en régime stabilisé, on analyse : i) à quel stade du lac (sec, petit, moyen, grand) correspond cet état asymptotique ; ii) l'amplitude de variation annuelle de superficie du lac, d'intérêt primordial pour les cultures de décrue. On analyse également le temps mis par le lac pour passer d'un état asymptotique à l'autre en cas de modification du régime d'apport stabilisé. On analyse enfin la profondeur moyenne de chaque partie du lac en fonction de son niveau de plan d'eau.

NIVEAU DU LAC EN REGIME D'APPORTS STABILISE

Définition des régimes d'apports stabilisés

Pluie : identique chaque année, avec chaque mois la moyenne sur 1956-2008 des valeurs utilisées en calage et validation du modèle

Débit de la Komadougou Yobé : identique chaque année, avec chaque mois la moyenne sur 1956-2008 des valeurs utilisées en calage et validation du modèle

Débit du Chari : identique chaque année, soit constant (hydrogramme plat), soit variable (hydrogramme caractéristique). Les hydrogrammes caractéristiques sont définis en calculant le débit Q de chaque mois en fonction du débit moyen annuel Q_m de la période juillet à juin, sur la base des régressions polynômiales de degré 2 établies sur les années 1953 à 2008 (tab. 1) :

$$Q = A \times Q_m + B \times Q_m^2 + C$$

La période juillet à juin est retenue pour le calcul de Q_m , de préférence aux autres périodes testées, car c'est elle qui donne globalement les meilleurs résultats pour relier les débits mensuels à Q_m , avec des différences significatives pour mai et juin (fig. 1).

Tableau 1 : paramètres des régressions entre débits mensuels Q et annuels Q_m exprimés en m^3s^{-1} :

mois	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
C	113	303	152	-28.7	-635	51.1	-5.71	-13.6	17.5	28.3	14.3	-12.1
$10^2 A$	34.9	97.0	265	368	341	32.7	29.7	16.9	1.71	-4.03	0.854	15.8
$10^5 B$	1.38	-14.1	-64.4	-73.3	-16.1	84.0	26.1	15.7	13.7	12.1	9.68	4.72
R^2	0.606	0.752	0.890	0.933	0.961	0.929	0.945	0.946	0.928	0.903	0.810	0.691

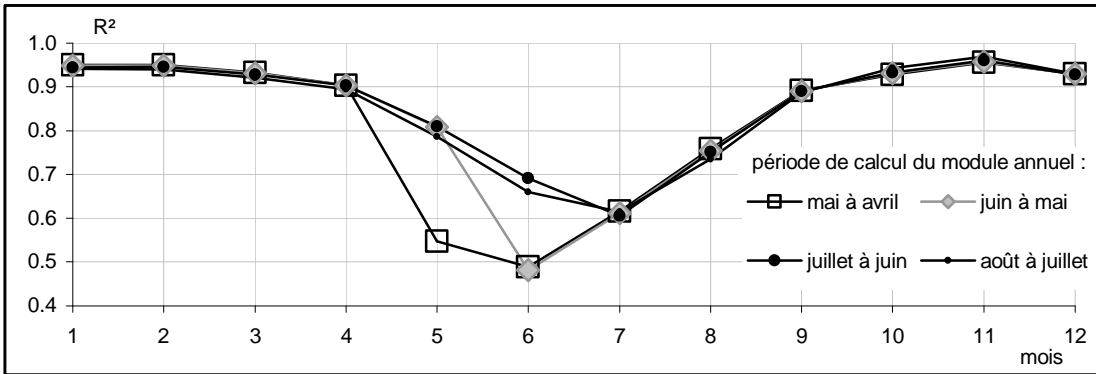


Figure 1 : coefficient de détermination de la régression polynômiale de degré 2 entre débit moyen annuel Q_m et débit mensuel, pour différentes périodes de calcul de Q_m

En les comparant aux débits mensuels observés, la figure 2 montre la bonne précision des 660 débits mensuels reconstitués sur la période 1953-2008 à partir des modules observés annuels. La figure 3 montre les hydrogrammes caractéristiques du Chari obtenus pour différents modules annuels. On remarque que le débit moyen mensuel le plus fort se situe en octobre pour les crues faibles et moyennes et en novembre pour les fortes crues.

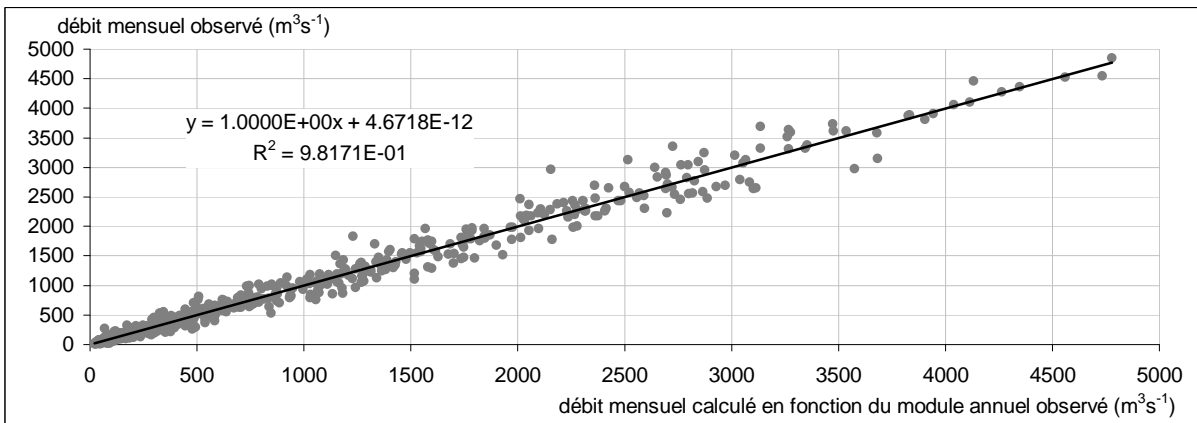


Figure 2 : débits mensuels du Chari. Valeurs observées et reconstituées à partir des modules

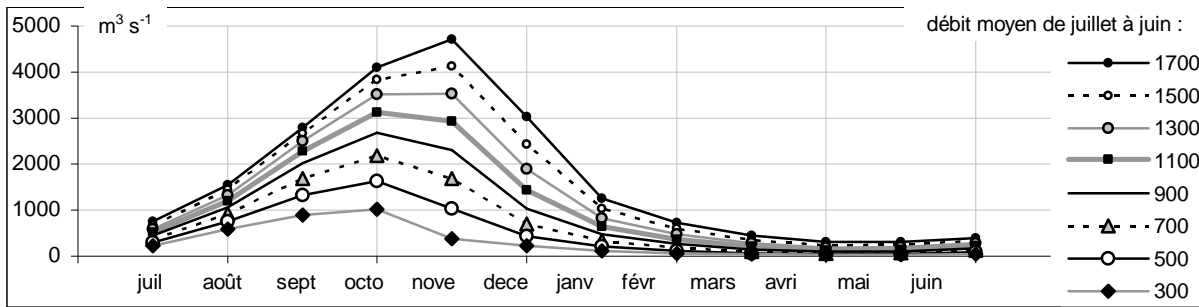


Figure 3 : hydrogrammes caractéristiques du Chari à Ndjamena sur la période 1953-2008

Débit de l'El Beid : identique chaque année, avec des valeurs mensuelles calculées en fonction du module du Chari. Dans un premier temps, le module annuel de l'El Beid de la période mai à avril est calculé en fonction de celui du Chari, par la relation suivante calée entre 1953 et 1969 :

$$Q_{ElBeid\ annuel} = 1.80926 \times 10^{-6} Q_{Chari\ annuel}^{2.35307} \quad (11 \text{ points ; } R^2=0.72 ; \text{ erreur type} = 13 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$$

Après quoi, les débits mensuels sont calculés en fonction du module annuel en respectant les rapports $Q_{mensuel}/Q_{annuel}$ observés pour chaque mois de l'année sur les valeurs moyennes interannuelles de la période 1953-1969.

Méthode

Les différents scénarios testés se différencient donc par le module annuel du Chari (entre 200 et 1800 m³ s⁻¹) ou par la forme de son hydrogramme (plat ou caractéristique). Pour chacun d'entre eux, le modèle hydrologique du lac Tchad est appliqué sur 53 années avec les paramètres issus de son calage sur la période 1970-1997 et un niveau global initialisé à 282.64 m. Pour les scénarios correspondant à un module du Chari supérieur ou égal à 1300 m³ s⁻¹, une simulation est faite également en supposant la débitance du Bahr El Gazal multipliée par 20 par rapport à celle qui est retenue pour le calage et la validation du modèle. Pour chaque scénario d'apport, l'état asymptotique du lac est analysé.

En outre, le temps nécessaire pour faire évoluer le lac entre différents états caractéristiques est analysé en fonction du module annuel des apports du Chari, dans le cas des hydrogrammes caractéristiques et pour une débitance du Bahr El Gazal multipliée par 20.

Résultats concernant les états asymptotiques du lac

Avec des apports identiques chaque année, l'état du lac se stabilise assez rapidement (presque toujours moins de 20 ans) de telle sorte que dans chaque cuvette, les mêmes valeurs minimales et maximales annuelles de niveau finissent par se reproduire chaque année à moins d'un centimètre près. Ces niveaux extrêmes caractérisent des états stables du lac associés aux différentes valeurs de module annuel du Chari.

La figure 3 montre l'évolution des niveaux extrêmes annuels en régime stabilisé, en fonction du module annuel du Chari. On constate les résultats suivants :

- **Tchad sec** : dès $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($6.3 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$) en module annuel, le débit du Chari permet au plan d'eau de la cuvette sud de dépasser la cote 279 m au moins une partie de l'année et d'alimenter ainsi la cuvette nord. Mais celle-ci demeure asséchée en surface tout au long de l'année tant que le module du Chari reste en dessous de $470 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ avec les hydrogrammes caractéristiques ou $510 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ avec les hydrogrammes plats (14.9 et $16.1 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$). Les apports reçus dans ce cas par la cuvette nord sont inférieurs à ce que seraient les pertes par infiltration et surtout infiltration si le niveau de plan d'eau dépassait la surface du sol. Les fluctuations de niveau se produisent donc sous la surface, dans le réservoir sol.
- **Petit Tchad** : avec un module annuel de 470 à $1080 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour les hydrogrammes caractéristiques et de 510 à $1060 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour les hydrogrammes plats (resp. de 14.9 à 34.0 et de 16.1 à $33.6 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$), le débit du Chari permet à la cuvette nord de rester en eau au moins une partie de l'année. Mais la surface libre y demeure en dessous de la cote 279 m pendant au moins une partie de l'année également..
- **Moyen Tchad** : avec un module annuel de 1080 à $1370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ environ pour les hydrogrammes caractéristiques et de 1060 à $1370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ environ pour les hydrogrammes plats (resp. de 34.0 à 43.2 et de 33.6 à $43.2 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$), le débit du Chari permet de maintenir toute l'année le niveau de plan d'eau de la cuvette nord entre 279 et 282.30 m.
- **Grand Tchad** : avec un module annuel supérieur à $1370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ environ ($43.2 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$), le débit du Chari permet au niveau de plan d'eau de la cuvette nord de dépasser la cote 282.30 m au moins une partie de l'année.
- **Unicité du plan d'eau** : la définition des quatre états du lac, de Tchad sec à grand Tchad, est effectuée en considérant uniquement le niveau de plan d'eau de la cuvette nord. Quand celui-ci dépasse la cote 279 m, on suppose pour simplifier que le lac ne forme plus qu'un unique plan d'eau alors qu'en réalité, une dénivelée non nulle continue à exister entre les plans d'eau des cuvettes sud et nord. Cette dénivelée, qui permet l'écoulement entre les deux cuvettes et qui, à niveau égal dans la cuvette nord croît forcément avec le débit échangé, est représentée par le modèle. Les résultats indiquent que les hydrogrammes caractéristiques du Chari doivent présenter un module annuel supérieur à environ $1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($37.8 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$) pour que les niveaux de plan d'eau diffèrent de moins de 10 cm pendant l'étiage et de moins de 70 cm en valeurs maximales annuelles. Il est probable que le modèle surestime la dénivelée entre plans d'eau pour les états de moyen et grand Tchad, comme on pouvait le prévoir à partir de ses erreurs moyennes sur H_n , H_a et H_s en validation. La variation linéaire du paramètre $A1_{sn}$ en fonction de la cote, qui permet au modèle de représenter à la fois l'évolution du strickler et celle de la largeur d'écoulement, ne convient probablement plus au-delà d'une certaine cote. C'est peut-être un défaut du modèle, car les observations simultanées de niveau à Bol et Nguigmi, supérieures à 279 m, ne montrent pas de dénivelée notables entre les deux plans d'eau. Il faut noter cependant que ces observations ont été faites durant une période succédant à des hautes eaux qui n'avaient pas encore permis le développement de la végétation sur la grande barrière et pendant lesquelles les différentes parties du lac avaient eu tout le temps nécessaire pour s'équilibrer entre elles. Les états stabilisés du lac analysés ici ne correspondent pas à ce cas de figure et sont de plus modélisés avec un unique jeu de paramètres, compromis sensé représenter le fonctionnement hydrologique du lac à la fois avant et après le développement de la végétation sur la grande barrière.
- **Débordement vers le Bahr El Gazal** : avec un module annuel $1230 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($38.6 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$) pour les hydrogrammes caractéristiques et de $1320 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($41.6 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$) pour les hydrogrammes plats, le débit du Chari permet au plan d'eau de l'archipel de dépasser la cote 282.30 m une partie de l'année et déborder ainsi dans le Bahr El gazal. Du fait de la dénivelée mentionnée ci-dessus entre les plans d'eau des cuvettes sud et nord, le débit permettant d'amener le niveau de la cuvette sud à la cote 282.30 m est inférieur à celui qui

permet d'amer le niveau de la cuvette nord à cette valeur. Reste alors à voir si l'on définit l'état de grand Tchad à partir du niveau de la cuvette nord, comme nous l'avons fait jusqu'ici, ou à partir de celui de la cuvette sud.

Directement tirés de l'analyse faite ci-dessus, les niveaux extrêmes annuels donnés dans le tableau 2 permettent de définir certains états caractéristiques du lac en régime stabilisé.

Tableau 2 : cotes minimales et maximales annuelles des plans d'eau pour divers états caractéristiques du lac en régime d'apports stabilisés, dans le cas des hydrogrammes caractéristiques du Chari.

débit moyen du Chari (m ³ s ⁻¹)	min(1/1/aaaa au 31/12/aaaa)			max(1/6/aaaa-1 au 31/5/aaaa)			code	état du lac
	Hs	Ha	Hn	Hs	Ha	Hn		
200	278.33	277.71	274.02	279.76	277.90	274.37	A	état le plus bas analysé
470	278.95	277.88	274.32	280.40	278.98	275.19	B	passage tchad sec à petit Tchad
1080	279.85	279.70	279.01	281.47	281.31	279.59	C	passage petit Tchad à Tchad normal
1370	281.62	281.61	281.53	282.86	282.84	282.26	D	passage Tchad normal à grand Tchad
1800	282.52	282.52	282.47	283.66	283.63	283.27	E	état le plus haut analysé

La figure 4 montre qu'en régime stabilisé, les hydrogrammes caractéristiques du Chari dont le module annuel dépasse 600 m³ s⁻¹ (18.9 km³ an⁻¹) entraînent tous un marnage annuel du niveau compris environ entre 1.0 m et 1.6 m dans la cuvette sud et l'archipel et entre 0.5 m et 1.0 m dans la cuvette nord. Tous les hydrogrammes plats entraînent un marnage inférieur à 40 cm dans les différentes cuvettes. Les scénarios envisageant le maintien ou la multiplication par vingt de la débitance du Bahr El Gazal donnent des résultats quasiment identiques pour le marnage annuel, les seules différences ne concernant bien sûr que les forts débits permettant le débordement (> 1400 m³ s⁻¹)

Résultats concernant les temps de transition entre différents états caractéristiques du lac.

Les tableaux 3 et 4 donnent le nombre d'années écoulées à partir d'états initiaux stabilisés du lac, pendant lesquelles de nouveaux états respectivement plus élevés ou plus bas ne sont pas encore atteints (à moins de 1 cm près). On constate que ces durées de transition sont toujours très brèves, inférieures à 10 ans dans la plupart des cas étudiés.

débit moyen du Chari (m ³ s ⁻¹)		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
état initial	état atteint																	
A	B				1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	C										11	4	3	2	2	1	1	1
B	C										11	4	3	2	1	1	1	1
A	D												10	6	4	3	3	
B	D												10	6	4	3	3	
C	D												7	4	3	2	2	
A	E																	8
B	E																	8
C	E																	7
D	E																	5

Tableau 3 : nombre d'années pour élever le lac jusqu'à différents états à partir d'un état initial d'équilibre, avec un hydrogramme caractéristique du Chari répété chaque année.

débit moyen du Chari (m ³ s ⁻¹)		200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	
état initial	état atteint																		
B	A	1																	
C	A	3																	
D	A	4																	
E	A	5																	
C	B	2	3	3															
D	B	4	4	4															
E	B	4	4	5															
D	C	2	2	2	2	2	3	3	4	7									
E	C	2	2	2	3	3	3	4	5	8									
E	D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3					

Nombre d'années pour abaisser le lac jusqu'à différents état à partir d'un état initial d'équilibre, avec un hydrogramme caractéristique du Chari répété chaque année.

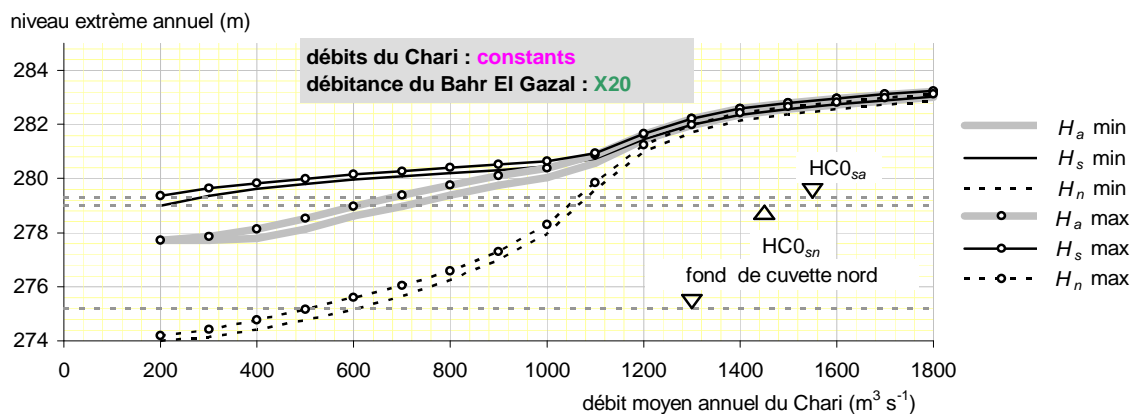
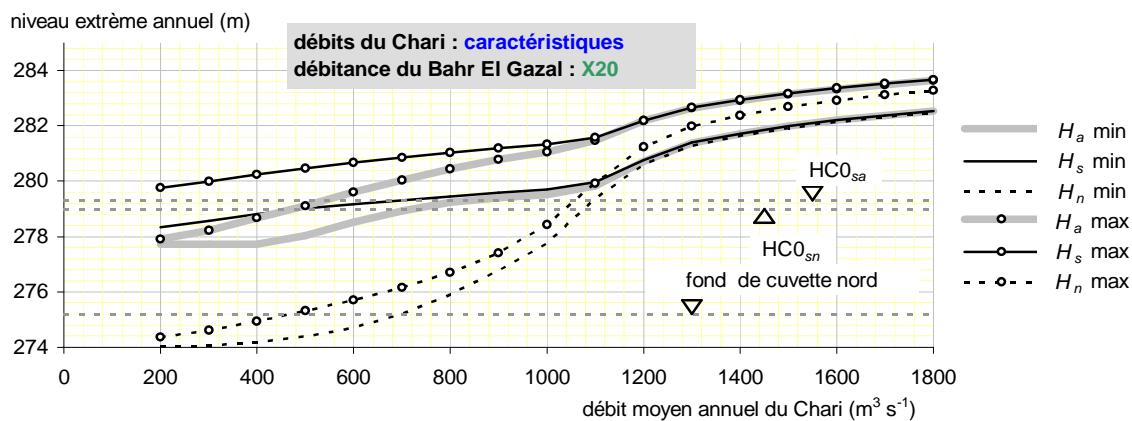
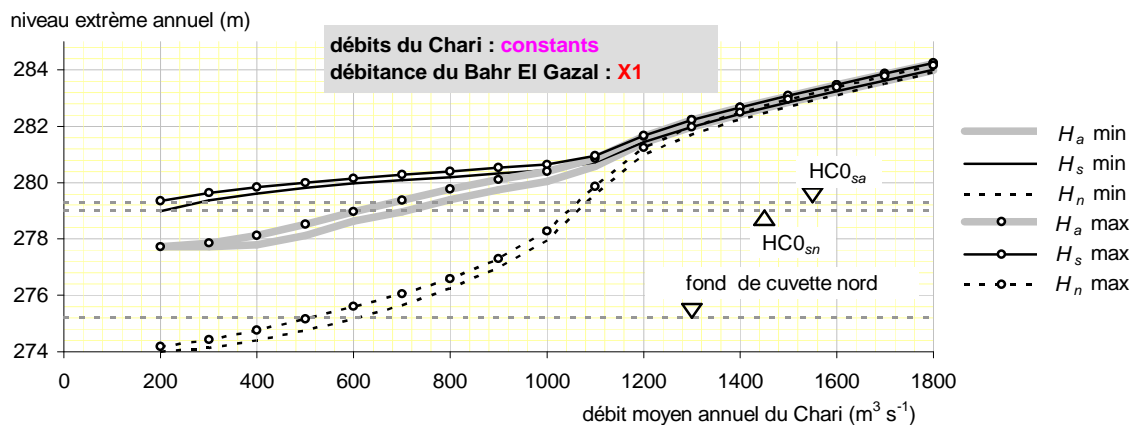
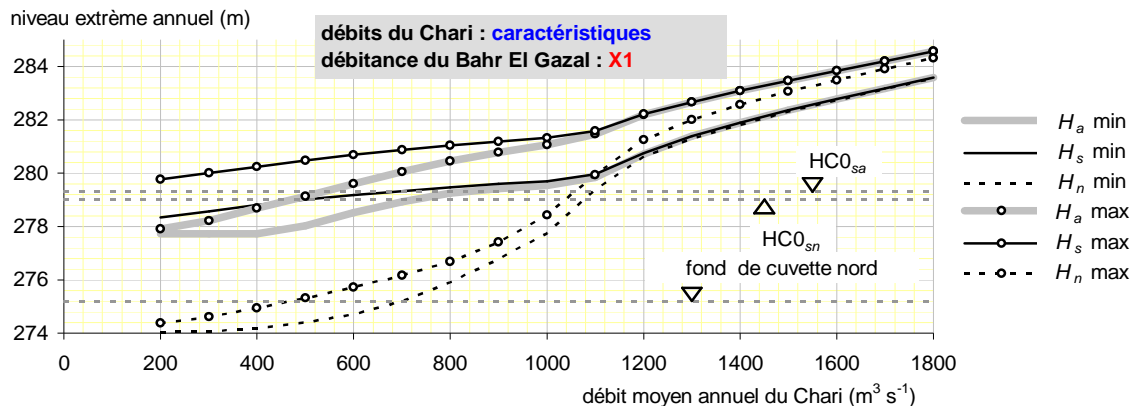


Figure 3 : niveaux extrêmes annuels en régime stabilisé, en fonction du module annuel du Chari

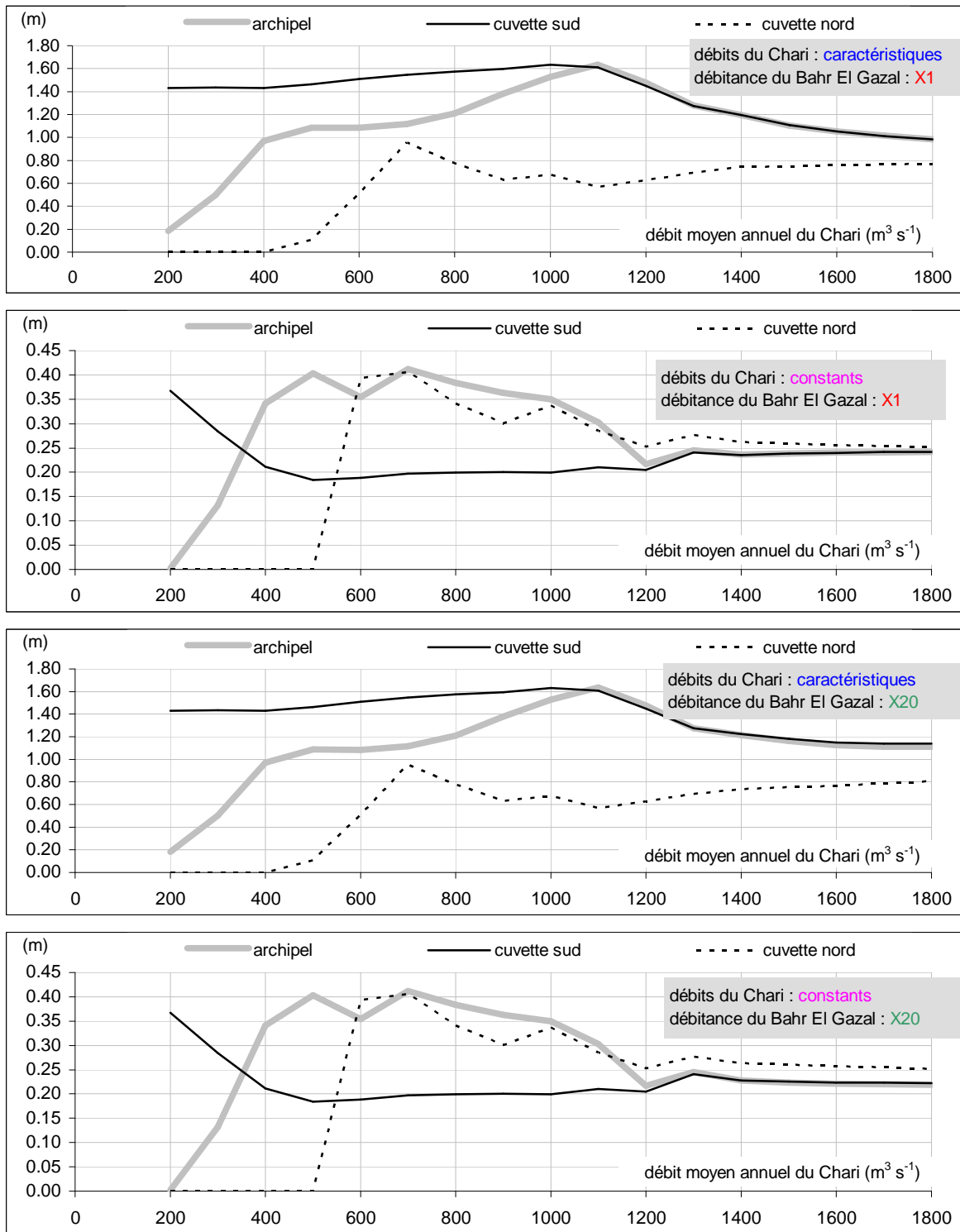


Figure 4 : marnage annuel de la surface libre en régime stabilisé, en fonction du module annuel du Chari

PROFONDEUR DU LAC

La profondeur moyenne de chaque réservoir du lac peut être calculée en divisant le volume stocké par la superficie du plan d'eau. Dans le cas de la cuvette nord, on considère ici uniquement l'eau stockée au dessus du fond, sans prendre en compte le réservoir sol.

La figure 5 montre qu'à niveau égal de surface libre, la profondeur moyenne dans la cuvette nord est supérieure à celle des autres réservoirs. Elle reste inférieure à 6 m pour l'ensemble des niveaux observés depuis 1956.

Depuis 1973, la profondeur moyenne est restée inférieure à 2 m sur l'ensemble du lac (fig. 5)

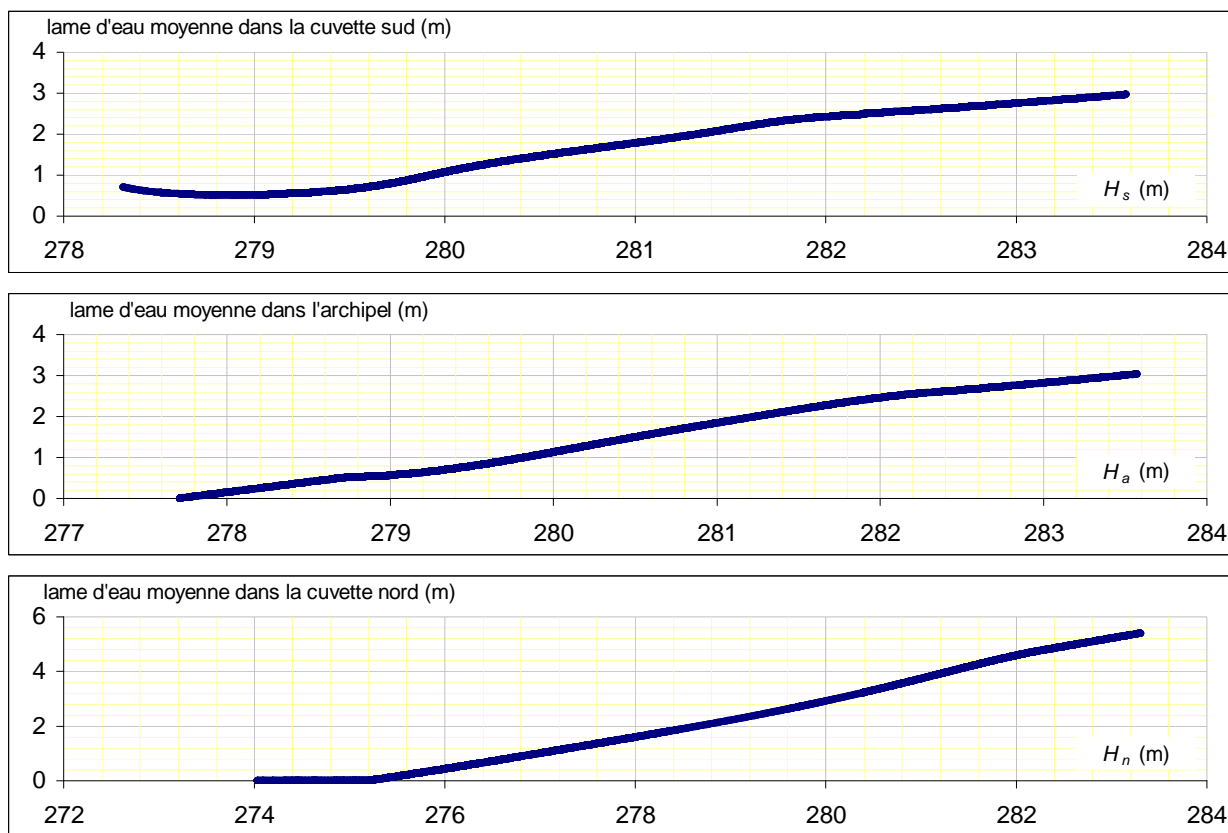


Figure 5 : profondeur moyenne du lac en fonction du niveau de surface libre

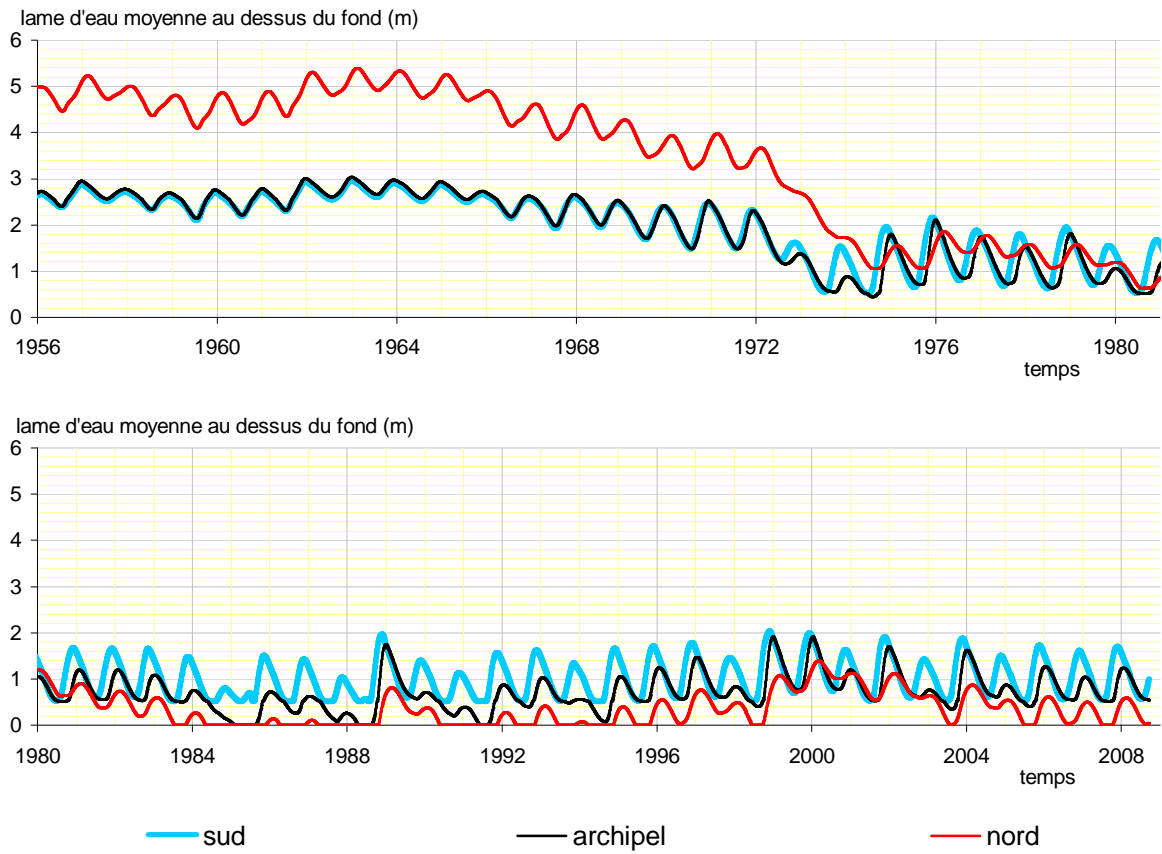


Figure 6 : profondeur moyenne du lac modélisée sur la période 1956-2008 à partir des flux observés

ADDENDUM (23/12/2010)

VARIATION ANNUELLE DE SUPERFICIE INONDEE EN REGIME STABILISE

On considère ici le régime stabilisé avec les hypothèses suivantes :

- Débit entrant dans la cuvette sud (Chari + El Beid) : hydrogramme type
- Débitance du Bahr El Gazal : multipliée par 20

La figure 7 montre les superficies inondées minimales et maximales obtenues chaque année en régime stabilisé, en fonction du débit moyen annuel du Chari (+El Beid).

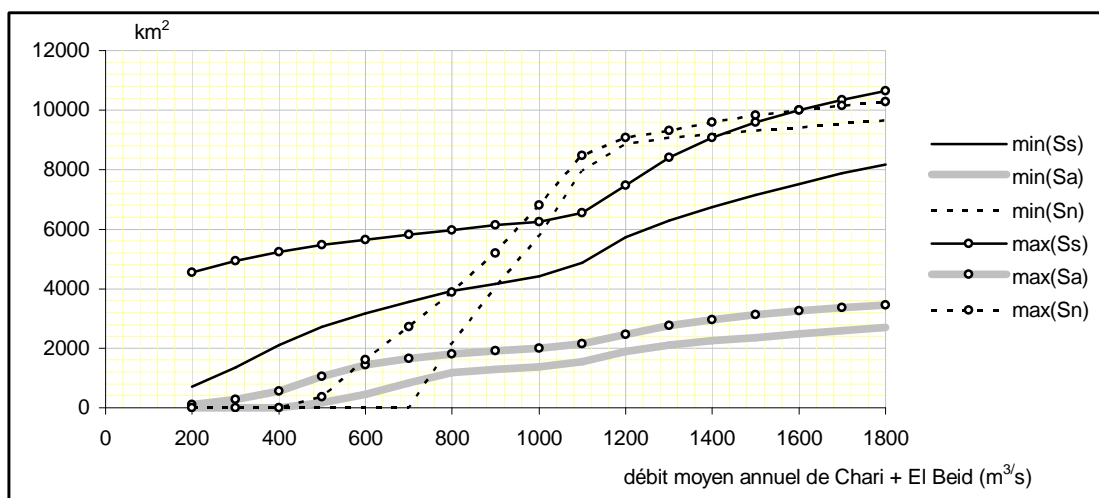


Figure 7 : valeurs extrêmes annuelles des superficies inondées en régime stabilisé

La variation annuelle de superficie inondée totale sur le lac fluctue entre 2500 et 6000 km² environ, selon le débit moyen entrant dans la cuvette sud (fig. 8). Elle est maximale (5788 km²) pour un débit moyen annuel de 700 m³/s (soit 22.08 km³/an), et minimale (2546 km²) pour un débit moyen annuel de 1200 m³/s (soit 37.84 km³/an).

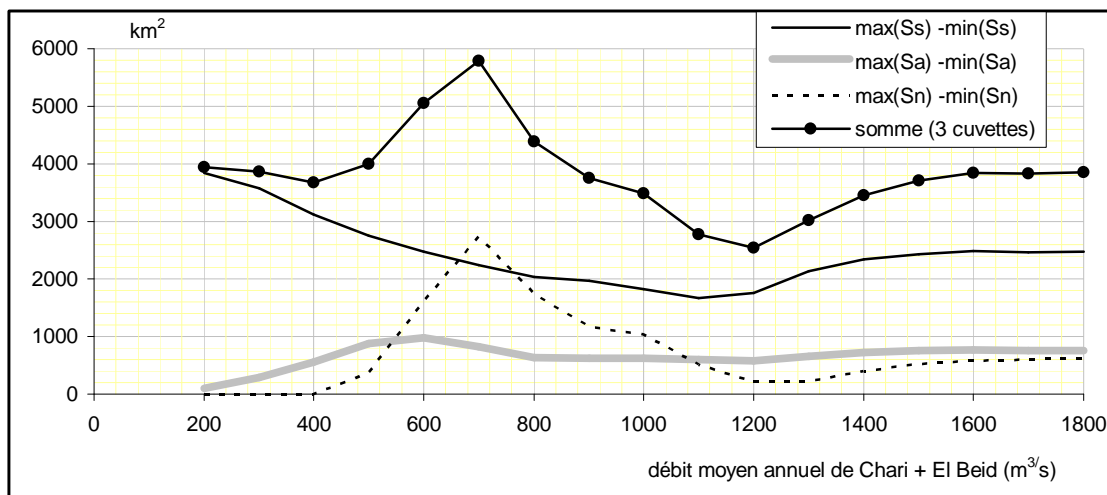


Figure 8 : variation annuelle de superficie inondée sur les trois cuvettes et sur la totalité du lac