

# **Modélisation hydrologique distribuée : Application au Bassin Versant du Lac Tchad**



***LE COZ Mathieu***

*Master Recherche Eau et Environnement – SupAgro Montpellier*

*Maison des Sciences de l'Eau – Montpellier, janvier-juin 2007*

*Directeur de stage : M. DELCLAUX François*

# Remerciements

Je remercie François Delclaux de m'avoir proposé ce stage et de m'avoir une nouvelle fois encadré avec une grande disponibilité.

Je remercie également Eric Servat, directeur de l'UMR HydroSciences Montpellier, pour m'avoir accueilli.

## Avant-propos

Le présent travail a été réalisé au cours d'un stage dans le cadre du M2 Recherche « Eau et Environnement », enseigné à SupAgro Montpellier. D'une durée de 6 mois, ce stage a été effectué à la Maison des Sciences de l'Eau (MSE) dans l'axe 3 de l'unité mixte de recherche HydroSciences Montpellier (HSM), composée de personnel de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), de l'Université de Montpellier II (UMII), et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Il a été encadré par M. François Delclaux, membre permanent IRD de cette unité.

Les recherches effectuées au sein de HSM (<http://www.hydrosciences.org/>) ont essentiellement trait à l'étude des impacts climatiques et anthropiques sur les ressources en eau en milieux méditerranéen et tropical. La finalité de ces travaux passe à la fois par l'analyse et la modélisation des processus mis en jeu et par la caractérisation de phénomènes régionaux. Ils s'organisent autour de quatre axes comprenant chacun plusieurs thèmes :

-Axe 1 : processus biogéochimiques, risques écologiques et remédiation

-Axe 2 : karsts et milieux fissurés

**-Axe 3 : variabilité hydrologique : analyse, mécanismes et impacts sur les ressources en eau**

-Axe 4 : risques hydrologiques liés aux aléas extrêmes

L'axe 3, en particulier, poursuit ses travaux dans le cadre de l'étude des changements hydrologiques, d'origine climatique et/ou anthropique, dans les zones tropicales et semi-arides. La notion de ressource est omniprésente dans les thématiques retenues dans cet axe, qui est également centré sur des problématiques faisant intervenir la modélisation, qu'elle soit de processus ou de fonctionnement des bassins versants. Le travail effectué dans le cadre de ce stage a notamment repris ces thématiques.

# Sommaire

Remerciements	2
Avant-propos	3
Introduction	6
<b>I. Contexte et objectifs de l'étude</b>	<b>8</b>
1. Le bassin versant du lac Tchad	8
1.1. Géographie et climatologie	8
1.2. Hydrographie	9
1.3. Aperçu hydrogéologique	11
1.4. Le lac Tchad	12
2. Modélisation hydrologique du BVLT : état des lieux, critiques et perspectives	15
2.1. Typologie des modèles hydrologiques	15
2.2. Modélisation hydrologique du BVLT : l'association IBIS-HYDRA	16
2.2.1. Le modèle de biosphère IBIS	16
2.2.2. Le modèle HYDRA	17
2.2.3. L'association IBIS-HYDRA	17
2.3. Vers une restructuration de la modélisation	18
2.3.1. IBIS : une simulation des ruissellements peu pertinente	18
2.3.1. HYDRA : une structure intéressante	19
<b>II. Le modèle HYDRA</b>	<b>21</b>
1. Fonctionnement général	21
2. Structure du modèle	23
2.1. Les mailles « versant »	23
2.2. Les mailles « lac »	24
2.3. Des mailles « lac » et « versant »	25
<b>III. Données géomorphologiques</b>	<b>26</b>
1. Agrégation et comparaison de MNT	26
1.1. Le MNT SRTM30c	26
1.2. Agrégation du MNT SRTM30c	27
2. Morphologie des dépressions : le lac Tchad	28
3. Définition des directions d'écoulement	29
3.1. Méthodologie	29
3.1.1. Définition des directions d'écoulement et extraction du réseau hydrographique	29

3.1.2. Qualité des MNT au regard des directions d'écoulement	29
3.1.3. Méthode adoptée	30
3.2. Comparaison des réseaux hydrographiques	31
3.2.1. Comparaison qualitative	31
3.2.2. Comparaison quantitative	33
4. Choix d'un MNT	36
IV. Développement d'un modèle hydrologique	39
1. Méthodologie et contexte du développement	39
1.1. Méthodologie	39
1.1.1. Les modèles « à paramètres »	39
1.1.2. Méthode de développement adoptée	40
1.2. Contexte du développement	41
1.2.1. Période d'étude	41
1.2.2. Données d'entrée des modèles	42
2. Intégration d'une fonction de production GR au modèle HYDRA	43
2.1. Choix d'une fonction de production	43
2.1.1. Les modèles GR	43
2.1.2. La fonction de production du modèle GR2M-94	43
2.2. Association de la production GR2M-94 et d'HYDRA	45
2.2.1. Concept d'écoulement hypodermique	45
2.2.2. Adaptation des structures	45
2.2.3. Performances des modèles proposés	47
3. Essai de perfectionnement du modèle GR-HYDRA-B	50
3.1. Critique du modèle GR-HYDRA-B	50
3.1.1. Une structure à perfectionner	50
3.1.2. Une signification discutable du paramètre C	50
3.2. Essai de perfectionnement du modèle GR-HYDRA-B	51
3.2.1. Conséquences de la variabilité du paramètre C sur les performances de GR-HYDRA-B	51
3.2.2. Implémentation d'un terme de pertes vers le milieu souterrain à la structure de GR-HYDRA-B	52
3.2.3. Discussion sur la structure du modèle GR-HYDRA-C	54
4. Le modèle GR-HYDRA-B : état actuel	56
Conclusions et perspectives	57
Référence bibliographiques	
Liste des figures et des tableaux	64
Annexes	67

# Introduction

Le bassin versant du lac Tchad, qui s'étend sur 2 500 000 km<sup>2</sup> à travers l'Afrique soudano-sahélienne, est le plus vaste bassin endoréique au monde. L'ensemble de son réseau hydrographique converge vers une dépression centrale où s'est formé le lac Tchad. Ce lac, du fait notamment de sa faible profondeur, est très sensible aux changements climatiques. Cela se traduit par des variations de surface rapides et importantes qui peuvent avoir des répercussions dramatiques pour les populations locales. En effet, ce lac situé au cœur du Sahel constitue un réservoir d'eau de consommation et d'irrigation unique en son genre. De plus, il est à la base de l'activité économique de la région, grâce à la pêche et aux échanges commerciaux qu'il permet.

HYDRA est un modèle hydrologique distribué permettant de simuler le fonctionnement de bassins versants continentaux tel que celui du lac Tchad. Sa principale caractéristique est de redéfinir les zones inondées à chaque pas de temps. Il est donc particulièrement adapté à la modélisation du bassin du lac Tchad, afin de comprendre et de prévoir les variations de surface du lac. Pour fonctionner, HYDRA nécessite en entrée des données climatiques et des données descriptives du milieu.

Actuellement, plusieurs Modèles Numériques de Terrain (MNT), issus du MNT SRTM, permettent de générer les données descriptives du milieu. L'un des objectifs de la présente étude est de déterminer celui qui, parmi eux, est le plus approprié au regard de cette application. D'autre part, les données climatiques de ruissellements utilisées jusqu'à présent en entrée d'HYDRA, issues du modèle de biosphère IBIS, se révèlent de qualité médiocre au niveau du bassin du lac Tchad. Le second objectif de cette étude est de développer une structure de production des ruissellements plus pertinente et intégrée à HYDRA.

Dans la première partie de ce rapport, le bassin versant du lac Tchad et l'état actuel de sa modélisation sont présentés de façon à définir précisément le contexte et les objectifs de l'étude.

Dans une deuxième partie, la structure du modèle HYDRA est détaillée afin de comprendre son fonctionnement particulier.

Dans la troisième partie, les différents MNT utilisables en entrée d'HYDRA sont comparés au regard de leurs caractéristiques susceptibles d'influencer la modélisation, à savoir la morphologie des dépressions et les directions d'écoulement. Concernant ce dernier critère, une méthode d'évaluation originale est proposée. Cette étude comparative est complétée par une analyse de la sensibilité du modèle aux MNT. Ainsi, le MNT le plus approprié est mis en évidence.

Dans la quatrième partie, un développement d'HYDRA est proposé via l'implémentation à sa structure d'une nouvelle fonction de production des ruissellements. Divers modules (écoulement hypodermique, pertes vers le milieu souterrain) sont ensuite testés afin de permettre une amélioration des performances du modèle.

# **-I-**

## **Contexte et objectifs de l'étude**

### **1. Le bassin versant du lac Tchad**

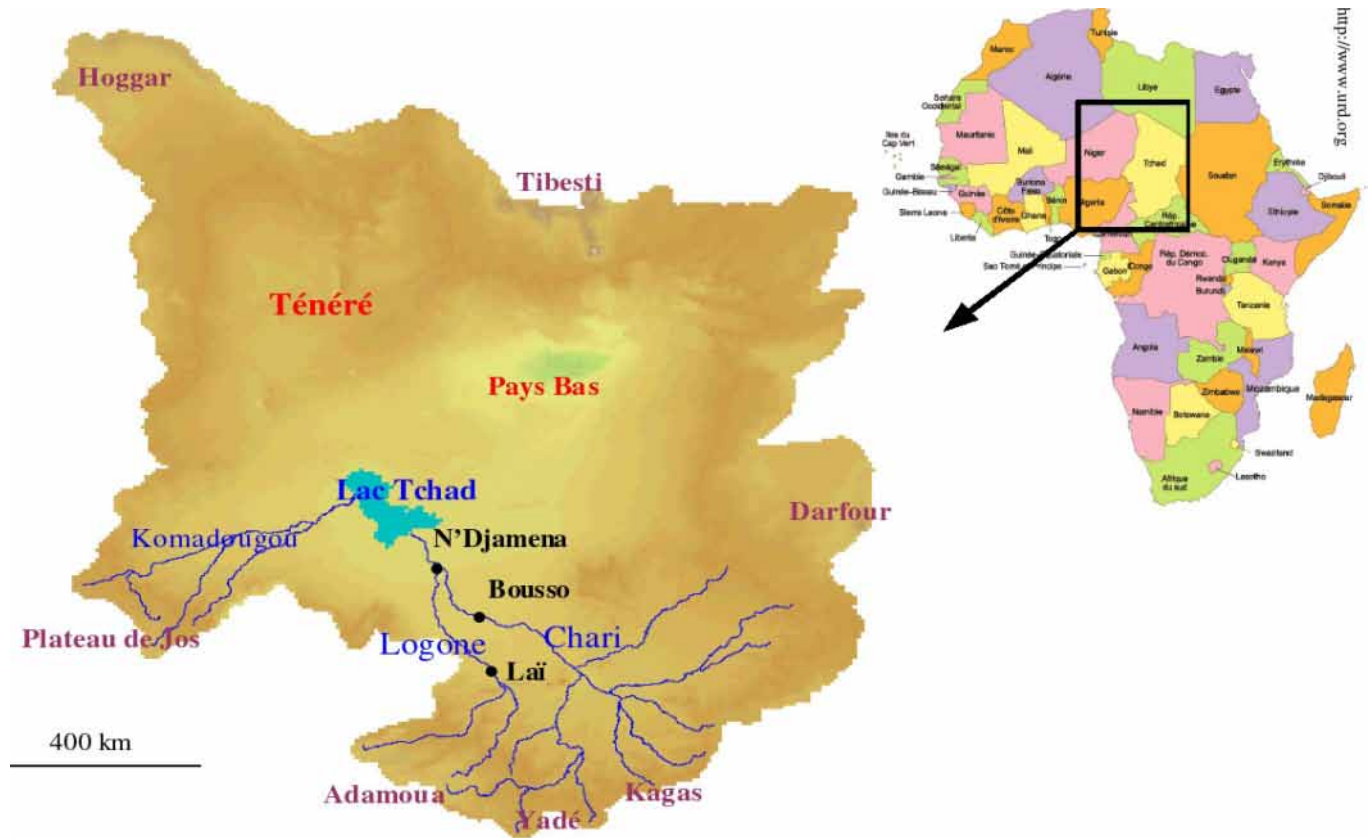
Avant d'envisager sa modélisation, il convient d'appréhender le fonctionnement hydrologique particulier du bassin versant du lac Tchad.

#### 1.1. Géographie et climatologie

Le Bassin Versant du Lac Tchad (BVLT) se situe au centre du continent africain, entre les latitudes 5°N et 25°N et les longitudes 7°E et 27°E. Il s'étend sur environ 2 500 000 km<sup>2</sup> à travers les territoires souvent désertiques du Niger (désert du Ténéré), du Nigeria, du Tchad, du Cameroun et jusqu'aux confins de l'Algérie, de la Libye, du Soudan et de la République Centrafricaine, ce qui en fait le plus vaste bassin endoréique au monde (Figure I-1). En effet, enclavé entre des chaînes de montagnes (Tibesti, Darfour) et des hauts plateaux (Adamoua), l'ensemble de son réseau hydrographique converge vers une dépression centrale (la cuvette tchadienne) où s'est formé le lac Tchad. Outre ces reliefs limitrophes, le BVLT reste relativement plat.

Le climat de cette région est lié aux mouvements de la Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC) (Olivry et al,1996). La ZITC correspond à la zone d'ascendance de l'air chaud équatorial à l'origine de flux atmosphériques : un flux continental sec, l'harmattan, provenant du nord-est et un flux océanique humide, de mousson, provenant du sud-est. Au nord de la ZITC, l'harmattan impose un climat sec tandis qu'au sud, le flux de mousson apporte des précipitations intenses. La ZITC migre au cours de l'année et balaie notamment le sud du BVLT. Elle atteint sa position la plus septentrionale en juillet-août.

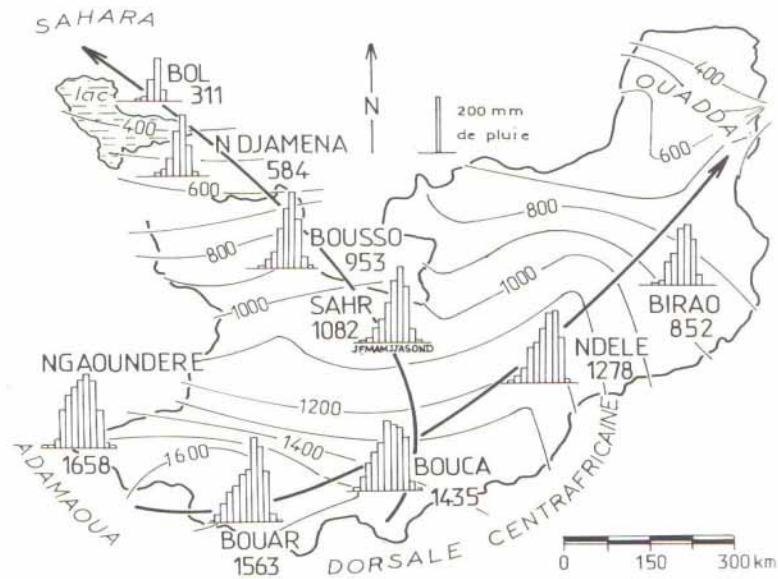




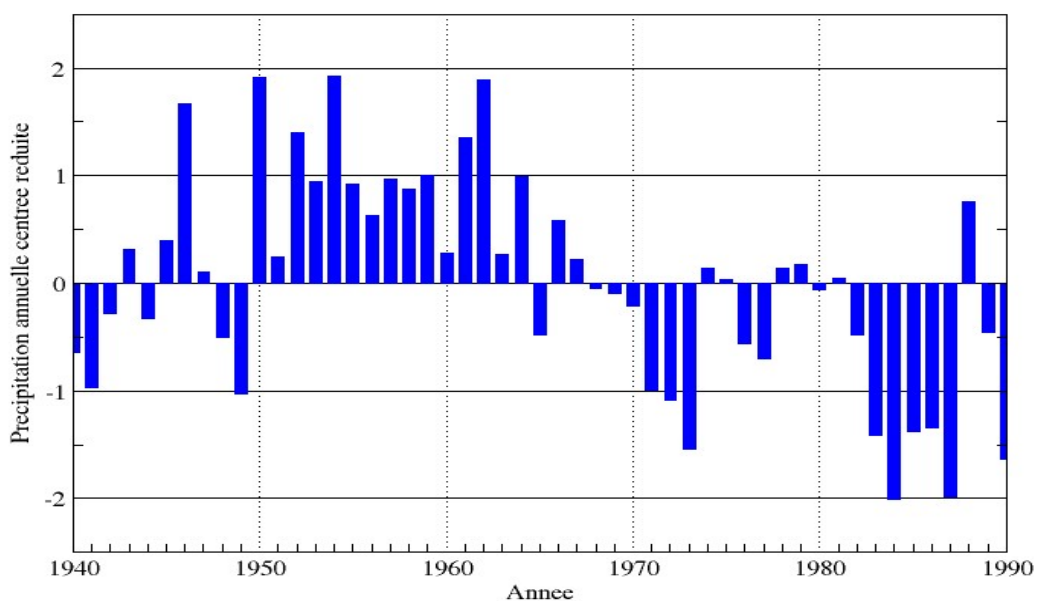
**Figure I-1** : Le bassin versant du lac Tchad.

Ainsi, au sud du BVLT, le climat est de type soudano-guinéen (une saison chaude, une saison humide) et la saison humide apportée par le flux de mousson dure jusqu'à 8 mois. Les précipitations, maximales en août, ont une moyenne annuelle supérieure à 1500 mm. Plus au nord, au niveau du lac Tchad notamment, le climat est de type soudano-sahélien (une saison sèche et fraîche, une saison sèche et chaude, une saison humide) car la ZITC n'atteint la zone qu'en juillet-août, seuls mois humides où les précipitations totales moyennes ne dépassent guère les 300 mm (Figure I-2). Enfin, la moitié nord du BVLT est constamment soumise à l'harmattan et le climat est de type sahélo-saharien, les précipitations étant négligeables. Les températures moyennes annuelles, supérieures à 25°C sur l'ensemble du bassin, tendent à augmenter vers le sud mais de façon relativement modérée (Gac, 1980).

Depuis la fin des années 1960, l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest et Centrale est touché par une sécheresse qui se caractérise par sa durée, son intensité et son extension (Ardoin-Bardin, 2004). Ainsi, sur le BVLT notamment, les précipitations annuelles ont nettement diminué (Figure I-3).



**Figure I-2 :** Pluviosité et isohyètes annuels au sud du bassin versant du lac Tchad, avant 1970 (Gac, 1980).



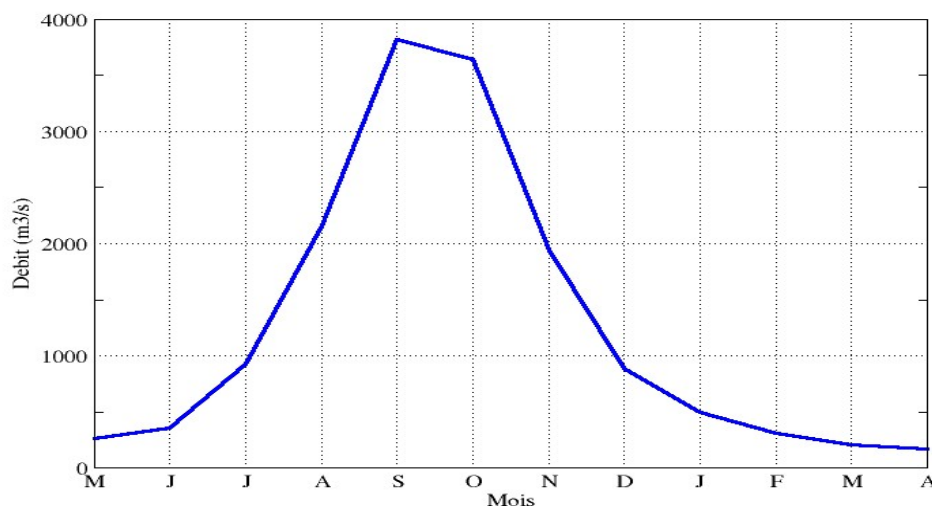
**Figure I-3 :** Indices pluviométriques sur le bassin versant du lac Tchad pour la période 1940-1990 (source : Climatic Research Unit, Norwich, UK).

## 1.2. Hydrographie

Les conditions climatiques du BVLT permettent de comprendre que seule sa partie sud est hydrologiquement active (Figure I-1). Celle-ci s'étend sur 700 000 km<sup>2</sup> (moins d'un tiers de la superficie totale du bassin) dont 600 000 km<sup>2</sup> correspondent aux sous-bassins du Chari et du Logone.

Les branches principales du Chari, fleuve le plus important du BVLT, prennent leur source dans les monts du Yadé en République Centrafricaine. Elles se rejoignent dans la cuvette tchadienne, où le lit du fleuve s'élargit, les eaux d'inondation pouvant alors s'étendre sur un front de plus 8 km (Gac, 1980). Le Logone prend sa source dans le massif de l'Adamoua au Cameroun et se jette dans le Chari à N'Djamena, après avoir traversé de vastes plaines d'inondation, les Yaérés. Après leur confluence, ces deux fleuves prennent une allure deltaïque et leurs eaux rejoignent le lac Tchad.

Bien qu'il connaisse des variations annuelles et inter-annuelles importantes, le débit annuel du complexe Chari-Logone pour la période 1956-1975 est de 1200 m<sup>3</sup>/s, dont 60% proviennent du Chari et 40% du Logone (Gac, 1980). Son régime est qualifié de tropical naturellement régularisé, du fait de l'écrêtement des crues au sein des plaines d'inondation. L'étiage s'étale de décembre à juin et la crue atteint son maximum en septembre-octobre (Figure I-4). Entre 1975 et 1990, la sécheresse a entraîné une diminution des volumes transportés par ce fleuve, le débit moyen annuel s'abaissant à moins de 700 m<sup>3</sup>/s (Djoret, 2000).



**Figure I-4 :** Hydrogramme du Chari-Logone pour l'année moyenne sur la période 1956-1975 (Gac, 1980).

Le Chari-Logone apporte au lac Tchad plus de 80% de ses apports tributaires (Olivry et al. 1996). La Komadougou Yobé, fleuve intermittent nigérian, est l'autre tributaire notable du lac. Ses débits sont néanmoins très nettement inférieurs à ceux du Chari-Logone (débit annuel moyen estimé à 16 m<sup>3</sup>/s pour la décennie 1960-70 (Olivry et al., 1996)).

### 1.3. Aperçu hydrogéologique

La cuvette tchadienne fait partie d'un grand bassin sédimentaire post-paléozoïque. Ces sédiments, principalement déposés lors des phases de transgression lacustre, reposent en discordance sur le socle Archéen et Protérozoïque qui affleure au niveau des reliefs délimitant le BVLT.

Les terrains superficiels de la cuvette tchadienne sont constitués de 60 à 100 m de sables éoliens quaternaires reposant sur une couche argileuse de plus de 200 m. Ces sables recèlent une nappe phréatique couvrant environ 500 000 km<sup>2</sup>, parfois discontinue du fait de la présence de lentilles d'argile (Leblanc, 2002).

Diverses études à des échelles régionales [e.g. (Massuel, 2001) ; (Djoret, 2000)] ou globales (Leblanc, 2002) ont permis de caractériser des zones de recharge ou de décharge de cette nappe. Cependant, il reste difficile de les associer à des processus d'infiltration ou d'exfiltration, les phénomènes de reprises évaporatoires étant prépondérants sous ces latitudes.

#### 1.4. Le lac Tchad

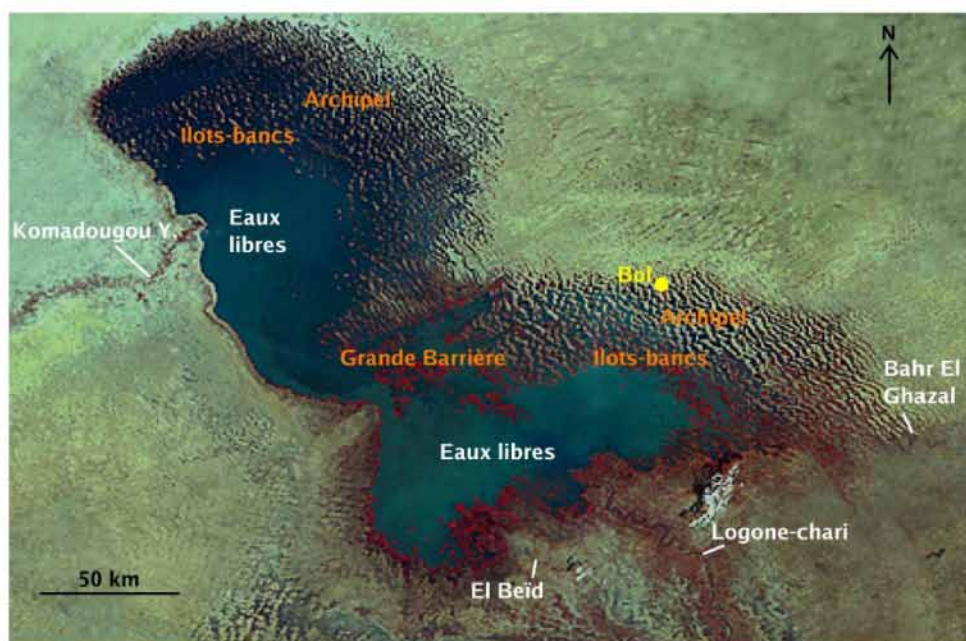
L'ensemble du réseau hydrographique décrit précédemment converge vers une vaste zone dépressionnaire où toutes les eaux drainées sur le bassin versant s'accumulent. A l'Holocène supérieur (environ 6000 ans BP), celle-ci aurait été occupée par un lac d'une superficie de 340 000 km<sup>2</sup>, le Méga-lac Tchad (Leblanc et al., 2006). Cette dépression est elle-même constituée de deux cuvettes, l'une plus profonde au nord, actuellement occupée par un erg (les « Pays-Bas » du Tchad) et l'autre, au sud, qui reçoit la majeure partie des eaux du bassin versant et qui contient le lac Tchad actuel. Ces deux cuvettes sont reliées par le Bahr El Ghazal, émissaire fossile du lac.

Le lac Tchad occupe actuellement une superficie comprise entre 10 000 et 25 000 km<sup>2</sup> selon l'importance des crues de ses tributaires, ce qui en fait l'un des 20 plus grands lacs au monde. Ces variations de superficie s'expliquent par la faible tranche d'eau du lac (3 à 4 m en moyenne), par l'évaporation intense à laquelle celle-ci est soumise ainsi que par la variabilité des débits du Chari et du Logone.

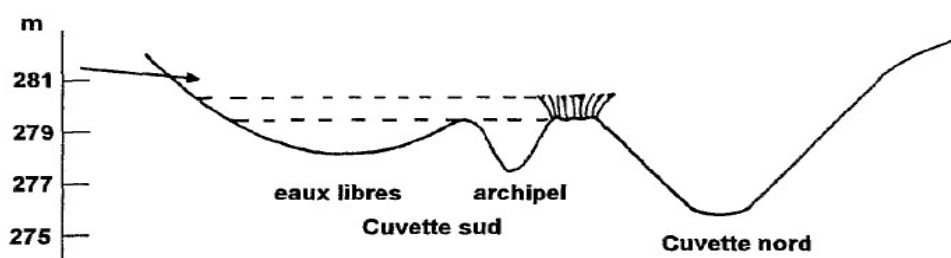
La morphologie du lac est très irrégulière et plusieurs entités peuvent être distinguées (Olivry et al., 1996) (Figure I-5). Tout d'abord, il convient de différencier la cuvette sud de la cuvette nord qui sont séparées par une zone de hauts-fonds, la Grande Barrière. Lorsque les cotes sont basses, celle-ci peut être exondée, ce qui provoque alors la scission du lac en deux parties indépendantes. La cuvette nord est dès lors alimentée par les faibles débits de la Komadougou Yobé, tandis que la cuvette sud reçoit les eaux plus abondantes du Chari-Logone. Le retour à un lac unique est perturbé par une végétation dense qui se développe sur les parties exondées de la Grande Barrière, et se fait à une cote plus élevée que celle ayant conduit à la scission (Figure I-6).

Au sein des deux cuvettes, certaines zones plus profondes, notamment à l'embouchure des différents tributaires, se caractérisent par de vastes étendues d'eau libre. Les zones moins profondes, recouvertes de végétation palustre, sont qualifiées de marécages.

Le nord et l'est du lac sont bordés par un erg fixé qui forme l'archipel, une zone présentant de nombreuses îles. Celles-ci diminuent de hauteur vers l'intérieur du lac et constituent alors les îlots-bancs, zones de hauts-fonds recouverts de végétation.

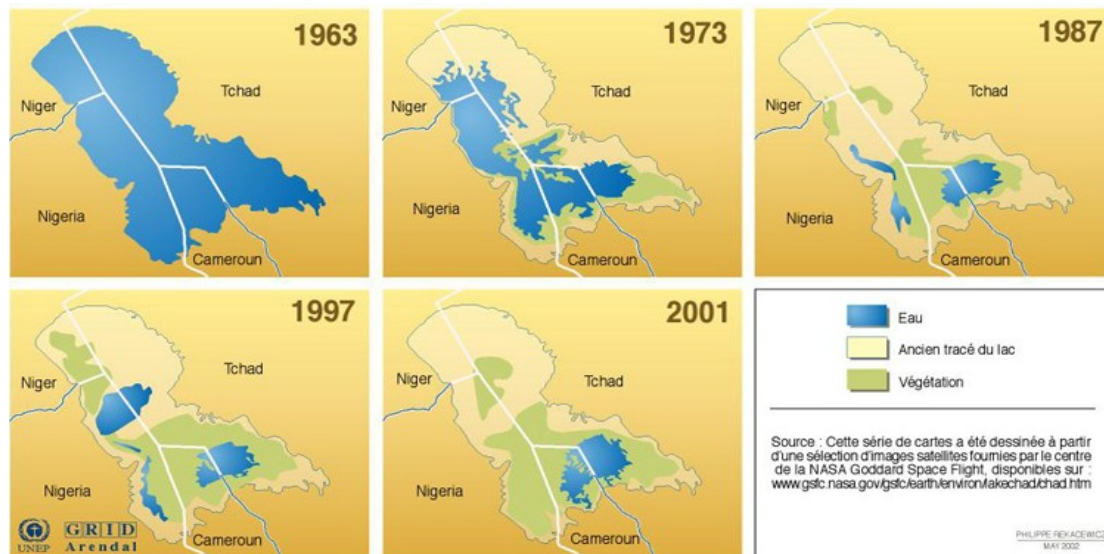


**Figure I-5 :** Régions naturelles du lac Tchad : la végétation apparaît en rouge (source : NASA, 1973).



**Figure I-6 :** Coupe schématique SE-NO du lac en période « Petit Tchad » (Olivry et al,1996).

Au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, les niveaux du lac ont varié si bien que celui-ci est passé par trois « stades » (Olivry et al,1996) (Figure I-7). En 1957 et entre 1963 et 1965, la cote du lac est supérieure à 283 m et il se rapproche ainsi du stade « Grand-Tchad » qui se caractérise par l'inondation des îlots-bancs et une surface supérieure à 20 000 km<sup>2</sup>. Durant la majeure partie des années et 1950 et 1960, une cote proche de 282 m associée à une surface en eau comprise entre 15 000 et 20 000 km<sup>2</sup> correspond au stade « Moyen-Tchad ». En 1973 et depuis 1975, une cote inférieure à 280 m entraîne la scission du lac via l'exondation de la Grande Barrière. Ce stade est dit « Petit-Tchad ».



**Figure I-7 :** Variation de surface du lac Tchad depuis 1963 (<http://www.grida.no/climate/>).

Le recul des cotes ou les remises en eau brutales du lac Tchad, ont des impacts importants sur les activités sociaux-économiques de plus de 20 millions de personnes (Roubinet, 2007). **La connaissance et la compréhension du régime hydrologique du lac et de son bassin versant représentent donc un enjeu majeur à l’origine de nombreuses études. Les plus récentes utilisent les nouvelles technologies et plus particulièrement les Systèmes d’Information Géographique (SIG) et les outils de modélisation informatique.**

## **2. Modélisation hydrologique du BVLТ : état des lieux, critiques et perspectives**

Le modèle mécaniste IBIS et le modèle conceptuel HYDRA ont récemment permis de simuler le fonctionnement hydrologique du BVLТ. Après une définition de leur typologie, IBIS et HYDRA sont présentés puis critiqués au regard de cette application. Une restructuration de la modélisation peut ainsi être envisagée.

### 2.1 Typologie des modèles hydrologiques

La détermination des débits à partir de la précipitation, de l'évaporation et d'autres facteurs occupe actuellement une place centrale dans les sciences hydrologiques, en témoignent les nombreux modèles hydrologiques développés au cours des dernières décennies. Ces modèles, outils de connaissance et/ou de gestion, visent à décrire le comportement de bassins versants via une représentation simplifiée de la réalité (Makhlouf, 1994). En effet, la compréhension imparfaite du cycle hydrologique nécessite une réduction de la complexité naturelle des processus qui le constituent, simplification qui peut être envisagée, selon le contexte et les objectifs de la modélisation, à travers diverses approches (Perrin, 2000).

Ainsi, les modèles mécanistes (ou à bases physiques) sont fondés sur des équations relatives aux connaissances physiques concernant le cycle de l'eau. Pour pallier la non-exhaustivité de ces connaissances, des paramètres de calage, à optimiser selon les applications, peuvent néanmoins être introduits au sein des équations (Edijatno et al., 1999). De tels modèles nécessitent une compréhension approfondie des processus en jeu ainsi que des informations riches et précises sur l'état du système étudié.

Lorsque ces conditions ne sont pas réunies, une simplification du comportement du système est requise et des modèles conceptuels peuvent être développés. Les différents processus pouvant influencer les débits sont alors représentés par des sous-modèles empiriques, associés à des paramètres de calage et à des paramètres fixés représentant des propriétés physiques des bassins. Cette approche peut aboutir à des architectures complexes, dépendantes de la perception de la réalité qu'a le modélisateur.

Au contraire, les modèles empiriques sont développés sans conception a priori sur le cycle hydrologique, à partir d'une architecture simple et parcimonieuse (nombre minimum de paramètres de calage) qui n'est compliquée que pour faire face aux difficultés à reproduire les observations (Nash et Sutcliffe, 1970). Ils correspondent à une combinaison d'opérateurs mathématiques reliant les données de forçage aux variables de sortie.

Les paramètres de calage des modèles empiriques peuvent cependant parfois être associés à des caractéristiques physiques des bassins et leurs structures se rapprocher de celles de modèles conceptuels.

Bien qu'elle soit couramment admise, cette classification des modèles hydrologiques selon leur mode de représentation de la réalité reste incomplète et discutable (Perrin, 2000). De plus, d'autres critères de classification sont utilisés. Ainsi, par exemple, les modèles sont qualifiés de globaux lorsque les bassins sont considérés comme des entités aux caractéristiques homogènes et de distribués lorsque les bassins sont spatialement discrétisés, de manière à rendre compte de la variabilité de leurs propriétés.

## 2.2. Modélisation hydrologique du BVLTL : l'association IBIS-HYDRA

### **2.2.1. Le modèle de biosphère IBIS**

Les modèles de biosphère ont pour objet la représentation des processus physiques relatifs à la partie superficielle de la Terre (sol-plante-atmosphère). Via plusieurs modules interdépendants, le modèle distribué IBIS (Integrated Biosphere Simulator), développé en 1996 par l'Université du Wisconsin-Madison, permet de simuler un grand nombre de ces processus ainsi que leur dynamique (Foley et al., 1996). IBIS est constitué de quatre modules principaux, un module de surface, un module de phénologie végétale, un module de bilan de carbone et un module de dynamique végétale. A partir de données de forçage climatique et de données descriptives du milieu, le module de surface permet notamment de modéliser les flux d'eau au sein du complexe sol-plante-atmosphère.

Le forçage climatique du module de surface d'IBIS nécessite de nombreuses données (température de l'air, vitesse du vent, précipitation, radiations solaires, etc.), mais leur fréquence peut être inférieure au pas de temps de la modélisation. En effet, ce module comporte un « générateur » de climat qui permet, par une approche stochastique, de générer des données journalières ou horaires à partir de données mensuelles. Les données descriptives du milieu caractérisent la végétation des strates arborée et herbacée ainsi que le sol jusqu'à 4 m sous la surface. Certaines propriétés de la végétation et du sol peuvent évoluer au cours des simulations selon les informations délivrées par les autres modules d'IBIS.

Le module de surface permet ainsi de modéliser l'infiltration, les ruissellements superficiel et l'écoulement hypodermique, l'humidité du sol, les prélèvements d'eau racinaire et la transpiration des plantes (Li et al., 2004). L'infiltration et le ruissellement de surface sont calculés à partir de la loi de Darcy et d'un seuil de saturation défini selon les propriétés physiques du milieu. L'humidité du sol est déterminée grâce aux équations de Richards et dépend donc de la quantité d'eau infiltrée et des propriétés du sol, mais également des prélèvements racinaires. Ces derniers, fonctionnellement liés à la transpiration, sont déduits des caractéristiques de la végétation, du climat et de la quantité d'eau disponible dans le sol.



D'autre part, une partie de l'eau du sol participe à l'écoulement hypodermique. Afin de considérer les variations des processus biophysiques et physiologiques durant les cycles diurnes, le module de surface fonctionne au pas de temps horaire et la résolution spatiale du modèle dépend de la résolution des données d'entrée disponibles.

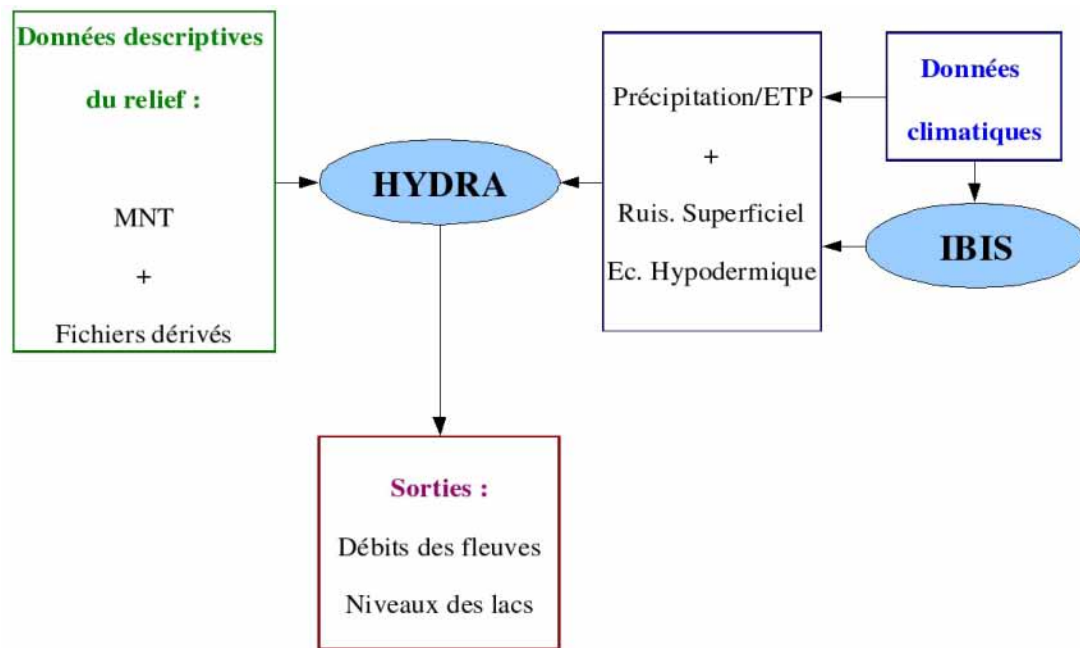
### **2.2.2. Le modèle HYDRA**

HYDRA (HYDrological Routing Algorithm), développé en 1999, également à l'Université du Wisconsin-Madison, est un modèle permettant de simuler les débits des fleuves ainsi que la position et la dynamique des lacs à l'échelle continentale (Coe, 1999). Ce modèle s'applique sur des bassins versants spatialement discrétisés, ce qui permet de différencier des entités exondées (« versant ») et des entités inondées (« lac »). La caractéristique principale d'HYDRA est de redéfinir ces entités à chaque pas de temps, selon le volume d'eau libre simulé au sein de chacune des mailles constituant le bassin. HYDRA requiert, pour son forçage climatique, des données de précipitation, d'évapotranspiration potentielle (ETP), de ruissellement superficiel et d'écoulement hypodermique. De plus, en entrée, le modèle nécessite des données descriptives du relief (ou géomorphologiques) issues d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Pour chacune des mailles appartenant à l'entité « versant », le flux hydrique est simulé par une association de trois réservoirs linéaires où transitent les ruissellements superficiel et hypodermique et les flux provenant des mailles amont (cf. II.). L'eau est ainsi acheminée vers le réseau hydrographique puis vers les dépressions où elle inonde des mailles qui appartiennent dès lors à l'entité « lac ». L'ETP et la précipitation s'appliquent uniquement aux mailles de cette entité. HYDRA permet donc de simuler à chaque pas de temps, les flux d'eau transitant au sein de l'ensemble des mailles et la position, la surface et le volume des zones inondées. Bien que les sorties soient exploitées au pas de temps mensuels, le modèle fonctionne classiquement au pas de temps horaire, selon une résolution spatiale dépendante des données d'entrées, particulièrement des données géomorphologiques.

### **2.2.3. L'association IBIS-HYDRA**

A partir de données climatiques et descriptives du milieu, IBIS permet de simuler le ruissellement total au sein de chaque maille d'un espace discrétisé. En terme de modélisation hydrologique, cette propriété peut être assimilée à une fonction de production, composante d'un modèle qui permet la transformation pluie brute/pluie nette. Pour les mailles « versant », HYDRA permet de collecter les ruissellements et d'acheminer l'eau vers les exutoires des bassins et correspond à une fonction de transfert (ou de routage), composante d'un modèle qui permet la répartition temporelle des flux produits. L'association IBIS-HYDRA (Figure I-8) constitue donc un modèle hydrologique cohérent comportant une fonction de production et une fonction de transfert distinctes (en ce qui concerne les mailles « lac », production et transfert sont assurés par HYDRA uniquement).



**Figure I-8 :** L'association IBIS-HYDRA.

IBIS et HYDRA sont qualifiés de modèles à base physique (Li et al., 2004). Cependant, si les ruissellements sont effectivement calculés à partir d'équations décrivant des processus physiques (en les simplifiant néanmoins), le routage via HYDRA, permis par une série de réservoirs linéaires caractérisés par des temps de résidence empiriques (Coe, 1999), est basé sur une conceptualisation des processus.

Grâce à l'association du modèle de biosphère IBIS et du modèle de routage des flux hydriques HYDRA, les débits des fleuves et les dynamiques lacustres au sein de bassins versants continentaux ont été simulés pour un pas de temps mensuel et une résolution spatiale de 5' x 5' (~ 10 km x 10 km à l'équateur). Le comportement du lac Tchad et de ses tributaires ont notamment été modélisés et il est intéressant de critiquer cette association au regard d'une telle application.

## 2.3. Vers une restructuration de la modélisation

### **2.3.1. IBIS : une simulation des ruissellements peu pertinente**

Le module de surface d'IBIS permet de calculer les ruissellements à partir d'équations représentant des processus physiques, ce qui implique, en théorie, une maîtrise et une compréhension de la modélisation. Cependant, pour une bonne reproduction des phénomènes, les nombreuses données de forçage doivent être précisément renseignées. Du fait de la vaste étendue de la région et de la rareté des dispositifs de mesure, ces données sont le plus souvent inaccessibles pour le BVLТ et elles ne peuvent être estimées que de manière imprécise.

Les débits annuels et pluriannuels des tributaires du lac Tchad simulés par l'association IBIS-HYDRA sont très différents des débits observés (Le Coz, 2006) (Tableau I-1). Pour ces échelles de temps, supérieures aux temps de concentration des bassins versants, de telles différences s'expliquent principalement par une production incorrecte et donc, pour ce cas précis, soit par une simulation peu pertinente des ruissellements par IBIS, soit par des pertes ou des apports liés, par exemple, à une mauvaise appréciation des prélèvements anthropiques (Coe & Foley, 2001). Cependant, il est apparu que, pour le BVLT et le bassin du Niger, les ruissellements issus d'IBIS surestimaient les valeurs « réelles » (Li et al., 2004), ce qui a conduit à une modification des équations du modèle via notamment l'introduction de paramètres de calage. Mais, dès lors, les questions de la signification de ces nouvelles équations et de la pertinence d'un modèle mécaniste se posent.

**Tableau I-1** : Différence entre les débits moyens annuels des tributaires du lac Tchad observés et simulés par l'association IBIS-HYDRA, pour la période 1954-1969 (Le Coz, 2006).

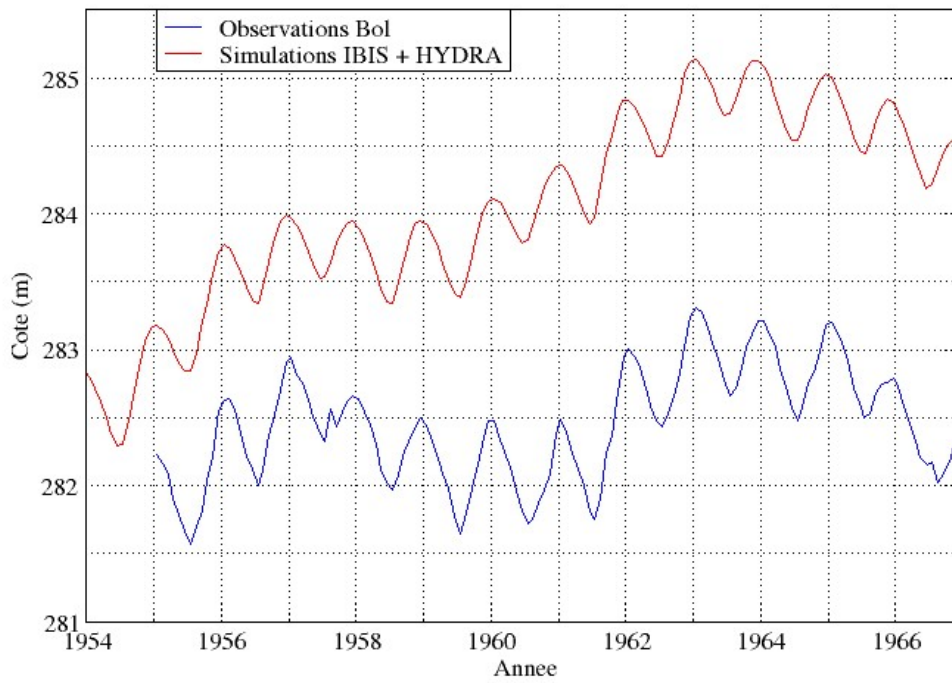
<i>Station</i>	<i>Différence</i>
Logone (Laï)	-74 %
Chari (Bouso)	-19 %
Chari-Logone (N'Djamena)	-27 %
Komadougou-Yobé	+1673 %

Du fait notamment de la qualité médiocre des données de forçage, les simulations des ruissellements au sein du BVLT par le module de surface d'IBIS se révèlent donc peu satisfaisantes. Afin de les améliorer, il conviendrait de préciser les données d'entrée et/ou de modifier la structure du modèle sans en altérer le sens physique. De telles mesures nécessitent des travaux conséquents, basés sur le long terme. La présente étude n'a pas cette ambition et **le module de surface d'IBIS sera remplacé par une fonction de production plus simple à mettre en œuvre et plus performante dans un contexte caractérisé par des données peu nombreuses. Celle-ci sera implémentée au sein de la structure d'HYDRA.**

### **2.3.2. HYDRA : Une structure intéressante**

A l'heure actuelle, les ruissellements calculés par IBIS sont les seules données pouvant être introduites pour le forçage climatique d'HYDRA sur l'ensemble du BVLT. Ces données sont peu précises et ne permettent donc pas une définition exacte de la qualité du modèle de routage. Néanmoins, la variabilité saisonnière des niveaux simulés du lac est généralement synchrone avec la variabilité des niveaux observés, ce qui indique des temps de transfert cohérents (Coe et Foley, 2001) (Figure I-9).

En outre, HYDRA présente un intérêt considérable dans le cadre d'une modélisation de l'hydrologie du BVLT, à savoir la distinction entre les entités « versant » et les entités « lac » et la prise en compte de leur dynamique. Ainsi, les variations de surfaces rapides et importantes caractérisant le lac Tchad peuvent être modélisées.



**Figure I-9 :** Cotes mensuelles du lac Tchad observées et simulées par l'association IBIS-HYDRA entre 1954 et 1967.

Bien que, en ce qui concerne le routage des flux, les performances d'HYDRA n'aient pas été évaluées précisément sur le BVLT, la structure du modèle apparaît particulièrement intéressante pour cette application où la dynamique lacustre est primordiale. **Cependant, à partir de l'agrégation d'un MNT du BVLT, plusieurs MNT utilisables en entrée du modèle peuvent être générés. Afin de déterminer celui qui, parmi eux, est le plus approprié pour cette application, leur qualité doit être évaluée.**

## -II-

# Le modèle HYDRA

## 1. Fonctionnement général

Le modèle HYDRA (Coe, 1999) s'applique sur des bassins versants spatialement discrétisés dont les mailles peuvent intégrer soit des zones exondées (mailles « versant »), soit des zones inondées (mailles « lac »). La répartition de ces entités est variable dans le temps et le fonctionnement du modèle y diffère. Sur les mailles « versant », le modèle permet le routage des ruissellements vers des zones potentielles d'accumulation d'eau (Potentiel Water Area, PWA) où des mailles sont ainsi inondées et définissent dès lors l'entité « lac ». Sur celle-ci, les stocks d'eau sont modulés par les débits provenant des mailles « versant », mais également par l'ETP et la précipitation.

Les données de forçage climatique d'HYDRA sont donc les ruissellements superficiel et hypodermique, la précipitation et l'ETP. De plus, à chacune des mailles, doivent être associées des caractéristiques géomorphologiques issues d'un MNT et de fichiers dérivés :

-Le fichier *basin* définit les mailles appartenant au bassin versant objet de la simulation.

-Le MNT définit l'altitude de chaque maille.

-Le fichier *dir* définit la direction d'écoulement de l'eau au sein de chaque maille.

-Le fichier *flac* définit les mailles appartenant aux PWA, c'est à dire susceptibles de faire partie des entités « lac ».

-Le fichier *exu* définit la position et l'altitude des mailles exutoires des PWA.

Pour des raisons de stabilité numérique liées aux temps de résidence des réservoirs constituant le modèle, le pas de temps requis pour les simulations est inférieur à 2 heures. Cependant, des tests ont montré que l'utilisation d'un pas de temps de 3 heures ne modifiait que très faiblement les sorties du modèle tout en permettant une réduction importante des temps de calcul (Faroux, 2004). Ce pas de temps reste néanmoins généralement inférieur à celui des données de forçage climatique (mensuel pour le BFLT), ce qui implique une répartition temporelle de ces dernières, soit par un « générateur » de climat (e.g. IBIS), soit de manière uniforme.

Les sorties du modèle sont les débits au sein de chaque maille ainsi que la position et le volume d'eau des zones inondées. Bien qu'elles soient simulées à chaque pas de temps, ces sorties ne sont exploitées qu'au pas de temps des données de forçage climatique (i.e. mensuel pour le BFLT).

## 2. Structure du modèle

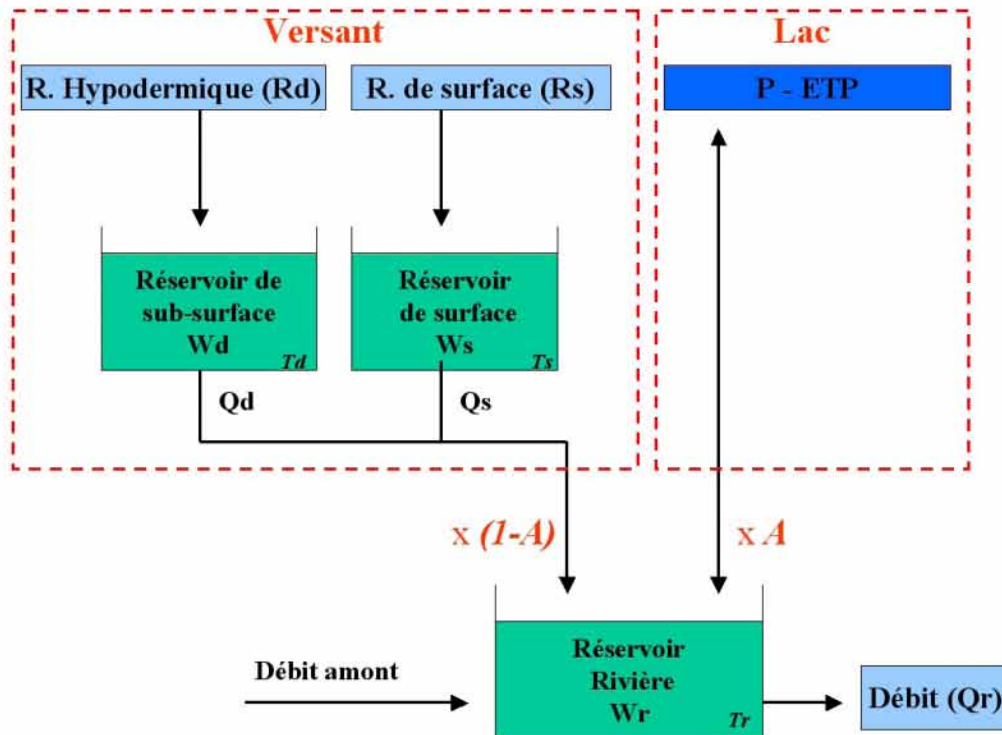


Figure II-1 : Structure du modèle HYDRA (d'après Coe, 1999).

### 2.1. Les mailles « versant »

Soit une maille appartenant à l'entité « versant ». Les processus hydrologiques y sont conceptualisés grâce à trois réservoirs linéaires, le réservoir de surface, le réservoir de sub-surface et le réservoir rivière (Figure II-1). Au temps  $(i-dt)$ , où  $dt$  est le pas de temps de la simulation, les volumes d'eau au sein de ces réservoirs sont respectivement notés  $W_{S_{i-dt}}$ ,  $W_{D_{i-dt}}$  et  $W_{R_{i-dt}}$ .

Au temps  $i$ , le réservoir de surface est alimenté par le ruissellement superficiel  $R_{S_i}$ , donnée de forçage du modèle. Le débit sortant de ce réservoir,  $Q_{S_i}$ , est fonction du temps de résidence qui le caractérise,  $T_s$ , et de  $W_{S_{i-dt}}$ .

$$Q_{S_i} = W_{S_{i-dt}}/T_s \quad (\text{II-1})$$

$$W_{S_i} = W_{S_{i-dt}} + (R_{S_i} - Q_{S_i}).dt \quad (\text{II-2})$$

De même, le réservoir de sub-surface est alimenté par l'écoulement hypodermique  $R_{D_i}$  et le débit sortant,  $Q_{D_i}$  est fonction de son temps de résidence,  $T_d$ , et de  $W_{D_{i-dt}}$ .

$$Qd_i = Wd_{i-dt}/Td \quad (II-3)$$

$$Wd_i = Wd_{i-dt} + (Rd_i - Qd_i).dt \quad (II-4)$$

Le réservoir rivière est alimenté par  $Qs_i$  et  $Qd_i$ , ainsi que par le débit sortant du réservoir rivière de la maille amont au pas de temps  $(i-dt)$ ,  $Qr_{c-1,i-dt}$ . Le débit sortant de ce réservoir,  $Qr_i$ , est fonction de son temps de résidence,  $Tr_i$ , et de  $Wr_{i-dt}$ .

$$Qr_i = Wr_{i-dt}/Tr_i \quad (II-5)$$

$$Wr_i = Wr_{i-dt} + (Qs_i + Qd_i + Qr_{c-1,i-dt} - Qr_i).dt \quad (II-6)$$

d'où :

$$dWr_i/dt = (W_{S_{i-dt}}/Ts + Wd_{i-dt}/Td) + Qr_{c-1,i-dt} - (Wr_{i-dt}/Tr_i) \quad (II-7)$$

Au temps  $(i+dt)$ ,  $Qr_i$  alimente le réservoir rivière de la maille aval ( $Qr_i = Qr_{c+1,i+dt}$ ). La position de cette maille, tout comme celle de la maille amont, est définie par le fichier géomorphologique *dir*.

Les temps de résidence des réservoirs de surface et de sub-surface sont des paramètres du modèles, respectivement fixés à 2 heures et 15 jours. Le temps de résidence du réservoir rivière est déterminé pour chaque maille selon la pente et la distance par rapport à la maille aval, modulés par un coefficient affecté aux entités « versant ».

De proche en proche, les débits sont ainsi transférés jusqu'aux mailles exutoires des PWA, puis l'eau est répartie dans les zones basses de celles-ci et inonde des mailles qui deviennent dès lors des mailles « lac » .

## 2.2. Les mailles « lac »

Soit une maille appartenant à l'entité « lac ». Les processus hydrologiques y sont conceptualisés grâce à l'unique réservoir rivière décrit précédemment (Figure II-1). Au temps  $i$ , ce réservoir est alimenté par la précipitation,  $P_i$ , ainsi que par le débit sortant du réservoir rivière de la maille amont (« versant » ou « lac ») au pas de temps  $(i-dt)$ ,  $Qr_{c-1,i-dt}$ . Les sorties de ce réservoir sont l'ETP,  $E_i$ , et le débit,  $Qr_i$ , fonction de son temps de résidence,  $Tr_i$ , et de  $Wr_{i-dt}$ . Au temps  $(i+dt)$ ,  $Qr_i$  alimente le réservoir rivière de la maille aval ( $Qr_i = Qr_{c+1,i+dt}$ ).

$$Qr_i = Wr_{i-dt}/Tr_i \quad (II-5)$$

$$Wr_i = Wr_{i-dt} + (P_i + Qr_{c-1,i-dt} - E_i - Qr_i).dt \quad (II-8)$$



d'où :

$$dW_{r_i}/dt = (P_i - E_i) + Q_{r_{c-1,i-dt}} - (W_{r_i-dt}/Tr_i) \quad (II-9)$$

Le temps de résidence  $Tr_i$  est déterminé pour chaque maille selon la pente et la distance par rapport à la maille aval, modulés par un coefficient affecté aux entités « lac ».

### 2.3. Des mailles « lac » et « versant »

Selon leurs propriétés géomorphologiques et les volumes d'eau simulés, certaines mailles peuvent être considérées en partie inondées. Le niveau du réservoir rivière est alors influencé par les sorties des réservoirs de surface et de sub-surface affectées du facteur  $(1-A)$  ainsi que par l'ETP et la précipitation affectées du facteur  $A$ , où  $A$  est la proportion de la surface de la maille inondée (Figure II-1).

$$dW_{r_i}/dt = A_i.(P_i - E_i) + (1 - A_i).(W_{s_i}/T_s + W_{d_i}/T_d) + Q_{r_{c-1,i-dt}} - (W_{r_i-dt}/Tr_i) \quad (II-10)$$

## **-III-**

# **Données géomorphologiques**

## **1. Agrégation et comparaison de MNT**

A partir de l'agrégation d'un MNT du BVLTL, plusieurs MNT utilisables en entrée d'HYDRA sont générés. Afin de déterminer celui qui, parmi eux, est le plus approprié pour cette application, leur qualité doit être évaluée au regard des caractéristiques géomorphologiques essentielles au fonctionnement du modèle.

### **1.1. Le MNT SRTM30c**

En février 2000, la mission spatiale SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a permis de relever les altitudes de la majeure partie des terres émergées du globe avec une résolution et une précision jamais atteinte jusqu'alors pour une telle échelle (Rabus et al., 2003). A partir de ces données, le NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) a généré le MNT quasi-mondial SRTM3 ver.2.0. (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), d'une résolution de 3''x3'' et dont les erreurs horizontales et verticales sont respectivement inférieures à 15 m et 16 m (qualité requise) pour 90% des altitudes (Rodriguez et al., 2005).

Cependant, pour que les sorties d'HYDRA et les observations hydrologiques concernant la région du lac Tchad soient directement comparables, les altitudes du MNT utilisé en entrée du modèle et celles relatives aux observations doivent être référencées dans un système similaire. Or, deux études distinctes, l'une réalisée au niveau du lac et l'autre au sud-est de celui-ci, ont permis de mettre en évidence une différence de l'ordre de +3 m entre le MNT SRTM et les données altimétriques recueillies in-situ (Leblanc et al., 2006). Les altitudes du MNT ont donc été abaissées de 3 m (Le Coz, 2006).

Par ailleurs, pour modéliser les niveaux d'eau du lac Tchad, le MNT utilisé en entrée d'HYDRA doit intégrer la topographie des fonds du lac. Or, des profils réalisés sur le MNT SRTM ont montré que, pour les zones inondées lors de la mission SRTM, ce MNT comportait des masques d'altitude uniforme. Un MNT spécifique au lac a donc été généré à partir d'une carte bathymétrique puis a été intégré au MNT SRTM (Le Coz, 2006).

Enfin, pour limiter les temps de calcul d'HYDRA, la résolution du MNT a été fixée à 5'x5' (~10 km x 10 km). Or, la résolution du nouveau MNT, nommé SRTM30c, obtenu via les modifications apportées au MNT SRTM est de 30''x30'' (~1 km x 1 km). C'est pourquoi, préalablement à son utilisation en entrée du modèle, ce MNT doit être rééchantillonné d'une résolution de 30''x30'' à une résolution de 5'x5'.

## 1.2. Agrégation du MNT SRTM30c

Afin de rééchantillonner le MNT SRTM30c, une grille constituée de mailles carrées de 5' de coté lui est superposée. L'agrégation est réalisée en attribuant à chacune des mailles de la grille une altitude représentative des 100 cellules du MNT qu'elle recouvre. Pour cela, plusieurs méthodes basées sur des outils statistiques peuvent être employées : la moyenne, la médiane, le mode, les valeurs minimales et maximales ou le plus proche voisin (altitude de la cellule qui se trouve la plus proche du centre de la maille associée). Six MNT d'une résolution de 5'x5', nommés *moy*, *méd*, *mod*, *min*, *max* et *ppv*, sont ainsi générés et peuvent être utilisés en entrée d'HYDRA.

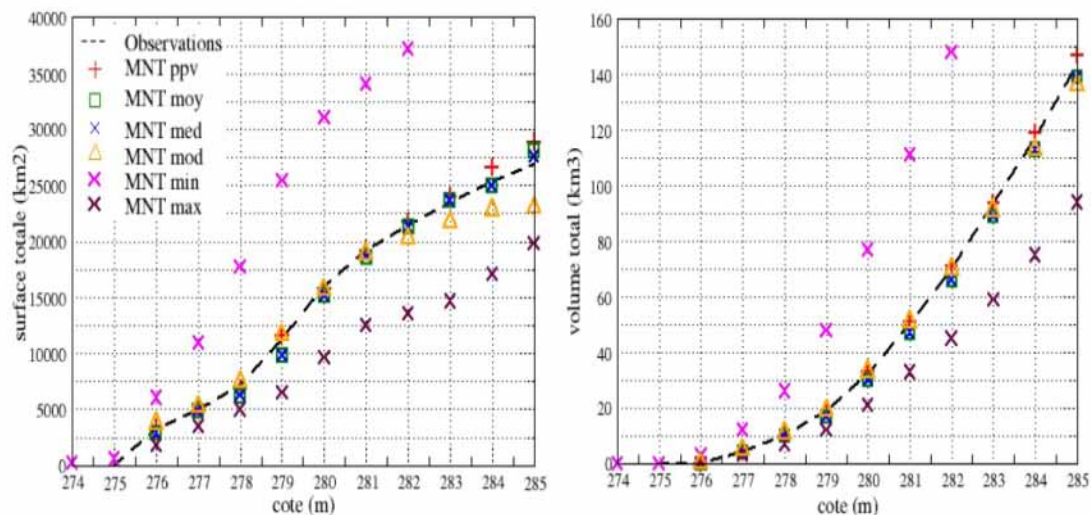
L'agrégation d'un MNT entraîne la perte d'une partie des données contenues par son plan altimétrique et, dès lors, une modification de la qualité des informations qui en sont extraites. Selon la méthode d'agrégation et le type d'information considéré, l'influence du rééchantillonnage peut varier (Takagi, 1996). Cependant, si de nombreuses études ont porté sur la dépendance des informations extraites des MNT par rapport à leur résolution (Charleux-Demargne, 2001), peu de travaux ont été menés quant à l'évaluation des méthodes d'agrégation.

Il convient donc d'évaluer la qualité des différents MNT obtenus à partir de l'agrégation du MNT SRTM30c au regard de leurs caractéristiques susceptibles d'influencer la modélisation du BVLT via HYDRA. Celles-ci sont, d'une part, **la morphologie des dépressions**, dont dépendent la position et le volume des zones inondées et, d'autre part, **les directions d'écoulement**, qui régissent le routage des flux.

## 2. Morphologie des dépressions : le lac Tchad

Une analyse de la représentation de la topographie des fonds du lac Tchad au sein des différents MNT agrégés, dont les conclusions sont rappelées ci-après, a récemment été réalisée (Le Coz, 2006).

Le lac Tchad constitue le principal stock d'eau potentiel du BVLT et la simulation des variations de son niveau est l'un des objectifs primordiaux de la modélisation par HYDRA. La morphologie de la dépression qui l'abrite doit donc être précisément décrite en entrée du modèle, et constitue un critère d'évaluation majeur de la qualité des MNT agrégés. C'est pourquoi, des courbes bathymétriques caractérisant les cuvettes du lac sont extraites de ces différents MNT et sont comparées à des courbes obtenues à partir de l'exploitation d'images Landsat (Lemoalle, 1979) et d'une carte représentant la topographie des fonds du lac (Carmouze & Lemoalle, 1983), utilisées, par ailleurs, pour générer le MNT SRTM30c (Figure III-1).



**Figure III-1 :** Comparaison entre les courbes bathymétriques issues des observations et celles extraites des MNT agrégés.

Les relations bathymétriques extraites des MNT *moy*, *med* et *ppv* sont les plus satisfaisantes. Ainsi, pour une cote donnée, elles permettent d'approcher le volume et la surface associés avec un écart moyen inférieur à 6% par rapport aux observations. Les courbes issues du MNT *mod* sont de qualité moindre, notamment en ce qui concerne les relations cote-surface (écart supérieur à 10%). Pour les MNT *min* et *max*, la morphologie de la dépression du lac n'est pas respectée, les volumes et les surfaces associés à une cote donnée étant très largement surestimés (*min*) ou sous-estimés (*max*).

### **3. Définition des directions d'écoulement**

La définition des directions d'écoulement constitue la seconde caractéristique géomorphologique susceptible d'influencer la modélisation du BVLТ via HYDRA. Une méthode d'évaluation de la qualité des MNT agrégés par rapport à ce critère est donc proposée puis mise en œuvre.

#### **3.1. Méthodologie**

##### **3.1.1. Définition des directions d'écoulement et extraction du réseau hydrographique**

Au sein du SIG Grass (<http://grass.itc.it/>), utilisé lors de la présente étude, les directions d'écoulement sont définies par l'algorithme monodirectionnel D8 (Neteler & Mitasova, 2002). Ainsi, pour une cellule donnée, les flux potentiels sont dirigés vers le centre de la cellule voisine présentant l'altitude la moins importante (8 directions possibles). Le fichier contenant les directions d'écoulement permet notamment de déterminer la surface drainée par chacune des cellules du MNT et leur appartenance ou non au réseau hydrographique. Celui-ci comprend l'ensemble des cellules situées à l'aval des zones d'émergence des rivières, ou cellules têtes de rivière, qui peuvent être définies selon divers critères tels la surface drainée critique, l'indice topographique ou d'autres informations internes ou externes au MNT (Charleux-Demargne, 2001).

La méthode de la surface drainée critique consiste à définir les cellules têtes de rivière comme étant les cellules associées à une aire de drainage seuil. Cependant, notamment pour des bassins présentant une variabilité climatique et géologique importante, à surface drainée équivalente, certains tronçons peuvent effectivement participer au réseau hydrographique (ils seront dits actifs) tandis que d'autres peuvent rester constamment hors d'eau (ils seront dits inactifs). Dès lors, l'arborescence des réseaux extraits des MNT est parfois trop développée pour les zones sèches ou infiltrantes et trop limitée dans les régions humides ou peu perméables. Cette méthode est néanmoins relativement simple à mettre en œuvre et, pour une surface seuil identique, les réseaux issus de différents MNT sont comparables.

##### **3.1.2. Qualité des MNT au regard des directions d'écoulement**

L'évaluation de la qualité des directions d'écoulement extraites des MNT (problématique abordée au cours de nombreux travaux, notamment relatifs aux techniques d'extraction et aux impacts des rééchantillonnages) est généralement menée via l'analyse des réseaux hydrographiques associés. Ceux-ci sont alors comparés à des réseaux de référence, qualitativement ou quantitativement, par rapport à leur position ou à leur géométrie.

Ainsi, le plus souvent [e.g. (Melville & Martz, 2004) ; (Kenny & Matthews, 2005)], le réseau à évaluer et le réseau de référence sont préalablement affichés sur une même image, ce qui permet d'apprécier visuellement leur degré de ressemblance et de mettre en évidence leurs principales divergences de tracé. Cette comparaison qualitative est d'autant plus aisée que les réseaux sont peu denses.

Afin de comparer de manière quantitative le positionnement des réseaux, les distances entre des points remarquables qu'ils comportent peuvent être mesurées (Charleux-Demargne, 2001). Cette méthode reste néanmoins très ponctuelle et une approche plus « globale » consiste à déterminer la proportion du réseau de référence interceptée par le réseau à évaluer (Kenny & Matthews, 2005). L'analyse de leur fonction longueur (Fekete et al., 2001) ou le calcul d'indices caractéristiques de leur arborescence tels l'ordre de Stralher maximum, le rapport de confluence ou le rapport de longueur [(Fekete et al., 2001) ; (Melville & Martz, 2004)], permettent de comparer la géométrie des réseaux.

### **3.1.3. Méthode adoptée**

La méthode de la surface drainée critique est employée pour extraire les réseaux hydrographiques des différents MNT agrégés. La surface seuil est fixée à 10 000 km<sup>2</sup>, de façon à représenter les principaux tronçons actifs du bassin, notamment ceux du Chari et du Logone. Bien que comparables entre eux, ces réseaux sont, par rapport au réseau actif, trop développés au nord du BVL, relativement sec, et parfois trop limités au sud, relativement humide (Figure III-2).

Afin d'évaluer la qualité des directions d'écoulement associées, ces réseaux sont comparés à la carte du réseau hydrographique actif du BVL, disponible au sein de la banque de donnée WDB2 (World Data Bank 2) (<http://www.evl.uic.edu/pape/data/WDB/>) et rasterisée selon une résolution de 30''x30''. Une comparaison qualitative est tout d'abord réalisée, puis la proportion du réseau WDB2 interceptée par les réseaux extraits des différents MNT (son « recouvrement ») est quantifiée.

Lors de la comparaison quantitative, l'importance des tronçons du réseau de référence (WDB2) est pondérée relativement aux volumes y transitant (poids de 1 à 10 où 1=0% à 10% des apports tributaires du lac Tchad, etc.). Ainsi, un poids moindre est donné aux branches amont du réseau, dont la définition est potentiellement plus approximative.

La largeur « virtuelle » minimale des réseaux est fixée par la résolution des fichiers raster auxquels ils sont associés. La largeur du réseau WDB2 est donc de ~1 km et celle des réseaux extraits des MNT agrégés de ~10 km. Cette dernière est progressivement augmentée, via la définition de zones « tampon » ou buffers, afin d'accroître le recouvrement du réseau WDB2 et de permettre une quantification de l'éloignement entre les réseaux.

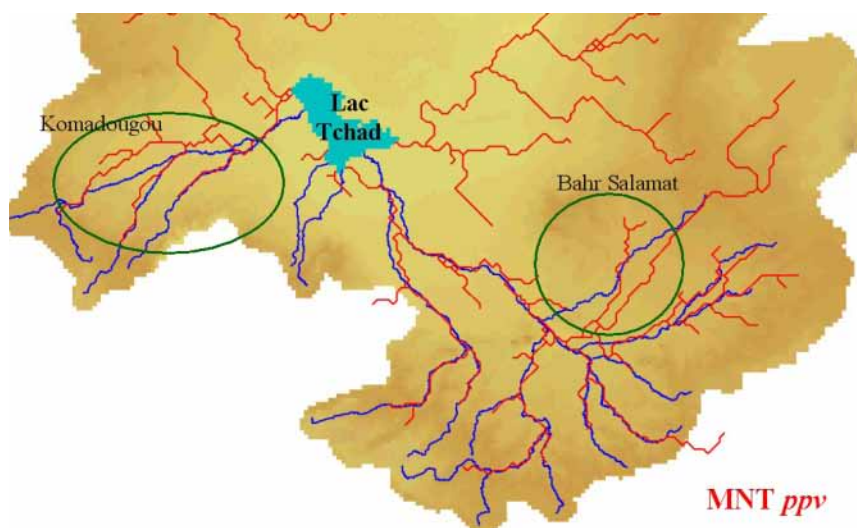
De par la méthode employée pour leur extraction, les réseaux issus des MNT ne présentent pas la même arborescence que le réseau WDB2. La superposition de ces réseaux ne peut donc être que partielle et la proportion du réseau de référence interceptée est un critère de qualité relatif. D'autre part, la comparaison d'indices caractérisant ces arborescences n'est pas pertinente.

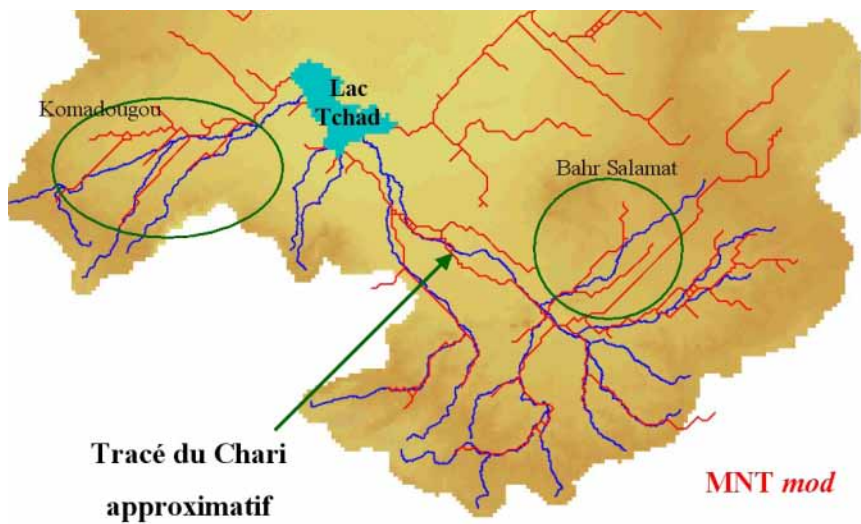
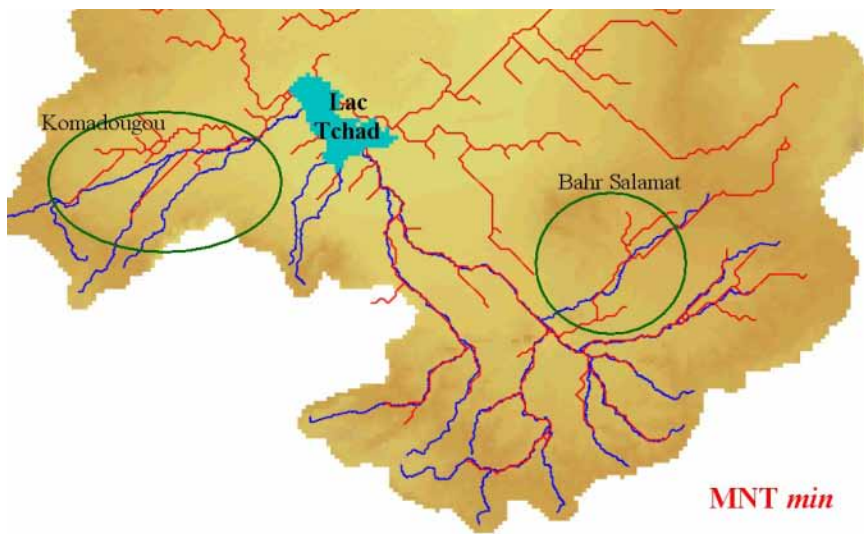
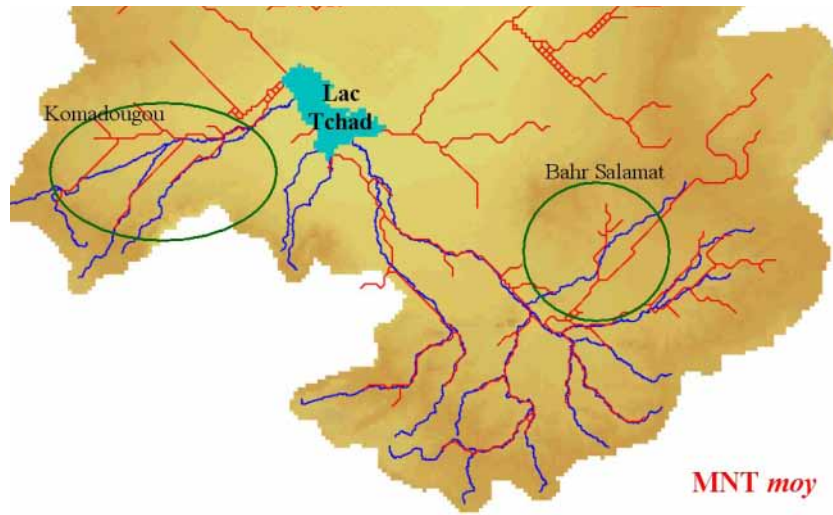
## 3.2. Comparaison des réseaux hydrographiques

### **3.2.1. Comparaison qualitative**

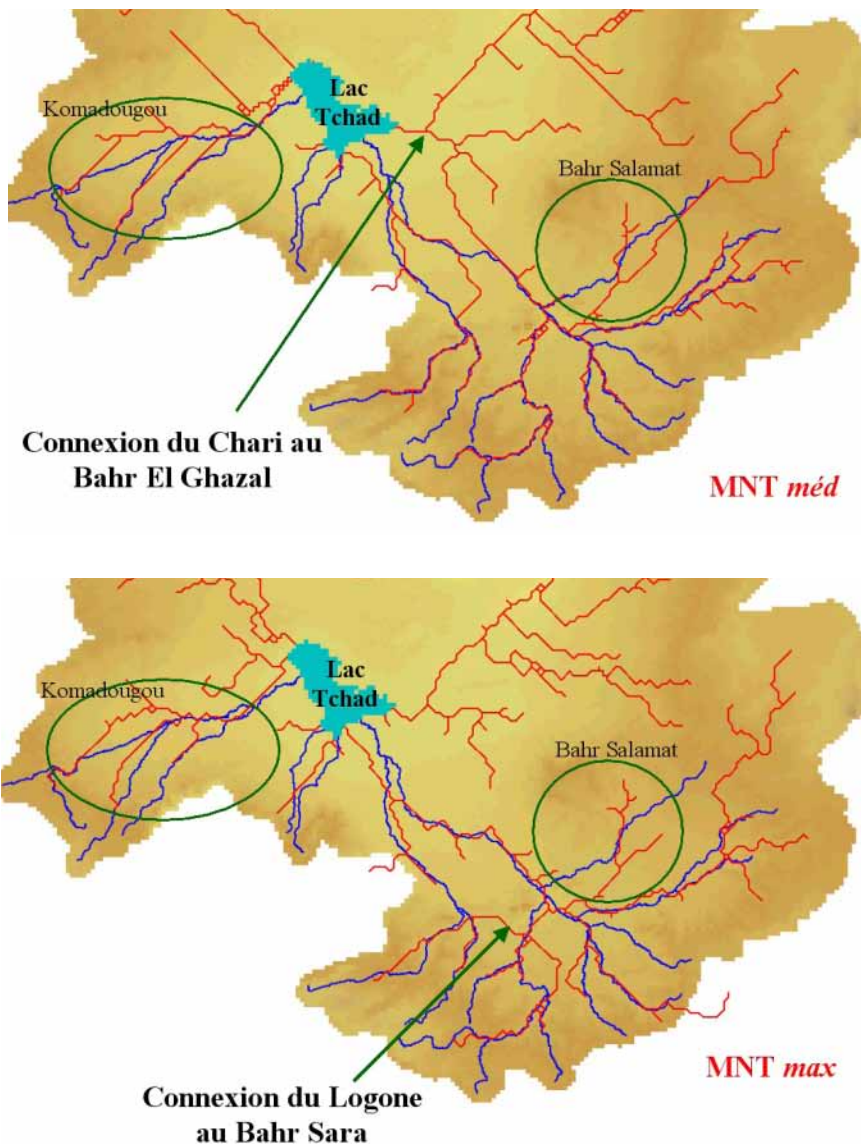
Pour l'ensemble des réseaux extraits des MNT agrégés, les lits de la Komadougou Yobé et du Bahr Salamat, affluent intermittent du Chari, sont représentés avec une géométrie conforme, mais un cheminement très approximatif (Figure III-2). Les réseaux hydrographiques associés à ces rivières sont vraisemblablement trop peu marqués par rapport à la précision des données SRTM et ne peuvent être détectés sur toute leur longueur. Gac (1980) évoque notamment une dégradation générale d'une partie du réseau hydrographique du Bahr Salamat.

Pour les MNT *ppv*, *moy*, *mod* et *min*, les réseaux hydrographiques du Chari-Logone présentent une géométrie cohérente (Figure III-2). Cependant, les tronçons principaux du réseau *mod* s'écartent notablement du tracé de référence. Pour le MNT *méd*, le Chari se connecte au Bahr El Ghazal, ce qui constitue une anomalie de géométrie importante, ce cours d'eau étant un émissaire du lac Tchad. La géométrie du réseau *max* est également incorrecte, le Logone supérieur se raccordant au Bahr Sara, dans le bassin amont du Chari.









**Figure III-2 :** Cartes du réseau hydrographique du BVLT - En bleu : réseau issu de la WDB2  
 – En rouge : réseaux extraits des MNT *ppv*, *moy*, *min*, *mod*, *méd* et *max*.

### 3.2.2. Comparaison quantitative

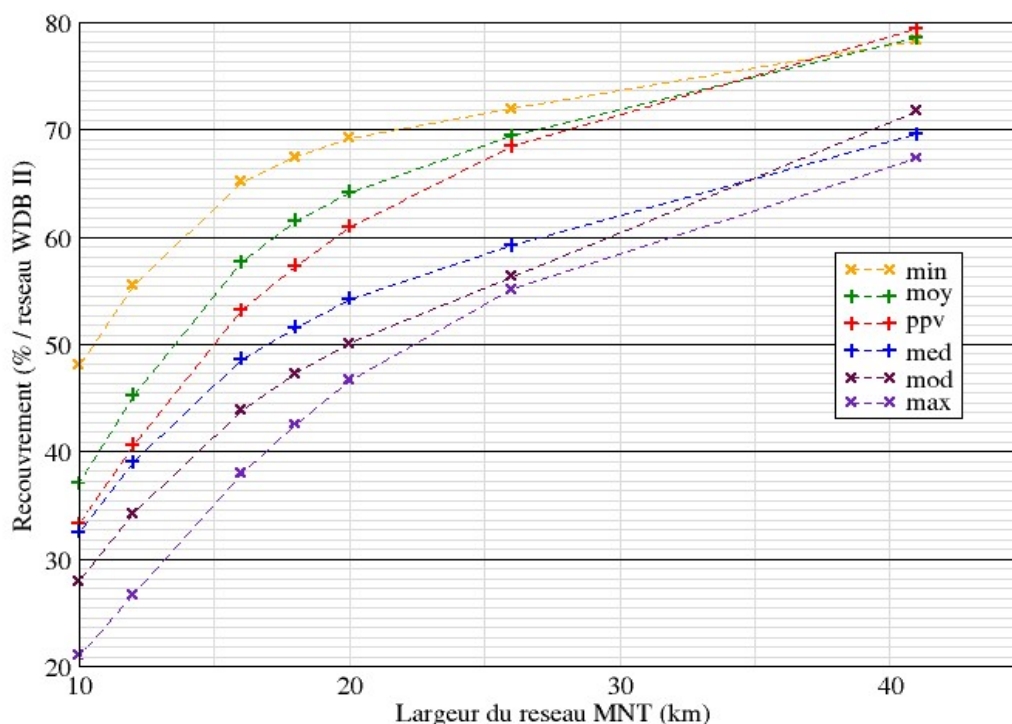
Le réseau extrait du MNT *min* permet un recouvrement du réseau WDB2 nettement supérieur (plus de 10%) à celui calculé avec les MNT *moy* et *ppv* (Tableau III-1) Cependant, l'élargissement des réseaux *moy* et *ppv* entraîne une augmentation des recouvrements associés plus importante que pour le réseau *min*, ce qui tend à combler la différence initiale (Figure III-3). Ces résultats sont cohérents avec une géométrie semblable des réseaux *ppv*, *moy* et *min* mais indiquent également une position plus approximative des deux premiers.

Si, initialement, le recouvrement du réseau WDB2 par le réseau *méd* est très proche de celui permis par le réseau *ppv*, cet écart s'accroît de manière importante lors de leur élargissement, au bénéfice du second (Figure III-4). Cela traduit la géométrie différente des deux réseaux et une plus grande cohérence du réseau *ppv*.

Les réseaux *mod* et *max* sont les moins performants, et seule l'analyse qualitative permet d'expliquer ces résultats par une géométrie incohérente (*max*) ou par un positionnement imprécis (*mod*).

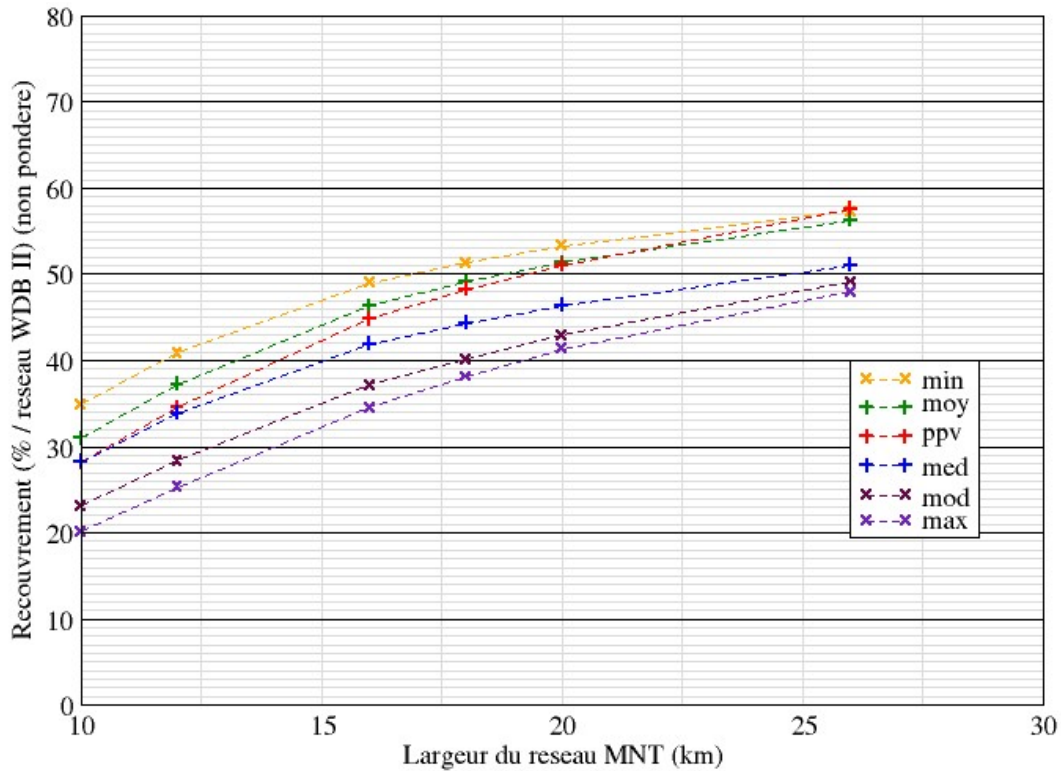
**Tableau III-1** : Proportion du réseau hydrographique WDB2 (« pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés (sans « élargissement »).

<i>MNT</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>ppv</i>	<i>méd</i>	<i>mod</i>	<i>max</i>
Recouvrement du réseau WDB2 (%)	48.1	37.1	33.3	32.5	28	21.1



**Figure III-3** : Proportion du réseau hydrographique WDB2 (« pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés.

*Remarque :* Une comparaison quantitative a également été réalisée en attribuant à chaque tronçon du réseau WDB2 un poids équivalent (Figure III-4). Le recouvrement est systématiquement moindre que lorsque l'importance des différents tronçons est prise en compte, ce qui confirme l'idée d'une position plus approximatives des tronçons amont. Cette comparaison montre également une recouvrement maximal pour les réseaux extraits des MNT min, moy et ppv.



**Figure III-4 :** Proportion du réseau hydrographique WDB2 (non « pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés.

## 4. Choix d'un MNT

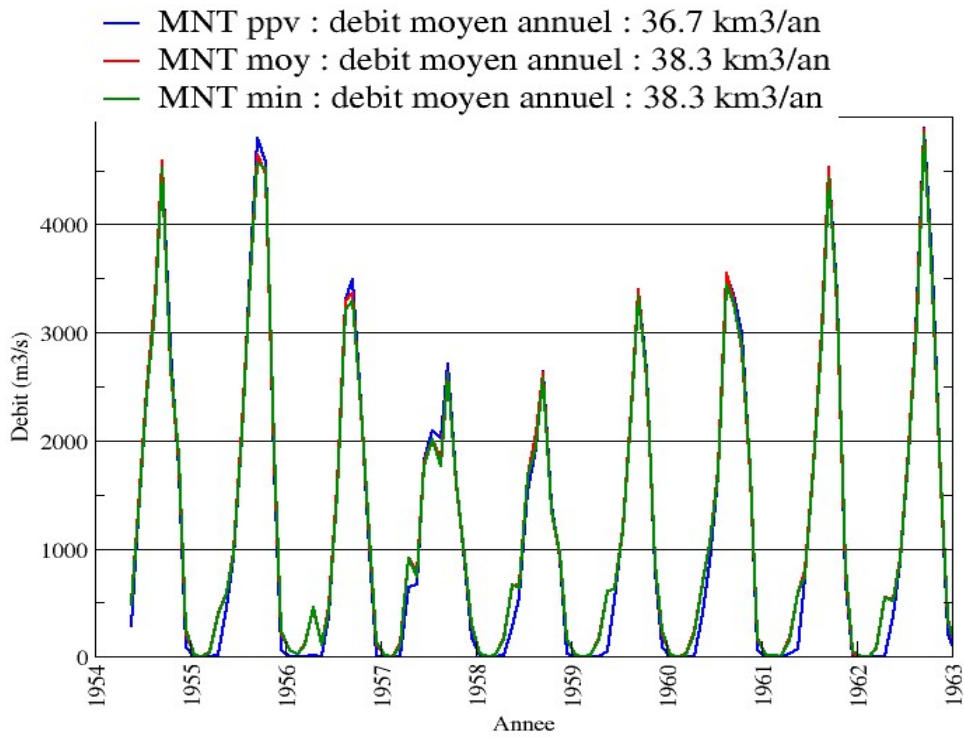
La qualité des MNT *ppv*, *moy* et *méd* se révèle satisfaisante en ce qui concerne la morphologie de la dépression contenant le lac Tchad, contrairement aux MNT *min* et *max* pour lesquels les courbes bathymétriques associées sont très différentes des courbes observées. En revanche, le MNT *min* est le plus intéressant en ce qui concerne les directions d'écoulement au sein du BVLT, le réseau hydrographique qui en est extrait correspondant le mieux au réseau observé. Pour ce critère, les MNT *ppv* et *moy* sont également relativement cohérents tandis que les MNT *max* et *méd* ne sont pas acceptables. Dans les deux cas, la qualité du MNT *mod* reste médiocre (Tableau III-2).

**Tableau III-2 :** Qualité relative des MNT agrégés au regard de la morphologie des cuvettes du lac Tchad et des directions d'écoulement au sein du BVLT.

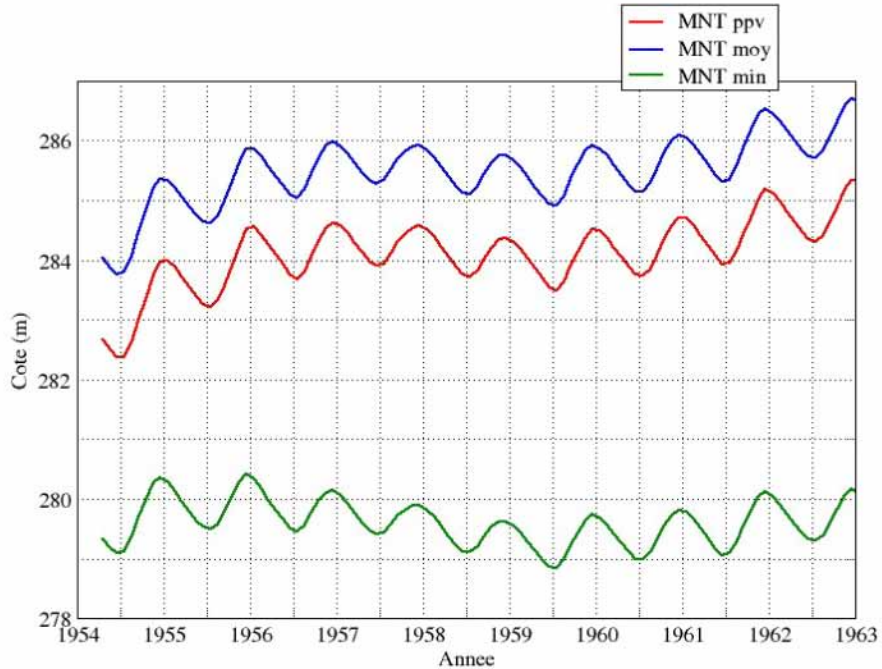
<i>Qualité</i>	++	+	~	--
Morphologie des dépressions (lac Tchad)	<i>ppv</i> <i>moy</i> <i>méd</i>		<i>mod</i>	<i>min</i> <i>max</i>
Directions d'écoulement (BVLT)	<i>min</i>	<i>moy</i> <i>ppv</i>	<i>mod</i>	<i>méd</i> <i>max</i>

Les MNT *ppv* et *moy* semblent donc les plus pertinents en vue d'une utilisation en entrée d'HYDRA. En effet, parmi les six MNT agrégés, seuls ceux-ci présentent une qualité relativement satisfaisante au regard des deux caractéristiques testées, susceptibles d'influencer les simulations. Cependant, si les directions d'écoulement ont fait l'objet d'une étude globale, à l'échelle du BVLT, la morphologie des dépressions n'a été considérée que régionalement, au niveau du lac Tchad. Dès lors, l'élimination du MNT *min*, dont la qualité est meilleure que celle des MNT *ppv* et *moy* pour le critère global, est discutable. Afin de préciser l'analyse, ces trois MNT sont chacun utilisés en entrée d'HYDRA et les résultats des différentes simulations sont comparés.

Pour des conditions de forçage identiques (IBIS), les débits simulés pour le Chari avec les MNT *min* et *moy* sont très proches (Figure III-5). L'utilisation de l'un ou l'autre de ces MNT n'aurait donc qu'une influence marginale sur la simulation des débits. En revanche, les niveaux du lac Tchad simulés sont nettement inférieurs pour le MNT *min* (Figure III-6), ce qui s'explique par des relations bathymétriques différentes. Le MNT *moy* apparaît donc plus pertinent que le MNT *min* pour une utilisation en entrée du modèle, la morphologie du lac y étant mieux représentée.

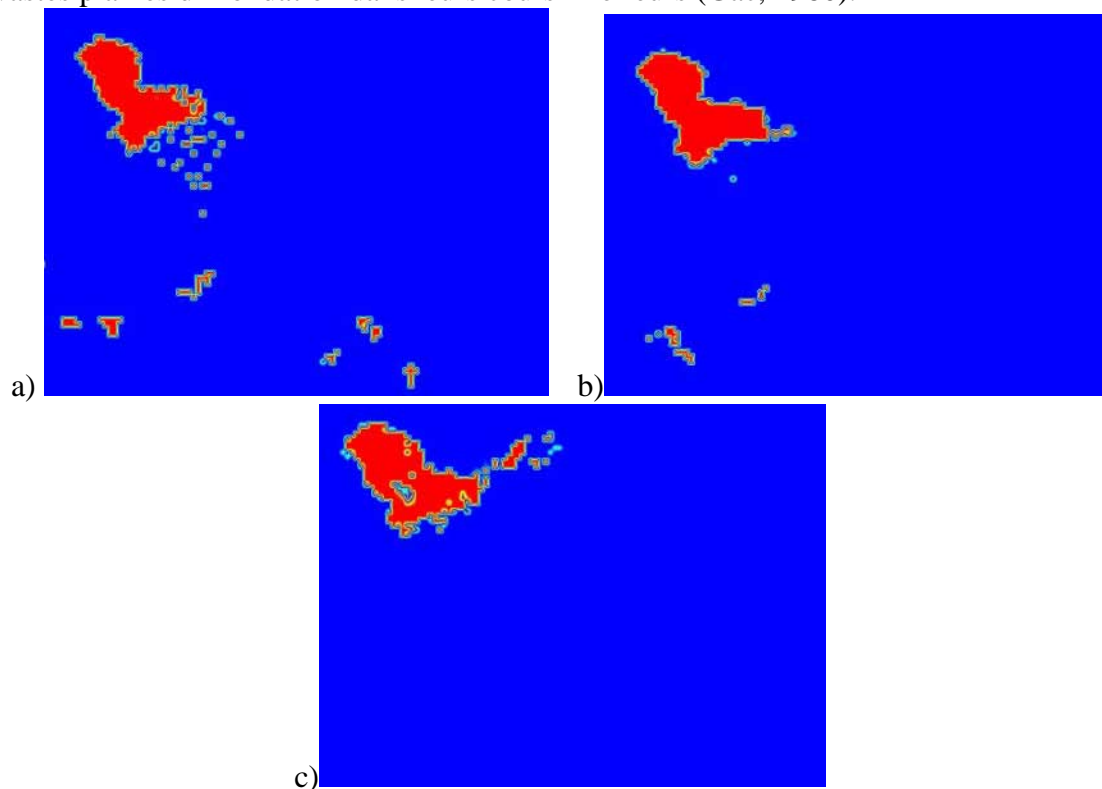


**Figure III-5 :** Hydrogrammes simulés avec l'association IBIS-HYDRA pour le Chari à Bouosso entre 1954 et 1963 avec les MNT *min*, *moy* et *ppv*.



**Figure III-6 :** Niveaux du lac Tchad simulés avec l'association IBIS-HYDRA entre 1954 et 1963 avec les MNT *min*, *moy* et *ppv*.

Avec le MNT *ppv*, les débits annuels simulés du Chari sont inférieurs aux débits simulés avec les deux autres MNT (Figure III-5). Une visualisation des surfaces inondées lors des simulations permet d'expliquer cette différence. Ainsi, il apparaît que, avec les MNT *moy* ou *min*, le lac Tchad constitue l'unique zone inondée du BFLT tandis que, avec le MNT *ppv*, de l'eau est stockée au sein de nombreuses dépressions à proximité du fleuve (Figure III-7). Or ces stocks (mailles « lac ») sont soumis à l'évaporation, d'où les débits moindres. Cette représentation est plus conforme à la réalité, le Chari et le Logone s'étalant effectivement sur de vastes plaines d'inondation dans leurs cours inférieurs (Gac, 1980).



**Figure III-7 :** Eaux libres (en rouge) simulées par HYDRA dans la région du lac Tchad : avec le MNT *ppv* (a), plusieurs zones inondées apparaissent à l'amont du lac ; avec les MNT *moy* (b) et *min* (c), le lac Tchad constitue l'unique surface inondée.

Contrairement aux MNT *moy* ou *min*, le MNT *ppv* permet donc de modéliser en partie les plaines d'inondation du Chari-Logone. Or celles-ci jouent un rôle non-négligeable dans le fonctionnement hydrologique du BFLT. En effet, elles constituent des zones de stockage potentielles pouvant favoriser l'évaporation et l'infiltration (impact sur la production) et pouvant entraîner un freinage de l'onde de crue du fleuve (impact sur le transfert) (Olivry et al., 1996). **Le MNT *ppv*, qui présente de plus une qualité relativement satisfaisante en ce qui concerne la morphologie de la dépression du lac Tchad et les directions d'écoulement, sera donc considéré comme le mieux approprié dans le cadre d'une utilisation en entrée d'HYDRA.**

## **-IV-**

# **Développement d'un modèle hydrologique**

## **1. Méthodologie et contexte du développement**

L'implémentation d'une fonction de production au sein d'HYDRA doit aboutir à une structure cohérente et performante. Afin de développer un tel modèle, il convient de définir une méthode adaptée et de déterminer les conditions et l'environnement de l'étude.

### 1.1. Méthodologie

#### **1.1.1. Les modèles « à paramètres »**

Les différentes structures associant une fonction de production au modèle HYDRA qui seront proposées dans cette étude comporteront un ou plusieurs paramètres de calage. Les paramètres permettent d'exprimer numériquement les principales caractéristiques du milieu, de corriger les effets d'échelle et les erreurs associées aux données de forçage et, ainsi, d'adapter les modèles à des contextes variés, sans en modifier les structures (Francés et al., 2006). Pour une application donnée, les paramètres doivent donc être optimisés.

La phase de calage (ou optimisation) consiste à établir les jeux de paramètres qui maximisent les performances d'un modèle, c'est à dire qui minimisent les écarts entre les simulations et les observations. Pour cela, une fonction critère adaptée aux objectifs de la modélisation et dont un optimum correspond à un niveau de performance maximal du modèle est définie. Elle permet, via une méthode d'optimisation, de déduire les paramètres les plus appropriés, dont la robustesse peut ensuite être évaluée lors d'une phase de validation. Cette procédure consiste à analyser les valeurs prises par la fonction critère sur une période distincte de celle utilisée pour le calage.

La fonction critère peut également être utilisée afin de caractériser l'évolution des performances d'un modèle relativement à une variation des valeurs prises par ses paramètres. Une telle analyse, dite de sensibilité du modèle aux paramètres, permet de critiquer la structure du modèle et, notamment, la pertinence des concepts associés aux différents paramètres. Elle est donc intéressante dans le cadre d'une tentative de perfectionnement d'un modèle.

### 1.1.2. Méthode de développement adoptée

Après avoir mis en évidence une fonction de production compatible avec la structure d'HYDRA au niveau des mailles « versant » et adaptée à une application sur le BVLTL, plusieurs modèles « à paramètres » seront proposés. Les performances maximales de chacun d'entre eux devront alors être déterminées afin de définir la structure la plus pertinente. Grâce notamment à une analyse de sensibilité aux paramètres, l'architecture du modèle retenu sera discutée et des perfectionnements pourront y être proposés de façon à la rendre plus cohérente. Cependant, ces modifications ne seront validées que si elles conduisent à une amélioration en terme de performances.

L'évaluation des performances des modèles telle qu'elle est proposée dans cette démarche empirique nécessite la définition d'une fonction critère appropriée. HYDRA permet de simuler les débits au niveau de chaque maille « versant » du bassin ainsi que les dynamiques lacustres pour les mailles « lac ». Le développement proposé ne concernant que les premières, l'analyse de son impact sur la génération des débits sera privilégiée.

Le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) est une fonction critère couramment employée pour caler les paramètres des modèles pluie-débit. Il s'agit d'un critère adimensionnel qui prend des valeurs inférieures ou égales à 100 %, valeur optimale indiquant une parfaite concordance entre les hydrogrammes simulés et les hydrogrammes observés. Le critère de Nash peut donc être utilisé pour définir les performances des structures proposées dans cette étude.

$$\text{Critère de Nash : } F=100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \right] \quad (\text{IV-1})$$

$N$  : Nombre mois dans la période d'étude

$Q$  : Débit mensuel observé

$\hat{Q}$  : Débit mensuel simulé

$\bar{Q}$  : Débit mensuel moyen observé sur l'ensemble de la période d'étude

$\bar{\hat{Q}}$  : Débit mensuel moyen simulé sur l'ensemble de la période d'étude



Lorsque le critère de Nash prend une valeur inférieure à 60 %, la simulation ne peut être considérée comme étant satisfaisante (Ardoïn-Bardin, 2004), mais le degré de liberté de cette fonction n'est pas connu. Il sera donc complété par un critère de bilan permettant d'apprécier objectivement la qualité des bilans volumiques modélisés, via la comparaison entre les débits moyens simulés et observés sur l'ensemble de la période d'étude. De plus, ce critère permettra de guider une procédure manuelle de calage des paramètres.

$$\text{Critère de bilan : } B=100 \left( \frac{\overline{\hat{Q}} - \overline{Q}}{\overline{Q}} \right) \quad (\text{VI-2})$$

## 1.2. Contexte du développement

### **1.2.1. Période d'étude**

Les observations régulières sur le lac Tchad et ses tributaires ont débuté au début des années 1950. Cette date est comprise dans la période relativement humide pour l'ensemble de la zone soudano-sahélienne à laquelle a succédé, à partir des années 1970, une période relativement sèche (responsable de l'assèchement partiel du lac Tchad) (Figure I-3). Pour plusieurs stations situées au sein du BVLTL, bien que les précipitations annuelles aient commencé à diminuer dès 1965, les ruptures statistiques dans les chroniques pluviométriques seraient apparues entre 1968 et 1971 (Ardoïn-Bardin, 2004). De plus, 1968 marque une accentuation de la phase d'assèchement du lac Tchad (Olivry et al., 1996).

Pour des modélisations hydrologiques au sein de bassins soudano-sahéliens, la validation en période sèche de paramètres calés sur la période humide (et inversement) s'est montrée moins performante que des procédures de calage-validation indépendantes sur chacune des périodes (Ardoïn-Bardin, 2004). Afin d'évaluer les performances des modèles développés dans la présente étude, il convient donc de s'intéresser à l'une ou l'autre de ces périodes (la durée du stage n'est pas suffisante pour envisager une analyse sur chacune des périodes). La phase humide, antérieure à 1968, sera préférée car les chroniques y sont plus nombreuses et souvent complètes dès 1954. Conformément aux conclusions de Perrin (2000) et de Ardoïn-Bardin (2004), le calage et la validation des paramètres seront respectivement réalisés sur 2/3 et 1/3 de la période, soit 1954-1963 pour le calage et 1964-1967 pour la validation.

Entre 1954 et 1967, les débits sont relevés mensuellement aux stations de Bousso sur le Chari, de Laï sur le Logone et de N'Djamena, après la confluence Chari-Logone (Figure I-1). Les débits de la Komadouyou Yobé à Gueskérou ne sont pas disponibles aussi régulièrement mais peuvent être estimés relativement à ceux du Chari-Logone (Olivry et al., 1996).

Néanmoins, la modélisation des débits de la Komadougou Yobé apparaît difficile, des infrastructures hydrauliques importantes aux conséquences indéterminées ayant été construites sur la partie nigérienne de ce fleuve dès les années 1960 (F. Delclaux, communication personnelle). Seules les chroniques associées aux stations de Bousso, de Lai et de N'Djamena seront donc utilisées pour les calculs des critères de Nash et des critères de bilan.

### **1.2.2. Données d'entrée des modèles**

Les structures associant HYDRA et une fonction de production proposées dans cette étude nécessitent, pour leur forçage climatique, des données de précipitation et d'ETP. Au niveau du BVLT, les données utilisées proviennent de grilles mondiales d'une résolution de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  délivrées par le CRU (Climatic Research Unit) de l'Université d'East Anglia (Norwich, UK). Elles ont été constituées par interpolation de mesures locales de précipitation et par différentes formulations reliant l'ETP à divers paramètres climatiques mesurés ou estimés.

D'autre part, au sein de certains modèles, les capacités en eau du sol (Water Holding Capacity, WHC) doivent être précisées. Elles peuvent être estimées en combinant les unités constitutives des sols et les capacités de rétention maximales de chacune de ces unités, données distribuées par la FAO (Food and Agriculture Organization) (Dieulin, 2005). Cette méthode, qui permet de constituer une grille d'une résolution de  $5' \times 5'$ , s'est montrée la plus pertinente dans le cadre de modélisations hydrologiques antérieures (Ardoin-Bardin, 2004).

En entrée d'HYDRA, les fichiers géomorphologiques utilisés sont issus d'un MNT spécifique au BVLT (Le Coz, 2006). Celui-ci a été généré à partir du MNT quasi-mondial SRTM et sa résolution horizontale, initialement de  $30'' \times 30''$ , a été dégradée à  $5' \times 5'$  par la méthode du plus proche voisin (cf. III.).

## **2. Intégration d'une fonction de production GR au modèle HYDRA**

Les modèles pluie-débit empiriques intègrent le plus souvent des fonctions de production parcimonieuses et robustes. L'analyse de l'un d'entre eux, le modèle GR2M-94, permet d'envisager une structure de simulation des ruissellements adaptée au BVLТ, compatible avec le modèle HYDRA et relativement performante.

### **2.1. Choix d'une fonction de production**

#### **2.1.1. Les modèles GR**

Afin de simuler les ruissellements au sein du BVLТ (ou d'autres bassins), une fonction de production nécessitant peu de données de forçage doit être intégrée à la structure d'HYDRA. De plus, cette fonction doit être parcimonieuse, de façon à faciliter l'optimisation des paramètres, et robuste, le BVLТ présentant des conditions climatiques très variables. Les modèles du Génie Rural, dont les structures comprennent une fonction de production et une fonction de transfert, présentent ces spécificités.

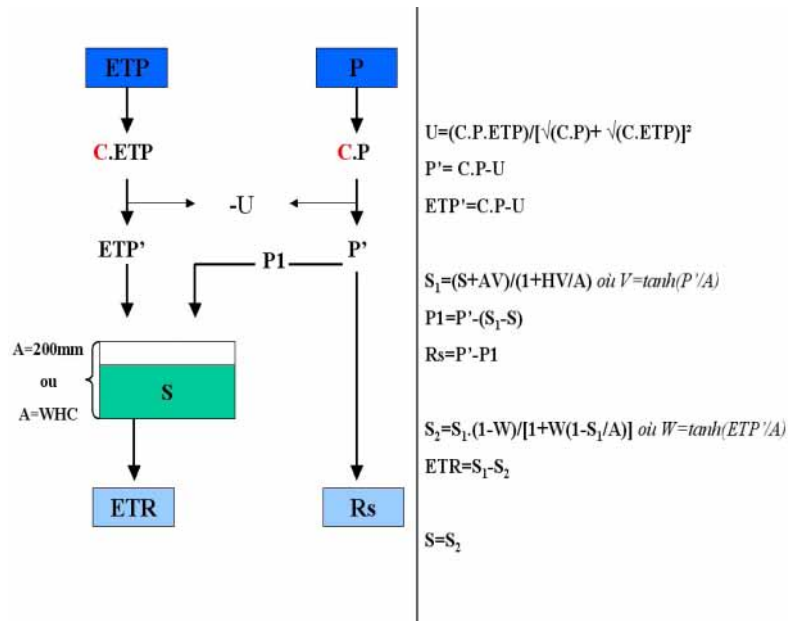
Depuis 1983, le Cemagref d'Antony a mené différents projets visant à développer des modèles pluie-débit globaux à divers pas de temps, comportant un nombre minimal de paramètres de calage (<http://www.cemagref.fr/webgr/>). L'idée était de partir d'un modèle le plus élémentaire possible (un unique réservoir et un paramètre) en ne compliquant son architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits observés et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique (Makhlouf, 1994). Ces modèles empiriques, nommés GR (Génie Rural), sont donc simples et parcimonieux.

Le modèle GR2M-94, mensuel et comportant deux paramètres de calage, l'un associé à la production et l'autre au transfert, a été développé en 1994 à partir d'une étude sur 91 bassins versants français (Makhlouf & Michel, 1994). Il a ensuite été utilisé dans des contextes divers [e.g. (Delclaux et al., 2005)], notamment de manière distribuée afin de simuler les débits du Chari et du Logone (Ardoin-Bardin, 2004). Les relatives bonnes performances de GR2M-94 pour cette application justifient une analyse de sa fonction de production en vue d'une implémentation au sein d'HYDRA.

#### **2.1.2. La fonction de production du modèle GR2M-94**

Comme l'ensemble des modèles GR aux pas de temps mensuel et journalier, la fonction de production du modèle GR2M-94 est régie par un réservoir « sol ».

De plus, cette fonction de production, associée à un unique paramètre de calage, inclut un ajustement et une neutralisation des entrées (Figure IV-1).



**Figure IV-1 :** Schéma de la fonction de production du modèle GR2M-94 : C (>0) est l'unique paramètre de calage ( $S_1$  et  $S_2$  sont des niveaux intermédiaires du réservoir « sol ») (d'après Makhlouf, 1994).

Les données de forçage du modèle sont la pluie brute, P, et l'ETP. Ces entrées sont tout d'abord ajustées afin de pallier d'éventuelles imprécisions liées à leur mesure ou à leur estimation. L'ajustement est réalisé en multipliant la précipitation et l'ETP par un même coefficient correctif C (>0), le paramètre de calage. Une quantité U est ensuite soustraite aux entrées ajustées. Cette phase, dite de neutralisation, joue le rôle d'interception et agit, dans les modèles au pas de temps mensuel, comme un amortisseur des effets « brutaux » (i.e. introduction instantanée de la totalité de la précipitation et de l'ETP mensuelles). Une partie, P1, de la pluie brute ajustée et neutralisée (P') alimente le réservoir « sol » selon son niveau de remplissage, S, et sa capacité A. Ce réservoir se vidange via l'évapotranspiration réelle (ETR), calculée à partir de S, de A ainsi que de l'ETP ajustée et neutralisée (ETP'). La fraction de la pluie qui n'alimente pas le réservoir « sol »,  $R_s$ , constitue le ruissellement.

Des modélisations globales sur des bassins versants français ont d'abord montré que la capacité du réservoir « sol », A, pouvait être fixée à 200 mm (Makhlouf & Michel, 1994). Cependant, des applications dans des contextes distribués au sein de bassins soudano-sahéliens [(Ouedraogo, 2001) ; (Ardoin-Bardin, 2004)] ont conduit à considérer ce terme variable dans l'espace et à l'associer à la notion de capacité en eau du sol ou WHC. A partir de l'intégration de la capacité en eau utile des différentes unités constituant les sols sur toute leur profondeur, la FAO a généré des cartes mondiales spatialisant ce concept.

Le modèle GR2M-94 a été développé empiriquement, en combinant des opérateurs de manière à obtenir des performances maximales. A posteriori, il apparaît néanmoins que, comme d'autres modèles GR, les différentes étapes de sa production peuvent être associées à des concepts précis. A condition de conserver une démarche empirique, des adaptations de sa structure peuvent donc être aisément envisagées, via l'ajout ou la suppression de certains modules. En outre, ce constat confirme que le développement des modèles empiriques peut permettre de mieux décrire les étapes intervenant dans la transformation pluie-débit (Edijatno et al., 1999).

## 2.2. Association de la production GR2M-94 et d'HYDRA

### **2.2.1. Concept d'écoulement hypodermique**

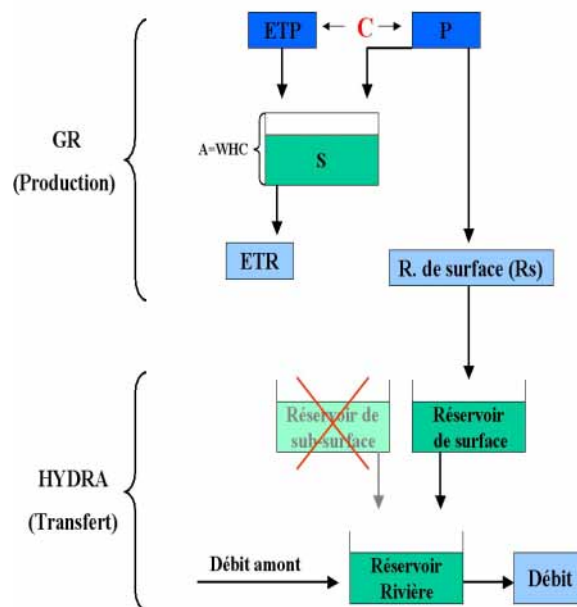
Au sein de l'horizon superficiel du sol, une partie de l'eau d'infiltration peut percoler latéralement à travers les macropores et les drains d'origine animale ou végétale. Cette eau peut « ré-émerger » à la faveur d'un changement de pente ou d'une variation de conductivité hydraulique du sol et ainsi, contribuer à la formation des débits avec un certain retard par rapport au ruissellement superficiel (Schmocker-Fackel, 2004). Ce processus est conceptualisé par l'écoulement hypodermique, un écoulement sub-surfacique parallèle à la topographie et moins rapide que le ruissellement de surface. Ce concept est cependant souvent discuté car, sauf sur de très courtes distances ou dans des contextes particuliers, les conductivités hydrauliques du sol mesurées ne permettent pas d'envisager des percolations latérales non marginales (Gaume, 2002).

A partir de la pluie et de l'ETP, le modèle GR2M-94 génère la production d'un ruissellement formé d'une seule composante directe. Au sein de cette structure le concept d'écoulement hypodermique n'est donc pas représenté. Au contraire, en entrée d'HYDRA, une distinction préalable entre le ruissellement superficiel et l'écoulement hypodermique est nécessaire. Ainsi, afin d'harmoniser les deux structures, le concept d'écoulement hypodermique doit être soit implémenté à la fonction de production du modèle GR2M-94, soit éliminé d'HYDRA. Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile de choisir objectivement entre l'une ou l'autre de ces solutions, particulièrement pour une application sur une région aussi vaste et peu étudiée que le BFLT. Elles doivent donc toutes deux faire l'objet d'une évaluation au regard des performances qu'elles engendrent.

### **2.2.2. Adaptation des structures**

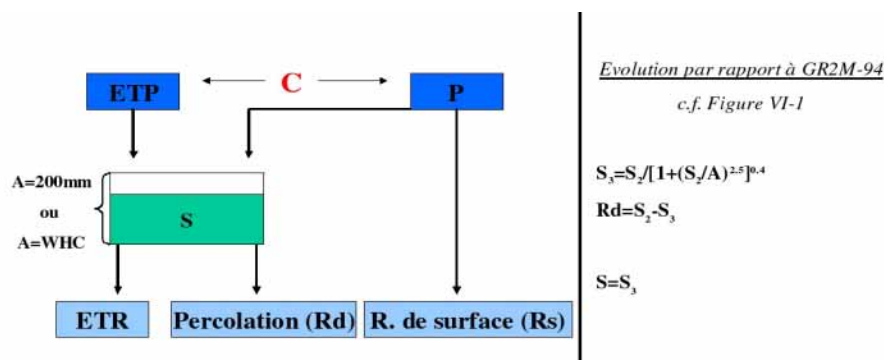
Les ruissellements superficiel et hypodermique, données de forçage d'HYDRA, alimentent respectivement un réservoir de surface et un réservoir de sub-surface. Ceux-ci se vidangent, selon des lois linéaires distinctes, dans un réservoir commun (réservoir « rivière »).

Le concept d'écoulement hypodermique peut être supprimé de cette structure en annulant les entrées du réservoir de sub-surface. Ainsi, un modèle cohérent est établi en dirigeant l'unique ruissellement (superficiel) produit par le modèle GR2M-94 vers le réservoir de surface d'HYDRA (Figure IV-2). Ce modèle, nommé GR-HYDRA-A, n'intègre pas le concept d'écoulement hypodermique.

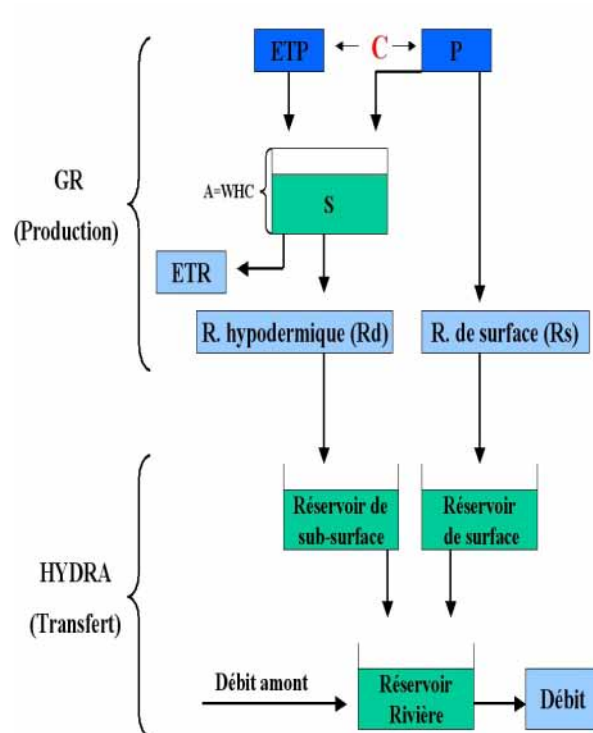


**Figure IV-2** : Schéma du modèle GR-HYDRA-A :  $C (>0)$  est l'unique paramètre de calage.

Au sein de plusieurs versions journalières et mensuelles de modèles GR, une fraction de l'eau contenue dans le réservoir « sol » percole et contribue à la formation des débits. Cette percolation peut être assimilée au concept d'écoulement hypodermique, la fraction de la pluie ne transitant pas par le réservoir « sol » correspondant dès lors au ruissellement superficiel. La similitude entre les différents modèles GR permet d'implémenter aisément un tel module à la fonction de production de GR2M-94 (Figure IV-3) qui devient donc compatible avec HYDRA. Un modèle intégrant le concept d'écoulement hypodermique, nommé GR-HYDRA-B, est ainsi établi (Figure IV-4).



**Figure IV-3** : Percolation du réservoir « sol » des modèles GR :  $C (>0)$  est l'unique paramètre de calage ( $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont des niveaux intermédiaires du réservoir « sol ») (d'après Mouelhi, 2003).



**Figure IV-4** : Schéma du modèle GR-HYDRA-B :  $C (>0)$  est l'unique paramètre de calage.

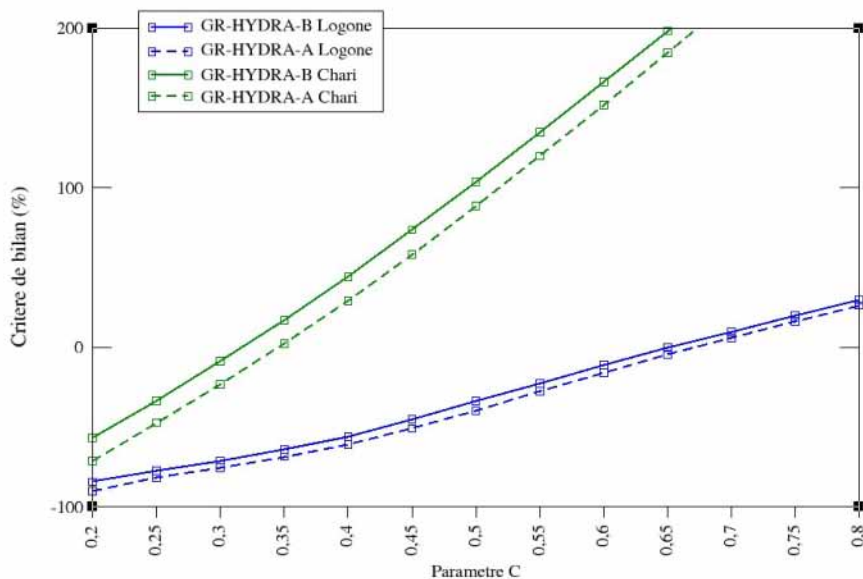
### 2.2.3. Performances des modèles proposés

Le coefficient d'ajustement des entrées,  $C$ , unique paramètre des modèles GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B est calé manuellement afin de maximiser la fonction critère de Nash sur les débits mensuels du Logone à Laï, du Chari à Bousso et du Chari-Logone à N'Djamena, pour la période 1954-1963. Les performances maximales, atteintes pour des valeurs différentes de  $C$  à chacune des stations, varient selon les modèles (Tableau IV-1). En effet, bien que, pour le Logone, les performances de GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B soient très proches, la seconde structure est nettement supérieure en ce qui concerne la modélisation des débits du Chari à Bousso et à N'Djamena (respectivement +8% et +5%). Ce constat est confirmé sur la période de validation (1964-1967).

Les critères de bilan associés aux deux modèles ainsi calés indiquent que pour l'ensemble des stations, les volumes simulés sous-estiment les observations dans des proportions importantes (-20% à -35% sur la période de calage) (Tableau IV-1). Cependant, à Bousso et N'Djamena, GR-HYDRA-B permet une meilleure approche des bilans observés. Plus généralement, pour des valeurs de  $C$  identiques, les débits interannuels générés par ce modèle sont plus importants que ceux simulés par GR-HYDRA-A (Figure IV-5). L'introduction d'un terme de percolation à la structure de GR2M-94 entraîne donc une augmentation des ruissellements totaux produits.

**Tableau IV-1** : Performances maximales comparées des modèles GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B.

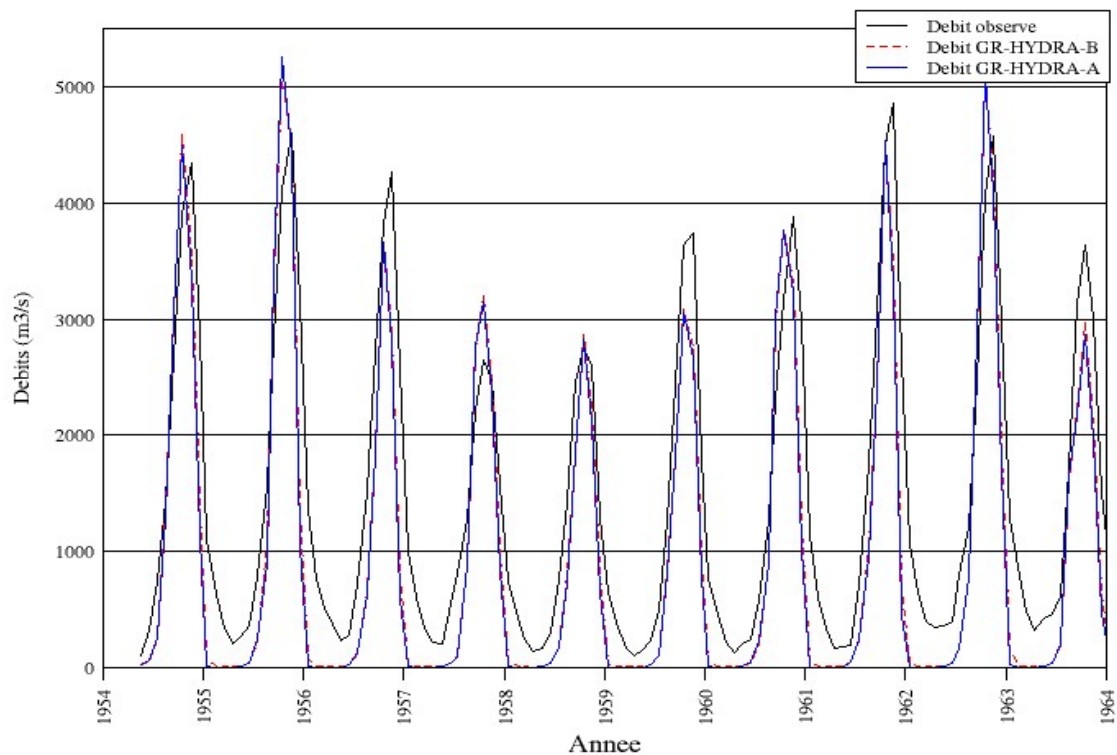
<i>Modèle</i>	<i>Station</i>	<i>Valeur du paramètre C</i>	<i>Critère de Nash (%) Calage (1954-1963)</i>	<i>Critère de Nash (%) Validation (1964-1967)</i>	<i>Critère de bilan (%) Calage (1954-1963)</i>	<i>Critère de bilan (%) Validation (1964-1967)</i>
<b>GR-HYDRA-A</b>	Laï (Logone)	0.575	61.4	72.6	-21.9	-13.4
	Bouso (Chari)	0.275	46	43.4	-35.8	-45.2
	N'Djamena	0.3	69.8	73.6	-32.4	-38
<b>GR-HYDRA-B</b>	Laï (Logone)	0.55	62.3	73.9	-22.6	-13.7
	Bouso (Chari)	0.25	53.6	50.2	-33.5	-41.4
	N'Djamena	0.275	74.7	77.6	-29.6	-35.5



**Figure IV-5** : Critères de bilan des modèles GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B en fonction de la valeur prise par le paramètre C (période 1954-1963).

Les hydrogrammes réalisés à partir des modèles optimisés montrent que la sous-estimation des volumes est principalement liée à une surestimation des durées et des intensités des étiages (Figure IV-6 ; Annexe 1). Ces hydrogrammes semblent également indiquer que les différences entre les bilans simulés par GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B se forment principalement lors des périodes de décrue.





**Figure IV-6 :** Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B pour le Chari-Logone à N'Djamena entre 1954 et 1964.

**Le modèle GR-HYDRA-B permet une meilleure simulation des débits des principaux tributaires du lac Tchad. Cette structure associant la fonction de production du modèle GR2M-94 agrémentée d'un module de percolation et HYDRA est donc retenue. Sa pertinence doit néanmoins être discutée en vue de son amélioration éventuelle.**

### **3. Essai de perfectionnement du modèle GR-HYDRA-B**

Les performances de GR-HYDRA-B et les valeurs optimales prises par son unique paramètre sont discutables. Ce constat conduit à proposer un perfectionnement de ce modèle, via l'introduction d'un terme de pertes vers le milieu souterrain. Cependant, cette nouvelle structure se révèle peu pertinente.

#### **3.1. Critique du modèle GR-HYDRA-B**

##### **3.1.1. Une structure à perfectionner**

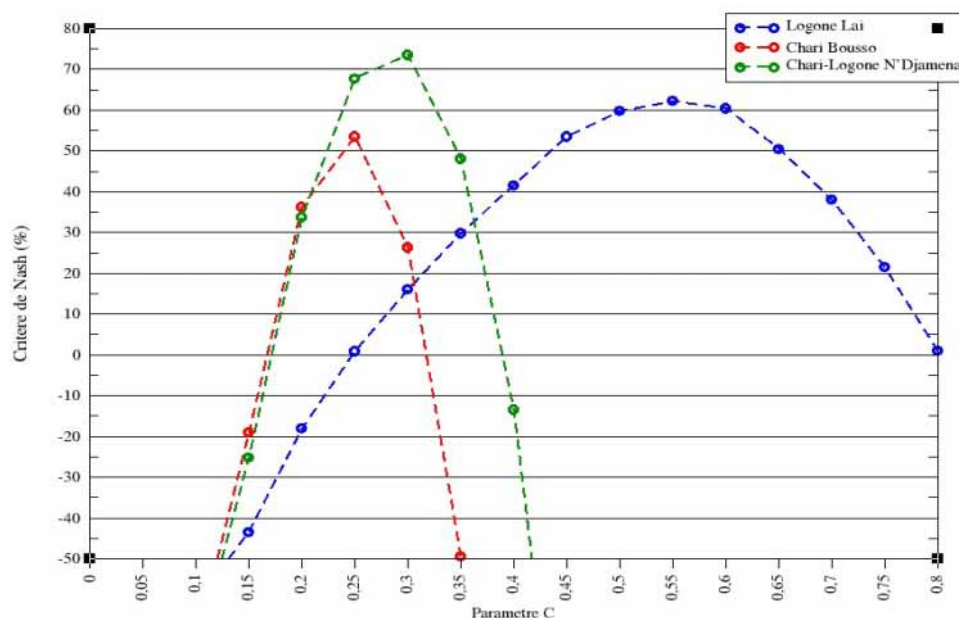
Comme mentionné dans la partie précédente (Tableau IV-1), les performances maximales du modèle GR-HYDRA-B en terme de reproduction des débits sont variables selon les stations considérées. Lors de la période de calage, les critères de Nash sont supérieurs à 60% pour le Logone à Lai et le Chari à N'Djamena. Ces simulations peuvent donc être qualifiées de satisfaisantes. De plus, ces relatives bonnes performances sont confirmées sur la période de validation, les critères de Nash augmentant dans les deux cas. En revanche, au niveau du Chari à Bousso, la même fonction critère prend une valeur nettement inférieure à 60% sur la période de calage puis diminue en validation, ce qui indique une simulation peu satisfaisante.

L'amélioration des performances du modèle GR-HYDRA-B est donc nécessaire en ce qui concerne les débits à Bousso, mais peut également être intéressante pour les deux autres stations. En effet, si les critères de Nash y sont satisfaisants, la comparaison des hydrogrammes simulés et observés témoigne de modélisations très médiocres des débits d'étiage (Figure IV-6 ; Annexe 1). La structure du modèle doit donc être discutée afin d'y apporter, le cas échéant, des modifications permettant d'augmenter ses performances.

##### **3.1.2. Une signification discutable du paramètre C**

Au sein de la structure du modèle GR-HYDRA-B, le paramètre C est défini comme un coefficient d'ajustement des données de forçage climatique, celles-ci pouvant parfois être douteuses et nécessitant alors une correction (Mouelhi, 2003). Les valeurs optimales prises par ce paramètre au cours des simulations sur les bassins du Logone et du Chari sont comprises entre 0.25 et 0.55 et impliquent donc une réduction de 45% à 75% de la précipitation et de l'ETP renseignées en entrée. De telles erreurs globales ne sont pas acceptables, et témoignent, soit d'un mauvais calage de C, soit d'une ambiguïté dans sa définition.

Or, une analyse de sensibilité du modèle à ce paramètre indique que, pour chaque station, la fonction critère de Nash ne présente qu'un unique maximum relativement localisé (Figure IV-7). Ainsi, la valeur optimale du paramètre C est unique et incontestable, les performances du modèle déclinant sensiblement pour de faibles variations de celle-ci. Elle ne peut donc pas être discutée afin de mieux satisfaire au sens qui lui est donnée.



**Figure IV-7 :** Sensibilité du modèle GR-HYDRA-B au paramètre C (période 1954-1963).

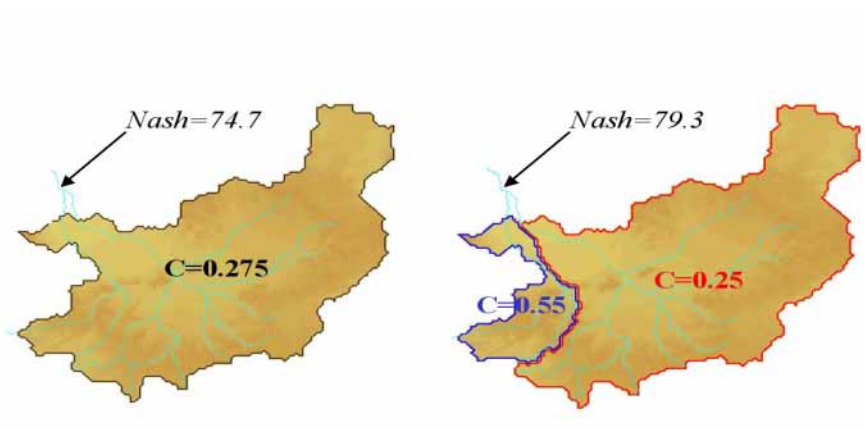
Dès lors, la signification du paramètre C est remise en question. En effet, dans la structure actuelle du modèle GR-HYDRA-B, il ne peut être considéré comme un simple coefficient correcteur des entrées. Il correspond donc à un paramètre de calage intégrant divers processus et concepts indéterminés (dont éventuellement une correction des entrées).

### 3.2. Essai de perfectionnement du modèle GR-HYDRA-B

#### **3.2.1. Conséquences de la variabilité du paramètre C sur les performances de GR-HYDRA-B**

Dans le cas de modèles distribués, l'indisponibilité des observations à cette échelle et les temps de calcul qui en découleraient ne permettent pas d'envisager une optimisation des paramètres pour chacune des mailles (Francés et al., 2006). Or, ceux-ci peuvent être associés à des propriétés spatialement variables des milieux et leur calage « global » constitue dès lors une limite aux performances des modèles.

Ainsi, les valeurs optimales prises par le paramètre C lors des simulations par GR-HYDRA-B diffèrent de manière relativement importante entre les stations de Laï (0.55) et de Bousso (0.25). A l'échelle des sous-bassins du Logone et du Chari, ce paramètre est donc associé à des processus présentant une variabilité spatiale qui peut être caractérisée grâce à un calage « semi-distribué ». Lorsque cette variabilité est renseignée en entrée du modèle, ses performances augmentent notablement pour la station de N'Djamena, située après la confluence Chari-Logone (Figure IV-8). Ce constat témoigne de l'intérêt de décrire a priori la variabilité des processus associés aux paramètres des modèles distribués.



**Figure IV-8 :** Calages « global » et « semi-distribué » du modèle GR-HYDRA-B.

La caractérisation de la variabilité des paramètres C pour l'ensemble du BVLT et à une échelle plus fine que celle des sous-bassins du Logone à Laï et du Chari à Bousso pourrait donc permettre une amélioration des performances de GR-HYDRA-B. Une telle procédure dite de régionalisation, implique néanmoins une connaissance des caractéristiques du bassin associées à ce paramètre et de la relation qui les unit.

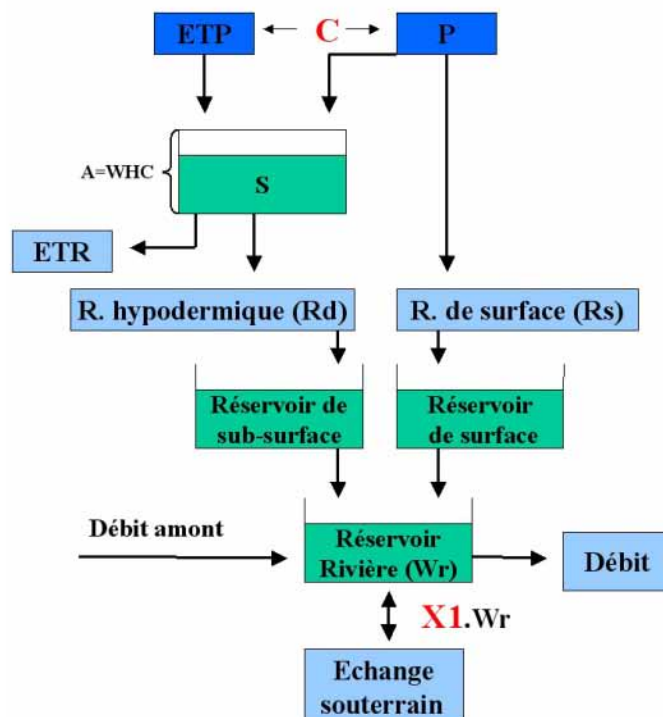
### **3.2.2. Implémentation d'un terme de pertes vers le milieu souterrain à la structure de GR-HYDRA-B**

Mouelhi (2003) constate que, contrairement à certains modèles GR au pas de temps journalier, les modèles GR mensuels ne tiennent pas compte d'une éventuelle ouverture des bassins sur leurs limites souterraines. Or, le plus souvent, l'influence des échanges entre la surface et le milieu souterrain ne peut être négligé dans la production des ruissellements (Mouelhi et al., 2006). Ainsi, la substitution des phases d'interception et de neutralisation des entrées par un module d'échange avec le milieu souterrain peut permettre d'améliorer les performances de modèles GR mensuels, en éliminant, de plus, avec le paramètre d'ajustement (équivalent de C dans le modèle GR-HYDRA-B), le problème posé sur le plan conceptuel par sa trop large gamme de variation (Mouelhi, 2003).

Au sein du modèle GR-HYDRA-B, ce concept d'échange souterrain n'est pas représenté par un module spécifique. Cependant sa prise en compte peut être indirectement permise lors du calage de  $C$ , paramètre dont la faible valeur serait dès lors expliquée par des pertes vers le milieu souterrain, en plus d'une correction éventuelle des entrées. Afin de dissocier ces deux processus et, à terme, d'envisager une caractérisation de leur variabilité, l'implémentation à la structure de GR-HYDRA-B d'un module conceptualisant les interactions surface-souterrain apparaît donc intéressante.

Même si il n'y a pas de correspondance a priori entre la nappe et le réservoir de routage (Perrin, 2000), associer le terme d'échange avec la fonction de transfert des modèles GR aboutit à des résultats pertinents (Mouelhi, 2003). Cependant la formulation du terme d'échange proposée par Mouelhi (2003) n'est pas transposable au sein de la structure de GR-HYDRA-B, sa fonction de transfert (partie HYDRA) étant très différente de celle des modèles GR.

En première approche et dans la logique d'un développement empirique, l'échange est supposé dépendant linéairement du volume d'eau présent dans le réservoir « rivière »,  $W_r$ , et d'un nouveau paramètre de calage,  $X_1$  (Figure IV-9). La valeur maximale prise par ce paramètre est de 1, les pertes ne pouvant pas être supérieures au contenu du réservoir. De plus, pour l'application considérée, l'échange est supposé unidirectionnel, de la surface vers le milieu souterrain (afin de permettre une augmentation de la valeur prise par  $C$ ), et la valeur minimale de  $X_1$  est donc 0.



**Figure IV-9** : Schéma du modèle GR-HYDRA-C :  $C$  ( $>0$ ) et  $X_1$  ( $0 < X_1 < 1$ ) sont les paramètres de calage.

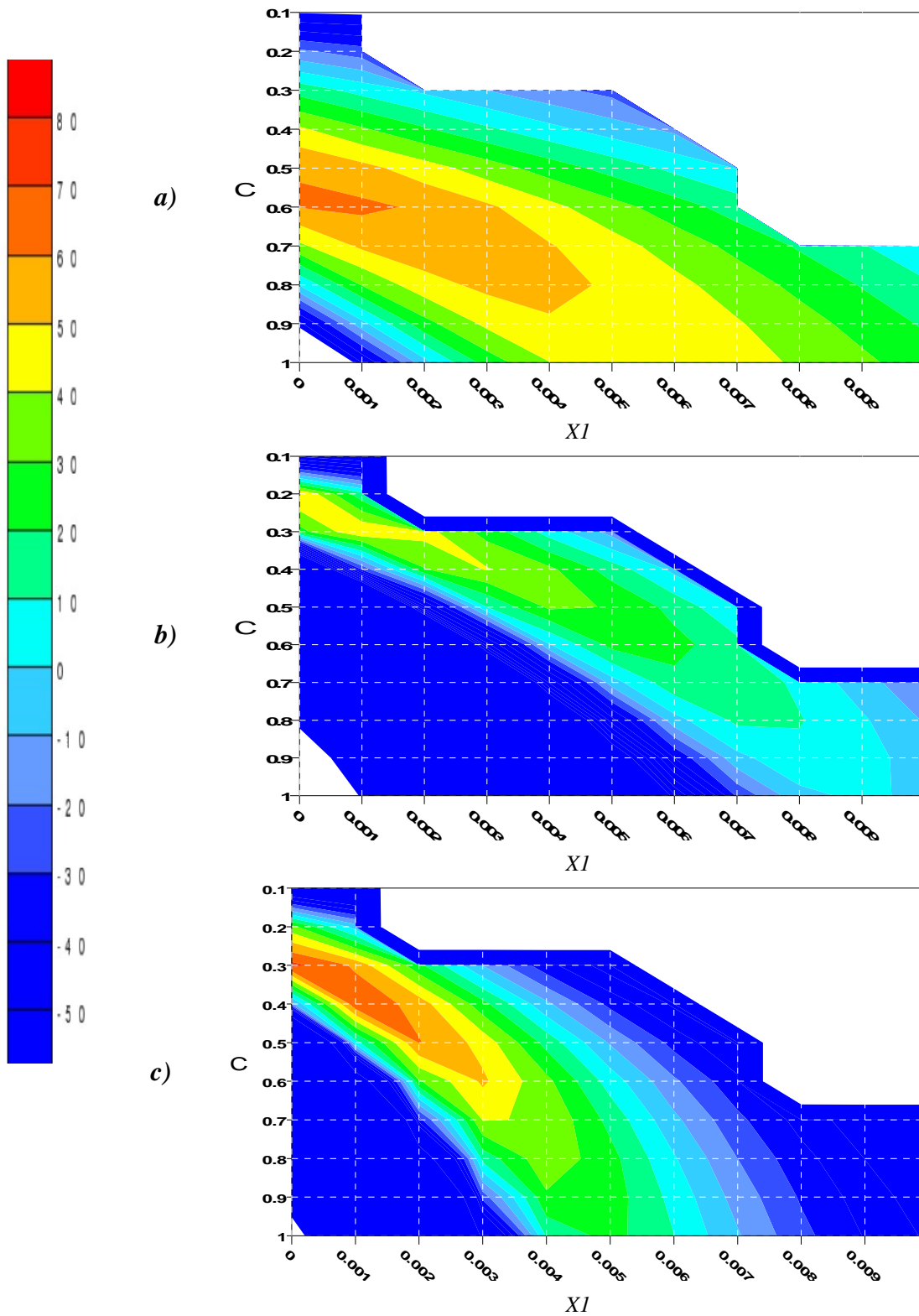
L'implémentation d'un module d'échange (pertes uniquement) avec le milieu souterrain à GR-HYDRA-B conduit à une nouvelle structure, nommée GR-HYDRA-C (Figure IV-9). Celle-ci comporte deux paramètres de calage, C, un coefficient d'ajustement des entrées et X1, un terme régissant l'échange avec le milieu souterrain. Avant une éventuelle étude de la variabilité des processus associés à ces paramètres, il convient d'analyser la pertinence de cette nouvelle structure à l'échelle des sous-bassins du Logone et du Chari, notamment par rapport à celle du modèle GR-HYDRA-B.

### 3.2.3. Discussion sur la structure du modèle GR-HYDRA-C

La procédure n'étant pas automatisée et les temps de simulation étant relativement long (1 heure pour 20 années), un calage précis des deux paramètres du modèle GR-HYDRA-C n'a pu être réalisé. Cependant, les performances associées à différents jeux de paramètres (une analyse de sensibilité « simplifiée ») permettent de discuter la pertinence de sa structure (Figure IV-10).

Cette analyse indique que, quelque soit le bassin considéré, l'abaissement de la valeur de C (donc la limitation des entrées) nécessite, afin d'augmenter les performances du modèle, une diminution de la valeur de X1 (donc une limitation des échanges surface-souterrain) et qu'il n'existe qu'une valeur optimale de C pour une valeur de X1 donnée et réciproquement. De plus, les performances semblent s'améliorer lorsque C se rapproche de la valeur optimale obtenue lors du calage du modèle GR-HYDRA-B et que X1 se rapproche d'une valeur nulle.

**La tendance ainsi mise en évidence semble donc indiquer que le terme d'échange, tel qu'il est formulé dans la structure de GR-HYDRA-C, ne présente pas d'intérêt, sa prise en compte conduisant à une dégradation des performances du modèle.** Cependant, comme tout autre concept permettant une caractérisation potentielle de la variabilité des paramètres associés, celui-ci pourra être à nouveau être testé sous une autre formulation, voire à un autre emplacement. Ainsi, par exemple, une formulation permettant un échange nappe-surface dominant en période de basses-eaux et un échange surface-nappe dominant en période de crue pourrait permettre une meilleure simulation des débits d'étiage tout en augmentant la valeur prise par le paramètre C.



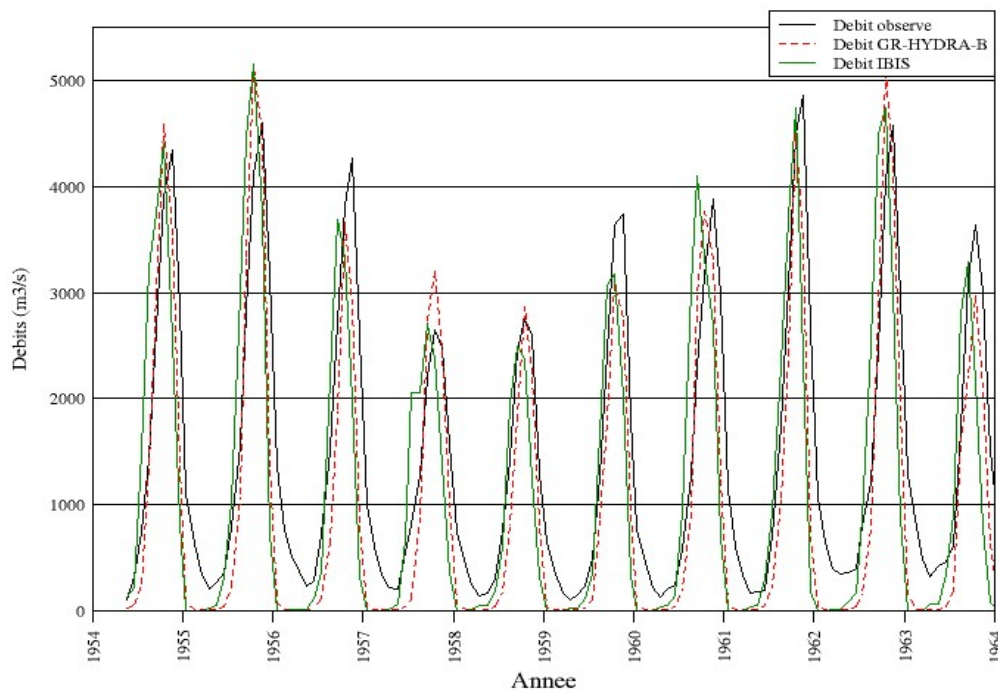
**Figure IV-10** : Surface de la fonction critère de Nash pour le Chari à Bousso (a), le Logone à Laï (b) et le Chari-Logone à N'Djamena (c), pour le modèle GR-HYDRA-C (période 1954-1963).

## 4. Le modèle GR-HYDRA-B : état actuel

Parmi les différentes versions testées associant une fonction de production GR à HYDRA, le modèle GR-HYDRA-B est le plus performant. Si elle reste perfectible, sa structure actuelle permet d'ores et déjà de simuler les débits des principaux tributaires du lac Tchad de manière plus cohérente que l'association IBIS-HYDRA, utilisée jusqu'à présent (Tableau VI-2). La comparaison des hydrogrammes simulés montre cependant que dans les deux cas, les débits d'étiage sont très largement sous-estimés (Figure IV-11 ; Annexe 1). Dès lors, il semble intéressant d'analyser plus en détail la structure d'HYDRA et notamment, sa sensibilité aux paramètres, pour l'instant fixés (Coe, 1999), qui régissent les temps de résidence de ses réservoirs.

**Tableau IV-2** : Performances comparées du modèle GR-HYDRA-B et de l'association IBIS-HYDRA : critère de Nash (%) pour la période 1954-1963.

	<i>Modèle</i>	<i>GR-HYDRA-B</i>	<i>IBIS+HYDRA</i>
<i>Station</i>	Lai (Logone)	62.3	-50.4
	Bouso (Chari)	53.6	-28
	N'Djamena	74.7	46.7



**Figure IV-11** : Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-B et l'association IBIS-HYDRA pour le Chari-Logone à N'Djamena entre 1954 et 1964.



## Conclusions et perspectives

En associant les données de ruissellements issues de modèle de biosphère IBIS au modèle conceptuel HYDRA, une modélisation distribuée de l'hydrologie du Bassin Versant du Lac Tchad (BFLT) a récemment été proposée. Bien que la simulation des dynamiques lacustres permise par HYDRA soit particulièrement intéressante pour cette application, les ruissellements produits par IBIS ne sont pas cohérents avec les observations, notamment au niveau des sous-bassins du Logone et du Chari.

Le travail présenté dans ce rapport consiste à remplacer le forçage IBIS par une fonction de production simple, intégrée à la structure d'HYDRA. Cependant, en entrée, le modèle requiert des données descriptives du relief et une analyse portant sur la qualité de différents MNT susceptibles d'être utilisés pour les générer est tout d'abord menée.

### Données géomorphologiques

Des travaux antérieurs ont permis d'enrichir la base de données géographique du BFLT d'informations altimétriques extraites du MNT SRTM. Ainsi, un MNT spécifique à cette région, calé sur le repère IGN local et intégrant notamment la bathymétrie du lac Tchad, a été produit. Sa résolution (30''x30'') est néanmoins inférieure à la résolution minimale fixée pour les entrées d'HYDRA (5'x5'), et il doit donc être rééchantillonné. Pour cela, plusieurs méthodes d'agrégation peuvent être employées (*moyenne, médiane, mode, minimum, maximum* et *plus proche voisin*), permettant de générer autant de MNT agrégés. Afin de déterminer celui qui, parmi eux, est le plus approprié dans le cadre d'une utilisation avec HYDRA, leur qualité est évaluée par rapport aux critères influençant la modélisation, soit la morphologie des dépressions et la définition des directions d'écoulement.

En ce qui concerne la morphologie des dépressions, les MNT agrégés avec les méthodes du *plus proche voisin*, de la *moyenne* et de la *médiane* sont ceux qui permettent d'obtenir les courbes bathymétriques du lac Tchad les plus satisfaisantes au regard des observations. Cependant, la méthode du *plus proche voisin* permet de prendre en compte certaines plaines d'inondation du Chari-Logone et est considérée, à ce titre, comme la plus pertinente.

En ce qui concerne les directions d'écoulement, une méthode d'évaluation de la qualité des MNT, basée sur la comparaison entre les réseaux hydrographiques qui en sont extraits et le réseau hydrographique observé est proposée. Elle permet de mettre en évidence, pour ce critère, la supériorité de l'agrégation via la méthode du *minimum*. Néanmoins, la position et la géométrie du réseau hydrographique extrait du MNT agrégé par la méthode du *plus proche voisin* se révèlent également relativement cohérentes, ce qui traduit une définition convenable des directions d'écoulement.

**La méthode d'agrégation du *plus proche voisin* est donc retenue pour rééchantillonner le MNT du BVLТ de 30''x30'' à 5'x5' en vue de son utilisation en entrée d'HYDRA.**

### Implémentation d'une fonction de production

Dans sa version distribuée, le modèle GR2M-94, simple, parcimonieux et robuste a déjà permis de simuler de manière satisfaisante les débits de certains fleuves africains. Sa fonction de production est donc intégrée à la structure d'HYDRA et ce nouveau modèle comporte un unique paramètre de calage. Il s'agit d'un coefficient permettant d'ajuster les données de forçage climatique, celles-ci pouvant parfois être approximatives.

Le modèle peut fonctionner selon deux configurations, l'une ne considérant que le ruissellement superficiel, l'autre prenant en compte le concept d'écoulement hypodermique. Au cours de la période 1954-1963, cette dernière se montre la plus performante pour la reproduction des débits des principaux tributaires du lac Tchad. Ainsi, les critères de Nash associés au Chari et au Logone sont de 1% à 8% supérieurs lorsque l'écoulement hypodermique est modélisé.

Cependant, les valeurs obtenues pour le paramètre de calage impliquent une réduction de 45% à 75% des données de forçage, incohérente avec un simple ajustement. Ce paramètre intègre donc vraisemblablement d'autres processus qu'il est intéressant de dissocier en vue de leur régionalisation éventuelle. C'est pourquoi un module de pertes vers le milieu souterrain intégrant un deuxième paramètre de calage est implémenté au modèle. Cet ajout n'entraîne pas d'amélioration de ses performances et n'est donc pas retenu.

**En ce qui concerne la simulation des débits des principaux tributaires du lac Tchad, la nouvelle structure associant la fonction de production du modèle GR2M-94, un module d'écoulement hypodermique et HYDRA s'avère néanmoins plus performante que l'association IBIS-HYDRA utilisée jusqu'à présent.** Ainsi, pour la période 1954-1963 le critère de Nash est passé de -50% à +62 pour le Logone à Lai et de -28% à +54% pour le Chari à Bousso. Ces résultats témoignent de l'intérêt du travail réalisé et ouvrent de nouvelles perspectives.

### Perspectives

Si l'implémentation d'une fonction de production à la structure d'HYDRA permet d'améliorer notablement les performances de la modélisation du BVLТ, celle-ci semble encore perfectible. En effet, il apparaît que les volumes annuels simulés sous-estiment de 20% à 35% les volumes observés.

Cette sous-estimation est principalement liée à une mauvaise reproduction des débits d'étiage. La **non-prise en compte des débits de base** au sein de la production ou des **temps de transfert trop rapides** au niveau du routage pourraient l'expliquer et constituent donc des pistes à explorer afin de poursuivre le développement du modèle.

De plus, les valeurs optimales prises par le paramètre du modèle sont incohérentes par rapport au sens qui lui est donné. Or, il apparaît que la **régionalisation de ce paramètre** par sous-bassins permet une augmentation des performances du modèle. La détermination des concepts auxquels il est associé puis la caractérisation de leur variabilité pourraient également être des directions à suivre pour développer le modèle.

Enfin, lorsque les débits de l'ensemble des tributaires du lac seront simulés de manière satisfaisante, le fonctionnement du modèle en ce qui concerne **la répartition et la dynamique des stocks d'eau** pourra être discuté. Un module d'infiltration au niveau du lac Tchad, implémenté dans le modèle lors de ce stage (Annexe 2), pourra alors être testé et validé.

## Références bibliographiques

- Ardoin-Bardin S. (2004) Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat. Université de Montpellier 2. 340 p.
- Carmouze J.P., Lemoalle J. (1983) The lacustrine environment. Lake Chad: Ecology and Productivity of a Shallow tropical Ecosystem, Eds. Carmouze J.P., Durand J.-R., Lévêque C. Dr W. Junk Publishers, The Hague (Netherlands), 575p.
- Charleux-Demargne J. (2001) Valorisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT) en hydrologie. Qualité d'extraction d'objets et de caractéristiques hydrologiques à partir des MNT. Utilisation pour l'estimation du régime de crue. Thèse de doctorat. ENSG Marnes la Vallée. 230p
- Coe M.T., Foley J.A. (2001) Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad Basin. Journal of geophysical research, vol.106, No. D4, 3349-3356.
- Coe M.T. (1999) Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: testing the accuracy of an atmospheric GCM. Journal of Climate vol. 13, 686-704.
- Delclaux F., Schweblin M., Coudrain A., Condom T. (2005) Linking lacustrine dynamics to climate variability: application to lake Titicaca basin, South America. EGU, General Assembly 2005, 24-29 avril 2005, Vienna, Austria.
- Dieulin C. (2005) Calcul des capacités en eau des sols (Water Holding Capacity - WHC) à partir de la carte des sols de la FAO. Note interne MSE/IRD Montpellier. 7 p.
- Djoret D. (2000) Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi (Tchad) par les méthodes chimiques et isotopiques. Thèse de doctorat. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse. 161 p.
- Edijatno, Nascimento N.O., Yang X., Makhlof Z., Michel C. (1999) GR3J : a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-278.
- Faroux C. (2004) Modélisation Hydrologique distribuée : Application à la dynamique Lacustre de Lac Tchad. Travail de diplôme. Cycle Postgrade Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau. EPFL. 83p.

- Fekete B.M., Vorosmarty C.J., Lammers R.B. (2006) Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: Development, analysis and control of error. *Water Resources Research*, 3 (77): 1955-1967.
- Foley, J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Levis S., Pollard D., Sitch S., Haxeltine A. (1996) An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics *Global Biogeochemical Cycles*, Volume 10, Issue 4, p. 603-628
- Francés F., Vélez J.I., Vélez J. (2007) Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models . *Journal of Hydrology*. 332 (1-2): 226-240.
- Gac J.Y. (1980) Géochimie du bassin du lac Tchad. *Travaux et Docu. ORSTOM* 123, Paris, 251 p.
- Gaume E. (2002) *Eléments d'analyse sur les crues éclair*. Thèse de doctorat. ENGREF Paris & INRS-EAU, Québec. 524 p.
- Isiorho S.A., Matisoff G., When K.S. (1996) Seepage relationships between Lake Chad and the Chad aquifers. *Ground Wat.* 34(5): 819-26.
- Kenny F., Matthews B. (2005) A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences* 31 (2005) 768–779.
- Leblanc M., Favreau G., Nazoumou Y, Leduc C., Stagnitti F., Van Oevelen P., Delclaux F., Lemoalle J., Maley J. (2006) Reconstruction of Megalake Chad using February 2000 Shuttle Radar Topographic Mission data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (239), 16–27.
- Leblanc M. (2002) *The use of remote-sensing and GIS for Water Resources Management of Large Semi-Arid Regions: a Case Study of the Lake Chad Basin, Africa*. Phd Thesis, University of Glamorgan (UK) and Université de Poitiers (France). 225p.
- Le Coz M. (2006) *Modélisation hydrologique distribuée de dynamiques lacustres : Application au lac Tchad*. M1 EGID. Université de Bordeaux 3. 47p.
- Lemoalle J. (1979) Application des données Landsat à la carte bathymétrique du lac Tchad. *Cah. ORSTOM, série Hydrobiol.*, 12(1), 83-87.
- Li K.Y., Coe M.T., Ramankutty N. (2004) Investigation of hydrological variability in West Africa using land surface models. *Journal of Climate* 18 (16), 3173-3188.

- Makhlouf Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony). 228 p.
- Makhlouf Z., Michel C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
- Massuel S. (2001) Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. Mém. DEA Sci. de l'Eau dans Environnement Continental, Université de Montpellier 2. 85 p.
- Melville J.K., Martz L.W. (2004) A Comparison of Data Sources for Manual and Automated Hydrographical Network Delineation. *Canadian Water Resources Journal*. Vol. 29 N.4. 267-282.
- Mouelhi S, (2003) Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony. 323 p.
- Nash J.E., Sutcliffe I.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 273, 282-290.
- Neteler M., Mitasova H. (2002) Open Source GIS: a GRASS GIS approach. Ed. Kluwer Academic Publishers, Norvell (USA), 434p.
- Olivry J.C., Chouret A., Vuillaume G., Lemoalle J., Bricquet J.P. (1996) Hydrologie du lac Tchad. Monographie hydrologique 12. ORSTOM éditions. 266 p.
- Ouédraogo M. (2001) Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat. Université de Montpellier 2. 257 p.
- Perrin C. (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat. INPG(Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 p.
- Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. (2003) The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)– A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. vol. 57, pp. 241-262, 2003 (ISPRS journal U.V. Helava BestPaper Award 2002).

- Roche M.A. (1973) Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Paris : ORSTOM. 398 p.
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W, Hensley S. (2005) An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 p.
- Roubinet D. (2007) Variabilité hydrologique du lac Tchad : passé, présent et perspectives. Sujet de synthèse bibliographique. M2 R2E. Université de Montpellier 2. 14 p.
- Schmocker-Fackel P. (2004) A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 15638.
- Tagaki M. (1996) Accuracy of Digital Elevation Model according to spatial resolution. Eds Fristch D., English M., Sester M., ISPRS Commission IV on GIS, Between Visions and Applications, Stuttgart (Germany).
- Vuillaume G. (1981) Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XVIII, n°1, 23-72.

## Liste des figures et des tableaux

**Figure I-1** : Le bassin versant du lac Tchad.

**Figure I-2** : Pluviosité et isohyètes annuels au sud du bassin versant du lac Tchad, avant 1970 (Gac, 1980).

**Figure I-3** : Indices pluviométriques sur le bassin versant du lac Tchad pour la période 1940-1990 (source : Climatic Research Unit, Norwich, UK).

**Figure I-4** : Hydrogramme du Chari-Logone pour l'année moyenne sur la période 1956-1975 (Gac, 1980).

**Figure I-5** : Régions naturelles du lac Tchad : la végétation apparaît en rouge (source : NASA, 1973).

**Figure I-6** : Coupe schématique SE-NO du lac en période « Petit Tchad » (Olivry et al,1996).

**Figure I-7** : Variation de surface du lac Tchad depuis 1963 (<http://www.grida.no/climate/>).

**Figure I-8** : L'association IBIS-HYDRA.

**Figure I-9** : Cotes mensuelles du lac Tchad observées et simulées par l'association IBIS-HYDRA entre 1954 et 1967.

**Figure II-1** : Structure du modèle HYDRA (d'après Coe, 1999).

**Figure III-1** : Comparaison entre les courbes bathymétriques issues des observations et celles extraites des MNT agrégés.

**Figure III-2** : Cartes du réseau hydrographique du BVLT - En bleu : réseau issu de la WDB2 – En rouge : réseaux extraits des MNT *ppv*, *moy*, *min*, *mod*, *méd* et *max*.

**Figure III-3** : Proportion du réseau hydrographique WDB2 (« pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés.

**Figure III-4** : Proportion du réseau hydrographique WDB2 (non « pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés.



**Figure III-5** : Hydrogrammes simulés avec l'association IBIS-HYDRA pour le Chari à Bouso entre 1954 et 1963 avec les MNT *min*, *moy* et *ppv*.

**Figure III-6** : Niveaux du lac Tchad simulés avec l'association IBIS-HYDRA entre 1954 et 1963 avec les MNT *min*, *moy* et *ppv*.

**Figure III-7** : Eaux libres (en rouge) simulées par HYDRA dans la région du lac Tchad : avec le MNT *ppv* (a), plusieurs zones inondées apparaissent à l'amont du lac ; avec les MNT *moy* (b) et *min* (c), le lac Tchad constitue l'unique surface inondée.

**Figure IV-1** : Schéma de la fonction de production du modèle GR2M-94 : C (>0) est l'unique paramètre de calage (d'après Makhoulouf, 1994).

**Figure IV-2** : Schéma du modèle GR-HYDRA-A : C (>0) est l'unique paramètre de calage.

**Figure IV-3** : Percolation du réservoir « sol » des modèles GR : C (>0) est l'unique paramètre de calage (d'après Mouelhi, 2003).

**Figure IV-4** : Schéma du modèle GR-HYDRA-B : C (>0) est l'unique paramètre de calage.

**Figure IV-5** : Critères de bilan des modèles GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B en fonction de la valeur prise par le paramètre C (période 1954-1963).

**Figure IV-6** : Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B pour le Chari-Logone à N'Djamena entre 1954 et 1964.

**Figure IV-7** : Sensibilité du modèle GR-HYDRA-B au paramètre C (période 1954-1963).

**Figure IV-8** : Calages « global » et « semi-distribué » du modèle GR-HYDRA-B.

**Figure IV-9** : Schéma du modèle GR-HYDRA-C : C (>0) et X1 (0<X1<1) sont les paramètres de calage.

**Figure IV-10** : Surface de la fonction critère de Nash pour le Chari à Bouso (a), le Logone à Laï (b) et le Chari-Logone à N'Djamena (c), pour le modèle GR-HYDRA-C (période 1954-1963).

**Figure IV-11** : Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-B et l'association IBIS-HYDRA pour le Chari-Logone à N'Djamena entre 1954 et 1964.

**Tableau I-1** : Différence entre les débits moyens annuels des tributaires du lac Tchad observés et simulés par l'association IBIS-HYDRA, pour la période 1954-1969 (Le Coz, 2006).

**Tableau III-1** : Proportion du réseau hydrographique WDB2 (« pondéré ») interceptée par les réseaux extraits des différents MNT agrégés (sans « élargissement »).

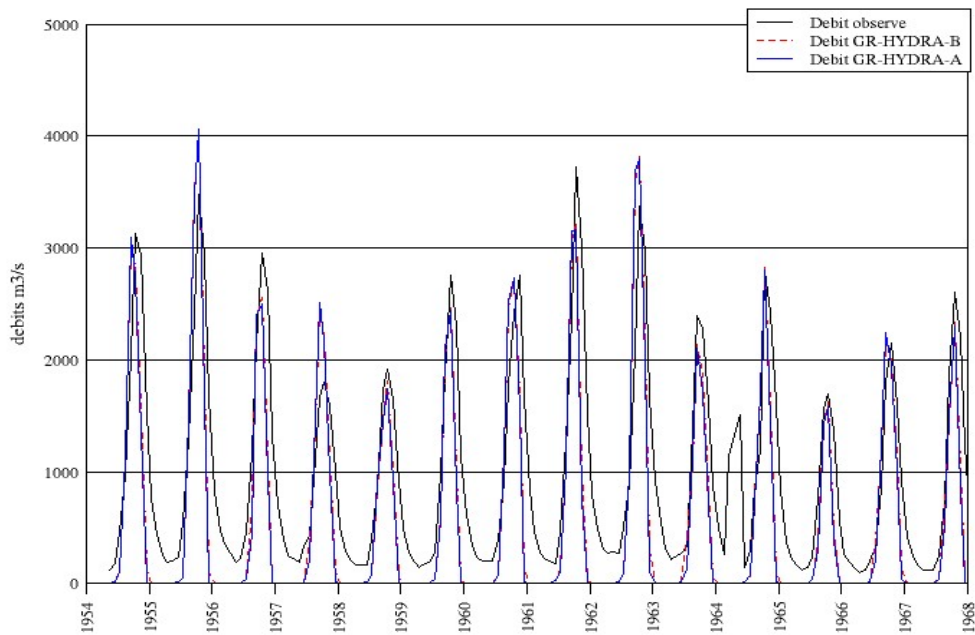
**Tableau III-2** : Qualité relative des MNT agrégés au regard de la morphologie des cuvettes du lac Tchad et des directions d'écoulement au sein du BVLT.

**Tableau IV-1** : Performances maximales comparées des modèles GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B.

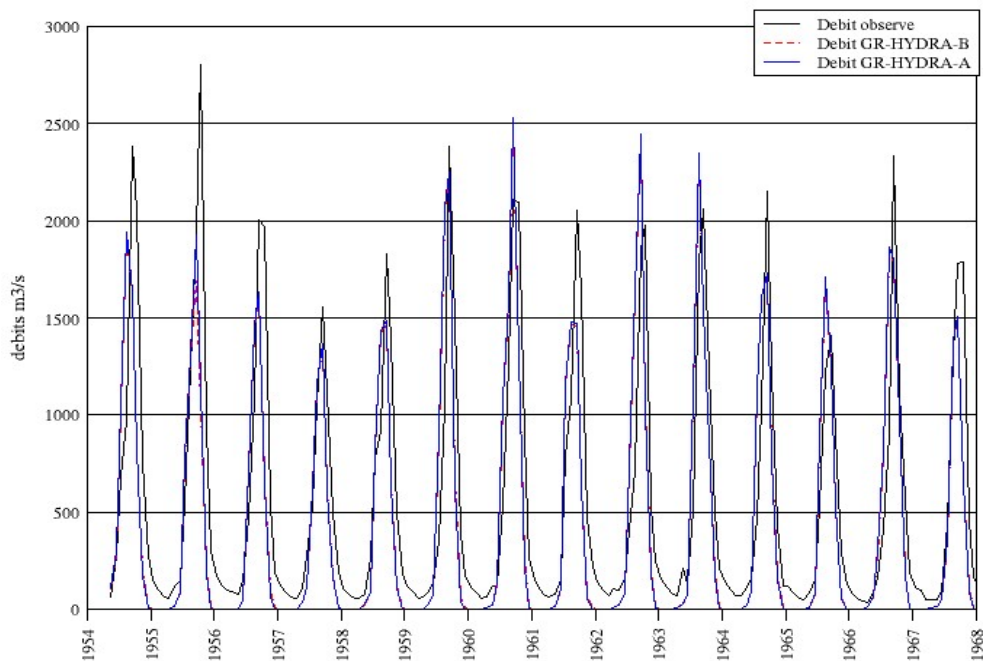
**Tableau IV-2** : Performances comparées du modèle GR-HYDRA-B et de l'association IBIS-HYDRA : critère de Nash (%) pour la période 1954-1963.

## **Annexes**

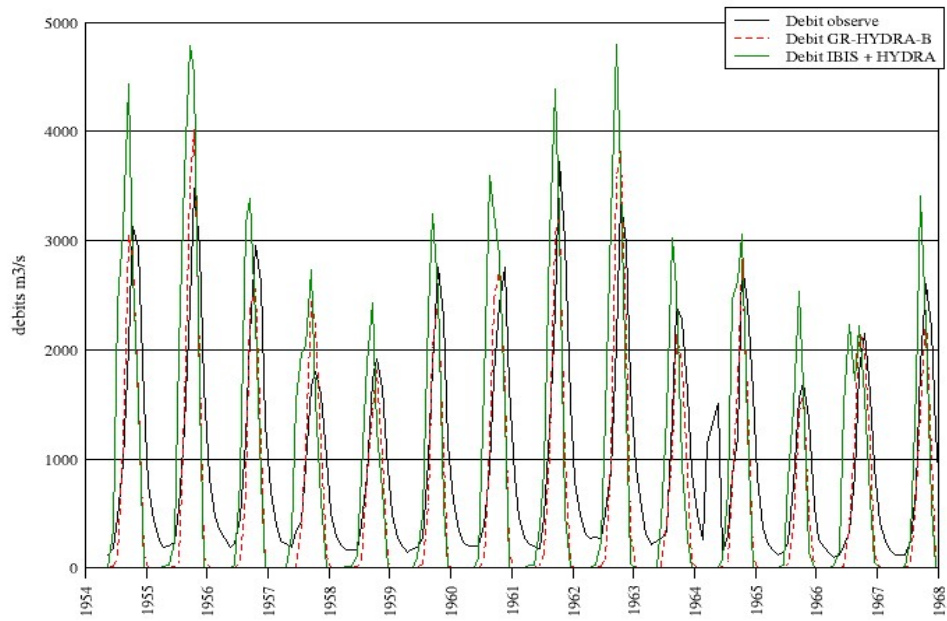
## Annexe 1 : Hydrogrammes observés et simulés



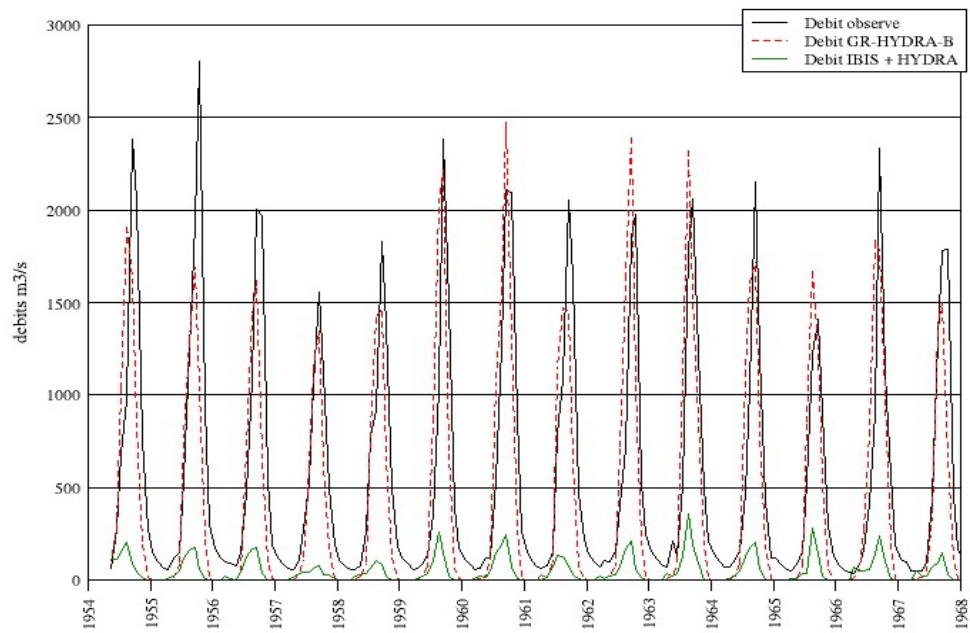
**Figure A1-1** : Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B pour le Chari à Bouso entre 1954 et 1964.



**Figure A1-2** : Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-A et GR-HYDRA-B pour le Logone à Lai entre 1954 et 1964.



**Figure A1-3 :** Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-B et IBIS/HYDRA pour le Chari à Bouso entre 1954 et 1964.



**Figure A1-4 :** Hydrogrammes observés et simulés par GR-HYDRA-B et IBIS/HYDRA pour le Logone à Lai entre 1954 et 1964.

## Annexe 2 : Implémentation d'un module d'infiltration à la structure d'HYDRA

Le lac Tchad occupe une position haute par rapport à l'aquifère phréatique du quaternaire et plusieurs études ont mis en évidence une infiltration des eaux du lac vers la nappe (Leblanc, 2002). Cependant la quantification des pertes au niveau du lac ou de la recharge de l'aquifère ont abouti à des caractérisations différentes de cette infiltration. Ainsi, à partir d'un bilan hydrologique, Vuillaume (1981) évalue les pertes annuelles par infiltration à 4.5% des apports totaux au lac ; via un bilan salin sur les eaux du lac, Roche (1980) estime que ces pertes sont comprises entre 4% et 8% des apports au lac ; grâce à des mesures in-situ et à un modèle hydrogéologique, Isihoro (1996) les quantifie à 20%, voire 30% des apports au lac.

L'infiltration constitue donc un terme non-négligeable du bilan hydrologique du lac Tchad. Au sein de la structure d'HYDRA, elle peut être conceptualisée par une perte au niveau des réservoirs « rivière » des mailles constituant l'entité « lac ». Cependant, du fait de l'incertitude concernant les volumes infiltrés, cette perte ne peut pas être définie à partir de données de forçage et doit faire l'objet d'une modélisation spécifique. Pour cela, l'unicité de la relation surface-souterrain est admise et le lac est considéré comme un potentiel imposé variable, mais toujours supérieur à la cote du toit de la nappe, qu'il alimente (Guillaume Favreau, note interne). L'infiltration est donc régie par la capacité de la couche de faible conductivité hydraulique colmatant les fonds du lac à laisser transiter l'eau. Dès lors, en considérant un écoulement mono-dimensionnel vertical, l'échange lac-nappe peut être estimé par la loi de Darcy.

$$q = -K(dH/dL) \text{ où } dH = (H_{\text{fond}} - H_{\text{lac}}) \quad (\text{II-12})$$

$q$ , flux lac-nappe (m/s) ;  $K$ , conductivité hydraulique verticale du colmatage (m/s) ;  $dH$ , différence de potentiel entre l'amont et l'aval du colmatage (m) ;  $dL$ , épaisseur colmatée (m)

$$q = C^* (H_{\text{lac}} - H_{\text{fond}}) \quad (\text{II-13})$$

$$C^* = K/dL \quad (\text{II-14})$$

où  $C^*$  ( $s^{-1}$ ) est un paramètre de conductance (=conductance / surface d'échange)

Cette formulation simplifiée nécessite la connaissance, pour chacune des mailles composant l'entité « lac », de la différence ( $H_{\text{lac}} - H_{\text{fond}}$ ) ainsi que du paramètre de conductance  $C^*$ . La première est calculée à chaque pas de temps par HYDRA et le second correspond à une propriété du milieu qui, à l'échelle de l'étude, peut être considérée comme temporellement invariante.

Il peut être évalué par une analyse de la lithologie des fonds du lac (Massuel, 2001) mais celle-ci n'est connue que localement et sa probable forte hétérogénéité rend approximative toute tentative de spatialisation. Ainsi, Leblanc (2002) suggère de considérer le paramètre de conductance libre. Il convient alors de l'optimiser par comparaison des niveaux du lac simulés et observés.

Ainsi, la structure d'HYDRA est agrémentée d'un module d'infiltration. Il s'agit d'une perte au niveau du réservoir rivière des mailles « lac » dont le volume est calculé à chaque pas de temps selon la lame d'eau et un paramètre de calage, noté X3 (paramètre de conductance).

$$V_i = (H_{\text{lac}} - H_{\text{fond}}) \cdot X3 \cdot A \quad (\text{II-15})$$

$V_i$ , volume infiltré au pas de temps  $i$  ( $\text{m}^3$ ) ;  $A$ , surface de la maille « lac » considérée ( $\text{m}^2$ )