

## Couplage entre un modèle Pluie-débit GR2M et un générateur de pluie pour évaluer le transfert entre deux barrages de Semi-aride Tunisien Sidi Saad et El Houareb

### [ Coupling between a rain-runoff model, GR2M, and a rain generator to evaluate the transfer between two dams the Tunisian Semi-arid Sidi Saad and El Houareb ]

*Safouane Mouelhi<sup>1</sup>, Saida Nemri<sup>1</sup>, Sihem Jebari<sup>1</sup>, and Mohamed Slimani<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêt (INRGREF), Ariana, Tunisie

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, Institut National Agronomique, Tunis, Tunisie

---

Copyright © 2017 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** This work opts to clarify the hydrological efficiency of the water transfer between the two dams Sidi Saad and El Haouareb. The Hydrological model GR2M was chosen to be calibrated and validated in the watershed corresponding to the two study sites. Coupled with the rain generation model, this model allowed the estimation of future inputs of two dams Sidi Saad and El Haouareb. Different scenarios were subsequently developed to estimate the monthly outputs of two dams and the volumes of security. A study of the filling of the dam is performed at the end by the balance equation and using the generated inflows and the estimated scenarios, which was used to study the possibility of water transfer.

**KEYWORDS:** Semi-arid; central Tunisia; hydrological modeling; GR2M model; Rain generation; inflows generation; Dam management.

**RESUME:** Ce travail opte à apporter des éclaircissements sur l'efficacité hydrologique du transfert entre deux barrages de semi-aride Tunisien Sidi Saad et El Haouareb sous angle de gestion intégrée de ressource en eau. Par ailleurs, le modèle GR2M a été choisi pour être calé et validé sur les bassins versants correspondant des deux sites d'études, ce qui a permis d'arrêter un outil d'estimation d'apports. Couplé avec les pluies générées, ce modèle a permis l'estimation des apports futurs de deux barrages de Sidi Saad et El Haouareb. Différents scénarios ont été développés par la suite pour estimer les sorties mensuelles de deux barrages ainsi que les volumes de sécurité nécessaires. Une simulation de remplissage de barrage est réalisée à la fin par l'équation de bilan et en utilisant les apports générés et les scénarios de sorties estimées pour étudier la possibilité de transfert.

**MOTS-CLEFS:** Semi-aride ; Tunisie centrale ; Modélisation hydrologique ; modèle GR2M ; Génération de pluie ; Génération des apports ; Gestion des barrages.

## 1 INTRODUCTION

La Tunisie centrale est une région semi-aride caractérisée par de fortes variabilité des pluies à l'origine des inondations dévastatrices provenant essentiellement des oueds Zeroud et Merguellil comme celles de 1969. Pour protéger la région de Kairouan contre les inondations, deux barrages ont été construits : Sidi Saad (Zeroud) et El Haouareb (Merguellil). Ces deux barrages sont aussi exploités pour l'irrigation et la recharge de la nappe de Kairouan. Dans le but d'un renforcement de connections du système hydraulique, il est question de procéder par un transfert via une liaison entre ces deux barrages.

Toutefois, sous un angle de gestion intégrée des ressources en eau, cette interconnexion ne serait optimale que si les besoins locaux correspondant à chacun de deux barrages, majorés par les pertes en infiltration et évaporation, sont satisfaits. Dans le but de reconstituer une série des apports futurs aux barrages au pas de temps mensuel, un couplage entre un générateur de pluie et un modèle pluie débit GR2M est nécessaire. L'étude de la spécificité de la pluie de la zone montre qu'elle est très aléatoire et aucun cycle ne distinguable dans l'historique d'où aucun générateur classique ne peut être applicable d'où la nécessité de développer un générateur en se basant sur la chaîne de Markov et la génération des rangs en premier lieu et la quantité de pluie en second lieu cette méthodologie a été déjà décrite dans un article publié. Les apports générés par le couplage sont utilisés dans la simulation de remplissage de deux barrages.

## 2 METHODOLOGIE

Ce travail s'inscrit dans une optique de simulation prévisionnelle de remplissage des barrages afin de quantifier le volume d'eau mobilisable pour un éventuel transfert entre les barrages. Des scénarios ont été développés pour estimer l'évolution des sorties mensuelles et le volume de sécurité à laisser dans le barrage avant tout transfert envisageable tout en utilisant les apports générés par le couplage générateur de pluie- Modèle Pluie débit. La figure 1 résume la méthodologie du travail.

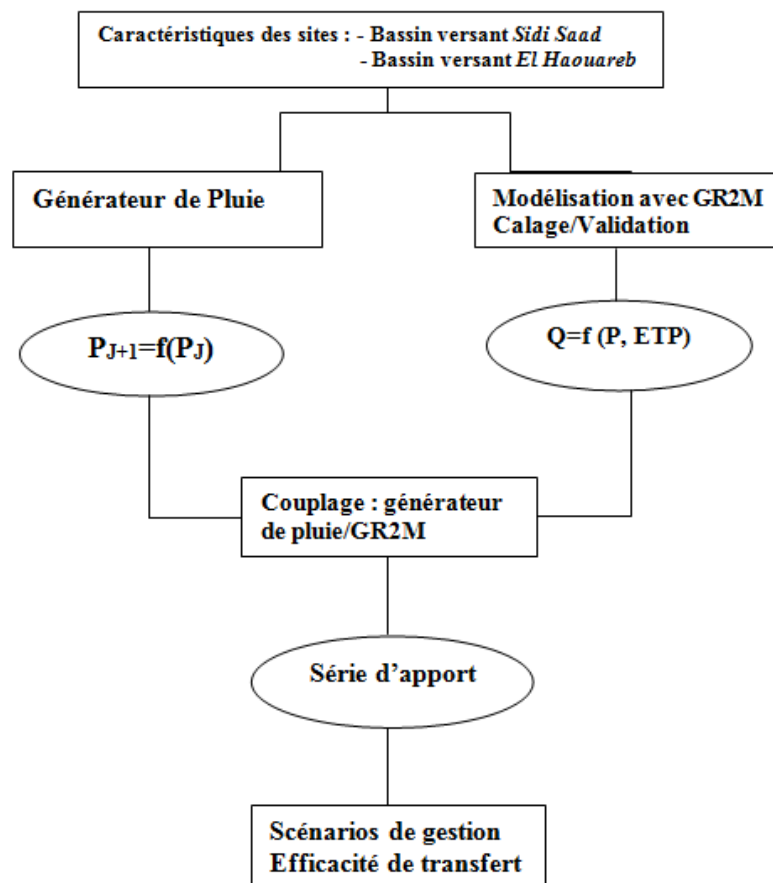


Figure 1: Méthodologie de travail

### 2.1 ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES

La région de la Tunisie centrale est traversée par deux principaux oueds Zeroud et Merguellil. Ces oueds drainent les flancs de la dorsale tunisienne à l'ouest jusqu'à l'amont immédiat de la ville de Kairouan. Ces deux oueds qui coulent 30 jours par an sont connus par la violence de leurs crues débouchant dans la plaine de Kairouan. En 1981 l'oued Zeroud est barré par un grand barrage Sidi Saad et de même en 1989 l'oued Merguellil par le barrage El Haouareb pour maîtriser les écoulements à l'entrée de la plaine (Figure 2). Le bassin versant *Merguellil* couvre une superficie de 1330 Km<sup>2</sup> [1]. Le bassin versant de



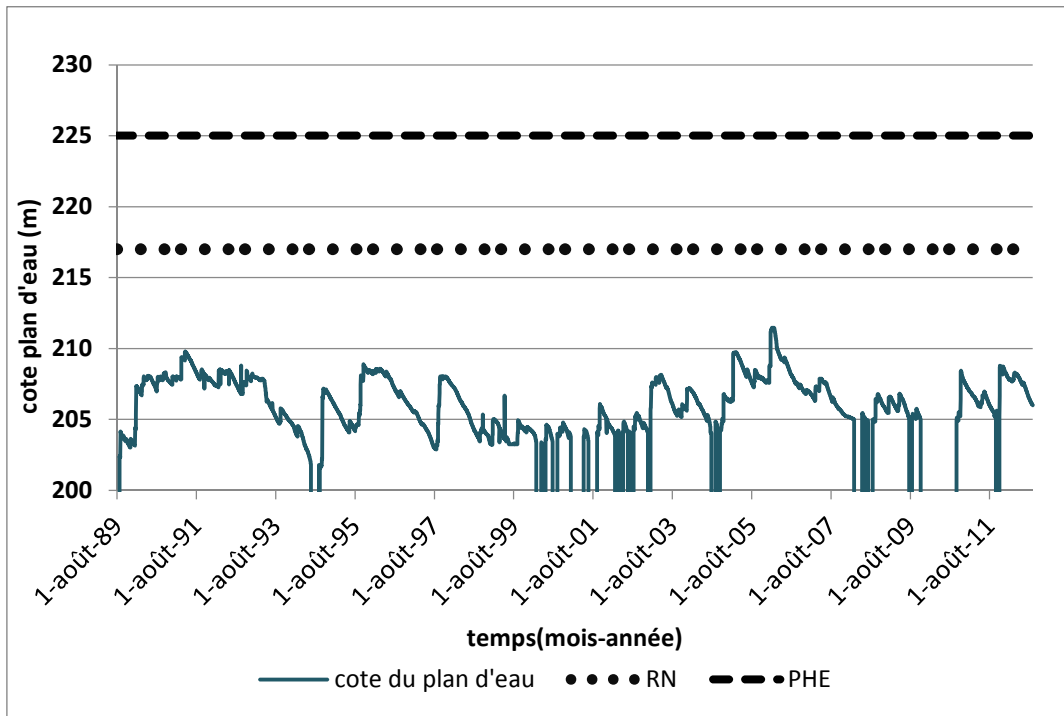


Figure 3: Evolution du niveau d'eau dans la retenue du barrage d'El Haouareb (années 1989-2012)

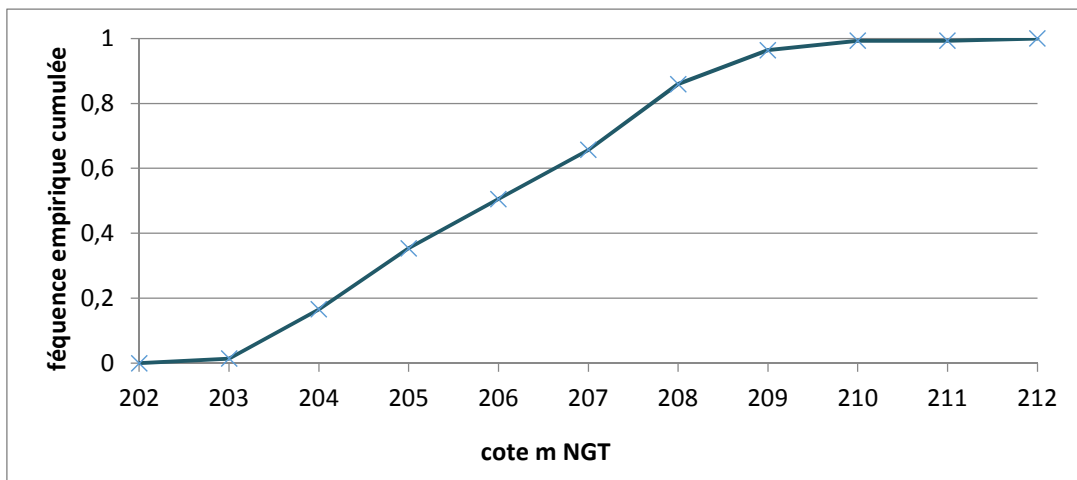


Figure 4: Fonction de répartition empirique de niveau de l'eau dans le barrage El Haouerb

Le volume annuel moyen sorti du barrage est de  $17,7 \text{ Mm}^3/\text{an}$  dont le volume évaporé est de  $3,9 \text{ Mm}^3$  et représente 22,05 % du volume total sorti. Le volume infiltré constitue le terme le plus important du bilan il est estimé à  $10,22 \text{ Mm}^3/\text{an}$  et représente 57,64 %. Le volume l'irrigation qui commence qu'après 5 ans de la mise en eau a augmenté progressivement et constitue 16,7 % du volume total avec  $2,79 \text{ Mm}^3/\text{ans}$ . Les volumes de dévasement, de déversement et les lâchés d'eau pour la recharge de la nappe ne constituent que 3,5 %, donc entre 70 et 90 % de volume perdu par évaporation ou par infiltration (Figure 5).

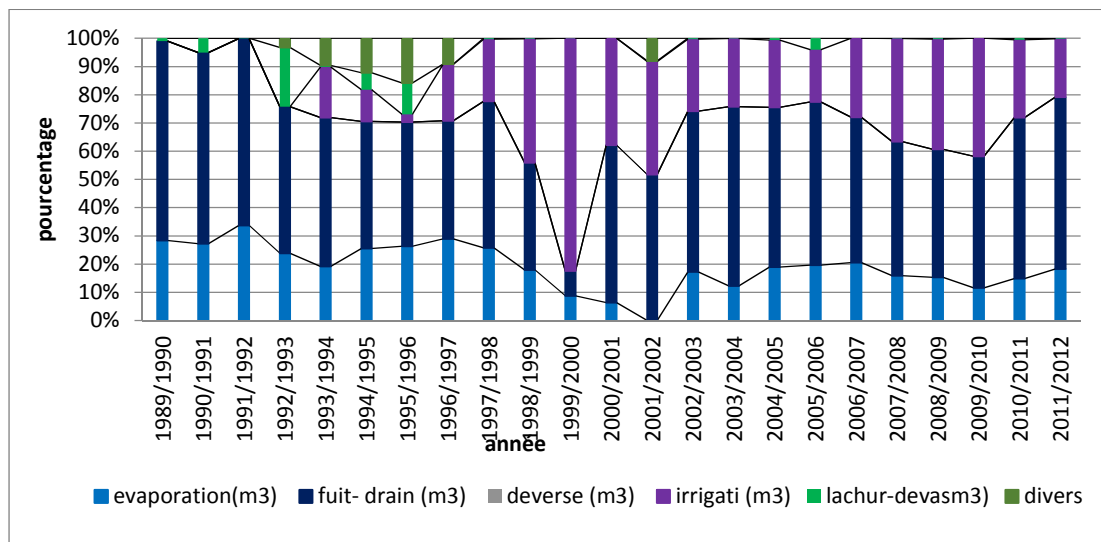


Figure 5: Sorties annuelles du barrage El Houareb (m3)

### 2.1.2 BARRAGE SIDI SAAD

Le barrage de *sidi Saad* a été installé à l’embouchure de l’oued *Zeroud* suite aux crues catastrophiques de 1969 pour protéger la ville de Kairouan contre les inondations. Le barrage de *Sidi Saad* est exploité par la suite pour l’irrigation et la recharge de la nappe du Kairouan à l’aval. *Ben Mammou* et *Louati* (2007) [8] ont montré, par l’étude de l’évolution temporelle de l’envasement des barrages de Tunisie, que L’alluvionnement moyen annuel de barrage *sidi Saad* a passé de 0,98Mm<sup>3</sup> en 1988 à 2,41Mm<sup>3</sup> en 1993 et il est égal à 2,9Mm<sup>3</sup> en 2000 [9], [8].

La côte de la retenue normale est de 270m, celle des plus hautes eaux est de 298m. La capacité du réservoir à la côte de la retenue normale est 209Mm<sup>3</sup>, la tranche destinée au laminage des crues est 1785 Mm<sup>3</sup>. L’évolution de la côte d’eau dans la retenue de barrage *Sidi Saad* depuis sa mise en eau jusqu’à 2012 montre que le niveau de l’eau n’a dépassé la côte de déversement, de 270m, que durant l’épisode d’apport important entre janvier 1990 et 1993 (suite à la crue exceptionnelle de 1990) et entre Septembre 1995 et Novembre 1995 (Figure 6). Sur un échantillon constitué par les côtes de l’eau dans la retenue du barrage à la fin de chaque mois sur une période de 24 années on procède ici par l’analyse de la distribution empirique de la côte de remplissage, illustrée dans la figure 7. On remarque que le niveau de l’eau dépasse rarement la côte de la retenue normale (270m) avec une fréquence empirique égale à 0,18. La côte de l’eau est inférieure à la côte 267m avec une fréquence de 0,75. Le volume moyen soutiré du barrage *Sidi Saad* est de 57Mm<sup>3</sup>/an. Le volume d’eau d’irrigation a augmenté à partir de 1998 et constitue 50 % de volume soutiré. Le pourcentage du volume évaporé par rapport au volume total varie entre 30 et 40 % de volume total. Alors que celui relatif au dévasement, déversement et les lachures pour la recharge de la nappe varient entre 10 et 20 % (Figure 8).

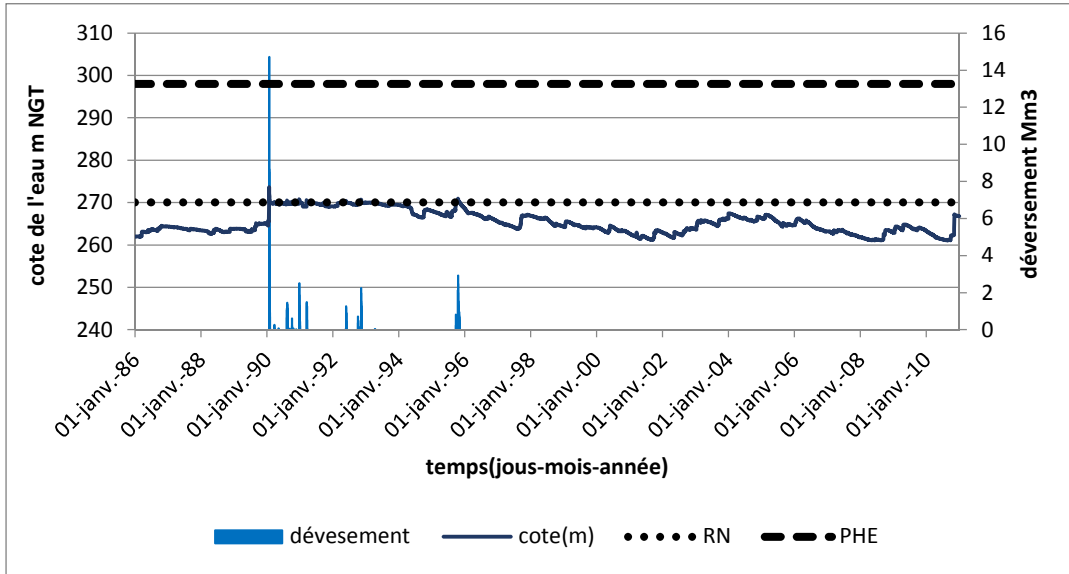


Figure 6: Evolution de la cote d'eau dans la retenue de barrage sidi Saad

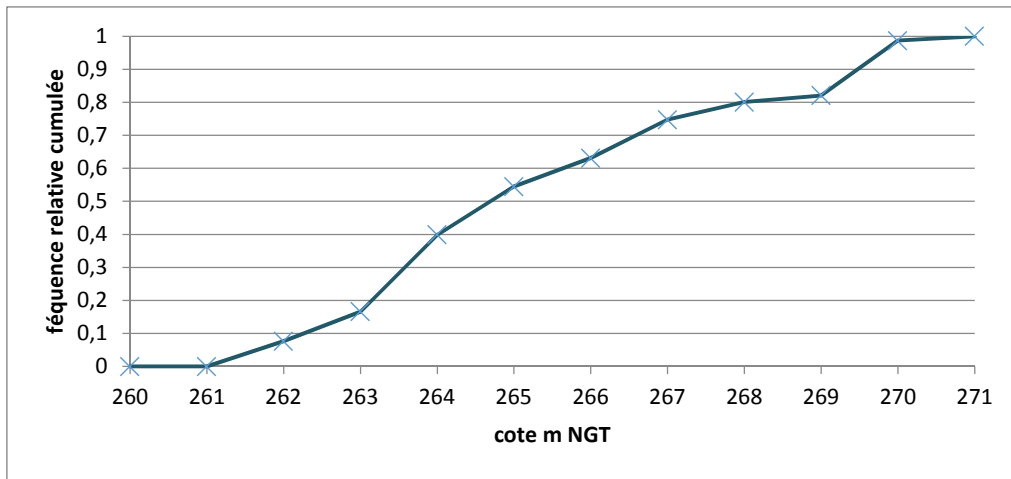


Figure 7: Fonction de répartition empirique des côtes de niveau de l'eau dans la retenue Sidi Saad

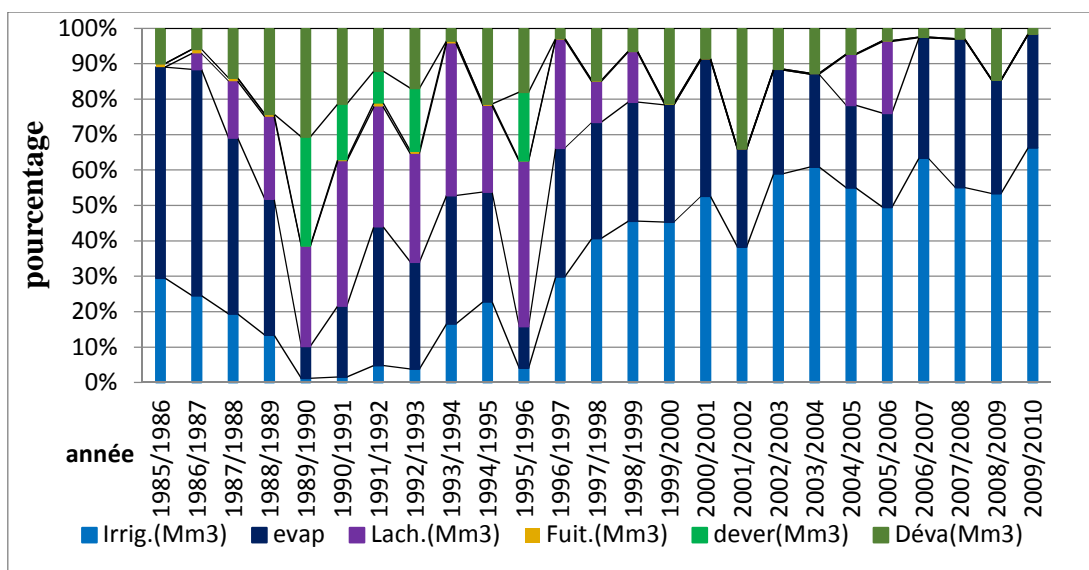


Figure 8: Les volumes soutirés du barrage Sidi Saad

## 2.2 LA MODELISATION PLUIE-DEBIT : SIMULATION DES APPORTS DES BARRAGES

Le modèle GR2M est un modèle pluie-débit globale conceptuel développé sur des bassins versants français par Cemagref à pas de temps mensuel. Makhoulf (1994) [10] a travaillé sur un modèle mensuel en proposant une version à deux paramètres, GR2M, qui a par la suite été amélioré par [11] [12] [13]. Ce modèle a été utilisé dans le cadre de cette étude pour plusieurs raisons : d'une part, on cite sa robustesse et sa simplicité. D'autre part, il nécessite seulement deux entrées : la pluie et l'ETP et il ne présente que deux paramètres à caler [14], [11], [13]. Dans ce modèle, la transformation de la pluie en débit est décomposée en différentes composantes et le fonctionnement du bassin versant est représenté par des réservoirs interconnectés ou le débit de vidange dépend du taux de remplissage (Figure 9). Les équations décrivant les processus comportent des paramètres empiriques non mesurables, qui doivent être obtenus par calage [13] Ce modèle ne comporte que deux paramètres à caler :

$X_1$  : Capacité du réservoir de production exprimée en mm.

$X_2$  : Coefficient d'échanges souterrains

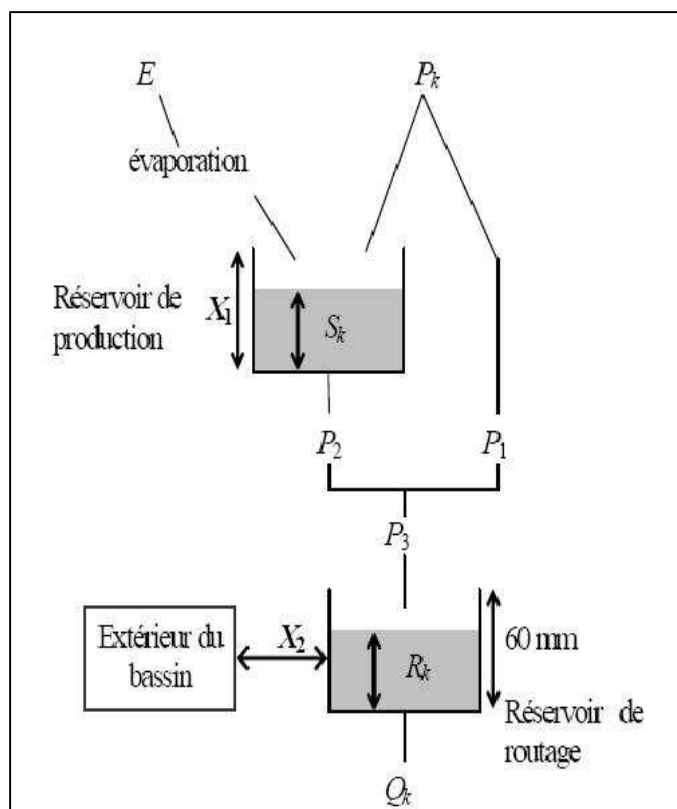


Figure 9: Schémas de la structure du modèle GR2M

Le modèle GR2M est constitué par deux composants majeurs pour simuler le débit à l'exutoire : un module de production et un module de routage ou transfert :

**Un module de production** : responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette en quantité évaporée et en quantité stockée. Il est constitué par un réservoir sol caractérisé par son remplissage maximal. Cette fonction repose sur une équivalence de suivi d'humidité du sol pour déterminer la pluie nette à partir de la pluie brute.

**Un module de routage** : ou de transfert : permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes [13] :

• *Production :*

Une partie  $P_s$  de la pluie  $P_k$  (pluie mensuelle du mois  $k$ ) va être ajoutée au contenu  $S_k$  dans le réservoir au début du pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2 \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}$$

La pluie  $P_1$  en excès est donnée par  $P_1 = P - P_s$

Le contenu du réservoir est devenu  $S' = S_k + P_s$

Sous l'effet de l'évapotranspiration, une quantité  $E_s$  est prélevée du réservoir avec  $E$  est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois  $K$

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{K_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}$$

Et le niveau  $S'$  devient  $S'' : S'' = S' - E_s$

• *Percolation :*

Le réservoir se vidange ensuite selon une percolation  $P_2$

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left(\frac{S''}{X_1}\right)^3 \right]^{-1/3} \right\}$$

Le niveau  $S_{k+1}$  du réservoir pour le calcul du mois suivant est :

$$S_{k+1} = S'' - P_2$$

• *Routage :*

La quantité de pluie  $P_3$  qui atteint le réservoir de routage est :

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Et le niveau  $R_k$  du réservoir devient  $R'$

$$R' = R_k + P_3$$

F et un terme d'échange en eau souterrain  $F$  qui est calculé par :

$$F = (X_2 - 1) \cdot R'$$

Et le niveau de réservoir :

$$R'' = X_2 \cdot R'$$

Réservoir de la capacité maximale 60 mm se vidange pour donner un débit  $Q_k$  :

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Et le contenu du réservoir devient :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k$$

**2.2.1 LES SÉRIES DE DONNÉES UTILISÉES : PLUVIOMÉTRIE**

Les bassins versants de Zeroud et Merguellil appartiennent à une zone recevant une pluviométrie annuelle entre 200 et 400 mm. La pluviométrie la plus importante considérée comme exceptionnelle est celle relative à l'année 1969 qui a dépassé 740 mm. Pour la modélisation les deux stations pluviométriques Sidi Saad et Haffouz ont été choisies respectivement pour le bassin Sidi Saad et El Haouareb vu la qualité et la longueur des enregistrements (Tableau 1).



Tableau 1: Séries pluviométrique de station Sidi Saad et El Haouareb

Station	date	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Coefficient de variation
Sidi Saad	sept-1956/mai 2011	255	121	0,47
Haffouz	sept-1968/mai 2011	316	145	0,46

### 2.2.2 ÉVAPOTRANSPIRATION

Pour éviter les problèmes de collecte et de lacune des données, un modèle d'estimation de l'évapotranspiration potentielle proposé par Ludovic (2004) est choisi ici. C'est la méthode la plus simple à utiliser et ne demande que la température et l'altitude. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été estimée alors par ce modèle à partir des données de températures de la station de Kairouan.

### 2.2.3 DÉBITS

Aucune station à l'entrée directe de deux barrages El Haouareb et Sidi Saad. Ceci nous amène à estimer les apports en se basant sur le bilan hydrique des retenues. L'apport mensuel obtenu est en m<sup>3</sup>/mois, il faut alors le rapporter à la surface totale du bassin versant pour le transformer en mm/mois. On dispose alors de 31 et 36 années des apports observés respectivement pour le barrage El Haouareb et Sidi Saad (Tableau 2).

Tableau 2: Caractéristiques des séries des apports aux barrages sidi Saad et El Haouareb

	Date	Moyenne (Mm3)	Max (Mm3)	Min (Mm3)	Ecart-type	Coefficient de variation
El Haouareb	janvier 1986/ décembre 2010	3	481	0	29,0	8,4
Sidi Saad	août 1989/ août 2012	5	178	0	13,1	2,6

## 2.3 COUPLAGE GR2M-GENERATEUR DE PLUIE

L'étude des séries pluviométriques historique enregistrées a montré que la pluie mensuelle est très aléatoire ce qui nous a amené à développer une nouvelle méthodologie pour générer une série de pluie mensuelle. Dans l'article publié par Mouelhi et al (2016) [15] une explication très détaillée de la démarche de cette méthode qui est basée essentiellement sur la chaîne de Markov. Une série de pluie mensuelle générée sur 100 ans est obtenue pour chaque station et qui vont être utilisés comme entrées pour le modèle Pluie-débit pour générer des chroniques des apports futurs aux barrages qui vont servir par la suite dans la simulation de la gestion future des barrages.

Ardion (2004) [16] a montré qu'il est difficile de prévoir l'évolution des paramètres X1 et X2 d'un modèle GR2M et pour la simulation future on a supposé que les paramètres ayant servi au calage et à la validation des modèles GR2M sur la période observée resteront les mêmes. Pour constituer une série de l'évapotranspiration potentielle future on a transposé toute la série enregistrée dans l'historique sur la période future jusqu'à obtenir une série de 100 années puisque Oudin (2004) [17] a montré que le modèle est peu sensible à l'ETP.

## 2.4 SCÉNARIOS DE GESTION DE BARRAGE

Nous tentons dans cette étude de répondre à la question Est-ce que c'est possible de concilier entre le transfert et les autres objectifs assignés aux barrages ? en utilisant les résultats du couplage du modèle GR2M avec les pluies générées et tout en imaginant des scénarios futurs de gestion pour estimer le volume d'eau transférable. Chaque scénario simulé vise à satisfaire un objectif de gestion dans l'immédiat ou à préserver le stock nécessaire dans la retenue. Pour la simulation future deux scénarios ont été simulés pour estimer le volume mensuel soutiré de deux barrages. Dans le premier les sorties mensuelles sont estimées par des volumes moyens avec le volume de recharge de nappe et le deuxième scénario sans recharge. Le tableau 3 résume les volumes mensuels sortis des deux scénarios pour les deux barrages. Et puisque les deux barrages se trouvent dans une zone semi-aride où la variabilité d'apports est très forte, d'où la nécessité de prendre en considération dans les scénarios de gestion les risques de sécheresse et de l'inondation par un volume d'eau minimale à conserver dans la retenue pour la satisfaction future dans une période définie. Pour le volume de sécurité deux scénarios ont

été considérés. **Scénario 1** ; Dans ce scénario le volume à conserver pour l'irrigation est le volume moyen jusqu'à la mobilisé depuis le début effectif de l'irrigation. Ce volume égal à 4,2Mm<sup>3</sup>/an pour le barrage d'El Haouareb et 24Mm<sup>3</sup>/an pour le barrage de Sidi Saad. Les pertes aussi ont été calculées par la moyenne des pertes annuelles depuis la mise en eau. La sécurité est assurée ou bien pour une année (Tableau 4) ; **Scénario 2** : Dans ce scénario la réserve satisfait la sécurité moyenne d'irrigation et la recharge moyenne mobilisée jusqu'à la depuis la mise en eau (Tableau 5). A la fin quatre mode de gestion vont être appliqués pour chaque barrage deux pour les sorties mensuelles et deux pour le volume de sécurité

**Tableau 3: Sorties mensuelles moyennes de deux barrages Sidi Saad et El Haouareb**

		Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	juin	juillet	août
Scénario moyen El Haouareb	évaporation	0,40	0,31	0,22	0,18	0,15	0,19	0,31	0,31	0,54	0,60	0,68	0,60
	Irrigation	0,22	0,24	0,20	0,29	0,26	0,26	0,44	0,39	0,22	0,38	0,43	0,22
	recharge	0,20	0,63	0,05	0,36	0,13	0,27	0,00	0,94	0,39	0,00	0,00	0,01
	fuite	0,09	0,18	0,01	0,04	0,02	0,06	0,00	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00
	somme avec recharge	0,90	1,35	0,47	0,87	0,56	0,78	0,74	1,78	1,28	0,98	1,11	0,82
	somme sans recharge	0,70	0,72	0,42	0,50	0,43	0,52	0,74	0,84	0,89	0,97	1,11	0,82
Scénario moyen Sidi Saad	Evaporation	1,56	1,02	0,69	0,47	0,42	0,55	0,88	1,19	1,66	2,25	2,73	2,31
	Irrigation	0,86	0,90	1,16	1,50	1,38	1,38	2,27	1,82	0,92	0,80	1,35	1,26
	recharge	1,51	1,80	1,88	1,95	2,79	0,71	1,67	0,95	3,58	1,50	1,47	1,69
	fuite	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	somme avec recharge	3,95	3,74	3,75	3,94	4,61	2,66	4,84	3,98	6,18	4,56	5,57	5,28
	somme sans recharge	2,44	1,94	1,87	1,99	1,82	1,95	3,17	3,03	2,60	3,06	4,10	3,59

**Tableau 4: Volume de sécurité moyenne sans recharge : Scénario 1**

Volume annuel (Mm3)	fuite	Evaporation	pertes totales	irrigation	recharge	volume de sécurité (1 ans)
El Haouareb	10,9	4,6	15,5	4,2	0	35,2
Sidi Saad	0,2	15,7	15,9	24	0	55,9

**Tableau 5: Volume de sécurité moyenne avec recharge : scénarios 2**

Volume annuel (Mm3)	fuite	Evaporation	pertes totales	irrigation	recharge	volume de sécurité d'une année
El Haouareb	10,9	4,6	15,5	4,2	2,97	38,17
Sidi Saad	0,2	15,7	15,9	24	21,51	77,31

En appliquant l'équation du bilan à chacune des retenues le modèle regarde mois par mois selon les sorties mensuelles et le volume à conserver la quantité d'eau disponible qui peut être transférée. Connaissant le volume à stocker minimale au début de mois j, on va calculer le volume transférable maximal durant le mois j sachant que le volume à la fin de mois V(j) ne se baisse pas au-dessous de volume minimal à satisfaire.

L'équation de bilan :

$$V_T(j) = V_f(j-1) + V_A(j) - V_S(j) - V_R$$

Avec :

$V_T(j)$  = volume transférable du mois j

$V_f(j-1)$  = Volume à la fin de mois j-1

$V_A(j)$  = volume de l'apport au barrage pendant le mois j

$V_s(j)$ = Volume des sorties pour satisfaire les besoins de ce mois j

$V_R$ = Volume à stocké pour la satisfaction des besoins d'une période définie

### 3 RÉSULTATS DISCUSSIONS

#### 3.1 CALAGE DU MODEL GR2M

Le modèle pluie-débit conceptuel globale GR2M (Mouelhi, 2006) a été appliqué pour modéliser les apports des deux barrages *sidi Saad* et *El Haouareb*. Pour le calage la méthode calage/validation a été appliquée: séparation de la période disponible (Janvier 1990à Mars 2011) en deux sous-périodes indépendantes : calage du modèle sur la première période et test de simulation sur la seconde. Le critère cible servant à juger la fiabilité du modèle dans cette étude, n'est pas seulement le critère de Nash calculé sur les débits (Nash (Q)) mais aussi le critère de Nash calculé sur les logarithmiques des débits (Nash (ln(Q))) qui juge la simulation des faibles débits et le bilan global.

Pour le barrage d'El Haouareb le tableau 6 et la figure 10 montrent que le calage du modèle est satisfaisant avec un critère du Nash égal à 77,54%. Il diminue et atteint pour devenir 56,86 % dans la validation. Pour le barrage sidi Saad la méthode de calage/validation n'a pas donné des résultats satisfaisants sur toute la période depuis la mise en eau à cause de la forte variabilité de la pluie et la crue exceptionnelle de l'année 1990, ceci signifie que les faibles apports sont mal reconstitués. On a trouvé qu'il vaut mieux commencer à partir de l'année 1991 pour éliminer la forte variabilité des apports et juger la simulation par le critère Nash (ln(Q)) (Figure 11 et tableau 7).

Tableau 6: Paramètres de calage et validation du modèle GR2M : barrage El Haouareb

	Période de mise en route (mois)	Date de départ	Date de fin	$X_1$	$X_2$	Nash(Q)	Nash (vQ)	Nash (ln(Q))	Bilan
calage	24	01/01/1992	01/08/2001	2,07	0,24	77,54	71,54	55,12	95,14
validation	0	01/09/2001	01/03/2011	2,01	0,24	56,02	53,86	33,91	80,49

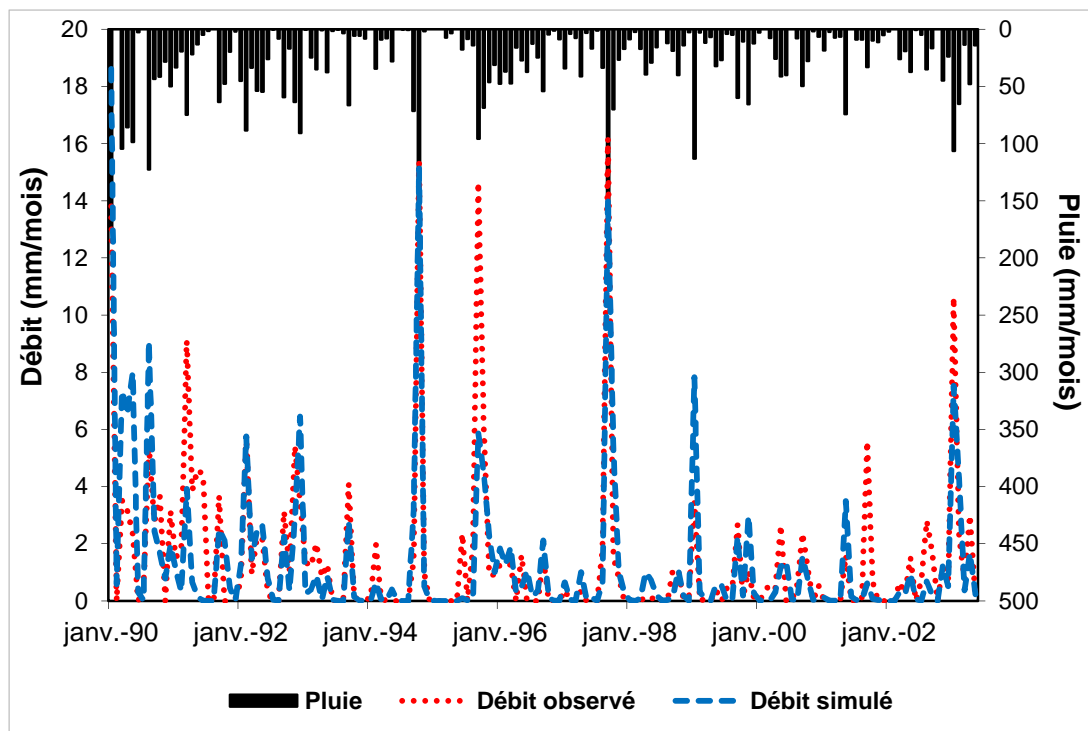


Figure 10: Débit observé et simulé par GR2M du barrage El Haouareb

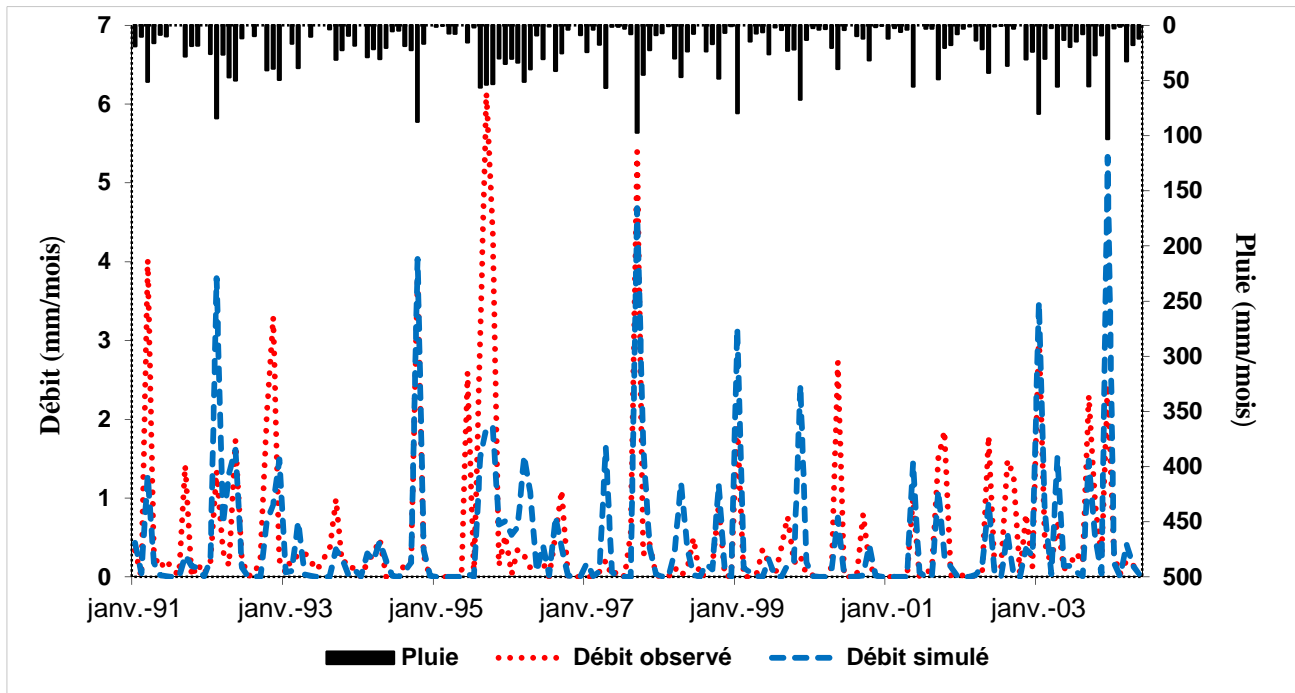


Figure 11: Débit observé et simulé par GR2M au niveau du barrage Sidi Saad

Tableau 7: Paramètres de calage et validation du modèle GR2M : Barrage Sidi Saad

	Période de mise en route (mois)	Date de départ	Date de fin	$X_1$	$X_2$	Nash (Q)	Nash(VQ)	Nash (ln(Q))	Bilan
Calage	36	01/01/1994	01/05/2002	2,22	0,22	51,2	52,1	47,5	88,3
Validation	0	01/06/2002	01/12/2010	2,22	0,22	-27,3	36,6	26,6	107

### 3.2 COUPLAGE : GÉNÉRATION DES APPORTS

Pour chaque barrage les séries des pluies générées sont utilisées comme entrées du modèle GR2M pour la simulation future, les paramètres  $X_1$  et  $X_2$  ont été maintenus constante. Les débits générés ont été comparés aux débits observés et aux débits reconstitués par le modèle dans la phase de simulation lors du calage.

Le tableau 8 montre que la moyenne des apports générés est de  $0,9 \text{ Mm}^3$  qui est faiblement inférieur à la moyenne observée et reconstituée. L'écart type des apports observés est plus élevé que les autres mais pour toutes les autres caractéristiques statistiques les valeurs sont très proches. Pour le barrage de Sidi Saad toutes les caractéristiques statistiques sont très proches mais on remarque que les apports générés sont plus proches aux apports reconstitués par le modèle GR2M comme il est clair dans le tableau 9.

Tableau 8: Comparaison des apports générés, observés et reconstitués par le model GR2M du Barrage El Haouareb

	Apports générés 2010-2106	Apports observés 1990-2010	Apports reconstitués (GR2M) 1990-2010
Moyenne	0,9	1,7	1,5
Coefficient d'asymétrie	5,3	3,8	3,8
Ecart-type	1,8	3,4	3,0
Médiane	0,2	0,5	0,3
1 quartile	0,0	0,0	0,0
Min	0,0	0,0	0,0
3iem quartile	0,8	1,8	1,4
Max	22,2	23,2	21,7
Coefficient de variation	2,1	1,9	2,0

Tableau 9: Comparaison des apports générés, observés et reconstitués par le model GR2M du Barrage Sidi Saad

	Apports générés 2010-2086	Apports observés 1986-2010	Apports reconstitués (GR2M) 1986-2010
Moyenne	4,46	4,11	3,32
Ecart-type	8,45	8,90	8,57
Coefficient d'asymétrie	3,45	4,23	4,70
Coefficient de variation	1,90	2,16	2,58
1 er quartile	0,21	0,07	0,03
2 ième quartile	4,21	3,56	2,36
Maximum	59,14	76,10	77,55
Minimum	0,00	0,00	0,00

### 3.3 SIMULATION DE REMPLISSAGE

Les graphiques 12 et 13 illustrent les volumes à la fin du mois pour chaque scénario des sorties mensuelles. Le scénario des sorties moyennes sans recharge est le plus optimiste et le volume dans le barrage restera plus grand que les deux volumes de sécurité. Pour le scénario des sorties moyennes avec recharge la fréquence de dépassement de volume de sécurité 36Mm<sup>3</sup> est très faible.

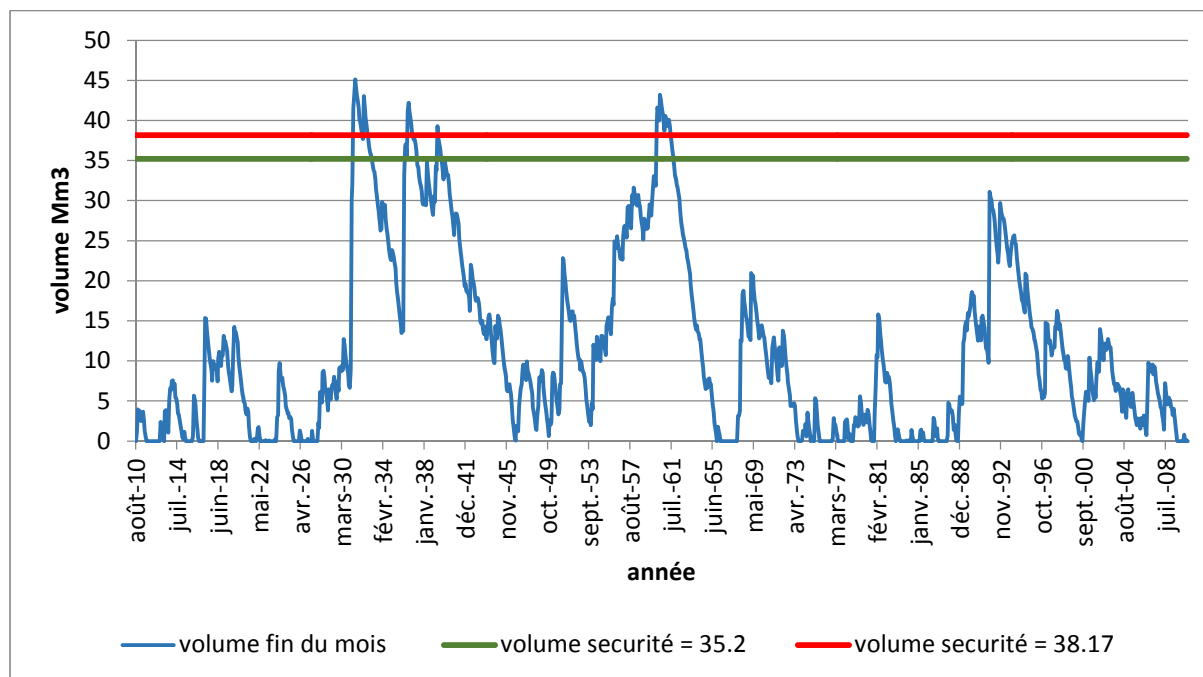


Figure 12: Scénario des sorties mensuelles moyennes avec recharge : Barrage El Houareb

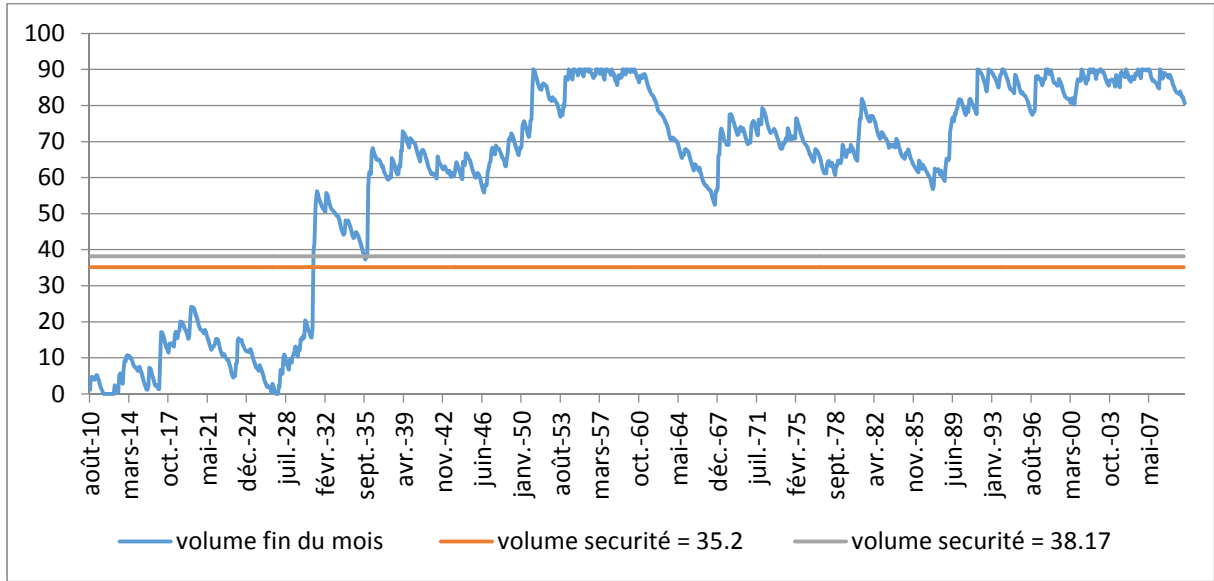


Figure 13: Scénario des sorties mensuelles moyennes sans recharge : Barrage El Haouareb

Les figures 14 et 15 montrent le volume à la fin du mois après la simulation de remplissage du barrage sidi Saad. Le scénario de sorties mensuelles moyennes sans recharge (Figure 15) est le plus optimiste où le volume est supérieur à tous les volumes de sécurité d’où la possibilité de transférer l’eau est très grande.

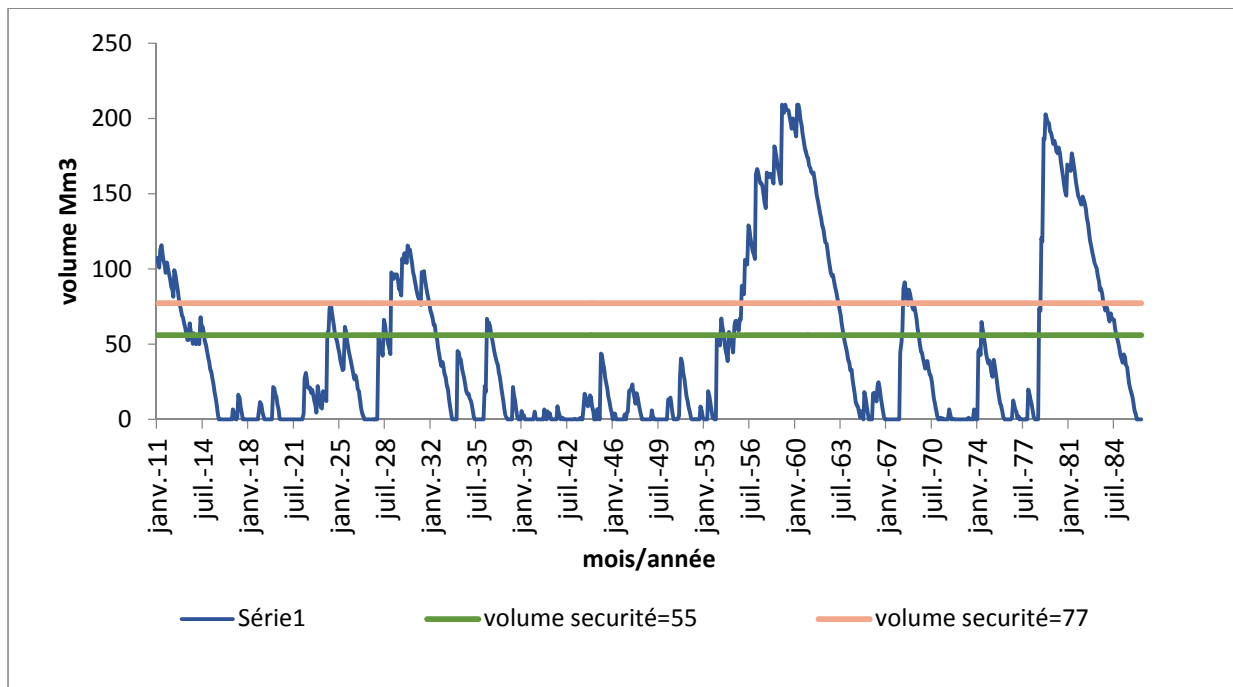


Figure 14: Scénario des sorties mensuelles moyennes avec recharge : Barrage Sidi saad

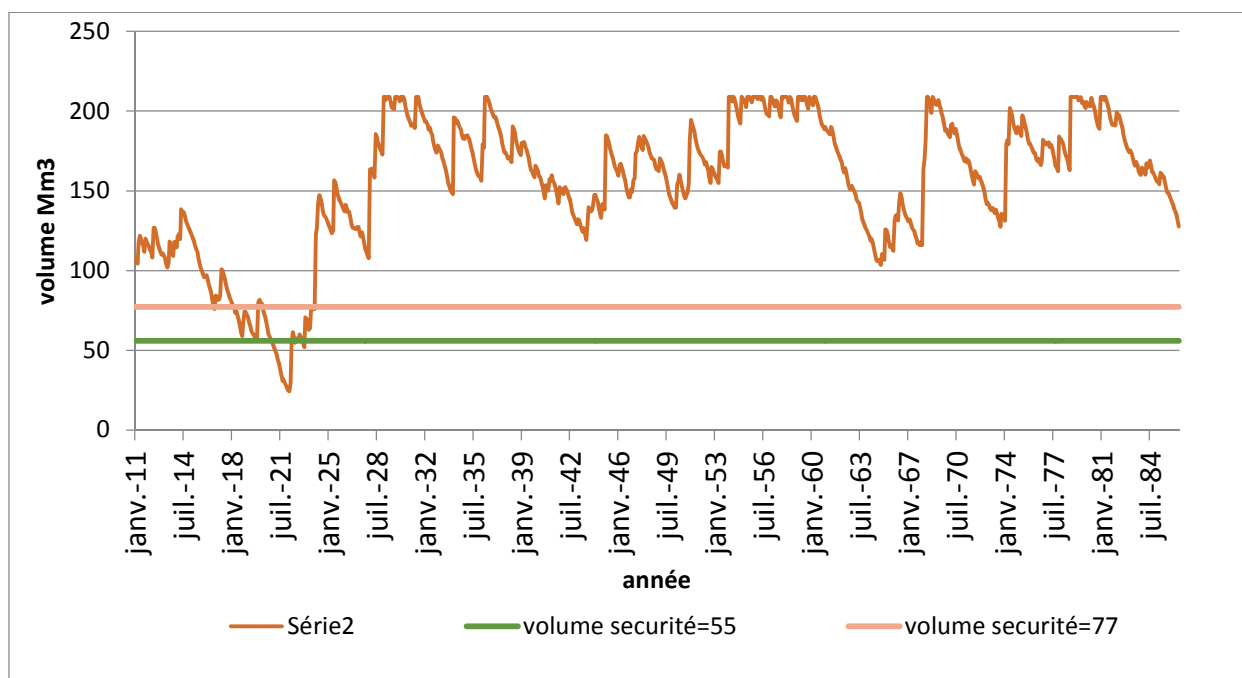


Figure 15: Scénario des sorties mensuelles moyennes sans recharge : Barrage Sidi saad

Pour le scénario des sorties moyennes avec recharge (Figure 15) la fréquence de dépassement est moyenne pour le faibles seuil ( $55\text{Mm}^3$ ) et faible pour les grands seuils ( $77\text{Mm}^3$ ).

#### 4 CONCLUSION

Une étude des bilans annuels et mensuels des deux barrages Sidi Saad et El Haouareb a été effectuée afin d'acquérir une idée sur l'historique de remplissage et les volumes disponibles dans les barrages tout au long de l'année. Dans le but de reconstituer une série des apports futurs aux barrages au pas de temps mensuel, un couplage entre un générateur de pluie et un modèle pluie débit a été effectué. Les apports générés par le couplage sont utilisés dans la simulation de remplissage de deux barrages Sidi Saad et El Haouareb. Des scénarios ont été développés pour estimer l'évolution des sorties mensuelles et le volume de sécurité à laisser dans le barrage avant tout transfert envisageable. En appliquant l'équation du bilan il s'avérait que le scénario le plus optimiste pour le transfert et celui des sorties mensuelles moyennes sans recharge pour les deux barrages. Des études ultérieures ont montré que le niveau de la nappe du Kairouan est en chute continue depuis la mise en eau des deux barrages qui ont limité la recharge naturelle par l'écoulement des oueds. Ces études ont montré aussi qu'une recharge artificielle est possible à travers la nappe phréatique de la plaine de Kairouan dans des zones bien précises. Une valorisation de volume d'eau disponible dans les deux barrages après la satisfaction des besoins par la recharge de la nappe du Kairouan sera plus facile à mettre en œuvre qu'un transfert entre deux barrages d'une même région où le risque de sécheresse peut affecter en même temps les deux bassins.

#### REFERENCES

- [1] Bouzaiane S. et Lafforgue A., (1986). Monographie des oueds Zeroud et Merguellil. Tunis ORSTOM/DGRE.
- [2] Ben Ammar S., (2007). Contribution à l'étude hydrogéologique, géochimique et isotopique des aquifères de Ain el Beidha et du bassin du merguellil (plaine de Kairouan) : implications pour l'étude de la relation barrage-nappes. Thèse de doctorat Université de Sfax Faculté des sciences, Sfax : 226 p.
- [3] Nazoumou Y., (2004). Rapport technique : analyse du réservoir aquifère de la plaine de Kairouan. Tunis IRD/DGRE
- [4] Nazoumou Y. and Besbes M. (2001). Estimation de la recharge et modélisation de nappe en zone aride : cas de la nappe de Kairouan. Impact of Human Activity on Ground water Dynamics Maastricht, Netherlands.
- [5] Nazoumou Y., (2002). Impact des barrages sur la recharge des nappes en zones aride : étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse de doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis : 251 p.

- [6] Chaieb H., (1988). Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques de la plaine de Kairouan. Mémoire de DEA, Faculté des sciences Tunis : 77 p.
- [7] Garreta P., et Ouerghemmi A., (1998). Note sur l'envasement du barrage d'el Haouareb : Résultats des nivellements de 1998 et mise à jour de la bathymétrie de la retenue d'El Haouareb, Evaluation des apports en sédiments. Tunis, ORSTOM&DG/ETH.
- [8] Ben Mammou A. et Louati M. H., (2007). Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. Revue des sciences de l'eau 20(2), 201-210.
- [9] Ben Mammou A., (1995). Quantification, identification et propriétés physiques des sédiments de la retenue du barrage sidi Saad (centre de la Tunisie). Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'ingénieur Paris.
- [10] Makhoulouf Z., (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat Université Paris-Sud, Cemagref : 413 p.
- [11] 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, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Cemagref&INGREF Paris : 323 p.
- [12] Mouelhi S., Madani K., et al., (2013). A Structural Overview through GR(s) Models Characteristics for Better Yearly Runoff Simulation Open Journal of Modern Hydrology 3, 179-187.
- [13] Mouelhi S., Michel C., et al., (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of Hydrology 318(1-4), 200-214.
- [14] Perrin C., (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble Cemagref Antony 291 p.
- [15] Mouelhi, S. , Nemri, S. , Sihem, J. and Mohamed, S. (2016) Using the Markov Chain for the Generation of Monthly Rainfall Series in a Semi-Arid Zone. Open Journal of Modern Hydrology, 6, 51-65.
- [16] Ardoin S., (2004). Variabilité hydro climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, université Montpellier II, Montpellier : 440 p.
- [17] Oudin L., (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Cemagref&INGREF Paris : 495 p.