

## **MODELISATION CONCEPTUELLE GLOBALE DE LA RELATION PLUIE DEBIT**

**Eric SERVAT, Alain DEZETTER,**

### **I RESUME**

Les auteurs présentent ici une version "opérationnelle" de deux modèles globaux conceptuels et déterministes de relation pluie-débit: CREC et MODGLO. L'objectif visé était de fournir de véritables outils aux aménageurs et aux gestionnaires de projets. Les concepts utilisés dans les deux logiciels concernés sont décrits d'un point de vue théorique. La structure informatique de ces modèles, adaptés sur micro-ordinateur, est ensuite détaillée. On présente des exemples de procédure de saisie et de sortie de résultats. Ceux-ci sont fournis aux pas de temps décennaires, mensuels et/ou annuels sous la forme de tableaux et de graphiques permettant la comparaison des lames écoulées calculées et observées. Les applications présentées concernent un bassin versant tunisien et deux bassins burkinabés.

## II OBJECTIFS

L'accroissement des moyens de calcul mis à la disposition des hydrologues a permis un développement important de la modélisation hydrologique durant ces vingt dernières années. Celle-ci a des objectifs variés allant de la prévision de crue à la génération de chroniques de données en passant, entre autres, par la simulation du fonctionnement de systèmes d'eau ou la prédétermination de valeurs atteintes par quelques variables communément mesurées.

Concernant le domaine particulier de la relation pluie-débit, de très nombreux modèles ont vu le jour durant cette période. Cependant le bilan réel de leur exploitation n'est que rarement effectué et leur utilisation par une autre personne que leur concepteur s'avère généralement très délicate, parfois même impossible. Comparé au foisonnement des modèles, le maigre bilan tiré en matière d'utilisation "opérationnelle" de ces modèles vient donc renforcer le contexte général de scepticisme à l'égard de l'évolution actuelle et des performances de la modélisation hydrologique. (Klemes, 1986, Kundzewic, 1986, Beven, 1987)

Avant de se lancer dans tout nouveau développement, il nous a donc paru important d'arriver à une meilleure utilisation des modèles actuellement disponibles. Il faut pour cela leur assigner des objectifs qui soient réellement en rapport avec ce que ces algorithmes sont en mesure de réaliser. Cette démarche est certainement moins ambitieuse mais plus réaliste que celle qui consiste à affirmer l'"universalité" d'un concept élaboré dans un cas particulier.

L'objectif qui était le nôtre était de fournir aux gestionnaires de projets et aux aménageurs de véritables outils, c'est à dire des logiciels utilisables par des non spécialistes tant en Hydrologie qu'en Informatique.

A cette fin, ils doivent répondre à plusieurs conditions:

- être de mise en oeuvre rapide et pouvoir fonctionner sur micro-ordinateur,
- se montrer d'une utilisation particulièrement conviviale,
- pouvoir utiliser des données de réseaux,
- apporter des réponses utiles et adaptées aux problèmes traités (par exemple des évaluations d'apports à des pas de temps décennaux ou mensuels dans le cas de projets à vocation agricole).

Parmi les différents modèles globaux conceptuels déterministes qui étaient à notre disposition, nous en avons retenu deux (les modèles CREC et MODGLO) sur lesquels faire porter nos efforts de manière à satisfaire les contraintes énoncées plus haut. Cela a entraîné un important travail informatique indispensable à leur réorganisation, leur simplification, leur standardisation et leur adaptation sur micro-ordinateur.

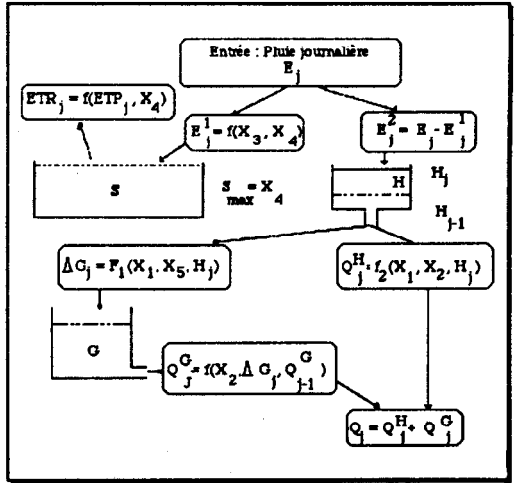
### **III. LES MODELES CREC ET MODGLO**

#### **III.1 LE MODELE CREC**

CREC est un modèle mis au point au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université des Sciences de Montpellier au début des années 1970. C'est un modèle conceptuel global (obéissant à un schéma de type à réservoir) appliqué de nombreuses fois, dans des conditions de bassins versants très variées (mais en zone climatique tempérée), et qui a montré une grande capacité d'adaptation. (Guilbot, 1986).

La version de CREC décrite ici est une version à cinq paramètres (X1, X2, ..., X5) (Combes, 1985). Il existe des versions à sept et onze paramètres permettant son application à des conditions hydrologiques particulières.

Classiquement, entre le sol recevant la pluie et l'exutoire du bassin, on définit une fonction de production et une fonction de transfert. La fonction de production tient compte de l'état d'humidité du sol par le biais du taux de remplissage d'un réservoir alimentant l'évapotranspiration et fournit la fraction de l'eau précipitée devant participer à l'écoulement. La fonction de transfert comprend un écoulement rapide et un écoulement lent à décroissance exponentielle. La figure 1 présente le schéma conceptuel du modèle CREC.



**Figure 1 :** Schéma conceptuel - Modèle CREC

**III.1.a La fonction de production**

La fonction de production effectue un prélèvement sur la lame précipitée qui permet de respecter le caractère conservatif du système. Son élément principal est l'évapotranspiration, mais elle peut prendre en compte des éléments différents du type fuites hors du bassin ou biais systématiques dans les évaluations des lames précipitées.

Cette fonction de production est, en fait, représentée par un réservoir en cul de sac, S, soumis à un contrôle amont (fonction de partage de la pluie) et à une sortie aval modulée sur l'ETP et qui génère une ETR (qui n'a sans doute de réelle que le nom). (cf. figure 1)

**III.1.b La fonction de transfert**

Dans le modèle CREC, la fonction de transfert est constituée d'un ensemble de deux réservoirs (H et G) à la fois en série et en parallèle grâce à la double sortie du réservoir H. (cf. figure 1).

Le réservoir H intervient à deux niveaux:

- laminage des débits permettant de rendre continue la réponse à une alimentation discontinue,

- répartition entre débit à décroissance rapide et débit à décroissance lente. Le transfert rapide se fait directement, alors que le transfert lent est régularisé par le biais d'un tarissement exponentiel (c'est le rôle du réservoir G).

### **III.1.c La détermination des paramètres**

Dans le cas particulier du modèle CREC, la détermination des valeurs des paramètres s'effectue automatiquement à l'aide d'une procédure d'optimisation non linéaire minimisant un critère d'écart entre débits observés et calculés. Le processus d'optimisation choisi ici est la méthode de Rosenbrock (1960) (Servat et Dezetter (1988)), méthode séquentielle permettant à la fois:

- de déterminer la longueur du pas de recherche,
- de déterminer la direction de ce pas,
- de tenir compte de contraintes imposées concernant les valeurs des paramètres.

## **III.2 LE MODELE MODGLO**

Conçu à l'ORSTOM en 1974 par G. Girard, MODGLO est lui aussi un modèle conceptuel global au pas de temps journalier.

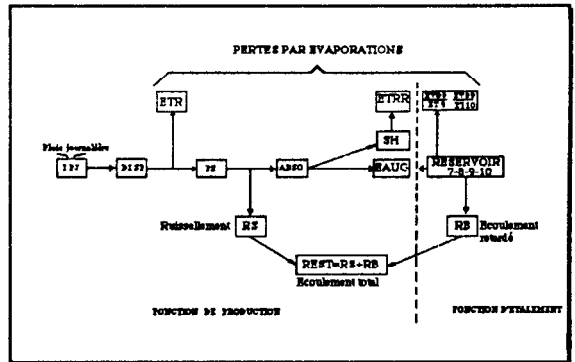
Utilisant des fonctions de production et de transfert individualisées, le modèle effectue à chaque pas de temps une série d'opérations qui conditionne le devenir de l'eau précipitée. Si l'algorithme fait appel à certains mécanismes physiques de la transformation pluie-débit (capacité de rétention, infiltration), on y adjoint cependant de nombreuses hypothèses simplificatrices. (Servat, 1986, Dezetter, 1987).

### **III.2.a La fonction de production**

La fonction de production est organisée autour d'un réservoir "sol" caractérisé par une capacité de rétention en eau définie par deux paramètres: CRT qui est la valeur moyenne sur le bassin versant et DCRT qui permet d'introduire une hétérogénéité de la rétention en eau des sols. (Servat, 1986). C'est au niveau de cette fonction de production qu'est réalisée une première série d'opérations déterminant la répartition des volumes mis en jeu (cf. figure 2):

**Figure 2** : Schéma conceptuel -  
Modèle MODGLO

- calcul de la pluie moyenne sur le bassin (DISP),
- calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière (ES),
- calcul de la pluie au sol pouvant générer de l'écoulement (PS),
- calcul du ruissellement pur éventuel (RS),
- calcul de l'eau livrée à l'écoulement retardé (EAUG)
- calcul du niveau d'eau dans le réservoir sol (SH).



### III.2.b La fonction de transfert

La fonction de transfert ne concerne que le terme EAUG, distribué dans quatre réservoirs. Ce sont la charge et les coefficients de débits de chacun des réservoirs qui vont déterminer la modulation de l'écoulement dans le temps. L'écoulement total au cours du pas de temps est alors la somme du ruissellement RS et de cet écoulement retardé RB.

### III.2.c La détermination des paramètres

Contrairement au modèle CREC, élaboré avec le souci d'un calage automatique des paramètres au moyen d'une technique d'optimisation, MODGLO n'admettait initialement qu'un calage classique par une méthode du type "essais-erreurs". Il existe maintenant une version de ce modèle couplée avec une méthode d'optimisation (au choix: méthode de Rosenbrock (1960) ou méthode de Nelder et Mead (1964) (Servat et Dezetter, 1988)). Néanmoins, les nombreux paramètres définis à l'origine ne sont pas tous indépendants les uns des autres ce qui ne favorise pas leur optimisation à l'aide d'une procédure automatique. C'est pourquoi, actuellement, les meilleurs résultats sont obtenus par un calage "manuel" de la fonction de production et une optimisation des paramètres de transfert.

## IV. STRUCTURE INFORMATIQUE DES LOGICIELS

Les travaux entrepris autour de ces modèles avaient pour principal objectif de les rendre "opérationnels". Nous souhaitons en faire de véritables outils utilisables par des gestionnaires de projets ou des aménageurs. Cette démarche s'inscrit dans un cadre plus général de constitution d'un "système modélisateur" comprenant logiciels et bibliothèque de pro-

cédures. Cela a nécessité un important travail informatique car il a fallu standardiser et adapter les structures de chacun des logiciels étudiés. On a développé une organisation modulaire des algorithmes et repris la programmation proprement dite de façon à les utiliser sur micro-ordinateur (pour accroître leur "portabilité").

La structure actuelle de ces logiciels, une organisation de type modulaire, est présentée en figure 3. On y distingue trois modules au sens large: Entrées, Calculs, Sorties. L'articulation, ou interface, entre les différents niveaux peut être définie par un état de la mémoire vive au moment du passage entre ces niveaux.

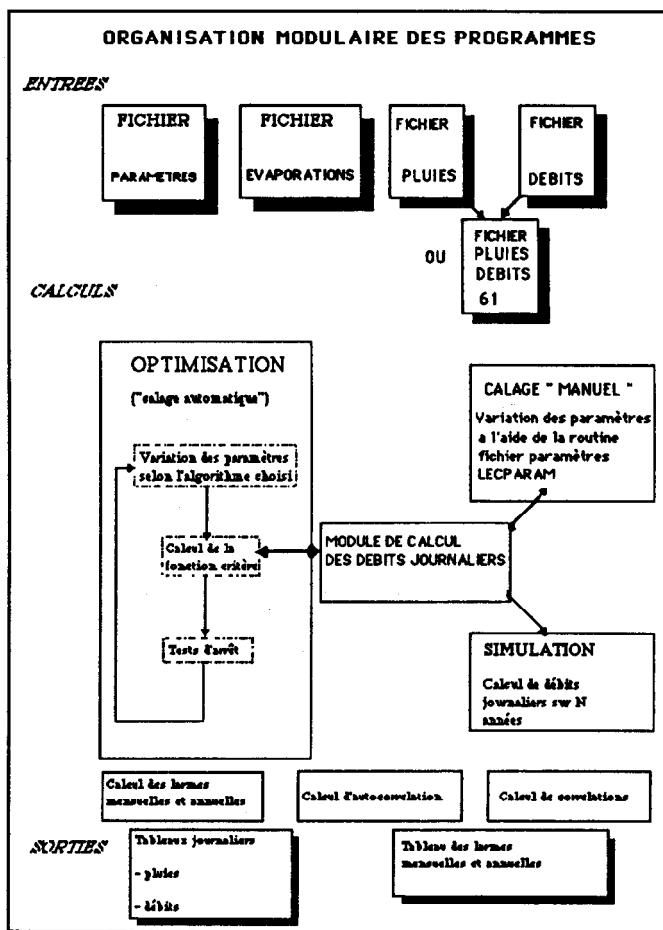


Figure 3

**Tableau 1 : Procédure de saisie des paramètres - MODGLO**

PARAMETRES DE CALAGE DU MODELE	
Surface du bassin versant km <sup>2</sup>	SURFBV : 13 900
Coefficient de passage pluie brute-pluie au sol CPJ	: 1 000
Hétérogénéité des pluies sur le BV (BB)	: 0 420
Paramètres de l'infiltration XIN	: 8 500 AXIN : 0 270
Hétérogénéité AA	: 0 400
Hauteur d'eau dans le réservoir sol au départ SH	: 80 000
Capacité de rétention en eau du sol CRT	: 150 000
Hétérogénéité DCRT	: 50 000
Coefficient de pondération de l'évaporation mesurée (EVAS) CET	: 1 000
PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT	
Coefficients de répartition de EAUG dans le réservoir	
CG7	: 0 300 CG9 : 0 350 CG10 : 0 350
Coefficients de débit des réservoir d'étalement	
COEFG7	: 0 250 COEFG8 : 0 590 COEFG9 : 0 460 COEFG10 : 0 590
Coefficients de reprise de l'évaporation réservoir 9 et 10	
ET9	: 1000 000 ET10 : 1000 000
Niveau d'eau dans les réservoirs d'étalement au départ	
SH7	: 0 000 SH8 : 0 000 SH9 : 0 000 SH10 : 0 000
Voulez-vous corriger un ou plusieurs de ces paramètres ? O/N	

**Tableau 2 : Exemple de sortie des résultats - MODGLO**

EDITION DES PARAMETRES DU MODELE MODGLO																																													
SURFBV	: 13.900	ET9	: 1000.000	CG7	: 0.300	BB	: 0.420	SH7	: 0.000	CG10	: 0.350	AXIN	: 0.270	SH9	: 0.000	COEFG8	: 0.590	SH	: 80.000	CET	: 1.000	COEFG10	: 0.590	DCRT	: 50.000	CPJ	: 1.000	ET10	: 1000.000	CG9	: 0.350	XIN	: 8.500	SH8	: 0.000	COEFG7	: 0.250	:AA	: 0.400	SH10	: 0.000	COEFG9	: 0.460	CRT	: 150.000
TABLEAU DES LAMES MENSUELS ET ANNUELLES																																													
ANNEE : 1975																																													
STATION : OUED SIDI BEN NACEUR																																													
Unités : mm																																													
LAME	Janv.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc	TAN																																
Pluie	61.0	174.7	96.6	19.0	54.1	0.9	0.0	48.9	5.2	110.03	11.3	66.3	948.0																																
E Obs	9.8	91.9	28.7	2.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	115.9	28.9	278.6																																
E Calc	10.3		70.2	23.5	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	129.1	31.5																																
	275.1																																												
EVAPORATIONS MOYENNES MENSUELLES JOURNALIERES EN mm/j																																													
	1.8	2.0	2.9	3.5	3.7	4.2	4.8	3.5	3.1	2.2		1.7																																	
Total pluie	: 948.00					Evaporation	: 628.50																																						
Pluie max jour	: 64.90					Ruissellement	: 89.21																																						
Lame maxi journ	: 30.91					Eau gravitaire	: 185.98																																						
Niveau maxi SH9	: 9.93					Ecoulement total	: 275.05																																						
VALEUR DES HAUTEURS D'EAU DANS LES RESERVOIRS A LA FIN DE L'ANNEE																																													
SH	: 143.360	SH7	: 0.042	SH8	: 0.063	SH9	: 0.152	SH10	: 0.018																																				



#### IV.1 LE MODULE ENTREES

Ce premier module a pour objectif de lire et de stocker en mémoire les données et les paramètres définissant un état de fonctionnement du modèle. Il comprend un fichier évaporation, un fichier pluie et un fichier débit (ou un fichier "pluie-débit" unique d'un type standard utilisé à l'ORSTOM), et un fichier paramètres. Ce dernier contient les paramètres du modèle (production, transfert) et les paramètres dits d'"environnement logiciel" (sortie ou non de tableaux, etc.); c'est le seul fichier spécifique du modèle. Les formats des fichiers d'évaporation, de pluie et de débit sont imposés. Par contre il a été développé une procédure permettant la création à l'écran du fichier des paramètres. Cette procédure peut être employée en phase de calage pour modifier les paramètres. L'utilisation de ces modèles est particulièrement commode et conviviale puisque l'opérateur est alors débarrassé de toute manipulation de fichiers. Le tableau 1 présente une copie d'écran de cette procédure de saisie et de constitution du fichier des paramètres dans le cas de MODGLO.

#### IV.2 LE MODULE CALCULS

Les différentes fonctions de ce module n'ont aucune interface directe avec l'utilisateur. Trois types de fonctionnement ont été distingués (calage "manuel", optimisation, simulation) qui ont conduit à deux types de programme pour chaque modèle: une version calage "manuel" et simulation d'une part, et une version optimisation d'autre part. Plusieurs points sont néanmoins communs aux deux versions:

- calcul des débits au pas de temps journalier. C'est le "coeur" du modèle, appelé à chaque pas de temps, et spécifique à chaque algorithme,
- calcul des lames décadaires, mensuelles et annuelles à partir d'un vecteur journalier,
- calcul d'autocorrélation sur un vecteur et de corrélation entre deux vecteurs.

Les techniques d'optimisation disponibles sont actuellement au nombre de deux (Rosenbrock ou Nelder et Mead (Servat et Dezetter , 1988)). Le choix de la fonction critère et du test d'arrêt de la procédure ne dépend que de l'utilisateur.

### IV.3 LE MODULE SORTIES

Les résultats, qui sortent sur écran ou sur imprimante (au choix de l'utilisateur), apparaissent sous la forme de tableaux de lames écoulées décennales, mensuelles et annuelles, calculées et observées. Ces tableaux donnent également aux mêmes pas de temps les valeurs des lames précipitées et d'un certain nombre de paramètres d'écoulement propres à chaque modèle (le tableau 2 est un exemple de sortie des résultats fournis par MODGLO). L'impression des tableaux journaliers de pluie et de débits observés et calculés est optionnelle. Un environnement graphique a été développé qui permet le tracé des séries chronologiques de débits observés et calculés à des pas de temps journaliers et décennales. Ces graphiques sont un élément d'appréciation supplémentaire important lors de la phase de calage.

## V. EXEMPLES D'UTILISATION

### V.1 PRÉSENTATION DES BASSINS VERSANTS

Nous présentons ici les essais réalisés sur trois bassins versants: un bassin tunisien (l'Oued Sidi Ben Naceur) et deux bassins burkinabés (le Kuo à Digouera et le Kuo à Badara).

#### V.1.a L'Oued Sidi Ben Naceur

Ce bassin versant présente une superficie de 13.9 km<sup>2</sup> et une pente moyenne de 4%. Le sol est argileux et recouvert d'un manteau de colluvion sablo-argileux. La végétation est constituée d'un taillis de lentisques bien conservé. Le climat est méditerranéen humide avec une pluie interannuelle de l'ordre de 850 mm, et une ETP évaluée, à partir de mesures sur bac, à environ 1170 mm. (Ibiza, 1985). La période étudiée s'étend de 1974 à 1977.

#### V.1.b Les bassins versants du Kuo

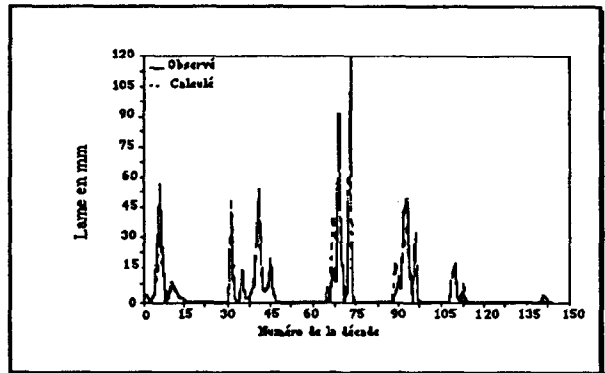
Ces deux bassins versants situés en climat sub-soudanien présentent une végétation de savane classique. Les sols sont généralement de type ferrugineux mais l'on rencontre aussi des sols d'apport colluvial peu évolués. Le Kuo à Badara (période étudiée: 1955 à 1957) offre une superficie de 971 km<sup>2</sup> et le Kuo à Digouera (période étudiée: 1981 à 1983) une superficie de 67.8 km<sup>2</sup>. Les pentes varient entre 2 et 4%. Ces deux bassins sont situés dans une zone où la pluie interannuelle est comprise entre 900 et 1200 mm. (Albergel, 1987).

## V.2 PRÉSENTATION DE QUELQUES RÉSULTATS

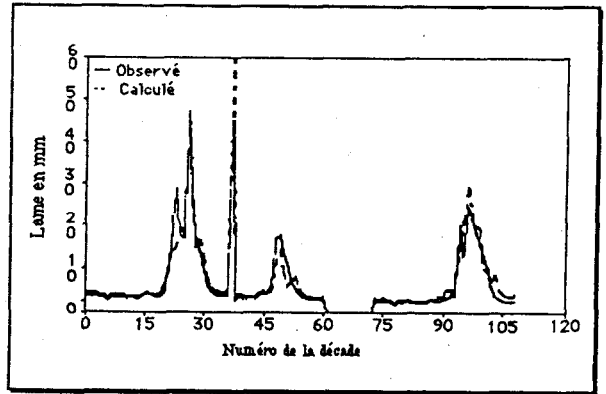
Les figures 4, 5 et 6 présentent les résultats obtenus au pas de temps décadaire avec l'un ou l'autre des modèles. Comme on peut le voir, il existe dans chacun des cas une bonne correspondance entre lames écoulées observées et calculées, et ce dans des conditions de fonctionnement de bassins versants pourtant assez différentes les unes des autres:

- superficie allant de 14 à 971 km<sup>2</sup>,
- zones climatiques différentes,
- hétérogénéité marquée des précipitations au sein même des périodes de temps considérées (exemple du bassin tunisien: total pluviométrique de 1976: 1017 mm, total pluviométrique de 1977: 445 mm),
- lames écoulées sur un même bassin pouvant varier d'un facteur 20 d'une année à l'autre. C'est, par exemple, le cas du Kuo à Digouera: lame écoulée en 1982: 52.3 mm (total pluviométrique 834.2 mm) et lame écoulée en 1983: 2.5 mm (total pluviométrique 678.6 mm).

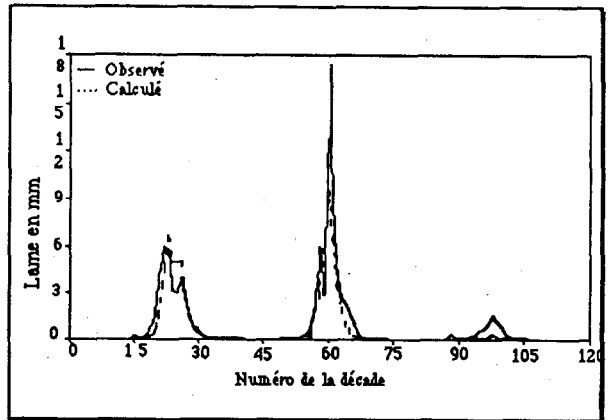
**Figure 4 :** Oued Sidi Ben Naceur Tunisie Modèle MODGLO - Années 1974 à 1977 Lames décennales observées et calculées



**Figure 5 :** La Kuo à Badara Burkina Faso Modèle MODGLO - Année 1955 à 1957 Lames décadaires observées et calculées

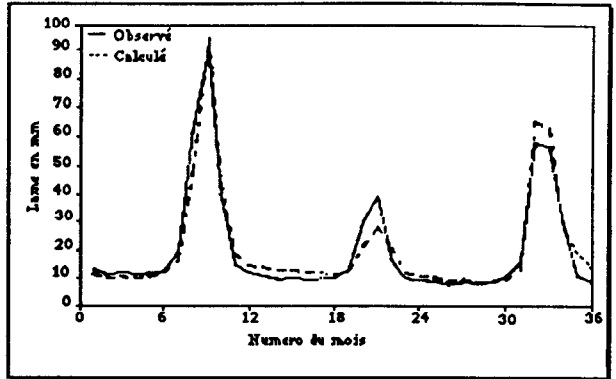


**Figure 6 :** Le Kuo à Digouera Burkina Faso Modèle CREC - Années 1981 à 1983 Lames décadaires observées et calculées



La figure 7 est un exemple de tracé au pas de temps mensuel. Il présente, lui aussi, un bon degré d'adéquation entre lames écoulées observées et calculées.

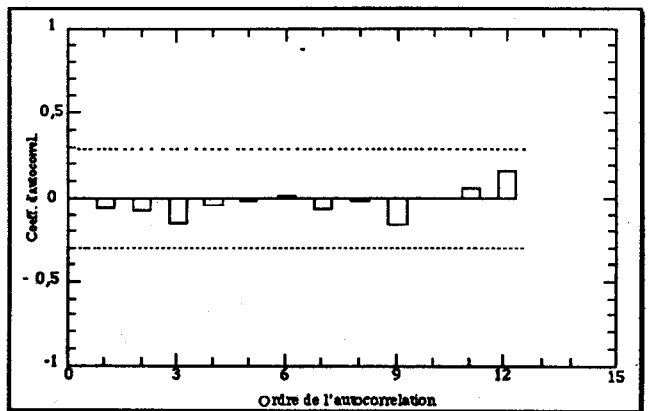
**Figure 7 :** Le Kuo à Badara Burkina Faso Modèles MODGLO - Années 1955 à 1957 Lames mensuelles observées et calculées



Les séries chronologiques de résidus (écarts "lames observées - lames calculées") peuvent également être étudiées à l'aide de plusieurs types de graphiques:

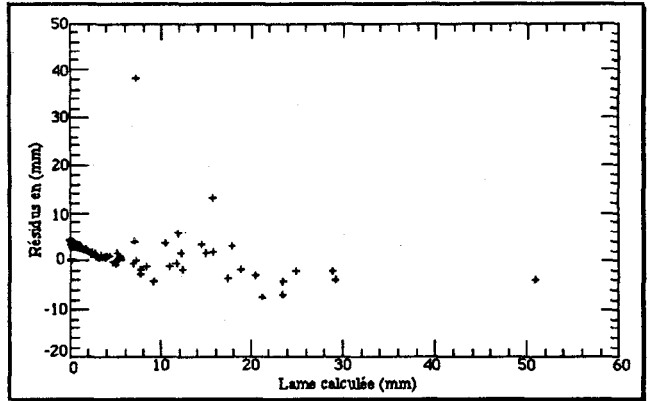
- le corrélogramme des résidus (exemple figure 8) qui présente les coefficients d'autocorrélation pour différents décalages de la série chronologique étudiée ainsi que l'intervalle de confiance à 95% de l'acceptation de l'hypothèse "autocorrélation des résidus nulle" (Kottegoda, 1980).

**Figure 8 :** Modèle MODGLO - Oued Sidi Ben Naceur Pas de temps mensuel - Corrélogramme de résidus



- le tracé "résidu = f(lame calculée)" (exemple figure 9) révélateur d'anomalies (Draper et Smith, 1981).

**Figure 9** : Modèle Crec - Le Kuo à Badara Pas de temps décadaire - Résidu = f (Lame calculée)



Dans le cas présent aucune anomalie particulière n'a été détectée et l'étude des différents corrélogrammes a permis de conclure à une absence d'autocorrélation des résidus pour l'ensemble des calages réalisés à différents pas de temps sur les bassins versants étudiés.

Ces différentes possibilités de sorties graphiques (lames observées et calculées aux pas de temps décadaires et mensuels, corrélogrammes des résidus et tracés de "résidus = f(lames calculées)") combinées aux tableaux de résultats présentés plus haut permettent à l'utilisateur de visualiser rapidement et précisément toute modification apportée à l'un ou l'autre des paramètres des modèles.

## VI CONCLUSIONS

Totalement restructurés en modules distincts et adaptés sur micro-ordinateur, les modèles globaux conceptuels déterministes présentés, CREC et MODGLO, sont d'une utilisation simple pour un non spécialiste tant en Hydrologie qu'en Informatique. Ils offrent en effet, actuellement, l'avantage d'une manipulation réduite des fichiers de données, une extrême simplicité des procédures de saisie et de constitution du fichier des paramètres, des possibilités de calages "manuels" ou automatiques et un environnement graphique très complet. Ils présentent aux pas de temps décadaires et mensuels un degré de précision des résultats tout à fait satisfaisant pour un aménageur ou un gestionnaire de projet à vocation agricole par exemple. Dans ces conditions ces algorithmes constituent donc deux outils opérationnels bien adaptés à l'évaluation des ressources en eau.

## VII BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), 1987 - Genèse et Prédétermination des Crues au Burkina Faso. Du m<sup>2</sup> au km<sup>2</sup>, Etude des Paramètres Hydrologiques et de leur Evolution. Thèse de Doctorat. Univ. Paris VI.

BEVEN (K.), 1987 - Towards a New Paradigm in Hydrology. AISH Publication 164

COMBES (V.), 1985 - Paramétrisation de Modèles Conceptuels d'un Bassin Versant. Contribution à l'Elaboration d'un Système de Mesure des Caractéristiques Hydrologiques d'un Bassin Versant. Application au Modèle CREC. Thèse Docteur-Ingénieur. USTL Montpellier.

DEZETTER (A.), 1987 - Modèle Global "ORSTOM 74". Analyse des Structures et du Fonctionnement en vue d'une Reformulation. DEA USTL Montpellier.

DRAPER (N.R.), SMITH (H), 1981 - Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons ed. 709 p.

GUILBOT (A.), 1986 - Des Multiples Applications d'un Modèle Conceptuel du Cycle de l'Eau en France. Rev. Int. Sciences de l'Eau. Vol 2, 1, pp 19-26.

IBIZA (D.), 1985 - Point de Vue sur les Fonctions de Production. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, 3.

KLEMES (V.), 1986 - Dilctantism in Hydrology, Transition or Destiny. Wat. Resour. Res. 22, supplement 9, Aout 1986.

KOTTEGODA (N.T.), 1980 - Stochastic Water Resources Technology, The MacMillan Press Ltd, 384 p.

KUNDZEWICZ (Z.), 1986 - The Hydrology of Tomorrow. Hydro. Sciences Journal 31, 2, 6/1986.

NELDER (J. A.), MEAD (R.), 1964 - A Simple Method for Function Minimization. Computer Journal, 7: 308-313.

ROSENBROCK (H. H.), 1960 - An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. Computer Journal, 3, 175.

SERVAT (E.), 1986 - Présentation de Trois Modèles Globaux Conceptuels Déterministes: CREC5, MODGLO et MODIBI. Rapport ORSTOM, Dépt.F, UR 604.

SERVAT (E.), DEZETTER (A.), 1988 - Deux Méthodes d'Optimisation Non Linéaire. Théorie et Pratique. Publication OVNih, Groupe de Recherche ULM, ORSTOM Montpellier.