

13/98

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE**

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

**MEMOIRE D'INGENIEUR D'ETAT EN HYDRAULIQUE**

**THEME**

---

**ETUDE COMPARATIVE DES MODELES DE  
PREVISION DES CRUES**

---

**ETUDIE PAR :**

**MELLE MEKHALFIA FARIDA**

**PROMOTEUR :**

**NEBACHE NACER**

***promotion 1998***

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## **DEDICASES**

***A mon cher père, cette thèse exposée  
est dédié, qu'il trouve ici l'expression de ma  
reconnaissance émue et affectueuse.***

***A ma mère chérie, pour son apport en soin  
objectif et de conscience érudite.***

***A mes soeurs, frères et amis pour leurs  
encouragement dévoués.***

**FARIDA**

## ***REMERCIEMENTS***

***Je tiens à exprimer ma vive gratitude à tous ceux qui m'ont aidés, de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, mon promoteur :***

***MONSIEUR N. NEBBACHE.***

***Je remercie également :***

***MONSIEUR A.SMATI , pour ses diverses orientations amicales.***

***FARIDA***

**PLAN DE TRAVAIL  
INTRODUCTION**

**CHAPITRE I**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE II**

**APPLICATION AU BASSIN VERSANT SEBAOU**

- 1) *Présentation du bassin versant*
- 2) *Le système de prévision et annonce des crues*

**CHAPITRE III**

**ETUDE DES CRUES**

- 1) *Introduction*
- 2) *crues historiques*
- 3) *Principales crues enregistrées en Algérie*
- 4) *Les causes des crues*
- 5) *L'évolution des crues*
- 6) *La puissance des crues*
- 7) *La protection contre les crues*

**CHAPITRE IV**

**PREVISIONS DES CRUES**

- 1) *Définition*
- 2) *Délai de prévision*
- 3) *Principe de prévision*
- 4) *Conception d'un système de prévision*
- 5) *Système de prévision hydrologique*

**CHAPITRE V**

**ECOULEMENT A SURFACE LIBRE - REGIME  
TRANSITOIRE**

- 1) *Méthodes de prévisions fondées sur la notion d'onde de crue*
- 2) *Equations de base*

**CHAPITRE VI**

**MODELES DE PREVISION**

- 1) *Introduction sur les modèles de prévision*
- 2) *Modèles de prévision étudiés*
  - 1° *Méthodes immédiates*
  - 2° *Méthodes a liaisons spatiales*

**CHAPITRE VII**

**RESULTATS ET DISCUSSION**

- 1) *Objectif*
- 2) *Critères de comparaison*
- 3) *Présentation des résultats*
- 4) *Interprétation des résultats*

**CONCLUSION**

## INTRODUCTION

La planète terre a connu des phénomènes naturels: tels que les séismes, les crues etc...

Les inondations, malgré les progrès de la technique, restent encore dans le monde entier, la cause principale des dommages aux biens et aux personnes provoqués par les crues.

Les crues sont des phénomènes naturels aléatoires du point de vue <sup>de</sup> la date de la réalisation de l'événement et l'ordre de grandeur.

Les crues sont définies comme des accroissements notables du débit des cours d'eau en un temps court. Ces crues peuvent entraîner des submersions ou inondations plus au moins dommageables .

L'étude des crues contient deux parties:

La première, appelée parfois la prédétermination <sup>que on consistant</sup> consiste à rechercher la probabilité pour que les événements supérieurs à un seuil se produise au cours d'une année.

La deuxième partie, appelée prévision consiste à définir l'évolution des phénomènes dans un proche avenir.

Dans ce cadre, on s'intéresse à l'étude de la prévision des crues, cette prévision se distingue par les délais disponibles pour intervenir, les enjeux économiques et les moyens nécessaires à sa mise en oeuvre.

La prévision des débits des crues pour les prochaines heures a pour objectifs:

- l'objectif le plus immédiat l'alerte des riverains qui est un enjeu prépondérante de l'annonce des crues.
- informer les services chargés de la surveillance de digues
- organiser l'exploitation et la gestion des réservoirs d'accumulation
- ainsi que d'autres objectifs multiples comme la protection de la navigation

De nombreux modèles de prévision des crues ont été mis au point, cette étude consiste à tester quatre modèles sur le bassin du **SEBAOU**, pour trois crues choisies, dont l'objectif est la comparaison de ces modèles simples et choisir le modèle le plus performant.

**CHAPITRE I**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## L'INTRODUCTION

En hydrologie, un modèle est une présentation simplifiée et schématisée du phénomène réel, le modèle est destiné à élaborer un outil efficace pour des objectifs variés.

Le modèle n'a de sens que par rapport à un état donné de l'information hydrologique dans un environnement d'incertitudes de mesures ou autres.

## 1-LES MODELES MATHEMATIQUES

Les modèles mathématiques sont des modèles simples pour la conception et l'utilisation, ces modèles sont basés sur les équations de régression d'ajustement récursif ; parmi les modèles présentés :

### 1-1 LES MODELES LINEAIRES

Le modèle linéaire présenté par M.EIGER (1983), admet l'existence d'une relation linéaire entre le débit dans une section aval au temps (t+d) et les débits à l'instant t dans cette même station et d'autres situés en amont ; d'où l'équation est:

$$QV(t+d) = a_0 QV(t) + a_1 QM_1(t) + a_2 QM_2(t) + a_3 QM_3(t) + \dots + a_n QM_n(t) + a_{(n+1)} \quad (1)$$

avec

QV: débit aval

QM<sub>i</sub>: débit amont à la station I

a<sub>i</sub> : les paramètres obtenus en fonction du modèle de Muskingum pour un bief sans affluents.

### 1-2 LES MODELES LINEAIRES EMPIRIQUES

Les modèles linéaires empiriques sont des modèles linéaires avec correction autorégressive en temps réel, ces modèles se composent de deux parties estimées séparément:

*significatif*

- la partie conceptuelle  $f_c$  on peut la représenter par l'équation suivante:

$$f_c = QV(t+d) = a_0 QV(t) + a_1 QM_1(t) + a_2 QM_2(t) + a_3 QM_3(t) + \dots + a_{(n+1)} \quad (1)$$

- la partie empirique  $f_e$ , est de la forme :

$$f_e = \rho (Y_t - \mu)$$

avec:

$\rho, \mu$  : paramètres

$$Y_t = Q(t) - Q'(t)$$

$Q(t)$ : débit aval au temps ( t )

$Q'(t)$ : débit estimé par la composante conceptuelle

on aura l'équation

$$QV(t+d) = a_0 QV(t) + a_1 QM_1(t) + a_2 QM_2(t) + a_3 QM_3(t) + \dots + a_n QM_n(t) + a_{n+1} + \rho(Y_{t-\mu}) + \mu \quad (2)$$

### 1-3 LES MODELES DES DIFFERENCES SIMPLES

Les modèles des différences simples utilisent les variations temporelles des variables, donc l'équation se présente sous la forme :

$$\Delta Q_v(t+d) = a_0 \Delta Q_v(t) + \sum_{i=1}^n a_i \Delta Q_M^i(t) + a_{n+1} \quad (1)$$

les différences simples sont définie par :

$$\Delta Q_v(t+d) = Q_v(t+d) - Q_v(t)$$

$$\Delta Q_v(t) = Q_v(t) - Q_v(t-d)$$

$$\Delta Q_M^i(t) = Q_M^i(t) - Q_M^i(t-2)$$

les paramètres 'ai' sont obtenu en fonction du modèle de Muskingum

### 2 - METHODE DE BACHET

Cette méthode est proposé par M. **BACHET** (1934), c'est une méthode basée sur la notion de la propagation de l'onde de crue ; elle est simple d'emploi pour la prévision des crues .

Considérant deux sections d'abscisses X et X+dX, la variation du volume emmagasiné pendant le temps 'dt' est égale à la différence des débits entrant et des débits sortant soit:

$$a \cdot dh \cdot dX = q \cdot dt - (q + dq) \cdot dt \quad (1)$$

avec:

a: largeur du lit de la rivière

dh : variation de hauteur entre X et X+dX

dq : variation du débit de crue pendant dt

cette équation peut s'écrire de la forme:

$$a \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial X} = 0 \quad (2)$$

comme le débit de la crue  $q = q_1 + p$ , alors

$$a \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial X} + \frac{\partial p}{\partial X} = 0 \quad (3)$$

$q_1$  débit de la rivière en régime permanent

P débit complémentaire, dépend de l'onde de crue.

pour toute section donnée, X est constant, la variation de la hauteur pendant le temps dt correspond à la variation du débit  $q_1$  pendant le temps dt, on peut écrire:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial q_1} \cdot \frac{\partial q_1}{\partial t} \quad (4)$$

considérant deux courbes représentatives de  $q_1$  en fonction de la distance X, l'une à l'instant t, l'autre à l'instant (t+dt), en comparant les valeurs de  $q_1$  au points A(t,X) et C(t+dt,X+dX), on aura la valeur de dX donnée par la relation:

$$dX = \left( \frac{1}{a} \right) \cdot \left( \frac{dq_1}{dh} \right) \cdot dt \quad (5)$$

le passage à l'ordonnée  $dq_1$  du point A au point C est donné par la formule :

$$dq_1 = \frac{\partial q_1}{\partial X} \cdot dX + \frac{\partial q_1}{\partial t} \cdot dt \quad (6)$$

soit:

$$dq_1 = \left( \frac{\partial q_1}{\partial X} \right) \cdot \left( \frac{1}{a} \right) \cdot \left( \frac{dq_1}{dh} \right) \cdot dt + \frac{\partial q_1}{\partial t} \cdot dt \quad (7)$$

en multipliant la relation (3) par  $(1/a) \cdot (dq1/dh)$  on obtient :

$$\frac{\partial q1}{\partial t} + (1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (dq1/dX) + (1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (\partial p / \partial X) = 0 \quad (8)$$

ou

$$\frac{\partial q1}{\partial t} = (-1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (dq1/dX) + (-1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (\partial p / \partial X) \quad (9)$$

en remplaçant l'équation (9) dans l'équation (7) on aura

$$dq1 = \left( \frac{\partial q1}{\partial X} \right) \cdot (1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot dt + (-1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (dq1/dX) \cdot dt + (-1/a) \cdot (dq1/dh) \cdot (\partial p / \partial X) \cdot dt$$

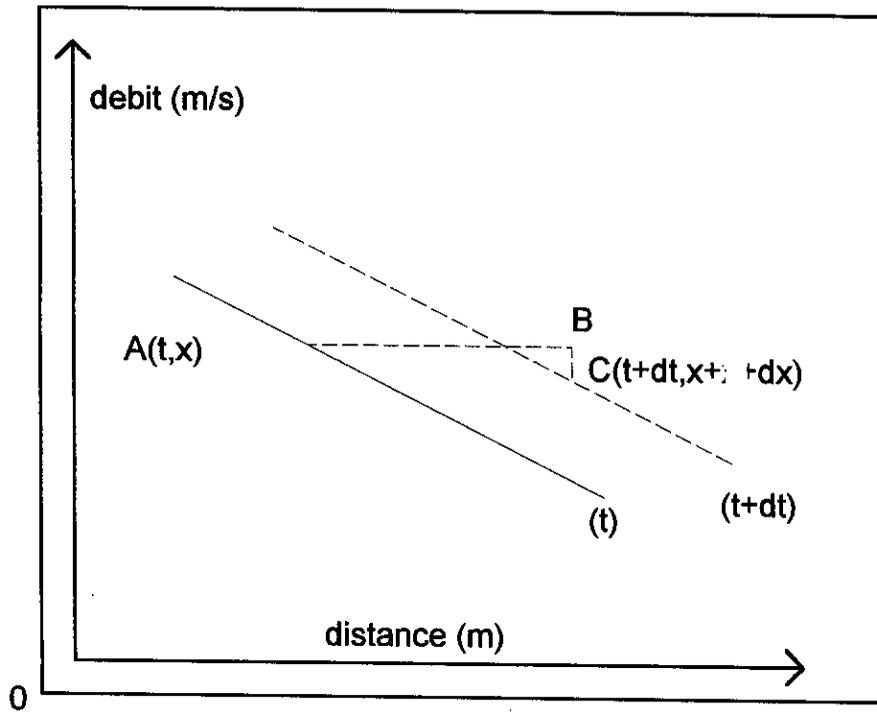
$$dq1 = \frac{(-1/a) \cdot (\partial q1 / \partial h) \cdot (\partial p / \partial X) \cdot dt}{\left[ (-1/a) \cdot (\partial q1 / \partial h) \cdot dt \right] \cdot \frac{\partial p}{\partial X}}$$

↑-----↑  
dX

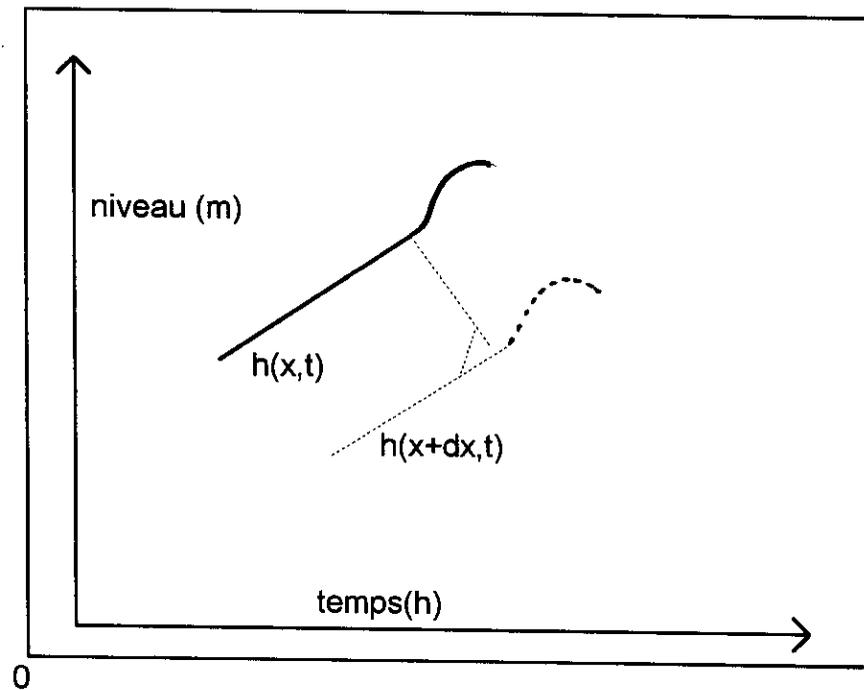
$$dq1 = - \left( \frac{\partial p}{\partial X} \right) \cdot dX \quad (10)$$

cette équation montre que le débit de la rivière à un point de l'onde d'abscisse  $(X+dX)$ , à l'instant  $(t+dt)$  se déduit d'un point d'abscisse  $(X)$ , à l'instant  $t$ .

GRAPHE N°1



GRAPHE N°2



### 3- MODELE HAYAMI

Le modèle HAYAMI proposée par M.HAYAMI (1951), ce modèle est basé sur la notion de propagation de l'onde de crue, c'est un modèle simple qui résume la crue par deux paramètres quantitatifs qui sont le débit maximum  $Q_{max}$  et la durée " d " pendant la quelle le débit dépasse 80% le débit maximum.

En se plaçant dans une rivière de section rectangulaire ,de pente constante , avec les hypothèses

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$
$$v \cdot \frac{\partial v}{\partial X} = 0$$

L : longueur de tronçon de la rivière constante  
v : la vitesse

HAYAMI fait un calcul complet des ondes des crues par la méthode de la diffusion à partir des équations de SAINT -VENANT de type parabolique d'ou le nom «**crue diffusante** » les équations de SAINT -VENANT sont :

1-équation de continuité

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = - \frac{\partial s}{\partial t}$$

2-équation dynamique

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial X} = -g \cdot \frac{\partial h}{\partial X} + g(I-J)$$

d'ou le système :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + L \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = q(x,t)$$
$$- \frac{\partial h}{\partial X} + I - J = 0$$

avec

q : débit latéral

$$\frac{\partial z}{\partial X} = \left( \frac{\partial h}{\partial X} \right) - I$$

alors

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + L \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = q(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial X} + J = 0 \quad (2)$$

dérivant (1) par rapport à x et (2) par rapport à t, on aura :

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + L \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial X \partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} \cdot \left( \frac{\partial L}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial X} \right) = \frac{\partial q}{\partial X} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial X \partial t} + \frac{\partial J}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial J}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

de l'équation (1) on a :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 1/L(q - \frac{\partial Q}{\partial X}) \quad (5)$$

en remplaçant l'équation (5) dans l'équation (4) on aura :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial X \partial t} = -\frac{\partial J}{\partial z} \left[ 1/L(q - \frac{\partial Q}{\partial X}) \right] - \frac{\partial J}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (6)$$

en remplaçant l'équation (6) dans l'équation (3) on aura :

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + L \left\{ -\frac{\partial J}{\partial z} \left[ \frac{1}{L} (q - \frac{\partial Q}{\partial X}) \right] - \frac{\partial J}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \right\} + \frac{\partial z}{\partial t} \left( \frac{\partial L}{\partial X} + \frac{\partial L}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial X} \right) = \frac{\partial q}{\partial X} \quad (7)$$

de l'équation (5) et de l'équation (2), l'équation (7) s'écrit :

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} - L \cdot \frac{\partial J}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{L} \cdot (q - \frac{\partial Q}{\partial X}) \left[ L \cdot \frac{\partial J}{\partial z} - \frac{\partial L}{\partial X} + J \frac{\partial L}{\partial z} \right] = \frac{\partial q}{\partial X} \quad (8)$$

en divisant par  $(-L \cdot \frac{\partial J}{\partial Q})$  on a:

$$\frac{1}{L} \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + \frac{\partial q}{\partial X} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{L} (q - \frac{\partial Q}{\partial X}) \left[ \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial X} - J \cdot \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{\partial J}{\partial z} \right] \quad (9)$$

Cette dernière équation s'écrit sous forme:

$$D \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial q}{\partial x} \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{L} \left( q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \cdot C \quad (10)$$

$$D = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{\frac{\partial J}{\partial Q}}$$

$$C = \frac{1}{L} \frac{\frac{\partial L}{\partial x} - J \cdot \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{\partial J}{\partial z}}{\frac{\partial J}{\partial Q}}$$

D: coefficient de diffusion

C: vitesse de propagation de l'onde de crue

si on néglige les apports latéraux  $q$  et  $q/x$  et si on prend  $C$  et  $D$  constants sur le bief considéré on aura une équation aux dérivés partielles linéaires, c'est le modèle de la crue 'diffusante d'HAYAMI'

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (11)$$

en considérant que le régime initiale est un régime permanent, on aura :

$$Q(t, x) = q_0 + \int_0^t q(\tau, 0) \cdot k(t - \tau, x) \cdot d\tau$$

avec:

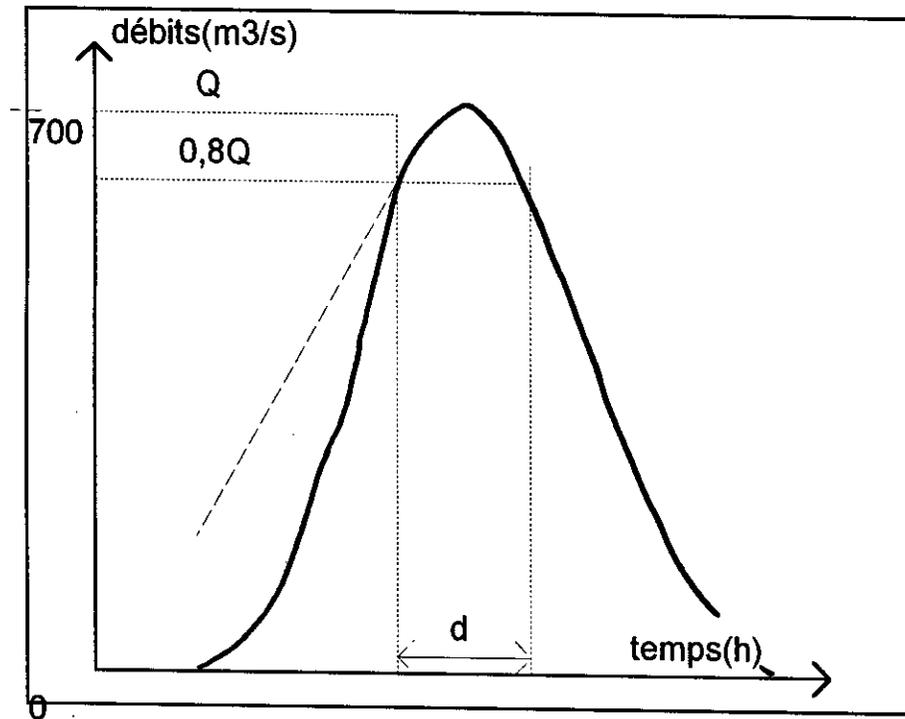
$$k(\tau, x) = \frac{x}{2 \sqrt{\pi \cdot D \cdot \tau} \exp \left[ \frac{(x - C \tau)^2}{4D\tau} \right]}$$

$\alpha$ ,  $\beta$  et  $\sigma$ : paramètres à caler sur l'hydrogramme réel

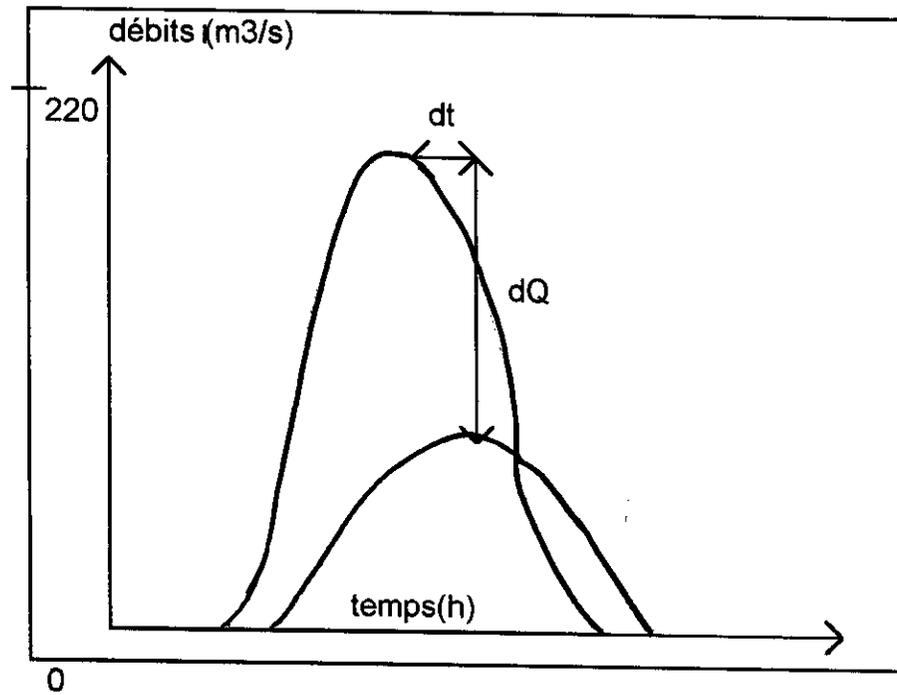
$\theta$ : paramètre fonction du bief intéressé  $\theta = D/C$

le modèle HAYAMI a l'avantage de bien simuler le phénomène de propagation d'une façon satisfaisante, et le défaut de ne pas être un modèle de prévision des débits des crues.

**GRAPHE N°1**



**GRAPHE N°2**



#### 4- METHODE D. P. F. T.

La méthode *D.P.F.T* (différence première de la fonction de transfert) ; est une méthode qui fait partie des modèles pluie-débit .

La méthode *D.P.F.T* est une extension de la méthode classique de l'hydrogramme unitaire .

Cette méthode suppose que sur le bassin, la pluie se transforme en débit par passage à travers deux fonctions successives :

- une fonction de "*production*" qui transforme la pluie brute tombée sur le bassin en pluie efficace ruisselée.
- une fonction de "*transfert*" qui étale dans le temps les débits issus d'une pluie efficace donnée

soit :

"*P*" la lame d'eau brute reçue par le bassin , cette lame se réduit en lame d'eau efficace "*PE*",

par la relation simple non linéaire suivante :

$$PE(t) = P^2(t) [P(t)+b] \quad (1)$$

avec:

b: partie infiltration + évaporation

cette lame d'eau efficace , se transforme en débit du ruissellement à l'exutoire du bassin versant ce débit calculé par la formule :

$$Q(t+1) = Q(t) + a_1 PE(t+1) + a_2 PE(t) + a_3 PE(t-1) + \dots + a_i PE(t-i+2) \quad (2)$$

avec:

$Q(t+1)$  le débit prévue à l'instant  $(t+1)$

$Q(t)$  le débit à l'instant  $(t)$

$PE$  pluie efficace

$a_i$  coefficients de la *D.P.F.T*, déterminés par calage .

on peut écrire la relation précédente sous la forme :

$$Q(t+1) = Q(t) + q(t+1) \quad (3)$$

l'avantage de cette méthode réside dans la diminution de la corrélation entre les débits successifs et son affranchissement aux dérives de la courbe de tarage.

Toute fois, l'inconvénient de la méthode est sa sensibilité aux erreurs de mesures sur les débits, les précipitations ou autres mesures.

## 5- MODELE PREVIK

Le modèle **PREVIK** fait partie des modèles pluies - débits, ce modèle suppose que la transformation pluie-debit s'effectue en deux opérations:

**La première:** est la transformation de la précipitation en pluie nette, par une fonction de production .

**La deuxième:** est la déformation de la pluie nette en hydrogramme à l'exutoire du bassin, par une fonction de modulation.

soit:

"**P**" la précipitation, on lui associe à chaque pas de temps la pluie nette "**PE**" calculée par la relation suivante:

$$PE(t) = P(t) [a I(t)+b] \quad (1)$$

dans laquelle

a : coefficient déterminé par calage .

I : coefficient de saturation du sol due aux précipitations antérieures , il est évalué à chaque pas de temps d'après la formule de récurrence :

$$I (t+1) =K [I (t)+P (t)] \quad (2)$$

La lame d'eau écoulee pendant chaque pas de temps est obtenue en sommant les écoulements dus aux pluies élémentaires on aura:

$$Q(t+1) = \alpha Q(t) + XPE(t) + (1-\alpha-X) PE (t-1) \quad (3)$$

$\alpha$  : paramètre estime a partir du tarissement des crues observées

X : paramètre calculé par tâtonnement.

## 6-METHODE A LIAISONS SPATIALES

Les méthodes à liaisons spatiales sont basés sur la notion de propagation de l'onde de crue le long de la rivière .

Ces méthodes tiennent compte de l'information recueillie à l'extérieure de la station de prévision d'ou l'importance des calcules nécessaires . Cette information concerne les débits et les pluies.

Pour ces méthodes on considère les deux modèles suivant :

Modèles de *Muskingum*

Modèles à *Régression multiples*

ces modèles vont être étudié en détail au cours du chapitre ( VI )

## 7- MODELES A RESERVOIRS

Les réservoirs représentent des biefs de la rivière .

On considère un seul bief représenté par un seul réservoirs , de volume W, pour ce bief on applique l'équation de continuité , on aura :

$$dW/dt = Q_e(t) - Q_s(t) \quad (1)$$

tenant compte de la relation qui existe entre le volume stocké et les niveaux amont et aval , on aura l'équation suivante:

$$dW = f(Q_e) dQ_e + g(Q_s) dQ_s \quad (2)$$

à partir de ces deux équations , on obtient une équation différentielle:

$$g(Q_s) dQ_s/dt + Q_s(t) = Q_e(t) - f(Q_e) dQ_e/dt \quad (3)$$

à l'instant t, Q<sub>e</sub> et Q<sub>s</sub> sont connues .

Si g peut être considéré comme constante ; on évalue l'accroissement du volume entre les instants t et t + Δt , on aura l'équation suivante :

$$Q_s(t + \Delta t) = Q_s(t) + \int_t^{t + \Delta t} \exp \left[ \frac{-t + \Delta t - u}{f} \right] [Q_e(u) - f(u) \frac{dQ_e(u)}{dt}] \cdot du \quad (4)$$

ou Q<sub>s</sub>(t + Δt) est le débit prévue à l'aval , à l'instant (t + Δt).

## 8-METHODE DE CONVOLUTION

La méthode de convolution consiste à déterminer l'évolution des débits amont , des débits aval par application du principe de superposition entre les biefs amont et aval respectivement .

Soit la relation :

$$Q_s(t) = Q_s(0) + \int_0^t Q_e(t-u) K(u) du \quad (1)$$

K(u): le noyau de convolution

Le débit prévue à l'aval au temps (t + Δt) est alors donné par l'expression :

$$Q_s(t + \Delta t) = Q_s(t) + \int_0^t Q_e(u) [K(t + \Delta t - u) - K(t - u)] du + \int_t^{t + \Delta t} Q_e(u) K(t + \Delta t - u) du \quad (2)$$

$\Delta t$  : étant le délai de prévision  
la valeur de débit amont entre  $t$  et  $(t + \Delta t)$  est obtenue par extrapolation  
pour améliorer la prévision; on peut traiter les écarts entre observation et prévision au  
cour de la même crue en déroulement.

***CHAPITRE II***

***APPLICATION AU BASSIN VERSANT  
SEBAOU***

## II -1- PRESENTATION DU BASSIN VERSANT SEBAOU (ANRH)

avec vous  
moedat à la  
délimitation du B.V.  
superficie déterminée

Le bassin hydrographique du **SEBAOU** couvre une surface totale d'environ 2500Km<sup>2</sup>. Il est constitué pour une bonne part d'une plaine où presque, flanquée au nord d'une chaîne côtière peu élevée (1278 m au maximum) qui assure une séparation avec la mer et à l'EST et surtout au SUD avec le massif du DJURDJURA, d'une frontière de reliefs élevés (jusqu'à 2300M ) fortement et profondément entaillées par des vallées rapide. Ainsi de la chaîne en frontière sud partent des épourons vers le NORD qui peut être cassant la circulation des masses pluvieuses venant de l'ouest.

La géologie même simplifiée met en évidence l'hétérogénéité du bassin en particulier on note que l'oued **AISSI** coule principalement sur les roches métamorphiques alors que le haut **SEBAOU** se développe sur les grès et Schistes verts.

La formation et l'évolution des crues du **SEBAOU** sont des phénomènes aux caractéristiques hydrologiques particulières. Elles sont brutales, violentes et rapide.

Afin de prendre les mesures de protections des personnes et des biens, l'**ANRH** en collaboration avec le **PNUD** a mis en place un réseau de mesure hydrométéorologique avec télétransmission automatique, pour l'annonce et la prévision des crues comme moyen de lutte contre ce phénomène.

## II -2- LE SYSTEME DE TELEMESURE POUR LA PREVISION ET L'ANNONCE DES CRUES DANS LE SEBAOU ( A.SMATI)

Le système est composé de quatre équipements qui sont:

1- Le réseau de télémessure et de transmission a été récemment installé dans le bassin du **SEBAOU**, il est constitué de huit stations d'acquisition automatiques. chaque station équipé de capteurs de niveau d'eau, pluie et température. La transmission des données est faite à partir d'un réseau radio qui relie les stations automatiques à la station terminale, ainsi que la ligne téléphonique spécialisée reliant la station terminale au centre de prévision d'Alger.

2- L'équipement de supervision ou de contrôle central, permet les opérations automatiques, supervision des données.

3- Les équipements hydrologiques au niveau des stations sont nécessaires aux mesures de pluies, hauteur d'eau, température et de conversion de ces données en signaux électriques pour la transmission sur le réseau de télémessures.

4- Le système d'alimentation, source d'énergie à partir de batteries rechargeables par panneaux solaires pour l'opération des différents équipements.

le système permet notamment:

- \* l'acquisition locale des mesures hydrologiques:
- \* la transmission en temps réel de ces données.
- \* la réception, la validation, le traitement des données.
- \* le stockage des données
- \* effectuer les prévisions

Le réseau radio de télémesure est installé dans le bassin du SEBAOU dans le but de collecter automatiquement des informations hydrologiques de différentes natures (hauteur d'eau dans la rivière , intensité de pluie ....)

Actuellement, huit stations de mesures sont automatisés et deux poste de collecte installés (TIZI OUZOU -ALGER )

le système de télémesure est capable de rapatrier un maximum des données, même lors d'une panne d'un élément du réseau radio ou d'un concentrée .

### II-3-CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES

Les stations utilisées dans cette étude sont:

la station **BELLAOUA** située à l'amont

la station **BAGHLIA** située à l'aval

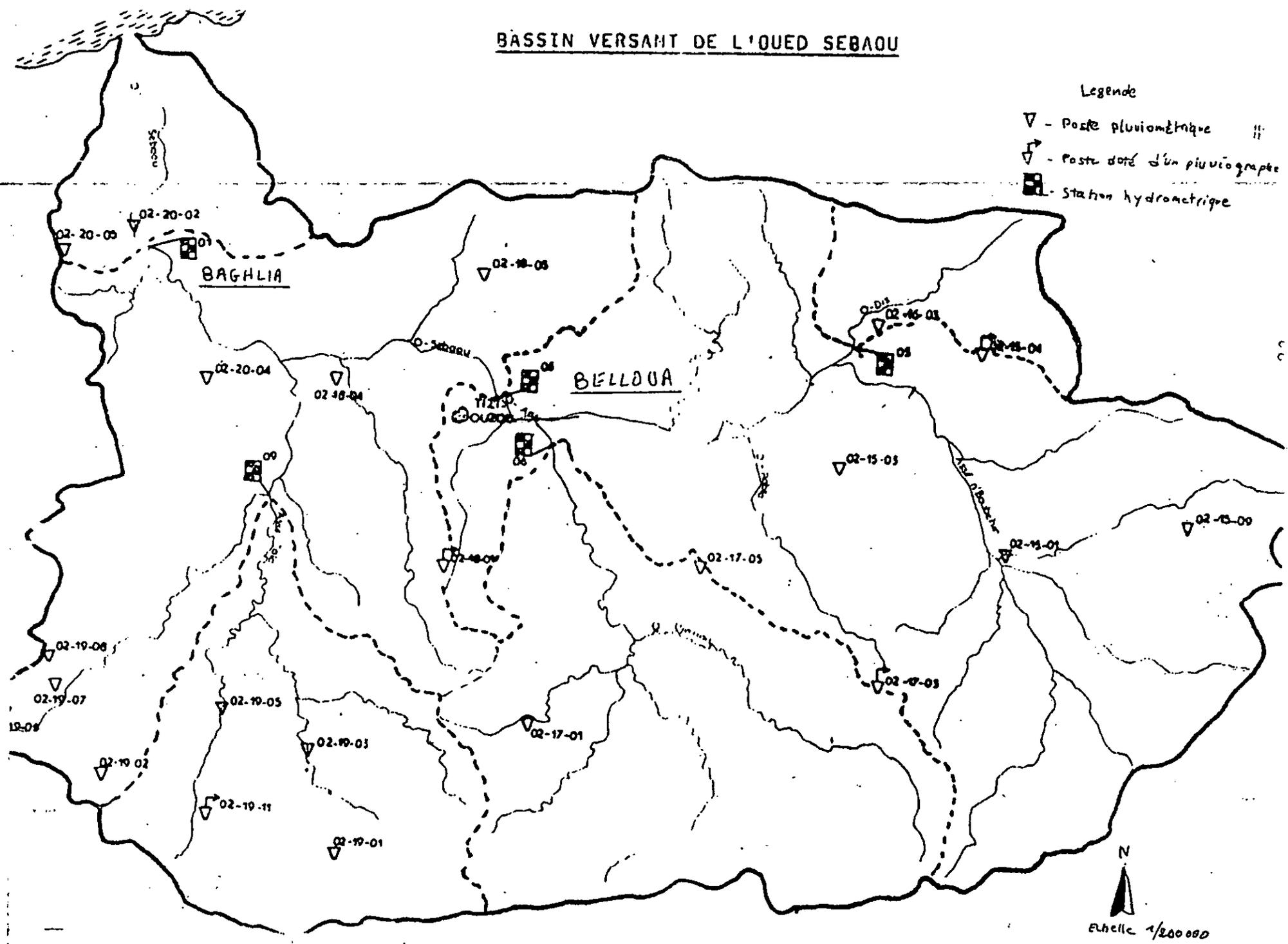
le tableau suivant présente les caractéristiques géomorphologiques des deux stations

station	surface(km <sup>2</sup> )	perimètre(km)	longueur(km)	ongueur oued	altitudes		
					min	max	moy
<b>BELLOUA</b>	<b>1490</b>	<b>155</b>	<b>42,2</b>	<b>66</b>	<b>70</b>	<b>2305</b>	<b>635</b>
<b>BAGHLIA</b>	<b>2390</b>	<b>200</b>	<b>60,5</b>	<b>92</b>	<b>20</b>	<b>2305</b>	<b>590</b>

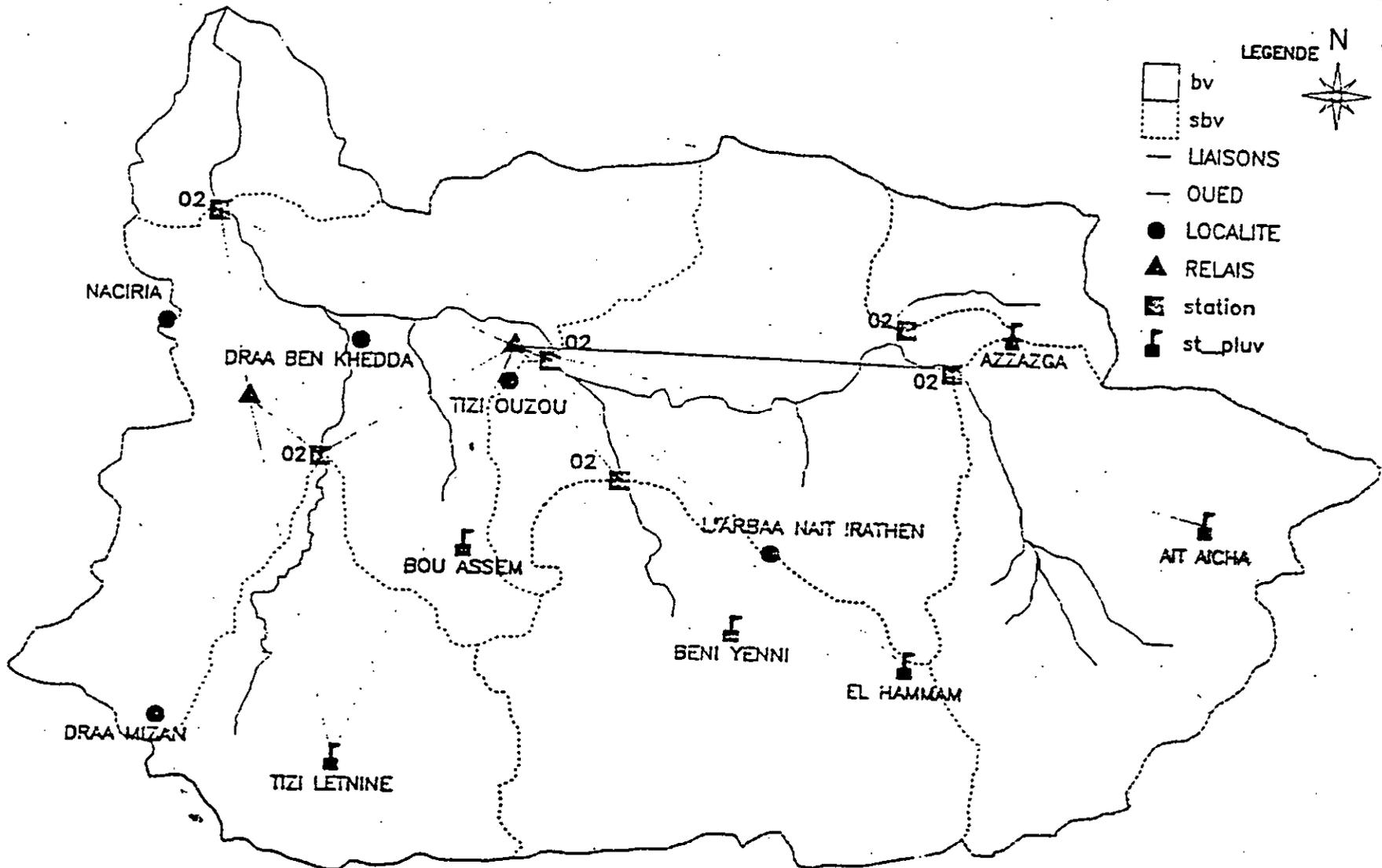
# BASSIN VERSANT DE L'OUED SEBAOU

## Legende

- ▽ - Poste pluviométrique
- ▽ (with arrow) - Poste doté d'un pluviographe
- (with cross) - Station hydrométrique



# RESEAU DE TELEMESURES DU SEBAOU



LEGENDE N

- bv
- sbv
- LIAISONS
- OUED
- LOCALITE
- ▲ RELAIS
- ⊞ station
- ⊞ st\_pluv

NACIRIA

02

DRAA BEN KHEDDA

TIZI OUZOU

02

02

02

AZZAZGA

02

02

L'ARBAA NAT IRATHEN

BOU ASSEM

AIT AICHA

BENI YENNI

EL HAMMAM

DRAA MIZAN

TIZI LETNINE

***CHAPITRE III***  
***ETUDE DES CRUES***

### III-1 INTRODUCTION

Les crues sont des accroissement notables du débit des cours d'eau en un temps très court , ces crues peuvent entraîner des submersions ou inondations plus ou moins dommageables .

Pour toute étude d'ouvrage hydraulique , la crue est caractérisée par les éléments suivant:

- le débit maximum instantané (ou a défaut moyen journalier )
- la durée de la crue (temps de concentration, temps de base, temps de réponse )
- le volume totale écoulé
- l'hydrogramme de la crue

En raisons des dégâts matériels et corporels qu'elles provoquent les crues font l'objet d'études particulières qui mettent en oeuvre des méthodes hydrologiques supplémentaires qui en font une branche un peut à part de l'hydrologie.

Les causes, l'évolutions, protections, prévisions, comparaison sont les principaux thèmes pour faire une étude sur les crues.

### III -2 CRUES HISTORIQUES

Les principales crues enregistrées dans la région de TIZI-OUZOU sont:

En avril 1954, octobre, novembre et décembre 1957, novembre 1971, Mars 1973, 1974 et septembre 1979.

Les précipitations qui accompagnent ces crues sont généralement très étendues et de longues durée, cependant les intensités de ces pluies sont faibles relativement.

Le débit maximale atteint en 1957 la valeur 3500 (m<sup>3</sup>/s) à la station BELLOUA, caractérisé par sa position élevée sur un col, cependant l'ensemble de la vallée fut envahi par les eaux qui débordèrent les digues pour inonder les routes. L'écoulement durant les journées de 29-30 Décembre 1957 a été près de 150.10 m<sup>3</sup>

Les crues les plus fortes et catastrophiques étaient celles de mars 1974; les précipitations furent abondantes: 528 mm en quatre jours à AIN-HAMMAM pour un total annuel de: 1100 mm le débit maximal à **BELLOUA** atteint 4500 m<sup>3</sup>/s.

Ces crues entraînèrent la mort de 52 personnes et détruisirent 4570 maisons et 13 ponts ainsi que de nombreuses routes sont inondées. la station de jaugeage de la RN12 située sur l'oued '**AISSI**' était détruite, alors que les autres stations étaient endommagées.

Les caractéristiques principales de ces crues étaient l'écoulement important durant une longue période et l'existence de deux pointes à la plupart des stations.

### III- 3 -PRINCIPALES CRUES ENREGISTREES EN ALGERIE

Le tableau suivant donne les crues principales enregistrées dans les régions différentes du territoire nationale

#### principales crues enregistrées en Algérie

<i>Localité</i>	<i>Année</i>	<i>Oued</i>	<i>Hauteur max(m)</i>	<i>débit max(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>période de retour(ans)</i>
Tizi-Ouzou	1957	SEBAOU	-	3500	-
	1974	SEBAOU	-	3420	35
	(mars)	(BAGHLIA)			
	1974	SEBAOU	-	2940	30
	(mars)	(BELLOUA)			
	1973	SEBAOU	-	4500	-
		(BELLOUA)			
<i>guelma</i>	1973	Bouhamelane	6,00	986	11
	(mars)				
	1984	//	6,80	1500	17
	(février)				
	1984	//	6,10	1450	16
	(décembre)				
<i>Annaba</i>	1973	Seybousse	15	2400	25
	(mars)				
	1984	Seybousse	15,15	3100	40
	(février)				
	1984	Seybousse	14,90	2900	35
	(décembre)				
<i>El-eulma</i>	1980	Djehadi	0,04	2500	-
	(septembre)				
<i>sidi-belabbes</i>	1987	Mekerra	-	1500	-
	1994	//	380	210	-
<i>sidi-aissa</i>	1989	Guetrini	-	500	-

### **III-4- LES CAUSES DES CRUES**

Les crues sont engendrées par les fortes averses, fonte de neige, embâcle ou débâcle déglace, et autre cause accessoires.

#### **III-4-1 LES CRUES D'AVERSES:**

Les grandes crues ont surtout pour origine des averses exceptionnelles par leur intensité, leur extension, et leur durée.

Notamment, sur les petits bassins versants, ces averses orageuses produisent des crues très pointues dont les débits maxima élevés peuvent provoquer de gros dégâts pendant des durées assez courtes. comme une partie de l'eau s'infiltré, une autre s'évapore et le reste se ruisselle et que les débits calculés sont très grands par rapport aux débits réellement ruissellés.

pour les petits bassins versant, cet écart est un peut faible, ce qui nous permet de faire une opinion sur les débits prévues d'après les intensités observées de pluie.

#### **III-4-2- LES CRUES DE FONTE DE NEIGE**

Certains bassins montagneux de haute altitude sont parfois en grande partie couvert de neige, dans une telle situation, si une augmentation de la température porte l'isotherme  $0^{\circ}$  c de l'altitude 2000 à 2500 m, il résulte une fusion rapide des neiges existant au dessous de cette cote et un déclenchement de grandes crues.

mais ce phénomène est assez rare et l'influence des fontes de neige sur les débits des crues est surestimée.

C'est ainsi l'effet de la pluie est prépondérant dans le processus de fonte des neiges, en supposant que la pluie arrive au sol à la température de  $8^{\circ}$  C à chaque centimètre pourra fondre une couche de neige équivalent a un millimètre d'eau puisque la chaleur de fusion de la glace est de 80Kcal/kg

#### **III-4-3- LES CRUES D'EMBACLE OU DE DEBACLE DE GLACE**

Dans les régions froides, les pluies ou le dégel produisent des crues qui emportent avec elles les blocs de glace, arrêtés par des obstacles, ces blocs s'accumulent en formant des barrages dont le remous s'étend vers l'amont en créant des inondations parfois ces barrages sont brusquement emportés par le flot; il en résulte des crues brutales qui s'étalent rapidement.

### **III-4-4- AUTRES CAUSES ACCESSOIRES DE CRUE:**

Les crues peuvent être engendrées par la rupture des barrages naturels ou artificiels, libérant brusquement les eaux accumulées derrière eux, ainsi que la crevasion de poches d'eau incluses dans les masses glaciaires a parfois produit des crues catastrophiques pour les riverains des torrents émissaires.

### **III-5-L'EVOLUTION DES CRUES**

L'évolution de la crue est représenté par un hydrogramme spécial pour chaque crue . Suivant le type de crue rencontré, pour une crue simple ,cinq intervalles a distinguer : la période de concentration, la pointe de la crue, la courbe de décrue, la courbe de tarissement et enfin le débit de base.

Pour la crue complexe, plusieurs montées et descentes sont remarqués cela revient aux plusieurs facteurs responsables de la crue.

#### **III-5-1 CRUES SIMPLES**

Ce sont des crues simples, cinq secteurs à distinguer sur l'hydrogramme de crue:

##### **1- Le temps de concentration :**

Le temps de concentration est en théorie le temps mis par l'élément de volume ruisselé le plus hydrauliquement éloigné de l'exutoire pour atteindre cet exutoire. il est plus court pour les petits bassins versant ,plus long pour les bassins versant étendus.

##### **2- La pointe de la crue:**

La pointe de la crue exprime la puissance de la crue et la durée de la période critique; elle est donnée en hauteur d'eau sur l'hydrogramme de crue.

##### **3-La courbe de décrue:**

Après la pointe, le niveau de la rivière baisse .l'écoulement est alimenté par le ruissellement des régions lointaines, les lits majeurs et les nappes phréatiques donc le temps de décrue est très long par rapport au temps de concentration.

##### **4-La courbe de tarissement:**

La courbe de tarissement correspond à la reprise par la rivière du niveau antérieur à la crue car l'écoulement diminue plus lentement que précédemment.

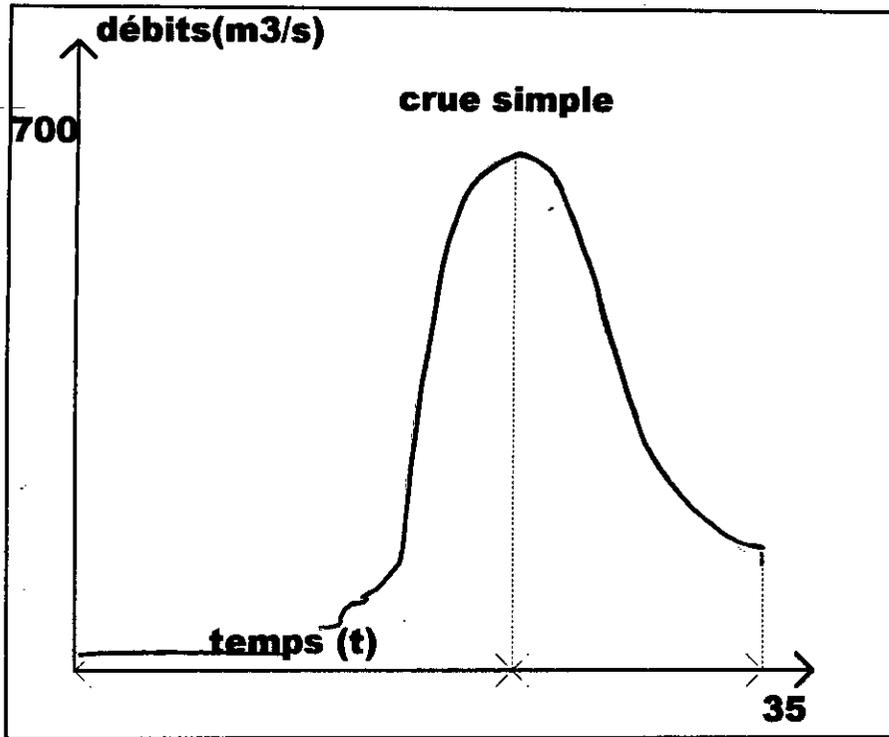
##### **5-Le niveau de base:**

Le niveau de base est le niveau que aurait le cours d'eau ,après une longue période de sécheresse, ce niveau est égale au niveau de cours d'eau avant que la crue s'est produit.

### **III-5-2 LES CRUES COMPLEXES**

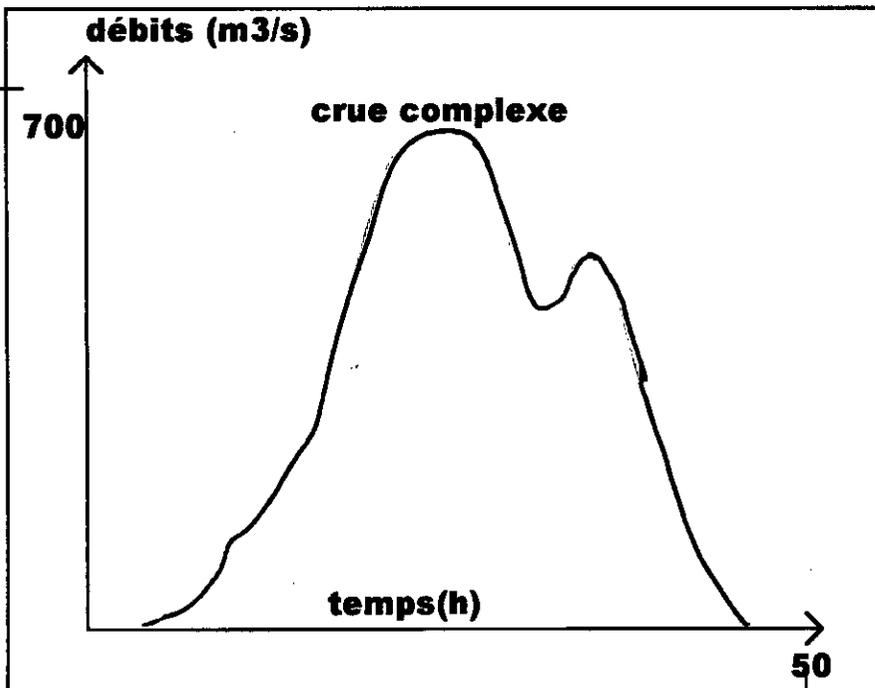
Pour les crues complexes, l'hydrogramme de crue comporte deux ou plusieurs pointes de débits, ces pointes sont séparées par des paliers. cela revient a plusieurs facteurs: averses multiples, temps de concentration différent des affluents ou groupes d'affluents.

GRAPHE N°1



0

GRAPHE N°2



0

### **III-6-LA PUISSANCE DES CRUES**

Pour faire une comparaison entre la puissance des crues différentes , on doit faire une comparaison entre les valeurs:

- les côtes
- les débits
- les volumes évacués

#### **III-6-1-LES COTES**

La côte est influencée par les caractéristiques du lit au point de mesure: rugosité, pente, largeur et débordement.

La côte sera élevée dans les deux cas suivant:

- Inondations à l'amont
- Les étroits à forte pente, grâce à l'accroissement des vitesses qui permet l'évacuation des grands débits, d'où l'augmentation de la pente superficielle, ainsi l'augmentation des niveaux dans ces étroits.

#### **III-6-2-LES DEBITS**

Le débit maximum dépend de l'intensité de l'averse.

Les bassins étendus ont les plus gros maxima débits, ces débits se croissent vers l'aval, sauf des exceptions comme: les lacs, les débordements réduisent les débits et provoquent la chute des modules ;c'est l'aplatissement de la crue.

On définit le débit maximum de la crue comme étant le débit fourni par unité de surface de bassin.

La diminution de ce débit dépend de:

- La surface, qui est la particularité liée à la localisation des avères
- L'évaporation, la cause secondaire prélève des valeurs croissantes de ce débit spécifique.

#### **III-6-3-VOLUMES TOTAUX**

Les volumes totaux sont des volumes écoulés pendant toute la durée de la crue . théoriquement on obtient ces volumes par les méthodes suivantes:

- En additionnant tous les débits instantanés à la seconde pendant le temps ou la crue s'est poursuivie et en retranchant le volume correspondant au débit de base.

– Plus simplement, en additionnant les débits journaliers et en multipliant le résultat par le nombre de secondes dans l'année.

– Ou bien , en planimétrant le graphique de la crue établi avec les débits à une échelle choisi convenablement, en prenant pas en considération le débit de base.

Les volumes totaux résultent du produit de la lame d'eau écoulee pendant la crue par la surface réceptrice.

$$V=L.S$$

V: le volume total

L: la lame d'eau écoulée

S: la surface réceptrice

### **III-7-LA PROTECTION CONTRE LES CRUES**

*Le choix du débit de crue maximum à admettre dans un projet d'ouvrage hydraulique est la base pour la mise en oeuvre des aspects principaux de la protection contre les crues. En citant parmi ces aspects principaux :les barrage et les digues, la correction des lits, la protection et l'aménagement des bassins.*

*La protection par les barrages est la meilleur solution, et cela en gardant en réserve une tranche suffisante de la retenue, mais leurs coûts de construction imposent leurs utilisation pour des besoins essentiels comme irrigation et production de l'énergie électrique.*

*La correction des lits contient tous les travaux dont l'effet est de minorer les niveaux, parmi ces travaux, l'élargissement des lits, l'approfondissement des lits par la dégradation, etc. ...*

*tous ces travaux ont pour but d'accroître la section mouillée afin d'améliorer sa capacité, ce qui entraîne la diminution de sa rugosité et augmentation de la vitesse.*

***CHAPITRE IV***  
***PREVISION DES CRUES***

#### **IV-1- DEFINITION:**

La prévision est par définition l'estimation de l'évolution des phénomènes dans un proche avenir. Cette prévision se distingue par les délais disponibles pour intervenir, les enjeux économiques et les moyens nécessaires à sa mise en oeuvre.

#### **IV-2- LE DELAI DE PREVISION:**

On appelle le délai de prévision, la durée entre la date de prévision (la date du dernier indicateur collecte ) et la date échéance de la variable à prévoir.

On appelle aussi, le délai de prévision la durée séparant entre la fin de l'averse intense et la pointe de crue.

Un cas particulier, lorsque la prévision utilise les débits d'une station amont, on dit que le délai de prévision est le temps de propagation d'amont en aval d'une onde.

#### **IV-3- PRINCIPE DE PREVISION**

La prévision des débits (niveaux), où les hauteurs revient à calculer le débit à l'instant  $(t+dt)$  à partir des observations enregistrés à l'instant  $t$ .

Le but du prévisionniste est de mettre en oeuvre les modèles de prévision avec les délais de prévision les plus grandes possible, afin de choisir le meilleur modèle.

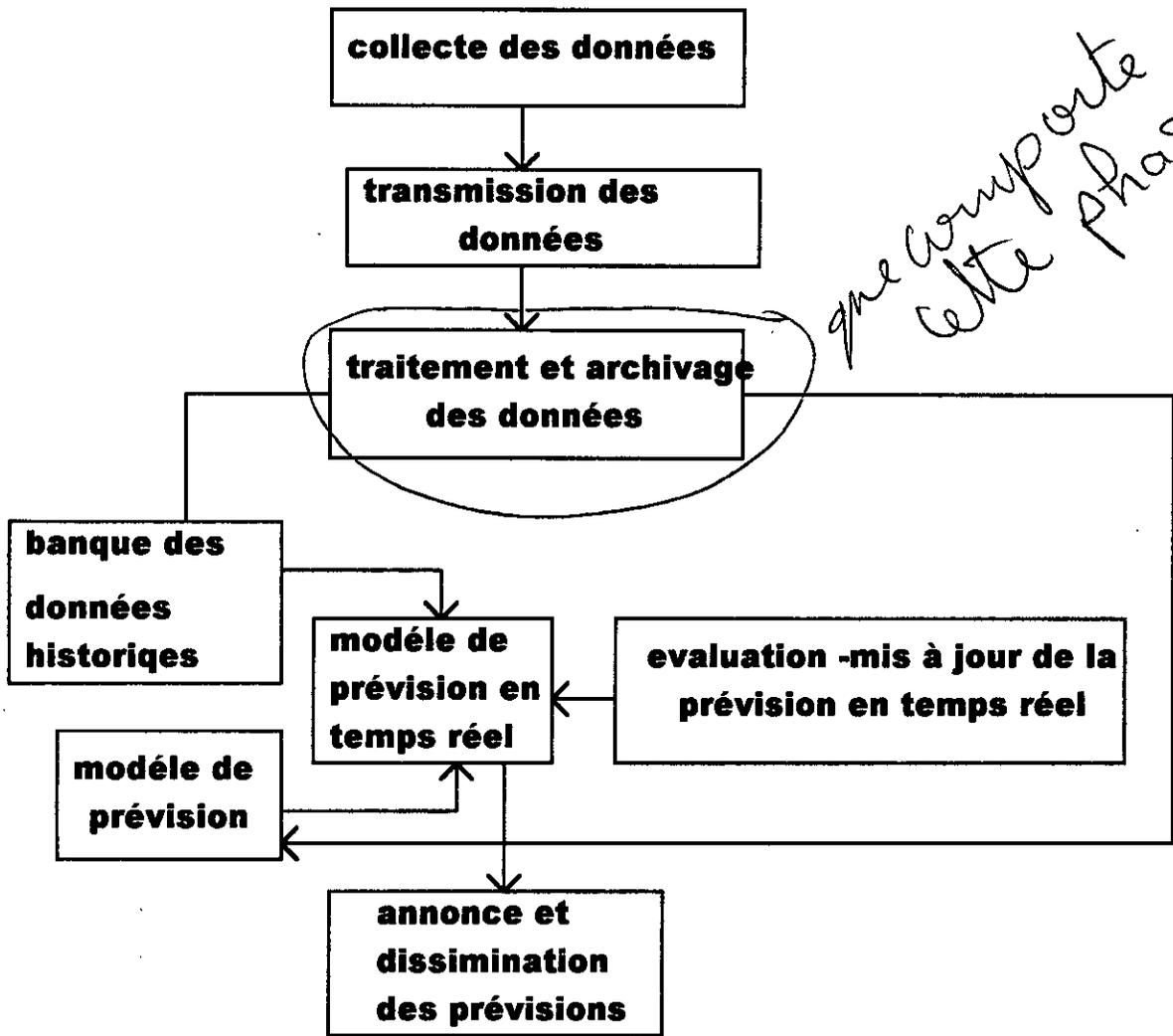
#### **IV-4- LA CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PREVISION ET ANNONCE DES CRUES**

Un système de prévision et annonce des crues se compose de :

- \* un réseau de télémesures comportant des stations automatiques pour les mesures pluviométrique des hauteurs de la précipitation, des niveaux d'eau et de la température.
- \* un réseau de communication par radio qui transmis les données recueillies vers le centre de prévision.
- \* un modèle mathématique utilisant des méthodes de calcul. Le modèle est un moyen nécessaire pour exploiter les informations, fournir le déroulement de la crue et estimer l'évolution des niveaux.

#### **IV-5- SYSTEME DE PREVISION HYDROLOGIQUES:**

La figure suivante montre les différentes parties du système de prévision et annonce des crues



SYPREHD-OMM

***CHAPITRE V***

***ÉCOULEMENT SURFACE LIBRE  
RÉGIME TRANSITOIRE***

## **V-1 MODELES DE PREVISION FONDEE SUR LA NOTION D'ONDE DE CRUE**

Les modèles de prévision fondée sur la notion d'onde de crue visent à déterminer les paramètres futurs de l'onde en des points précis (c.a.d abscisse et instant donné) d'après les paramètres passés recueillie en des points situés généralement en Amonts sont des modèles relativement précises, dont l'emploi se heurte aux même conditions que celle de l'onde de crue.

- L'onde de crue suppose qu'il n'y a pas d'apports, ni de pertes d'eau au cours de l'écoulement, donc ces modèles de prévision sont utilisées:

\*En dehors des régimes dont les pluies, la neige, la glace concourent d'une façon appréciable à la formation de la crue.

\*A l'absence de champs d'inondation ou d'infiltration susceptible détourner une part des débits de crue

- L'onde de crue repose sur la notion d'écoulement par tranches, donc ces modèles de prévision sont utilisés en absence de variations notable de largeur de la zone de grand écoulement, ces variations sont causées par des accidents topographiques où inondation latérales.

## **V-2 EQUATION DE BASE:** (équation de barre saint-veraut)

### **V-2-1 HYPOTHESE:**

Les équations décrivant les écoulements non permanents a surface libre dans les rivières, sont basés sur une série d'hypothèses suivantes:

- écoulement unidimensionnel
- la répartition des pressions est hydrostatiques dans une section droite
- la densité de l'eau est constante
- les postes de charges sont représentées par les formules du régime permanent.

Dans ces conditions, l'écoulement est parfaitement définie à partir de la connaissance des deux variables dépendantes décrivant le mouvement du fluide le long du tronçon.

Ces variables peuvent être les combinaisons de :

(débit- profondeur), (vitesse moyenne, côté de la surface libre) et sont déterminées en fonction des variables: section transversales et temps.

## V-2-2- EQUATIONS DE L'ECOULEMENT:

Les équations régissant l'écoulement unidimensionnel sont au nombre de deux:

- l'équation aux dérivées partielles exprime la conservation de volume; c'est l'équation de continuité.
- une deuxième équation aux dérivées partielles exprime le théorème de quantité de mouvement: c'est l'équation dynamique.

en l'absence d'apports latéraux ces équations s'écrivent, en désignant par X l'abscisse de la section droite le long de la rivière et T le temps comme suit:

### équation de continuité:

l'expression de la conservation de la masse entre les sections (x) et (x+ Δx) pendant le temps t conduit à écrire l'égalité : la différence entre les débits entrant et sortant, et d'autre part, la variation contenu entre ces deux sections:

soit

$$[ Q - (Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \partial x) ] dt = [ S + \frac{\partial S}{\partial t} \partial t - S ] \Delta x \quad (1)$$

$$\Rightarrow - \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \partial x dt = \frac{\partial S}{\partial t} \cdot \partial t \cdot \partial x \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

### Equation dynamique:

Cette équation montre l'égalité entre:

- la variation de la quantité de mouvement à l'intérieur du volume limité par le tronçon de longueur X.
- la somme de la quantité nette de mouvement entrant dans ce volume et des forces extérieures agissant sur ce volume.

cette égalité s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot v \cdot h) \Delta x = \rho [ (vh)v - (v \cdot h \cdot v + \frac{\partial}{\partial x} (vh \cdot v) \Delta x) ] + g \cdot \rho \cdot h \cdot I \Delta x +$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g [ h^2 - (h^2 + \frac{\partial h^2}{\partial x} \cdot \partial x) ] - \rho \cdot g \cdot h \cdot J \cdot \Delta x$$

qui peut se mettre sous la forme:

$$\frac{\partial}{\partial t} (vh) + \frac{\partial}{\partial x} (v^2 h) + g/2 \cdot \frac{\partial h^2}{\partial x} = gh (I-J)$$

d'où:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + gJ = 0$$

$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x}$  : variation de quantité de mouvement

$g \frac{\partial Z}{\partial X}$  : variation des forces de pression

$gJ$  : forces de frottement

Ce système de deux équations aux dérivées partielles exige pour sa résolution, la connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites qui se répartissent entre une relation amont et une relation aval la condition à la limite amont est généralement la connaissance  $Q(t)$  de l'hydrogramme de crue observé à la station amont .

La condition a la limite aval est en général, soit une relation  $Q(z)$  définie par une section de contrôle particulière, soit une relation  $z(t)$  si la côte aval est fixée par le niveau d'une mer ou d'un lac.

Cependant, la mise en oeuvre des équations de **Saint-Venant** est relativement lourde dans la mesure où elle exige une description assez rigoureuse de la géométrie du cours d'eau  $[s(x,y)]$  et de sa rugosité  $k_s(x,y)$ , ces paramètres sont déterminés par des calages sur des crues antérieures, d'autre part, les termes de ces équations n'ont pas, selon les cas, la même importance, surtout pour les applications de prévision des crues.

## **VI-1- INTRODUCTION SUR LES MODELES DE PREVISION**

L'objectif de notre étude est la mise à l'épreuve des méthodes simples de prévision des crues en temps réel.

dans cette étude, nous avons appliqué les algorithmes de manière brutale sans tenir compte des caractéristiques géographiques car le but était de juger les modèles suivant des critères simples sans tenir compte de performance.

il y'a en effet de nombreux cas où des méthodes simples sont suffisantes pour une prévision des crues.

## **VI-2- LES MODELES DE PREVISIONS ETUDIEES**

Nous classerons les algorithmes de prévision de crue en temps réel en deux catégories:

**a)** les méthodes, que nous appellerons immédiates, qui ne font intervenir que l'information à la station où s'effectue la prévision (cette information concernera l'observation des niveaux transformés en estimation de débit par utilisation d'une courbe de Tarage)

**b)** les méthodes à liaison spatiale, faisant intervenir des observations et mesures en des points extérieurs la station où l'on veut effectuer la prévision. le plus souvent, ce sera le niveau où le débit en une station à l'amont.

Pour toutes les méthodes,  $t$  est date de la dernière observation, et l'on suppose que c'est aussi le moment où l'on réalise la prévision caractérisé par un délai  $d$ . le résultat de l'opération est l'estimation du débit  $Q(t+d)$  à la date  $(t+d)$

### **VI-2-1-METHODES IMMEDIATES**

#### **VI-2-1-1 METHODE D'EXTRAPOLATION**

L'algorithmes est construit suivant la manière habituelle des formules d'interpolation. L'interpolation consiste à construire une fonction d'approximation qui coïncide avec la fonction implicite représentant la réalité en un certain nombre de "pôles" qui seront ici les temps d'observation des niveaux, avec l'hypothèse, d'intervalle de temps constant entre les points successifs d'observations et de prévision. Pour la construction de polynôme d'interpolation, ou prévision. Pour la construction de polynôme d'interpolation, on préfère utiliser la ressource de l'algèbre symbolique au lieu d'utiliser les méthodes de la grange où de Newton.

PRINCIPE: construction de polynôme d'interpolation

DONNEES: débits  $Q$  au  $P$  instants antérieures

$$Q(t), Q(t-dt), Q(t-2dt), \dots Q[t-(p-1)dt]$$

INCONNUE:  $Q(t+dt)$

Hypothèse de calcul:

A: opérateur d'avancement

$$AQ(t) = Q(t+dt) \quad (1)$$

$\nabla$ : opérateur de différences arrières

$$\nabla Q(t) = Q(t) - Q(t - dt) \quad (2)$$

de (1) :  $AQ(t - dt) = Q(t)$

de (2) :  $\nabla Q(t) = AQ(t - dt) - Q(t - dt)$

$$\nabla Q(t) = (A - 1)Q(t - dt)$$

$$A^{-1} \cdot \nabla Q(t) = (A - 1)^{-1} Q(t - dt)$$

$$A^{-1} \cdot \nabla Q(t) = (I - A^{-1}) Q(t - dt)$$

$$\nabla A^{-1} \cdot Q(t) = (1 - A^{-1}) Q(t - dt)$$

⇓

$\nabla = 1 - A^{-1}$
-----------------------

Portant de  $\nabla = 1 - A^{-1}$

on montre :

$$\nabla = (1 - A^{-1}) \cdot \nabla = \nabla = (1 - A^{-1}) = 1 + A^{-2} - A^{-1}$$

$$\nabla = (1 - A^{-1}) \nabla^2 = (1 - A^{-1}) = 1 - 3A^{-1} + 3A^{-2} - A^{-3}$$

$$\nabla = (1 - A^{-1}) \cdot \nabla^p = (1 - A^{-1}) = (1 - PA^{-1} + [p(p-1) \setminus 2] A^{-2} + \dots + (-1)^k \cdot p \cdot A^{-k} + \dots)$$

pour une fonction  $Q(t)$  représentée par le polynôme d'ordre  $(p-1)$  on peut facilement construire l'algorithme d'extrapolation .

**a)Extrapolation linéaire:**

suit  $p=2$   $Q(t)$  est d'ordre 1;  $Q(t)$  : débit observé à la station considéré

$$\nabla^2 Q(t+dt) = 0$$

$$\nabla^2 Q(t+dt) = (1+A^2 - 2A^{-1})Q(t+dt) = 0$$

$$Q(t+dt) = 2A^{-1} Q(t) - A^{-2} Q(t-dt)$$

$$\boxed{Q(t+dt) = 2Q(t) - Q(t-dt)}$$

le débit calculé à l'instant  $(t+dt)$  dépend des débits observés aux instants  $(t)$  et  $(t-dt)$

**b)Extrapolation parabolique**

suit  $p=3$   $Q(t)$  est d'ordre 2

$$\nabla^3 Q(t+dt) = (1-3A + 3A^{-1} - A^{-2}) Q(t+dt) = 0$$

$$Q(t+dt) = 3A^{-1} Q(t) - 3A^{-2} Q(t-dt) + A^{-3} Q(t-2dt)$$

$$\boxed{Q(t+dt) = 3Q(t) - 3Q(t-dt) + Q(t-2dt)}$$

Le débit calculé l'instant  $(t+dt)$  dépend des débits observés aux instants  $t, t-dt, t-2dt$ .

**c)Extrapolation à l'aide d'un polynôme de Newton de 3ème degré**

suit  $p=4$   $Q(t)$  est de l'ordre 3

$$\nabla^4 Q(t+dt) = (1-4A + 6A^{-1} - 4A^{-2} + A^{-3}) Q(t+dt) = 0$$

$$Q(t+dt) = 4A^{-1} Q(t) - 6A^{-2} Q(t-dt) + 4A^{-3} Q(t-2dt) - A^{-4} Q(t-3dt)$$

$$\boxed{Q(t+dt) = 4Q(t) - 6Q(t-dt) + 4Q(t-2dt) - Q(t-3dt)}$$

le débit calculé l'instant  $(t+dt)$  dépend des débits observés aux instants  $t, t-dt, t-2dt, t-3dt$

d) extrapolation d'ordre (P-1)

soit Q(t) d'ordre (P-1)

$$\nabla^p Q(t+dt) = (1-A)^{p-1} \cdot Q(t+dt)$$

$$\nabla^p Q(t+dt) = \left\{ 1 - PA + \frac{[p(p-1)]}{2} A^2 + \dots + (-1)^k \cdot \frac{p!}{k!} A^k + \dots \right\} Q(t+dt) = 0$$

$$Q(t+dt) = PQ(t) - \frac{P(p-1)}{2} Q(t-dt) + \dots + (-1)^k \cdot \frac{p!}{k!} Q(t-dkdt) + \dots + (-1)^{p-1} Q[t-(p-1)dt]$$

Parmi toute ces équations présentés, nous avons choisie extrapolation linéaire dans cette étude, pour le calcul du débit prévue.

VI-2-1-2- METHODE LISSAGE

Le lissage consiste à utiliser une fonction d'approximation sans forcement coïncider avec la fonction implicite. Faisant intervenir des conditions de régularité qui lissent l'approximation avec l'hypothèse d'intervalle de temps constant entre les points successifs d'observations et de prévision.

Pour la détermination des coefficient du polynôme de lissage, nous avons utiliser la méthode des moindres carrés habituelle (*THIRRIOT* 1984) nous avons construit des polynôme particulier donnant plus de poids à la dernière information disponible au temps t, ceci pouvant aller jusqu'à imposer la coïncidence entre observation et approximation à ce temps t; c'est ce que nous avons appelé formule à PIVOT.

soit la fonction d'approximation

$$\omega = c_0 + c_1 u + \varepsilon$$

en faisant l'approximation linéaire de cette fonction, on aura la fonction linéaire suivante

$$\omega' = c_0 + c_1 u$$

les coefficients c<sub>0</sub>, c<sub>1</sub> sont calculés par la méthode des moindres carrés dont le principe est de minimiser (  $\sum \varepsilon^2_i$  )

$$\sum_{i=0}^{p-1} \varepsilon^2_i = \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)]^2$$

$$S = \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)]^2$$

nous allons minimiser cette expression par rapport à  $c_0, c_1$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial s}{\partial c_0} = 2 \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] (-1) = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial c_1} = 2 \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] (-u_i) = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] = 0 \\ \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] u_i = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] (-1) &= \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i - \sum_{i=0}^{p-1} (c_0 + c_1 u_i) \\ &= \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i - [p c_0 + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i] = 0 \end{aligned}$$

d'où 
$$\sum_{i=0}^{p-1} \omega_i = p c_0 + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{p-1} [\omega_i - (c_0 + c_1 u_i)] u_i &= \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i u_i - \sum_{i=0}^{p-1} (c_0 u_i + c_1 u_i^2) \\ &= \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i u_i - c_0 \sum_{i=0}^{p-1} u_i + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i^2 \end{aligned}$$

$$\text{d'ou } \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i u_i = c_0 \sum_{i=0}^{p-1} u_i + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i^2$$

on aura le système:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i = p c_0 + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i \\ \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i u_i = c_0 \sum_{i=0}^{p-1} u_i + c_1 \sum_{i=0}^{p-1} u_i^2 \end{array} \right.$$

sous forme de matrice:

$$\begin{array}{c|c|c|c} \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i & & \sum_{i=0}^{p-1} u_i & c_0 \\ \hline \sum_{i=0}^{p-1} \omega_i u_i & & \sum_{i=0}^{p-1} u_i & c_1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c|c|c|c} p & & \sum_{i=0}^{p-1} u_i & c_0 \\ \hline \sum_{i=0}^{p-1} u_i & & \sum_{i=0}^{p-1} u_i^2 & c_1 \\ \hline \end{array}$$

a) lissage linéaire à deux points de base

$p=2$  ,  $u_i = i$

$$\left| \begin{array}{c|c|c|c} \omega_0 + \omega_1 & & 2 & 1 & c_0 \\ \hline 0 + \omega_1 & & 1 & 1 & c_1 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c|c|c|c} 2 & 1 & c_0 \\ \hline 1 & 1 & c_1 \end{array} \right|$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 + \omega_1 = 2c_0 + c_1 \\ 0 + \omega_1 = c_0 + c_1 \end{array} \right. \implies \begin{array}{l} c_0 = \omega_0 \\ c_1 = \omega_1 - \omega_0 \end{array}$$

la fonction linéaire s'écrit alors:

$$\omega' i = c_0 + c_1 u_i = \omega_0 + (\omega_1 - \omega_0) u_i$$

on pose:  $\omega' i = Q(t-id)$

$$\omega' -1 = Q(t+d) = Q(t) + [Q(t-d) - Q(t)](-1)$$

$$\boxed{Q(t+d) = 2Q(t) - Q(t-d)}$$

**b) lissage linéaire à trois points de base:**

$$p=3 \quad ; \quad u_i=i$$

$$\begin{vmatrix} \omega_0 + \omega_1 + \omega_2 \\ 0 + \omega_1 + 2\omega_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} c_0 \\ c_1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} c_0 \\ c_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 5 \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} \omega_0 + \omega_1 + \omega_2 \\ 0 + \omega_1 + 2\omega_2 \end{vmatrix} \implies \begin{aligned} c_0 &= \frac{1}{6}(5\omega_0 + 2\omega_1 - \omega_2) \\ c_1 &= \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_0) \end{aligned}$$

la fonction linéaire s'écrit alors:

$$\omega'_i = c_0 + c_1 u_i = \frac{1}{6}(5\omega_0 + 2\omega_1 - \omega_2) + \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_0) u_i$$

$$\text{on pose : } \omega'_i = Q(t - id)$$

$$\omega'_{-1} = Q(t + d) = \frac{1}{6}[5Q(t) + 2Q(t-d) - Q(t-2d)] + \frac{1}{2}[Q(t-2d) - Q(t)](-1)$$

$$Q(t + d) = \left[ \frac{4Q(t) + Q(t-d) - 2Q(t-2d)}{3} \right]$$

nous avons choisie lissage linéaire à 3 points de base pour le calcul du débit prévue.

**VI-2-2 METHODES A LIAISONS SPATIALES**

La classe des méthodes à liaison spatiales est innombrable (nombreuse) et pour des raisons évidentes de temps et de coût, nous avons choisi la méthode de MUSKINGUM et la méthode de 'REGRESSION MULTIPLE'.

## VI-2-2-1 METHODE DE MUSKINGUM

### a) généralités

Cette méthode a été établie aux *ETATS-UNIS* sur la rivière *MUSKINGUM*, par *M. CARTHY*. le but de cette méthode été la prévision des débits à partir des débits connus au temps antérieures.

### **HYPOTHESE:**

On admet que les caractéristiques de l'écoulement changent peu dans tous le tronçon (une faible variation de la forme du lit et de sa pente, faible variation de la pente de charge).

On suppose que la qualité de liquide contenu à l'intérieur de l'élément de rivière est une fonction linéaire de débit entrant  $Q_a$  (amont) et de débit sortant  $Q_v$  (aval).

### Equation de base

cette méthode est basée sur les équations de Barré-Saint Venant ( l'équation dynamique est négligé)

a- équation de continuité: 
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial t} = q \quad (1)$$

b- équation dynamique négligée  $I=J$

comme: 
$$Q = V.S = K. \sqrt{Rh} . I . S$$

$$I = J = \frac{Q^2}{K^2.S^2.Rh}$$

I: pente du fond du bief

J: pente de ligne de charge

K: coefficient de STRICKLER

S: section mouillée

Rh: rayon hydraulique

### b) ALGORITHME DE MUSKINGUM

Soit un bief de rivière limité par un profil amont, repéré par l'indice  $m$  et un profil aval repéré par l'indice  $V$ , dans lequel se trouve accumulé un volume  $\Omega$ .

suit  $q(x,t)$  le débit d'apport latéral par unité de longueur l'équation de continuité s'écrit sous la forme différentielle :

$$\frac{d\Omega}{dt} = Q_m - Q_v + \int_{x_m}^{x_v} q(x,t) dx$$

en négligeant les apports  $q=0$ , on obtient le modèle de MUSKINGUM, avec hypothèse d'obtenir une relation linéaire entre  $Q_m(t+dt)$ ,  $Q_m(t)$ ,  $Q_v(t+dt)$  et  $Q_v(t)$  on aura:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{2} d [Q_m(t) + Q_m(t+d) - Q_v(t) - Q_v(t+d)]$$

on obtient:

$$Q_v(t+d) = a_{v0} Q_v(t) + a_{m0} Q_m(t) + a_{m1} Q_m(t+d)$$

avec:  $d$  le délai de prévision

$t$  le moment où l'on fait la prévision

$Q_m(t)$ ,  $Q_v(t)$ : débits historiques amont et aval respectivement

$Q_m(t+d)$ ,  $Q_v(t+d)$ : débits futures amont et aval respectivement

### c) Application de la méthodes de MUSKIGUM pour la prévision des crues

Ce modèle permet de calculer le débit à l'aval à l'instant  $(t+d)$ , connaissant les débits amont et aval au temps  $t$  et la valeur du débit amont au temps  $(t+d)$ , ce qui est impossible en temps réel; pour cela il faudra extrapoler l'hydrogramme amont en utilisant l'extrapolation linéaire à l'amont, on obtient le calage de ce modèle en remplaçant  $Q_m(t+d)$  par:

$$Q_m(t+d) = 2Q_m(t) - Q_m(t-d)$$

$$Q_v(t+d) = a_{v0} Q_v(t) + a_{m0} Q_m(t) + a_{m1} [2Q_m(t) - Q_m(t-d)]$$

$a_v$ ,  $a_{m0}$  et  $a_{m1}$  sont des coefficients à déterminer par optimisation .

la méthode choisie pour l'optimisation des paramètres est la méthode des moindres carrés.

### Méthode des moindres carrés

cette méthode consiste à minimiser la somme des carrés entre les valeurs observées et la valeur calculée.

mathématiquement:

$$E = \sum_{i=1}^n [Q_{cal} - Q_{obs}]^2$$

#### d) Détermination des coefficients:

On suppose qu'en absence de pluie sur le bassin, le régime est permanent, alors:

$$\begin{aligned} a_{v0} + a_{m0} + a_{m1} &= 1 \\ \text{d'où} \quad a_{v0} &= 1 - a_{m0} - a_{m1} \end{aligned}$$

on détermine ces coefficients à partir d'une crue antérieure à l'aide de la méthode des moindres carrés.

$$Q_v(t+d) = Q_v(t) + a_{m0} [Q_m(t) - Q_v(t)] + a_{m1} [2Q_m(t) - Q_m(t-d) - Q_v(t)]$$

On va minimiser l'expression obtenue par rapport aux coefficients  $a_{m0}$ ,  $a_{m1}$

$$E = \sum_{2d+1}^{n-d} [Q_v(t+d) - Q_v(t) - a_{m0} [Q_m(t) - Q_v(t)] - a_{m1} [2Q_m(t) - Q_m(t-d) - Q_v(t)]]^2$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{m0}} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial E}{\partial a_{m1}} = 0$$

on trouve le système suivant:

$$B1 - a_{m0}A1 - a_{m1}A2 = 0$$

$$B2 - a_{m0}A3 - a_{m1}A4 = 0$$

$$B1 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t+d) - Q_v(t)] [Q_m(t) - Q_v(t)]$$

$$A1 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_m(t) - Q_v(t)]^2$$

$$A2 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_m(t+d) - Q_v(t)] [Q_m(t) - Q_v(t)]$$

$$B2 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t+d) - Q_v(t)] [Q_m(t+d) - Q_v(t)]$$

$$A3 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_m(t) - Q_v(t)] [Q_m(t+d) - Q_v(t)]$$

$$A4 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_m(t+d) - Q_v(t)]^2$$

avec :

$$Q_m(t+d) = 2Q_m(t) - Q_m(t-d)$$

le système s'écrit sous forme matricielle:

$$\begin{vmatrix} B1 \\ B2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 & A2 \\ A3 & A4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} am0 \\ am1 \end{vmatrix}$$

en résolvant le système on trouve:

$$am0 = \frac{Det1}{Det} = \frac{B1A4 - B2A2}{A1A4 - A2A3}$$

Det : determinant

$$am1 = \frac{Det2}{Det} = \frac{A1B2 - A3B1}{A1A4 - A2A3}$$

$$av0 = 1 - am0 - am1$$

## VI -2-2-2 METHODE A REGRESSION MULTIPLE

### a) introduction

La méthode a régression multiple a été développée par les travaux de **BOX** et **JENKINS**, cette méthode est une estimation à caractère statistique, aboutit à un algorithme analogue à la méthode de MUSKINGUM.

Cette méthode prend peu de termes fait intervenir deux informations à l'aval et une information à l'amont.

d'où la formule:

$$Q_v(t+d) = a_{m0} Q_m(t+d) + a_{v0} Q_v(t) + a_{v1} Q_v(t-d)$$

avec: d : le délai de prévision

t : le moment où l'on fait la prévision

$Q_m(t+d)$  : débit future amont

$Q_v(t)$ ,  $Q_v(t-d)$ : débit aval

### b) Application de la méthode de régression multiple pour la prévision des crues

Cette méthode permet de calculer le débit aval à l'instant (t+d), connaissant les débits aval au temps t et (t-d), et le débit amont au temps (t+d), ce qui est impossible en temps réel, en utilisant l'extrapolation linéaire à l'amont, on remplaçant

$$Q_m(t+d) = 2Q_m(t) - Q_m(t-d)$$

on obtient :

$$Q_v(t+d) = a_{m0} [2Q_m(t) - Q_m(t-d)] + a_{v0} Q_v(t) + a_{v1} Q_v(t-d)$$

$a_{v0}$ ,  $a_{v1}$  et  $a_{m0}$  sont des coefficients à déterminer par optimisation, la méthode choisie pour l'optimisation des paramètres est la méthode des **moindres carrés**.

### c) Détermination des coefficients:

on suppose qu'en absence de pluie sur le bassin, le régime est permanent:

$$a_{v0} + a_{v1} + a_{m0} = 1$$

$$a_{v1} = 1 - a_{m0} - a_{v0}$$

$$Q_v(t+d) = a_{m0} [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)] + a_{v0} [Q_v(t) - Q_v(t-d)] + Q_v(t-d)$$

après avoir minimiser l'expression obtenue par rapport aux coefficients  $am_0$  et  $av_0$  on aura:

$$E = \sum_{2d+1}^{n-d} [Q_v(t+d) - Q_v(t-d) - am_0 [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)] - av_0 [Q_v(t) - Q_v(t-d)]]$$

$$\frac{\partial E}{\partial am_0} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial E}{\partial av_0} = 0$$

$$B1 - am_0 A1 - av_0 A2 = 0$$

$$B2 - am_0 A3 - av_0 A4 = 0$$

$$B1 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t+d) - Q_v(t-d)] [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)]$$

$$A1 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)]^2$$

$$A2 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t) - Q_v(t-d)] [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)]$$

$$B2 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t+d) - Q_v(t-d)] [Q_v(t) - Q_v(t-d)]$$

$$A3 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t) - Q_v(t-d)] [Q_m(t+d) - Q_v(t-d)]$$

$$A4 = \sum_{2d+1}^{n+d} [Q_v(t) - Q_v(t-d)]^2$$

sous forme de matrice

$$\begin{vmatrix} B1 \\ B2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A1 & A2 \\ A3 & A4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} am_0 \\ av_0 \end{vmatrix}$$

en résolvant le système on trouve:

$$am_0 = \frac{\text{Det1}}{\text{Det}} = \frac{B_1A_4 - B_2A_2}{A_1A_4 - A_2A_3}$$

$$avo = \frac{\text{Det2}}{\text{Det}} = \frac{A_1B_2 - A_3B_1}{A_1A_4 - A_2A_3}$$

$$av_0 = 1 - am_0 - avo$$

***CHAPITRE VII***

***RESULTATS ET DISCUSSIONS***

## VII -1- OBJECTIF:

L'objectif de notre étude est la comparaison des possibilités des différents modèles simples de prévision des crues en temps réel.

La comparaison des modelés permet de :

- \* choisir le modèle de base à utiliser
- \* plusieurs modelés en cas de difficultés. Cela consiste à classer les modelés par ordre de préférence, ainsi lorsque le modèle de base est rejeté, on examine le modèle suivant.

## VII -2- CRITERES DE COMPARAISON

Pour vérifier la qualité de l'ajustement des modelés étudiés, nous avons utilisés deux critères simples.

### 1- Erreur quadratique moyenne -S-

Comme, nous avons beaucoup utilisé la méthode des moindres carrés, l'erreur quadratique moyenne représente la dispersion moyenne des erreurs sur la variable étudiée, dans notre étude cette variable est le débit.

Cette erreur représente l'écart type des écarts entre prévision  $Q_p$  et observation  $Q_{obs}$ , elle a pour expression :

$$S = \left[ \sum_{t=1}^N (Q_{obs} - Q_p)^2 / N \right]^{1/2}$$

$N$  : nombre total d'observations au cours de la même crue.

### 2- critère de NASH

*NASH* et *SUTCLIFFE* (1970) présentent une nouvelle classe de critère de qualité plus élaborés.

Ils introduisent le coefficient d'efficacité  $E$ , il a pour expression:

$$E = 1 - \left\{ \frac{\varepsilon^2}{\sigma^2} \right\}$$

$\varepsilon^2$  est l'écart type des écarts entre prévision  $Q_p$  et observation  $Q_{obs}$

$$\varepsilon^2 = \{ \sum ( Q_p(j\Delta t) - Q_{obs}(j\Delta t) )^2 \} / N$$

$\sigma_{obs}^2$  est l'écart type de la distribution discrète des débits observés

$$\sigma_{obs}^2 = \sum [ Q_{obs}(j\Delta t) - \bar{Q}_{obs} ]^2 / N$$

$N$  : nombre total d'observations au cours de la même crue.

$\bar{Q}_{obs}$  est la valeur moyenne.

$$\bar{Q}_{obs} = \{ \sum Q_{obs}(j\Delta t) \} / N$$

le critère de *Nash* exprimé en pourcentage s'écrit :

$$E = 100 ( 1 - \{ \varepsilon^2 \backslash \sigma_{obs}^2 \} )$$

Plus  $E$  tend vers 100% plus le modèle est bon et meilleur, les valeurs négatives correspondent à des modèles mauvais.

### VII-3 -PRESENTATION DES RESULTATS

Pour faire la prévision par les quatre modèles étudiés, nous avons utilisés les données observées aux stations de **BAGHLIA** et **BELLOUA** et pour les trois crues survenues à oued **SEBAOU**.

Pour chaque crue nous avons construit deux tableaux de synthèse représentant le coefficient d'efficacité  $E$  et l'erreur quadratique moyenne  $S$ . Pour un pas de prévision de (1) une heure à (6) six heures.

Nous avons présenté dans la partie annexes, pour chaque crue et pour chaque pas de temps, les graphes correspondant aux quatre modèles ainsi le graphe du débit observé sur la même feuille.

## VII INTERPRETATION DES RESULTATS

### A/ A PARTIR DES CRITERES NUMERIQUES

#### **CRITERE DE NASH: E**

Du point de vue extrapolation et lissage, ces méthodes les plus simples sont les plus satisfaisants et meilleur, ils donnent des résultats très bons pour les premiers pas de temps: jusqu'à (4) quatre heures, au delà de cette valeur, les résultats ne sont pas bonne, on marque la valeur 1% pour le modèle lissage linéaire (d=6h 'crue1') ainsi que les valeurs négatives pour les modèles extrapolation et lissage (d=6h 'crue2'), sauf pour la crue n°3 où les résultats sont très bons pour tous les pas de prévisions.

En ce qui concerne les méthodes à liaison spatiale, les résultats sont très bons pour tous les pas de prévision marqué par le modèle *MUSKINGUM* et la méthode à 'régression multiple'.

#### **ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE : S**

Les méthodes *MUSKINGUM* et 'régression multiples' donnent des résultats bonnes et meilleures que les méthodes extrapolations et lissage qui commencent a donner des résultats mauvais à partir de d=2h ,

On remarque que les valeurs donnés par les méthodes *MUSKINGUM* et 'régression multiples' pour d=3h sont meilleurs que les valeurs données par extrapolation et lissage pour d=3h et d=2h, la même remarque pour d=4h, d=5h, d=6h.

### B/ ANALYSE GRAPHIQUE

#### **La première crue:**

Les débits prévues 1h, 2h sont presque confondus avec la crue historique.

Les débits prévus à 3 heures, par les modèles *MUSKINGUM* et 'régression' sont presque confondus avec le débit observé pour les méthodes extrapolation et lissage, l'hydrogramme des débits prévues augmente beaucoup par rapport au débit observé.

$$Q_{\text{extra}}(\text{max}) = 1204(\text{m}^3/\text{s}), Q_{\text{liss}}(\text{max}) = 1280(\text{m}^3/\text{s})$$

à partir de d=4h, il y'a un décalage entre les débits prévues et le débit observé. On remarque que les débits prévues par les méthodes *MUSKINGUM* et 'régression' sont presque les même; pour extrapolation et lissage les hydrogrammes atteignent des niveaux de pointe maximum.

Q (max) = 1268 (m<sup>3</sup>/s)  
extra

Q (max) = 1288 (m<sup>3</sup>/s)  
lissé

Ce décalage entre les débits prévus et le débit observé augmente au fur et à mesure que le délai de prévision augmente (d=5h, d=6h), on remarque qu'il y'a aucune ressemblance entre les quatre graphes prévus, ainsi que le niveau de pointe maximum est donné par les méthodes immédiates, pour d=6heures, il y'a la formation d'une crue complexe à trois pointes pour extrapolation et lissage.

### crue2

Les débits prévus par les méthodes immédiates à 1 heure, 2 heures sont presque confondues avec la crue historique, alors que les débits prévus par les méthodes à liaisons spatiales ne le sont pas et les niveaux de pointe atteignent des valeurs maximaux de: 3121,684 (m<sup>3</sup>/s) pour la méthode de **MUSKINGUM** est de : 3118,7525 (m<sup>3</sup>/s) pour la régression d=2h.

à partir de d=3h, les débits prévus ne sont pas confondues avec la crue historique, par contre les hydrogrammes prévus sont confondues entre eux, surtout au niveau de la montée .

Les débits maximaux sont marqués par extrapolation et lissage, le décalage entre les débits prévus et le débit observé augmente au fur et à mesure que le délai de prévision augmente aussi (à partir de d=4h), les débits prévus par les modèles de **MUSKINGUM** et '**régression**' donnent presque les mêmes débits. Pour d=6h, on a une crue complexe à 2 pointes, marqué par les méthodes extrapolation et lissage.

### crue3

Les débits prévus à d=1h, d=2h sont presque confondues avec la crue historique à partir de d=3h, les débits prévus ne sont pas confondues avec cette crue historique, ce décalage augmente au fur et à mesure que le délai de prévision augmente (d=4h, 5h, 6h), on remarque que les débits prévus par les modèles de **MUSKINGUM** et '**régression**' donnent presque les même hydrogrammes prévus; aussi les débits maximaux atteignent les valeurs maximaux par les méthodes extrapolation et lissage de 487,867 m<sup>3</sup>/s et 558,8 m<sup>3</sup>/s

**CRUE N°1**OBSERVATION : STATION B. ~~ELL~~OU A

PREVISION : STATION BAGHLIA

DUREE : 1 HEURE

**CRITERE DE NASH:E (%)**

<b>Modèle d(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Extrapolation linéaire</b>	98	94	84	65	40	10
<b>lissage linéaire</b>	98	91	76	54	29	1
<b>Muskingum avec extrapolation 'amont'</b>	99	98	97	88	70	49
<b>Régression avec observation 'amont'</b>	99	98	95	87	64	57

**Erreur quadratique moyenne:S**

<b>Modèle d(h)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Etrapolation linéaire</b>	33,246	77,990	122,874	180,848	234,011	288,32
<b>lissage linéaire</b>	32,785	91,220	150,967	208,941	254,233	302,206
<b>Muskingum avec extrapolation 'amont'</b>	29,433	38,155	53,445	106,849	165,293	216,046
<b>Régression avec observation 'amont'</b>	25,094	42,235	67,437	109,168	182,125	199,105

CRUE N°2

OBSERVATION : STATION BELLEGA

PREVISION : STATION BAYONNE

DUREE : 1 HEURE

**CRITERE DE NASH-E (%)**

Modèle d(h)	1	2	3	4	5	6
Extrapolation linéaire	98	93	79	59	30	-6,72
lissage linéaire	98	89	71	45	8	-38,68
Muskingum avec extrapolation 'amont'	98	97	94	89	77	62
Régression avec observation 'amont'	99	98	94	87	74	60

**Erreur quadratique moyenne:S**

Modèle d(h)	1	2	3	4	5	6
Extrapolation linéaire	110,020	230,577	382,743	542,203	688,958	897,367
lissage linéaire	118,180	281,384	454,094	633,884	861,871	1022,949
Muskingum avec extrapolation 'amont'	94,164	140,447	200,315	281,926	396,031	530,114
Régression avec observation 'amont'	69,535	116,020	196,233	301,297	421,030	546,058

CRUE N°3

OBSERVATION : BACCUA

PREVISION : BACQUA

DUREE : 1 HEURE

**CRITERE DE NASH-E (%)**

Modèle d(h)	1	2	3	4	5	6
Extrapolation linéaire	99	95	88	86	85	85
lissage linéaire	98	93	91	90	89	88
Muskingum avec extrapolation 'amont'	98	96	95	94	94	94
Régression avec observation 'amont'	99	98	96	95	94	93

**Erreur quadratique moyenne:S**

Modèle d(h)	1	2	3	4	5	6
Extrapolation linéaire	10,998	29,790	45,296	49,010	50,004	49,304
lissage linéaire	14,365	33,057	39,529	46,591	41,276	43,894
Muskingum avec extrapolation 'amont'	14,685	24,04	28,193	32,574	32,622	32,273
Régression avec observation 'amont'	8,687	18,150	23,875	28,102	32,622	35,214

## CONCLUSION

Au cours de cette étude, quatre méthodes sont mises en concurrence avec des délais de prévision allant de 1 heure à 6(six) heures. Nous <sup>meu</sup> sommes rendus compte que chaque méthode avait ses inconvénients et ses avantages.

Les méthodes d'extrapolation et lissage sont satisfaisante dans les montées et les descentes mais désastreuses au voisinage du maximum de niveau a courte échéance, l'extrapolation et lissage sont les plus satisfaisantes et meilleur et ce paradoxalement d'autant plus que le délai de prévision augmente;

La méthode de *MUSKINGUM* est la plus robuste, elle résiste bien à l'augmentation du délai de prévision surtout pour l'appréciation du débit maximal.

La méthode à régression amène a mieux la prévision du débit maximal pour les pas de temps élevés, elle parait la plus souple et efficace.

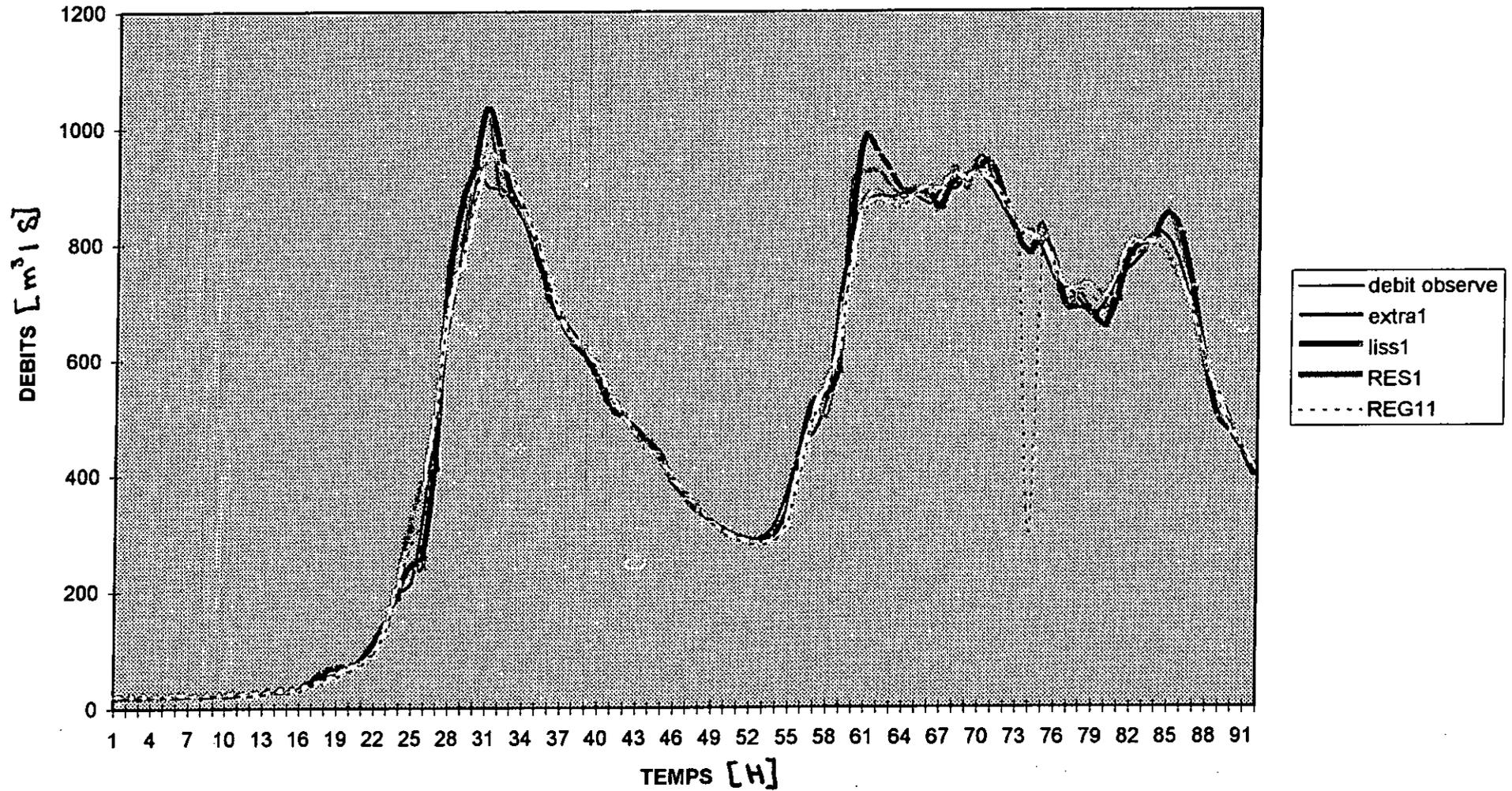
En conclusion, l'amélioration optimale est assurée par les algorithmes à liaison spatial de méthode de *MUSKINGUM* et régression .

Par conséquent, les méthodes à liaison spatial sont applicable avec des délais de prévision allant jusqu'à six heures par pas d'heure. Pour l'oued *SEBAOU* les résultats sont très bons.

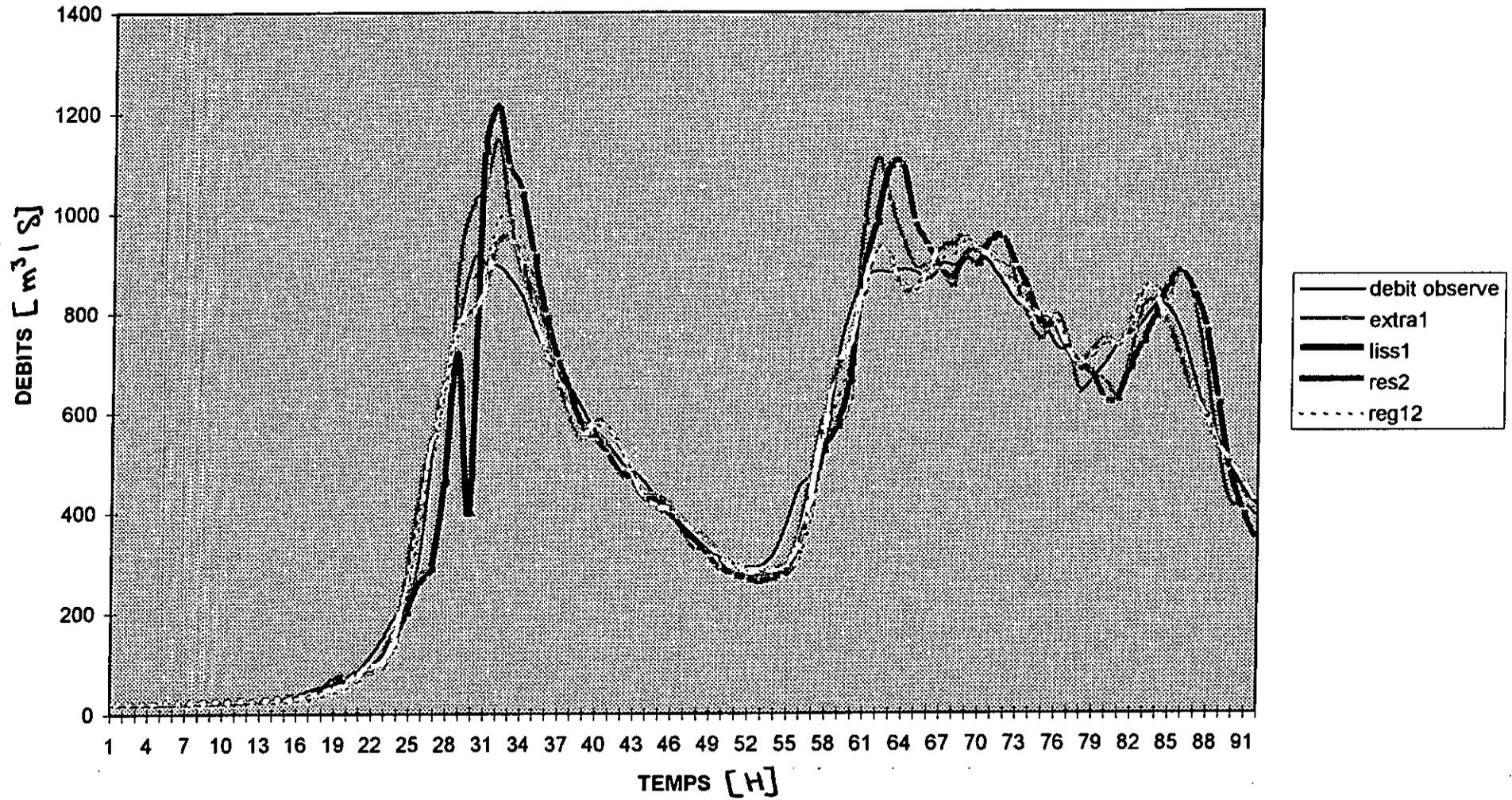
***CHAPITRE VIII***

***ANNEXES***

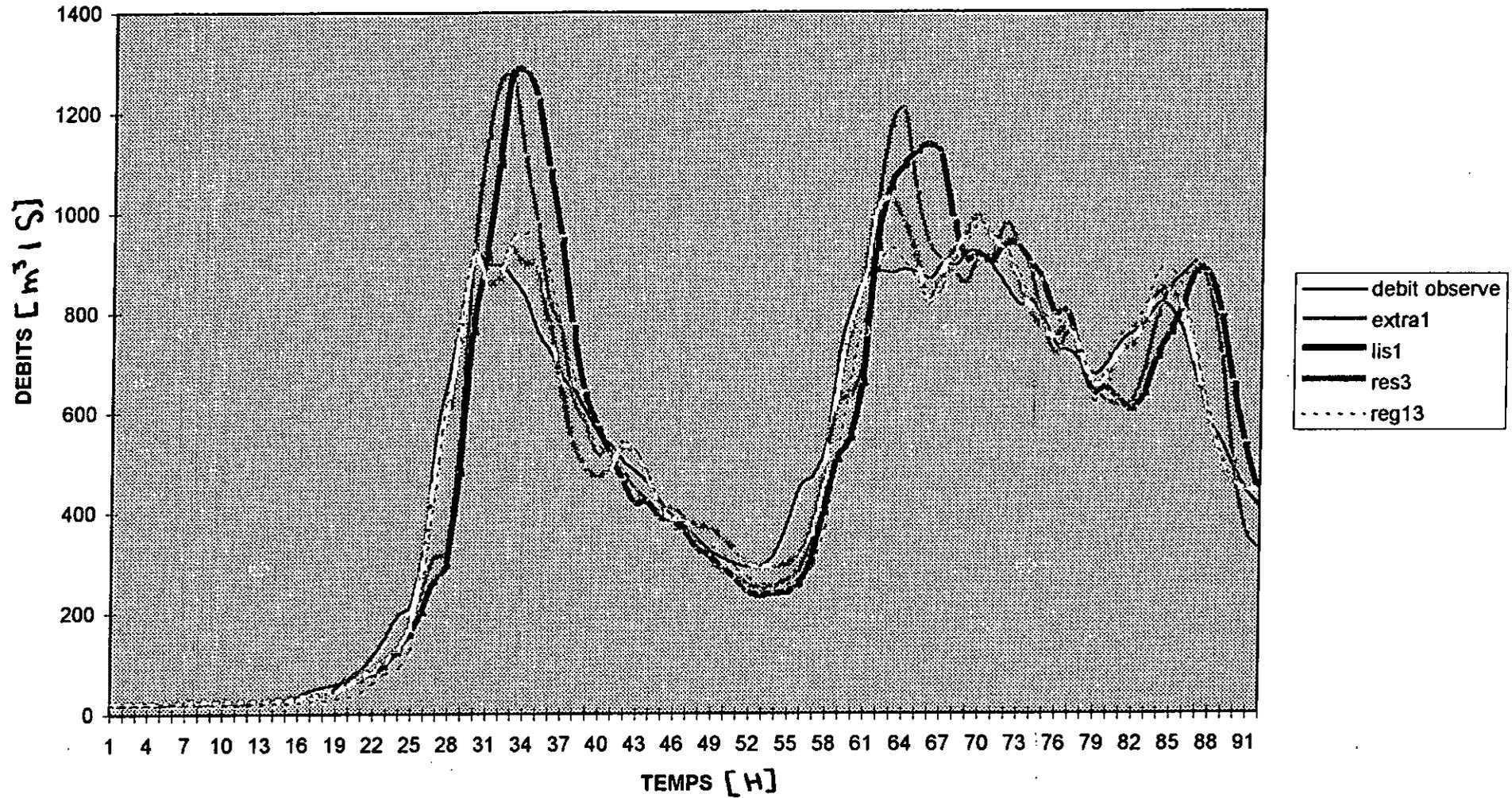
PAS DE TEMPD 1H CRUE1



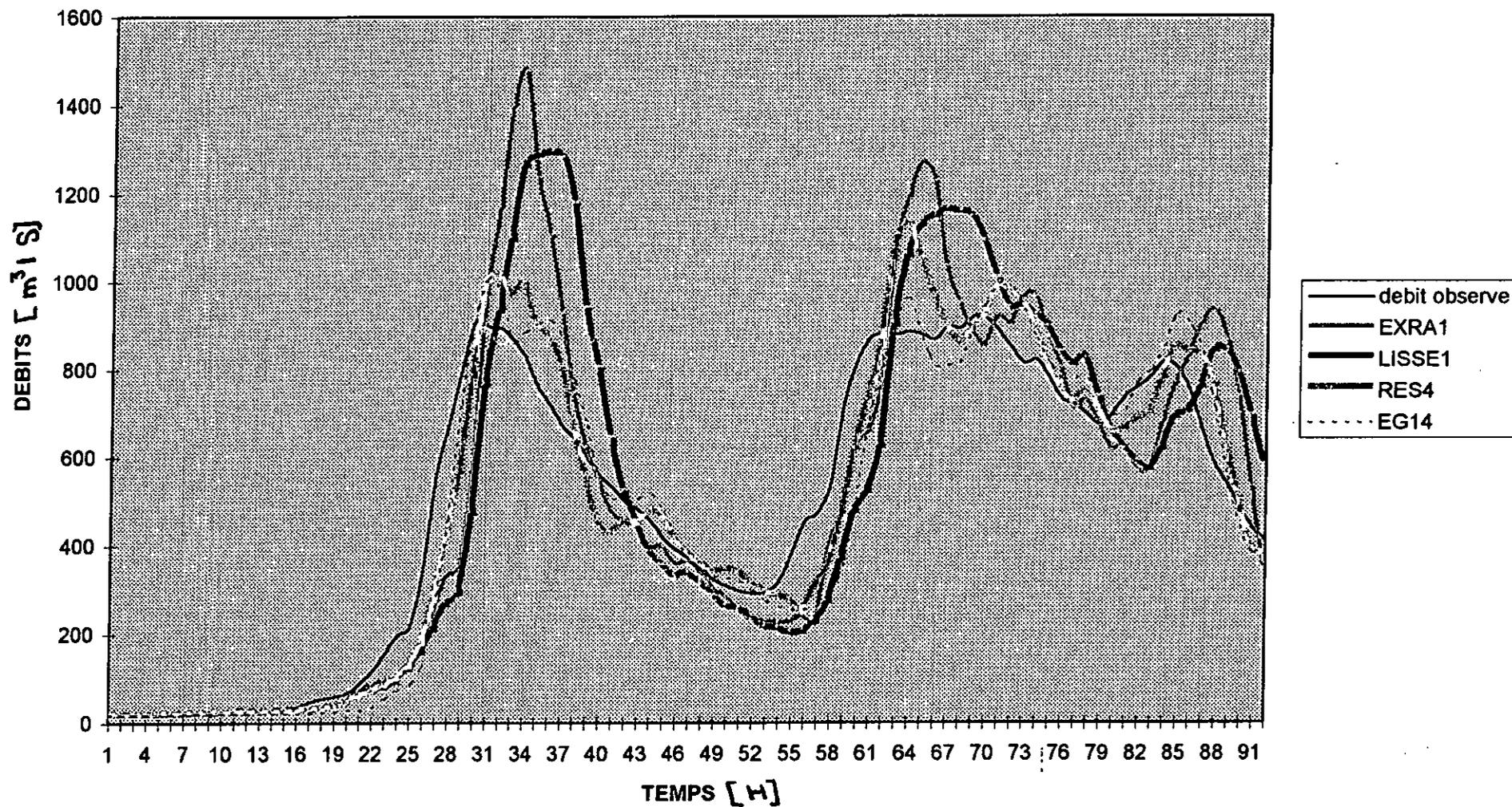
# PAS DE TEMPS 2H CRUE1



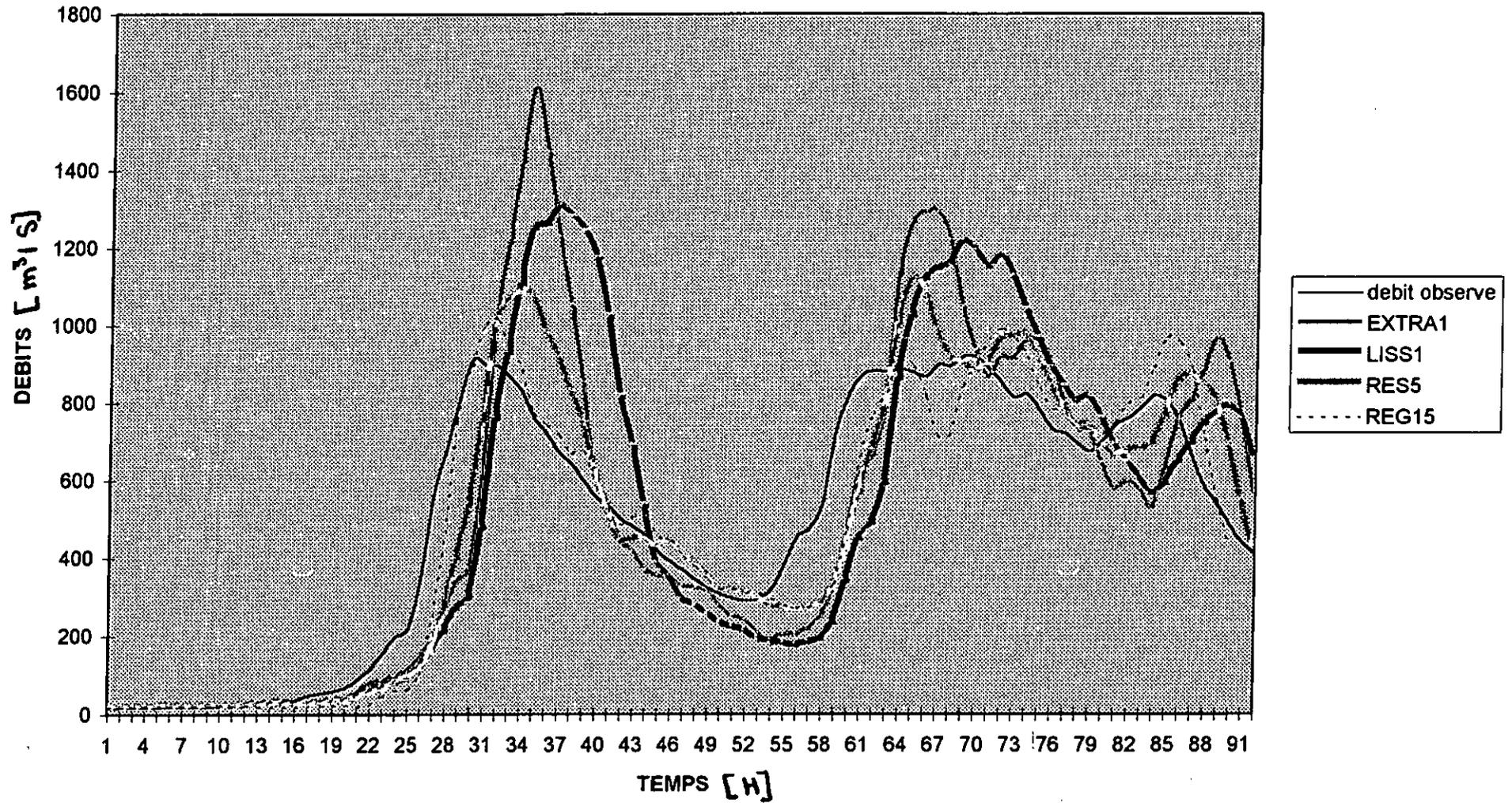
# PAS DE TEMPS 3H CRUE1



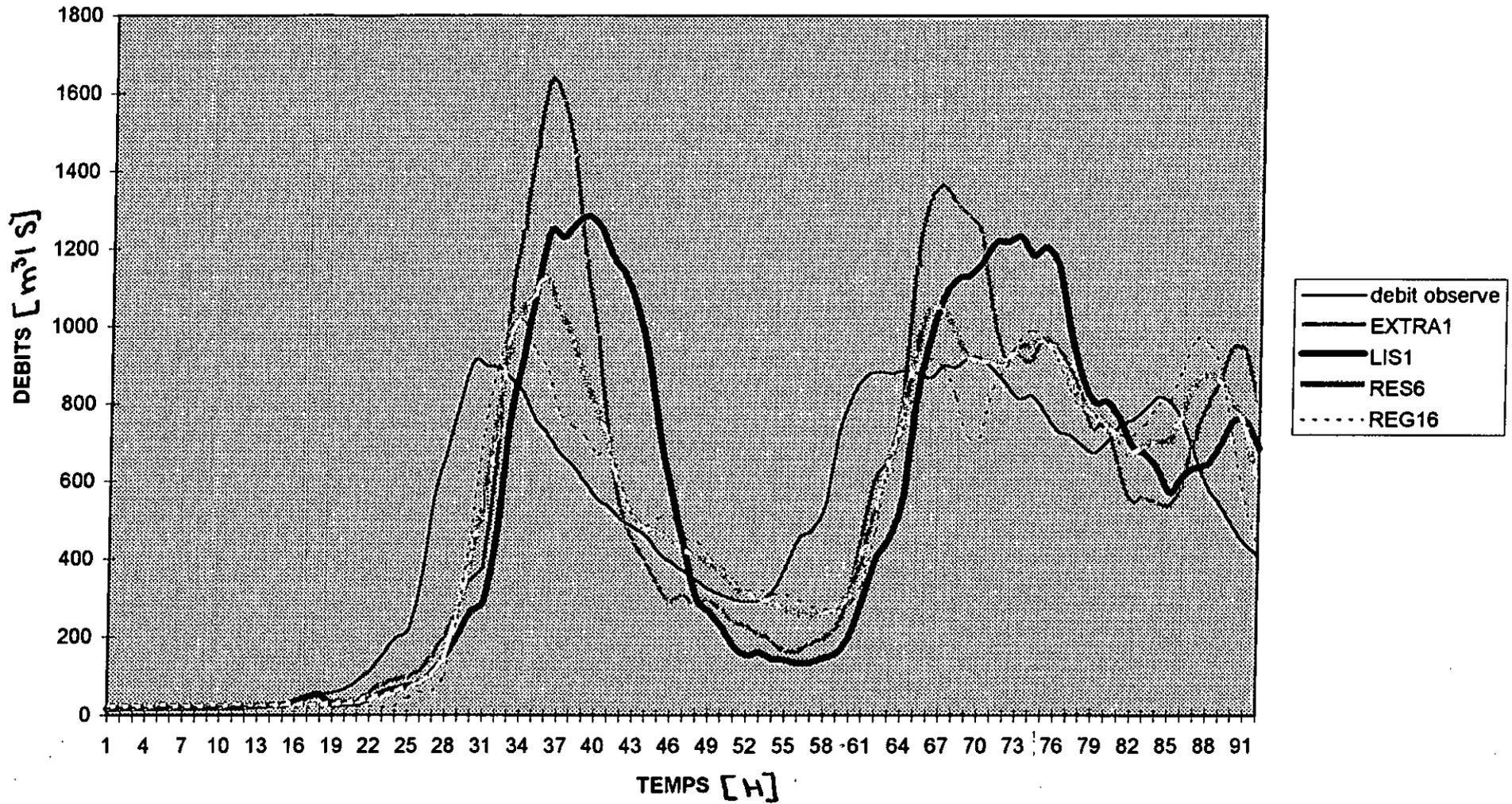
# PAS DE TEMPS 4H CRUE1



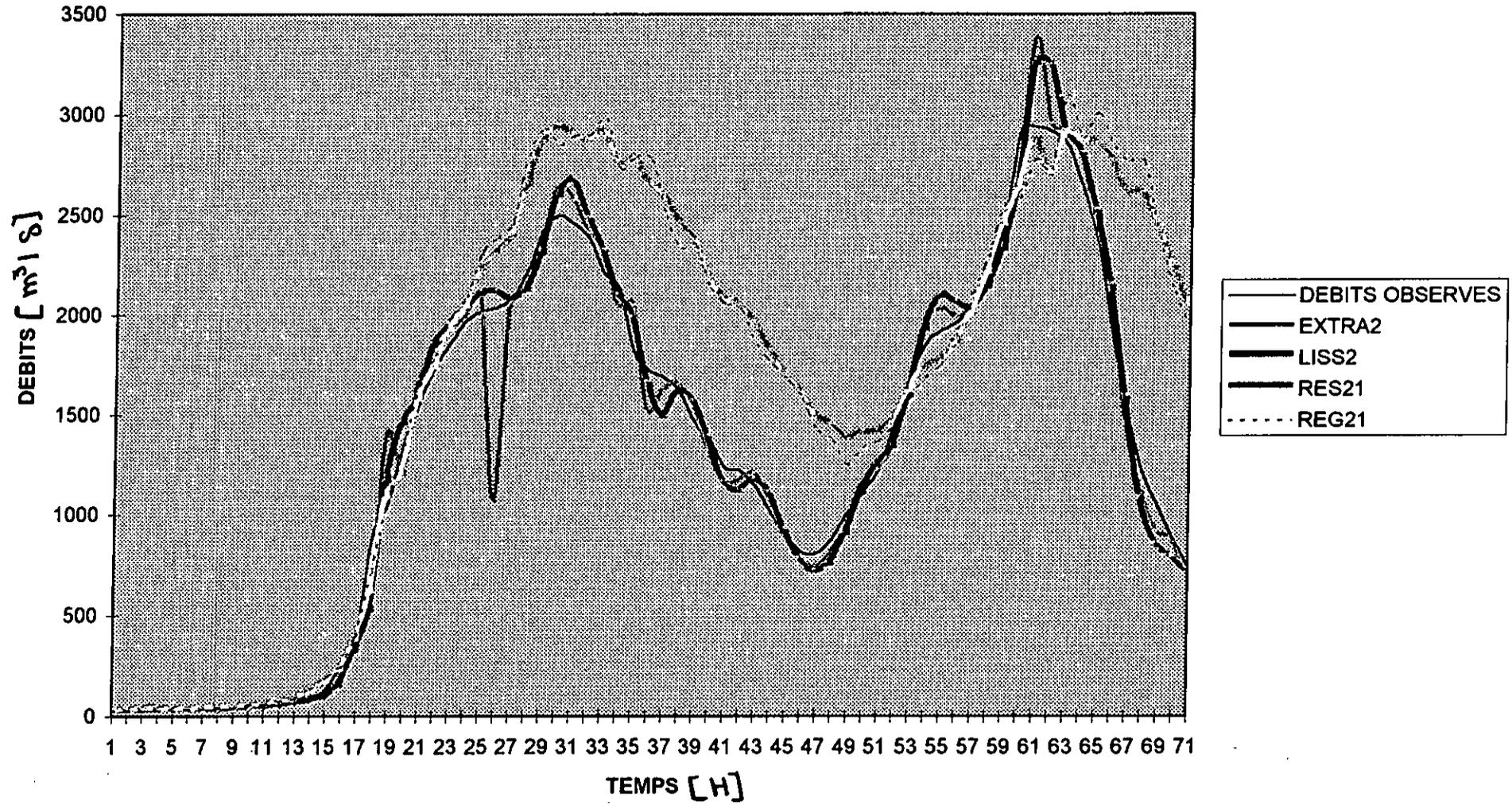
# PAS DE TEMPS 5H CRUE1



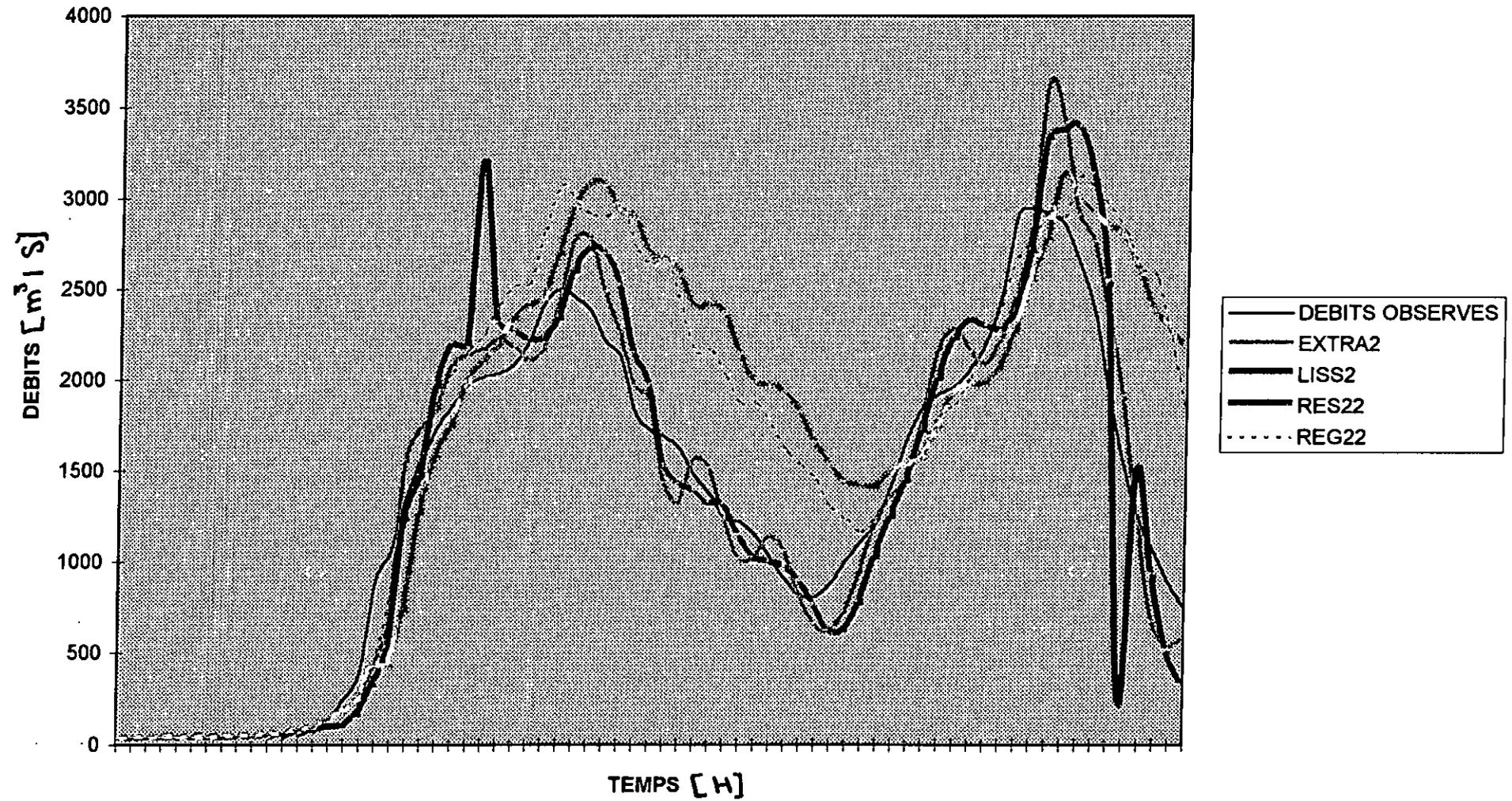
# PAS DE TEMPS 6H CRUE1



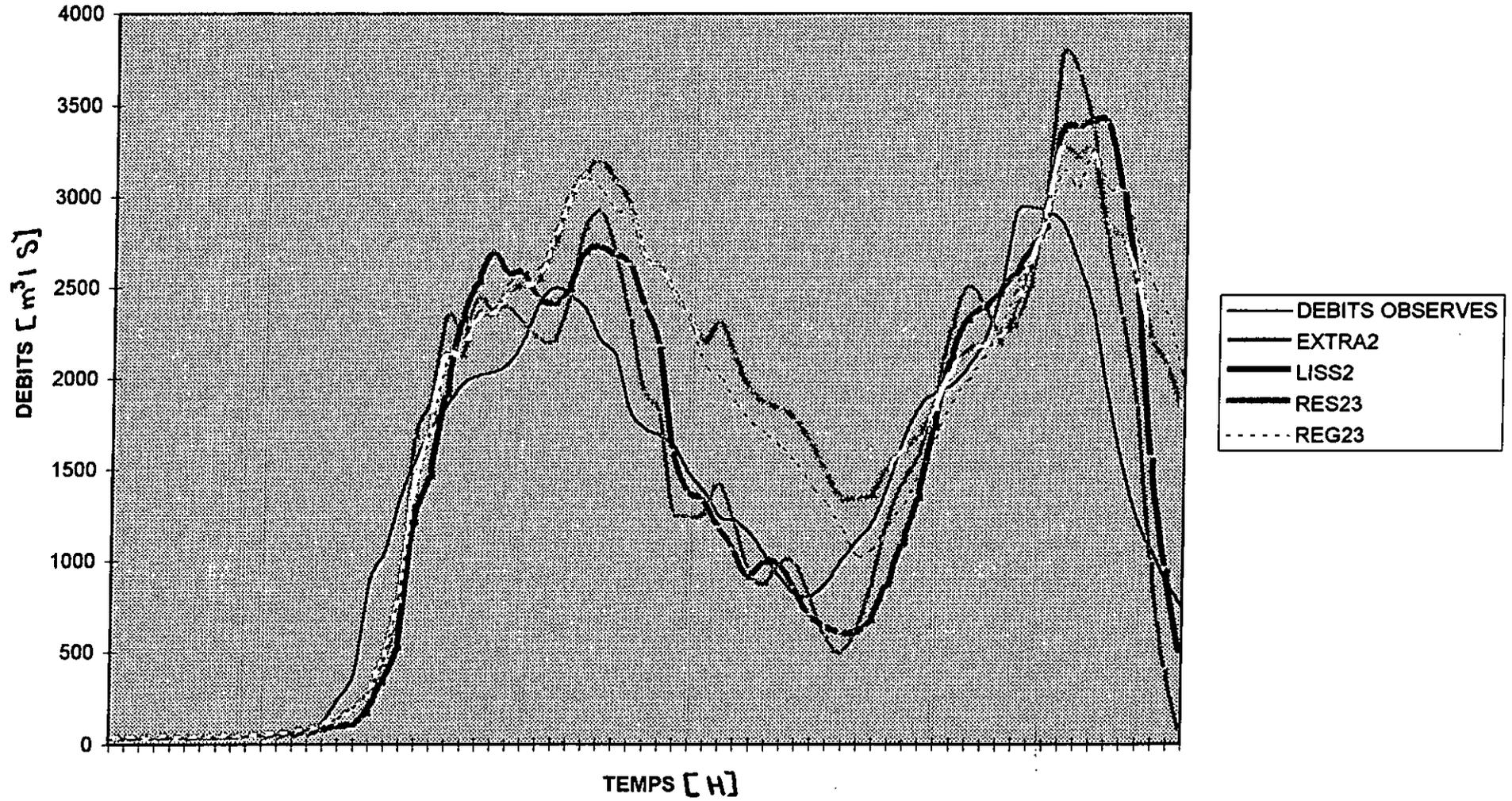
# PAS DE TEMPS 1 CRUE2



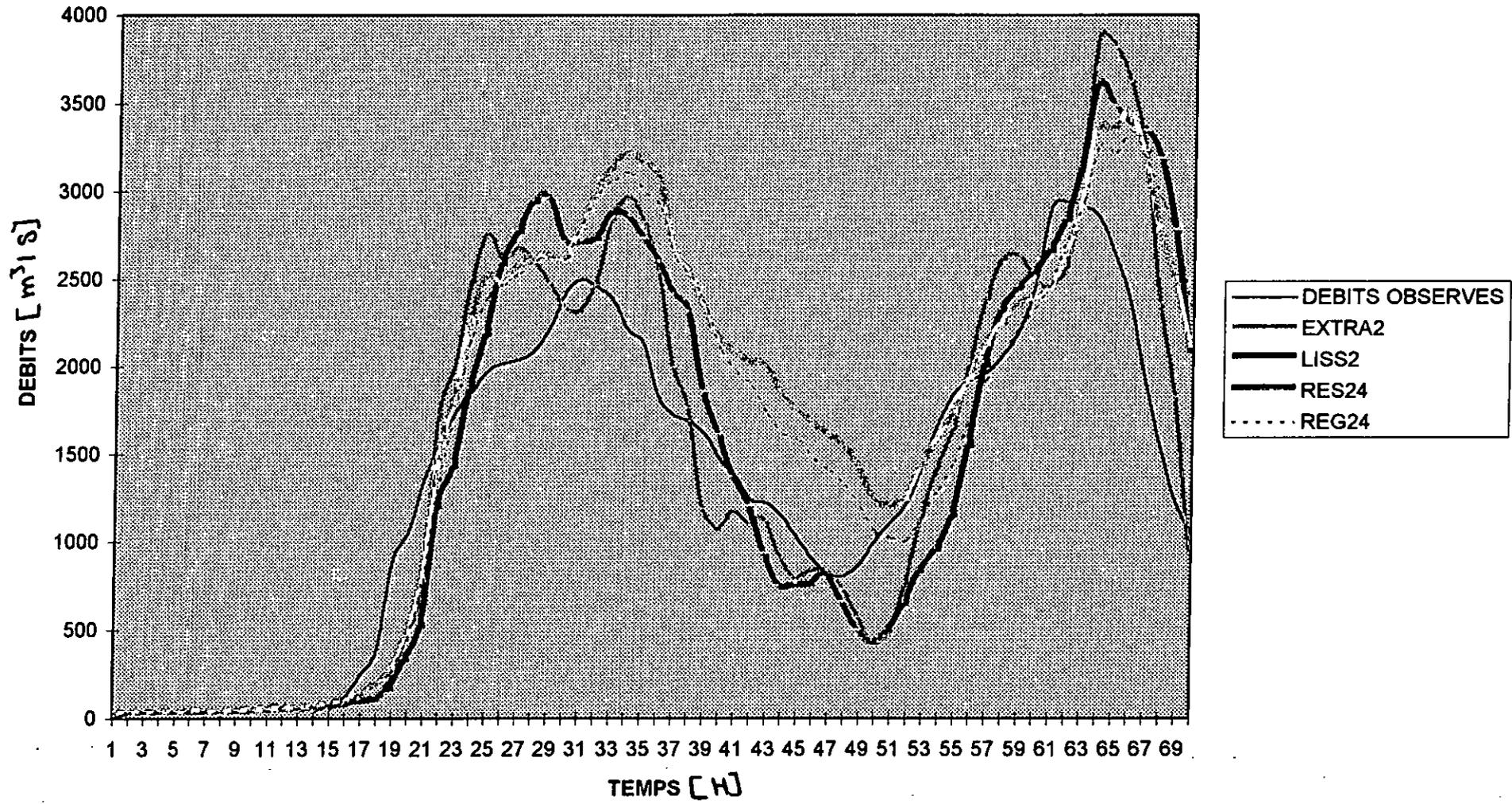
# PAS DE TEMPS 2 CRUE2



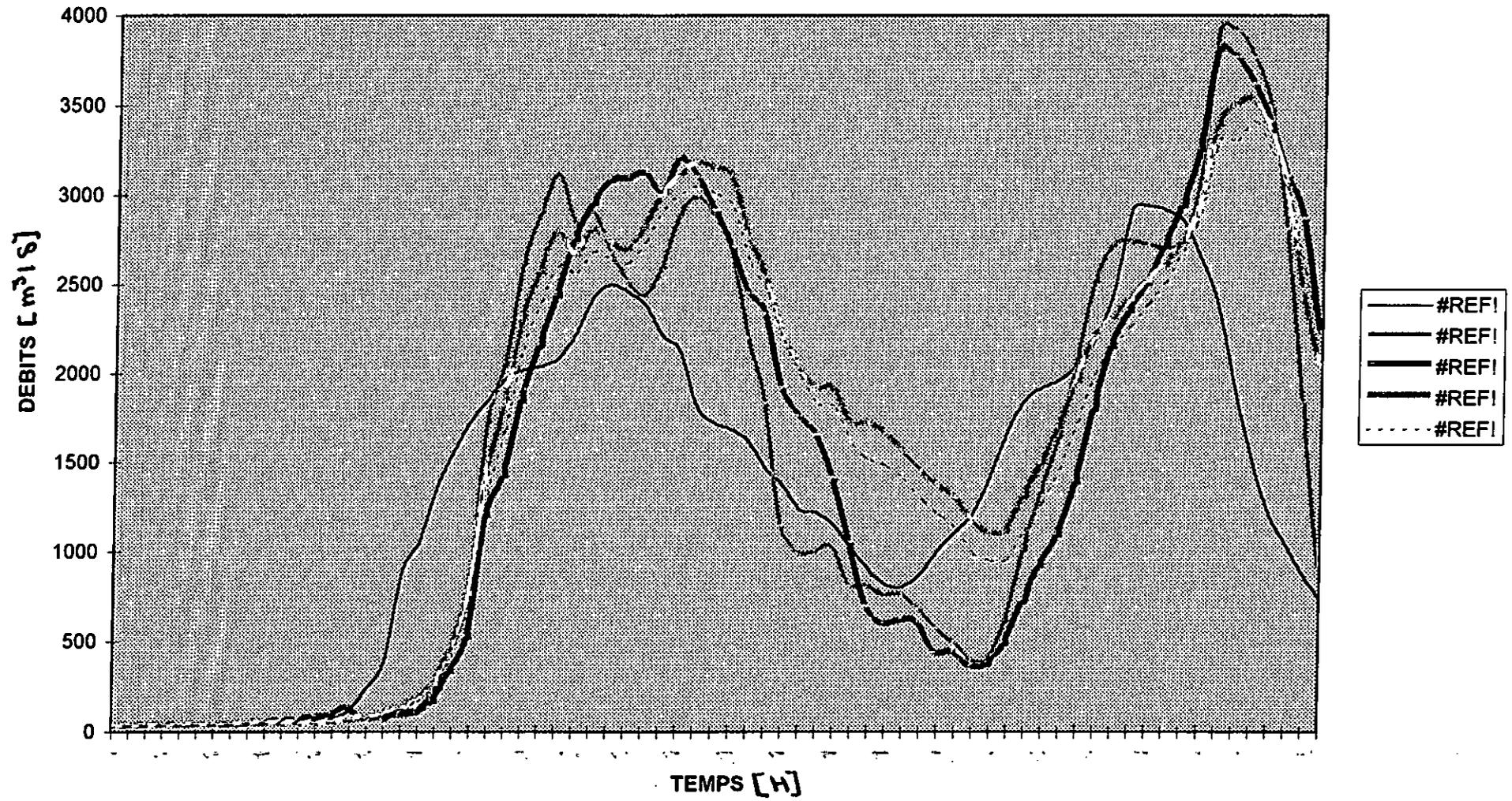
PAS DE TEMPS 3 CRUE2



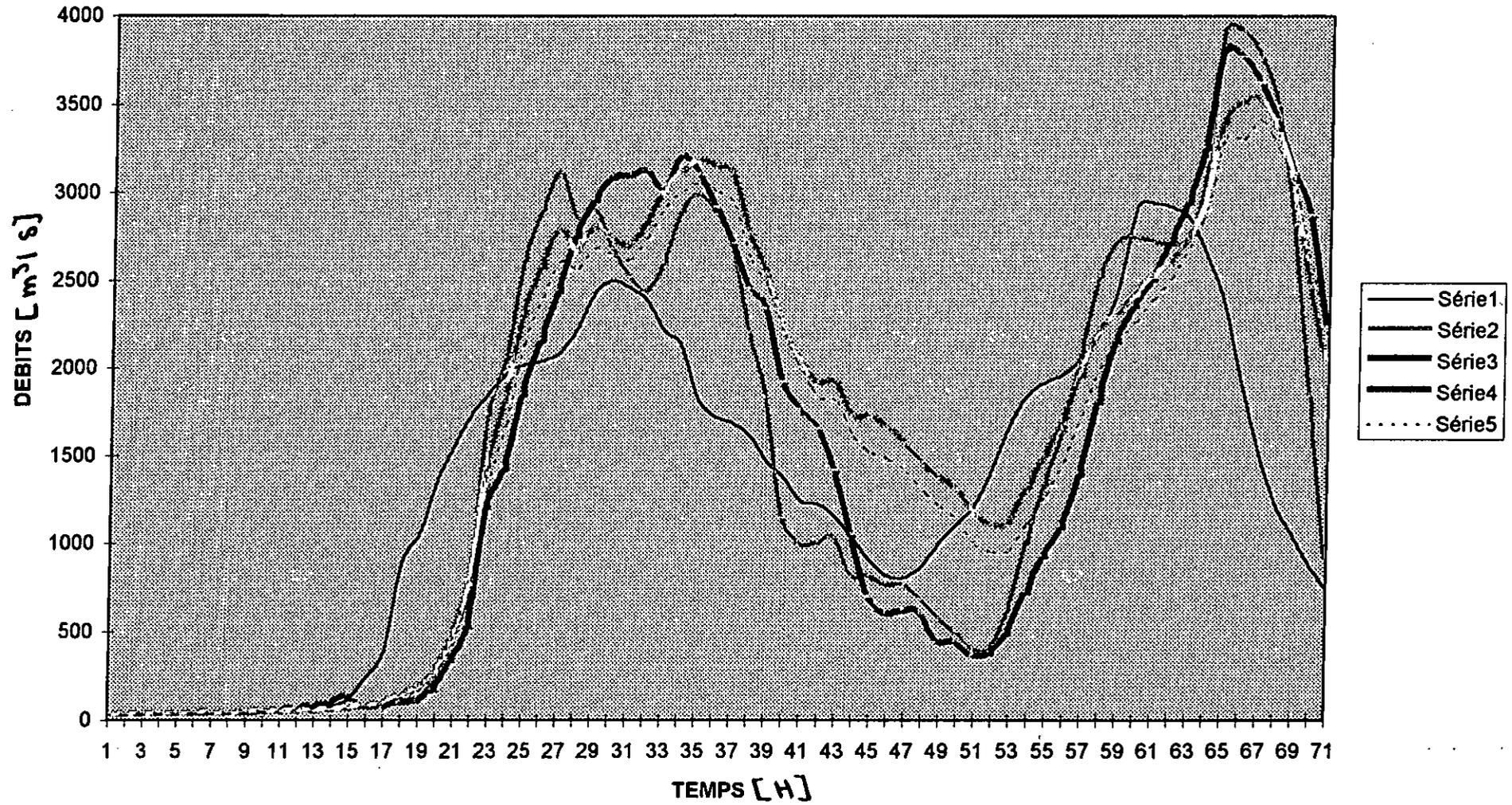
# PAS DE TEMPS 4 CRUE2



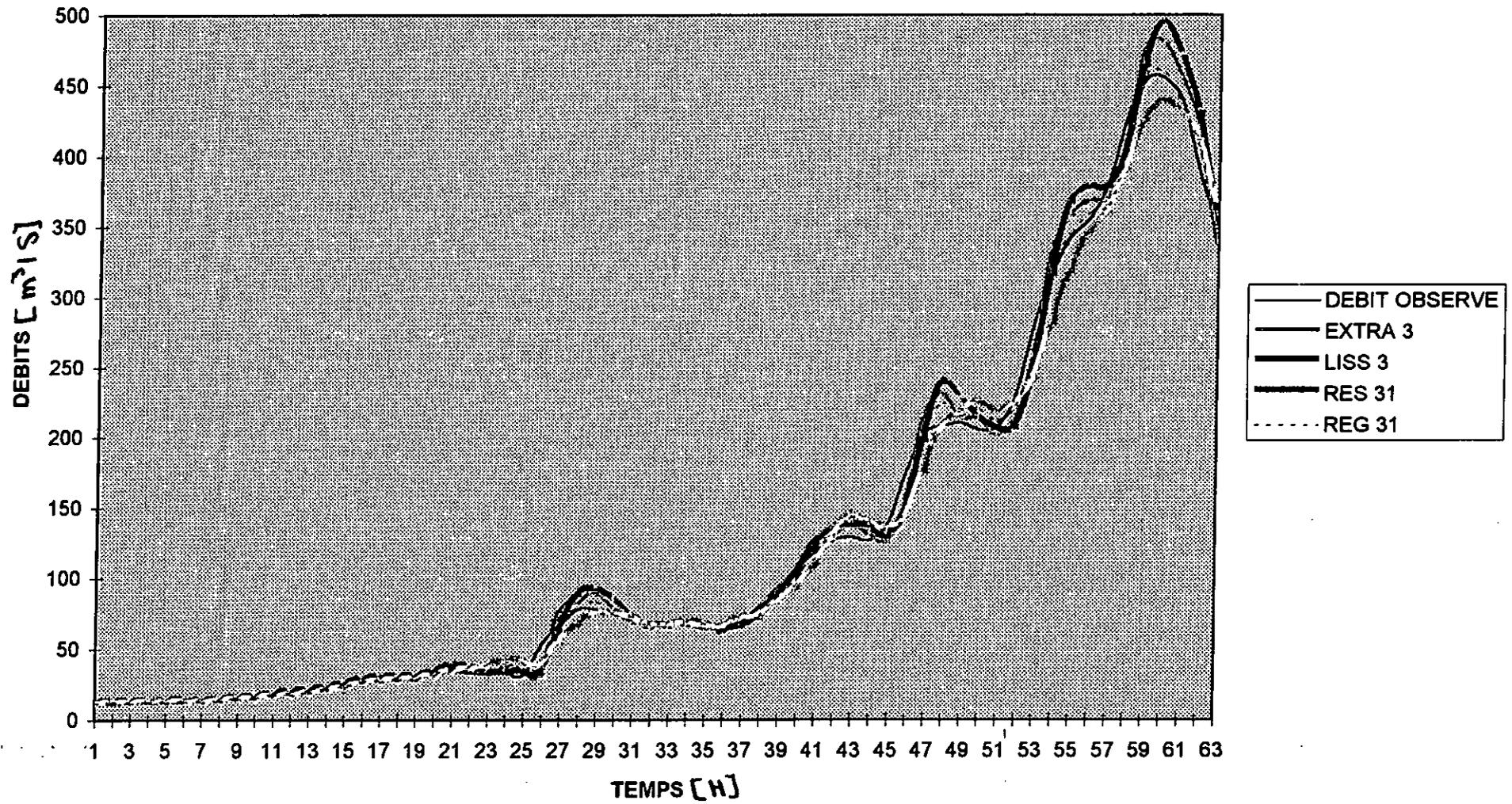
# PAS DE TEMPS 5 CRUE2



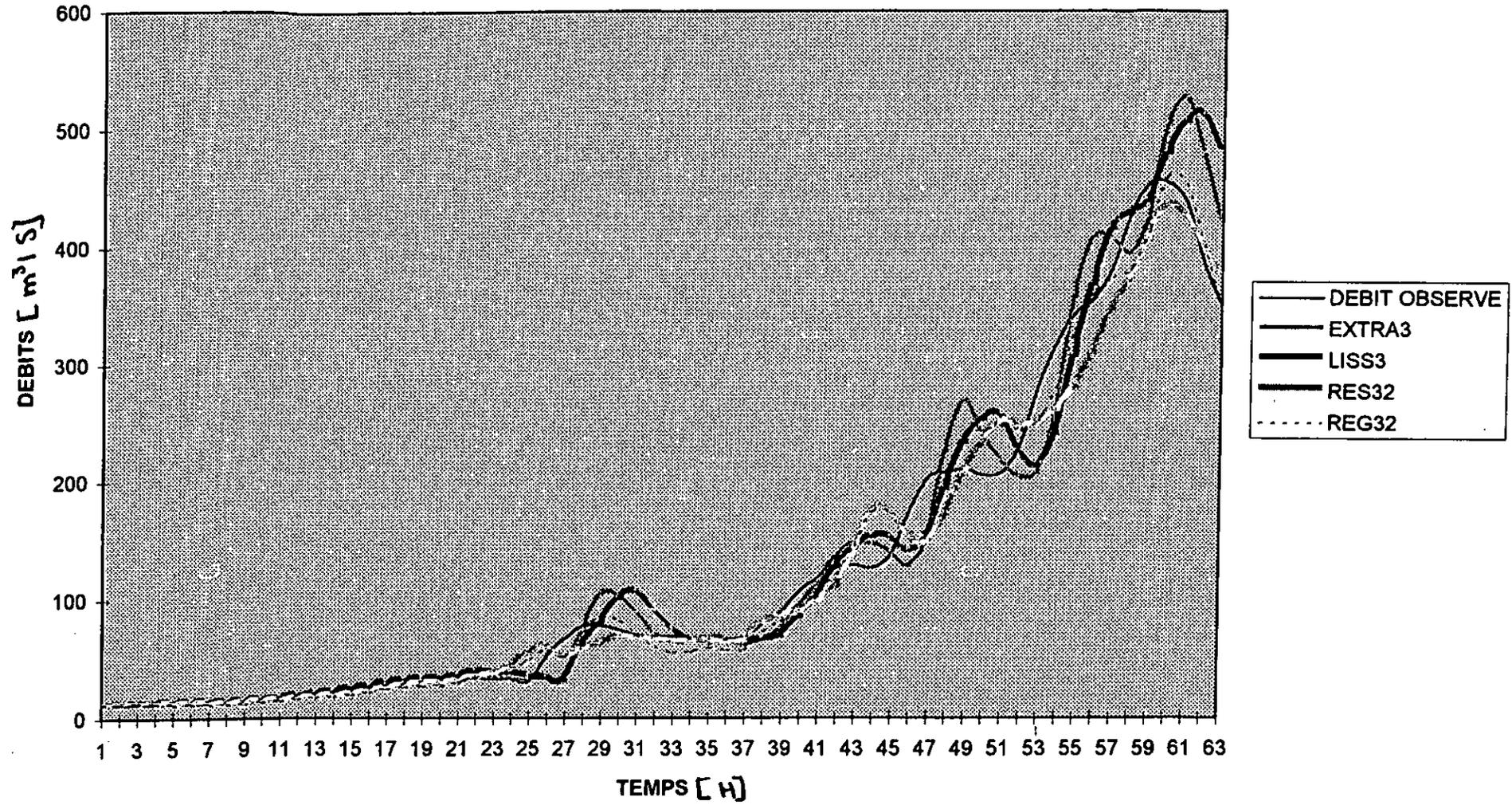
# PAS DE TEMPS 6H CRUE2



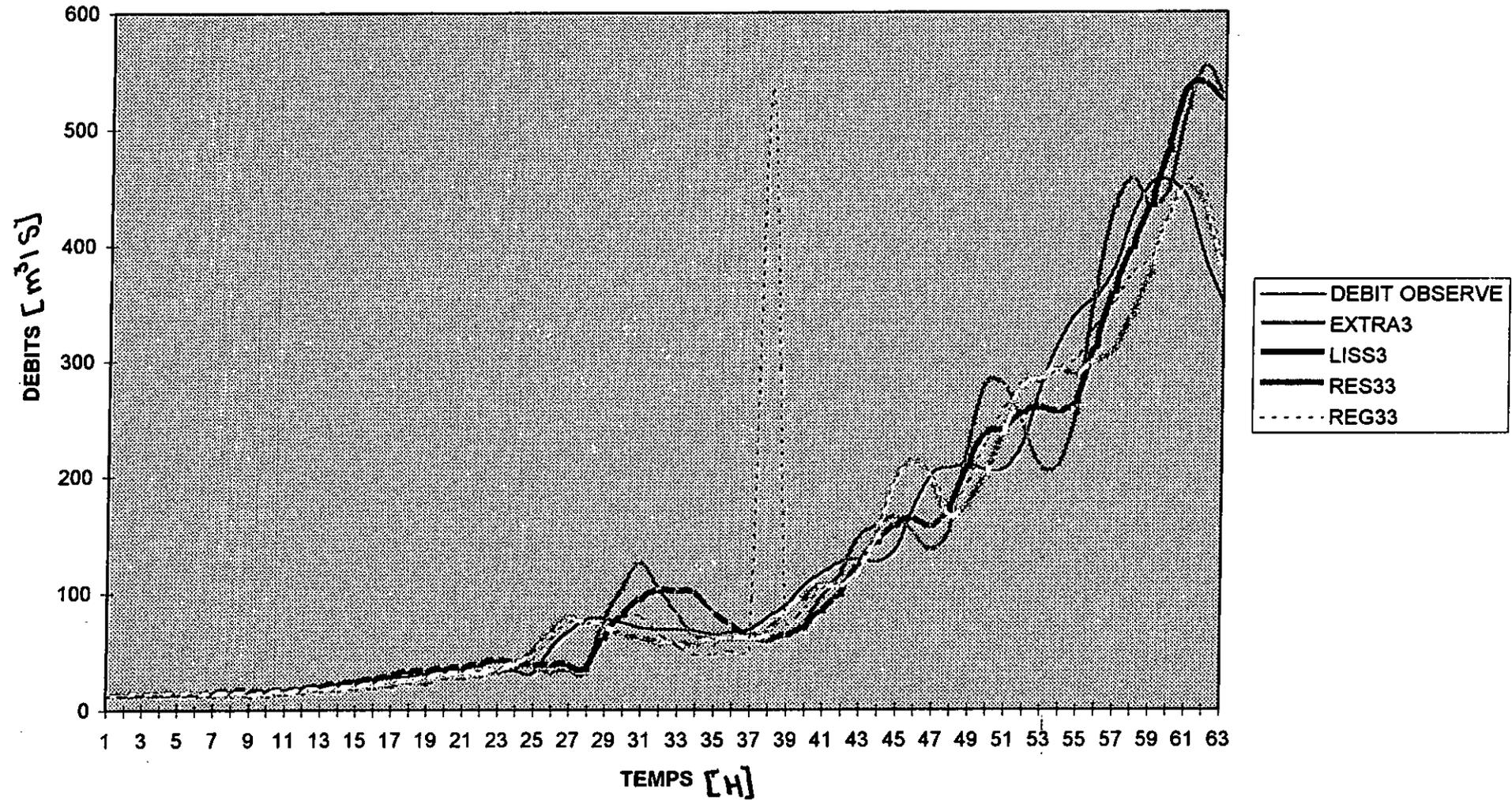
### PAS DE TEMPS 1H CRUE3



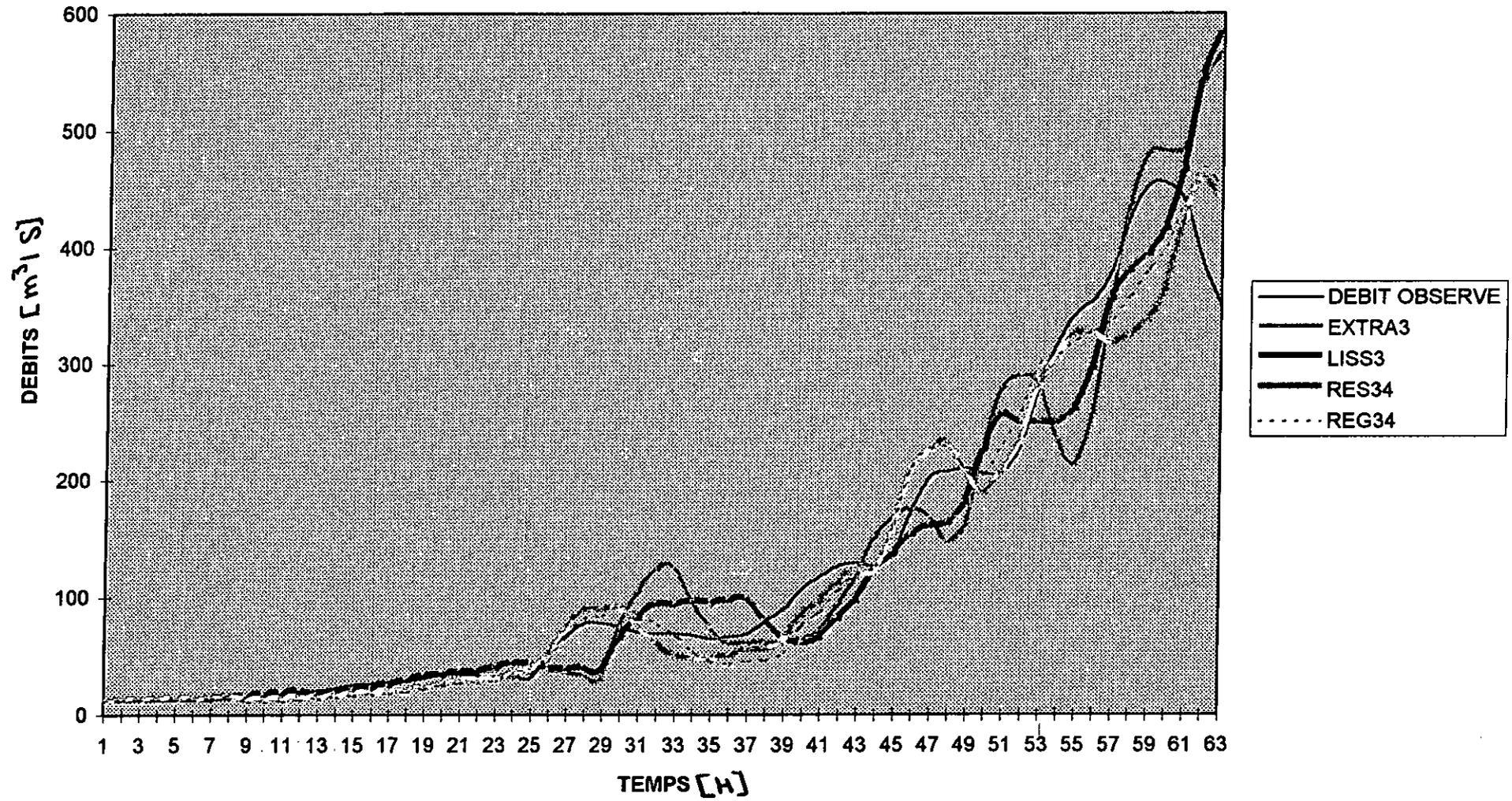
### PAS DE TEMPS 2H CRUE3



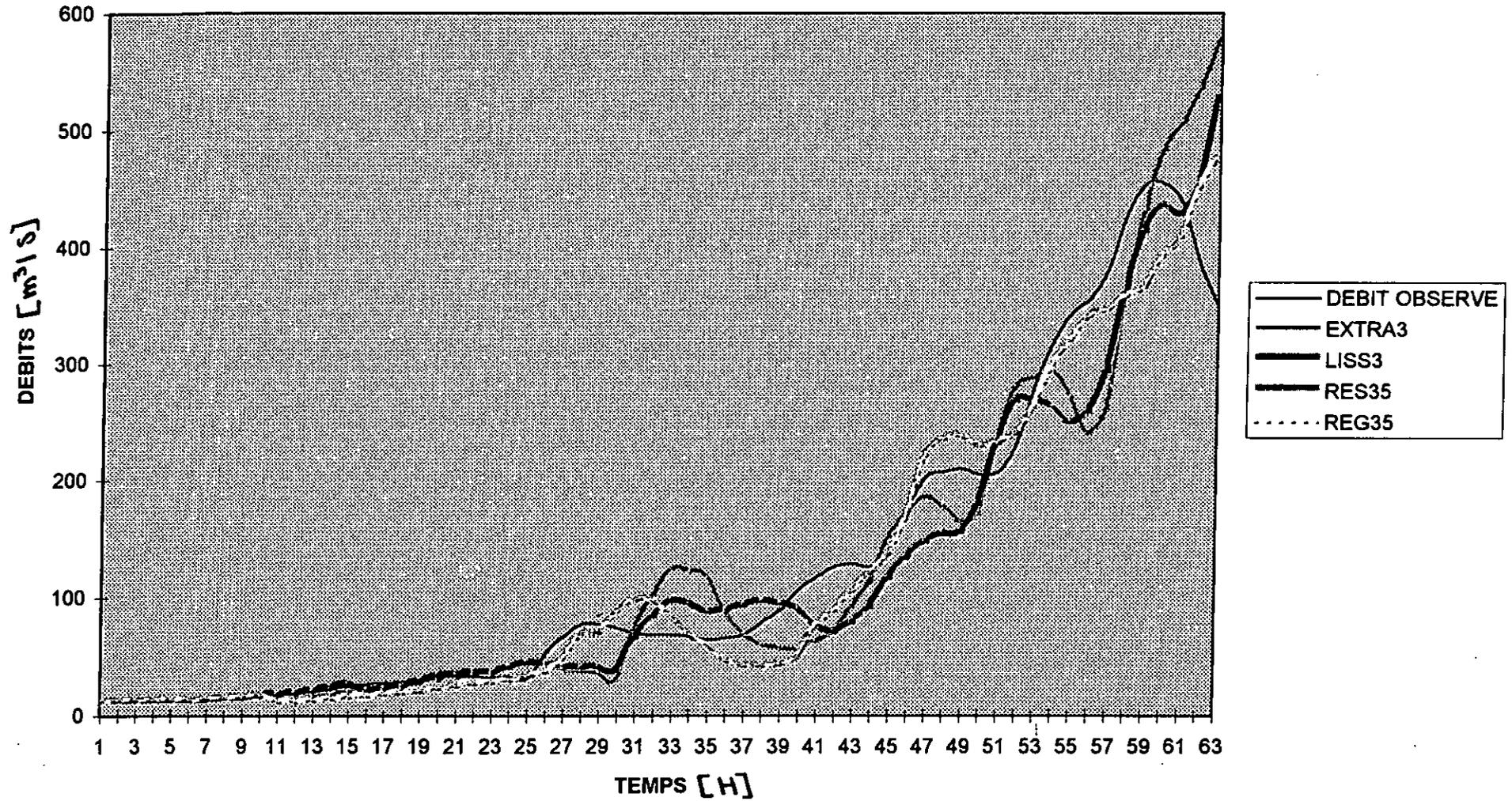
### PAS DE TEMPS 3H CRUE3



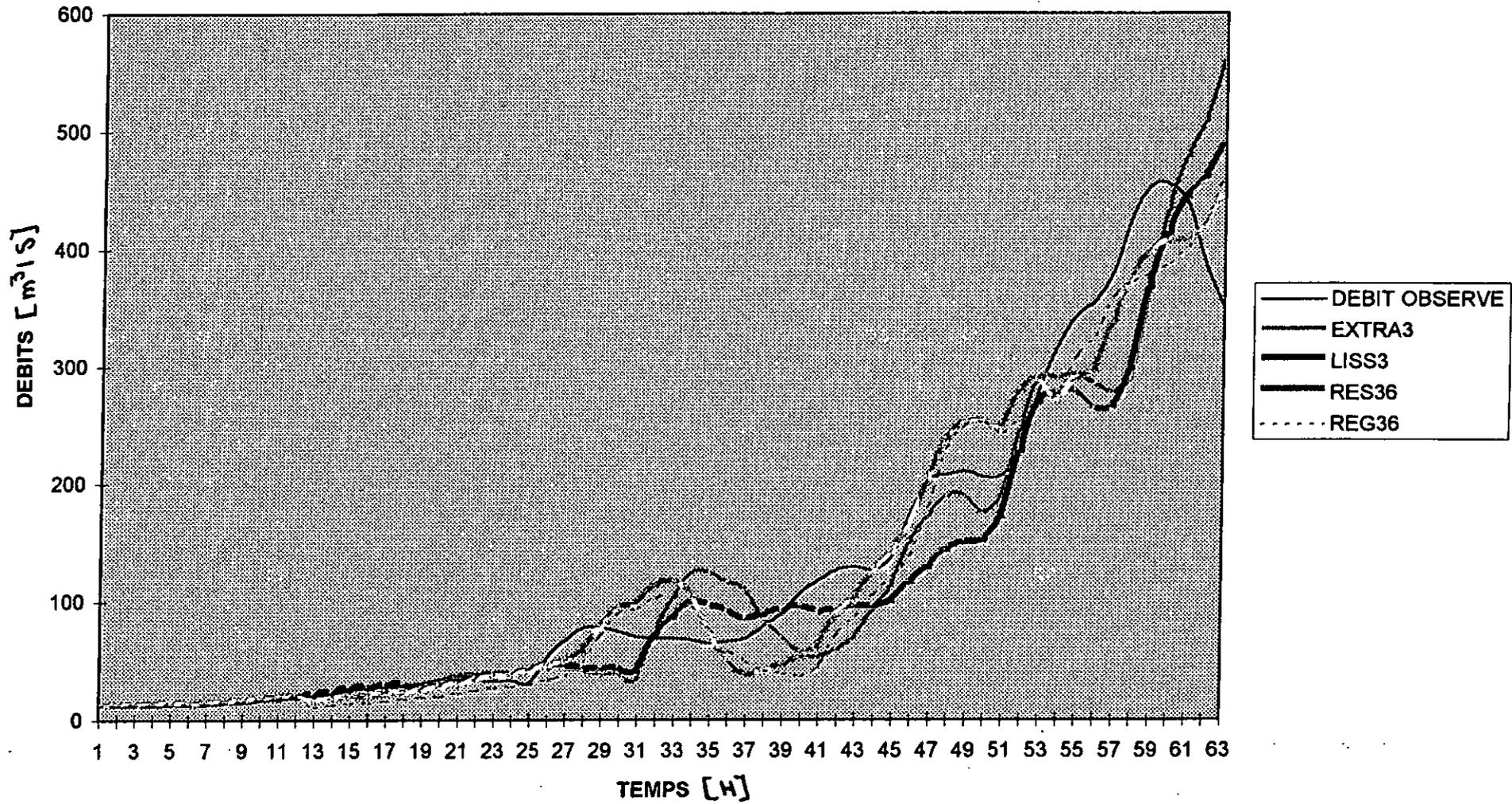
### PAS DE TEMPS 4H CRUE3



# PAS DE TEMPS 5H CRUE3



# PAS DE TEMPS 6H CRUE3



## ***BIBLIOGRAPHIE***

### **TITRE:**

### **AUTEUR**

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1- comparaison entre modèles de prévision des crues<br>(hydrol..continental n° 1, 1987 )                    | TUCCI<br>LANNA<br>ENDRES<br>LOPES |
| 2- guide de prévision des crues T.1 22  | P.A.ROCHE                         |
| 3- modélisation pluie-débit:<br>validation par simulation de la méthode DPFT<br>(houille blaude n°5/6-1988) | NALBANTIS<br>OBLED<br>RODRIGUEZ   |
| 4- informatisation de la méthode Bachet<br>(houille blaude n°5/6-1988)                                      | MIQUEL<br>LEBOSSE                 |
| 5- une utilisation simple du modèle HAYAMI en hydrologie<br>(houille Blaude5/6-1988)                        | BAPTISTA<br>MICHEL                |
| 6- système de télémessure pour la prévision et l'annonce des<br>crues dans le bassin SEBAOU (ANRH 1986)     | A.SMATI                           |
| 7- l'hydrologie de l'ingénieur (EYROLLES 1972)  | G.REMEINERAS                      |
| 8- comparaison pratique des méthodes de prévisions<br>de crue (houille blanche n°516-1988)                  | THIRRIOT<br>HABIEB<br>BERNEDE     |
| 9- fiabilité des modèles mathématiques de prévision de<br>prévision de crues (hydrol continent n°2,1987)    | THIRRIOT<br>HABAIEB               |
| 10- application comparée de certaines méthodes<br>de prévision de crue en temps réel (1987)                 | THIRRIOT<br>HABAIEB               |
| 11- Les Modèles de prévision des crues<br>( PFE 1990)   | HAMLAOU<br>HEMMENIE               |