

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/90

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

2 ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE MODELES DE PREVISIONS DES CRUES

Proposé par : Mr NEBBACHE

Etudié par : Mlles HAMENNI.N. Dirigé par : MM. NEBBACHE.
HAMPLAOUI.L. DECHEMI.

PROMOTION

1990



D E D I C A C I O N

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

HAMENNI,

JE DEDIE A: Ma grand mère
 Mes parents
 Mes frères et sœurs
 Ma soeur Karima et à ses enfants
 Toute la famille
 Mes amis (es)

HAMLAOUI,

JE DEDIE A: A mes très chers parents
 A mes frères et sœurs
 A mes amis(es)
 A tous ceux qui dans l'anonymat et la
 grandeur de leur synmpathie ont contribue
 efficacement à la réalisation de ce travail

Je leur exprime, ici, ma gratitude et ma reconnaissance.

R E M E R C I E M E N T S .



Nous tenons à exprimer notre vive gratitude à tous ceux qui nous ont aidés, collaborés de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, particulièrement pour l'encadrement pédagogique :

Monsieur N. DECHEMI

Monsieur N. NEBBACHE,

nos promoteurs, enfin nos distingués Professeurs, lesquels n'ont jamais ménagé durant notre cursus, aucun effort.

Nous remercions également :

Monsieur BENSAID

Monsieur BELOUEL

Monsieur MERABTENE,

Collègues en Informatique, dont leurs diverses orientations amicales nous ont été fructueuses.

Monsieur HAMENNI

Monsieur KACIMI

Monsieur MOULOUDI

Nous leur seront infiniment reconnaissantes.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE MODELES DE
PREVISIONS DES CRUES

Proposé par : Mr NEBBACHE

Etudié par : Mlles HAMENNI
HAMPLAOU

Dirigé par : MM. DECHMI
NEBBACHE

PROMOTION

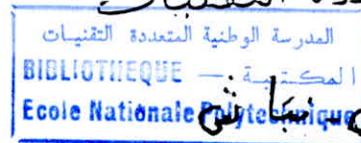
1990

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT: HYDRAULIQUE

PROMOTEUR: MM. DECHEMI-NEBBACHE

ELEVE INGENIEUR: Mlles HAMENNI-HAMLAOUI



مدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

دايرة = الري

الموجه = السادة = دشمني

تلميذ مهندس حمتمى - حملاوي

توقعات الفيضانات

موضوع

لملخص، لقد أصبحت توقعات الفيضانات انظلاقا من معطيات مستوى التدفق، موضوع الساعة عبر مجموع القطر الجزائر، وقد تم استعمال ثلاثة نماذج على وادي "سباو"، معتمدين بذلك على ستة من أخطر الفيضانات، في فترة 1974 - 1985، كمصدر للمعطيات. ويبدو ان نموذج "Muskingum" هو الذي يعطى أحسن النتائج.

SUJET: ...ÉTUDE DE MODELES DE PREVISION DES CRUES.....

RESUME: La prévision des crues, à partir des débits historiques, est une question d'actualité en Algérie. Notre étude consiste à tester trois (3) modèles sur le bassin versant de Sebaou. Pour cela, six (6) crues ont été choisies, parmi les plus catastrophiques, survenues entre 1974 et 1985. Il semble que le modèle de Muskingum soit celui qui donne les meilleurs résultats.

SUBJECT: ...STUDY OF MODELS FOR THE FORECASTING OF FLOODS.....

ABSTRACT: Flood forecasting based on historic water levels and discharges has become a topic of the day in Algeria. Three mathematical models for the forecasting of flood levels have been tested in order to study the Sebaou bassin, so six flood have been selected between the most important floods from 1974 to 1985. It seems that the best results are obtained with the "model of Muskingum"

<u>INDICATION</u>	<u>PAGE</u>
INTRODUCTION	1
BUT	3
I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
II. APPLICATION DU BASSIN VERSANT SEBAOU	20
II.1. DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT SEBAOU	20
II.2. SYSTEME DE PREVISION ET D'ANNONCE DES CRUES DU SEBAOU	20
III. ETUDE DES CRUES	25
III.1. INTRODUCTION	25
III.2. CRUES HISTORIQUES	25
III.3. PRINCIPALES CRUES ENREGISTREES EN ALGERIE	26
III.4. LES CAUSES DES CRUES	28
III.5. L'EVOLUTION DES CRUES	28
III.6. LA PUISSANCE DES CRUES	31
III.7. REMEDES CONTRE LES CRUES	33
IV. PREVISION DES CRUES	36
IV.1. DEFINITION	36

S O M M A I R E (S U I T E)

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INDICATION

	PAGE
IV.2.DELAI DE PREVISION	36
IV.3.PRINCIPE DE PREVISION	36
IV.4.CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PREVISION	36
IV.5.SYSTEME DE PREVISION HYDROLOGIQUE	38
V. ECOULEMENT A SURFACE LIBRE - REGIME TRANSITOIRE	39
V.1. METHODES DE PREVISION FONDEES SUR LA NOTION D'ONDE DE CRUE	39
V.2. EQUATIONS DE BASE	40
VI. MODELES DE PREVISION	43
VI.1. INTRODUCTION SUR LES MODELES DE PREVISION	43
VI.2.PRINCIPAUX MODELES DE PREVISION	43
VI.3.MODELES DE PREVISION ETUDIES	44
VI.3.1.METHODES IMMEDIATES	46
VI.3.1.1. METHODES D'EXTRAPOLATION	46
VI.3.1.2. METHODES DE LISSAGE	49
VI.3.2. METHODE A LIAISON SPATIALE	56

S O M M A I R E (S U I T E)

INDICATION

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

VII.RESULTATS ET INTERPRETATIONS	64
VII.1. OBJECTIF	64
VII.2. APPLICATION DES METHODES	64
VII.3. CRITERE DE NASH	64
VII.4. INTERPRETATIONS DES RESULTATS	65
CONCLUSION	

INTRODUCTION.

=====

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

La société impuissante dans un premier temps, s'efforce au fil du temps à maîtriser tant soit peu la situation. Cependant impuissant le plus souvent, l'homme tentera de prévoir les phénomènes. Fort des expériences, au fil des sociétés d'ébauche une science des prévisions des problèmes des crues qui nous intéresse.

Les crues sont définies comme des accroissements notables, exceptionnelles du débit de pluviométrie en un temps réduit. Elles portent généralement sur le niveau du cours d'eau. Ces crues peuvent entraîner des submersions. Celles-ci sont plus ou moins dommageables.

Ainsi dernièrement, certaines wilayates du Sud Algérien ont subi ce genre de catastrophes naturelles.

Aussi, il est important de pouvoir les prévenir par des méthodes pratiques. Le progrès technique en ce domaine a débouché sur l'hydrologie d'intérêt capital.

Dans ce cadre la prévision se définit par l'estimation au préalable des états futurs d'un phénomène hydrologique en temps réel.

La prévention des crues consiste à prédéterminer l'évolution du débit d'un cours d'eau à un instant donné, à partir des données mesurées afin de pouvoir avertir avec une avance suffisante les riverains des cours d'eau qui disposeront de ce délai pour réagir et se protéger contre les inondations.

La mise au point de méthodes pratiques, appliquées à la prévision des crues, sont beaucoup moins nombreuses toutefois, cette étude n'a pas la prétention de faire un inventaire complet des modèles de prévision des crues.

BUT DE LA PREVENTION.

La prévention apporte plusieurs avantages fondamentaux.

Ces avantages au nombre de quatre permettent :

- dans un premier temps de prévoir l'ampleur de la catastrophe et la prévention des populations ;
- dans un deuxième temps d'informer :
 - . Les responsables des ouvrages hydrométriques situés sur la rive ;
 - . Les services chargés de la surveillance et de l'entretien des édifices protecteurs ;
- dans un troisième temps de pouvoir disposer de manière optimale des débits de pointe.

Enfin la prévision des apports aux barrages permet d'adapter aux conditions hydrologiques de l'année, les réserves d'eau à maintenir en vue de satisfaire au mieux les besoins de consommation en eau pour l'irrigation et l'industrie.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. - MODELES EMPIRIQUES.

Ce sont les premiers modèles utilisés au début de ce siècle pour la prévision des crues.

I.I.1 - Méthode des hauteurs :

On admet dans cette méthode qu'il existe une relation linéaire liant les hauteurs amonts (i) et celles des hauteurs avals (A)

d'où la relation suivante :

$$H_A(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot H_i(t - \Delta t_i)$$

Cette équation peut être admise dans le cas d'une seule station amont, quoiqu'elle ne soit pratiquement jamais linéaire, les hauteurs ne sont ni liées linéairement, ni représentatives du poids de chaque bief entrée sur le bief sortie.

I.I.2 - Méthode des montées :

Si on dérive par rapport au temps la relation citée dans le paragraphe précédent, on établira une relation entre les montées des stations amont et aval :

$$\frac{\partial H_A}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\partial H_i}{\partial t}$$

Cette équation n'est pas linéaire, l'erreur ne peut-être commise que sur l'évaluation de la montée aval. Si l'on a un temps de montée relativement faible il est probable que l'on arrive à déterminer les hauteurs prévues avec une précision parfois acceptable.

I.I.3 - Méthode des comparaisons :

Cette méthode consiste à faire un inventaire des hydrogrammes des crues anciennes. Puis, lorsqu'une crue s'amorce, de rechercher quels hydrogrammes anciens ressemblent le plus à la crue qui se produit, et en déduire la forme de l'onde de crue qui se produira. Cette méthode n'est absolument pas applicable. Des expériences prouvent que les crues ne se ressemblent pas.

I.2. - METHODE HAYAMI (1951).

I.2.1 - Problème posé :

Il n'est pas toujours justifié de faire une étude hydraulique détaillée et cela pour deux raisons principales :

- les données hydrauliques complètes sont difficiles à obtenir ;
- les données hydrologiques tronquées, ce qui influe sur un calcul hydraulique précis.

Donc le problème se pose à savoir comment une crue est acheminée le long d'un tronçon de rivière ou plus exactement d'avoir une idée sur l'atténuation de la pointe de crue et sur le temps d'arrivée de cette pointe.

Aussi, le but de cette étude est de fournir un outil simple pour résoudre ce genre de questions. On va pour cela, rentrer dans le cadre de la prévision des crues par deux paramètres quantitatifs : le débit maximum Q et la durée d pendant laquelle le débit dépasse 80% du débit maximum. (Graphe N° 1)

Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices doivent être faites . Les crues doivent être lentement évolutives afin que

les termes d'inertie ($\frac{\partial V}{\partial t}$ et $\frac{\partial V}{\partial x}$) soient faibles, de cela on parvient à une solution à partir du système d'équation de SAINT VENANT de type parabolique, analogue aux équations de diffusion de la chaleur, d'où le nom de crue diffusante.

En 1951 SHOITIRO HAYAMI fait un calcul complet des ondes de crues par la méthode de la diffusion. Se plaçant dans le cas d'une rivière de section rectangulaire, de pente constante, il prend comme loi de perte de charge linéaire celle de CHEZY. Les équations de SAINT-VENANT sont :

$$a) - \frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{\partial S}{\partial t} \quad \text{équation de continuité.}$$

$$b) - \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + g(I - J) \quad \text{équation dynamique.}$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial H}{\partial x} - I \quad I : \text{pente du lit}$$

I.2.2 - Algorithme HAYAMI :

Détermination de l'équation de l'onde de crue diffusante à paramètres constants C et D.

Hypothèse : Les équations de SAINT-VENANT.

$$\text{On suppose : } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V}{\partial t} \approx 0 \quad \text{et} \quad V \frac{\partial V}{\partial x} \approx 0 \\ \text{et } L = \text{cte. (Largeur)} \end{array} \right.$$

$$\text{d'où le système : } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial x} + L \frac{\partial z}{\partial t} = q(x, t) \quad (1) \\ \frac{\partial z}{\partial x} + J = 0 \quad (2) \end{array} \right.$$

q : débit Latéral

ou bien :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{L} \left(q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial z}{\partial x} = - J \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3) \\ (4) \end{array}$$

dérivons (1) / x et (2) / t . On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + L \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial t} + \left(\frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial L}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \right) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial t} + \frac{\partial J}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial J}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5) \\ (6) \end{array}$$

(3) et (6) on a :

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial t} = - \frac{1}{L} \left(q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \frac{\partial J}{\partial z} - \frac{\partial J}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (7)$$

d'où (5) et (7) on a :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \left[\frac{\partial J}{\partial z} \left(q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + L \frac{\partial J}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + \\ & + \left(\frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial L}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} \right) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

(3) et (4) dans (8) on a :

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

en divisant les 2 membres de l'égalité par $(-L \frac{\partial \bar{J}}{\partial Q})$ on a :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{L} \left(q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \left[\frac{1}{L} \frac{\frac{\partial L}{\partial x} - J \frac{\partial L}{\partial z}}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}} - \frac{\frac{\partial \bar{J}}{\partial z}}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}} \right] = \frac{1}{L} \frac{\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \frac{\partial q}{\partial x}}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}}$$

avec :

$$C = \left[\frac{1}{L} \frac{\frac{\partial L}{\partial x} - J \frac{\partial L}{\partial z}}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}} - \frac{\frac{\partial \bar{J}}{\partial z}}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}} \right] \cdot \frac{1}{L} \quad \text{et } D = \frac{1}{L} \frac{1}{\frac{\partial \bar{J}}{\partial Q}}$$

C : est la vitesse de propagation

D : est le coefficient de diffusion.

Si on prend C et D constants, on aura une équation aux dérivées partielles linéaires, c'est le modèle de la crue diffusante d'HAYAMI on peut encore simplifier l'équation obtenue en négligeant les termes des apports latéraux q et $\frac{\partial q}{\partial x}$:

$$\frac{\partial Q}{\partial z} + C \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (10)$$

En considérant que le régime initial est un régime permanent (débit uniforme q_0) on démontre que l'on a :

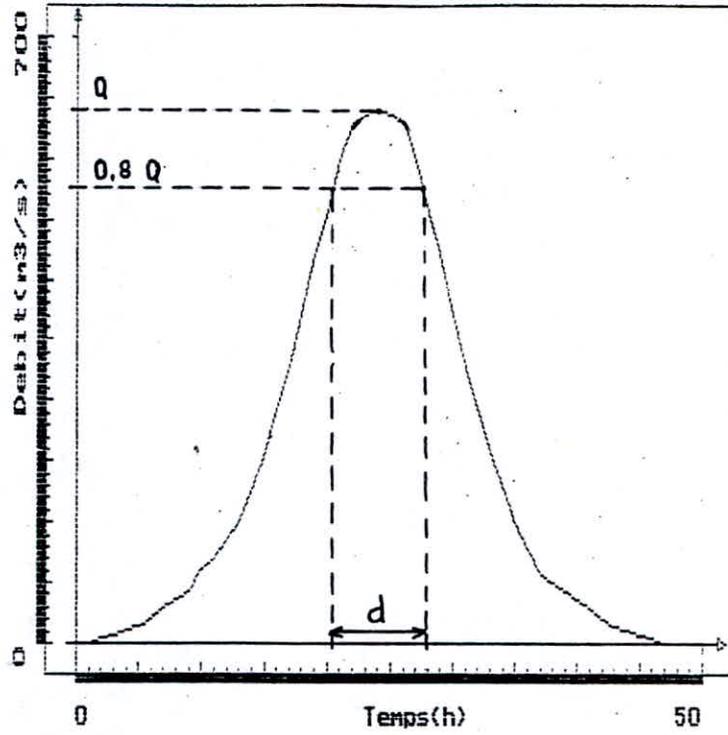
$$Q(t, x) = q_0 + x \int_0^t q(\tau, 0) K(t - \tau, x) d\tau \quad (11)$$

avec :

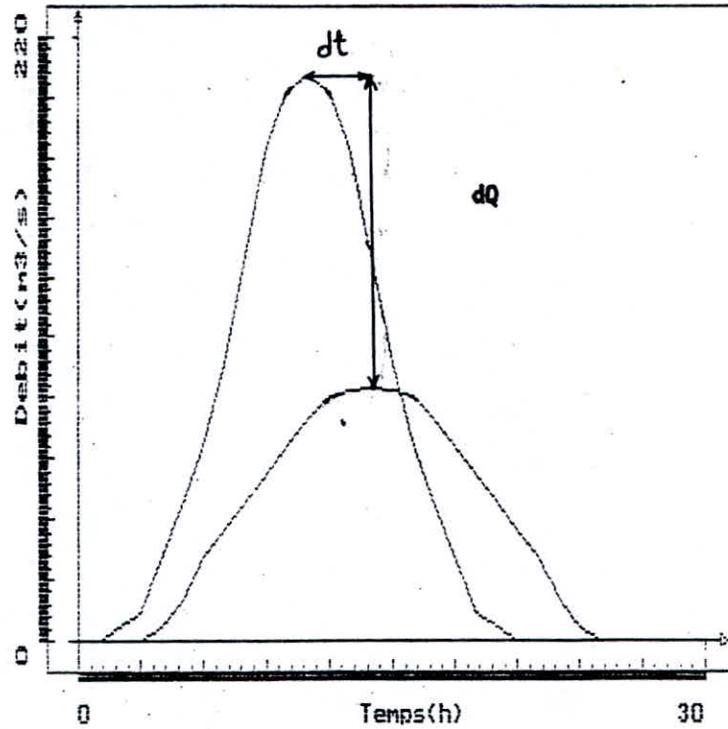
$$K(\tau, x) = \frac{x}{2 \sqrt{\pi D} \tau^{3/2} \exp \left[\frac{(x - C\tau)^2}{4 D \tau} \right]} \quad (12)$$

Si l'hydrogramme, à l'entrée du tronçon de rivière considéré, a la forme du noyau d'HAYAMI (12), le résultat de l'intégra-

GRAPHE N°1



GRAPHE N°2



tion est immédiat.

$$q(t) = \frac{\sigma}{2\sqrt{\pi\theta} (t+\beta)^{3/2} \exp\left[\frac{t^2 - 2t(\alpha+\beta) + (\alpha+\beta)^2}{4\theta^2(t+\beta)}\right]}$$

- α , β et σ paramètres à caler sur l'hydrogramme réel ;
- θ paramètre imposé en fonction du bief auquel on s'intéresse, $\theta = D / c^2$.

Le modèle d'HAYAMI décrit le mécanisme de propagation d'une façon très satisfaisante. En effet, le débit que l'on observera à l'entrée d'un tronçon se propagera en se diffusant, il en sera de même pour des débits voisins. (Graphe N° 2)

La méthode HAYAMI a le défaut de ne pas être une méthode de prévision des crues, mais elle a, en contre-partie, l'avantage de bien simuler le phénomène de propagation.

I.3. - METHODE DE BACHET.

I.3.1 - Historique de la méthode :

La méthode de BACHET a été élaborée et développée par un ingénieur des ponts et chaussées en 1934 et a été utilisée par les services d'annonce des crues.

Deux chercheurs du Laboratoire National d'Hydraulique de France (J. Miguel et A. Lebosse) se sont intéressés à cette méthode.

I.3.2 - Présentation de la méthode :

Cette méthode est basée sur la notion de la propagation d'onde de crue.

Lorsque le débit de la rivière est permanent, il correspond au

au débit r , constant dans le temps et dans l'espace, une hauteur donnée h pour une section donnée d'abscisse X . (Graphes 3,4)
 A chaque section, il existe donc une relation entre h et r et l'ensemble de ces relations pour les différentes valeurs de X caractérise la rivière. Il est commode de définir la crue par rapport aux lignes d'eau en régime permanent et à chaque débit r correspond une ligne d'eau, une onde de crue coupe celles-ci en différents points. L'onde de crue sera donc une fonction $r(X,t)$. On passera du débit r à la hauteur h en une section donnée X , par la fonction indépendante du temps, qui relie ces deux quantités.

Quand il y a une crue, le débit réel q est différent que celui en régime permanent r . On pose donc $q = r + P$;
 P : débit complémentaire dépendant de toutes les particularités de l'onde de crue.

Si on considère deux sections X et $X + dX$, la variation du volume emmagasiné dans la rivière entre ces deux sections pendant l'intervalle de temps dt est égale à la différence des débits entrant et sortant.

Soit a la largeur du lit de la rivière on a donc :

$$a \, dh \, dX = q \, dt - (q + dq)dt$$

ce qui nous donne encore :

$$a \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial X} = 0 \quad (1)$$

Cette équation exprime le conservateur de l'énergie ; et en remplaçant q par $r + p$, on obtient :

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

pour une section donnée, X est constant le terme dh est la variation de hauteur pendant le temps dt donc il exprime aussi la variation du débit dq pendant le même instant ; on peut donc écrire :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial t} \quad (3)$$

en introduisant cette expression dans l'expression (2) et après l'avoir multiplié par le facteur $(1/a) \cdot (dr/dh)$, on obtient la relation :

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{1}{a} \frac{\partial r}{\partial h} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{1}{a} \frac{dr}{dh} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Considérons deux courbes représentatives de r en fonction de X l'une à l'instant t , l'autre à l'instant $t + dt$, en comparant les valeurs de r aux points $A(t, X)$ et $C(t + dt, X + dX)$ en considérant une section voisine $(X + dX)$ qui ne sera pas arbitraire mais liée à dt par la relation $dX = (I/a) \cdot (dv / dh) \cdot dt$ on passe à l'ordonnée r de A à celle de C en utilisant la formule qui donne la différentielle totale :

$$dr = \frac{\partial r}{\partial x} dx + \frac{\partial r}{\partial t} dt \quad (5)$$

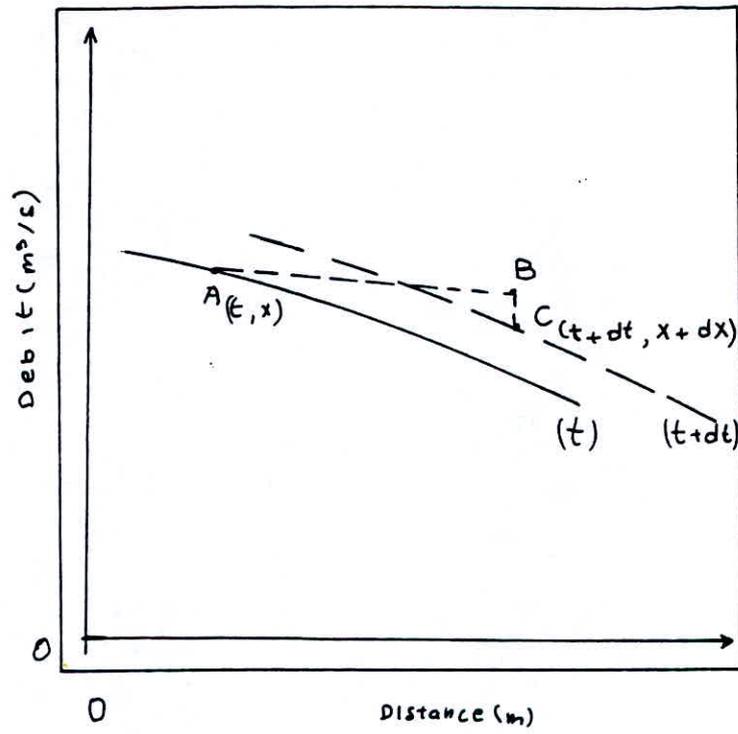
soit :

$$dr = \frac{1}{a} \frac{dr}{dh} \frac{\partial r}{\partial x} dt + \frac{\partial r}{\partial t} dt \quad (6)$$

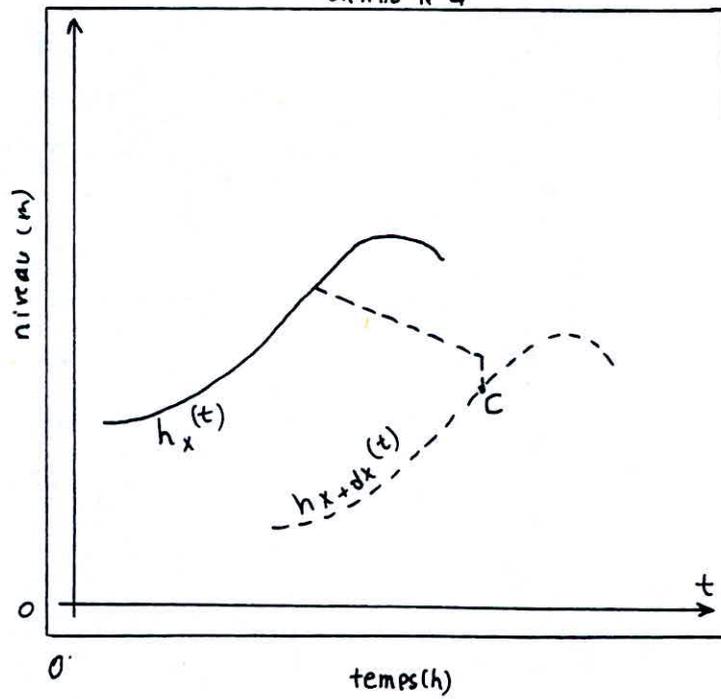
Or, l'équation fondamentale transformée nous montre que la différentielle ci-dessus est égale à :

$$dr = -\frac{1}{a} \frac{dr}{dh} \frac{\partial P}{\partial x} dt = -\frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (7)$$

GRAPHE N°3



GRAPHE N°4



Il en résulte que le point C de l'onde à l'instant $(t + dt)$ à l'abscisse $(X + dX)$ se déduit du point A à l'instant t et à l'abscisse X , par un déplacement dont les composantes sont :

1°/ - Une translation horizontale AB avec :

$$dX = \frac{I}{a} \cdot \frac{dr}{dh} dt$$

2°/ - Une translation verticale BC avec :

$$r = - \frac{\partial P}{\partial X} dX$$

La première translation s'interprète très simplement comme une propagation avec la vitesse :

$$v = \frac{I}{a} \frac{dr}{dh}$$

La seconde translation est une atténuation.

I.4. - METHODE A LIAISONS SPATIALES

L'information recueillie à l'extérieur de la station de prévision est nécessaire. On considèrera :

1 - Le cas sans prise en compte de la pluie qui intervient de manière implicite en moyenne, dans le calage des coefficients on prendra comme modèle la méthode de MUSKINGUM voir chapitre VI.

2 - Modèle à régression multiple :

Pour ce modèle on donnera l'algorithme avec pluie avec deux observations antérieures aval et avec une observation

antérieure amont décalée du temps de propagation t_p sur la bief.

$$Q_v(t + d) = a_1 Q_a(t + d - t_p) + a_2 Q_v(t) + a_3 Q_v(t - d) \\ + a_4 SP(t - t_c) + \xi(t).$$

S = surface du sous bassin

P = pluie moyenne en espace et en temps

t = la date de la dernière observation

d = délai de prévision: c'est le moment de la réalisation.

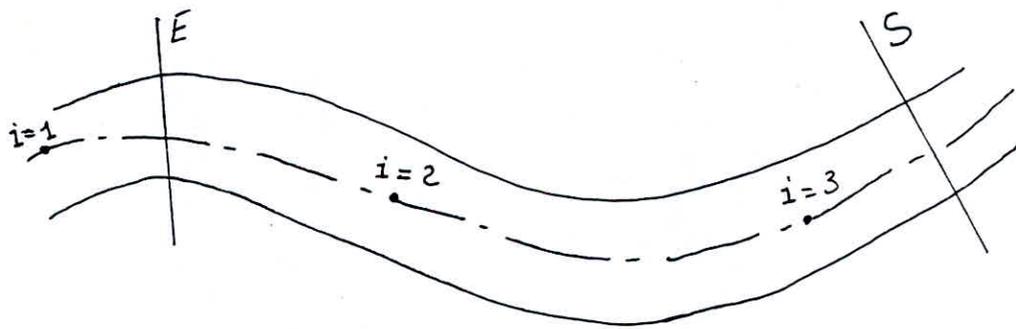
I.5. - METHODE DES CASIERS.

1.5.1 - Présentation :

Un casier représente une portion de rivière. L'étude consiste à étudier le vidange et le remplissage des casiers les uns des autres. L'étude de la propagation se fait en variant la largeur des casiers pour tenter de simuler les débordements, l'écoulement est unidimensionnel.

1.5.2 - Méthodologie :

On peut représenter schématiquement la rivière en constituant une succession de casiers, suivant au plus près de la rivière.



Les points $i = 1, 2, \dots, n$ représentent les barycentres des casiers, c'est en relation avec deux casiers $(i - 1)$ et $(i + 1)$, l'équation de continuité permet d'écrire :

$$\frac{(Z_i)_{t+\Delta t} - (Z_i)_t}{\Delta t} = \left[\frac{Q_{i-1,i} - Q_{i,i+1}}{A_i} \right]_{t+\Delta t/2} \quad (I)$$

Avec :

- A_i : surface du casier i
- $Q_{i-1,i}$: débit échangé entre les casiers $i - 1$ et i
- $Q_{i+1,i}$: débit échangé entre les casiers $i + 1$ et i
- Z : niveau de la surface libre du casier i en son barycentre.

D'autre part, la formule de CHEZY donne :

$$V = C \sqrt{RJ} = C \sqrt{HJ} \quad \text{avec } R : \text{ rayon hydraulique pris égal à } H$$

$$\text{et en posant } S = BH \quad : \quad Q = C \quad B \quad H^{3/2} \sqrt{J}$$

De plus l'équation dynamique permet d'exprimer la pente entre deux casiers :

$$\frac{|z_{i-1} - z_i|}{L_{i-1,i}} = J_{i-1,i}$$

où $L_{i-1,i}$: longueur entre le barycentre du casier $i-1$ et i .

De (I) on peut écrire :

$$(z_i)_{t+\Delta t} = (z_i)_t + \Delta t \sum_{k=-1}^{k=1} K \left[\frac{C B_{i+k,i} H_{i+k,i}^{3/2}}{A_i} \sqrt{\frac{|z_{i+k} - z_i|}{L_{i+k,i}}} \right]_{t+\Delta t/2}$$

$\sum_{k \neq 0}$: somme privée de zéro.

La dernière relation est de nature implicite, on doit connaître les niveaux des casiers $i+1$ et $i-1$ à l'instant $t + \frac{\Delta t}{2}$ donc, à $t + \Delta t$ pour calculer le niveau du casier i à l'instant $t + \Delta t$. Afin de ne pas résoudre le système linéaire, on utilise une méthode itérative explicite. La méthode des casiers est basée sur un transfert de masse, malgré cela, on ne peut pas espérer l'utiliser pour l'annonce des crues. En effet, il est nécessaire d'évaluer les niveaux des casiers à l'instant $t + \Delta t/2$, pour calculer les niveaux des casiers à l'instant $t + \Delta t$.

De ce fait la condition à la limite amont sera donc obligatoirement la hauteur relevée à l'instant $t + \Delta t$. Cette méthode ne peut donc être utilisée que pour l'étude de la propagation des crues.

L'application de cette méthode présente quelques difficultés. Tout d'abors, il est nécessaire d'avoir des informations sur

les formes géométriques du lit.

En conclusion, la méthode des casiers est sans aucun doute un modèle très prometteur, répondant bien au phénomène crue. Sans que les informations topographiques soient trop importantes, il apportera semble-t-il une réponse à des études d'écoulement, même parfois relativement complexes.

I.6. - MODELE DE HARLEY (1967).

Ce modèle, plus complexe que celui d'HAYAMI, s'obtient à partir des équations de SAINT-VENANT pour un canal rectangulaire, suffisamment large afin de négliger les effets de berge, et sans apports latéraux.

En supposant le régime permanent. Le modèle de HARLEY fournit de meilleures réponses, est cependant plus lourd et exige de plus la connaissance préalable du nombre de Fronde et du tirant d'eau de référence y_0 , données difficiles à estimer avec précision.

I.7. - MODELE DE SAUER (1973).

Le modèle de SAUER est basé sur une analogie avec les modèles pluie - débit.

En utilisant les propriétés de linéarité de la section il est en mesure de déterminer la propagation de n'importe quel volume amont : il lui suffit de décomposer l'hydrogramme en A en volumes de durée élémentaire D, et de propager ensuite chacun d'eux : l'hydrogramme final en B s'obtient par sommation des divers hydrogrammes élémentaires.

L'intérêt du modèle de SAUER est de prendre en compte les va-

riations du temps de propagation avec le volume propagé.

I.8. - LE MODELE DE KEEFER (1974).

Le modèle de KEEFER vise à résoudre l'une des principales difficultés des modèles linéaires, ceux-ci supposent que la célérité C et la diffusion D sont des constantes. Or en fait C et D dépendent de x et de Q

CHAPITRE II

APPLICATION DU BASSIN VERSANT

SEBAOU

II.1. - PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DU SEBAOU (ANRH 1987).

Le bassin versant du SEBAOU, situé à environ 90 Km à l'Est d'Alger couvre une superficie de 2 500 Km².

Les principaux affluents sont les oueds BOUBRIR, AISSI et BOUGDOURA qui drainent le flanc Nord du massif du DJURDJURA. La précipitation annuelle moyenne sur le bassin est de 950 mm alors que l'écoulement annuel moyen est estimé à 890.10^6 m³. Le bassin est sujet à de fortes crues liées à d'importantes chutes de pluies qui provoquent une rapide montée des eaux de rivières causant ainsi d'énormes dégâts aux riverains et aux infrastructures économiques de la wilaya de TIZI-OUZOU.

II.2. - LE SYSTEME DE PREVISION ET D'ANNONCE DE CRUE DU SEBAOU.

Il se compose de :

II.2.1 - Le réseau de mesure :

Constitué de 07 stations d'acquisition automatique de données dont l'objet est :

- Recueillir des renseignements concernant :

- la côte de l'eau de la rivière
- la hauteur de pluie en ce site
- éventuellement d'autres paramètres (températures, PH).

- Transmettre ces renseignements en centre de prévision.

- Signaler dans le cas où un seuil d'alerte est atteint, l'atteinte de ce seuil.

Chaque station comportera :

- . Un limnigraphe et un pluviographe.
- . Un codeur pour transformer les informations analogiques fournies en informations digitales.
- . Une "électronique d'acquisition" qui stockera les données sur le site et jouera le rôle d'interface entre les capteurs et le support de transmission.
- . Un "bloc transmission" pour l'émission et la réception.
- . Une alimentation en énergie.

II.2.2 - Le réseau de transmission :

Ce réseau qui couvrira le bassin du SEBAOU a pour objet de rapatrier les informations recueillies au niveau des stations d'acquisition vers le centre de calcul. L'isolement des stations, la soudaineté et la rapidité des crues conduisent dans un souci d'efficacité et de fiabilité du système de transmission en période d'intempéries, à envisager la réalisation d'un réseau radio de télémessure. Un autre mode de transmission, qui est une solution moderne qui peut palier à l'absence de réseau filière ou à la complexité des liaisons radio est le satellite géostationnaire.

II.2.3 - Le centre de prévision :

Installé à TIZI-OUZOU est organisé autour d'un noyau central qui est un calculateur, il doit pouvoir assurer les fonctions suivantes :

- Interrogation des stations.
- Acquisition des données.
- Détection des seuils d'alarme et déclenchement des alertes.

- Traitement des données et prévisions.
- Dissémination des résultats auprès des services concernés.

Le centre disposera de logiciels d'exploitation en temps réel et de logiciels d'application pour la gestion du réseau.

II.3. - CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIES.

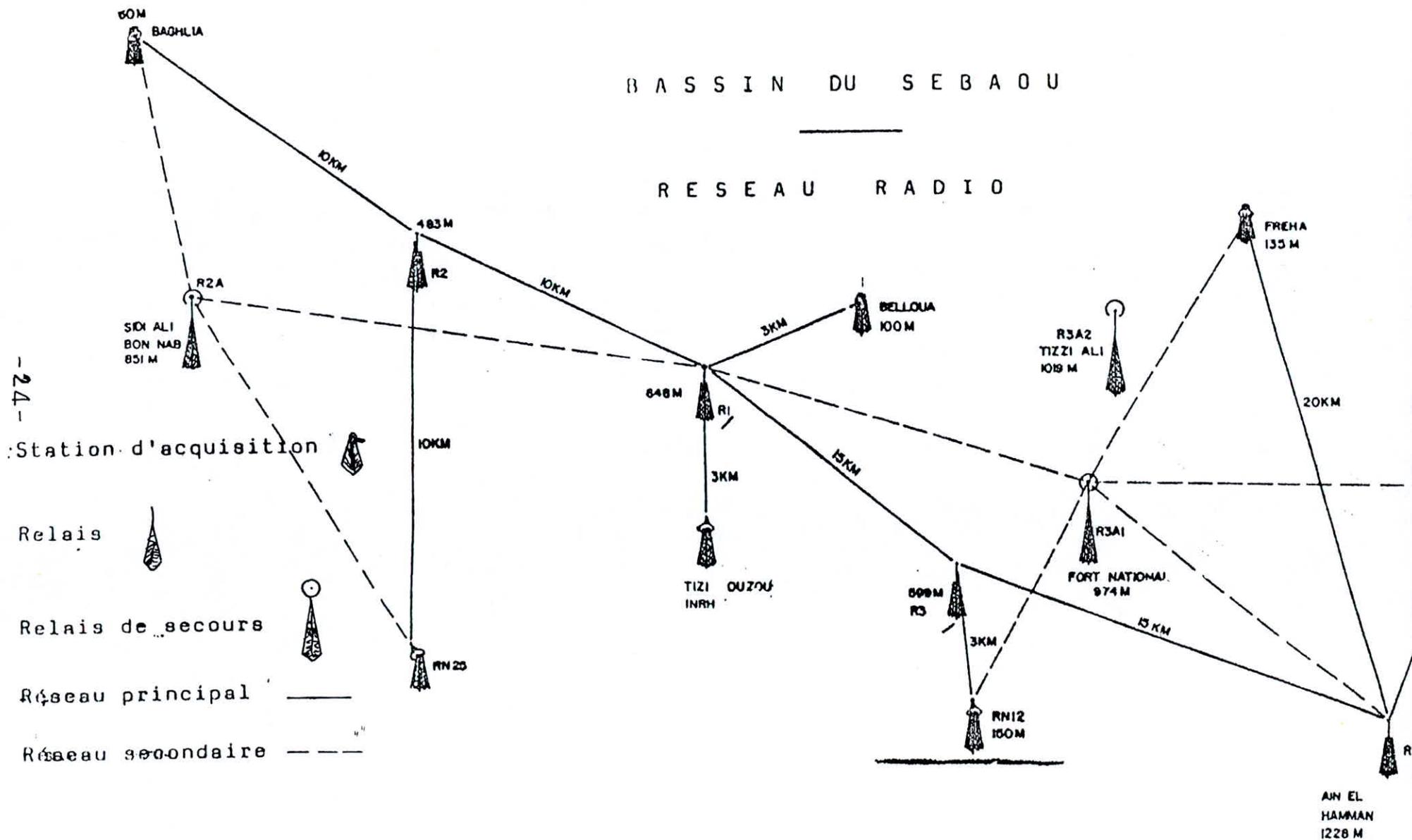
Les seules stations utilisées dans cette étude sont : BELLOUA et BAGHLIA.

Le tableau suivant présente les caractéristiques géomorphologies des deux stations.

Station	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Longueur (c _{rect.}) (Km)	Altitudes			Longueur de l'oued
				min	max	moy	
BELLOUA	1 490	155	42,2	70	2305	635	66
BAGHLIA	2 390	200	60,5	20	2305	590	92

BASSIN DU SEBAOU

RESEAU RADIO



-24-

CHAPITRE III

ETUDE DES CRUES

III.1. - INTRODUCTION.

Les crues sont des gonflements hydrométriques exceptionnels, débordants ou non, qui affectent, sous périodicité le plus souvent, l'écoulement. Il ne faut pas les confondre avec les hautes eaux saisonnières qui restent dans les limites du lit apparent et ne constituent pas une menace pour les riverains. Les crues les plus dévastatrices dans le bassin SEBAOU furent observées en Décembre 1957 et en Mars 1974.

En raison 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 peu à part de l'hydrologie. Causes, évolutions, comparaisons, prévisions et remèdes sont les principaux thèmes retenus pour leur étude.

III.2. - CRUES HISTORIQUES.

De grosses crues survinrent dans la région de TIZI-OUZOU en Avril 1954, Octobre, Novembre et Décembre 1957, Novembre 1971, Mars 1973, 1974 et Septembre 1979.

Les précipitations qui l'accompagnent sont généralement très étendues et de longue durée. Les intensités de pluies restent cependant relativement faibles.

Le débit maximal atteint en 1957 fut de $3\ 500\ \text{m}^3/\text{S}$ (ANRH) dans les Gorges de BELLOUA, non loin de la ville de TIZI-OUZOU, heureusement épargnée 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 du 29 et 30 Décembre 1957 a été de près de :

$150 \cdot 10^6\ \text{m}^3$ (ANRH).

Les crues les(+)étendues et les plus catastrophiques survenues récemment dans la région furent celles de Mars 1974. Les précipitations furent abondantes : 528 mm en 04 jours à AIN EL-HAMMAM pour un total annuel de : 1 100 mm (ANRH). Le débit maximal à BELLOUA étant de 4 500 m³/S (ANRH). Ces crues entraînèrent la mort de 52 personnes (DEMRH, 1974) et détruisirent ou endommagèrent sérieusement 4 570 maisons et 13 ponts. De nombreuses routes furent inondées (DEMRH, 1974). La station de jaugeages de la RN.12 située sur l'Oued Aïssi fut détruite. Alors les autres stations étaient endommagées.

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

Les niveaux de pointe furent atteints en 6 - 12 heures à la plupart des stations. Des montées de 250 m³/S en 3 - 6 heures furent enregistrées aux stations de BELLOUA et BAGHLIA.

III.3. - PRINCIPALES CRUES ENREGISTREES EN ALGERIE.

Le tableau ci-après (SETHYAL) donne un aperçu de quelques crues enregistrées de 1920 à 1989 dans les régions diversifiées du territoire national.

LOCALITE	ANNEE	OUED	DEBIT m ³ /s	REMARQUES
BLIDA	1920	EL-KEBIR	3 500	
TIZI-OUZOU	1954 1957	SEBAOU	3 500	
SIDI-AICH	1957	SOUMMAM	-	Dégâts matériels
OÛLED DJELLAL EL-M'GHAIAR	1969	de l'Oued M'Zi	5 000	Crue millénaire catastrophique
TIZI-OUZOU	1971 1973 1974 1979	SEBAOU (BELLOUA)	- 4 500 - -	52 morts + dégâts matériels
EL-EULMA	1980	DJEHADI JOUAB	2 500	43 morts 200 blessés
SIDI-BEL ABBES	1987	MEKERRA	1 500	03 morts plusieurs blessés
SIDI-AISSA M'SILA	1989	GUETRINI	500	-
NAAMA et EL-BAYADH	1989			05 morts quelques blessés

III.4. - LES CAUSES DES CRUES.

Les crues résultent de grosses averses, de la formation puis de la destruction de barrages, de la fonte rapide de la neige ou de la glace.

III.4.1 - Les grosses averses :

C'est la cause principale.

L'eau ne ruisselle pas en totalité puisqu'il s'en évapore et s'en infiltre et les débits réels sont inférieurs aux chiffres relevés. Ils s'en approchent pourtant sur les petits bassins et ils nous permettent surtout de nous faire une opinion sur les débits à craindre d'après les intensités pluviales réellement observées.

III.4.2 - La fonte des neiges :

Elle est progressive en montagne. La fonte ne peut venir à bout d'un coup d'une épaisse couverture nivale à cause du nombre considérable de calories nécessaires pour transformer la neige plus ou moins tassée en liquide : un peu plus de 79 calories/g. Si la température est haute, une partie du liquide sera évaporée et l'écoulement amoindri d'autant mais en s'ajoutant à celui d'une grosse averse, le déversement augmente la puissance des crues et provoque parfois le débordement.

III.5. - L'EVOLUTION DES CRUES.

L'évolution se suit sur un hydrogramme (graphe n°5) de l'évènement. Il fait apparaître, pour une crue simple, cinq secteurs : une période de concentration, la pointe de la crue,

la courbe de ~~d~~ crue, la courbe de tarissement, le débit de base. Dans les crues complexes, il montre plusieurs hausses et plusieurs baisses qui témoignent de la pluralité des facteurs responsables de la crue.

III.5.1 - Crues simples ou monogéniques

Ce sont les plus faciles à étudier car elles ne comportent qu'une seule montée.

III.5.1.1. Le temps de concentration.

C'est la durée nécessaire à l'eau tombée (ou fondue ou libérée par la rupture d'un barrage) dans les régions les plus éloignées pour gagner l'exutoire du bassin touché par l'évènement. Il est plus long pour une aire réceptrice allongée et étroite, plus court lorsqu'elle est ramassée et en forte pente. Il augmente avec la longueur des différents tronçons constituant le réseau hydrographique. Les nappes d'eau, les débordements, la perméabilité, la couverture végétale l'accroissent.

Or, de ce temps de concentration, dépend en grande partie la puissance de la crue. S'il est très court, les flots d'amont atteindront la station avant que l'averse qui les a formés ait cessé ; ils s'ajoutèrent aux débits constitués à l'aval et tout le bassin versant concourt à la crue dont la puissance sera maximum. Si le temps est très long, les flots d'amont se présenteront quand la pluie aura cessé sur le réseau aval et que les rivières y auront amorcé leur décrue, l'intumescence sera atténuée.

III.5.1.2. La pointe de la crue.

Elle exprime la puissance de la crue et la durée de la période critique. Sur l'hydrogramme, elle est donnée en hauteur d'eau. A la station lymnimétrique, elle permet de comparer entre-elles la puissance des crues pendant la période d'observations et de calculer le débit maximum instantané. Ce débit est tiré des courbes de tarage extrapolées.

III.5.1.3. Courbes de décrue et de tarissement.

Après la pointe, le niveau de la rivière baisse, mais le temps de décrue est plus long que le temps de concentration. L'écoulement reste en effet alimenté par le ruissellement sur les régions les plus lointaines, par les restitutions des lits majeurs et par les trop-pleins des nappes phréatiques. La structure des averses explique aussi cette lenteur : c'est au début que l'on trouve les intensités maxima et donc le ruissellement le plus dense et les débits solides les plus fournis.

Dans la séquence de décrue, la charge minérale est moindre car les eaux tardives de ruissellement ont moins de matériaux mobiles à leur disposition tandis que les eaux émanant des lits majeurs sont décantées, c'est pourquoi le graphe n° 6 de la crue est dissymétrique.

La dissymétrie de la courbe est accusée par la courbe de tarissement qui correspond à la reprise par la rivière du niveau antérieur à la crue : l'écoulement diminue encore plus lentement car il est soutenu par les nappes aériennes qui évacuent leur trop-plein ou par les nappes souterraines les moins profondes qui alimentent les sources non pérennées. Si les précipitations n'ont pas lieu pendant une longue période, le cours d'eau retrouve son niveau d'avant la crue : c'est le niveau de base.

III.5.1.4. Niveau de base.

Il est rare qu'une crue unique soit suivie d'une période assez longue de sécheresse pour que la rivière revienne à son volume d'avant le phénomène. Dans la majorité des cas, les courbes de tarissement sont aussi soutenues par des précipitations, parfois insuffisantes pour affecter leur allure générale, mais suffisantes pour retarder le retour au niveau de base ou par des averses responsables des montées secondaires.

III.5.2 - Crues polygéniques :

L'hydrogramme de crue comporte souvent, deux ou plusieurs pointes de débit égales ou inégales, séparées par des baisses ou par des paliers. Les poussées successives ont des génèses différentes : averses multiples, temps de concentration différents des affluents ou groupes d'affluents ou les deux causes réunies (graphe n° 7).

III.6. - PUISSANCE DES CRUES.

On la caractérise par les côtes et les débits maxima et par les volumes totaux évacués par les crues. A partir de ces valeurs, différents artifices permettent de comparer la puissance des crues.

III.6.1 - Hauteurs :

Les hauteurs sont influencées par les caractéristiques des lits au point de mesure : rugosité, pente, largeur, débordements. En cas d'inondation à l'amont, les côtes seront modestes et il en est de même dans les étroits à

forte déclinité grâce à l'accroissement des vitesses qui permet l'évacuation des débits énormes sans accroissement notable de section, moyennant l'augmentation de la pente superficielle. Cette augmentation est obtenue par l'élevation des niveaux dans les secteurs plus larges et en pente moindre qui précèdent les étroits.

III.6.2 - Débits :

Les maxima dépendent de l'intensité des averses. Les bassins les plus étendus ont les plus gros maxima bruts. Ils croissent vers l'aval, mais les exceptions ne manquent pas : les lacs, les débordements, réduisent les débits et provoquent la chute des modules : c'est l'aplatissement de la crue.

On calcule le maximum spécifique de crue soit le débit fourni par unité de surface de bassin et l'on s'aperçoit qu'il diminue très rapidement quand les surfaces, particularité qui est liée à la localisation des averses. De son côté, l'évaporation prélève des tributs croissants, mais elle apparaît comme une cause secondaire de l'aplatissement de l'écoulement spécifique, sauf le cas de lacs et de débordements très étendus. Elle affecte, aussi les volumes totaux.

III.6.3 - Volumes totaux :

Ce sont les volumes écoulés pendant toute la durée de la crue. On les obtient théoriquement en additionnant tous les débits instantanés à la seconde pendant le temps où la crue s'est poursuivie et en retranchant le volume correspondant au débit de base. On procède plus simplement en additionnant les débits journaliers et en multipliant le résultat par le nombre de secondes dans l'année ou plus commodément

encore en planimétrant le graphique de la crue établi avec les débits à une échelle convenable, en ne prenant pas en compte le débit de base.

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

$$V = L \cdot S.$$

V : volume total

L : lame d'eau écoulée

S : surface réceptrice.

III.7. - LES REMEDES CONTRE LES CRUES.

La correction des lits, l'emploi judicieux de barrages et la construction de digues, la protection et l'aménagement des bassins sont les principaux aspects de la lutte contre les crues. Leur mise en oeuvre suppose la connaissance préalable de la crue maximum probable.

III.7.1 - La correction des lits :

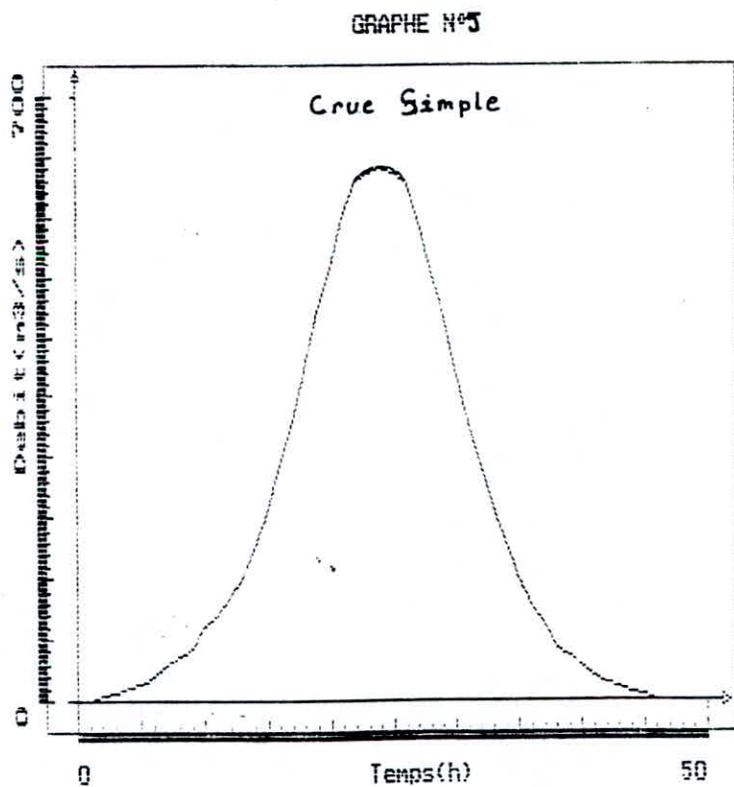
On accroît la section mouillée en élargissant les lits, en les approfondissant par des dragages ou des aroctages, en relevant les digues, etc ..., tous travaux dont l'effet est de minorer les niveaux. On améliore ainsi la capacité d'une section en simplifiant le chenal, en le dépouillant de sa végétation, en le lissant ce qui diminue sa rugosité et augmente la vitesse.

III.7.2 - Barrages et digues :

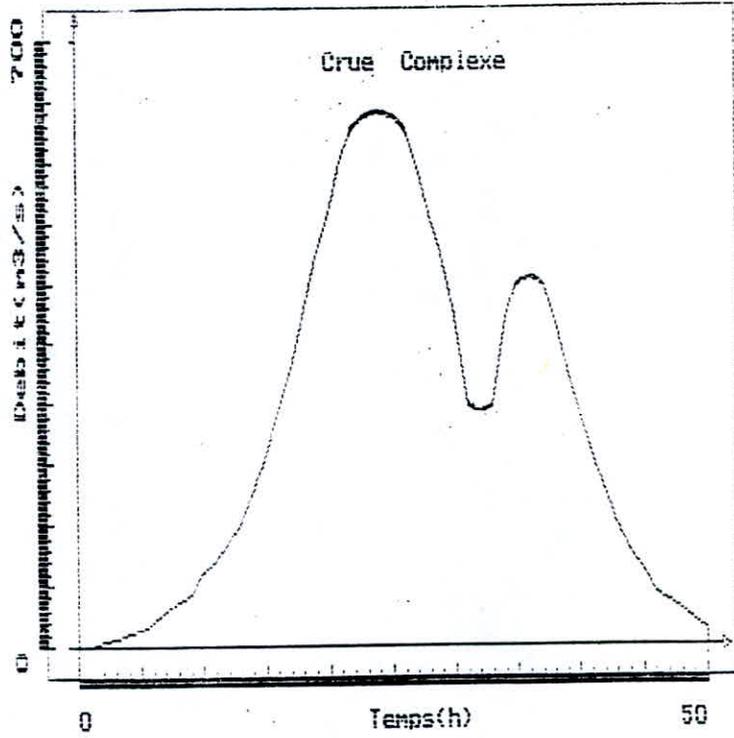
La protection par barrages est la meilleure, mais leur coût de construction impose leur utilisation à

d'autres fins : production hydro-électrique, irrigation, adduction, pour les amortir. Il faut donc concilier le stockage de l'eau à des fins économiques et le rôle de protection dévolu à ces constructions. La solution est de garder en réserve une tranche suffisante de la retenue.

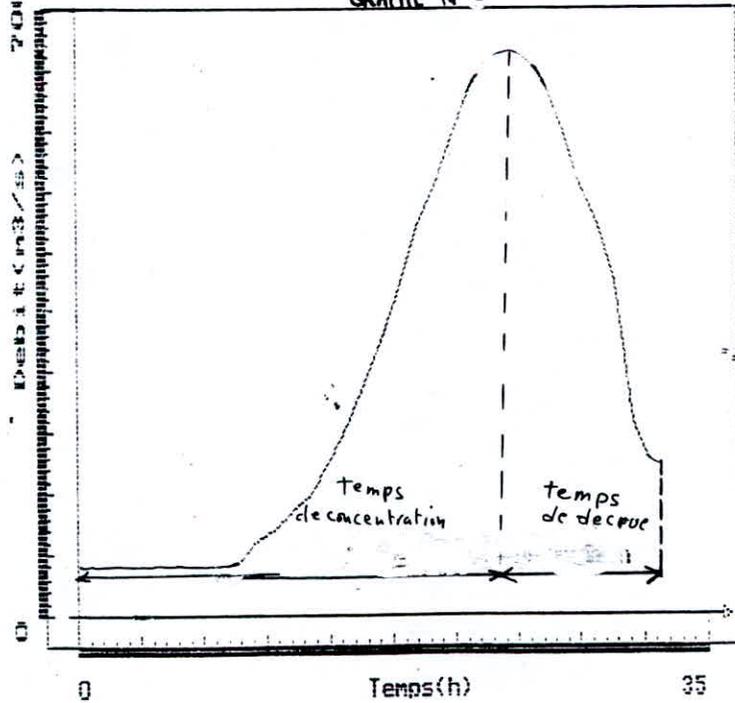
Dans l'ensemble, les barrages sont plus avantageux que les endiguements, leur utilité est optimum dans les bassins petits et moyens.



GRAPHE N°7



GRAPHE N°6



CHAPITRE IV

PREVISION DES CRUES

IV.1. - DEFINITION.

La prévision hydrologique est par définition l'estimation au préalable des états futurs d'un phénomène hydrologique en temps réel.

IV.2. - DELAI DE PREVISION. (d)

C'est un intervalle de temps entre la date de prévision (celle du dernier indicateur collecte) et la date (ou échéance) de la variable prévue.

IV.3. - PRINCIPE DE PREVISION.

Prévoir une crue revient à calculer un débit ou une hauteur d'eau, que l'on observe à l'instant $(t + dt)$ à une station aval, à partir d'observations enregistrées à l'instant t à une ou plusieurs stations amont.

Le souci du prévisionniste est par conséquent de mettre au point des méthodes offrant des délais de prévision les plus grands possibles, mais compatibles avec le phénomène physique.

IV.4. - CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PREVISION ET D'ANNONCE DE CRUES.

Les systèmes de prévision et d'annonce des crues se composent :

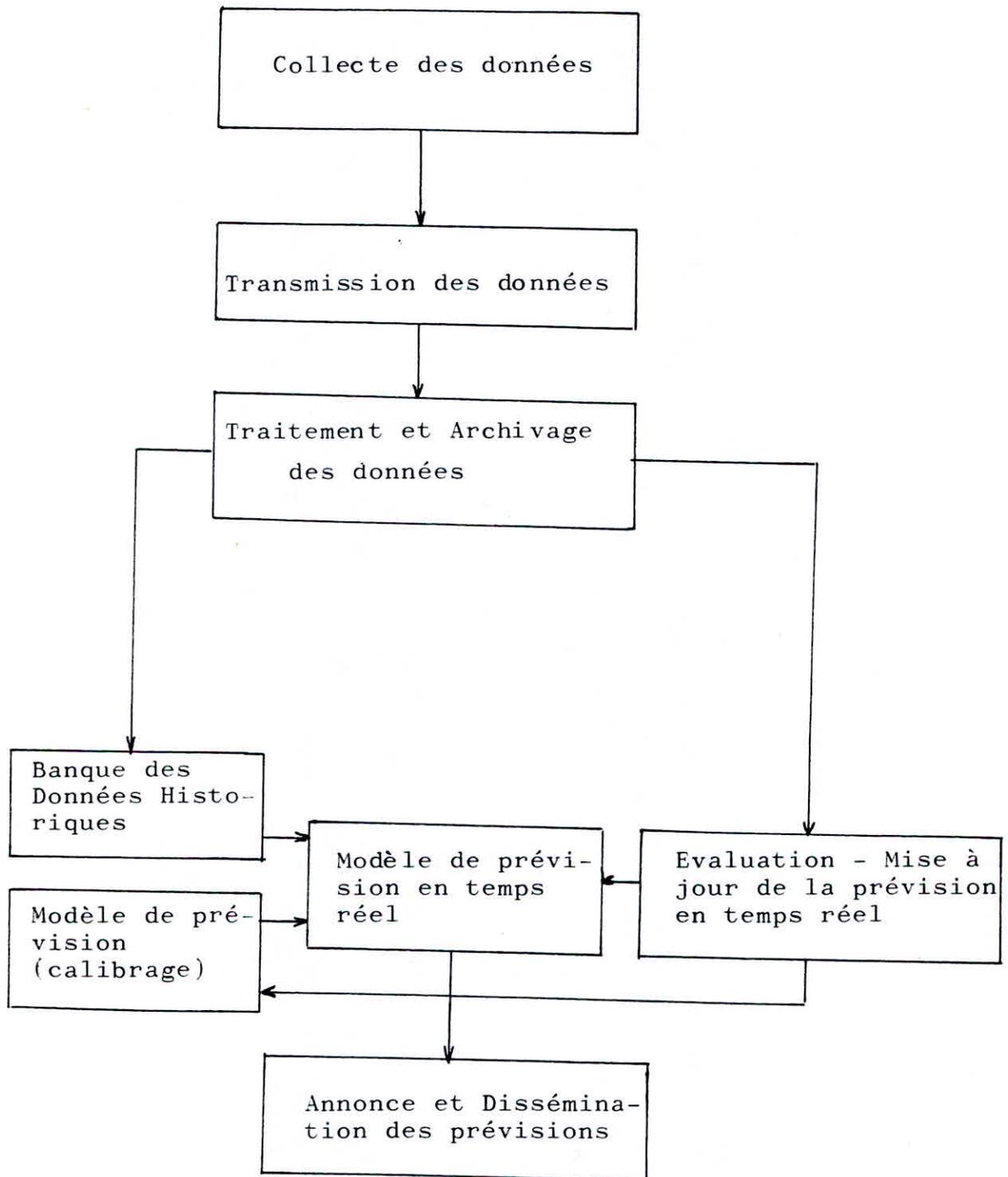
- d'un réseau de stations de mesures pluviométriques (lymnimétriques) notamment la hauteur de précipitations et niveau d'eau en rivière.
- D'un système de transmission très rapide qui achemine ces don-

nées sur un centre de calcul.

- D'un modèle mathématique qui utilise un ou plusieurs méthodes de calcul. Celui-ci est un moyen nécessaire pour exploiter les informations obtenues et fournir au fur et à mesure du déroulement de la crue, des estimations de l'évolution à venir des niveaux et des débits.

La figure suivante montre les différents éléments constituant un système de prévision et d'alerte des crues.

IV.5. - SYSTEME DE PREVISION HYDROLOGIQUE.



CHAPITRE V.

ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

REGIME TRANSITOIRE

V.1. - METHODE DE PREVISION FONDEE SUR LA NOTION D'ONDE DE CRUE.

Domaine d'application :

Les méthodes de prévision des crues qui font appel à la notion d'onde de crue visent à déterminer les éléments futurs de l'onde en un point donné d'après les éléments passés qu'on a pu recueillir N heures (N jours) plus tôt en un ou plusieurs points, situés généralement à l'amont. Ce sont des méthodes relativement précises et sûres, mais dont l'emploi se heurte aux mêmes conditions restrictives que la notion d'onde de crue sur laquelle elles s'appuient.

Or la notion d'onde de crue suppose qu'il n'y ait pas d'apports ni de pertes d'eau d'un bout à l'autre de l'écoulement. On ne peut donc utiliser les méthodes de prévision fondées sur la notion d'onde de crue :

- qu'en dehors des régimes dont les pluies, la neige ou la glace concourent d'une façon appréciable à la formation et à l'alimentation de crue.

- Qu'en l'absence de champs d'inondation ou d'infiltration susceptibles de détourner momentanément une part appréciable des débits de crue. La notion d'onde de crue repose d'autre part, sur la notion d'écoulement par tranches, on ne peut donc utiliser les méthodes de prévision fondées sur la notion d'onde de crue qu'en l'absence de variation notable de largeur de la zone de grand écoulement, ces variations sont causées par des accidents topographiques ou d'inondation latérales.

- La plupart des méthodes de prévision fondées sur la notion d'onde de crue n'utilisent enfin que des éléments relevés en un ou plusieurs points à l'amont, on ne peut donc les utiliser qu'en l'absence de seuils de barrage, d'étran-

glements du lit, de champs d'inondation, de remous ou de marais pouvant réagir de l'aval vers l'amont.

V.2. EQUATIONS DE BASE

(Equations de Barre Saint-Venant)

V.2.1 - Hypothèses : (guide de prévision)

Les équations décrivant les écoulements non permanents à surface libre dans les rivières ou canaux sont fondées sur une série d'hypothèses énoncées par le guide de prévision T.II (1871).

- L'écoulement est unidimensionnel.
- La répartition des pressions sur une verticale est hydrostatique (on néglige les accélérations d'inertie).
- La densité de l'eau est constante.
- Les pertes de charges régulières sont représentées globalement par les mêmes formulations qu'en régime permanent.

Dans ces conditions, l'écoulement peut-être parfaitement défini à partir de la connaissance de 2 variables dépendantes décrivant le mouvement du fluide le long du tronçon. Ces variables peuvent être les combinaisons suivantes :

- . (débit - profondeur),
- . (vitesse moyenne, côte de la surface libre),
- . etc ...

et sont déterminées en fonction des variables : sections transversales et temps.

V.2.2 - Equations fondamentales de l'écoulement non stationnaire :

V.2.2.1. Equation de conservation de la masse.

(ou équation de continuité)

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

$$\left[Q - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \right) \right] \Delta t = \left[\left(S + \frac{\partial S}{\partial t} \Delta t \right) - S \right] \Delta x \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t = \frac{\partial S}{\partial t} \Delta x \Delta t$$

soit :
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

Des apports latéraux répartis linéairement le long du tronçon Δ x peuvent être introduits dans le 1er membre de l'équation de bilan par l'adjonction d'un terme : q₁ Δ x Δ t, q₁ représenterait un débit (par unité de longueur) positif en cas d'apport et négatif en cas de prélèvement diffus, l'équation deviendra alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} + q_1 = 0$$

V.2.2.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement. (ou équation dynamique)

Cette équation montre l'égalité entre :
- d'une part, la variation de la quantité de mouvement à

l'intérieur du volume limité par le tronçon de longueur x .

- d'autre part, la somme de la quantité nette de mouvement entrant dans ce volume et des forces extérieures agissant sur ce volume.

Cette égalité s'écrit (en appelant h la profondeur de l'eau).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v h) \Delta x = \rho \left[(Vh) V - (Vh \cdot V + \frac{\partial}{\partial x} (Vh \cdot V) \Delta x) \right] + \rho h I \Delta x + \frac{1}{2} \rho \left(h^2 - (h^2 + \frac{\partial h^2}{\partial x} \Delta x) \right) - \rho g h J \Delta x .$$

Ce qui peut encore se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t} (Vh) + \frac{\partial}{\partial x} (V^2 h) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = g h (I - J) .$$

d'où

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g J = 0$$

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

$g \frac{\partial z}{\partial x}$: quantité et variation des forces de pression

$g J$: frottements.

CHAPITRE VI

MODELES DE PREVISION

VI.1. - INTRODUCTION SUR LES MODELES DE PREVISION.

Notre étude est consacrée aux méthodes et moyens à mettre en oeuvre pour réaliser des prévisions de crues. Ceux-ci sont regroupés sous le terme de système de prévision des crues. Le développement des modèles de prévision est nécessaire c'est à dire il faudra les modèles, les ajuster, les tester et les insérer dans le dispositif opérationnel. Il y a en effet de nombreux cas où des méthodes simples sont suffisantes pour une prévision de crues satisfaisante.

VI.2. - LES PRINCIPAUX MODELES.

Si le facteur averse est fondamental dans la génèse des crues, il n'est pas le seul et, dans une certaine mesure, il est subordonné aux caractéristiques du bassin que l'on peut prendre en compte selon deux méthodes :

- Une expérimentale consiste à étudier sur maquette le phénomène crue en différentes parties du bassin.

- L'autre, mathématique, se fonde sur des équations empiriques où les principaux facteurs modifiant l'écoulement sont présentés par des paramètres.

Les équations les plus employées sont fondées sur la propagation des ondes et mettent en oeuvre les 2 équations de l'écoulement stationnaire du BARRE SAINT-VENANT, l'une exprime la conservation des volumes (équation de continuité).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{\partial S}{\partial t}$$

L'autre la conservation de la quantité de mouvement, c'est-à-dire l'équilibre qui existe à chaque instant entre l'accélé-

ration motrice d'une part, la résistance due aux pertes de charges et aux frottements d'autre part. C'est l'équation dynamique :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial X} = -g \frac{\partial H}{\partial X} + g (I - J)$$

- H : hauteur de la tranche d'eau
- Q : débit
- S : section mouillée
- V : vitesse moyenne
- g : accélération de la pesanteur
- X : abscisse de la section étudiée.

Les modèles mathématiques sont étudiés par comparaison avec des crues réellement observées. Leur mise au point terminée, il devient possible d'étudier, en faisant varier les paramètres, le comportement des hauteurs d'eau, des débits, du lit, etc ... En cas de crue.

Le tableau ci-après résume les principaux modèles utilisés pour la prévision et l'étude des phénomènes de propagation.

VI.3. - MODELES DE PREVISION ETUDIES.

On classe les algorithmes de prévision de crue en temps réel en deux catégories :

a) - Les méthodes immédiates, qui ne font intervenir que l'information à la station où s'effectue la prévision.

b) - Les méthodes à liaisons spatiales, faisant intervenir des observations et mesures en des points extérieurs à la station où l'on veut effectuer la prévision.

Classification des méthodes	Nom des méthodes	Système d'équations sur lequel sont basées les différentes méthodes	Application
Modèles mathématiques	Méthode des caractéristiques	$v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = g (I - J)$ $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$	Etude de la propagation des ondes de crues
	Méthode HAYAMI Méthode des casiers	$\frac{\partial H}{\partial x} = I - J$ $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$	
Modèles hydrologiques statistiques	Méthode de MUSKINGUM	$I - J = 0$ $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$	Modèle de prévision des crues ou modèle d'étude de la propagation des ondes de crues
Modèle graphique	Méthode de BACHET	$\frac{\partial H}{\partial x} = I - J$ $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$	Méthode de propagation de crues

VI.3.1 - Méthodes immédiates :

VI.3.1.1. Méthode d'extrapolation.

L'extrapolation sera fondée tout simplement sur les procédés 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 (THIRRIOT 1984).

Pour la construction des formules on est parti de l'élaboration théorique de THIRRIOT et HABAIEB (1986) qui par des opérateurs des différences ont construit l'algorithme d'extrapolation.

Principe : construire une fonction d'approximation.

Données : débits Q aux p instants antérieurs.

($Q(t)$, $Q(t - dt)$, $Q(t - 2dt)$... $Q(t - (p - 1) dt)$) débits observés

inconnues $Q(t + dt) =$ (prévision)

Hypothèses de calcul :

A : opérateur d'avancement

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

∇ : opérateur de différences arrières

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

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

$$(2) \Leftrightarrow \nabla Q(t) = A Q(t - dt) - Q(t - dt)$$

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

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

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

$$\nabla A^{-1} Q(t) = (1 - A^{-1}) Q(t - dt) \quad \text{de (1)}$$

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

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

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

$$\nabla^P = (1 - A^{-1}) \nabla^{P-1} = (1 - A^{-1})^P$$

$$\nabla^P = (1 - P A^{-1} + [P(P-1)/2] A^{-2} \dots + (-1)^K \binom{K}{P} A^{-K} + \dots)$$

$Q(t)$: fonction représentée par un polynôme d'ordre $(p - 1)$.

$$\Rightarrow \nabla^P Q(t + dt) = 0.$$

a) - Extrapolation linéaire :

Soit $P = 2$ $Q(t)$ est d'ordre 1 ; $Q(t)$: débit observé à la station considérée.

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

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

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

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

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

$$Q(t + dt) = 2 Q(t) - Q(t + dt)$$

On a abouti ainsi au résultat de l'extrapolation linéaire où le débit calculé à l'instant $(t + dt)$ dépend des débits obser-

servés aux instants t et $(t - dt)$

b) - Extrapolation parabolique

Soit $P = 3$ $Q(t)$ est d'ordre (2)

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

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

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

$$Q(t + dt) = 3 Q(t) - 3 Q(t - dt) + Q(t - 2dt)$$

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

c) - Extrapolation à l'aide d'un polynôme de NEWTON de troisième degré :

Soit $P = 4$ $Q(t)$ est de degré 3

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

$$Q(t + dt) = 4 Q(t) - 6 Q(t - dt) + 4 Q(t - 2dt) - Q(t - 3dt)$$

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

d) - Extrapolation d'ordre $(p - 1)$:

Pour $Q(t)$ d'ordre $(p - 1)$

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

$$= [1 - p A^{-1} + [p(p - 1)/2] A^{-2} + \dots + (-1)^K C_p^K A^{-K} + \dots] Q(t + dt) = 0$$

$$Q(t + dt) = 0$$

$$Q(t + 1dt) = p Q(t) - P(p-1)/2 Q(t - dt) \dots + (-1)^K C_p^K$$

$$Q(t + d - Kd) + \dots (-1)^P Q(t - (p-1) dt)$$

Cette dernière représente la fonction d'interpolation donnant $Q(t + dt)$ concernant les p valeurs précédentes $Q(t - Kd)$.

$K \in [0, p - 1]$.

VI.3.1.2. Polynôme de lissage.

L'algorithme d'interpolation étant très sensible aux erreurs aléatoires, il est commode pour y remédier d'utiliser les techniques de lissage.

Par la méthode des moindres carrés habituelle, on détermine les coefficients du polynôme d'approximation (THIRRIOT 1984) on construit le polynôme particulier donnant plus de poids à la dernière observation 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 alors formule à pivot.

Le lissage consiste à utiliser une fonction d'approximation qui ait moins de degrés de liberté qu'on ne considère de pôles (ou dates d'observation) en faisant intervenir des conditions de régularité qui lissent l'approximation. Le graphe d'approximation passe au plus près de points observés sans forcément coïncider, à la différence de la fonction d'interpolation.

a) - Formule de lissage linéaire :

$$\text{Soit l'approximation linéaire } W' = C_0 + C_1 u$$

approximation de $W = C_0 + C_1 u + \xi$.

ξ : résidu ou bruit blanc.

Nous calculerons les coefficients C_0, C_1 par la méthode des

moindres carrés dont le principe est de minimiser $(\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2)$ les coefficients sont calculés de manière à minimiser :

$$\sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)]^2$$

Ce qui donne le système :

$$S = \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)]^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial C_0} = 2 \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] (-1) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial C_1} = 2 \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] (-U_i) = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] = 0 \\ \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] U_i = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] &= \sum_{i=0}^{P-1} W_i - \sum_{i=0}^{P-1} (C_0 + C_1 U_i) \\ &= \sum_{i=0}^{P-1} W_i - [P C_0 + C_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i] = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{et } \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (C_0 + C_1 U_i)] U_i &= \sum_{i=0}^{P-1} [W_i U_i - (C_0 U_i + C_1 U_i^2)] \\ &= \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i - \sum_{i=0}^{P-1} (C_0 U_i + C_1 U_i^2) = 0 \\ &= \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i - [C_0 \sum_{i=0}^{P-1} U_i + C_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2] = 0 \end{aligned}$$

d'où :

$$P C_0 + C_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i = \sum_{i=0}^{P-1} W_i$$

$$C_0 \sum_{i=0}^{P-1} U_i + C_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 = \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i$$

Sous forme de matrice :

$$\begin{vmatrix} P & \sum_{i=0}^{P-1} U_i \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_0 \\ C_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{P-1} W_i \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i \end{vmatrix}$$

C_0, C_1 sont les inconnues de ce système, la solution de ce système me permet de déterminer les coefficients C_0, C_1 .

- Lissage linéaire à (2) points de base ($p = 2$).

$$\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_0 \\ C_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_0 + W_1 \\ 0 + W_1 \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} C_0 = W_0 \\ C_1 = W_1 - W_0 \end{matrix}$$

$$W'_i = C_0 + C_1 U_i = W_0 + (W_1 - W_0) U_i$$

$$W'_{-1} = W_0 + (W_1 - W_0) U_{-1}$$

$$\text{avec : } U_{-1} = -1 \quad W'_{-1} = Q(t + d)$$

d'autre part :

$$W'_i = Q(t - id)$$

$$W'_0 = Q(t) \quad \text{et} \quad W_1 = Q(t - d)$$

d'où :

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

Formule de lissage à deux points de base : extrapolation linéaire.

- Lissage linéaire à (3) points de base (p = 3).

$$\begin{vmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C_0 \\ C_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_0 + W_1 + W_2 \\ W_1 + 2 W_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} C_0 \\ C_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 3 & -1 \\ 3 & 5 & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} W_0 + W_1 + W_2 \\ W_1 + 2 W_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} C_0 \\ C_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5/6 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} W_0 + W_1 + W_2 \\ W_1 + 2 W_2 \end{vmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} C_0 = \frac{1}{6} (5 W_0 + 2 W_1 - W_2) \\ C_1 = \frac{1}{2} (W_2 - W_0) \end{cases}$$

L'extrapolation en $i = -1$

$$W'_i = C_0 + C_1 U_i$$

$$= \frac{1}{6} [5 W_0 + 2 W_1 - W_2] + 1/2 [W_2 - W_0] U_i$$

$$W_{-1} = Q(t + d)$$

$$W'_{-1} = \frac{1}{6} (5 W_0 + 2 W_1 - W_2) - 1/2(W_2 - W_0)$$

$$W'_{-1} = \frac{1}{3} (4 W_0 + W_1 - \underline{2} W_2) \quad \text{avec } W_i = Q(t - id)$$

d'où :

$$Q(t + d) = (4 Q(t) + Q(t - d) - 2 Q(t - 2d))/3$$

- Lissage linéaire à 3 points de base : Extrapolation linéaire.

N.B. une augmentation de points de base conduit à une instabilité.

b) - Formule de lissage parabolique :

Soit l'approximation parabolique $W' = d_0 + d_1 u + d_2 u^2$
 et $W = d_0 + d_1 U + d_2 U^2 + \varepsilon$

De la même manière que précédemment, les coefficients d_i servent à calculer par la méthode des moindres carrés.

$$S = \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2)]^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial d_0} = - 2 \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2)] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial d_1} = 2 \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2)] (- U_i) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial d_2} = 2 \sum_{i=0}^{P-1} [W_i - (d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2)] (- U_i^2) = 0 \quad (3)$$

$$(1) \Rightarrow \sum_{i=0}^{P-1} W_i - \sum_{i=0}^{P-1} (d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2) = \sum_{i=0}^{P-1} W_i - p d_0 - d_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i - d_2 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 = 0$$

$$\Rightarrow p d_0 + d_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i + d_2 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 = \sum_{i=0}^{P-1} W_i$$

$$(2) \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i = d_0 \sum_{i=0}^{P-1} U_i + d_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 + d_2 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^3$$

$$(3) \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 W_i = d_0 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 + d_1 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^3 + d_2 \sum_{i=0}^{P-1} U_i^4$$

d'où :

$$\begin{vmatrix} P & \sum_{i=0}^{P-1} U_i & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^3 \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^3 & \sum_{i=0}^{P-1} U_i^4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{P-1} W_i \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i W_i \\ \sum_{i=0}^{P-1} U_i^2 W_i \end{vmatrix}$$

Résolution du système par la méthode de CRAMER

D = déterminant principal (D ≠ 0)

D_j = déterminant associé

$$b_j = \frac{D_j}{D}$$

d'où :

$$W_i' = d_0 + d_1 U_i + d_2 U_i^2$$

$$W_{-1} = Q(t + d)$$

$$W_{-1} = d_0 + d_1(-1) + d_2(-1)^2$$

$$\begin{aligned} W_{-1} &= \frac{D_0}{D} + \left(-\frac{D_1}{D}\right) + \frac{D_2}{D} \\ &= \frac{1}{D} (D_0 - D_1 + D_2) \end{aligned}$$

d'où

$$\underline{Q(t+d) = \frac{1}{D} (D_0 - D_1 + D_2)}$$

Lissage parabolique : extrapolation parabolique.

- Lissage parabolique à 4 points de base. (p = 4)

$$\begin{vmatrix} 4 & 6 & 14 \\ 6 & 14 & 36 \\ 14 & 36 & 98 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} W_0 + W_1 + W_2 + W_3 \\ 0 + W_1 + 2W_2 + 3W_3 \\ 0 + W_1 + 4W_2 + 9W_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{vmatrix}$$

$$D_0 = \det \begin{vmatrix} A_0 & 6 & 14 \\ A_1 & 14 & 36 \\ A_2 & 36 & 98 \end{vmatrix} = -76 A_0 - 34 A_1 + 20 A_2$$

$$D_1 = \det \begin{vmatrix} 4 & A_0 & 14 \\ 6 & A_1 & 36 \\ 14 & A_2 & 98 \end{vmatrix} = -84 A_0 + 196 A_1 - 60 A_2$$

$$D_2 = \det \begin{vmatrix} 4 & 6 & A_0 \\ 6 & 14 & A_1 \\ 14 & 36 & A_2 \end{vmatrix} = 20 A_2 - 60 A_1 + 20 A_0$$

$$D = \det \begin{vmatrix} 4 & 6 & 14 \\ 6 & 14 & 36 \\ 14 & 36 & 98 \end{vmatrix} = 80$$

$$Q(t + d) = \frac{1}{D} (D_0 - D_1 + D_2)$$

$$Q(t + d) = \frac{1}{4} (9 A_0 - 17 A_1 + 5 A_2)$$

$$Q(t + d) = \frac{1}{4} (9 W_0 - 3 W_1 - 5 W_2 + 3 W_3) \quad W_i = Q(t - id)$$

$$Q(t + d) = \frac{1}{4} [9 Q(t) - 3 Q(t - d) - 5 Q(t - 2d) + 3 Q(t - 3d)]$$

Lissage parabolique : extrapolation parabolique.

VI.3.2 - Méthode à liaison spatiale : Méthode MUSKINGUM.

VI.3.2.1. Généralités.

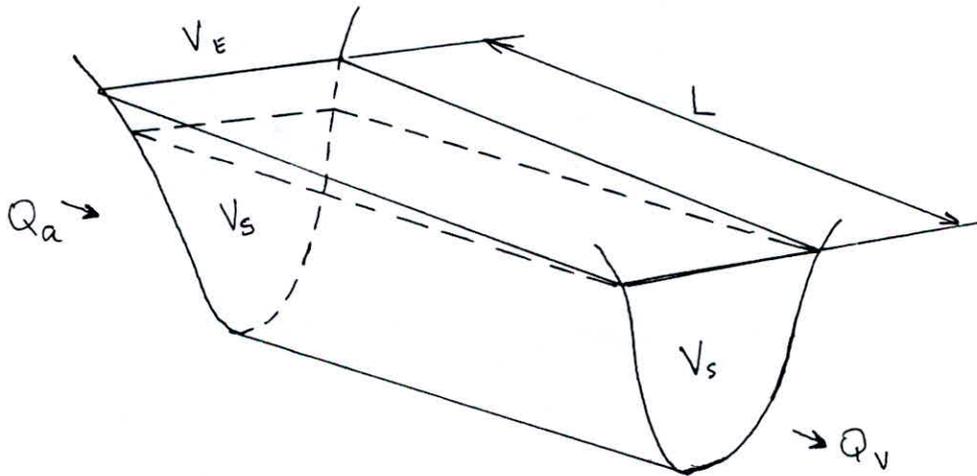
Cette méthode a été établie aux ETATS-UNIS sur la rivière MUSKINGUM, elle fut développée à l'origine par Mc. CARTHY et par des ingénieurs de l'US en 1934 - 35 (Référence : Vidal - le guide de prévision).

- Le but est de simuler ce qui aurait été la prévision des débits à partir de certains temps initiaux.

Le problème est de calculer l'hydrogramme de la crue à l'aval avec un délai de prévision à partir des débits observés à l'amont.

La comparaison des débits calculés avec les débits observés permet le réglage des fonctions du modèle de propagation.

- Hypothèse. On admet que les caractéristiques de l'écoulement changent peu dans tout le tronçon (faible variation de la forme du lit, de la pente de charge, de la pente du lit ...). On suppose que la qualité de liquide contenu à l'intérieur de l'élément de rivière est une fonction linéaire du débit d'entrée Q_a (amont) et de sortie (aval) Q_v .



VI.3.2.2. Détermination du débit prévu

La méthode de MUKSINGUM est basée uniquement par l'équation de continuité de SAINT-VENANT (l'équation dynamique est négligée).

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

b - Equation dynamique négligée : $I = J$ (2)
 (onde cinématique)

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

I : pente du fond du bief

J : pente de charge unitaire

K : coefficient de STRICKLER

S : section mouillée

R_h : rayon hydraulique

$$I = \frac{Q^2}{K^2 S^2 R_h} \Rightarrow S = \frac{Q}{K \sqrt{I R_h}} \quad (a)$$

$$\frac{\partial S^2}{\partial t} = 2S \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{2Q}{K^2 R_h I} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (b)$$

de (a) et (b) on a :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{K \sqrt{I R_h}} \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{1}{C(Q)} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (c)$$

d'où de (1) on a :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = C(Q) \cdot q \quad (3)$$

avec $C(Q) = [K \sqrt{I R_h}]$

a) - Méthode intuitive directe :

Après une discrétisation sur les sous-domaines X_i , X_{i+1} et t_i , t_{i+1} .

On obtient le modèle de MUSKINGUM en supposant d'apport nul ($q = 0$).

$$Q_V(t + d) = a_1 Q_a(t) + a_2 Q_a(t + d) + a_3 Q_V(t) \quad (4)$$

$Q_a(t)$, $Q_V(t)$: débits historiques.

$Q_V(t + d)$, $Q_a(t + d)$: débits futurs avec un délai de prévision d .

a_1 , a_2 , a_3 : coefficients.

b) - Calage des paramètres :

En absence d'échanges latéraux en écoulement permanent $Q_V = Q_a$ d'où $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Le modèle est parfaitement défini par la connaissance de deux paramètres a_1 et a_2 d'où :

$$Q_V(t + d) = a_1(Q_a(t) - Q_V(t)) + a_2(Q_a(t + d) - Q_V(t)) + Q_V(t)$$

(5)

VI.3.2.3. Application de la méthode de MUSKINGUM pour la prévision des crues.

Ce modèle permet d'obtenir le débit à l'aval à l'instant $(t + d)$ (ou calculé $Q_c(t + d)$), si on connaît les valeurs des débits au temps t aux différentes stations

(ce qui est possible en temps réel) et si on connaît aussi la valeur du débit à la station précédente au même temps $(t + d)$ $Q_a(t + d)$, ce qui est impossible en temps réel, pour présenter ce modèle comme méthode de prévision il faudra extrapoler l'hydrogramme amont.

En utilisant l'extrapolation parabolique à l'amont, on obtient le calage de ce modèle de la même façon que celui cité précédemment en remplaçant juste $Q_a(t + d)$ par :

$$Q_a(t + d) = 3 Q_a(t) - 3 Q_a(t - d) + Q_a(t - 2d) \quad (6)$$

$$Q_V(t + d) = a_1 Q_a(t) + a_2 [3 Q_a(t) - 3 Q_a(t - d) + Q_a(t - 2d)] + a_3 Q_V(t) \quad (7)$$

a_1, a_2, a_3 : sont des coefficients à déterminer par optimisation.

VI.3.2.4. Optimisation des paramètres.

Les **méthodes** d'optimisation sont un des outils de base dans les Sciences de l'Ingénieur. Elles interviennent dans les domaines extrêmement variés comme aide à la conception de produits ou au fonctionnement du système. Un problème d'optimisation se caractérise par des paramètres à optimiser.

L'étude d'un tel problème comporte trois points principaux :

- démonstration de l'existence (et si possible de l'unicité) d'une solution ;
- obtention des conditions nécessaires (et suffisantes) d'optimalité ;

- mise en place d'une méthode numérique pour obtenir une solution.

Critère des Moindres Carrés :

C'est un problème de minimisation dont le critère E est une somme de carrés :

$$E = \sum_{i=1}^N a_j Q_i^2$$

Ensuite on dérive E par rapport aux coefficients a_j ($j = 1, 2$)

VI.3.2.5. Détermination des coefficients

a_1 , a_2 et a_3 .

On suppose que l'écoulement est permanent puisqu'on étudie sur un tronçon de petite longueur L.

d'où

$$\underline{a_1 + a_2 + a_3 = 1} \tag{8}$$

$$a_3 = 1 - a_1 - a_2 \tag{9}$$

On pourra déterminer ces coefficients à partir d'une crue précédente par la méthode des moindres carrés afin de réduire et de rendre négligeable l'erreur amenée par l'évaluation du débit entrant à l'instant t et (t + dt) et débit sortant à (t) de (7) et (9) on a :

$$Q_V(t + d) = a_1 [Q_a(t) - Q_V(t)] + a_2 [3 Q_a(t) - 3 Q_a(t - d) + Q_a(t - 2d) - Q_V(t)] + Q_V(t)$$

En minimisant l'expression suivante par rapport aux coefficients a_1 et a_2 :

donc résolution d'un système d'équation :

$$E = \sum_{2d+1}^{N-d} \left[Q_V(t+d) - a_1 [Q_a(t) - Q_V(t)] - a_2 [3Q_a(t) - 3Q_a(t-d) + Q_a(t-2d) - Q_V(t)] - Q_V(t) \right]^2$$

$$\begin{cases} \frac{\delta E}{\delta a_1} = 0 & \text{et} & \frac{\delta E}{\delta a_2} = 0 \end{cases}$$

Après dérivation, le dernier système trouvé est de la forme :

$$\begin{cases} a_1 A_1 + a_2 A_2 = B_1 \\ a_1 A_3 + a_2 A_3 = B_1 \end{cases}$$

Où :

$$A_1 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_a(t) - Q_V(t)]^2$$

$$A_2 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_a(t) - Q_V(t)] [Q_a(t+d) - Q_V(t)]$$

$$A_3 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_a(t) - Q_V(t)] [Q_a(t+d) - Q_V(t)]$$

$$A_4 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_a(t+d) - Q_V(t)]^2$$

$$B_1 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_V(t+d) - Q_V(t)] [Q_a(t) - Q_V(t)]$$

$$B_2 = \sum_{2d+1}^{N-d} [Q_V(t+d) - Q_V(t)] [Q_a(t+d) - Q_V(t)]$$

avec :

$$Q_a(t+d) = 3Q_a(t) - 3Q_a(t-d) + Q_a(t-2d)$$

En résolvant le système on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{\det_1}{\det} = \frac{B_1 A_4 - B_2 A_2}{A_1 A_4 - A_2 A_3} \\ a_2 = \frac{\det_2}{\det} = \frac{A_1 B_2 - A_3 B_1}{A_1 A_4 - A_2 A_3} \\ a_3 = 1 - a_1 - a_2 \end{array} \right.$$

CHAPITRE VII

RESULTATS ET INTERPRETATION

VII.1. - OBJECTIF.

L'objectif consiste à gérer la qualité instantanée de l'ensemble des modèles utilisés et à choisir les meilleurs modèles pour un délai le plus large possible.

La comparaison des modèles permet de choisir :

- un modèle de base à utiliser,
- plusieurs modèles en cas de difficulté.

Ceux-ci consistent à classer les modèles par ordre de préférence, ainsi lorsque le modèle de base est rejeté, on examine le modèle suivant.

VII.2. - APPLICATION DES METHODES.

Les données observées aux stations de BAGHLIA et de BELLOUA sont appliquées pour faire de la prévision par les méthodes de MUSKINGUM et immédiates, sur les six crues survenues récemment à l'Oued SEBAOU. Celles-ci ont été testées par pas de prévision d'une heure allant de une à six heures.

Les graphes présentés dans l'annexe ont été obtenus par les modèles correspondant aux six crues et aux débits cités.

Ainsi pour juger de la fiabilité de chaque méthode, nous avons utilisé le critère de NASH.

VII.3. - CRITERE DE NASH.

La minimisation d'une fonction est un problème extrêmement fréquent en hydrologie dont les paramètres ne peuvent pas être estimés directement.

La fonction à minimiser traduit la proximité entre les débits observés et calculés.

Le critère le plus utilisé est celui des moindres carrés s'écrit :

$$C = \sum_{i=1}^N (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}})^2$$

Q_{obs} : débit observé

Q_{cal} : débit calculé.

Le critère de NASH consiste à comparer la variance de l'erreur à la variance de la variable Q_{obs} .

$$V = \sum_{i=1}^N (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2$$

V : variance de la variable Q_{obs}

$\overline{Q_{\text{obs}}}$: désigne la moyenne des Q_{obs} , soit :

$$\overline{Q_{\text{obs}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{\text{obs}}$$

Le critère de NASH exprimé en pourcentage s'écrira :

$$C_V = 100 \left(1 - \frac{C}{V} \right)$$

Plus C_V tend vers 100% plus le modèle est bon et meilleur, des valeurs négatives correspondent à des modèles plus mauvais. les tableaux ^{n° 3A, 3B} présentés à la fin rend compte des résultats des différentes méthodes. (voir page (72, 73))

VII.4. - INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les programmes qui ont été développés nous ont permis de tester et d'apprécier les performances des différentes méthodes étudiées.

TABLEAU 1.A.

Voir page : 68

C R U E	Extrapolation linéaire	Extrapolation parabolique	Extrapolation du 3ème degré	Lissage linéai- re à 3 points de base	Lissage parabo- lique à 4 points de base
1	résultats très bons pour tous les pas de prévision	résultats très bons jusqu'à 5h - moins bons pour 6h	résultats très bons jusqu'à 3h - médiocres pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour tous les pas de prévision sauf pour 6h	très bons pour tous les pas sauf pour 6h
2	résultats très bons sauf pour 6h	résultats très bons jusqu'à 5h - médiocres pour 6h	résultats très bons jusqu'à 4h - moyens pour 5h - très mauvais pour 6h	très bons ré- sultats jus- qu'à 4h sauf pour 5 et 6h	très bons pour 1,2h - moyens pour 3h - très mauvais pour 4,5,6h
3	résultats très bons pour 1 et 2h - moyens pour 3,4h - mauvais pour 5 et 6h	très bons ré- sultats pour 1,2h - mauvais pour 3,4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1h - médiocres pour 2h - très mauvais pour 3,4,5h	résultats très bons jusqu'à 3h - moyens pour 4,5,6h	très bons ré- sultats jus- qu'à 3h - moyens pour 4,5h - mauvais pour 6h

TABLEAU 1.B.

voir page : 68

C R U E	Extrapolation linéaire	Extrapolation parabolique	Extrapolation du 3ème degré	Lissage linéai- re à 3 points de base	Lissage parabo- lique à 4 points de base
4	très bons ré- sultats pour 1 et 2h - mauvais pour 3,4,5h	très bons pour 1h - moyens pour 2h - très mauvais pour 3,4,5h	très bons ré- sultats pour 1h - mauvais pour 2h - très mauvais pour 3,4,5, 6h	très bons ré- sultats pour 1h - moyens pour 2h - très mauvais à partir de 3h	très bons ré- sultats pour 1h - très mauvais pour 2,3,4, 5,6h
5	très bons ré- sultats pour 1 et 2h - mauvais pour 3,4,5 et 6h	très bons pour 1,2h - moyens pour 3h - très mauvais pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1h - médiocres pour 2,3h - très mauvais pour 5,6h	très bons ré- sultats jus- qu'à 2h - très mauvais pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1h - très mauvais pour 2,3,4,5, 6h
6	très bons ré- sultats pour 1,2,3h - mauvais pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1,2,3h - mauvais pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1,2h - médiocres pour 3h - très mauvais pour 4,5 et 6h	très bons ré- sultats jus- qu'à 3h - moyens pour 4,5,6h	très bons ré- sultats pour 1,2h - mauvais pour 3,4,5,6h

VII.4.1 - Méthodes immédiates :

Les différentes appréciations qui sont résumées dans les tableaux n° 1^A₁₃ sont fondées sur une simulation numérique, qui a permis d'apprécier les performances de différents algorithmes basés sur l'extrapolation et le lissage et cela pour chaque crue et pour des délais de prévisions allant jusqu'à six heures.

Les graphes confirment les résultats du tableau

- Les graphiques du lissage et d'extrapolation linéaires sont satisfaisants dans les montées et descentes mais mauvais au voisinage du maximum et cela pour toutes les crues. Cette erreur sur le débit maximum est plus visible à partir du délai de prévision quatre heures.

- Les graphiques du lissage et d'extrapolation paraboliques, les hydrogrammes prévus à des délais une, deux, trois heures suivent l'allure de l'hydrogramme observé mais présentent plusieurs pics et ceci marque une instabilité très apparente pour toutes les crues.

- En ce qui concerne l'extrapolation du 3ème degré, ces instabilités sont plus nombreuses que pour l'extrapolation et le lissage paraboliques et deviennent plus accentuées au fur et à mesure que le pas de prévision augmente.

Donc il est préférable d'utiliser les modèles linéaires qui sont plus simples et plus satisfaisants. (voir Annexes)

VII.4.2 - Méthode de MUSKINGUM avec extrapolation amont et sans prise en compte de la pluie du critère de NASH :

Les résultats du critère de Nash :
qui mesure la proximité de deux séries de nombres observés aval

et prévus avec un pas de prévision d , nous a permis de classer le délai de prévision et quelque soit la valeur du débit maximum, la simulation de ces deux débits par ordre croissant voir tableau N°2

Cette méthode donne beaucoup de satisfactions.

La fiabilité du modèle diminue quand le pas de prévision augmente.

Nous remarquons que pour toutes les crues testées et avec les différents pas de prévision, la simulation est très bonne au niveau de la crue et de la décrue. Au niveau de la pente, les hydrogrammes des débits prévus augmentent légèrement par rapport au débit observé et de plus en plus quand d augmente et cela pour les crues :

(Voir Annexes) n°1 ($d = 4, 5, 6$)

n°2 ($d = 1, 2, 3, 4$)

n°4 ($d = 1, 2, 3$)

Ainsi pour la première crue, les débits prévus une heure, deux heures et trois heures après, sont presque confondus avec la crue historique pour un pas de prévision de quatre heures, le débit augmente de $66,173 \text{ m}^3/\text{s}$ et $141,584 \text{ m}^3/\text{s}$, pour un pas de prévision de six heures.

Donc pour cette crue, l'annonce doit être faite trois heures à l'avance.

La deuxième crue, le débit maximum augmente au fur et à mesure que le pas de prévision augmente de une à quatre heures, à cinq heures le débit diminue; n'empêche qu'il reste toujours supérieur à Q_{obs} , pour $d = 6\text{h}$ on a une crue complexe avec deux pointes de débits égaux à 2210.000 et $2631.096 \text{ m}^3/\text{s}$, d'où il est préférable d'alerter la population une heure à l'avance.

La troisième et quatrième crues, la simulation est excellente jusqu'à un pas de prévision de six heures, malgré qu'il y ait une légère augmentation de débit de $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$, trois heures après pour la troisième crue et de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ deux heures après pour quatrième crue.

La cinquième crue, le débit maximum reste approximativement le même que le débit observé, trois heures dépassées il y a dé-crue.

Enfin la dernière crue, le critère de NASH varie entre 99 et 100%, l'allure des hydrogrammes est tout à fait la même ce qui permet de prévenir la population six heures à l'avance.

Par conséquent, la méthode de MUSKINGUM est applicable pour l'Oued SEBAOU, vu que les résultats sont très bons.

TABLEAU N°2 DU CRITERE DE NASH: CV %

DU MODELE DE MUSKINGUM AVEC EXTRAPOLATION AMONT
 ET SANS PRISE EN COMPTE DE LA PLUIE

RIVIERE DE SEBAOU

OBSERVATION : STATION BAGHLIA
 PREVISION : STATION BELLOUA
 DUREE : 60 mn

d(h) Crue N°	1	2	3	4	5	6
1	100	99	99	97	96	100
2	98	98	91	94	83	100
3	95	95	82	94	71	100
4	94	93	93	92	60	98
5	93	94	87	96	48	99
6	91	82	86	98	39	99

TABLEAU DU CRITERE DE NASH: CV %

OBSERVATION : STATION BAGHLIA
 PREVISION : STATION BELLOUA
 DUREE : 60 mn

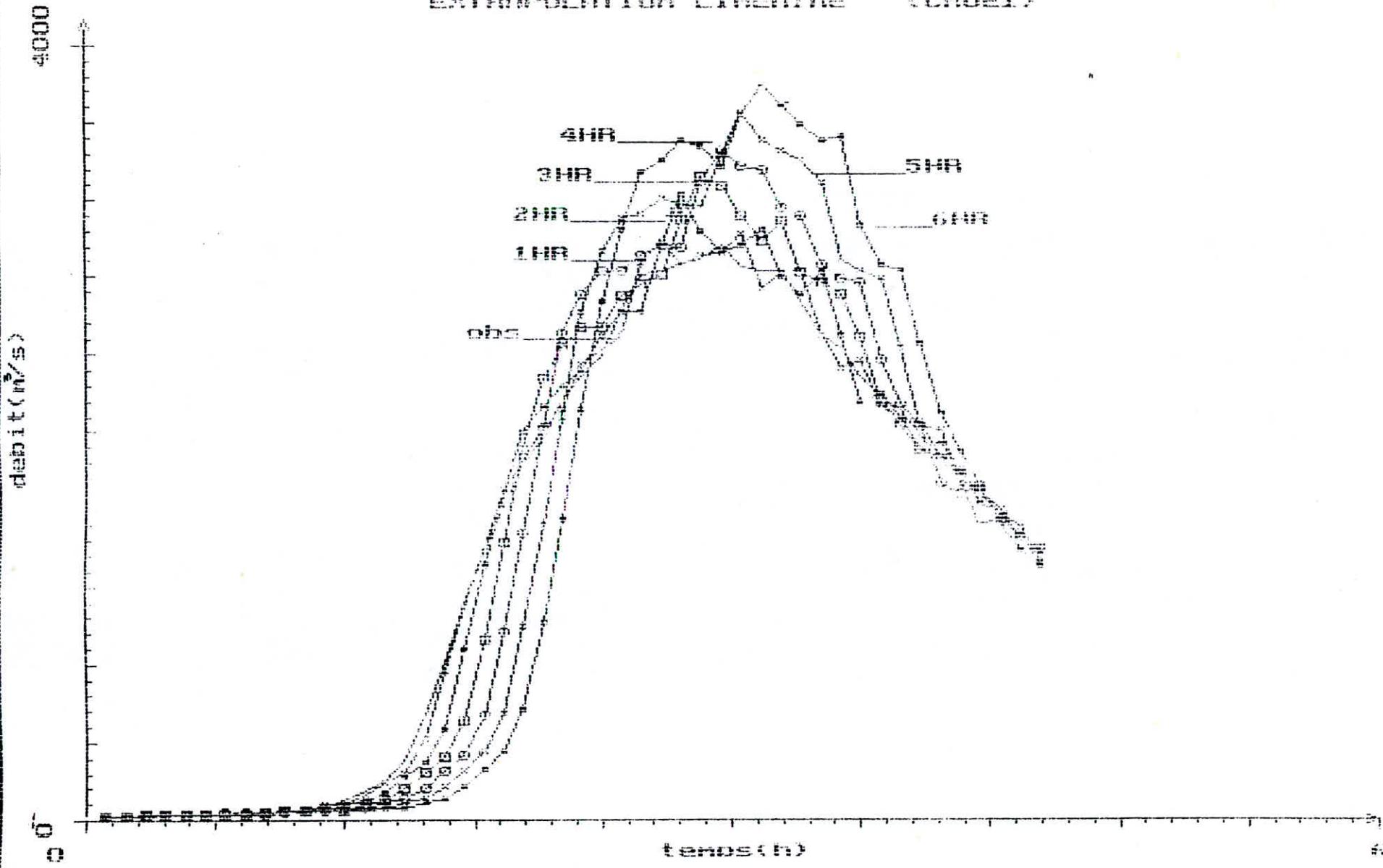
Crue	MODELE d(h)	1	2	3	4	5	6
1	Muskingum	100	99	99	97	96	100
	Extrapolation Lineaire	100	99	97	92	83	71
	Extrapolation Parabolique	99	98	95	88	77	62
	Extrapolation 3 degre	98	92	87	67	47	22
	Lissage Lineaire A 3 Points de Base	100	98	94	85	70	49
	Lissage Parabolique A 4 Points de Base	99	98	95	88	77	60
2	Muskingum	99	98	91	94	83	100
	Extrapolation Lineaire	100	98	95	88	76	58
	Extrapolation Parabolique	99	96	94	88	70	37
	Extrapolation 3 Degre	97	88	82	80	63	-2
	Lissage Lineaire A 3 Points de Base	-100	97	91	78	57	29
	Lissage Parabolique A 4 Points de Base	99	98	94	80	59	33
3	Muskingum	95	95	82	94	71	100
	Extrapolation Lineaire	99	88	68	48	26	-3
	Extrapolation Parabolique	98	78	25	-1	14	-11
	Extrapolation 3 Degre	96	42	-57	-117	-115	1
	Lissage Lineaire A 3 Points de Base	97	84	72	57	53	49
	Lissage Parabolique A 4 Points de Base	97	76	74	69	46	18

TABLEAU DU CRITERE DE NASH: CV %

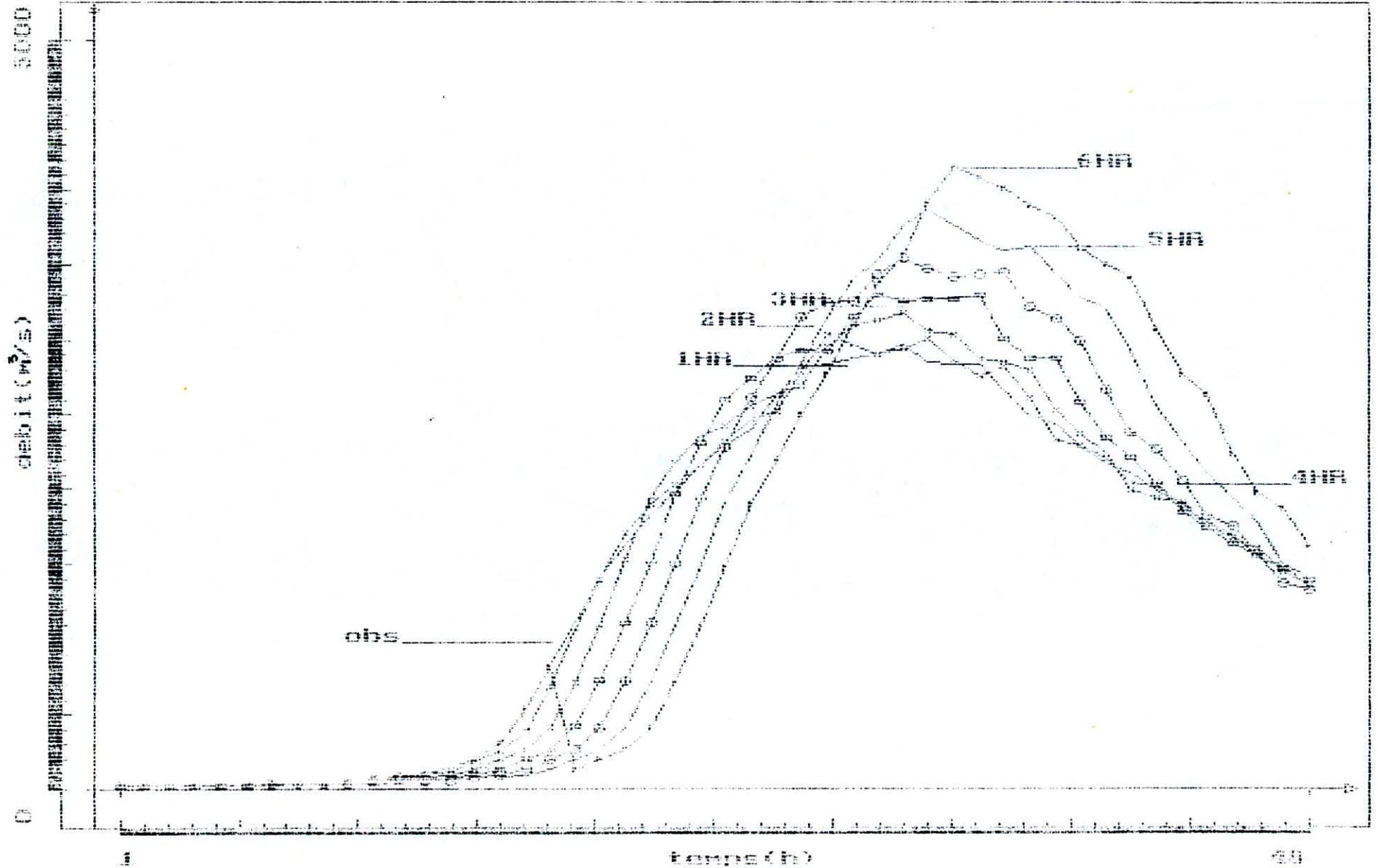
OBSERVATION : STATION BAGHLIA
 PREVISION : STATION BELLOUA
 DUREE : 60 mn

Crue	MODELE	d(h)	1	2	3	4	5	6
4	Muskingum		94	93	93	92	60	98
	Extrapolation Lineaire		97	76	28	-38	-104	-101
	Extrapolation Parabolique		95	63	-36	-205	-261	-304
	Extrapolation 3 Degre		85	15	-124	-501	-645	-441
	Lissage Lineaire A 3 Points de Base		95	62	23	-26	-36	-7
	Lissage Parabolique A 4 Points de Base		95	59	-9	-22	-67	-95
	5	Muskingum		93	94	87	96	48
Extrapolation Lineaire			98	86	56	-1	-76	-159
Extrapolation Parabolique			97	80	48	-68	-250	-220
Extrapolation 3 Degre			92	41	20	-105	-523	-236
Lissage Lineaire A 3 Points de Base			97	76	31	-30	-99	-129
Lissage Parabolique A 4 Points de Base			96	84	18	-65	40	99
6		Muskingum		91	82	86	98	39
	Extrapolation Lineaire		99	95	85	67	42	17
	Extrapolation Parabolique		98	92	71	33	1	-50
	Extrapolation 3 Degre		97	80	31	-80	-94	-127
	Lissage Lineaire A 3 Points de Base		99	92	77	60	67	77
	Lissage Parabolique A 4 Points de Base		99	91	73	57	46	51

EXTRAPOLATION LINEAIRE (CIRUEL)



PROFOND L'ENFURE A TROIS POINTS DE BASE (CRUEL)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°1)

Q (m³/s)

2700.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

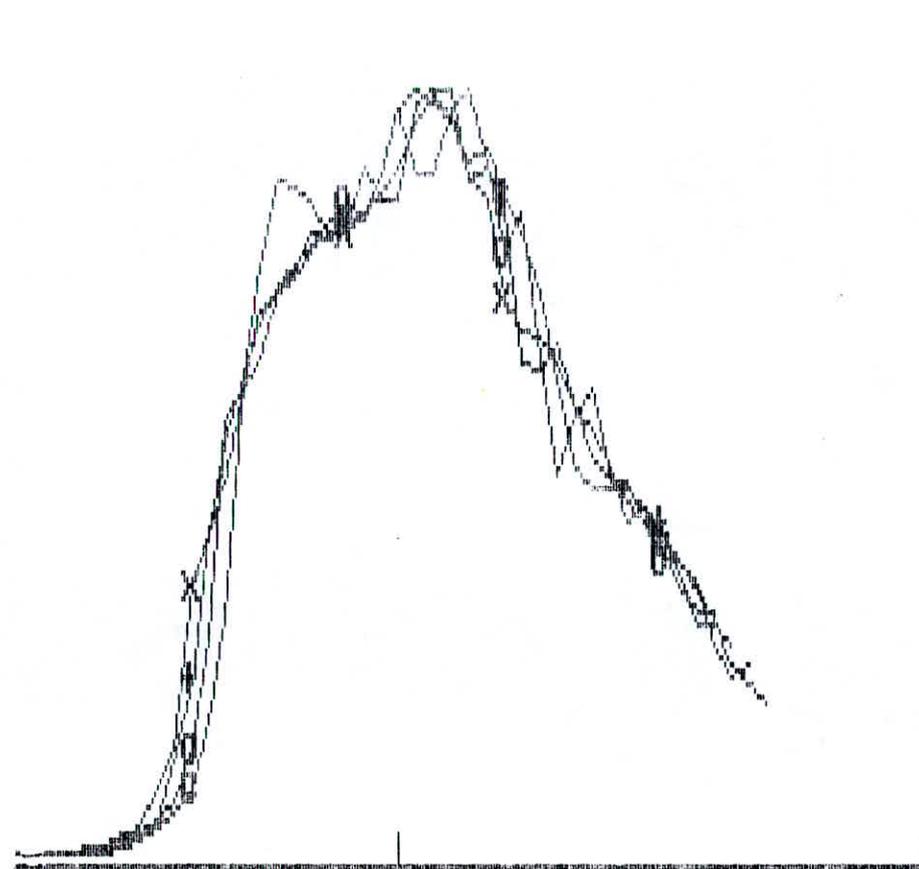
30.0

60.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 1H
- o Debit 2H
- c Debit 3H



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°1)

Q (m³/s)

2700.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

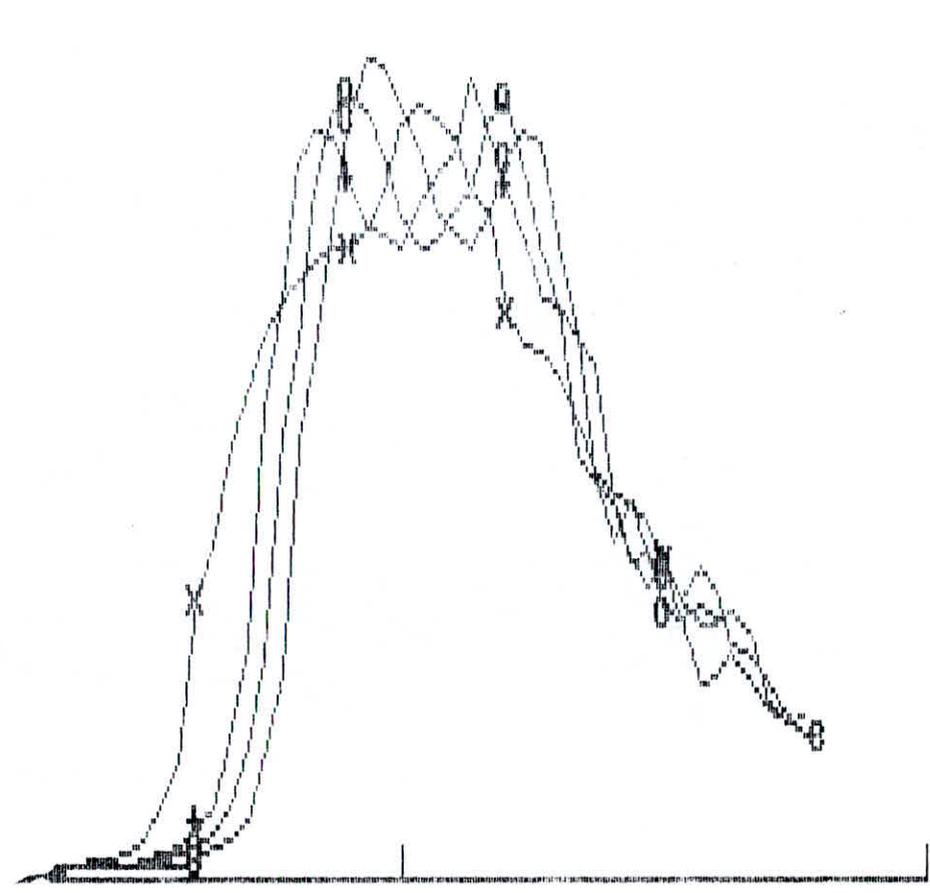
30.0

60.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 4H
- o Debit 5H
- c Debit 6H



C O N C L U S I O N

Aux termes de cette étude, nous avons mis en relief la valeur et la portée des différentes méthodes de prévisions.

Les crues demeurent la source à de rentables problèmes, contre lesquels il ne sera certainement jamais possible de se protéger d'une façon absolue.

Les évènements de ce type peuvent se produire dans l'avenir et auront des conséquences très graves dans les régions affectées.

En effet le plus souvent ces contrées connaissent l'exode massif et continu, des populations forcées auparavant sur les montagnes, vers la vallée qui ne cessent de se développer. En vue d'y palier à ce danger, l'on pourrait y appliquer certaines méthodes avec des délais de prévisions allant jusqu'à 6h par pas d'heure en se basant sur le critère de NASH. Ce faisant on y parvient à une variante de méthodes classées selon l'ordre suivant :

- Méthodes immédiates : elles comportent deux méthodes : extrapolation et lissage.

Celle relative à l'extrapolation du 3ème degré ne donne pas de bons résultats ou des résultats plus défavorables. En ce qui concerne celle parabolique les siens sont d'ordre moyens.

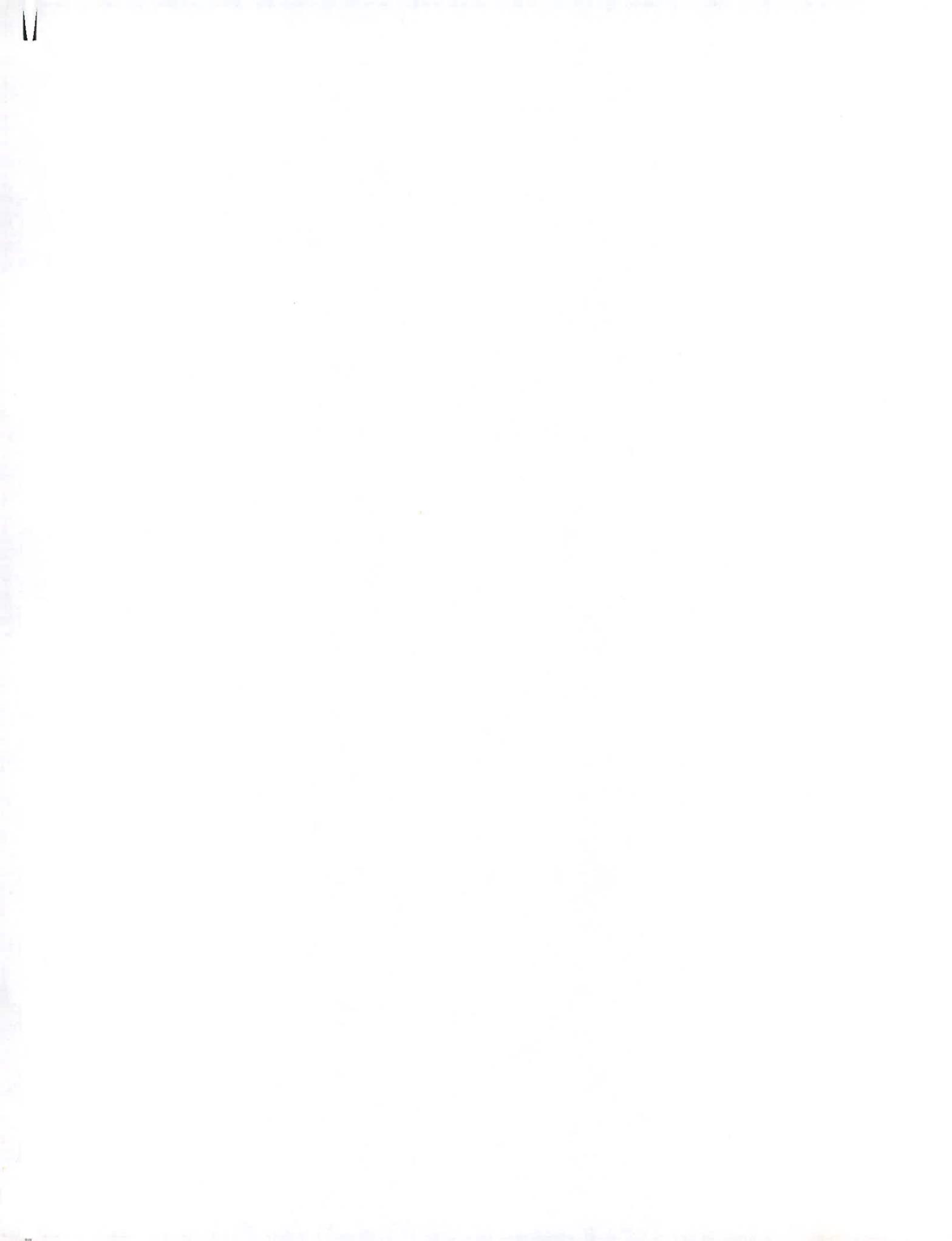
Ce n'est pas le cas de la méthode linéaire qui connaît un résultat satisfaisant.

Mieux encore la méthode de MUSKINGUM paraît la plus robuste donc la plus appropriée notamment en ce qu'elle permet d'avertir les populations sur une échéance de 6 heures.

En conclusion, avec des algorithmes simples, on peut éviter un grand nombre de problèmes concernant les crues.

B I B L I O G R A P H I E

<u>T I T R E</u>	<u>A U T E U R</u>
1. PREVISION ET PREDETERMINATION DES CRUES	Larrace
2. VALIDITE DES DIVERS DE PROPAGATION DES CRUES	Vidal
3. GUIDE DE PREVISIONS DES CRUES-T.2.	Sté Hydrotec de France
4. FIABILITE DES MODELES MATHEMATIQUES DE PREVISION DES CRUES	Thirriot Habaieb
5. COMPARAISON ENTRE MODELES DE PREVISION DES CRUES	Tucci Lannalopes Endres
6. SYSTEME DE PREVISION ET D'ANNONCE DES CRUES DU BASSIN DU SEBAOU	Taibi (ANRH)
7. ETUDE CRITIQUE PAR SIMULATION NUMERIQUE DES POSSIBILITES DE PREVISION DES CRUES AU TEMPS REEL SUR LA RIVIERE SHKUBIN EN ALBANIE	SHEHU-Exthyl Houille blan
8. UTILISATION SIMPLE DU MODELE HAYAMI EN HYDROLOGIE	H.Blanche 19
9. METHODE GRAPHIQUE D'ANNONCE DES CRUES METHODE DE BACHET	H.Blanche N° spécial B 48
10. INTRODUCTION AUX JOURNEES "PREVISION DES CRUES"	H.Blanche N° 5/6 - 1988
11. MISE EN OEUVRE OPERATIONNELLE D'UNE PREVISION DES CRUES	H.Blanche N° 5/6 - 1988
12. TECHNICAL DEVELOPEMENTS IN REAL TIME OPERATION HYDROLOGIC FORECASTING IN THE UNITED STATES	Journal of hydrology-198





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

5/90

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

2ex

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE MODELES DE
PREVISIONS DES CRUES

Proposé par :

Etudié par :

ηlies

HATTEMMI .N Dirigé par : M. DECHRI
HAT LAOUI .L NEBBACHE

A N N E X E S

PROMOTION

V

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ANNEXES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ANNEXE I

PROGRAMMES

PROGRAMME



OBSERVATION : STATION LEILA
RREVISION : STATION NASSIMA
DUREE : 60 mn

PROGRAM MUSK2

```
C.....  
C  
C PROGRAM DE PREVISION DE DEBIT PAR LE MODELE  
C DE MUSKINGUM SANS PRISE EN COMPTE DE LA PLUIE  
C ET AVEC UNE EXTRAPOLATION PARABOLIQUE AMONT  
C  
C.....  
DIMENSION QA(6,200),QV(6,200),QC(6,200),E(6,200)  
OPEN(1,FILE='LEILA.DAT',STATUS='OLD')  
OPEN(2,FILE='NASSIMA.DAT',STATUS='OLD')  
OPEN(3,FILE='RESUL2',STATUS='NEW')  
C.....  
C LECTURE DES DONNEES  
C.....  
DO 10 K=1,6  
READ(1,100) N  
READ(1,110)(QA(K,I),I=1,N)  
READ(2,100) N  
READ(2,110)(QV(K,I),I=1,N)  
J = 2  
WRITE(*,*) ' '  
WRITE(*,*) ' '  
WRITE(*,*) 'LECTURE PARFAITE DES DONNEES '  
WRITE(*,*) '----- '  
WRITE(3,*) ' '  
WRITE(3,*) ' '  
WRITE(3,*) '***** '  
WRITE(3,*) '* RESULTATS DU PROGRAMME DE PREVISION DE DEBIT * '  
WRITE(3,*) '* PAR LE MODELE DE MUSKINGUM SANS PRISE EN * '  
WRITE(3,*) '* COMPTE DE LA PLUIE ET AVEC UNE EXTRAPOLATION * '  
WRITE(3,*) '* PARABOLIQUE AMONT - AVEC : * '  
WRITE(3,*) '* * '  
WRITE(3,*) '* UN PAS DE PREVISION DE DEUX HEURES * '  
WRITE(3,*) '* ----- * '  
WRITE(3,*) '***** '  
WRITE(3,*) ' '  
WRITE(3,*) ' '  
WRITE(3,120) k
```

```

C.....
C  INITIALISATION DES PARAMETRES
C.....
    S=0.
    C=0.
    VAR=0.
    A1=0.
    A2=0.
    A3=0.
    A4=0.
    B1=0.
    B2=0.

C.....
C  CALCUL DES COEFFICIENTS
C.....
    DO 20 I=J+3,N-J
    A1=A1+(QA(K,I)-QV(K,I))**2
    A2=A2-(QA(K,I)-QV(K,I))*(3*QA(K,I)-3*QA(K,I-J)-QA(K,I-2*J)-
    & QV(K,I))
    A3=A3-(QA(K,I)-QV(K,I))*(3*QA(K,I)-3*QA(K,I-J)-QA(K,I-2*J)-
    & QV(K,I))
    A4=A4+(3*QA(K,I)-3*QA(K,I-J)-QA(K,I-2*J)-QV(K,I))**2
    B1=B1-(QV(K,I+J)-QV(K,I))*(QA(K,I)-QV(K,I))
    B2=B2-(QV(K,I+J)-QV(K,I))*(3*QA(K,I)-3*QA(K,I-J)-QA(K,I-2*J)-
    & QV(K,I))
20  CONTINUE
    WRITE(*,*)'  '
    WRITE(*,*)'  '
    WRITE(*,*) 'A1=',A1
    WRITE(*,*) 'A2=',A2
    WRITE(*,*) 'A3=',A3
    WRITE(*,*) 'A4=',A4
    WRITE(*,*) 'B1=',B1
    WRITE(*,*) 'B2=',B2
    DET=A1*A4-A2*A3
    DET1=B1*A4-B2*A2
    DET2=A1*B2-A3*B1
    D1=DET1/DET
    D2=DET2/DET
    D3=1.-D1-D2
    WRITE(*,*)'  '
    WRITE(*,*) 'DET=',DET
    WRITE(*,*) 'D1=',D1
    WRITE(*,*) 'D2=',D2
    WRITE(*,*) 'D3=',D3
    WRITE(*,*)'  '
    DO 30 I=1,4
    QC(K,I-J)=QV(K,I)
    S=S+QV(K,I)
30  CONTINUE

```

```

C .....
C   CALCUL:
C       - DES DEBITS PREVUS : QC
C       - DE LA VARIANCE : VAR
C       - DU CRITERE DE NASH : CV
C .....
      DO 40 I=J+3,N
      QC(K,I+J)=D1*(QA(K,I)-QV(K,I))+D2*(3*QA(K,I)-3*QA(K,I-J))
      QC(K,I+J)=QC(K,I+J)-D2*(QA(K,I-2*J)-QV(K,I))+QV(K,I)
      S=S+QV(I,K)
      C=C+(QV(K,I)-QC(K,I+J))**2
40    CONTINUE
      M=S/N
      DO 50 I=1,N
      VAR=VAR+(QV(K,I)-M)**2
50    CONTINUE
      CV=100*(1-C/VAR)
      WRITE(*,*) 'C=',C
      WRITE(*,*) 'M=',M
      WRITE(*,*) 'VAR=',VAR
      WRITE(*,*) 'CV=',CV
      WRITE(3,130) CV
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) '*****'
      WRITE(3,*) '*      DEBITS AVALS      *'
      WRITE(3,*) '*      -----          *'
      WRITE(3,*) '*****'
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,100)N
      WRITE(3,110)(QV(K,I),I=1,N)
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) '*****'
      WRITE(3,*) '*      DEBITS PREVUS      *'
      WRITE(3,*) '*      -----          *'
      WRITE(3,*) '*****'
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,*) ' '
      WRITE(3,100)N
      WRITE(3,110)(QC(K,I-J),I=1,N)
10    CONTINUE
      CLOSE(1)
      CLOSE(2)
      CLOSE(3)
100   FORMAT(I4)
110   FORMAT(11F9.3)
120   FORMAT('CRUE: ',I1)
130   FORMAT('CV = ',F4.0 %)
      WRITE(*,*)'MISSION ACCOMPLIE'
      STOP
      END

```

```

PROGRAM EXTRAPOLATION
DIMENSION Q(200),Q1(200),E1(200),Q2(200),E2(200),Q3(200),E3(200)
OPEN (1,FILE='      ',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
OPEN (2,FILE='      ',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
READ (1,100) N
READ(1,110) ( Q(J),J=1,N)
C.....
WRITE(2,*) '          DEBITS OBSERVES '
WRITE(2,100) N
WRITE(2,110) ( Q(J) ,J=1,N )
C.....
C  EXTRAPOLATION LINEAIRE
C .....
WRITE(2,*) ' *****'
WRITE(2,*) '          EXTRAPOLATION LINEAIRE'
WRITE(2,*) ' *****'
DO 5 I=1,6
WRITE(2,90) I
C=0.
V=0.
DO 10 J=1,N
IF(J.GE.2*I+1) THEN
Q1(J)=Q(J-I)*2-Q(J-2*I)
E1(J)=Q1(J)-Q(J)
ELSE
Q1(J)=Q(J)
E1(J)=0.0
ENDIF
CALL MOY(Q,N,QM)
C=C+E1(J)**2
V=V-(Q(J)-QM)**2
10 CONTINUE
CV=100*(1-C/V)
WRITE(2,*) '          DEBITS PREVUS '
WRITE(2,100) N
WRITE(2,110) ( Q1(J) , J=1,N )
WRITE(2,112) CV
5 CONTINUE

```

C.....
C EXTRAPOLATION PARABOLIQUE
C.....

```
DO 15 I=1,6  
WRITE(2,90) I  
V=0.  
C=0.  
DO 20 J=1,N  
IF(J.GE.3*I+1) THEN  
Q2(J)=3*Q(J-I)-3*Q(J-2*I)-Q(J-3*I)  
E2(J)=Q2(J)-Q(J)  
ELSE  
Q2(J)=Q(J)  
E2(J)=0.0  
ENDIF  
CALL MOY(Q,N,QM)  
C=C+E2(J)**2  
V=V+(Q(J)-QM)**2  
20 CONTINUE  
CV=100*(1-C/V)  
WRITE(2,*)' *****'  
WRITE(2,*)'                   EXTRAPOLATION PARABOLIQUE'  
WRITE(2,*)' *****'  
WRITE(2,*)'                   DEBITS PREVUS'  
WRITE(2,100) N  
WRITE(2,110) ( Q2(J) , J=1,N )  
WRITE(2,112) CV  
15 CONTINUE
```

C.....
C EXTRAPOLATION A L'AIDE D'UN POLYNOME DU TROISIEME DEGRE
C.....

```
DO 25 I=1,6  
WRITE(2,90) I  
C=0.  
V=0.  
DO 30 J=1,N  
IF(J.GE.4*I+1) THEN  
Q3(J)=4*Q(J-I)-6*Q(J-2*I)+4*Q(J-3*I)-Q(J-4*I)  
E3(J)=Q3(J)-Q(J)  
ELSE  
Q3(J)=Q(J)  
E3(J)=Q3(J)-Q(J)  
ENDIF  
CALL MOY(Q,N,QM)  
C=C-E3(J)**2  
V=V-(Q(J)-QM)**2  
30 CONTINUE  
CV=100*(1-C/V)
```

```

WRITE(2,*)' *****'
WRITE(2,*)'   EXTRAPOLATION AVEC POLYNOME DE TROISIEME DEGRE'
WRITE(2,*)' *****'
WRITE(2,*)'           DEBITS PREVUS
WRITE(2,100) N
WRITE(2,110) ( Q3(J) , J=1,N )
WRITE(2,112) CV
25  CONTINUE
100 FORMAT(I4)
110 FORMAT (11F10.3)
112 FORMAT ('CV=' ,F10.2)
90  FORMAT ('PAS DE PREVISION DE': ,I1,'HR')
CLOSE(1)
CLOSE(2)
STOP
END

```

```

C.....
C   SOUS PROGRAMME CALCULANT LA MOYENNE DES DEBITS OBSERVES
C.....
SUBROUTINE MOY(Q,N,QM)
DIMENSION Q(200)
S=0.
DO 1 J=1,N
S=S+Q(J)
1  CONTINUE
QM=S/N
RETURN
END

```

```

C   PROGRAMME DE LISSAGE
      DIMENSION Q(200),Q1(200),Q2(200),Q3(200),Q4(200),E1(200),
&E2(200),E3(200),E4(200)
      OPEN (1,FILE='          ',STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
      OPEN (2,FILE='          ',STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
      READ(1,100) N
      READ(1,110) ( Q(J) , J=1,N )
C .....
      WRITE(2,*) '          DEBITS OBSERVES          '
      WRITE(2,100) N
      WRITE(2,110) ( Q(J) ,J=1,N )
C .....
C   FORMULE DE LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE
C .....
      WRITE(2,*)' *****
      WRITE(2,*)'      LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE
      WRITE(2,*)' *****
      DO 5 I=1,6
      WRITE(2,90) I
      C=0.
      V=0.
      DO 10 J=1,N
      IF(J.GE.3*I+1) THEN
      Q1(J)=(4*Q(J-I)+Q(J-2*I)-2*Q(J-3*I))/3
      E1(J)=Q(J)-Q1(J)
      ELSE
      Q1(J)=Q(J)
      E1(J)=Q(J)-Q1(J)
      ENDIF
      CALL MOY(Q,N,QM)
      C=C+E1(J)**2
      V=V+(Q(J)-QM)**2
10  CONTINUE
      CV=100*(1-C/V)
      WRITE(2,*)'          DEBITS PREVUS          '
      WRITE(2,100) N
      WRITE(2,110) ( Q1(J) , J=1,N )
      WRITE(2,112) CV
112  FORMAT('CV=',F8.2)
      5  CONTINUE

```

```

C .....
C FORMULE DE LISSAGE PARABOLIQUE A QUATRE POINTS DE BASES
C .....
DO 25 I=1,6
WRITE(2,90) I
C=0.
V=0.
DO 30 J=1,N
IF(J.GE.4*I+1) THEN
Q3(J)=(9*Q(J-I)-3*Q(J-2*I)-5*Q(J-3*I)+3*Q(J-4*I))/4
E3(J)=Q(J)-Q3(J)
ELSE
Q3(J)=Q(J)
E3(J)=Q(J)-Q3(J)
ENDIF
CALL MOY(Q,N,QM)
C=C+E3(J)**2
V=V+(Q(J)-QM)**2
30 CONTINUE
CV=100*(1-C/V)
WRITE(2,*)' *****'
WRITE(2,*)' LISSAGE PARABOLIQUE AVEC QUATRE POINTS DE BASES '
WRITE(2,*)' *****'
WRITE(2,*)' DEBITS PREVUS '
WRITE(2,100) N
WRITE(2,110) ( Q3(J) , J=1,N )
WRITE(2,112) CV
25 CONTINUE
100 FORMAT(I4)
110 FORMAT (11F10.3)
90 FORMAT ('PAS DE PREVISION DE': ,I1,'HR')
CLOSE(1)
CLOSE(2)
STOP
END

```

```

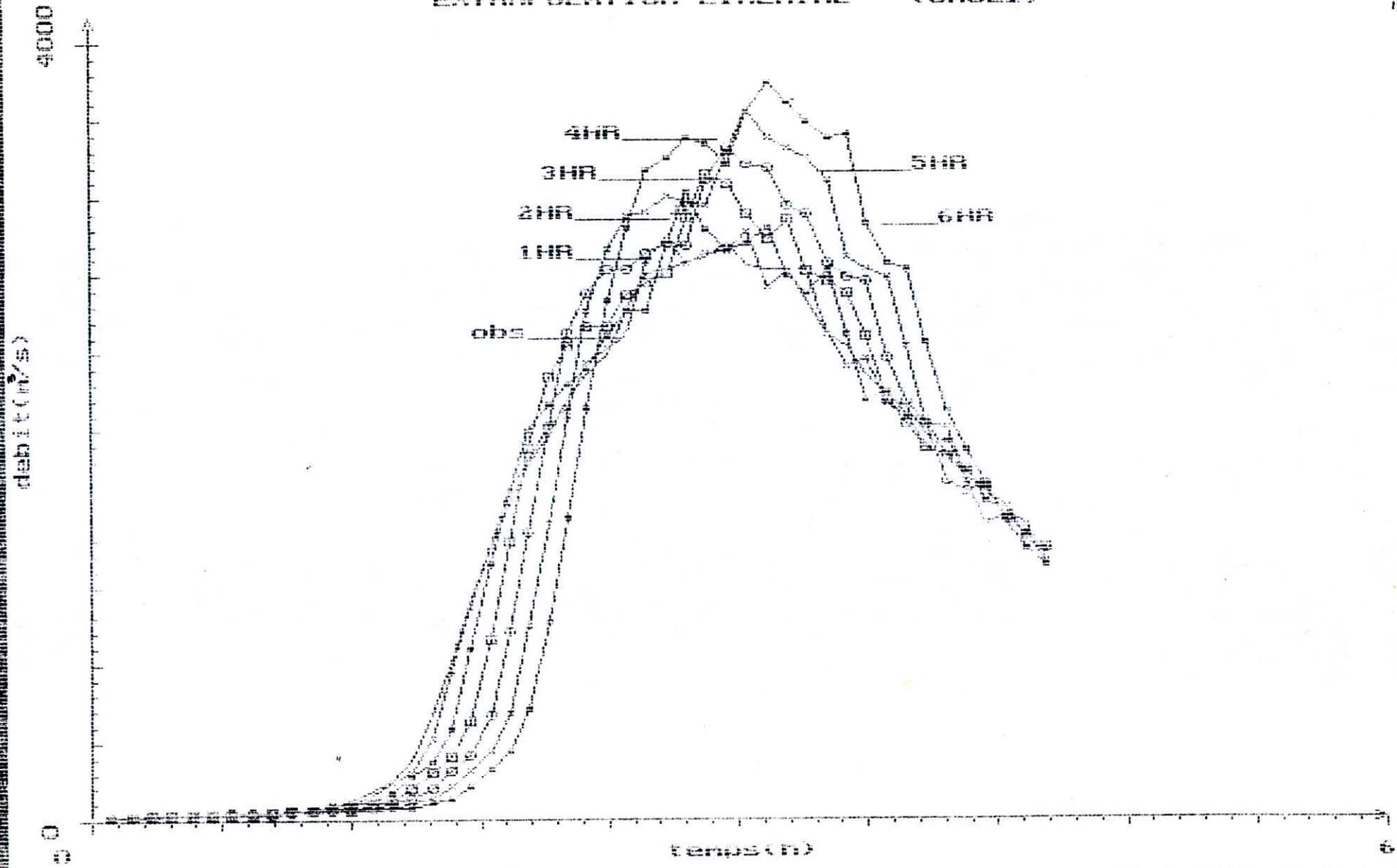
C .....
C SOUS PROGRAMME CALCULANT LA MOYENNE DES DEBITS OBSERVES
C .....
SUBROUTINE MOY(Q,N,QM)
DIMENSION Q(200)
S=0.
DO 1 J=1,N
S=S+Q(J)
1 CONTINUE
QM=S/N
RETURN
END

```

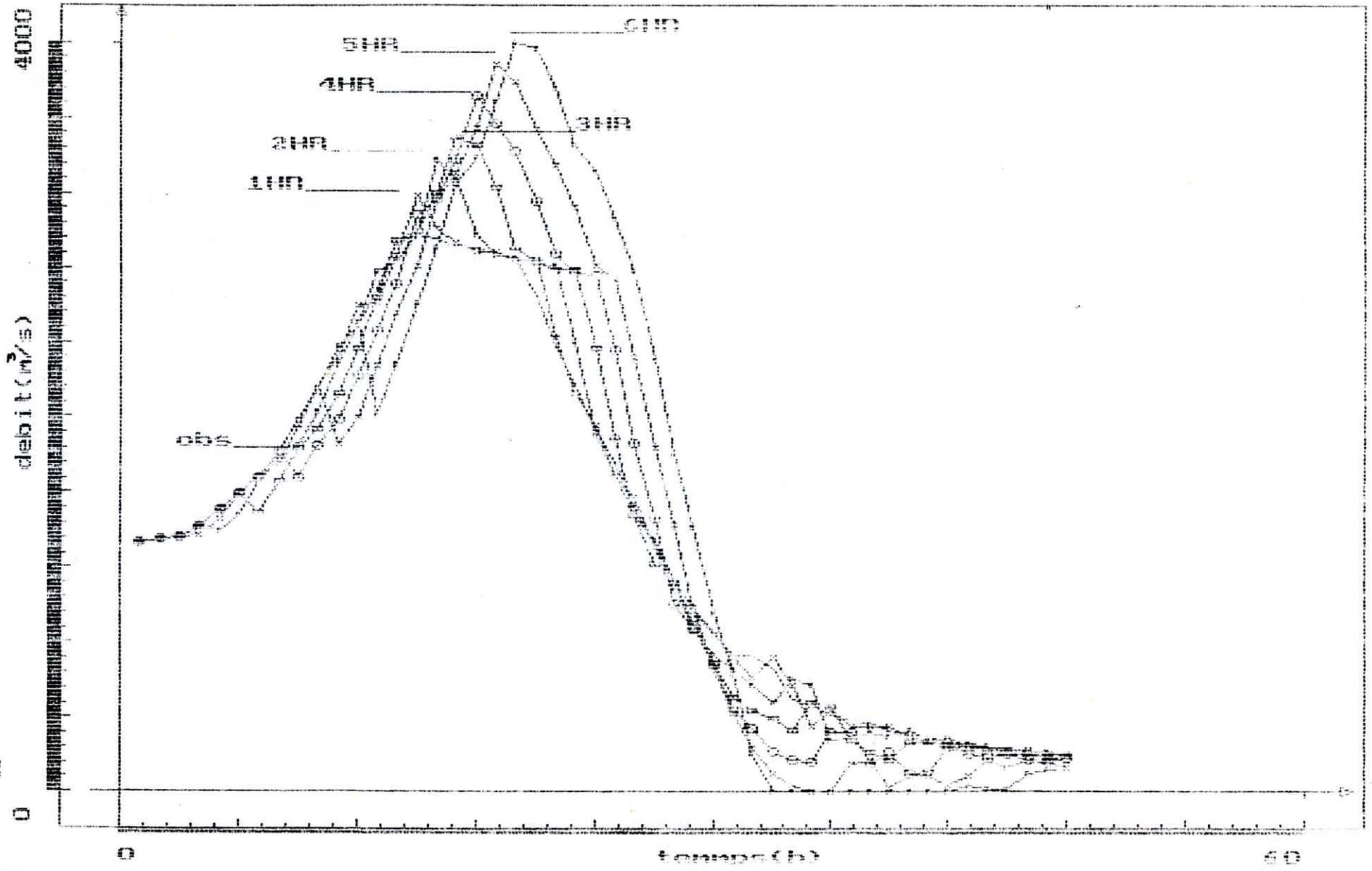
ANNEXE II

METHODE D'EXTRAPOLATION

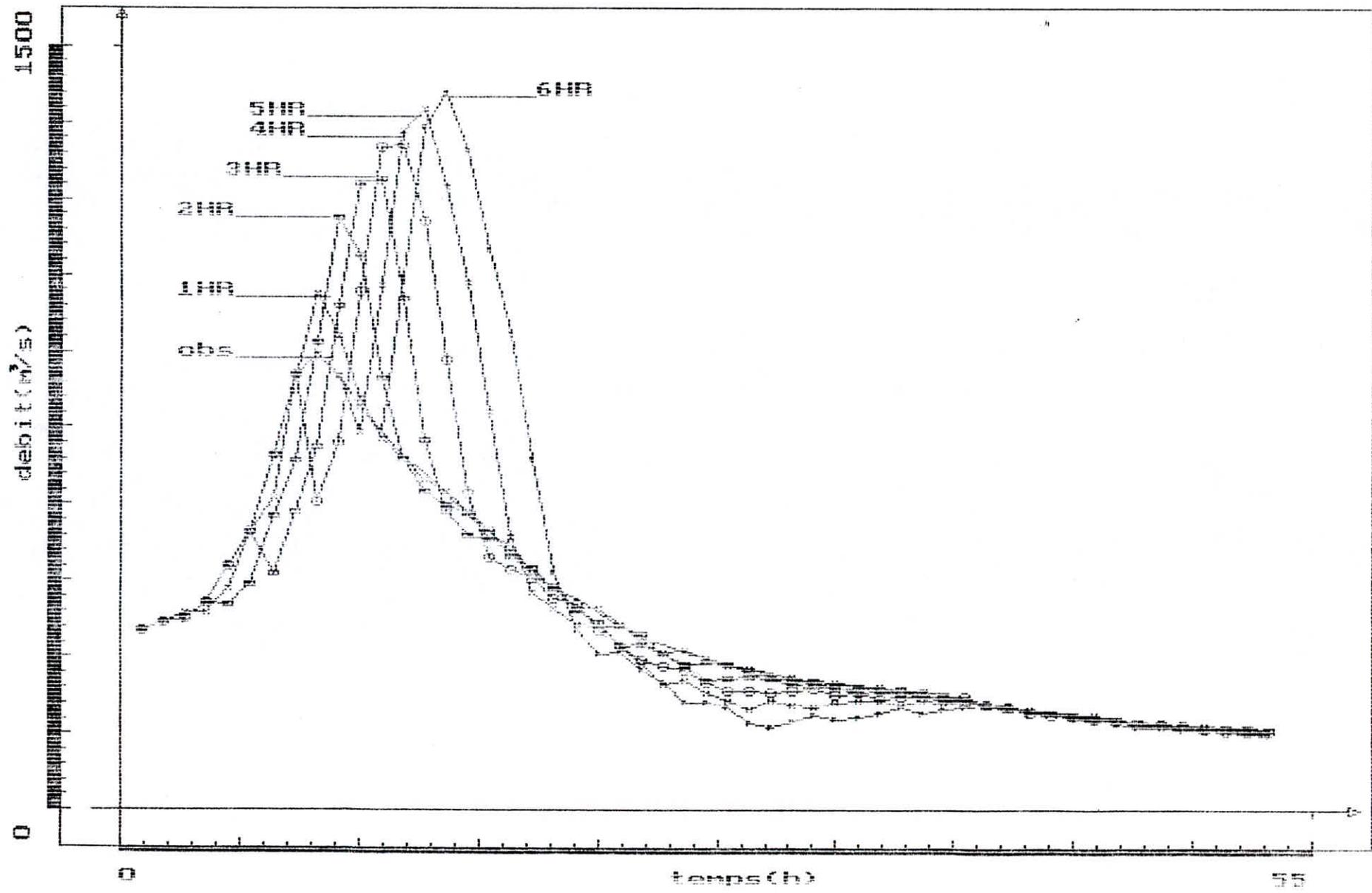
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CRUEL)



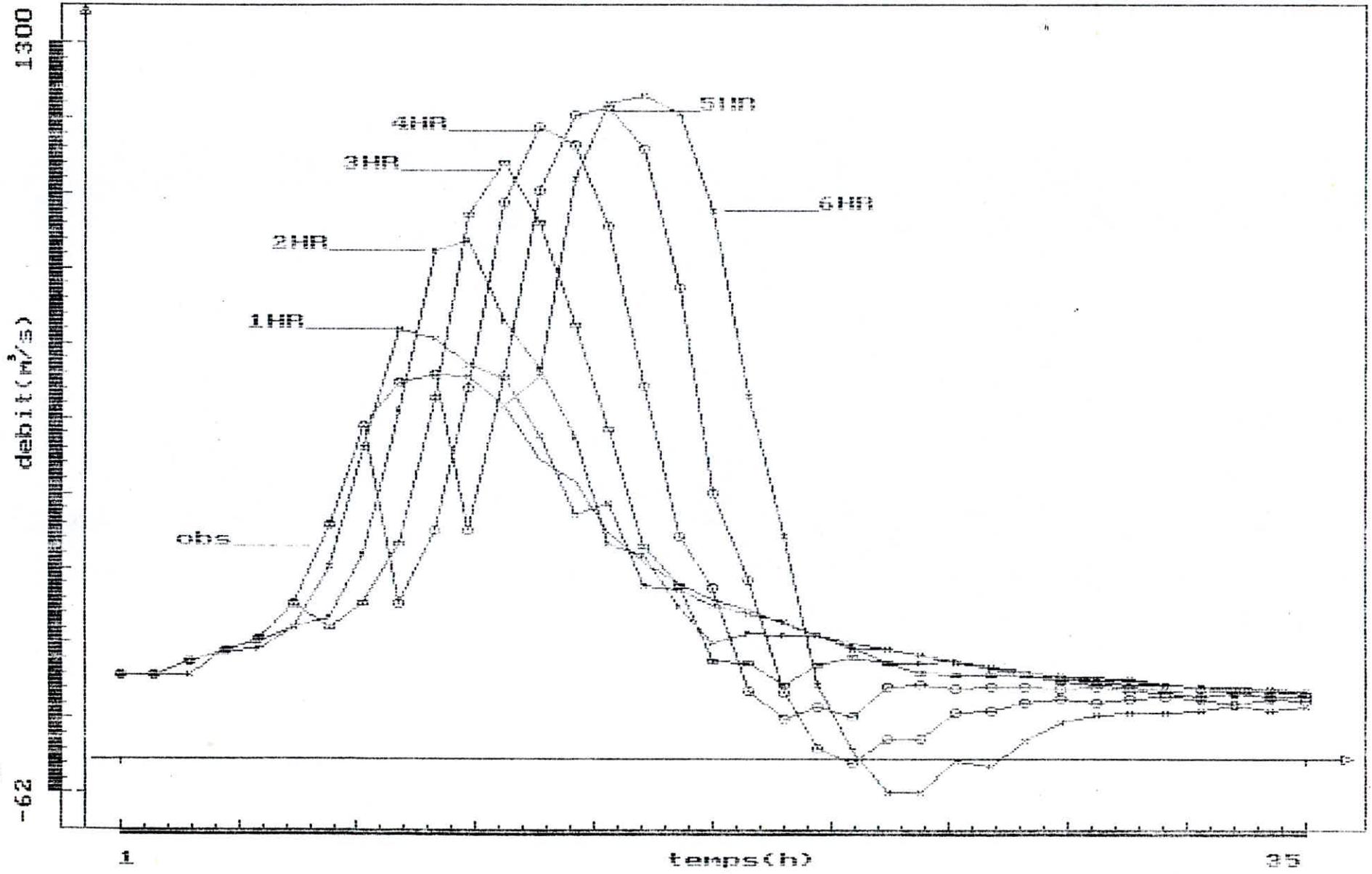
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CIVUES)



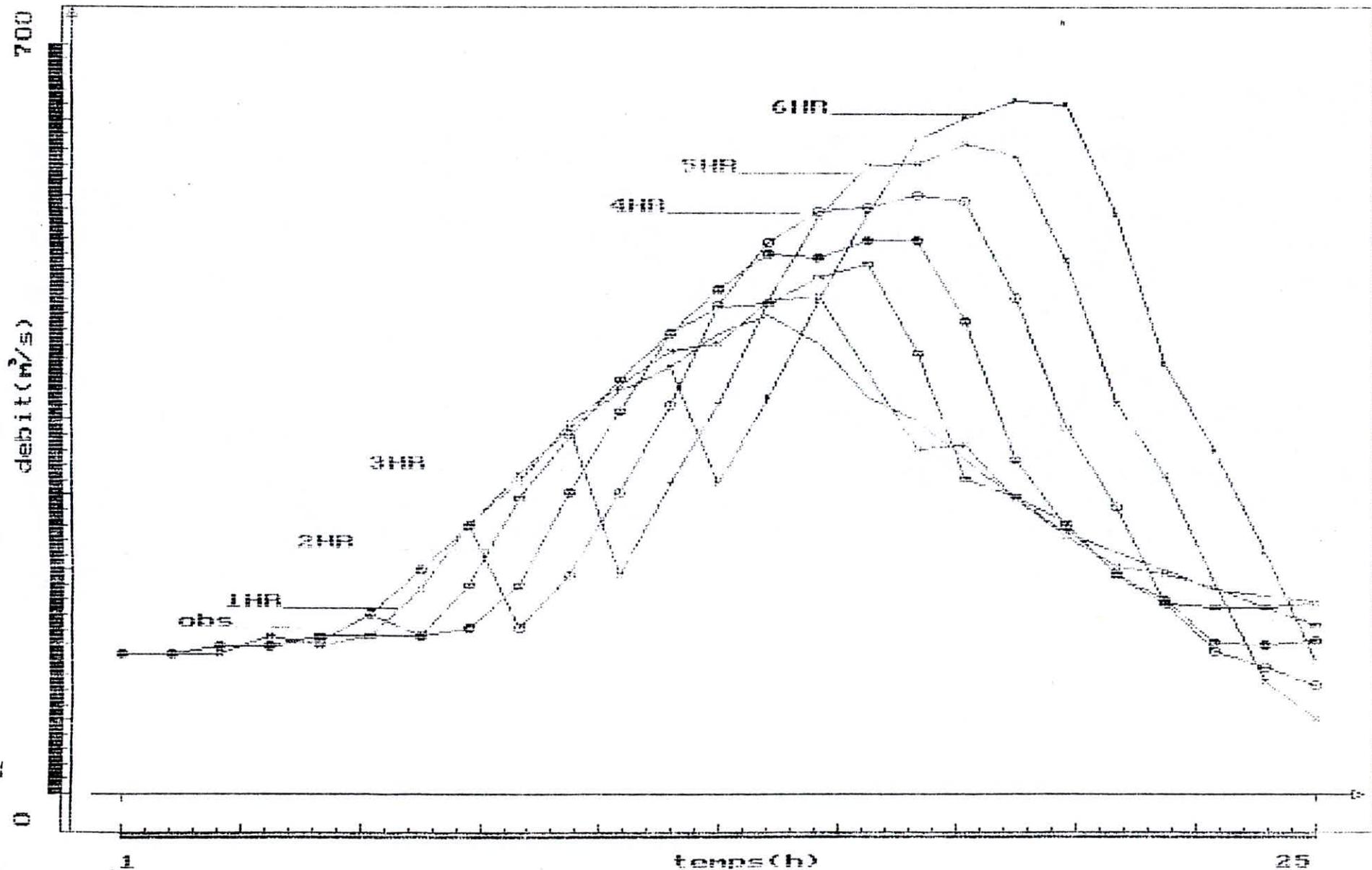
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CRUES)



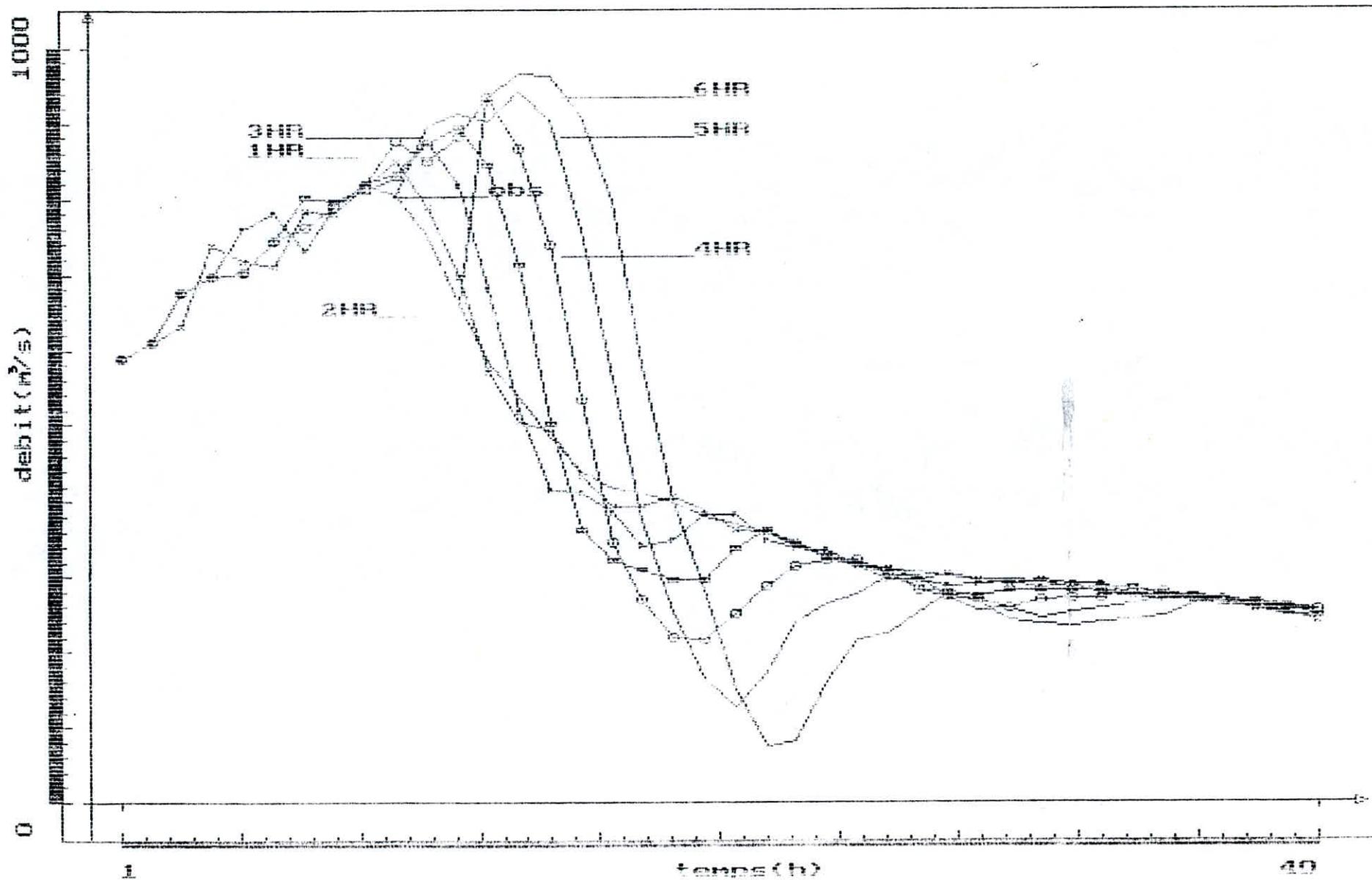
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CRUR4)



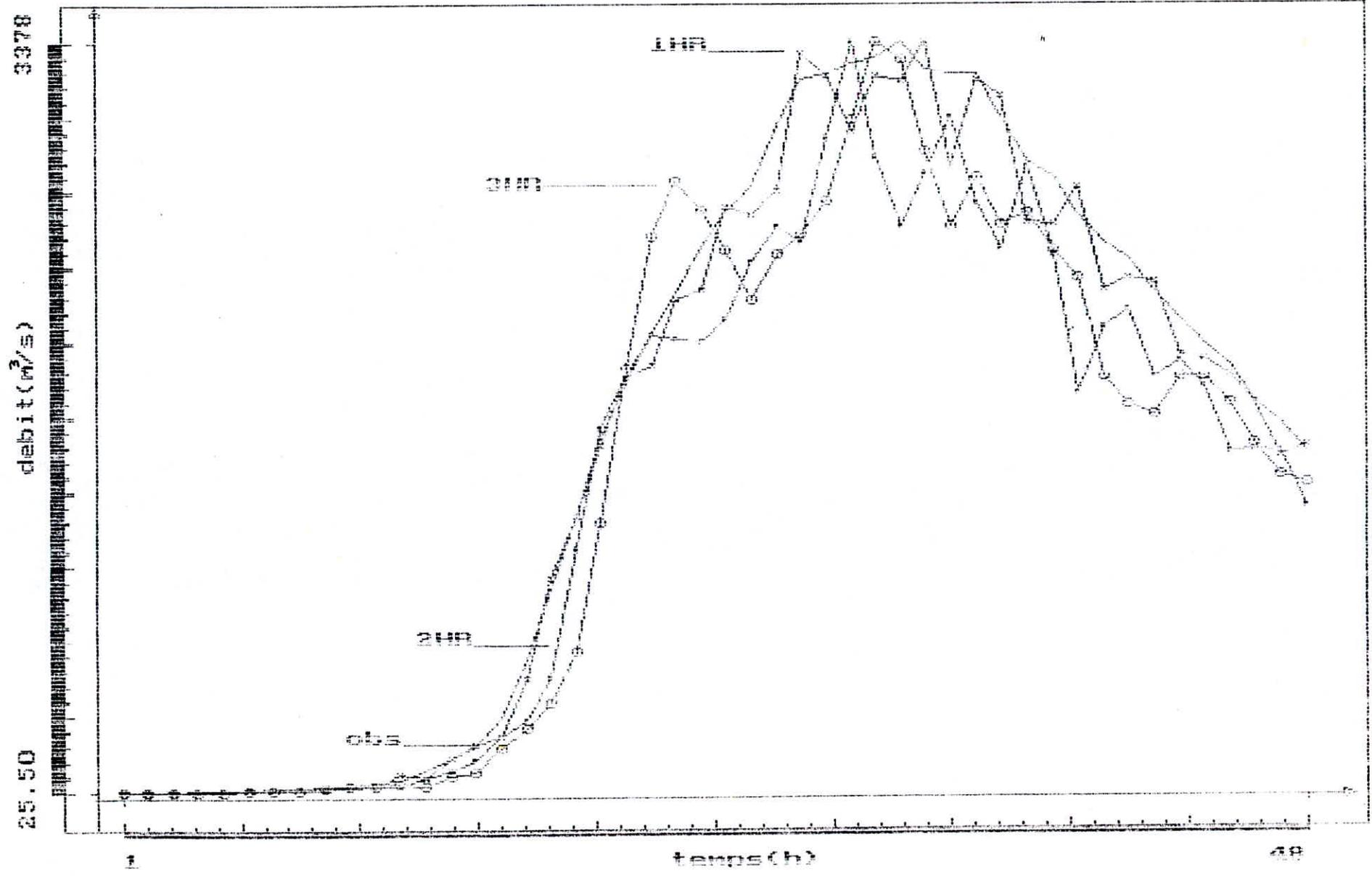
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CRUES)



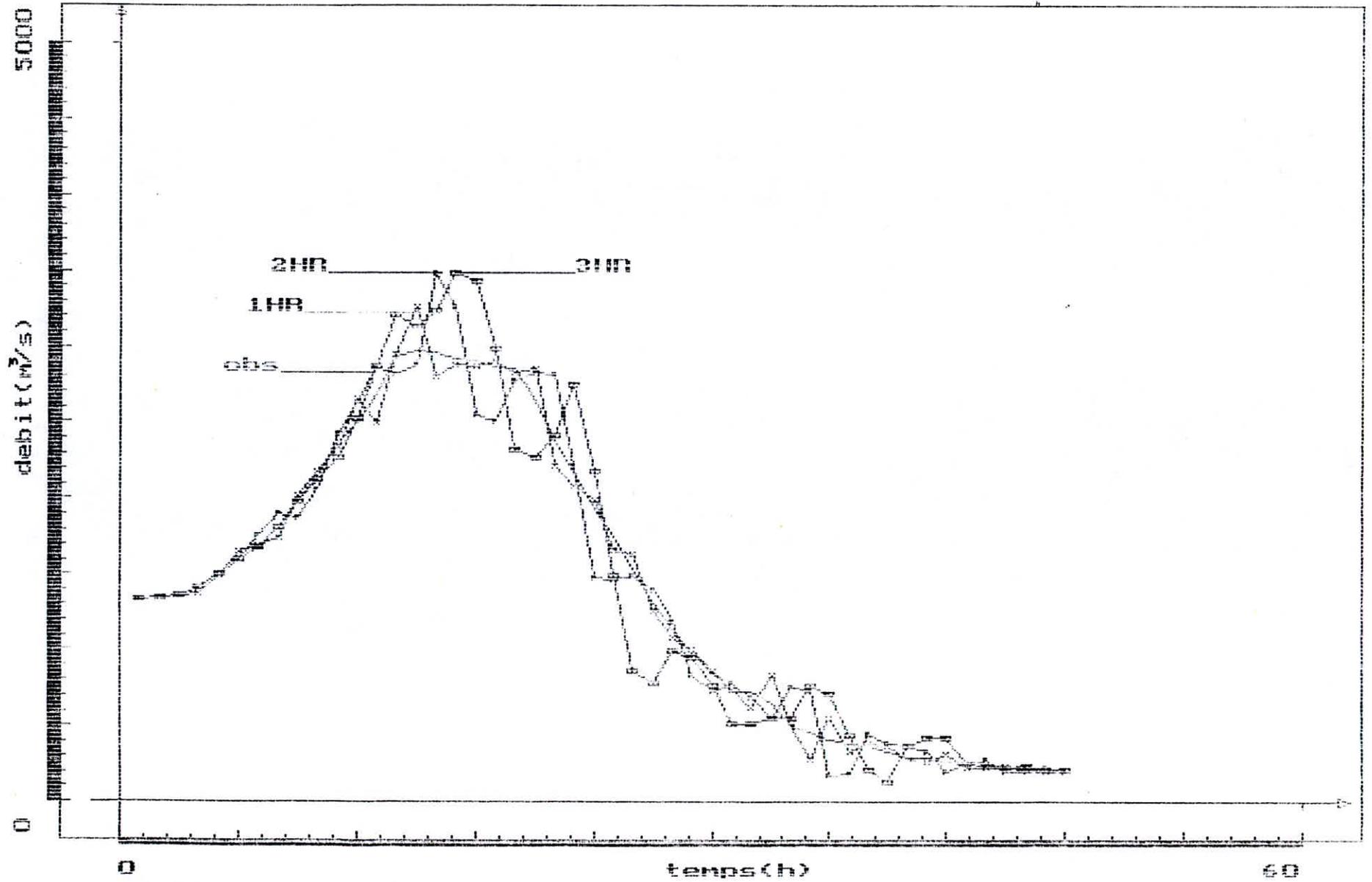
EXTRAPOLATION LINEAIRE (CRUE6)



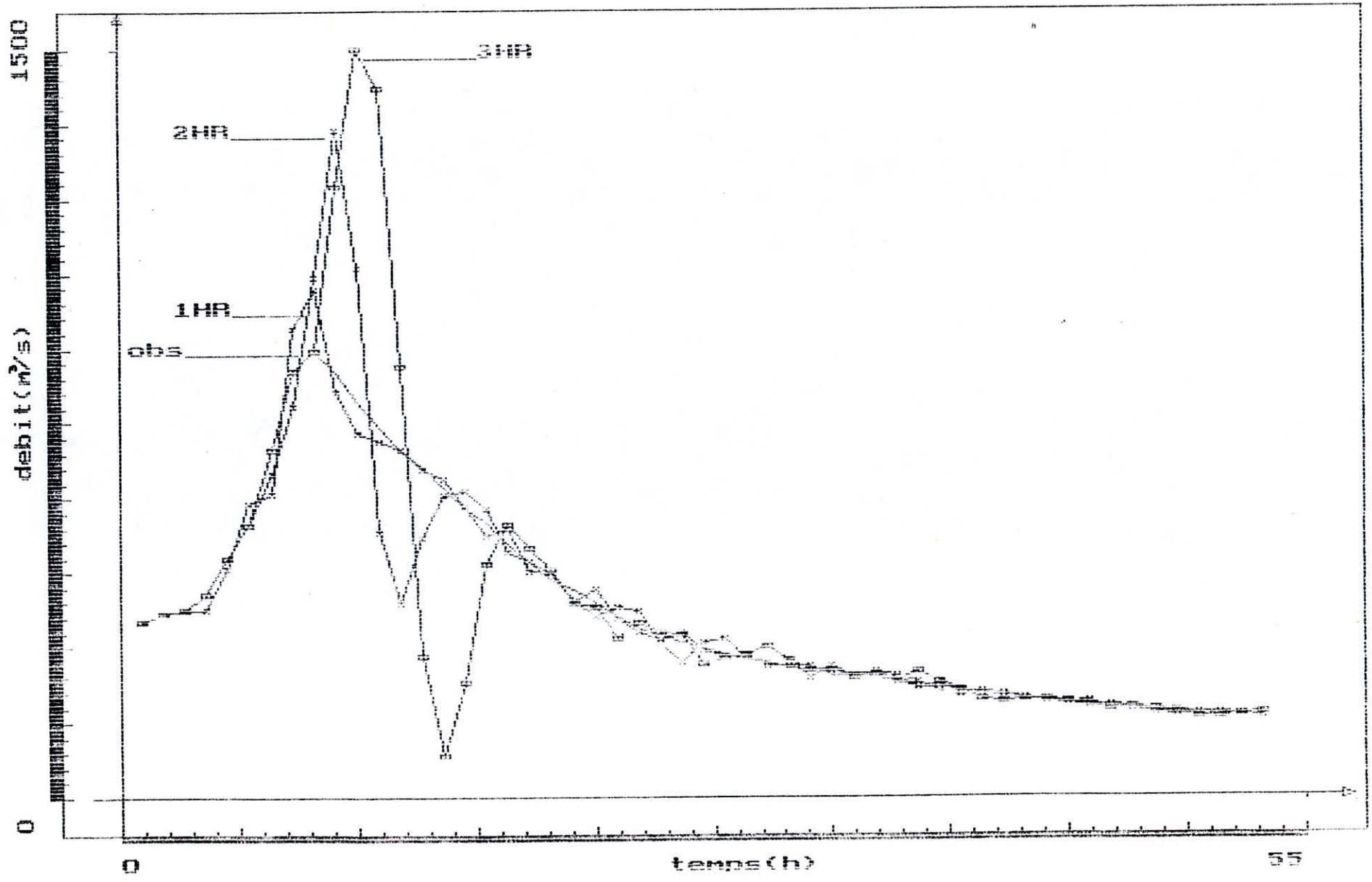
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE (CRUEL)



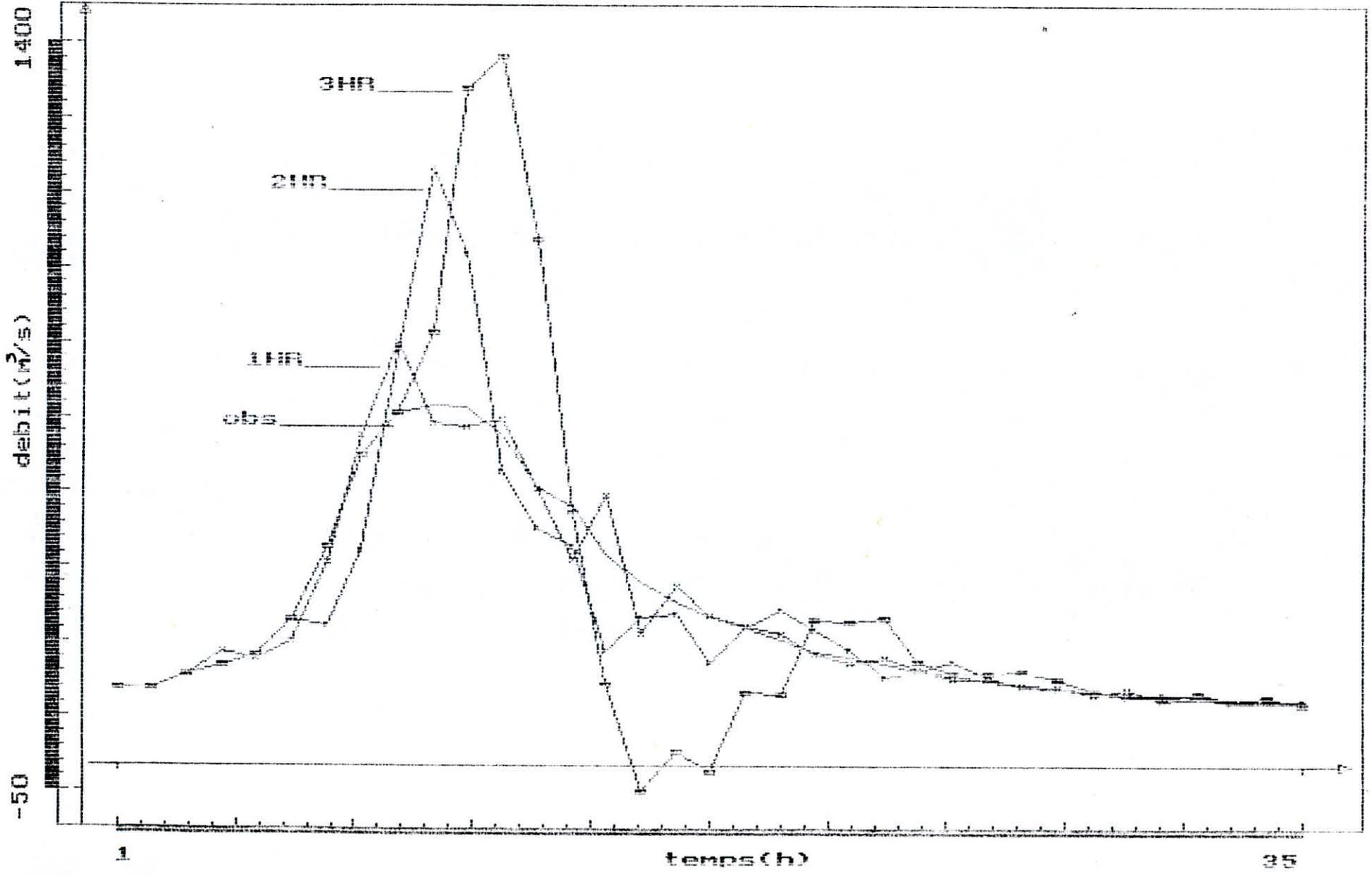
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE (CRUES)



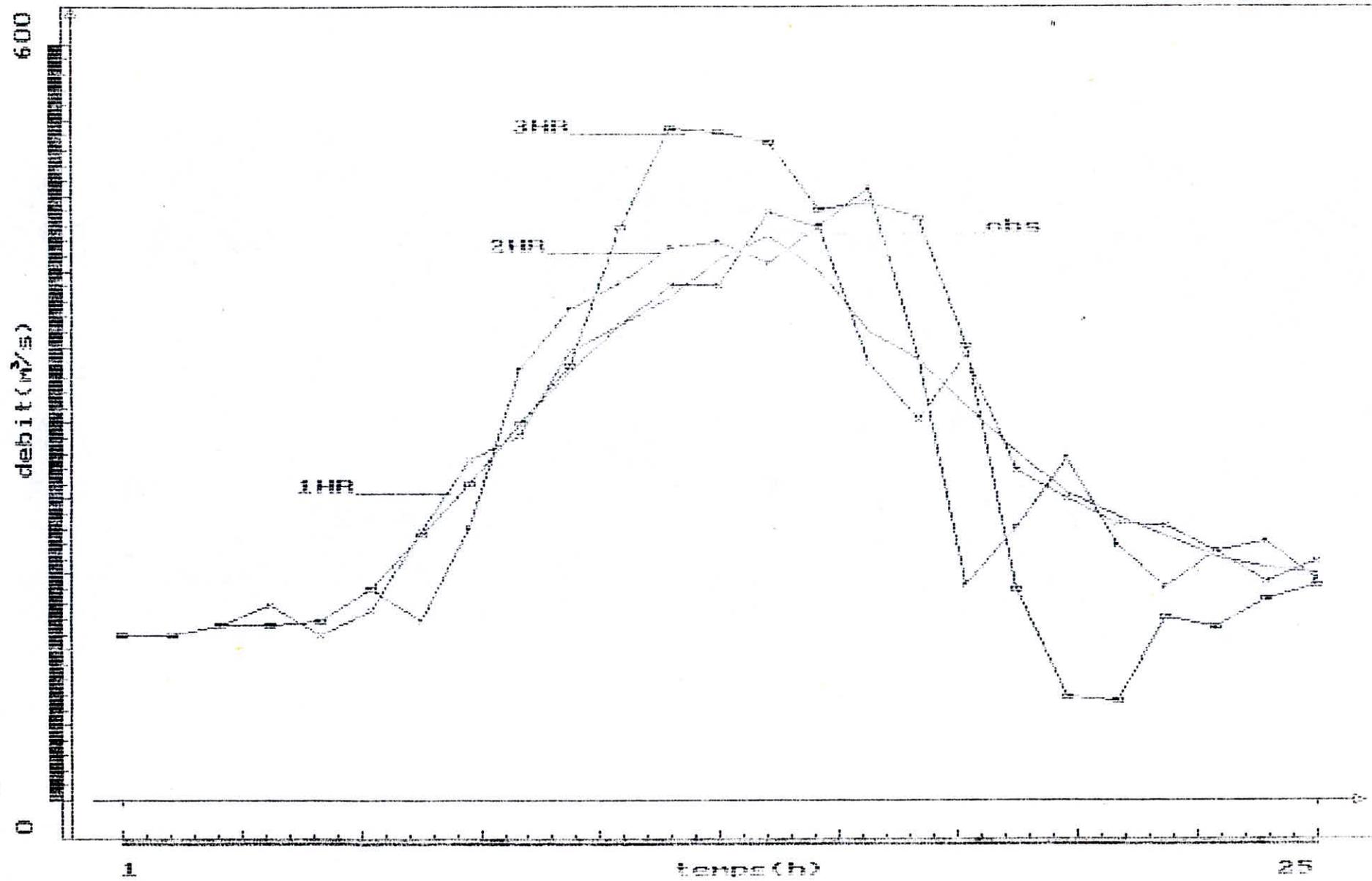
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE CRUE (3)



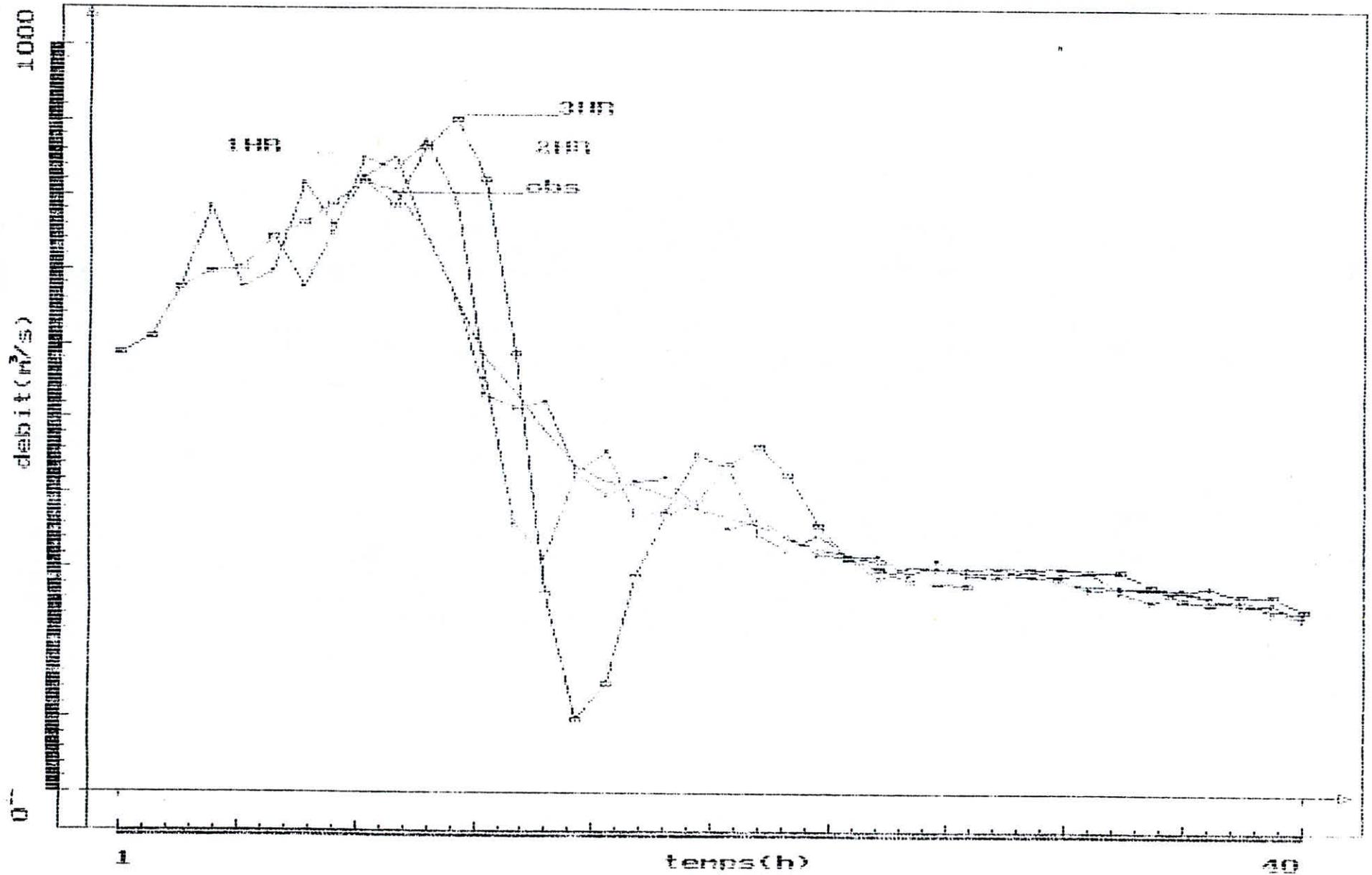
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE (CRUE4)



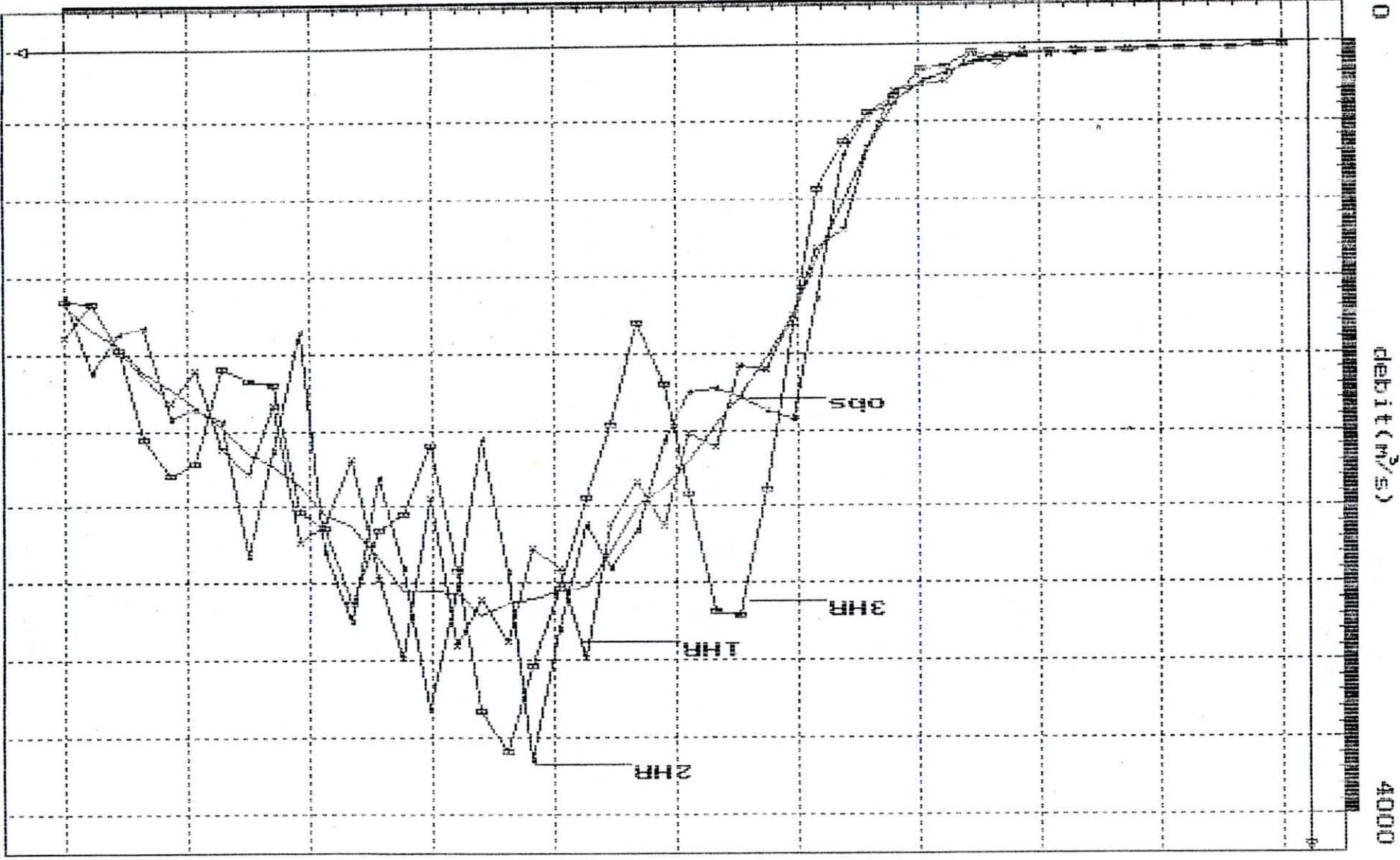
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE (CRUES)



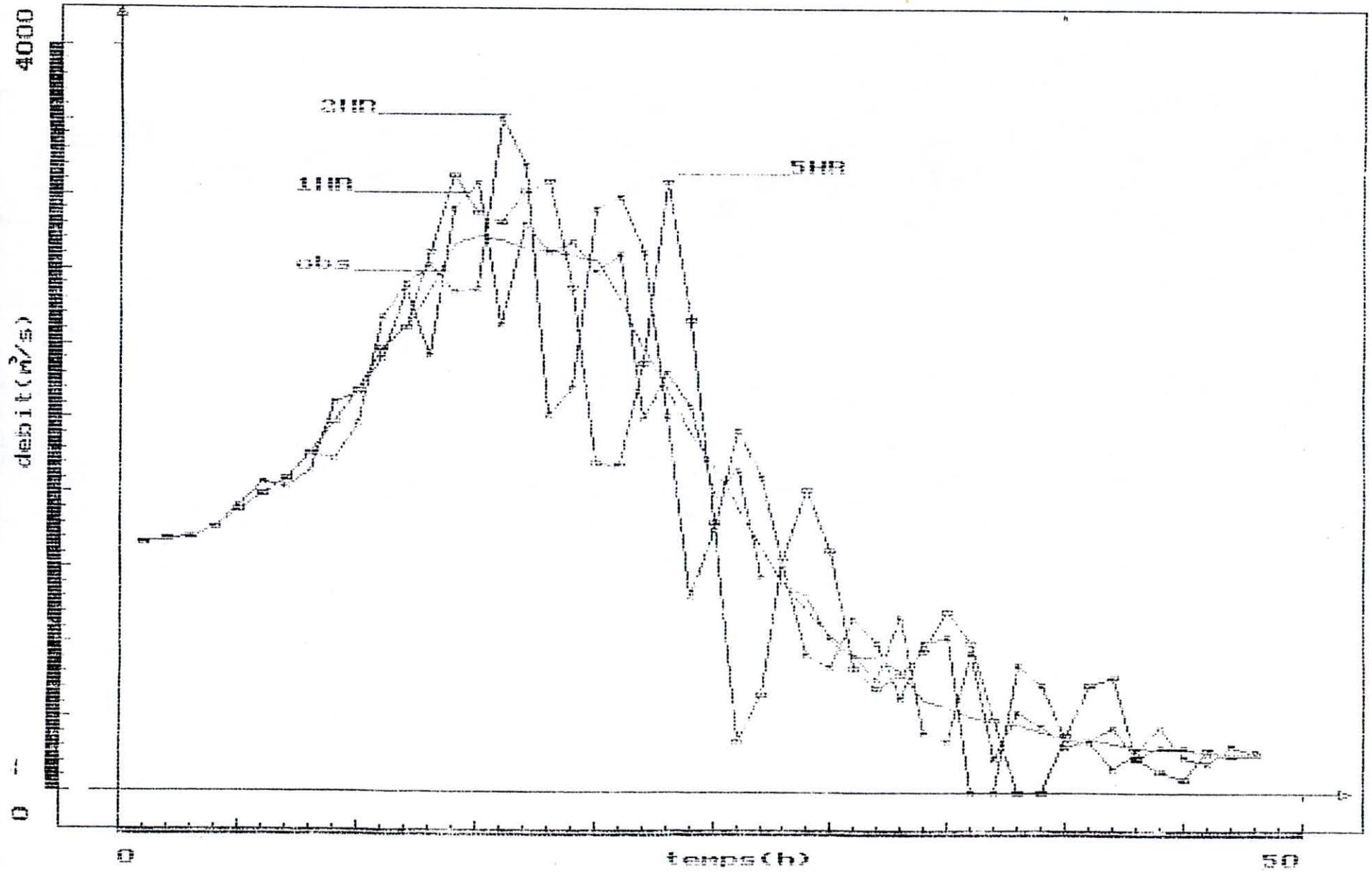
EXTRAPOLATION PARABOLIQUE (CRUE6)



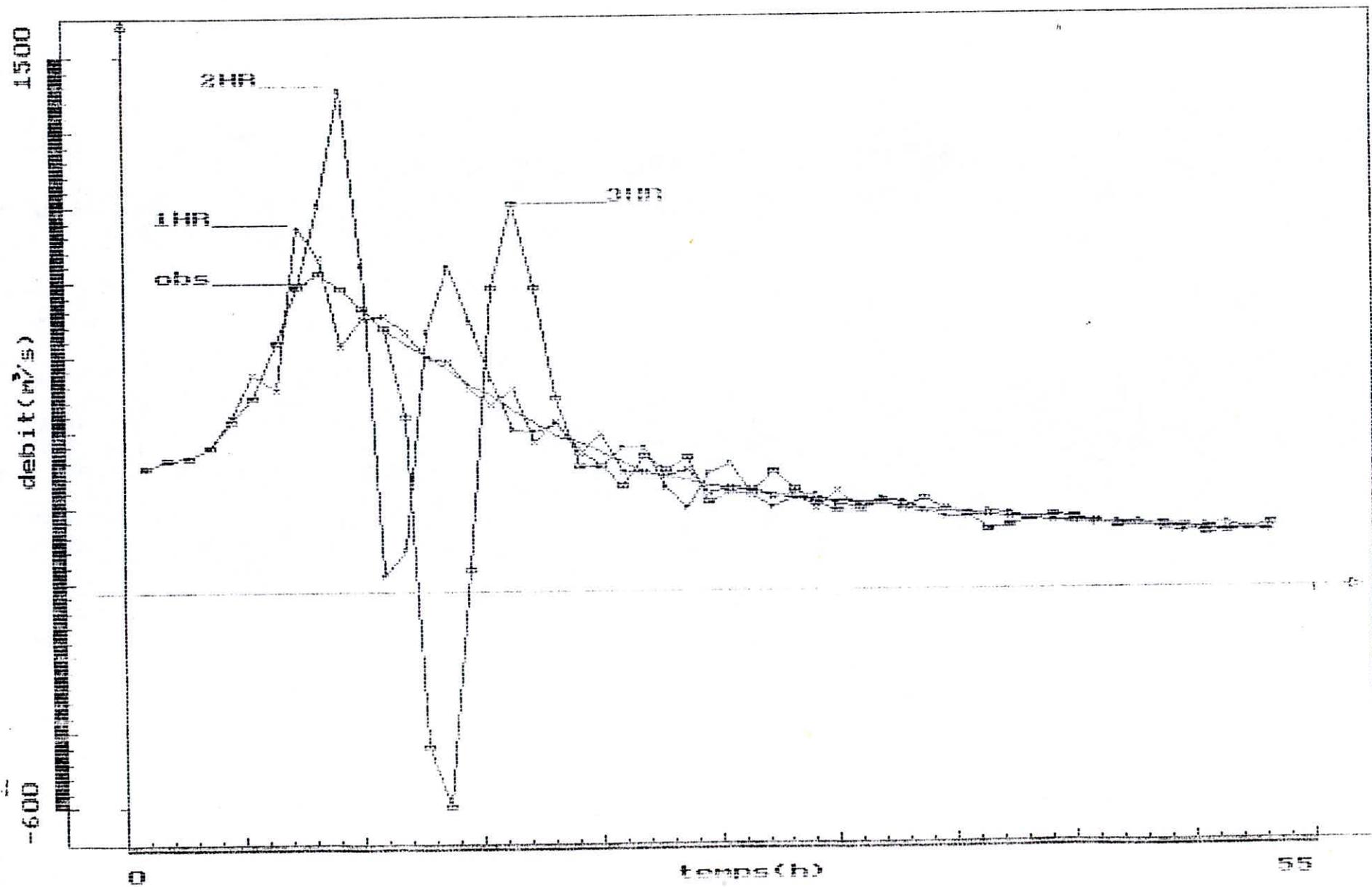
EXTRAPOLATION DU TROISIEME DEGRE (CRUEL)



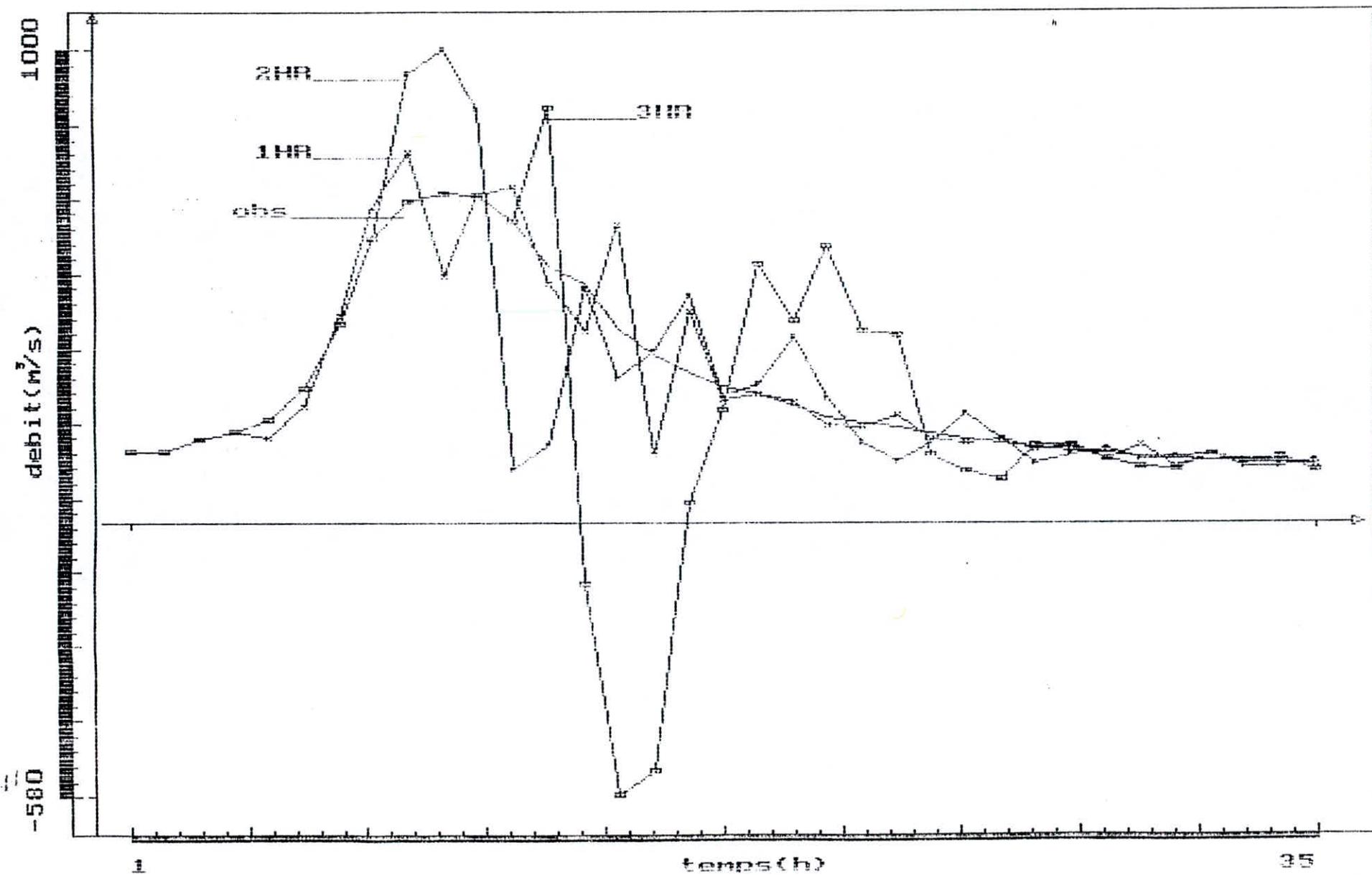
EXTRAPOLATION DE TROISIEME DEGRE (CRUE2)



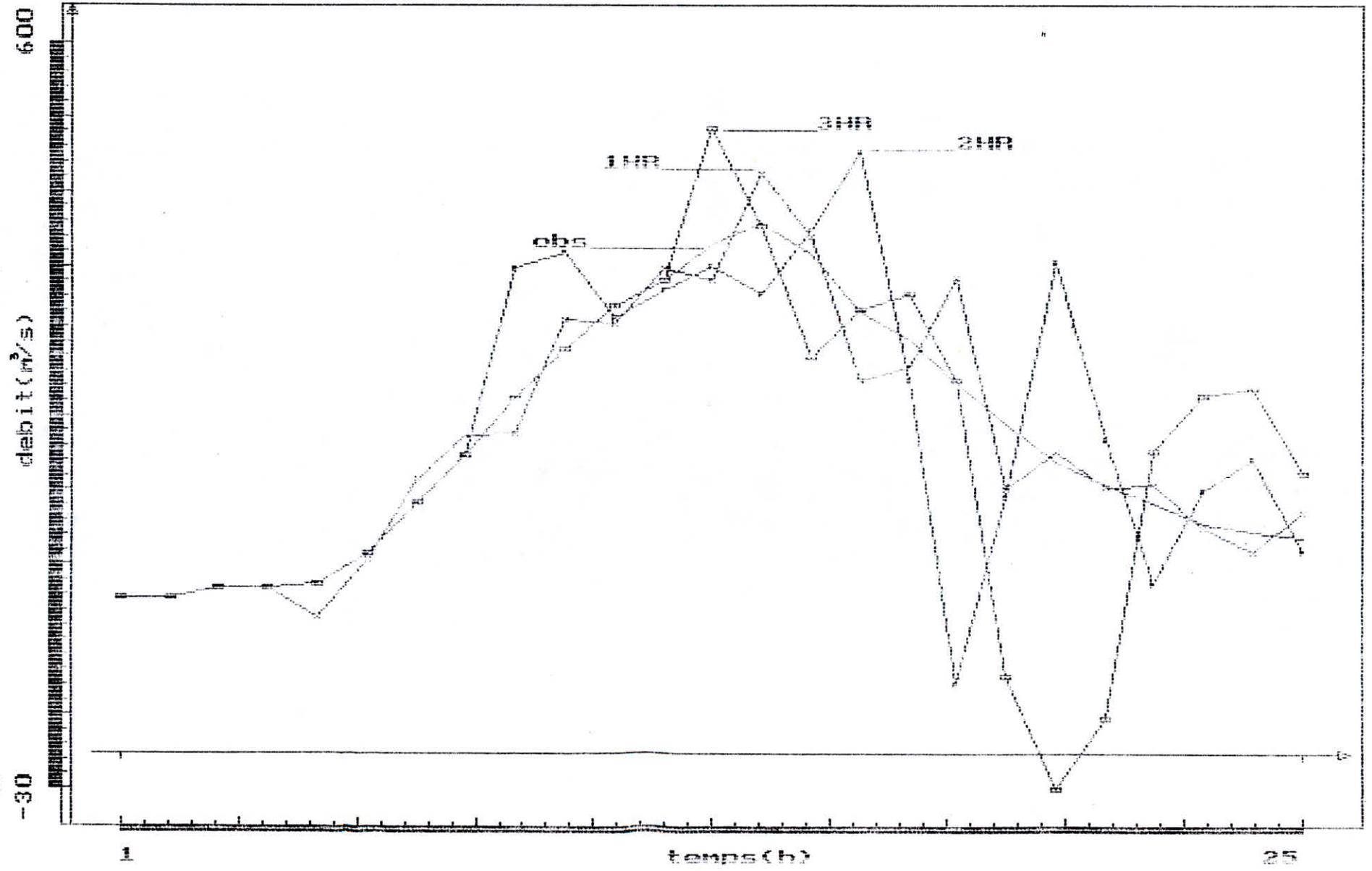
EXTRAPOLATION DE TROISIEME (CRUES)



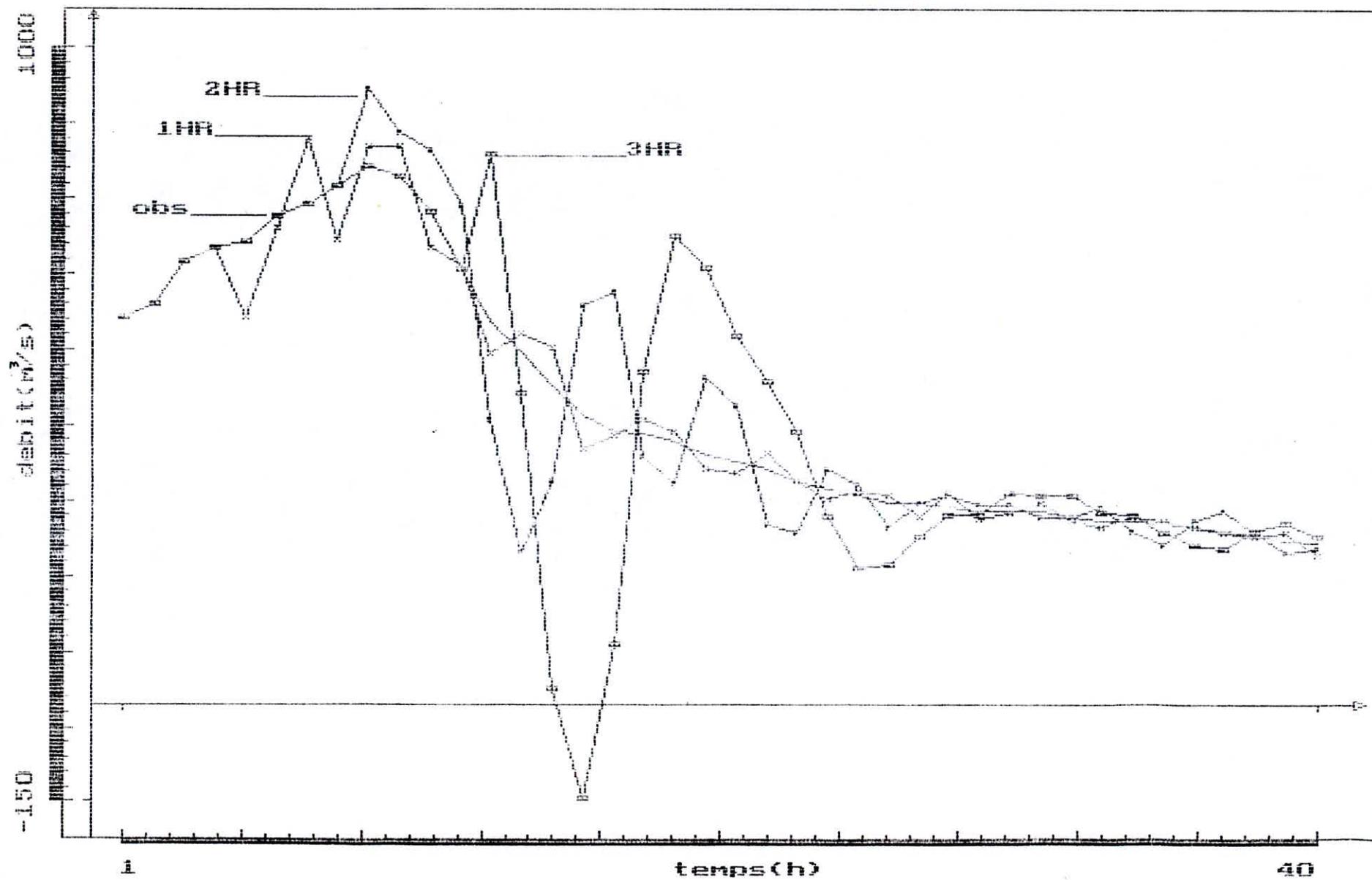
EXTRAPOLATION DE TROISIEME DEGRE (CRUE4)



EXTRAPOLATION DE TROISIEME DEGRE (CRUES)



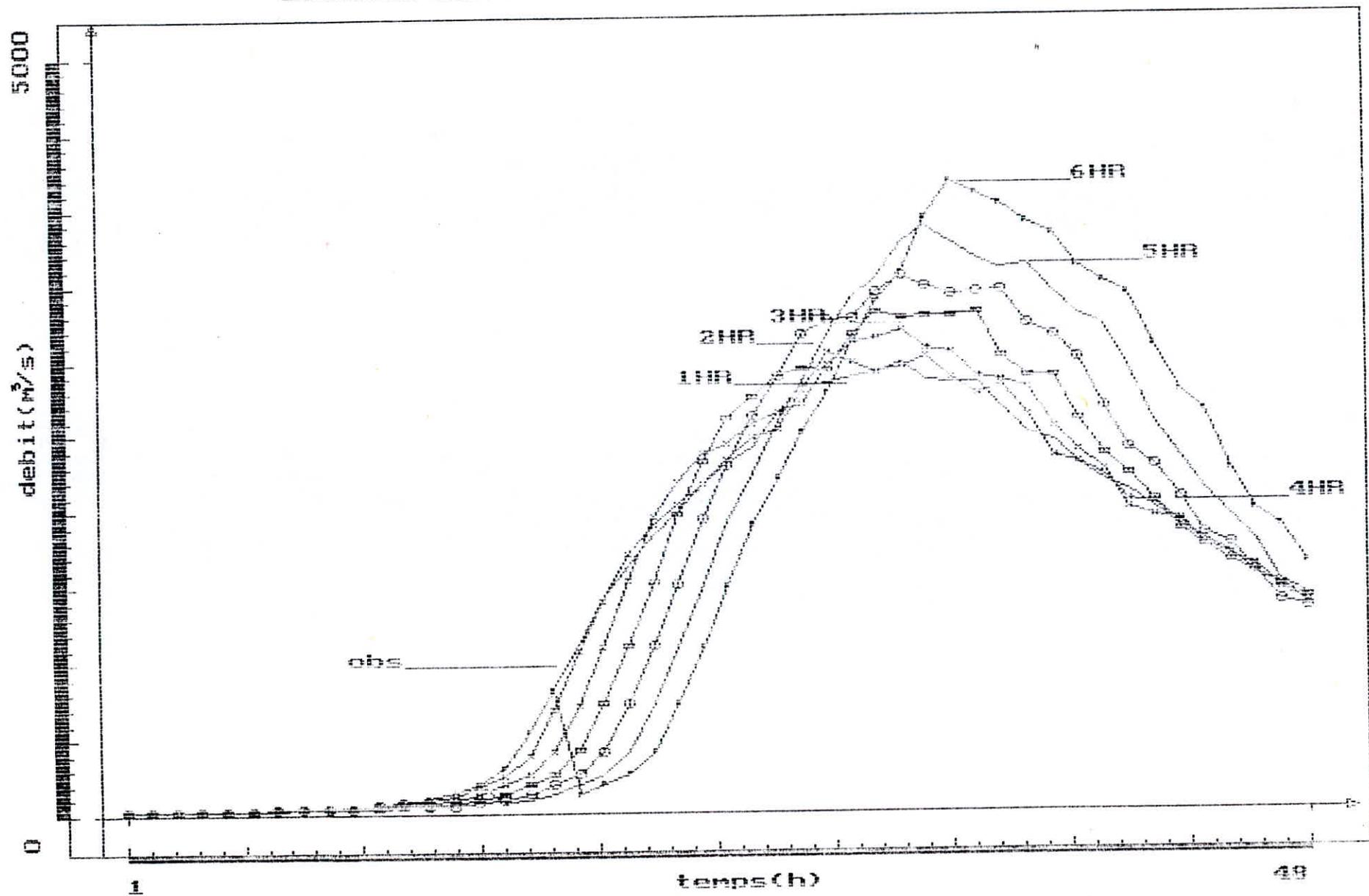
EXTRAPOLATION DE TROISIEME DEGRE (CRUES)



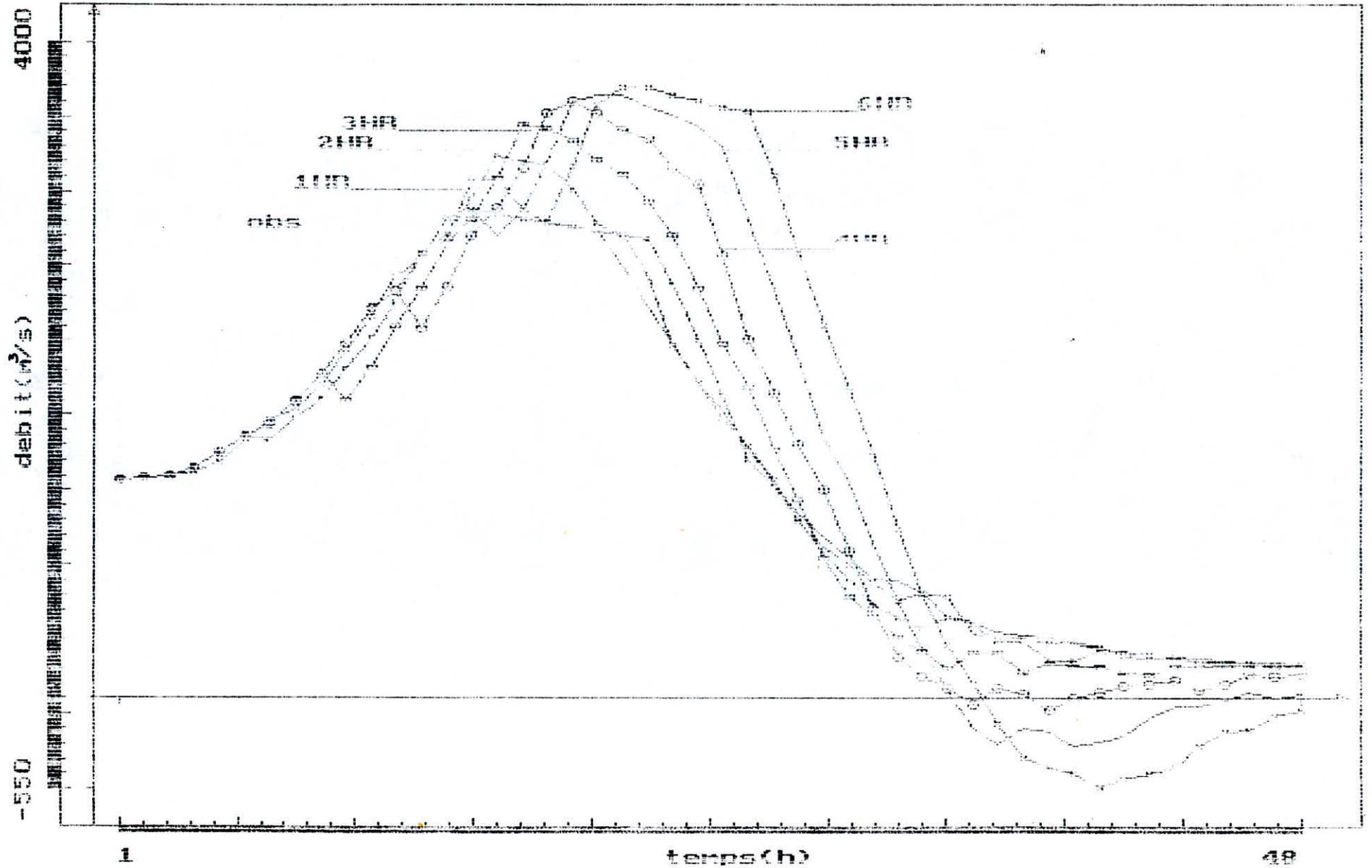
ANNEXE III

METHODE DE LISSAGE

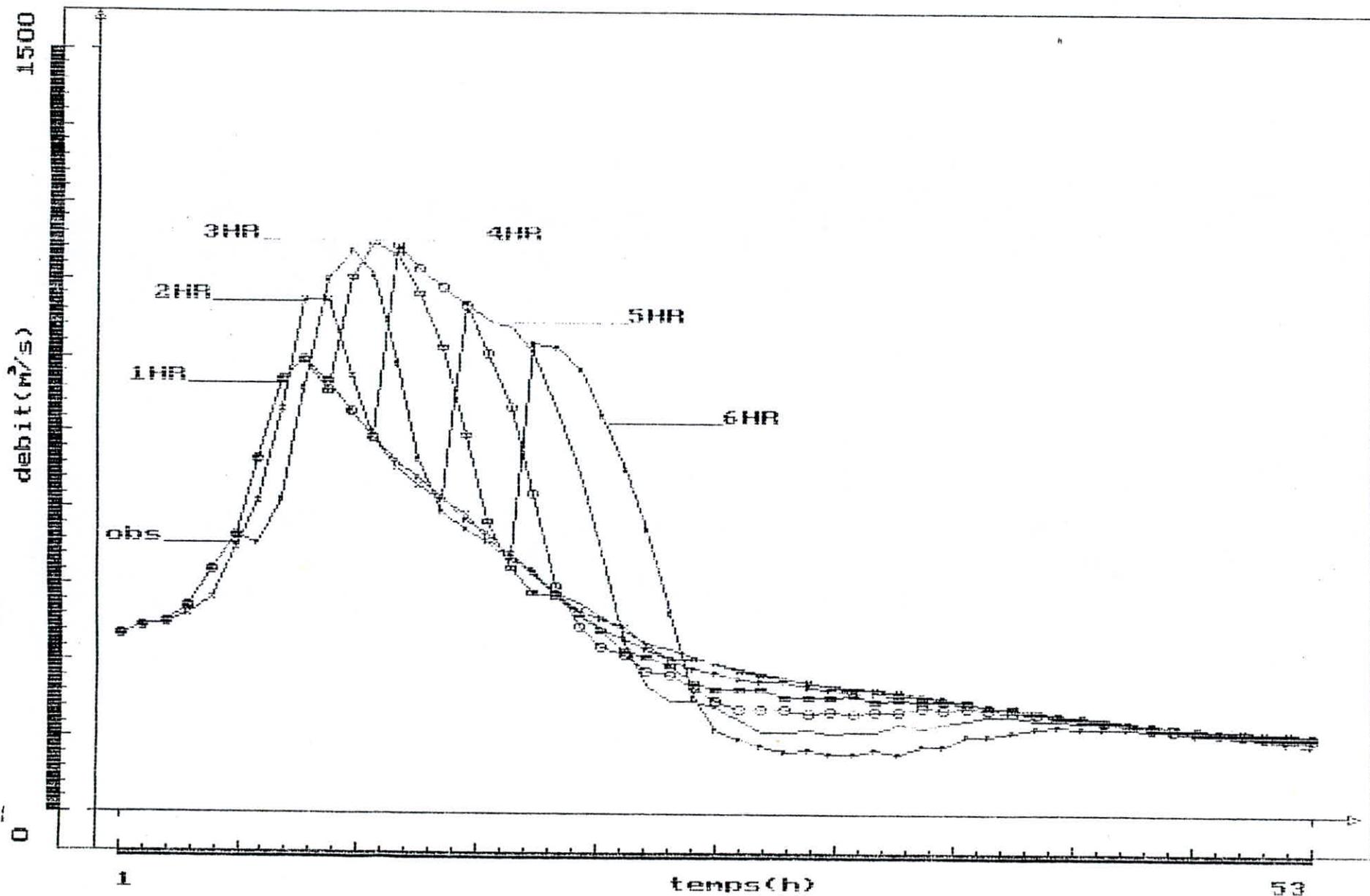
LISSAGE LINEAIRE À TROIS POINTS DE BASE (CRUEL)



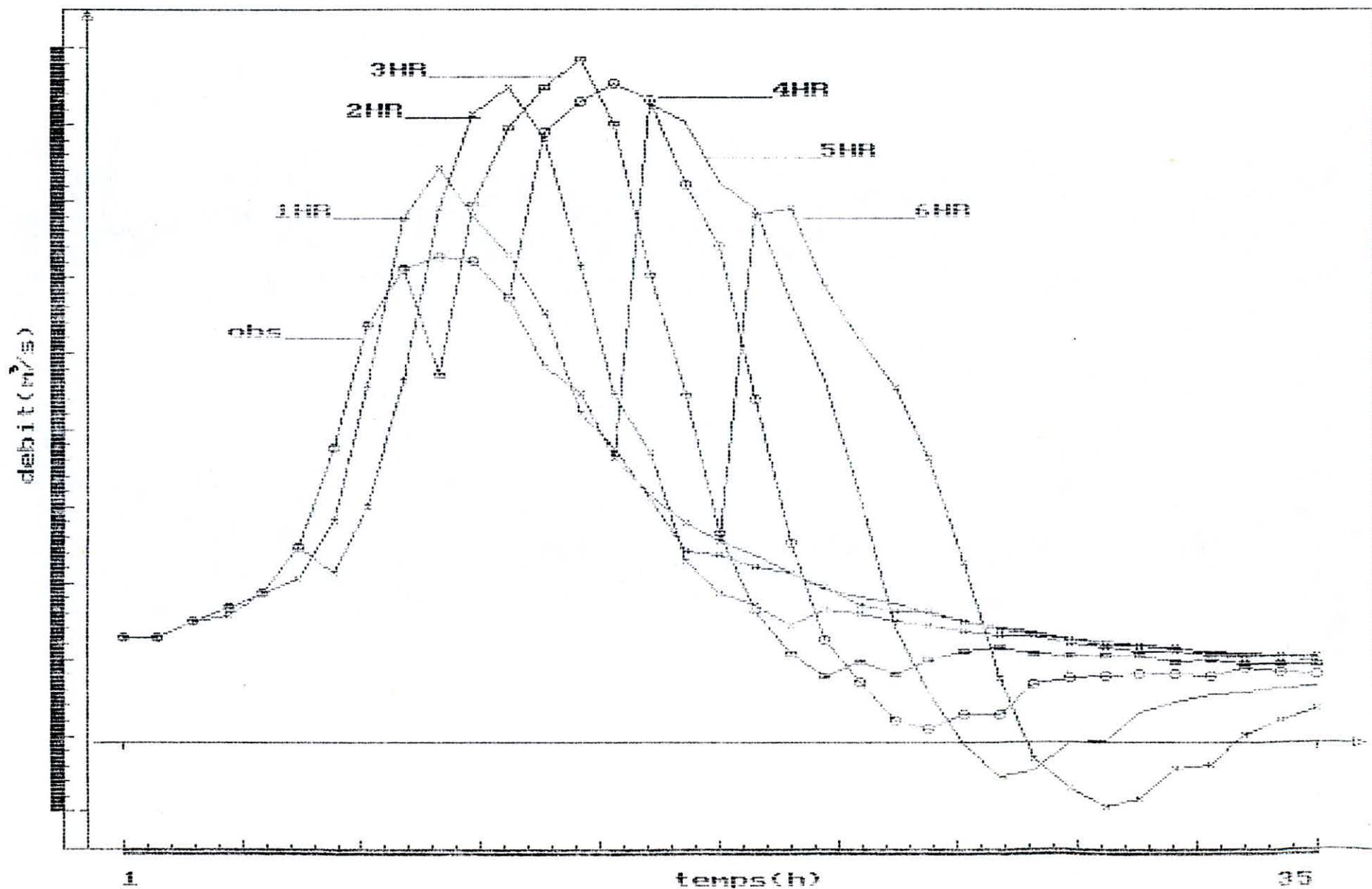
LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE (CRUES)



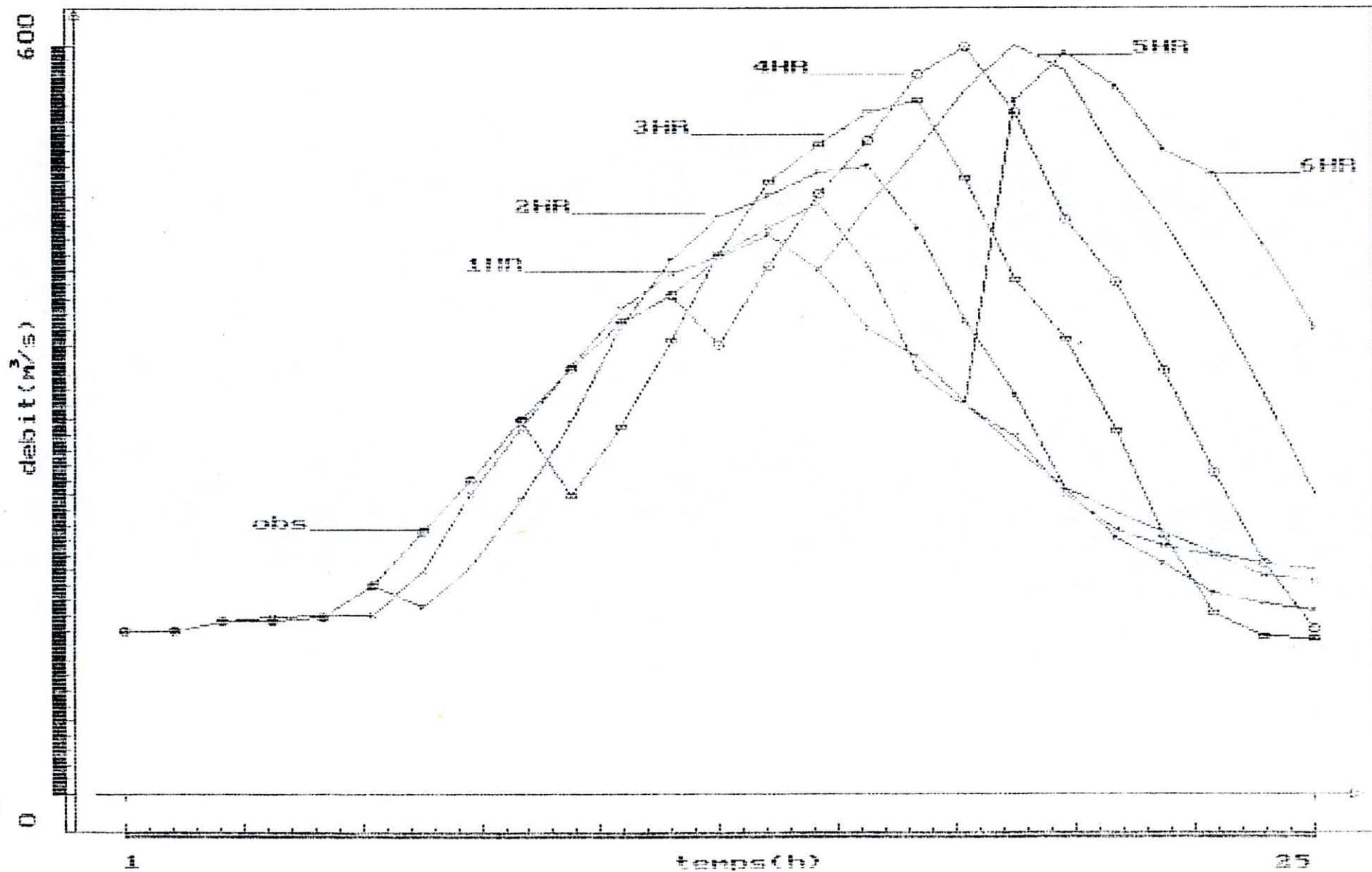
LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE (CRUE3)



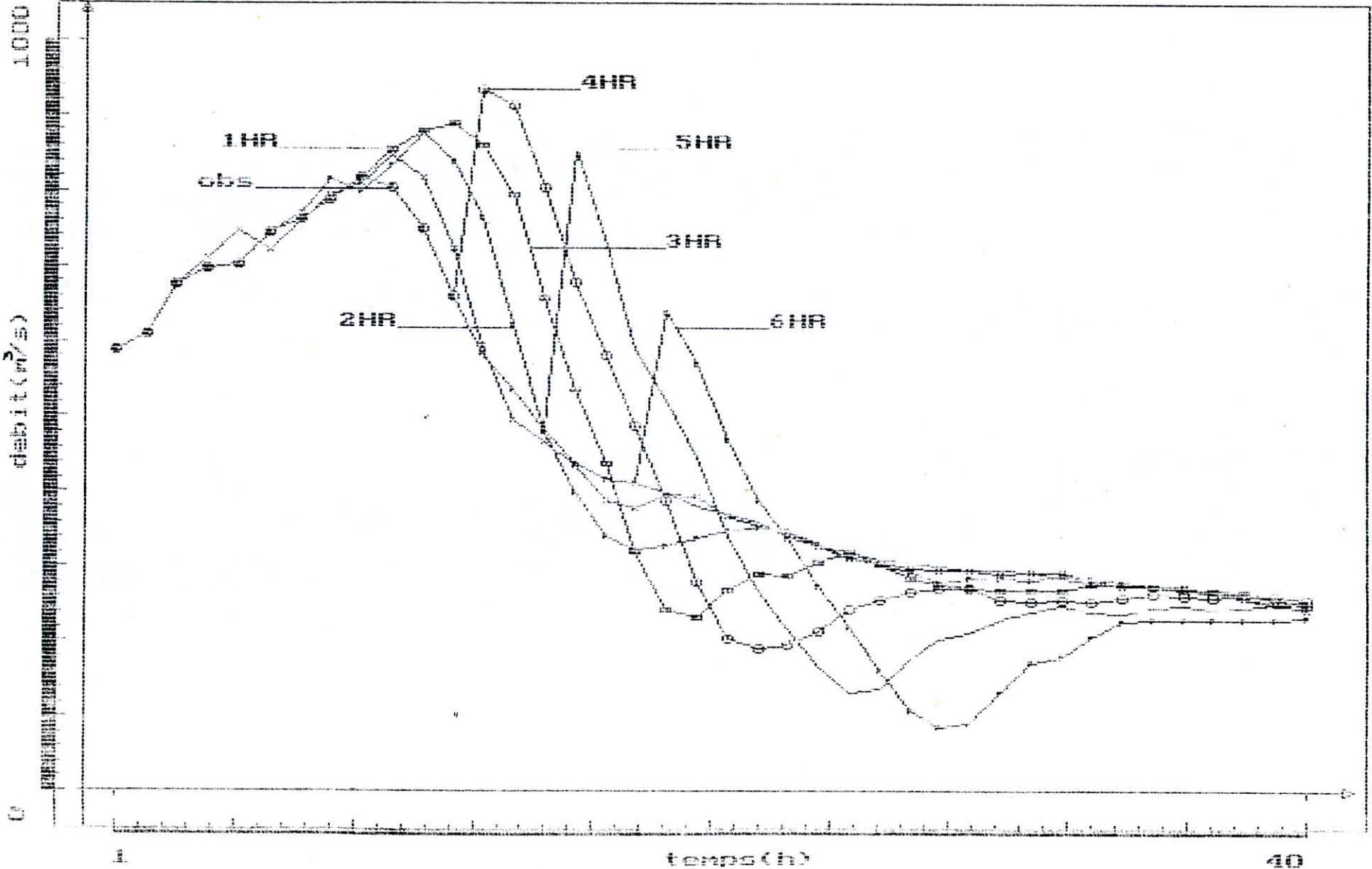
LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE (CRUE4)



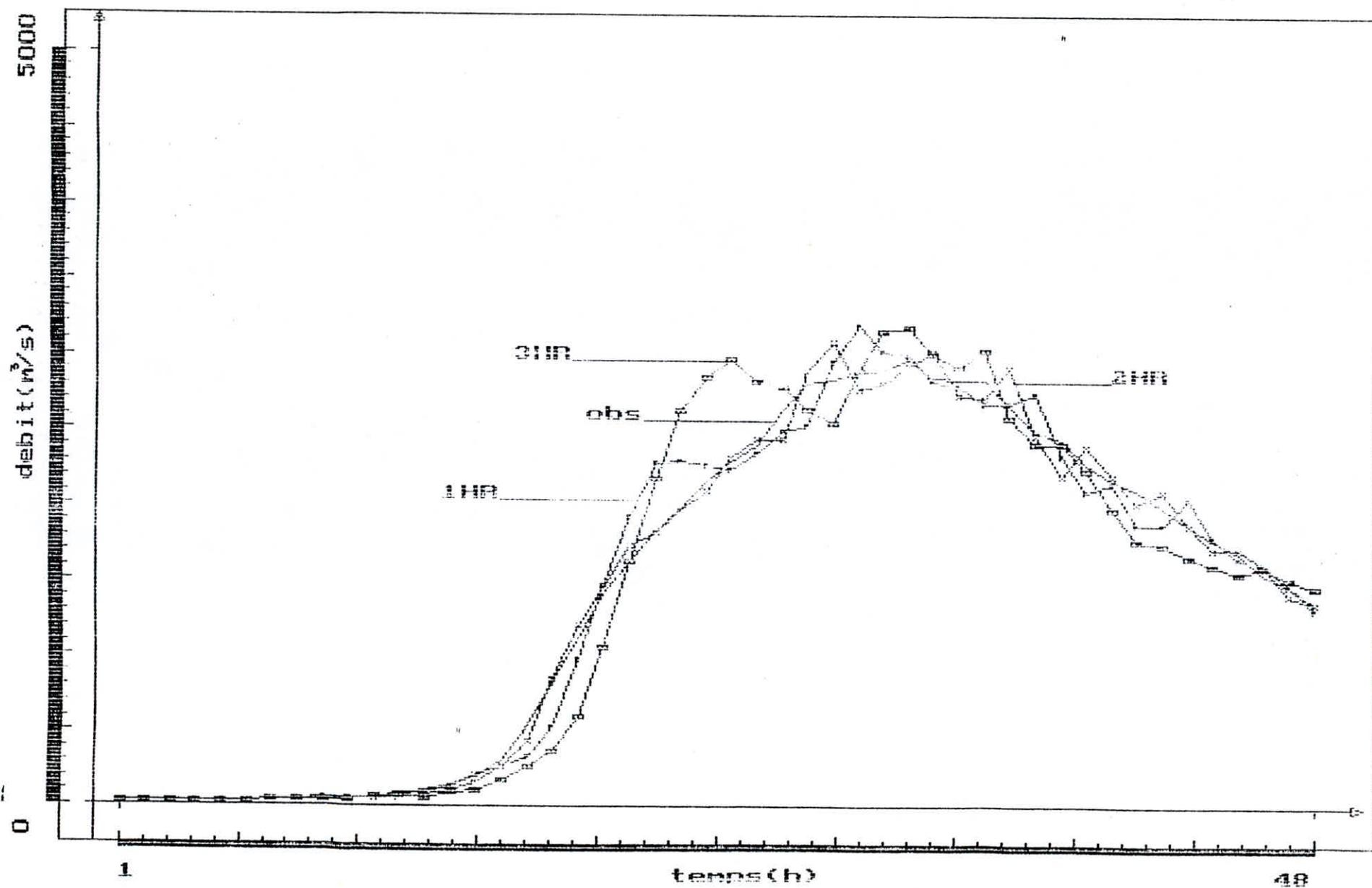
LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE (CRUES)



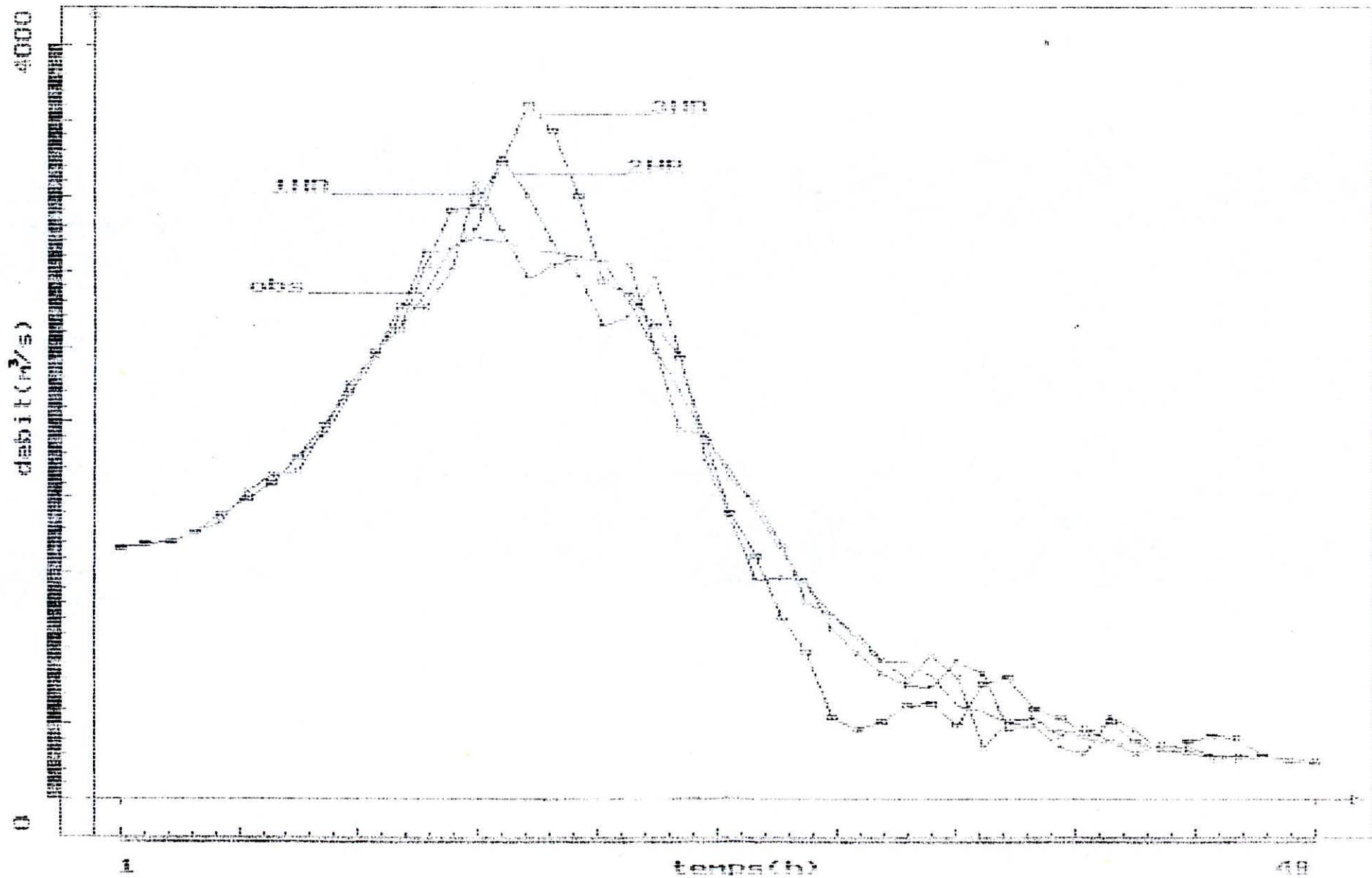
LISSAGE LINEAIRE A TROIS POINTS DE BASE (CRUE6)



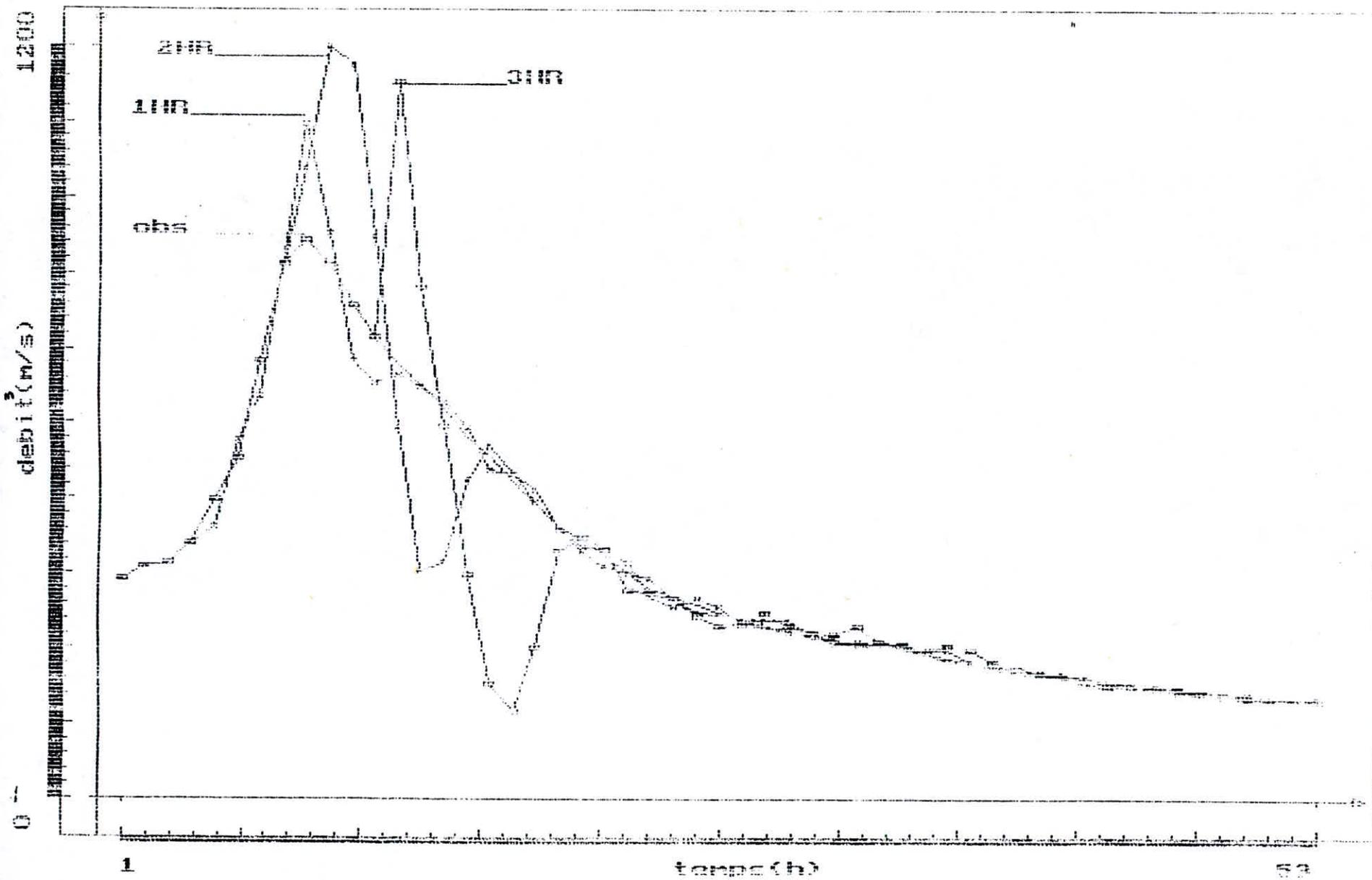
LISSAGE PARABOLIQUE A QUATRE POINTS DE BASE (CRUEL)



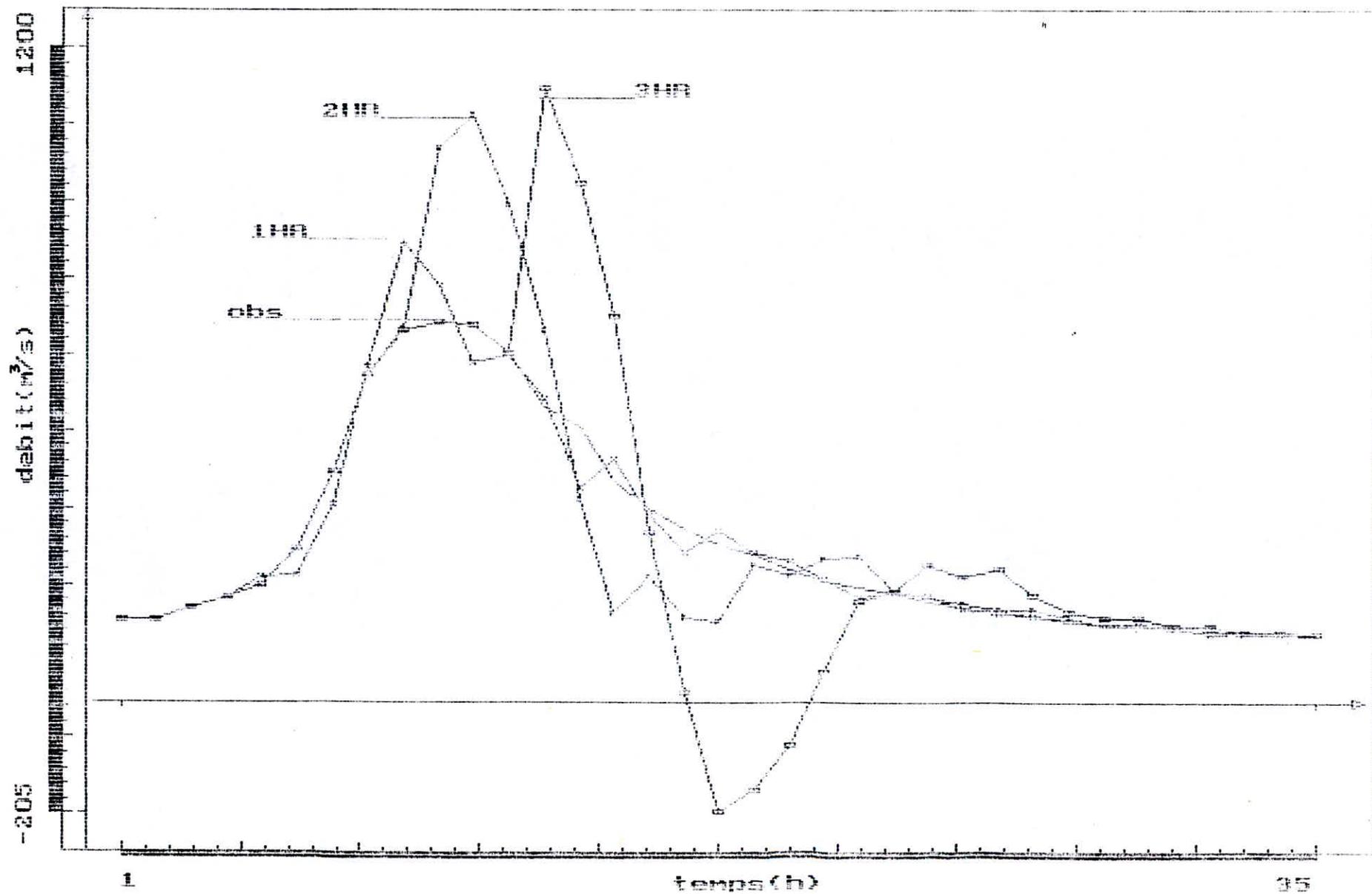
CHANGE ENVELOPES OF QUATRE POINTS DE BASE (CITUES)



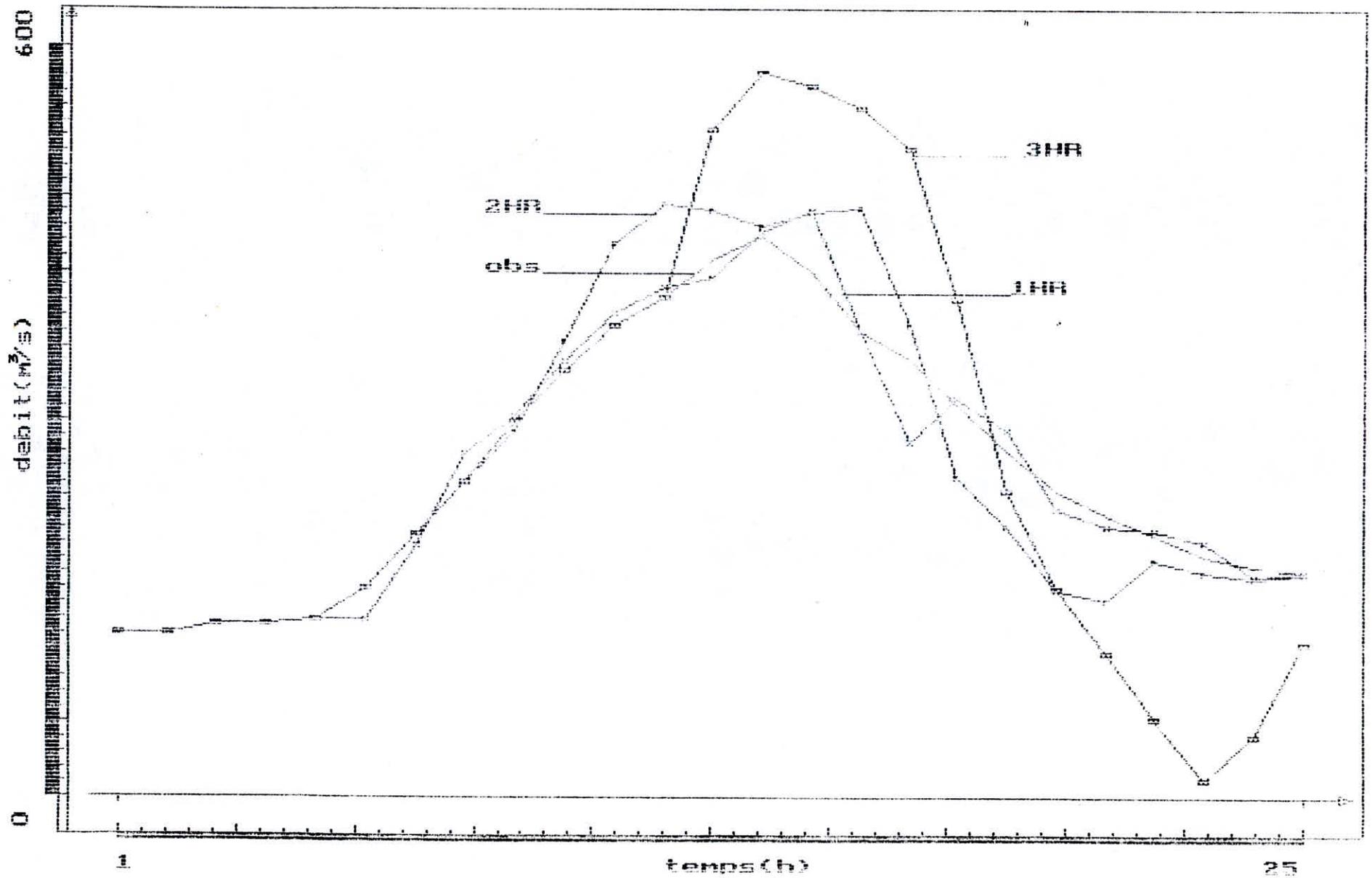
LISSAGE PARABOLIQUE A QUATRE PONTS DE BASE (COURBES)



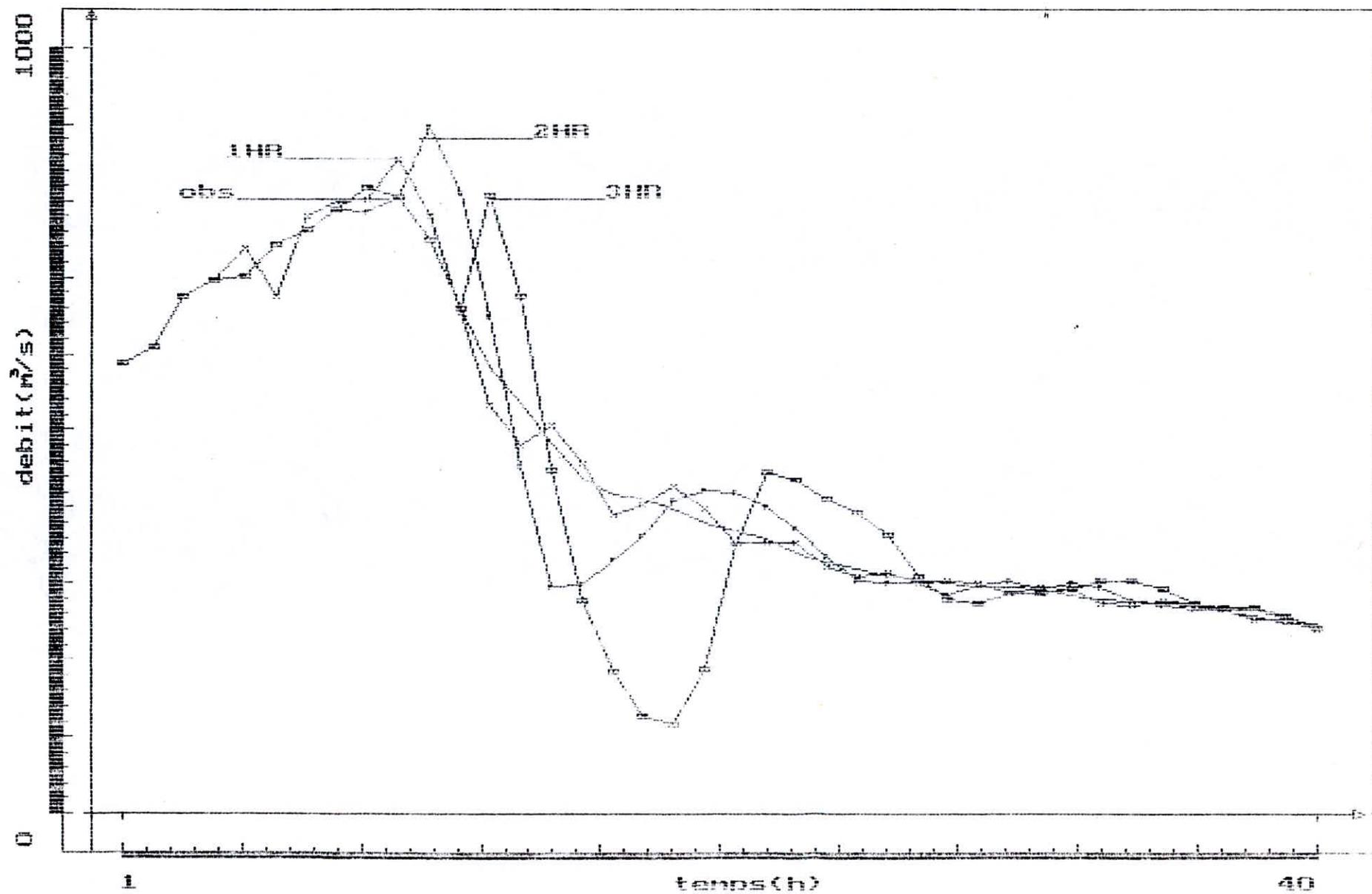
LISSAGE PARABOLIQUE A QUATRE POINTS DE BASE (CRUE4)



PASSAGE PARABOLIQUE A QUATRE POINTS DE BASE (CRUES)



LISSAGE PARABOLIQUE A QUATRE POINTS DE BASE (CRUES)



ANNEXE IV

METHODE DE MUSKINGUM

Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°1)

Q (m³/s)

2700.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

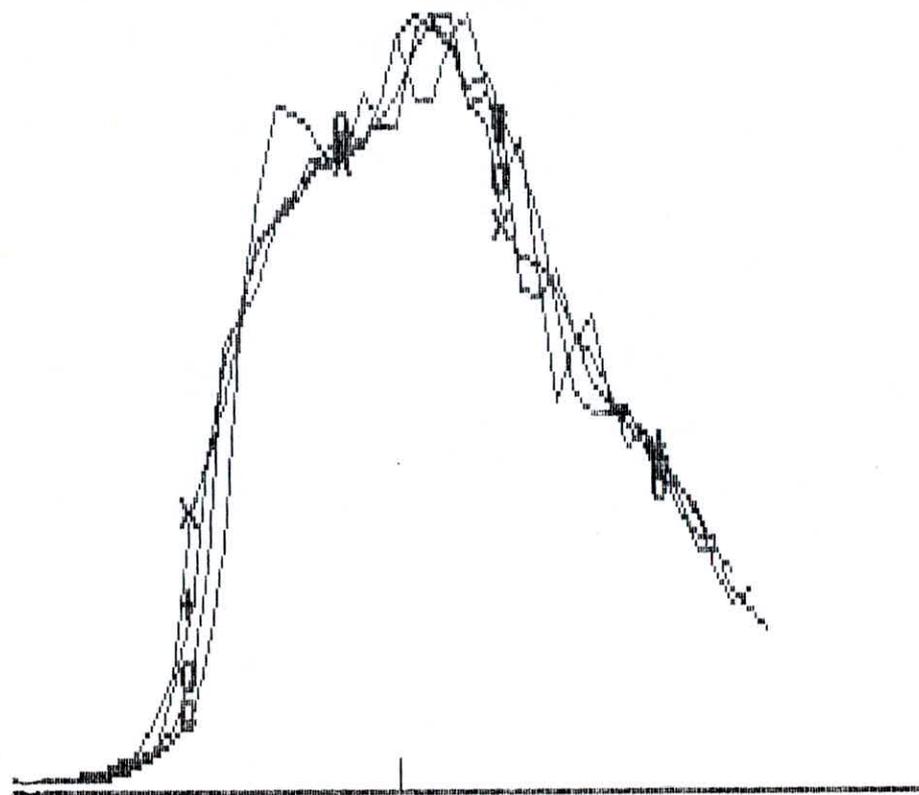
30.0

60.0

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 1H
- o Debit 2H
- c Debit 3H

Temps (h)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°1)

Q (m³/s)

2700.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

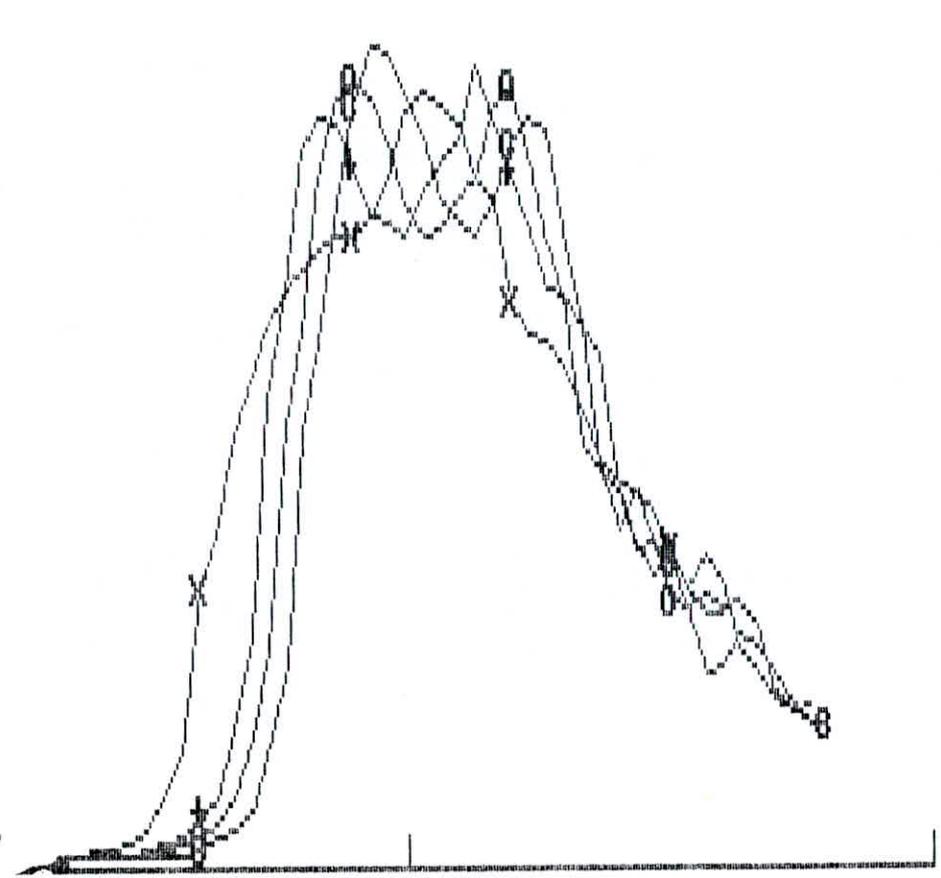
30.0

60.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 4H
- o Debit 5H
- c Debit 6H



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°2)

Q(m³/s)

3400.0

3000.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

30.0

60.0

Temps(h)

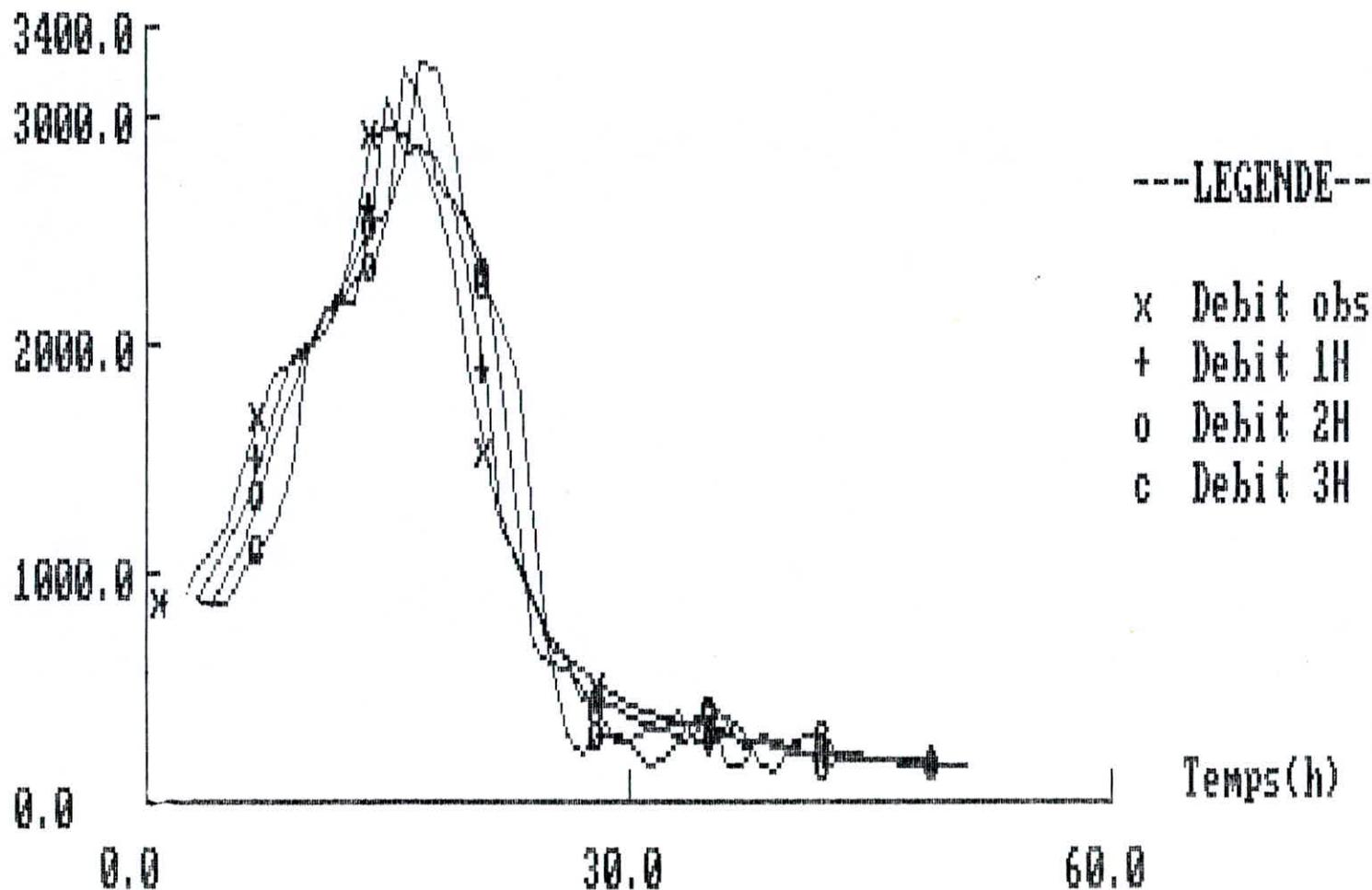
---LEGENDE---

x Debit obs

+ Debit 1H

o Debit 2H

c Debit 3H



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°2)

Q (m³/s)

3400.0

3000.0

2000.0

1000.0

0.0

0.0

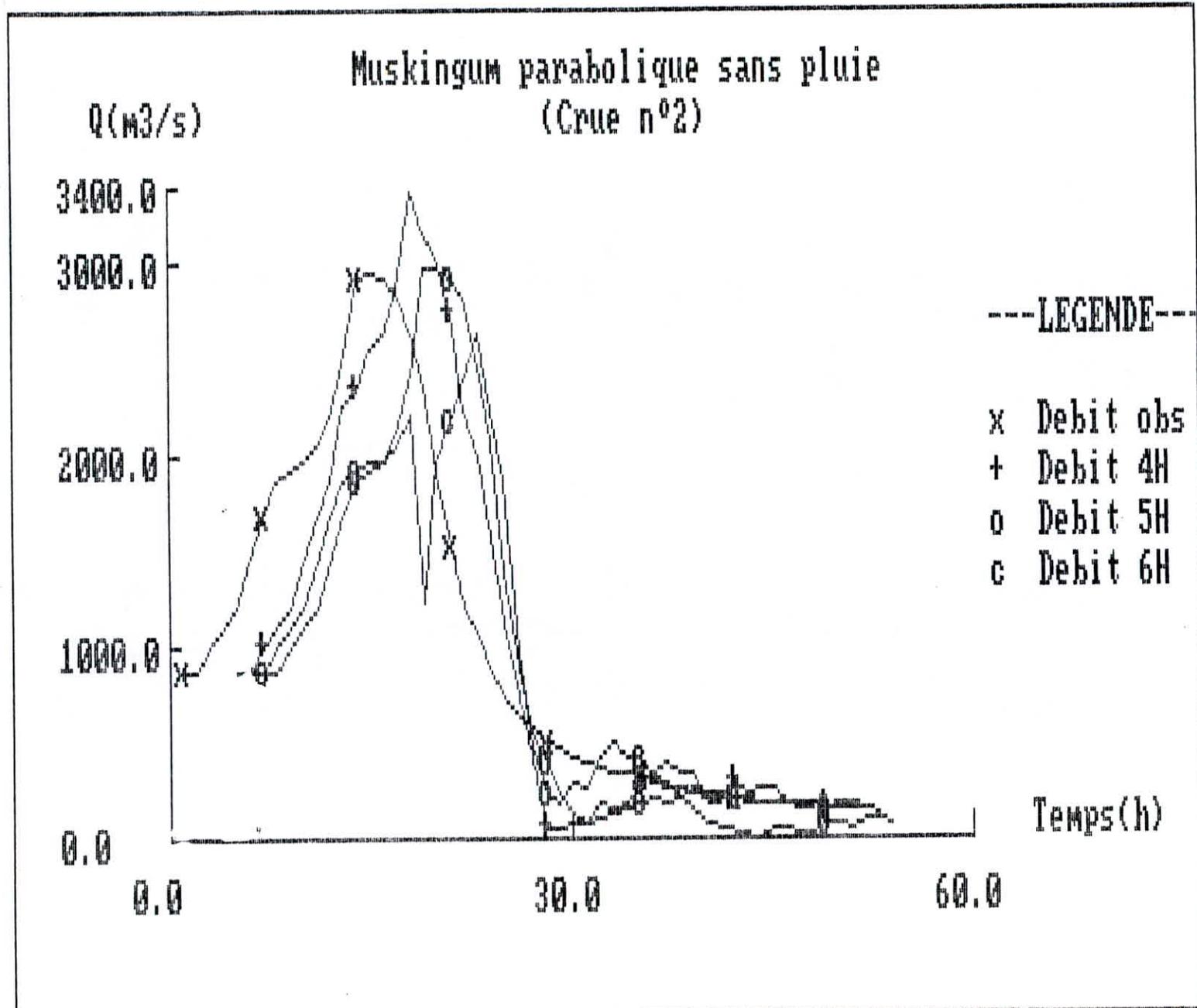
30.0

60.0

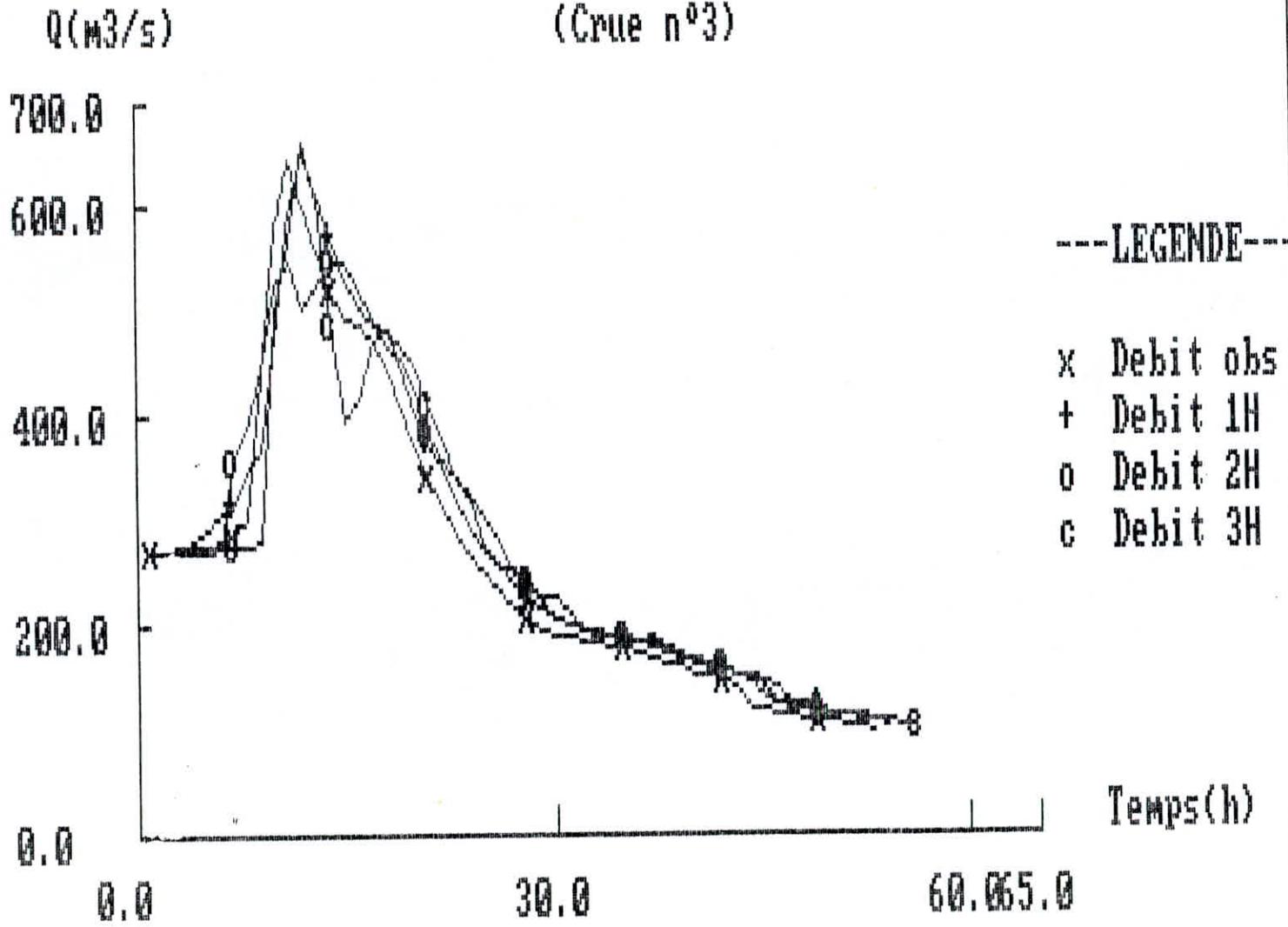
---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 4H
- o Debit 5H
- c Debit 6H

Temps(h)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°3)



---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 1H
- o Debit 2H
- c Debit 3H

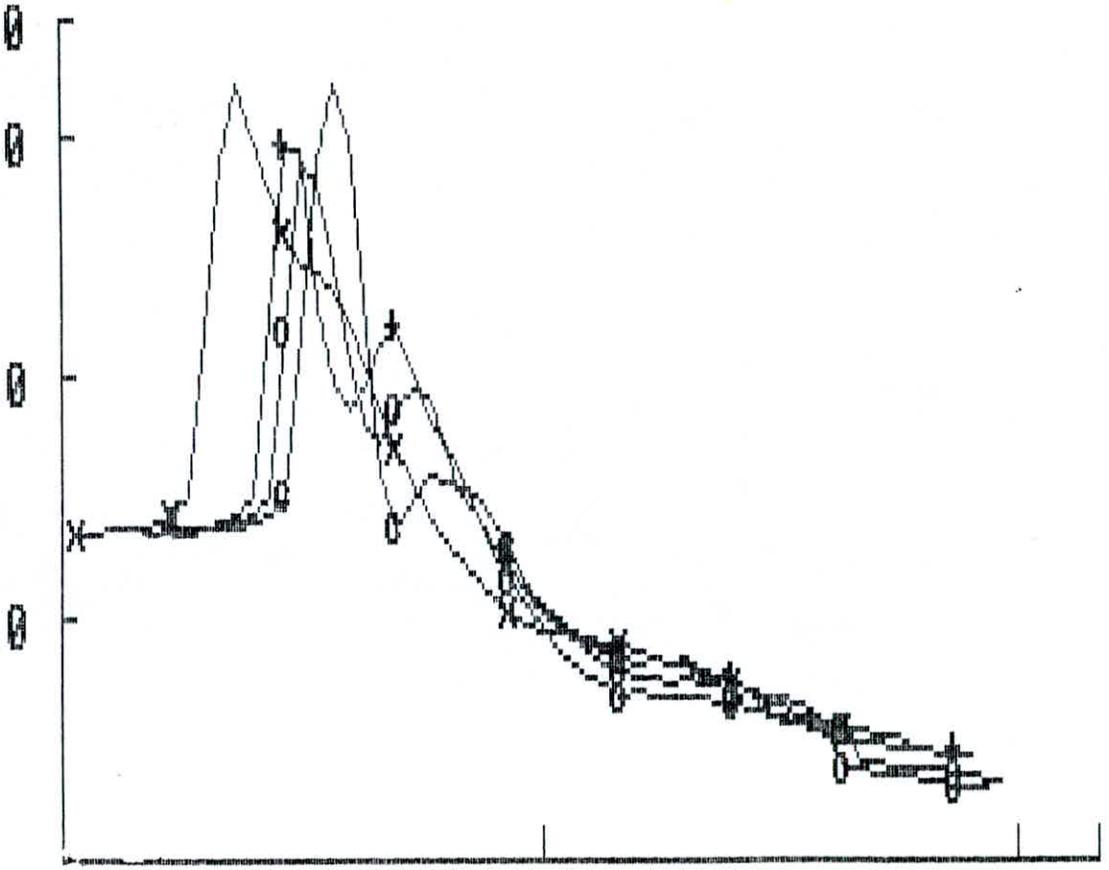
Temps (h)

Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°3)

Q (m³/s)

700.0
600.0
400.0
200.0
0.0

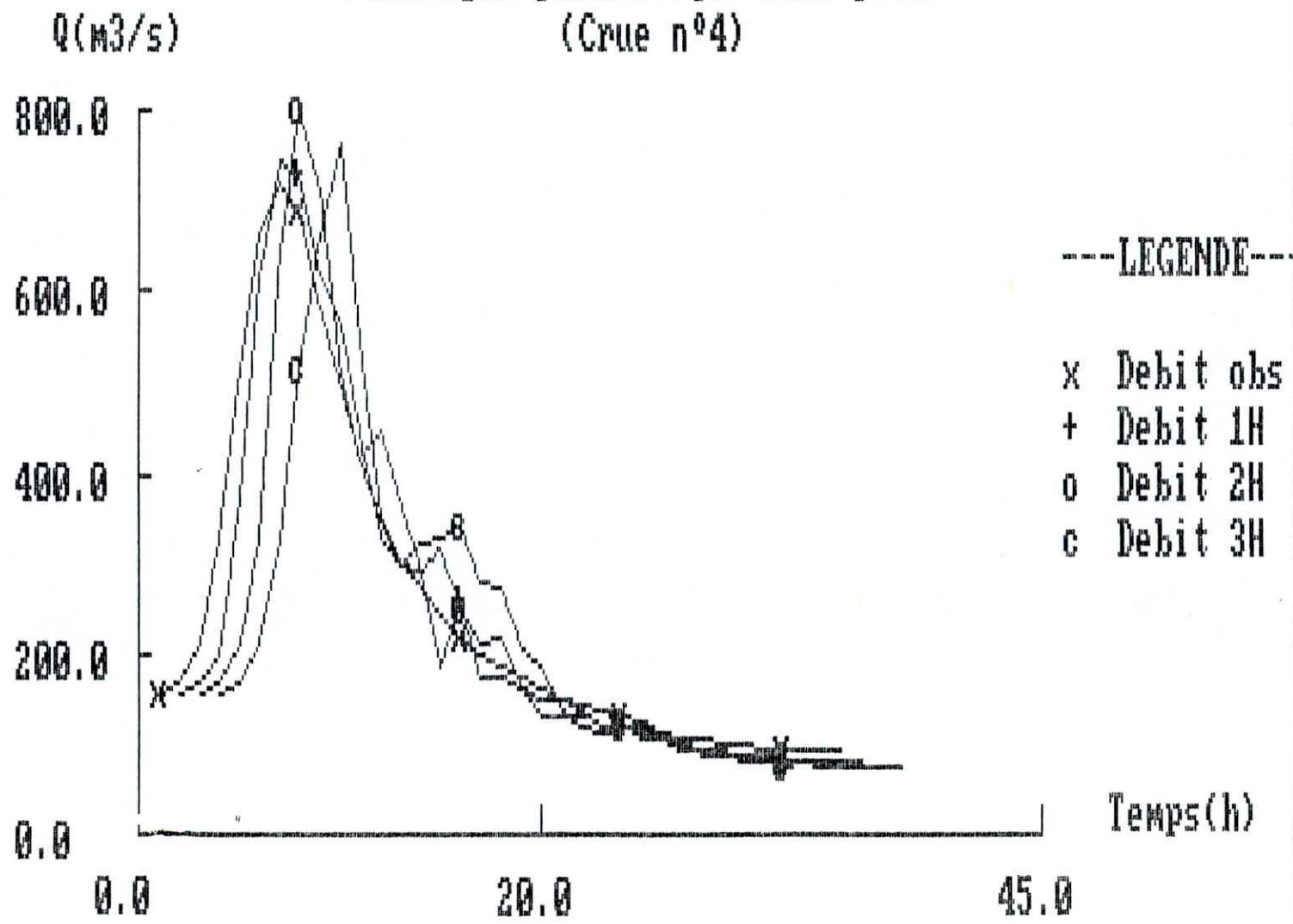
- LEGENDE---
- x Debit obs
 - + Debit 4H
 - o Debit 5H
 - c Debit 6H



0.0 30.0 60.0 65.0

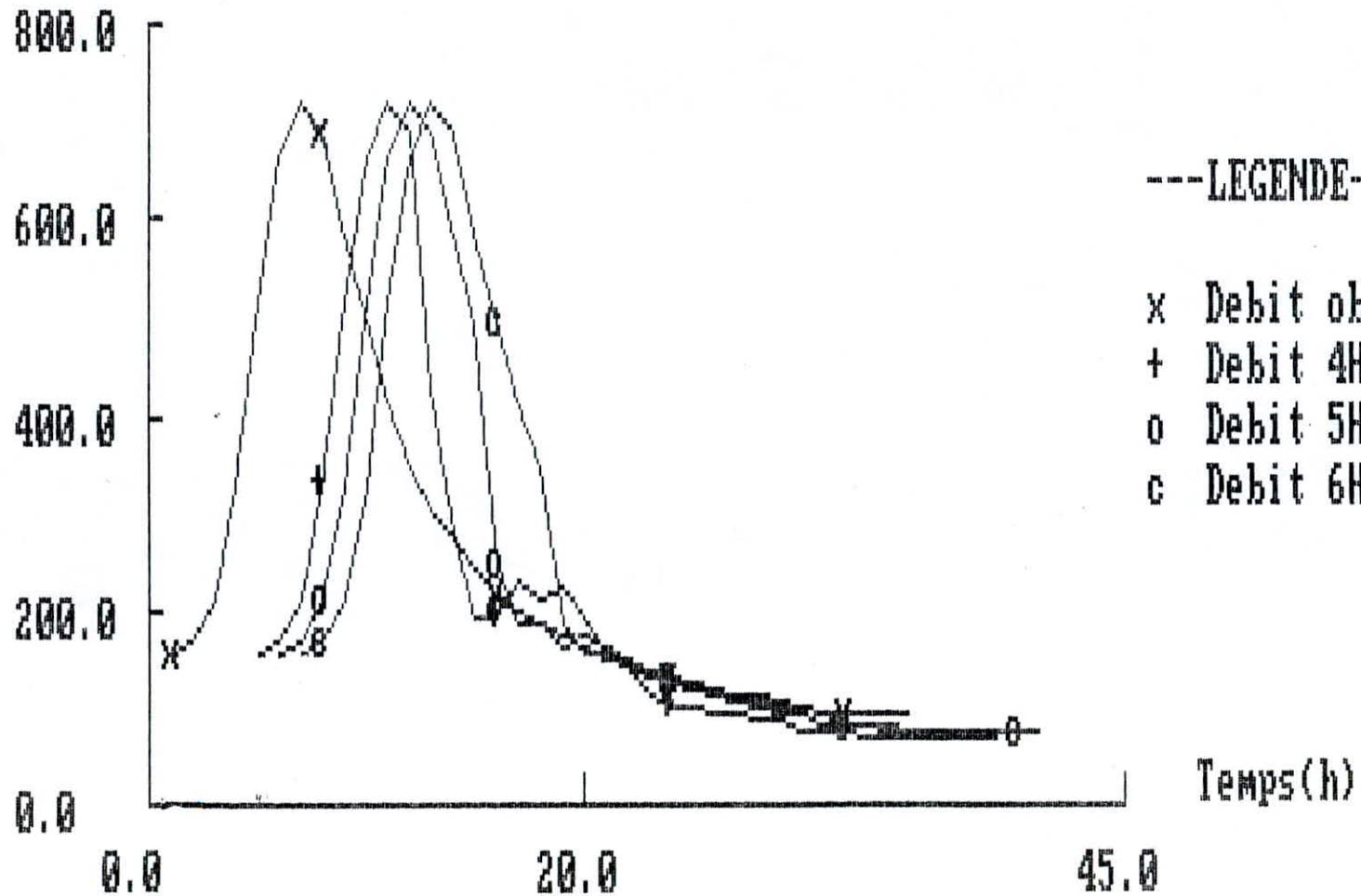
Temps (h)

Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°4)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°4)

Q (m³/s)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°5)

Q (m³/s)

600.0

400.0

200.0

0.0

0.0

15.0

35.0

---LEGENDE---

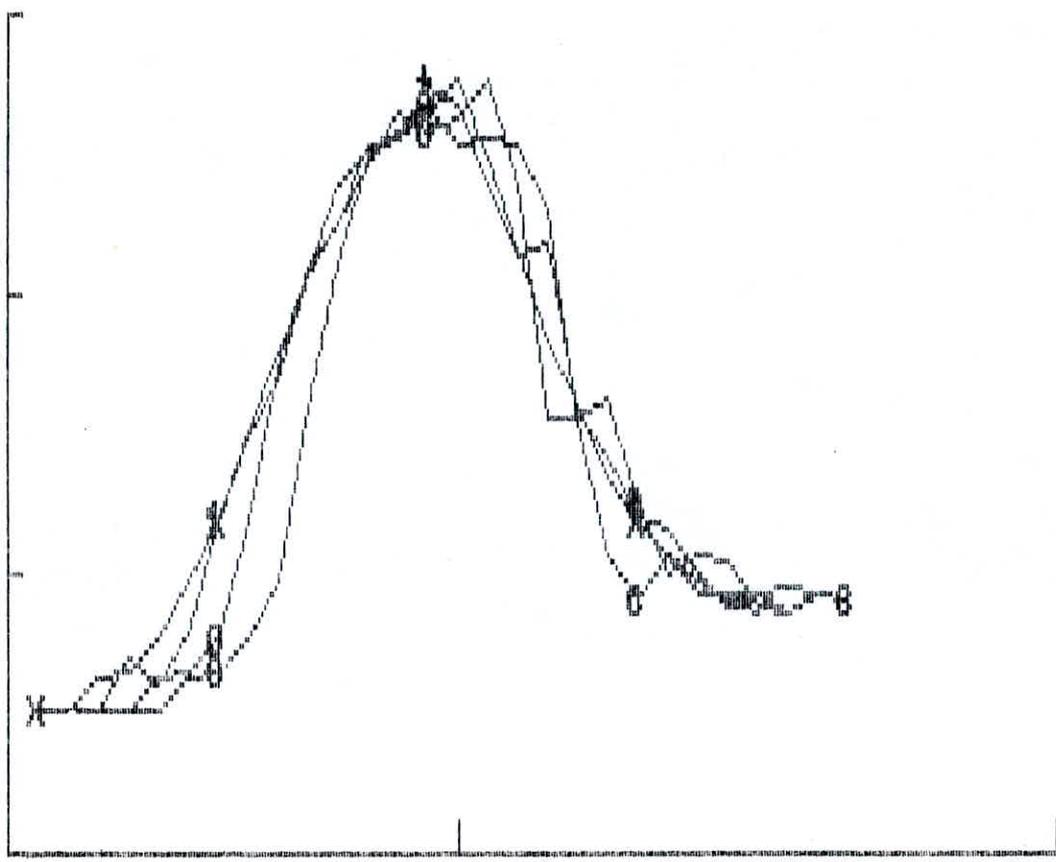
x Debit obs

+ Debit 1H

o Debit 2H

c Debit 3H

Temps (h)



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°5)

Q (m³/s)

600.0

400.0

200.0

0.0

0.0

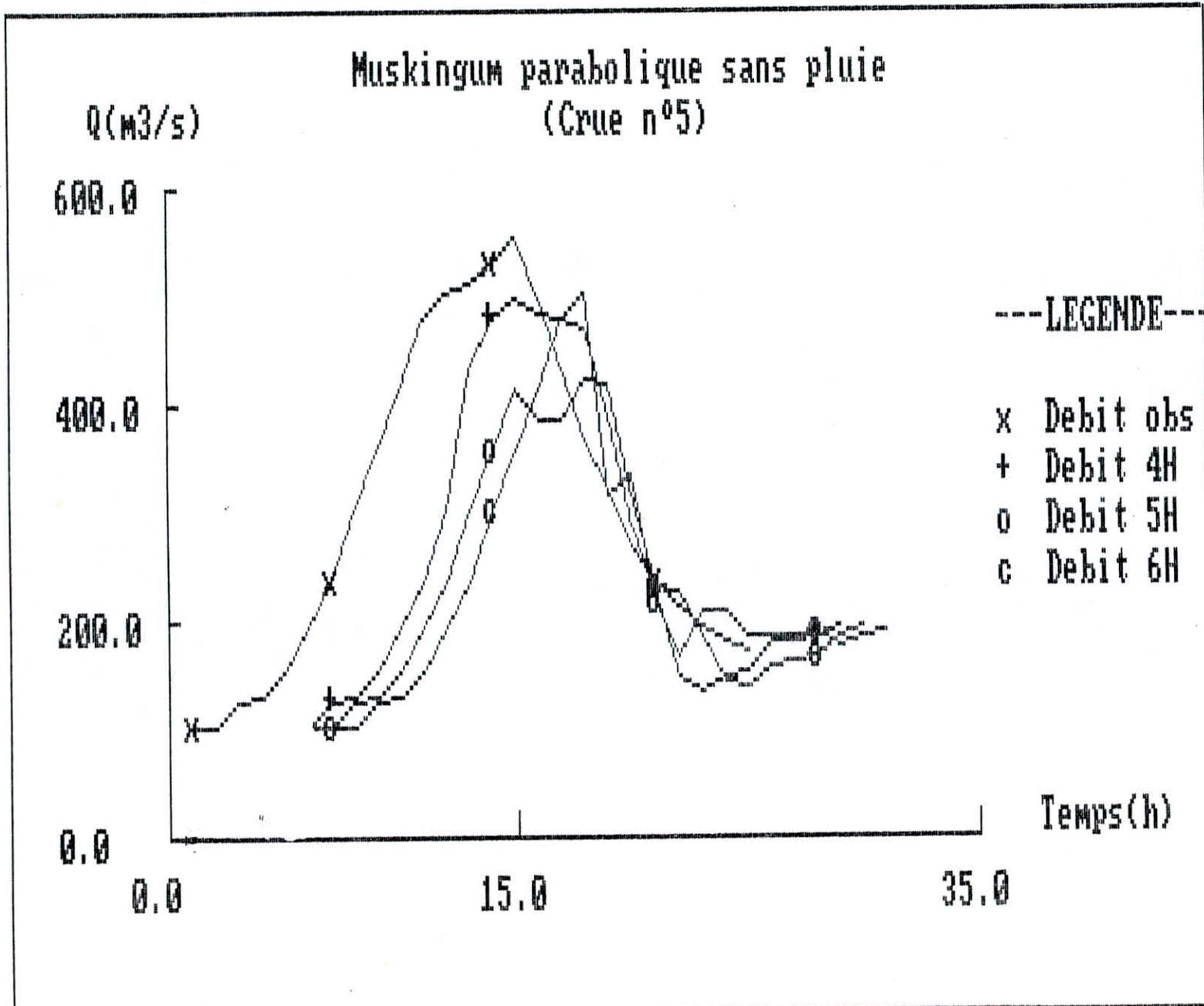
15.0

35.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 4H
- o Debit 5H
- c Debit 6H



Muskingum parabolique sans pluie
(Crue n°6)

Q (m³/s)

1000.0

900.0

600.0

300.0

0.0

0.0

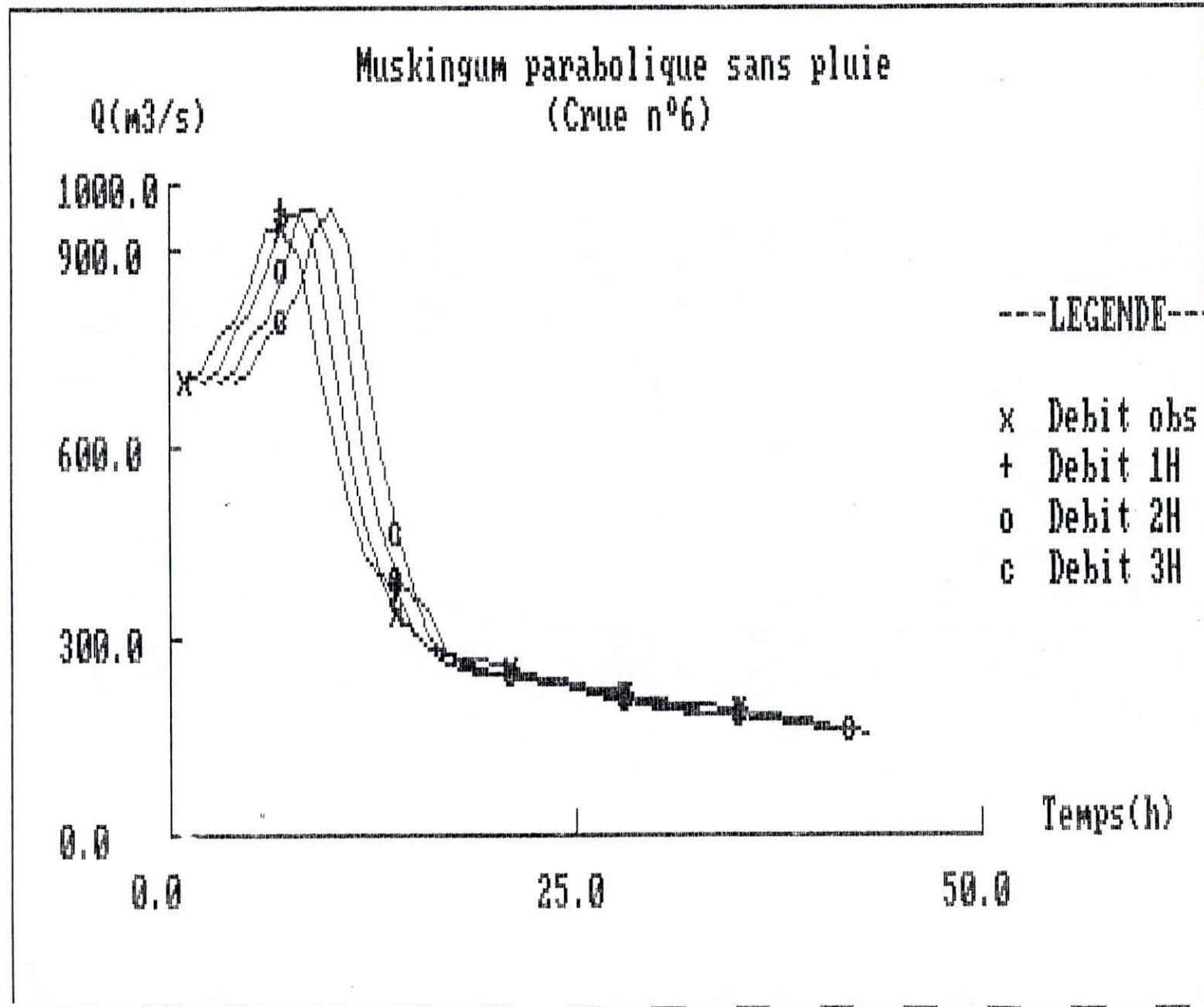
25.0

50.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 1H
- o Debit 2H
- c Debit 3H



Muskingum parabolique sans pluie (Crue n°6)

Q (m³/s)

1000.0

900.0

600.0

300.0

0.0

0.0

25.0

50.0

Temps (h)

---LEGENDE---

- x Debit obs
- + Debit 4H
- o Debit 5H
- c Debit 6H

