

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER



Service hydrologique



# RECHERCHE D'UN HYDROGRAMME STANDARD

par

Marcel ROCHE

Septembre 1966

- O.R.S.T.O.M. -

-----

Service Hydrologique

- RECHERCHE d'UN HYDROGRAMME STANDARD -

-----

Par

Marcel ROCHE

Septembre 1966

## 1 - NECESSITE d'un HYDROGRAMME STANDARD et POSITION du PROBLEME

Lors de l'étude d'un bassin par la méthode de l'hydrogramme unitaire, on dégage un "hydrogramme-type" (1) qui peut être considéré comme une caractéristique hydraulique de ce bassin. Pour ce faire on s'efforce, pour chaque averse suffisamment intense et suffisamment courte, eu égard au temps de réponse du bassin, de séparer la partie de l'hydrogramme provenant du ruissellement (2). On obtient ainsi, pour chaque crue étudiée, un hydrogramme dit "de ruissellement" que l'on ramène par réduction des ordonnées à un volume arbitraire constant. La superposition des hydrogrammes réduits, obtenus ainsi pour toutes les crues jugées "unitaires", fournit, par considération des ordonnées médianes ou moyennes, un hydrogramme-type dont le volume est égal au volume arbitraire fixé et dont la forme représente en moyenne celle d'un hydrogramme de ruissellement quelconque.

Un tel hydrogramme-type peut être appliqué au même bassin pour fournir un hydrogramme de crue rare, soit par simple affinité, soit par composition de plusieurs hydrogrammes si l'on utilise, pour la crue de fréquence choisie, une averse non unitaire. Cette opération suppose que l'on est capable de déterminer le coefficient de ruissellement, problème que nous supposons résolu ici.

Où les choses se compliquent, c'est lorsqu'on veut appliquer les résultats de l'étude, ou d'une série d'études, à un autre bassin. Un hydrogramme est en effet un opérateur fort complexe, malgré la simplification apportée par la conception même de la méthode, et défini par une infinité de paramètres. Or, sur un bassin non étudié du point de vue hydrologique, le seul espoir que l'on ait de définir ces paramètres, donc l'hydrogramme-type lui-même, est de les relier aux caractéristiques géomorphologiques. Comme il n'est pas concevable d'introduire tous les paramètres de l'hydrogramme, il sera nécessaire de schématiser le dernier et de le représenter par un nombre restreint de paramètres dont la seule connaissance permette de le reconstituer sans trop le défigurer, tout au moins dans ses données essentielles.

- 
- (1) - Parfois, mais de plus en plus rarement, un diagramme de distribution en escalier, représentant les pourcentages de ruissellement.
  - (2) - Ici et dans toute la suite de l'exposé, il est entendu que l'on opère sur des averses suffisamment homogènes dans l'espace.

Pour comprendre la nécessité de l'hydrogramme standard, il faut se mettre à la place d'un hydrologue à qui l'on désigne un site sur une rivière drainant un petit bassin, et à qui l'on demande de déterminer une crue de fréquence donnée. Les éléments de son estimation seront :

- une averse de même fréquence que la crue, unitaire ou non eu égard au temps de réponse du bassin ;
- un coefficient de ruissellement moyen ;
- la forme à donner à l'hydrogramme ayant comme volume la hauteur de l'averse multipliée par la surface du bassin et par le coefficient de ruissellement.

La détermination des deux premiers éléments est très complexe et les moyens dont on dispose pour la mener à bien sont encore fort sommaires. Nous nous contenterons ici d'examiner le troisième point.

La forme de l'hydrogramme-type, c'est-à-dire de volume arbitraire donné, à appliquer au volume de ruissellement obtenu, ne peut, en l'absence d'observations hydrométriques au site choisi, qu'être déterminée à partir des conditions géomorphologiques du bassin : surface, compacité, réseau de drainage, indice de pente et végétation. Cette forme devra donc être définie à partir de quelques paramètres simples bien caractéristiques qui pourront être mis en régression avec les facteurs géomorphologiques dont certains seront exprimés au moyen d'indices. Les paramètres définissant le plus complètement l'hydrogramme-type ont été dégagés depuis déjà fort longtemps. Ce sont :

- le temps de base  $T_b$ , ou durée totale du ruissellement ;
- le temps de montée  $T_m$ , ou intervalle de temps séparant le début du ruissellement du débit maximal ;
- le rapport  $\alpha = \frac{Q_M}{Q_m}$  du débit maximal au débit moyen de l'hydrogramme.

Ce sont ces paramètres que l'on s'attachera à relier aux facteurs géomorphologiques. Encore faudra-t-il les définir sans ambiguïté, ce qui fera l'objet du second paragraphe. Une première esquisse d'interprétation a été présentée par J. RODIER et C. AUVRAY qui ont étudié également le comportement du coefficient moyen de ruissellement par rapport aux facteurs géomorphologiques. Des études plus poussées sont en cours sous la direction de P. DUBREUIL. La présente note ne vise pas à autre chose qu'à clarifier

les notions encore vagues concernant l'hydrogramme-type utilisé dans les opérations de synthèse. L'étude dont elle est issue a conduit à l'adoption d'un hydrogramme-type applicable à tous les bassins moyennant un ajustement des trois paramètres de forme cités :  $T_b$ ,  $T_m$  et  $\alpha$  ; nous l'appellerons : hydrogramme standard.

## 2 - DETERMINATION des PARAMETRES de FORME

Supposons que le problème de la séparation des écoulements ait été résolu et que, pour un hydrogramme réel donné, on ait pu établir l'hydrogramme de ruissellement correspondant. La figure 1 montre comment se situent les trois paramètres fondamentaux,  $\alpha$  étant égal à  $Q_M/Q_m$ .  $Q_m$  est obtenu en divisant le volume ruisselé  $V_r$  par  $T_b$  ( $V_r = Q_m T_b$ ). On appellera  $A$  le temps qui s'écoule entre l'instant du maximum et la fin du ruissellement :  $A = T_b - T_m$ .

La séparation du ruissellement se ramène à déterminer sur l'hydrogramme naturel le début et la fin de ce ruissellement, puis la forme de la ligne liant ces deux points et séparant la partie imputable au ruissellement pur du reste de l'écoulement. Dans l'analyse classique, on prend comme point de départ le point le plus bas de la courbe de débit juste avant la montée de la crue. Lorsqu'on représente la branche descendante de l'hydrogramme en ordonnées logarithmiques, l'échelle des temps restant linéaire, on constate souvent une double cassure. Cette circonstance semble traduire l'existence d'un écoulement intermédiaire entre le ruissellement pur et le débit de base dû à la vidange des nappes. L'origine de cette phase intermédiaire n'est pas très nette ; on a voulu l'interpréter comme un écoulement "hypodermique" dont la réalité physique nous laisse sceptique. Nous pensons qu'il est préférable d'y voir une sorte de "ruissellement retardé".

Dans la pratique, la cause réelle de l'écoulement intermédiaire n'a que peu d'importance ; ce qui en a davantage, c'est d'une part la difficulté qu'on éprouve parfois à en définir les limites, d'autre part la variabilité de ces limites, surtout celle de la limite inférieure, quand on passe d'une crue à l'autre sur un même bassin (on suppose dans tout cet exposé que les hydrogrammes étudiés correspondent à des averses suffisamment homogènes et "unitaires"). En outre, on peut se demander si le ruissellement retardé doit être inclus ou non dans l'hydrogramme de ruissellement.

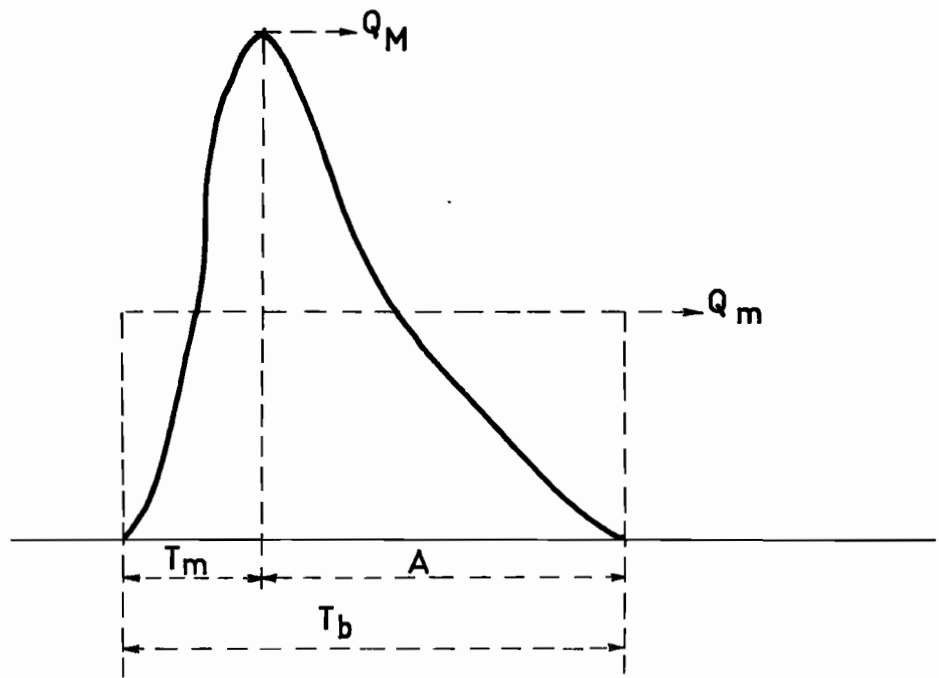


Fig:1

Or, pour les paramètres destinés à être mis en régression avec les facteurs géomorphologiques, on a intérêt à s'affranchir des définitions qui peuvent prêter à confusion et à obtenir une détermination la moins fluctuante possible : en un mot, ces paramètres doivent être "consistants".

Au cours des très nombreuses analyses d'hydrogramme effectuées au Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M., on s'est aperçu que deux éléments de la courbe de décrue sont assez bien définis en diagramme semi-logarithmique : la décrue franche qui suit le maximum, pour laquelle la qualité de ruissellement pur ne fait aucun doute, et la courbe, généralement droite, du débit de base. On a été ainsi amené à une définition plus consistante de la fin du ruissellement en adoptant le point d'intersection de ces deux courbes.

La ligne de séparation entre le ruissellement un peu conventionnel ainsi défini et le reste de l'écoulement est obtenue en joignant simplement par une droite le début du ruissellement au point défini ci-dessus.

Le début de l'hydrogramme de ruissellement est quelquefois assez net, mais souvent perturbé par des effets parasites provenant du ruissellement immédiat à l'aval du bassin. De plus, le démarrage de la crue est parfois brutal, parfois un peu plus progressif. Ces circonstances, peu gênantes pour l'établissement de l'hydrogramme-type d'un bassin, risquent de rendre très indécise la notion d'hydrogramme standard. C'est pourquoi nous proposons, là encore, de simplifier en prenant pour point de départ l'intersection du prolongement de la courbe de montée nette avec le prolongement de la courbe du débit de base antérieur à la crue.

La figure 2 montre, en trait plein, un hydrogramme naturel enregistré sur le bassin du DOUNI à ZIEVASSO, Côte d'Ivoire (5,25 km<sup>2</sup>). Les temps sont indiqués en prenant comme origine l'instant du maximum. Le début de l'hydrogramme de ruissellement, défini comme il a été dit plus haut, est représenté par le point a.

Le report en diagramme semi-logarithmique (figure 3) de la courbe de décrue illustre parfaitement le gain de précision obtenu, en appliquant la méthode préconisée, sur la position de la fin du ruissellement, représentée sur la figure 3 par le point b. Les courbes obtenues, ainsi que le point b sont reportés sur la figure 2 où l'hydrogramme de ruissellement est représenté par la courbe aMb. On n'aurait pas eu d'écart important sur le volume ruisselé en adoptant la méthode classique ; par contre, le temps de base retenu serait très différent, surtout si l'on avait décidé d'inclure l'hypodermique dans le ruissellement.

L'hydrogramme de ruissellement est reporté sur la figure 4. On a, les temps étant exprimés en heures et fractions d'heures :

$$\begin{aligned} T_m &= 2,6 \text{ h,} \\ T_b &= 13,1 \text{ h,} \\ A &= 10,5 \text{ h,} \\ Q_M &= 1,96 \text{ m}^3/\text{s,} \\ V_R &= 25\,320 \text{ m}^3, \\ \text{d'où } Q_m &= \frac{V_R}{T_b} = 0,537 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{et } \alpha &= \frac{Q_M}{Q_m} = 3,65. \end{aligned}$$

Les figure 5, 6 et 7 montrent les mêmes opérations pour le bassin de KOUMBAKA I au MALI (71 km<sup>2</sup>). On obtient :

$$\begin{aligned} T_m &= 1,3 \text{ h.} \\ T_b &= 6 \text{ h.} \\ A &= 4,7 \text{ h.} \\ Q_M &= 29,2 \text{ m}^3/\text{s.} \\ V_R &= 327\,600 \text{ m}^3. \\ Q_m &= 14,8 \text{ m}^3/\text{s.} \\ \alpha &= 1,97. \end{aligned}$$

Ces deux bassins donnent pour  $\alpha$  des valeurs voisines des valeurs extrêmes.

Les figures 8 à 13 donnent d'autres exemples de décomposition de crue pour :

- le bassin du PALLEWOL en Guinée (2,75 km<sup>2</sup>) ;
- l'Oued ALI en Mauritanie (11,3 km<sup>2</sup>) ;
- la LHOTO à MOUMOUJJI au Dahomey (45 km<sup>2</sup>).



DOUNI à ZIÉVASSO (COTE D'IVOIRE)

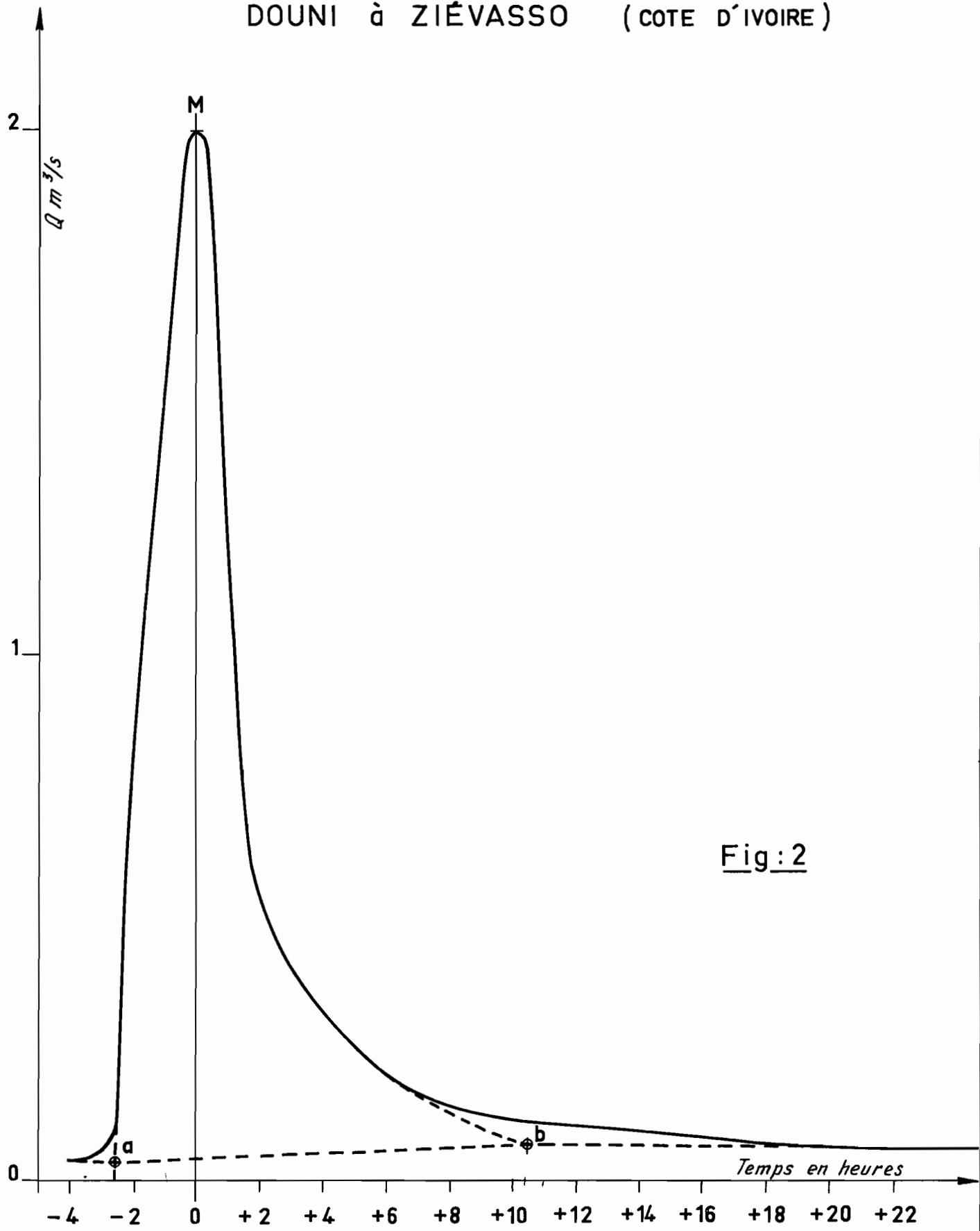
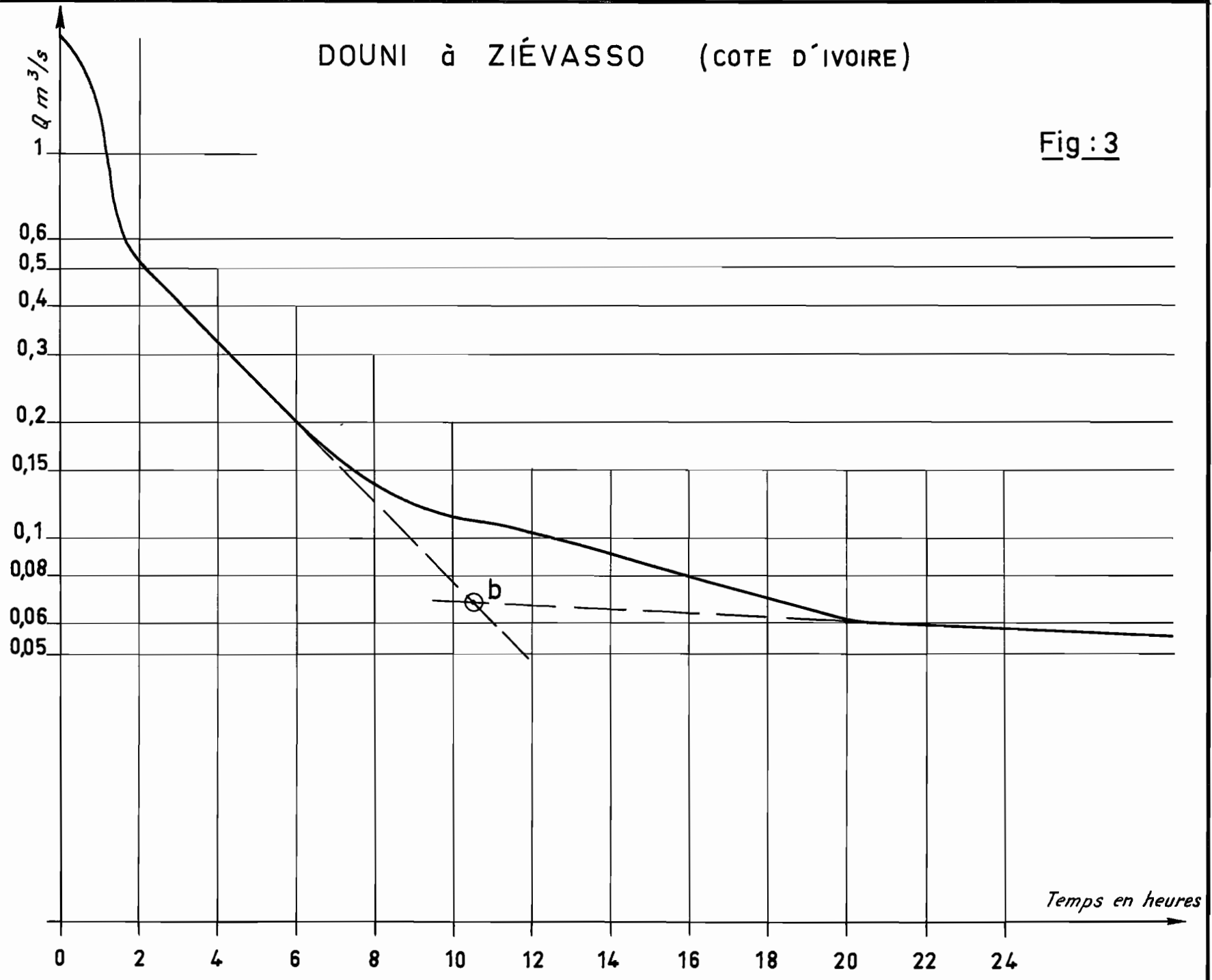


Fig:2

DOUNI à ZIÉVASSO (COTE D'IVOIRE)

Fig : 3



DOUNI à ZIÉVASSO (COTE D'IVOIRE)

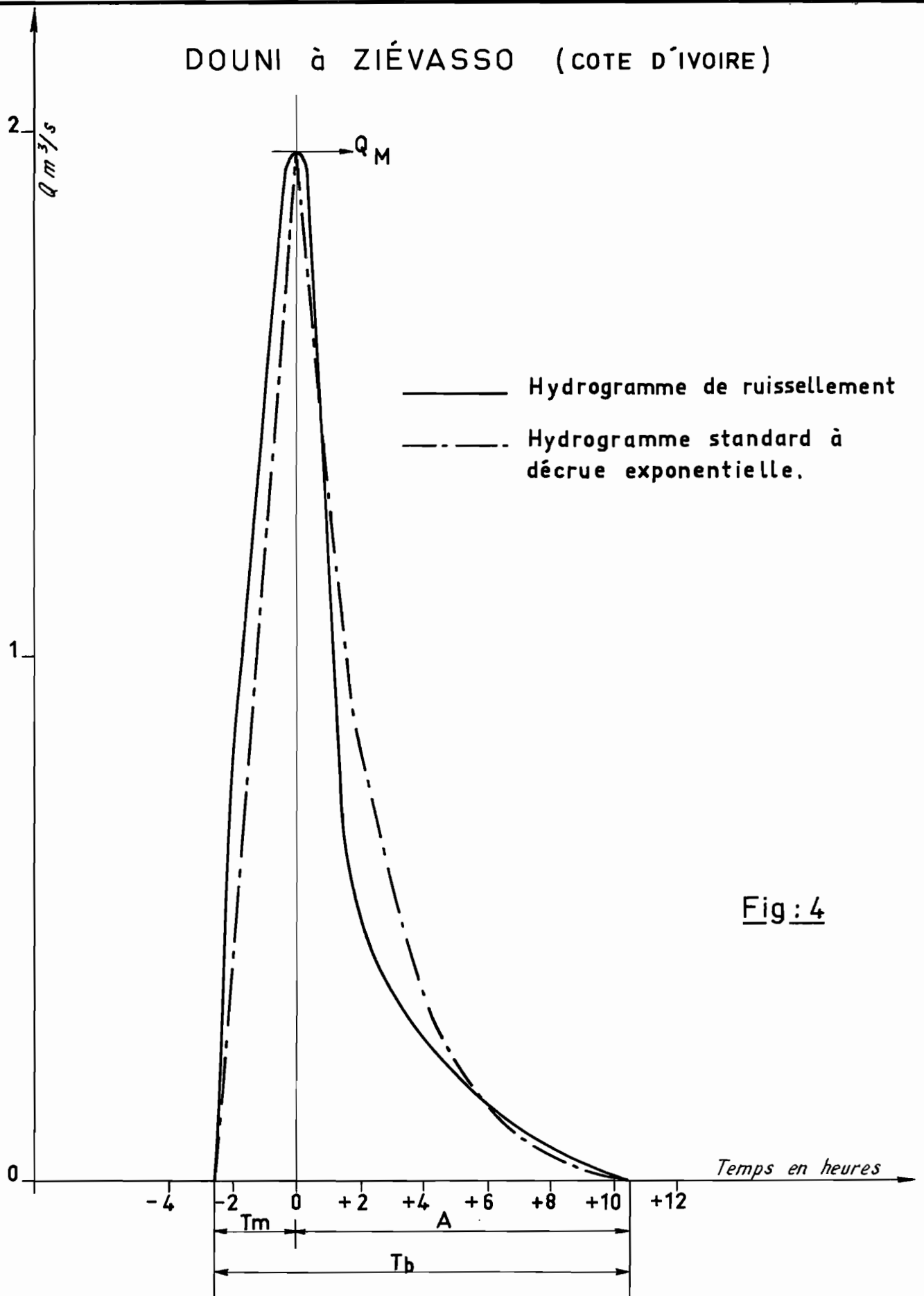


Fig : 4

KOUMBAKA I (MALI)

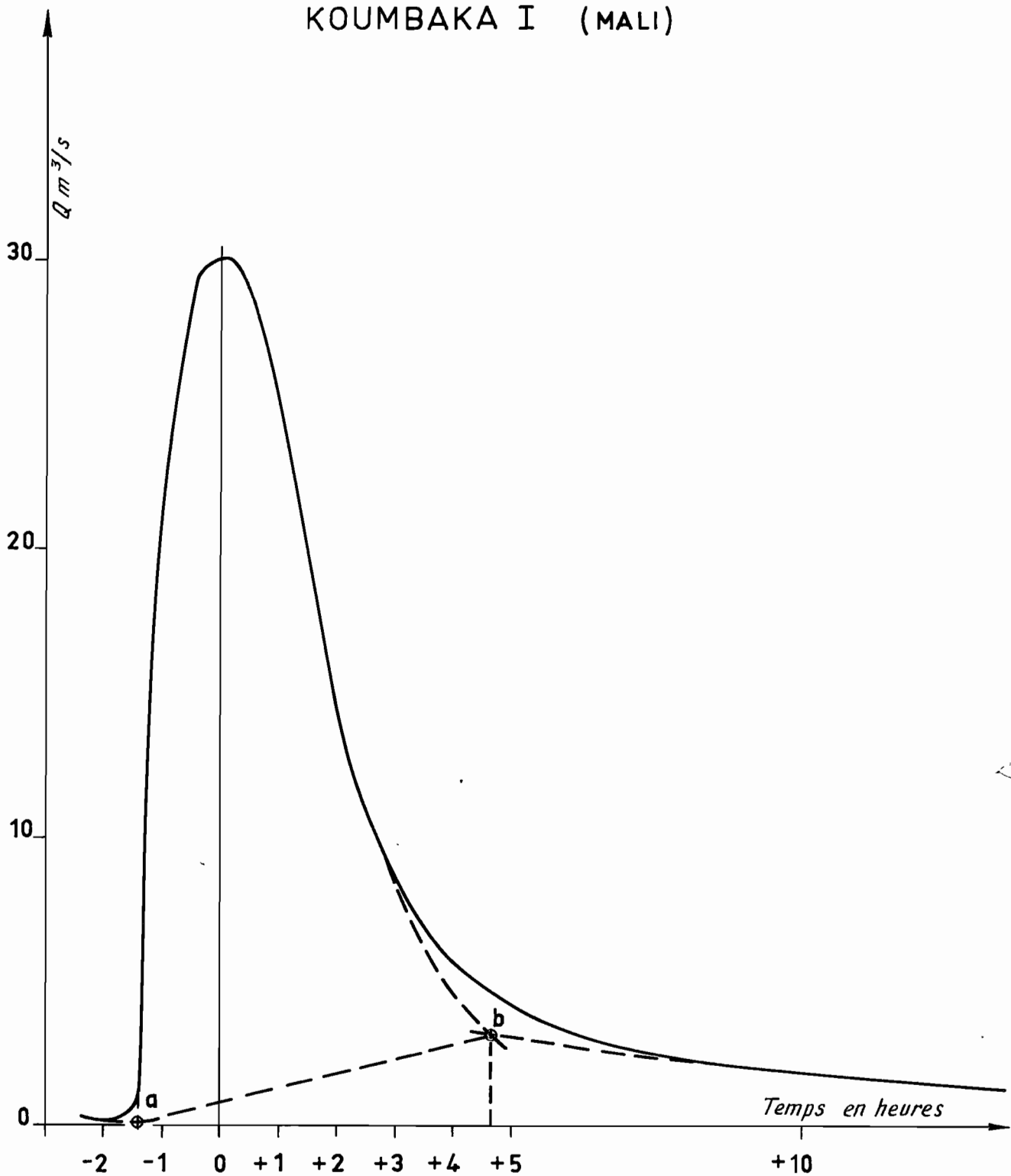
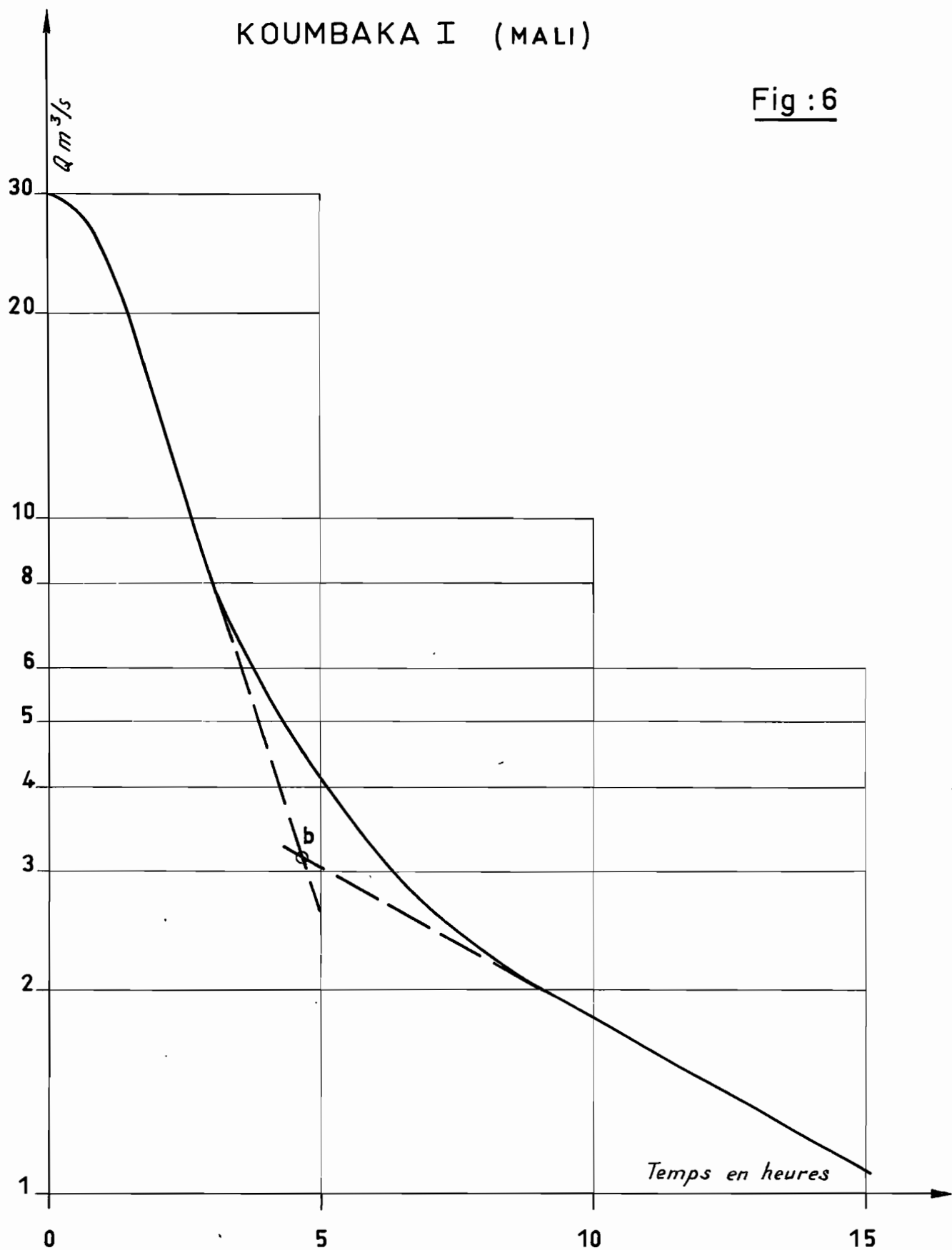


Fig : 5

# KOUMBAKA I (MALI)

Fig : 6



# KOUMBAKA I (MALI)

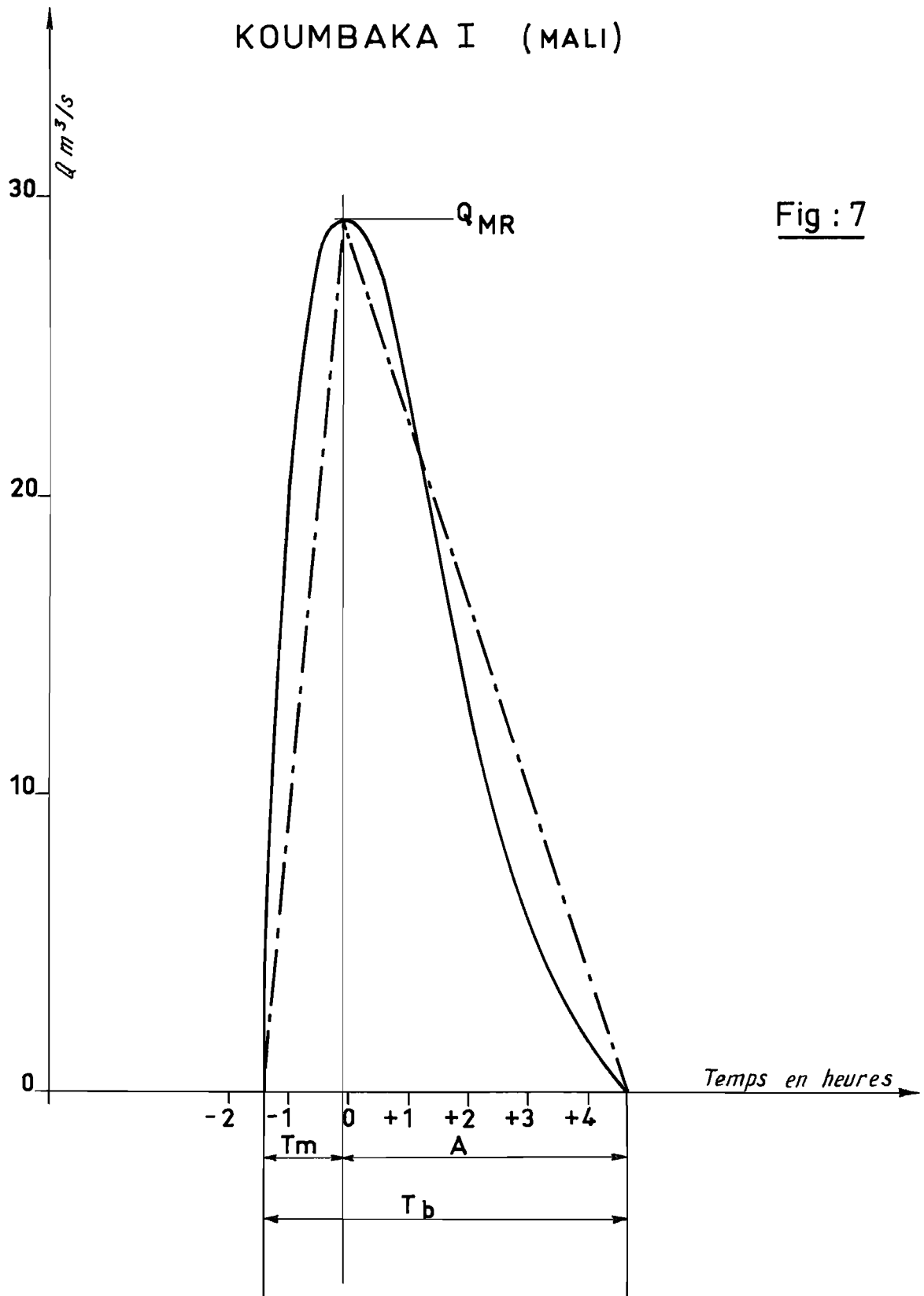


Fig : 7

PALLÉWOL (2,75 km<sup>2</sup>) - (GUINÉE)

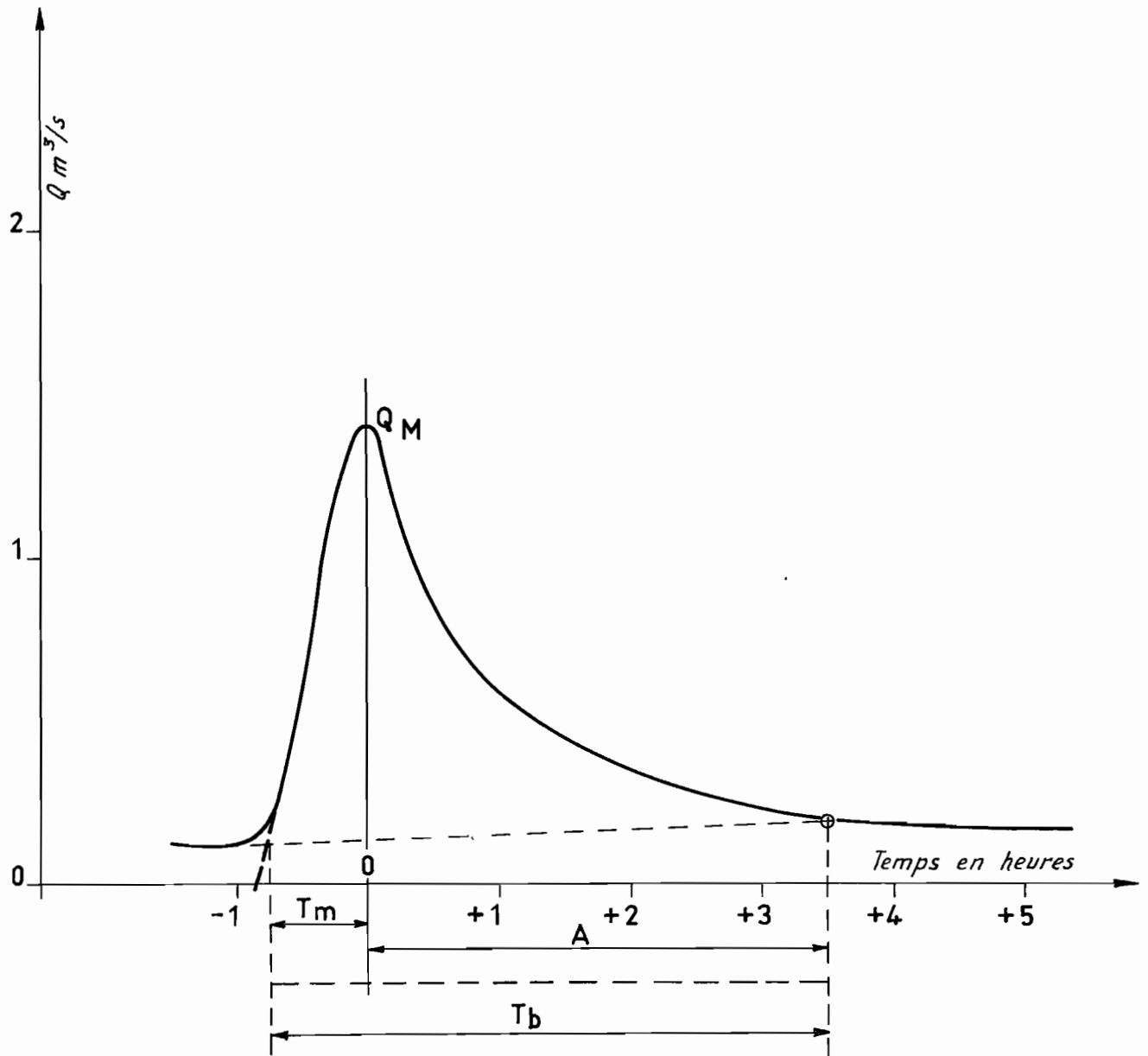


Fig : 8

# PALLÉWOL ( 2,75 km<sup>2</sup> ) - (GUINÉE)

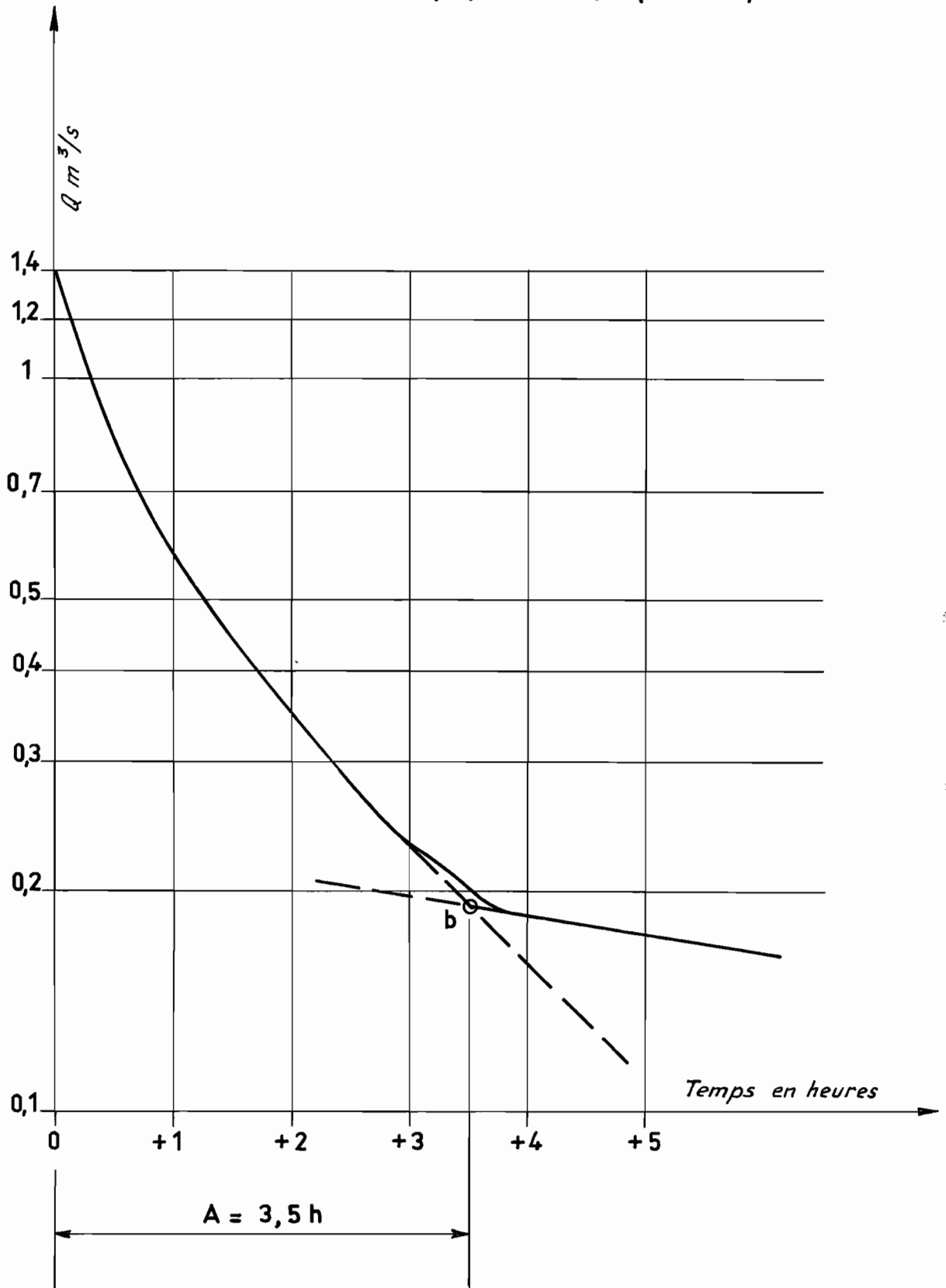


Fig:9



OUED ALI (MAURITANIE)

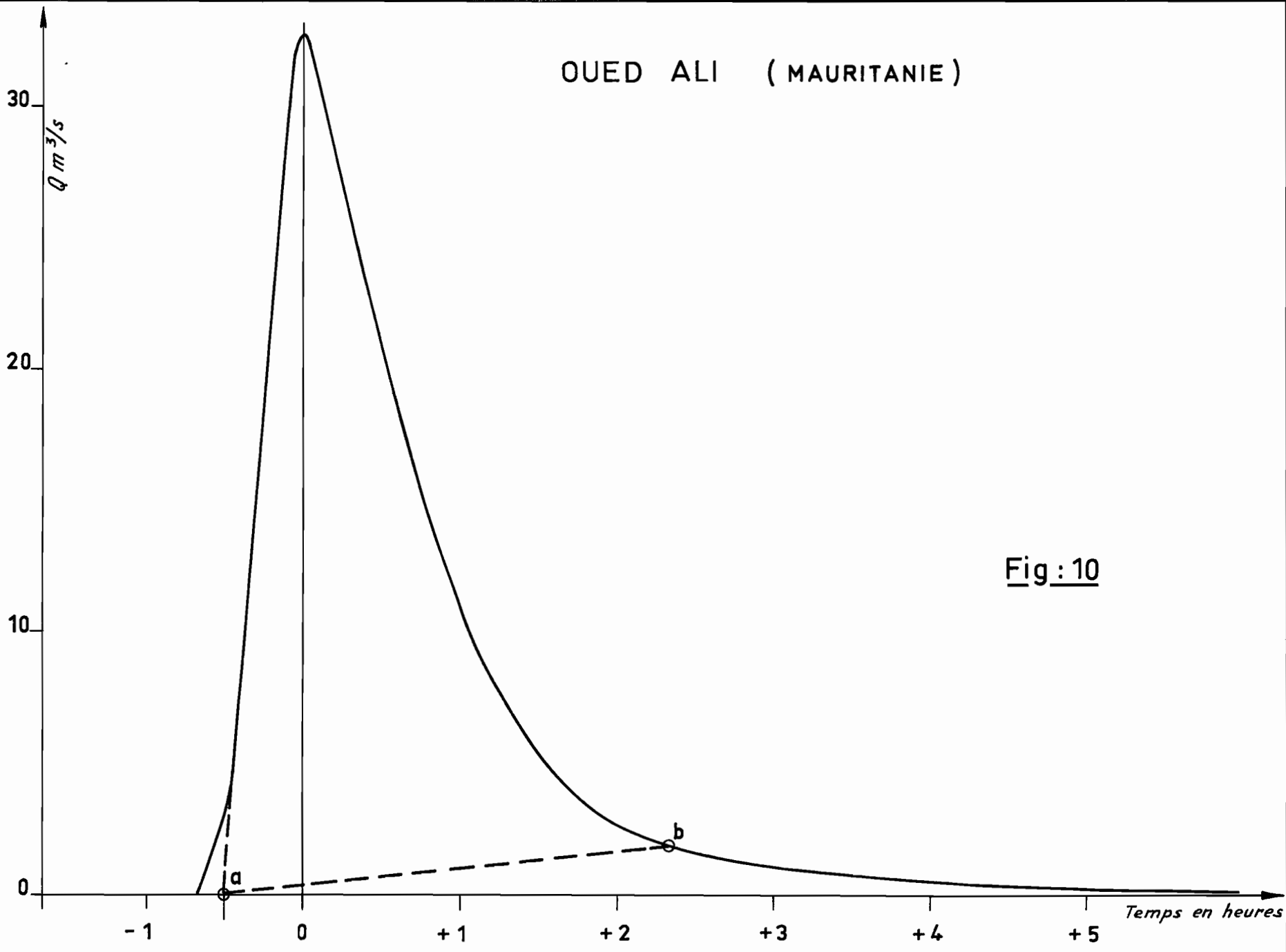


Fig : 10

OUED ALI (MAURITANIE)

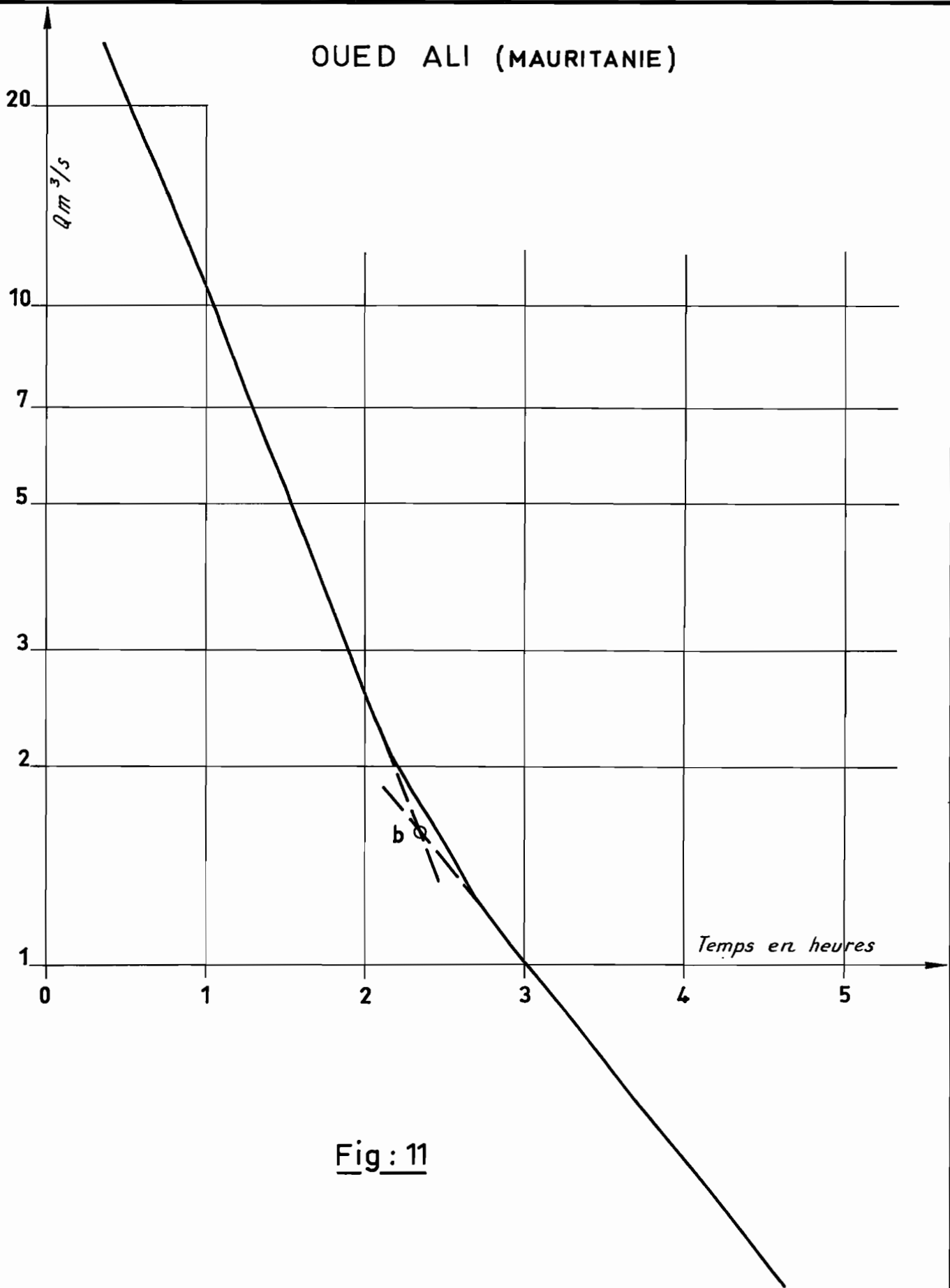


Fig : 11

LHOTO à MOUMOU DJI (DAHOMÉY)

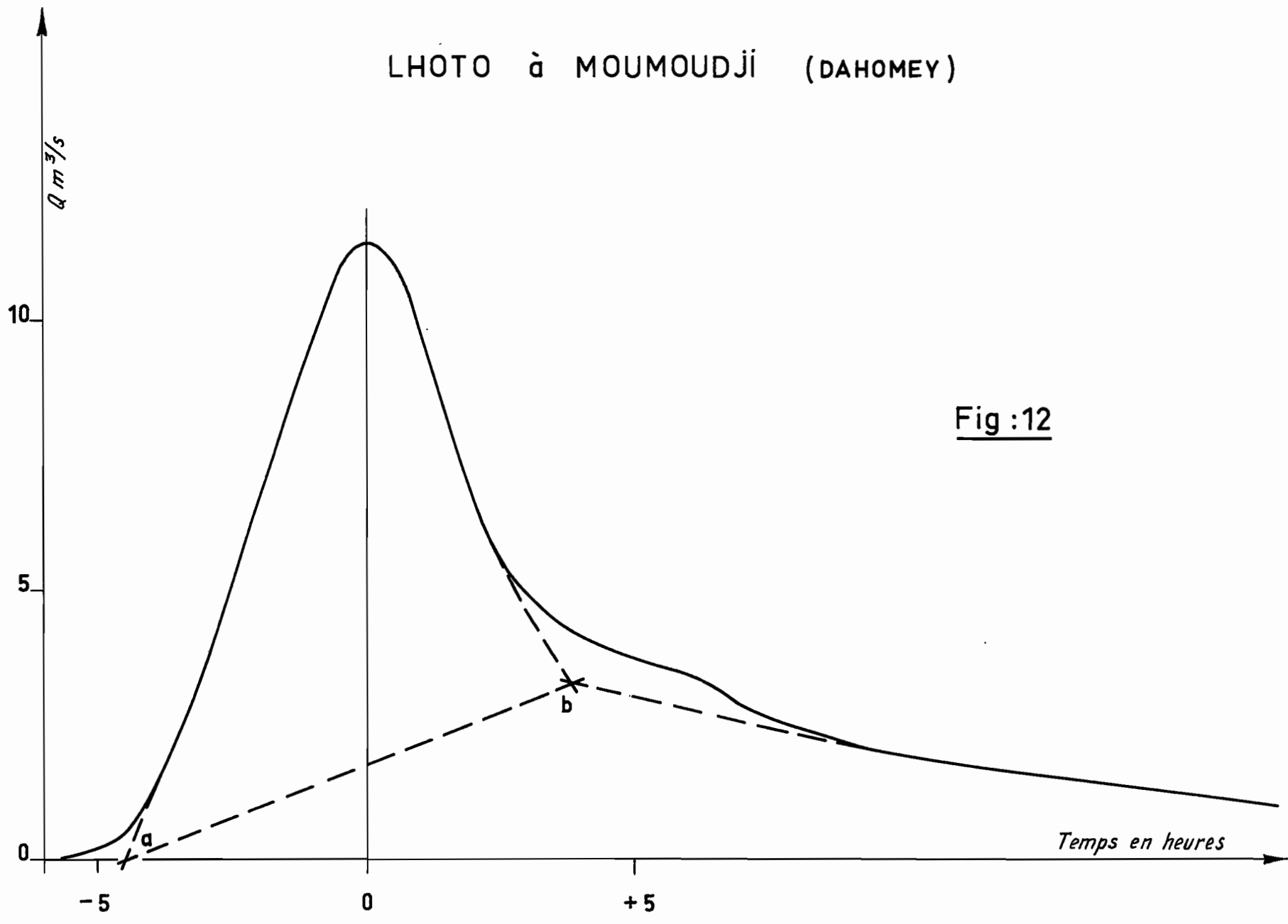


Fig :12

# LHOTO à MOUMOUDJÏ (DAHOMÉY)

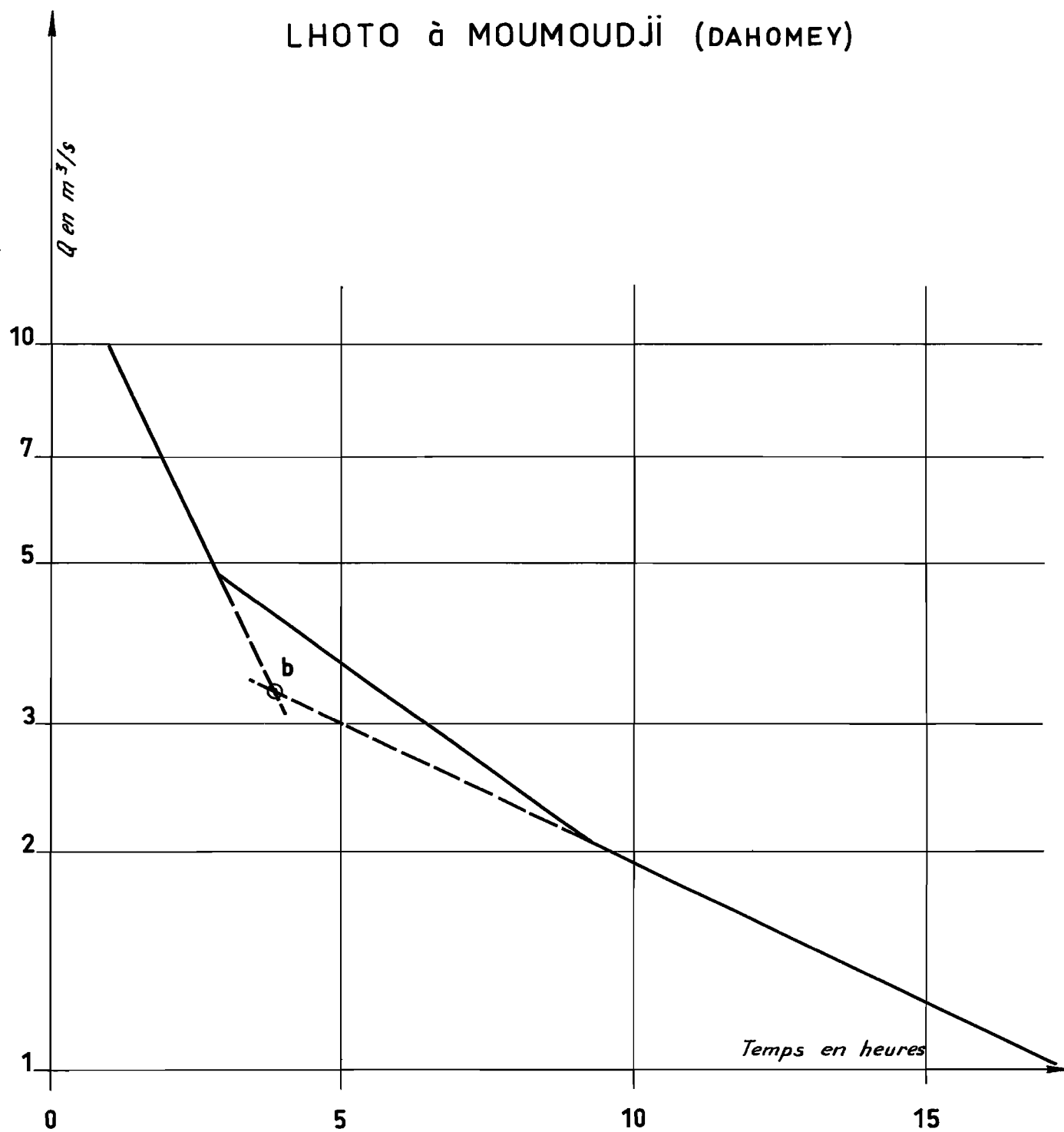


Fig : 13

Ces bassins sont situés dans des régions très différentes, tant du point de vue climatique que du point de vue morphologique. La séparation conventionnelle des écoulements n'y pose aucun problème.

On ne bénéficie pas toujours d'une si agréable simplicité. Pour la NIESBODE à KOCHNERE, Haute-Volta (21,5 km<sup>2</sup>), les figures 14 et 15 montrent une montée parasite avant la crue proprement dite, et une bien curieuse courbe de décrue ; cependant, la cassure de la figure 15 est nette. Il n'en est pas de même pour la crue du NION à la station II, Côte d'Ivoire (10,2 km<sup>2</sup>) ; la figure 17 montre qu'on peut hésiter pour délimiter la fin de l'écoulement ; on remarquera que le débit de base est particulièrement bien fourni.

Si la séparation des écoulements s'effectue crue par crue, l'estimation des paramètres de forme foit, par contre, être tirée de l'hydrogramme-type du bassin, défini au premier paragraphe de cette note.

### 3 - L'HYDROGRAMME STANDARD

Les paramètres de forme  $T_m$ ,  $T_b$  et  $\alpha$  ne nous renseignent pas complètement sur la forme de l'hydrogramme. Il nous permettent de situer, par rapport au début conventionnel du ruissellement, la position du maximum dans le temps et la valeur de ce maximum si on se donne le volume de ruissellement, enfin la position de la fin conventionnelle du ruissellement. Pour parachever notre hydrogramme standard, il faut indiquer la forme de la courbe de montée d'une part et celle de la courbe de décrue d'autre part. Il faut de plus que ces formes ne dépendent que des trois paramètres fondamentaux.

Il est bien évident que l'on ne pourra jamais trouver des formes aussi générales s'adaptant parfaitement à chaque cas particulier ; il s'agirait alors non plus d'un hydrogramme standard, mais d'un hydrogramme universel qui, malheureusement, n'existe pas. Dans ces conditions, il est inutile de chercher des choses compliquées. Pour la montée, on admettra une croissance linéaire du débit et pour la décrue, on adoptera une forme décroissante  $q(t)$ . Parmi les fonctions décroissantes les plus en usage, nous examinerons successivement la fonction exponentielle et la fonction hyperbolique.

# NIESBODÉ à KOGHNÉRE (HAUTE-VOLTA)

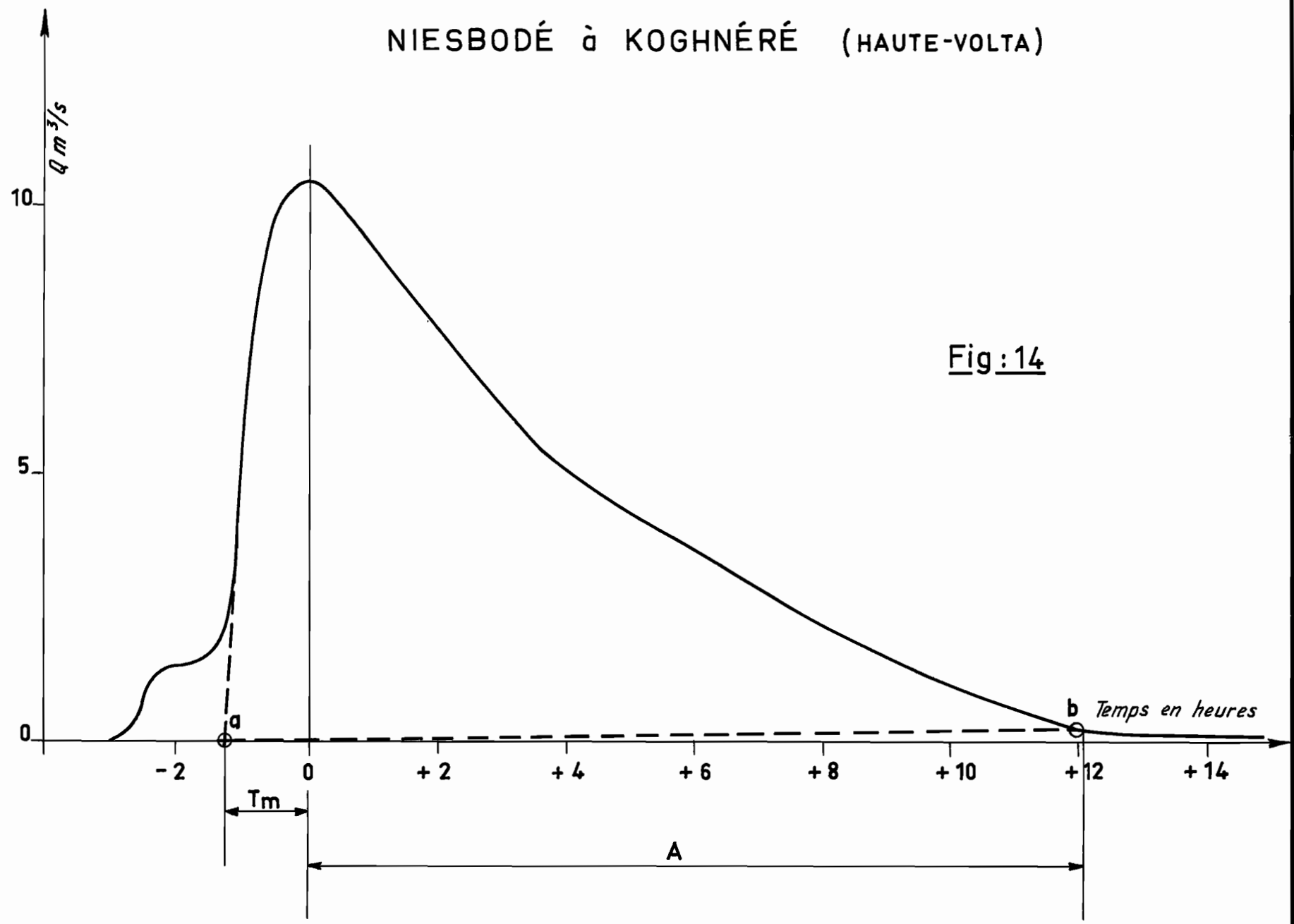


Fig : 14

# NIESBODÉ à KOGHNÉRE (HAUTE-VOLTA)

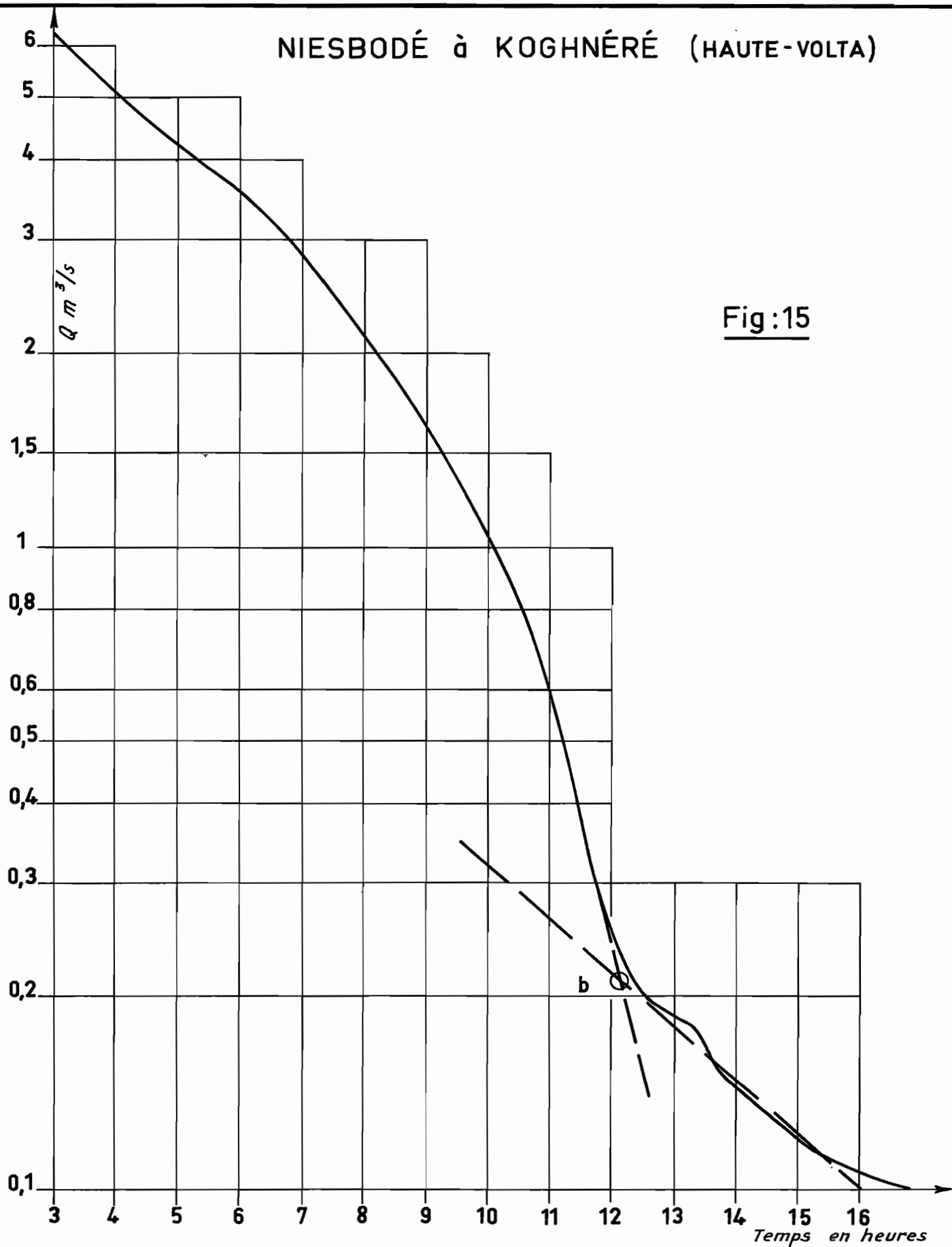


Fig:15

NION - Station n°II - (COTE D'IVOIRE)

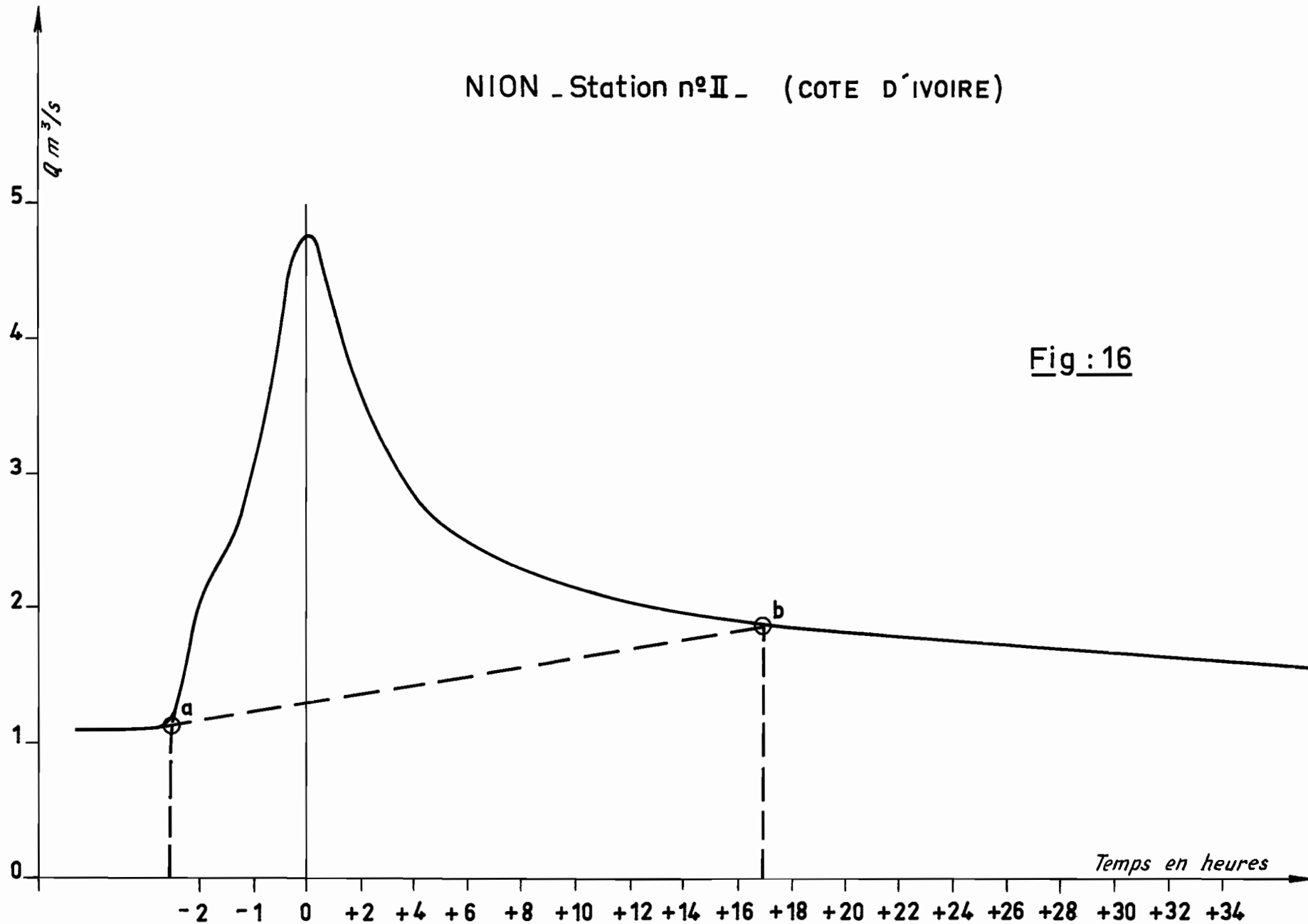


Fig : 16



NION - Station II - (COTE D'IVOIRE)

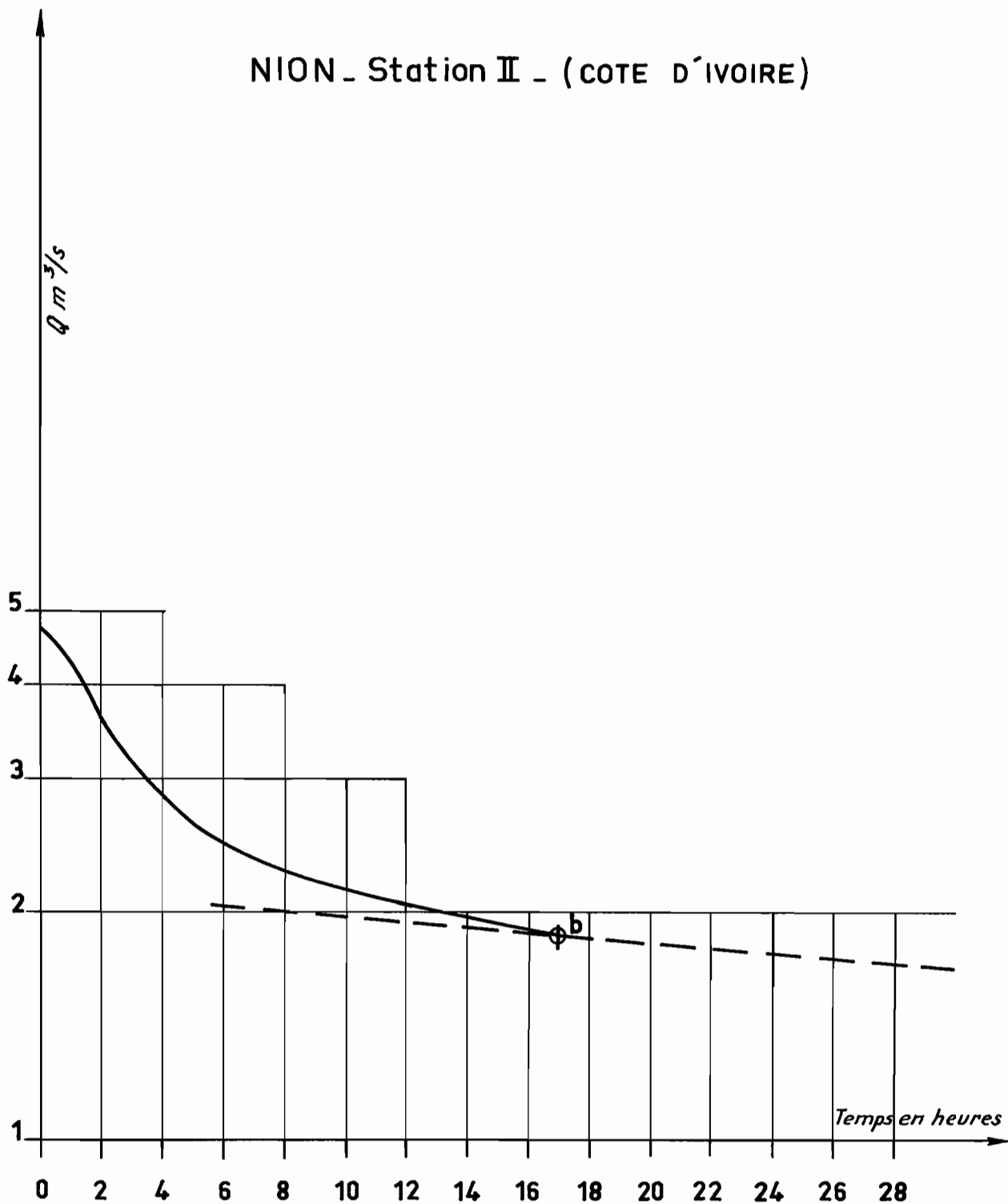


Fig : 17

### 3.1. - Hydrogramme standard à décroissance exponentielle

Sur la figure 18, on a tracé un hydrogramme standard et on a porté tous les éléments déjà définis précédemment. Pour la courbe de décroissance, l'instant du maximum est pris comme origine des temps.

On suppose que le débit  $q(t)$  à l'instant  $t$  décroît de façon exponentielle. Comme la courbe de décroissance doit atteindre le point  $b$ , c'est-à-dire recouper la courbe  $q = 0$ , et que l'exponentielle est asymptote à sa ligne d'abscisses, c'est donc que la ligne d'abscisses à prendre en compte est située à quelque  $Q_1$  en dessous de la droite  $q = 0$ . L'équation  $q(t)$  aura donc la forme :

$$(A) \quad q + Q_1 = (Q_M + Q_1) e^{-kt}$$

de plus,  $q$  doit être égal à  $Q_M$  pour  $t = 0$  et à  $0$  pour  $t = A$ . La première condition est réalisée par la forme même donnée à la relation. La seconde entraîne :

$$Q_1 = (Q_M + Q_1) e^{-kA}$$

d'où

$$Q_1 = \frac{Q_M}{e^{kA} - 1} \quad \text{avec } \frac{1}{e^{-kA}} = e^{kA}$$

et

$$q = Q_M \left[ \left( 1 + \frac{1}{e^{kA} - 1} \right) e^{-kt} - \frac{1}{e^{kA} - 1} \right]$$

Le volume total de l'hydrogramme doit être égal au volume ruisselé  $V = Q_m T_b$ , d'où la condition :

$$V = Q_m T_b = \frac{1}{2} T_m Q_M + \int_0^A q \, dt$$

Or, l'intégrale est égale à :

$$Q_M \left[ \frac{1}{k} - \frac{A}{e^{kA} - 1} \right]$$

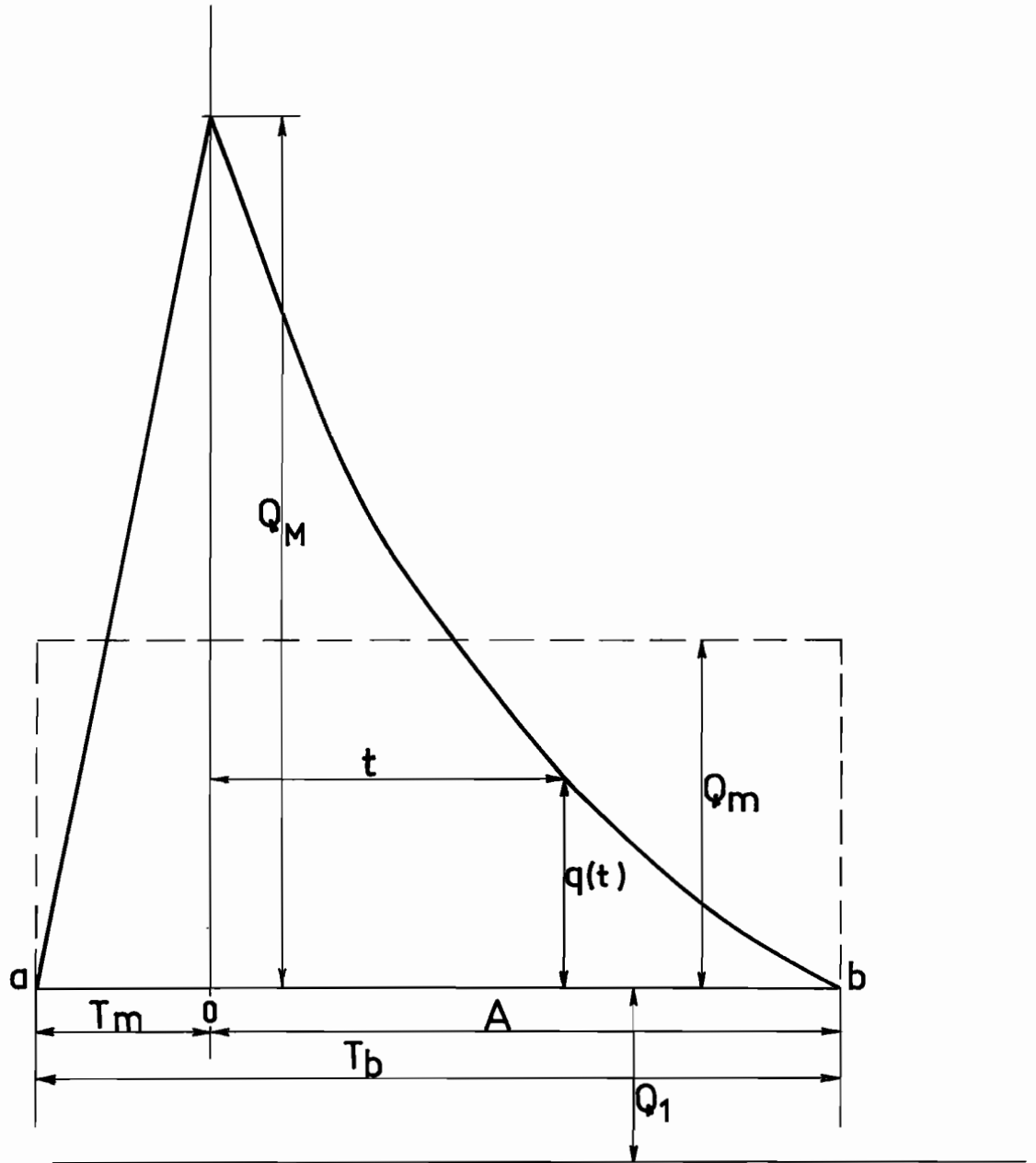


Fig : 18

D'autre part : 
$$\frac{Q_M}{Q_m} = \alpha$$

d'où la relation permettant de calculer  $k$  :

$$\frac{1}{k} = \frac{A}{e^{kA} - 1} + \frac{T_b}{\alpha} - \frac{T_m}{2}$$

en posant : 
$$\frac{T_b}{\alpha} - \frac{T_m}{2} = B,$$

$$x = kA$$
$$\lambda = \frac{B}{A}$$

on obtient : 
$$f(x, \lambda) = \frac{x}{e^x - 1} + \lambda x = 1,$$

équation implicite qui permet de calculer  $x$ , c'est-à-dire  $kA$ , connaissant  $\lambda$ . Or,  $\lambda$  est égal à  $\frac{T_b/\alpha - T_m/2}{T_b - T_m}$ , et ne dépend donc que des paramètres fondamentaux.

L'étude de la fonction  $f(x, \lambda)$  montre que, lorsque  $x$  tend vers zéro,  $f(x, \lambda)$  est équivalente à  $1 + (\lambda - 1/2)x$ , donc que  $\lambda$  tend vers  $\frac{1}{2}$ . Lorsque  $\lambda$  tend vers 0,  $\lambda x$  est équivalent à 1, donc le comportement de  $x(\lambda)$  est hyperbolique et  $x$  tend vers l'infini.

La fonction  $x(\lambda)$  est représentée schématiquement sur la figure 19 ; seule, la partie en trait plein a été calculée. La courbe donne une valeur approximative de  $x$  connaissant  $\lambda$ . Si on désire une meilleure précision, elle permet au moins de circonvenir le champ des approximations successives ; notons que la forme de l'équation ne permet pas un calcul par itération,  $f(x, \lambda)$  étant divergente de part et d'autre de l'unité.

Il sera bon de vérifier que la valeur obtenue pour  $x$  permet de retrouver le volume ruisselé avec une approximation suffisante. On

VARIATION de  $\alpha(\lambda)$  DÉFINI PAR :

$$\frac{\alpha}{e^{\alpha}-1} + \lambda \alpha = 1$$

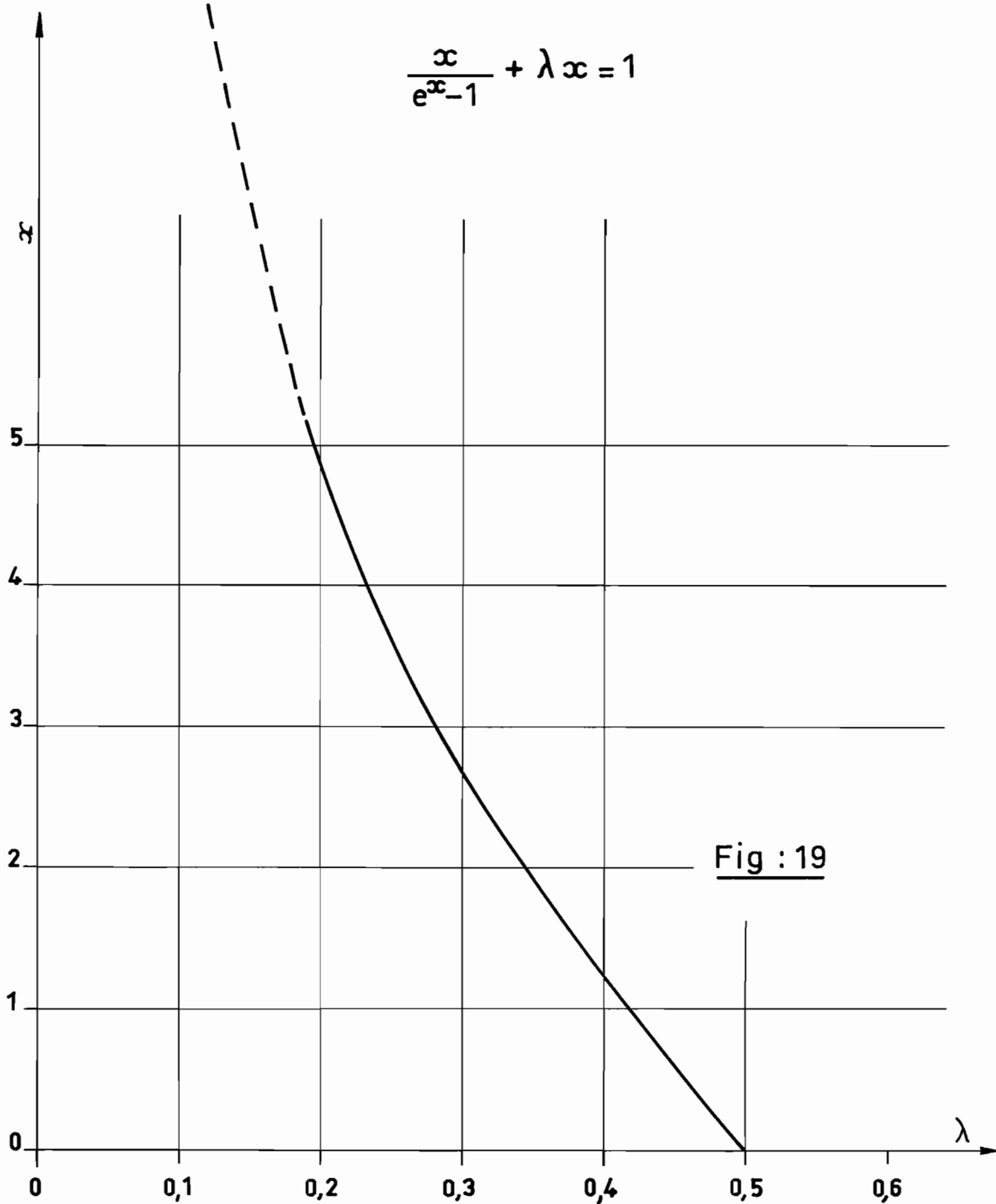


Fig : 19

On utilisera pour cela l'expression :

$$V = Q_M \left[ \frac{T_m}{2} + \frac{A}{x} - \frac{A}{e^x - 1} \right]$$

Rappelons que l'équation de la courbe de décrue est donnée par :

$$q = Q_M \left[ (1 + m) e^{-kt} - m \right]$$

en posant :

$$m = \frac{1}{e^x - 1}$$

ou, si l'on ne veut conserver que des variables sans dimension dans le multiplicateur de  $Q_M$  :

$$q = Q_M \left[ (1 + m) e^{-xu} - m \right]$$

avec  $u = \frac{t}{A}$ , ce qui revient à compter le temps, durant la décrue, en fractions de  $A$ . Bien entendu,  $u$  varie de 0 à 1.

### 3.2. - Hydrogramme standard à décrue hyperbolique

La courbe de décrue est tracée sur la figure 20. On désigne par  $t_0$  la distance de l'ordonnée de l'hyperbole équilatère au temps zéro correspondant au maximum, et par  $Q_1$  la distance de son abscisse à la droite  $q = 0$ .

L'équation générale peut s'écrire :

$$q + Q_1 = \frac{c}{t + t_0} .$$

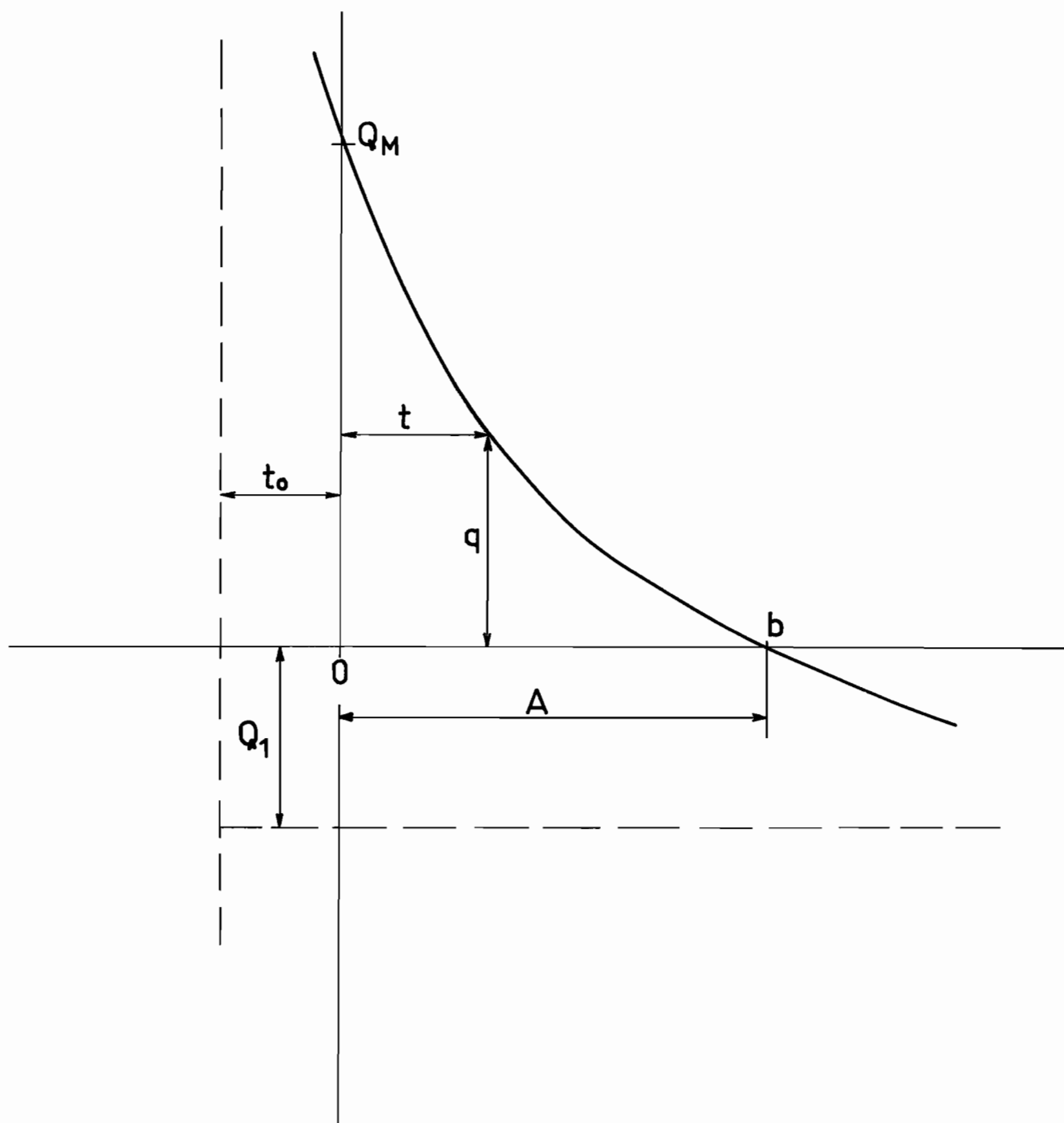


Fig: 20

D'où, avec les conditions  $q = Q_M$  pour  $t = 0$  et  $q = 0$  pour  $t = A$  :

$$Q_M + Q_1 = \frac{c}{t_0}$$

et 
$$Q_1 = \frac{c}{A + t_0}$$

d'où l'on tire : 
$$Q_1 = \frac{t_0}{A} Q_M$$

$$c = (A + t_0) \frac{t_0}{A} Q_M$$

En remplaçant  $Q_1$  et  $c$  par leur valeur dans l'équation générale et en posant :

$$\frac{t_0}{A} = x \quad \text{et} \quad \frac{t}{A} = u,$$

on obtient : 
$$q = Q_M x \left( \frac{1+x}{u+x} - 1 \right).$$

Le volume ruisselé a pour expression :

$$V = Q_m T_b = \frac{1}{2} Q_M T_m + A Q_M \int_0^1 x \left( \frac{1+x}{u+x} - 1 \right) du$$

L'intégrale a pour valeur :

$$x \left[ (1+x) \cdot L \left( 1 + \frac{1}{x} \right) - 1 \right]$$

En posant, comme en 3.1.-,

$$\frac{T_b}{x} - \frac{T_m}{2} = B$$

et 
$$\frac{B}{A} = \lambda,$$

on obtient finalement :

$$f(\lambda, x) = x \left[ e^{\frac{\lambda+x}{x(1+x)}} - 1 \right] = 1,$$



équation implicite donnant  $x$  en fonction de  $\lambda$ . Pour étudier le comportement de cette fonction, il est plus facile de la mettre sous la forme :

$$\lambda = x \left[ (x + 1) \operatorname{Log} \left( 1 + \frac{1}{x} \right) - 1 \right].$$

Lorsque  $x \rightarrow \infty$ ,  $\frac{1}{x} \rightarrow 0$  et on peut développer  $\operatorname{Log} \left( 1 + \frac{1}{x} \right)$ . On voit ainsi que  $\lambda$  est équivalent à  $\frac{1}{2} - \frac{1}{6x}$ , donc tend vers  $\frac{1}{2}$  lorsque  $x \rightarrow \infty$ .

Quand  $x \rightarrow 0$ ,  $x + 1$  est équivalent à 1 et  $\operatorname{Log} \left( 1 + \frac{1}{x} \right)$  à  $-\operatorname{Log} x$ . On peut poser  $x = 1 - y$  avec  $y \rightarrow 1$ , et développer  $\operatorname{Log}(1 - y)$ . On trouve alors que  $\lambda$  est équivalent à :

$$(1 - y) \left( y + \frac{y^2}{2} + \frac{y^3}{3} + \frac{y^4}{4} + \dots - 1 \right)$$

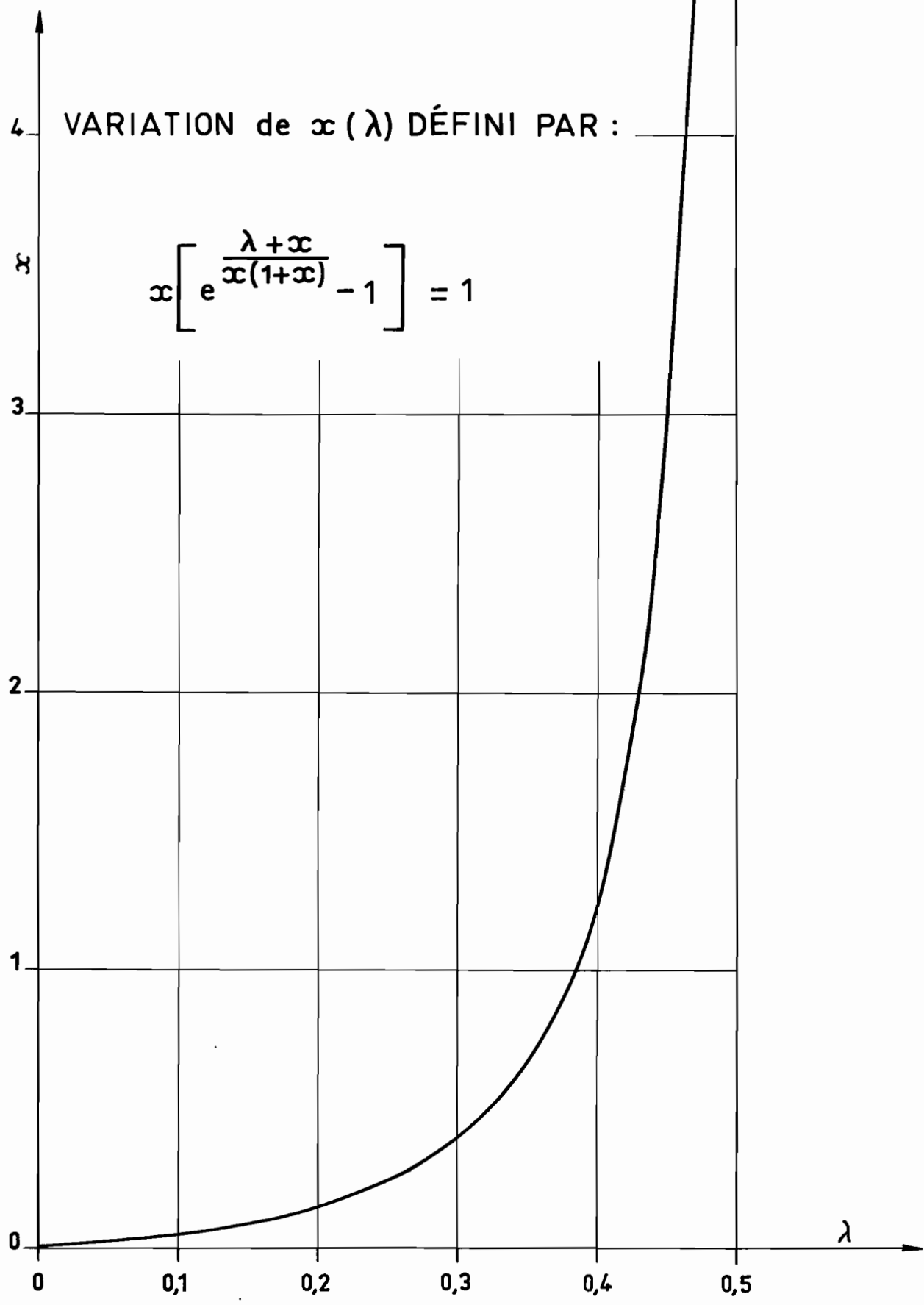
$$\text{soit : } y + \frac{y^2}{2} + \frac{y^3}{3} + \frac{y^4}{4} + \dots - y^2 - \frac{y^3}{2} - \frac{y^4}{3} \dots - 1 + y.$$

Il est facile de vérifier que, lorsque  $y$  tend vers 1,  $\lambda$  tend vers  $1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)}$ . Le second terme est la série de Leibnitz qui est égale à 1. Donc  $\lambda \rightarrow 0$ .

Une courbe sommaire de la fonction  $x(\lambda)$  est tracée sur la figure 21.

En pratique, la décroissance exponentielle ne diffère pas énormément de la décroissance hyperbolique. C'est tantôt l'une et tantôt l'autre qui s'adaptera le mieux à tel type d'hydrogramme. Comme, lors d'une synthèse, on ne peut pas savoir à quel type on a affaire, il vaudra mieux choisir une fois pour toutes un modèle de décrue pour caractériser l'hydrogramme standard. Personnellement, nous pencherions vers la forme exponentielle pour laquelle la valeur de  $x/d\lambda$  est moins variable, ce qui se traduit par une sensibilité plus constante et par conséquent une plus grande facilité pour le calcul numérique.

Fig : 21



#### 4 - QUELQUES EXEMPLES

Normalement, au cours de l'opération d'analyse, l'évaluation des paramètres fondamentaux,  $T_b$ ,  $T_m$  et  $\alpha$ , doit être faite sur l'hydrogramme-type. Cependant, le processus du calcul est le même si on opère sur un hydrogramme particulier correspondant à une averse unitaire.

On a vu au paragraphe 2 que, pour une crue particulière observée à ZIEVASSO, les paramètres de l'hydrogramme de ruissellement **étaient** les suivants :

$$\begin{aligned} T_m &= 2,6 && \text{h} \\ T_b &= 13,1 && \text{h} \\ \alpha &= 3,65 && (Q_M = 1,96 \text{ m}^3/\text{s}, Q_m = 0,537 \text{ m}^3/\text{s}). \end{aligned}$$

On calcule :

$$\begin{aligned} A &= T_b - T_m = 10,5 && \text{h.} \\ B &= \frac{T_b}{\alpha} - \frac{T_m}{2} = 2,289. \\ \lambda &= \frac{B}{A} = 0,218. \end{aligned}$$

L'équation  $x(\lambda)$  est donc, dans l'hypothèse exponentielle :

$$\frac{x}{e^x - 1} + 0,218 x = 1.$$

Pour  $\lambda = 0,218$ , la courbe de la figure 19 donne  $x = 4,3$  environ. Un calcul plus précis conduit à  $x = 4,320$ . On en déduit l'équation de la courbe de décrue :

$$q = 1,9864 (e^{-4,320 u} - 0,0133).$$

Rappelons que  $u$  est la variable de temps réduite  $\frac{t}{A}$ . Cette équation permet de tracer la courbe de décrue de l'hydrogramme standard ; on sait que par définition la courbe de crue est linéaire. L'hydrogramme

standard correspondant à la crue particulière étudiée est tracé sur la figure 4. Pour une autre crue particulière observée sur le bassin de KOUMBAKA I, on avait trouvé :

$$\begin{aligned} T_m &= 1,3 && \text{h.} \\ T_b &= 6 && \text{h.} \\ \alpha &= 1,97 && (Q_M = 29,2 \text{ m}^3/\text{s}, Q_m = 14,8 \text{ m}^3/\text{s}). \end{aligned}$$

Or, pour  $\alpha = 2$ , qui correspond à  $\lambda = 0,5$ , la courbe de décrue dégénère en droite aussi bien dans l'hypothèse exponentielle que dans l'hypothèse hyperbolique : l'hydrogramme standard est un triangle. Pour  $\alpha < 2$ , ou  $\lambda > 0,5$ , les équations en  $(x, \lambda)$  n'admettent plus de solution. On pourrait chercher une autre forme de courbe de décrue qui aurait cette fois sa concavité tournée vers le bas. En fait, c'est inutile, car  $\alpha$  descend très rarement de façon notable au-dessous de 2 ; lorsque sa valeur est égale ou légèrement inférieure à 2, il est parfaitement licite d'admettre une forme triangulaire. Dans la pratique, cela revient à exagérer très légèrement la valeur du maximum au cours de l'opération de synthèse.

On se fixera donc comme règle que l'hydrogramme standard est un triangle pour  $\alpha \leq 2$ , et l'obtention de  $Q_M$  se fera en multipliant effectivement par 2 le débit moyen tiré de la connaissance du volume ruisselé et du temps de base.

La figure 22 montre un hydrogramme-type établi pour le bassin du DODOU à WENOU, Dahomey (33,4 km<sup>2</sup>). Le volume de référence est de 100 000 m<sup>3</sup>. Les caractéristiques de l'hydrogramme sont :

$$\begin{aligned} Q_M &= 2,17 && \text{m}^3/\text{s} \\ T_b &= 27 && \text{h} \\ T_m &= 11 && \text{h} \\ Q_m &= 1,0288 && \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

d'où  $\alpha = 2,1092$

On en déduit :

$$\begin{aligned} A &= 16 && \text{h} \\ B &= 7,3009 && \text{h} \\ \lambda &= 0,4563. \end{aligned}$$

et

DODOU à WENOU (DAHOMÉY)

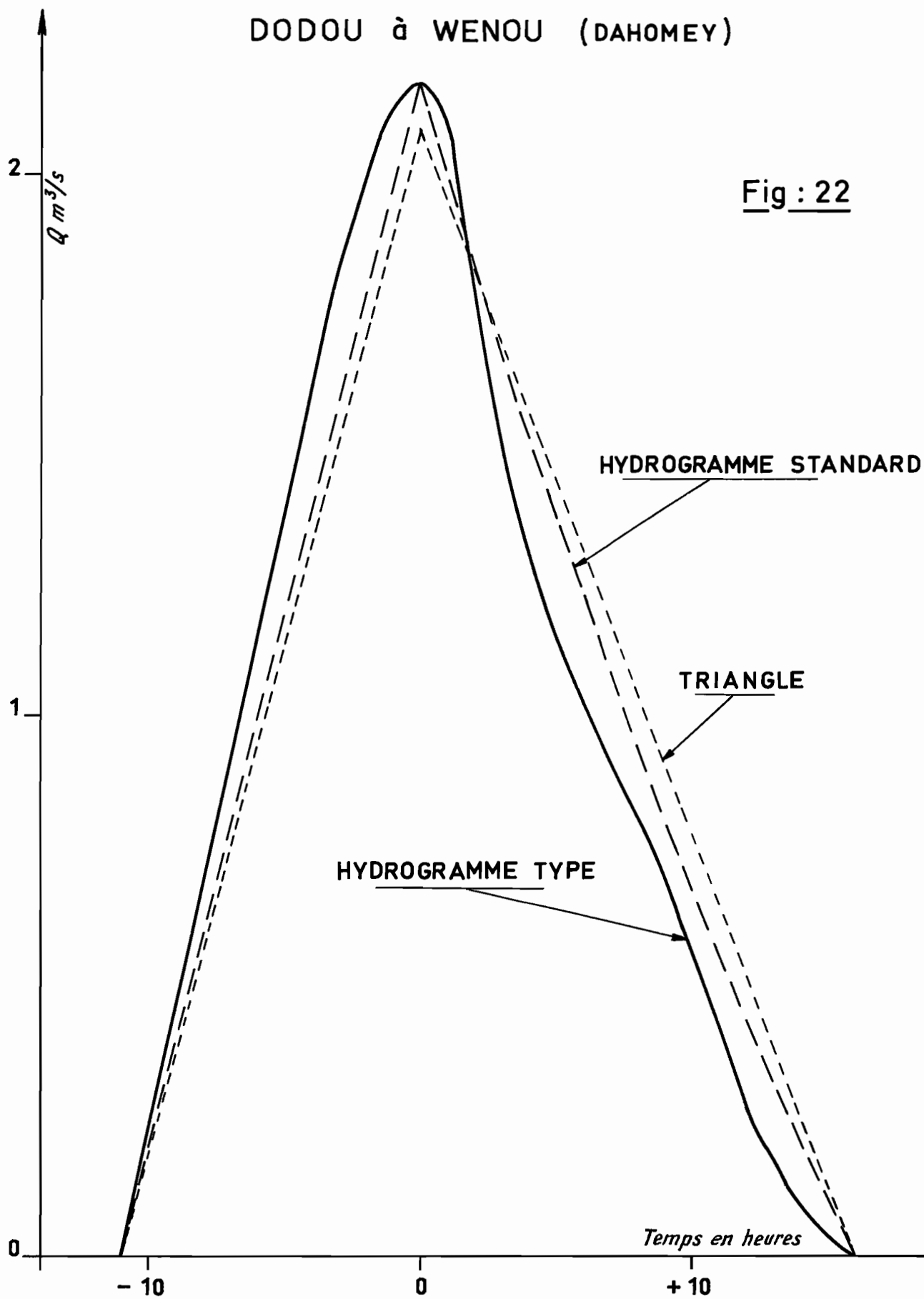


Fig : 22

Pour cette valeur de  $\lambda$ , la courbe donne  $x = 0,52$ . Un calcul plus précis conduit à  $x = 0,527$ .

Le tracé de l'hydrogramme standard sur la figure 22 montre que l'on est très près du triangle.

Sur la figure 23, on a tracé les courbes de décrue de l'hydrogramme standard du bassin de ZAGTOULI en Haute-Volta (11 km<sup>2</sup>), dans les deux hypothèses exponentielle et hyperbolique ( $\alpha = 2,356$ ,  $\lambda = 0,4028$ ). On voit que les deux courbes sont presque confondues. La différence entre les deux méthodes devient plus sensible lorsque  $\lambda$  diminue. Nous avons fait l'essai sur un hydrogramme imaginaire qui aurait pour caractéristiques :

$$\begin{aligned} T_b &= 30 \text{ h} \\ T_m &= 6 \text{ h} \\ \alpha &= 4 \quad (\text{on supposera } Q_M = 1 \text{ m}^3/\text{s}), \end{aligned}$$

d'où

$$\begin{aligned} A &= 24 \text{ h} \\ B &= 4,5 \text{ h} \\ \lambda &= 0,1875. \end{aligned}$$

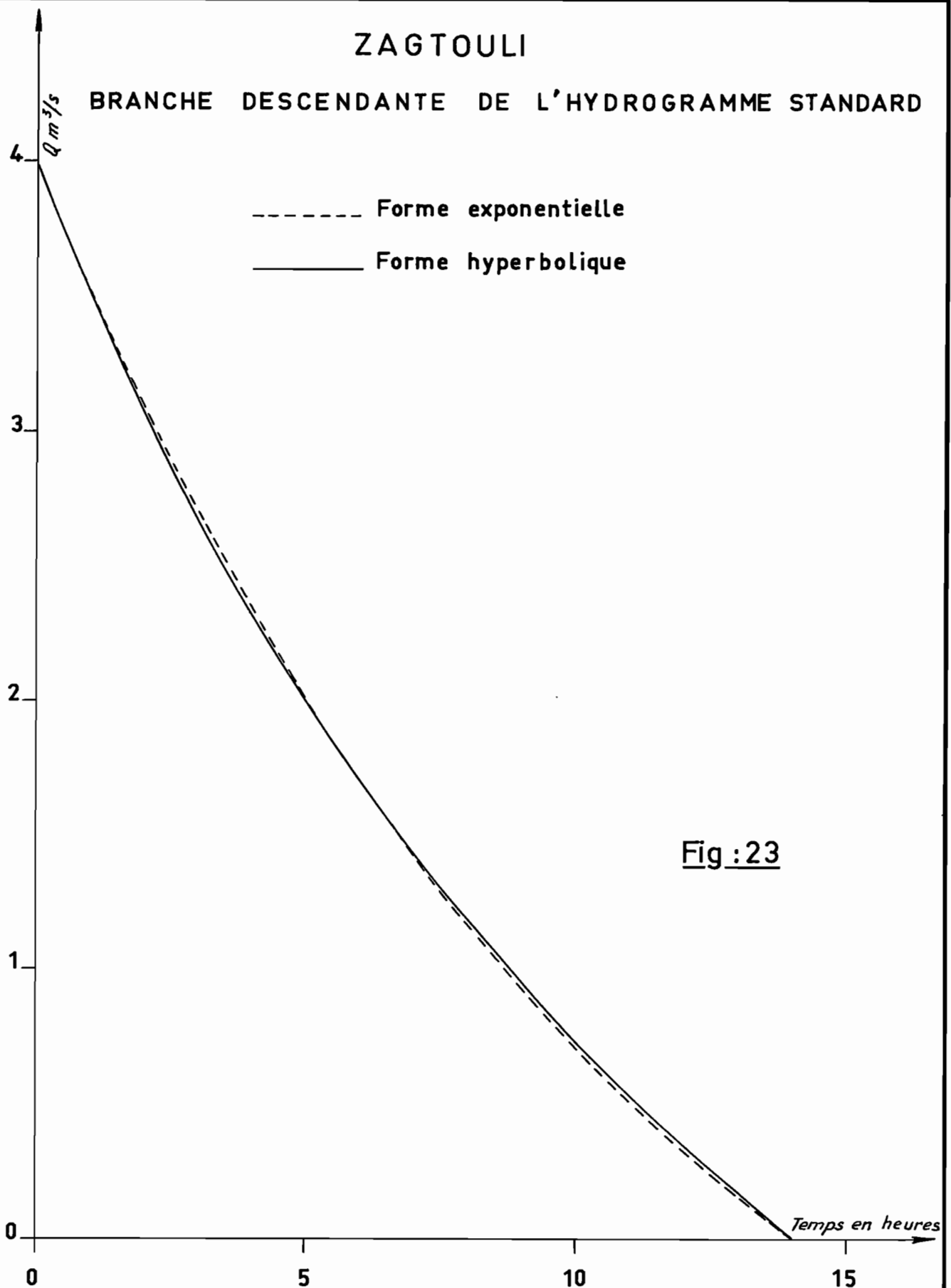
On trouve alors  $x = 5,177$  dans l'hypothèse exponentielle et  $x = 0,1297$  dans l'hypothèse hyperbolique. Les courbes correspondantes sont tracées sur la figure 24.

#### - CONCLUSION

Dans l'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire, il faut soigneusement distinguer les deux phases analyse et synthèse. Lors de l'analyse, l'opérateur a entre les mains tous les éléments constitutifs de l'averse et de la crue afférente. Il peut se permettre un grand raffinement dans la dissection des résultats ; rappelons-nous les méthodes extrêmement raffinées employées il y a seulement quelques années, méthodes dans lesquelles l'averse était littéralement taillée en pièce, chaque morceau devant être affecté avec précision à telle portion de l'écoulement. Cette sorte de rhétorique de l'hydrogramme unitaire, à laquelle nous avons tous contribué, n'a pas été inutile, bien au contraire. **L'exercice de style**

# ZAGTOULI

BRANCHE DESCENDANTE DE L'HYDROGRAMME STANDARD



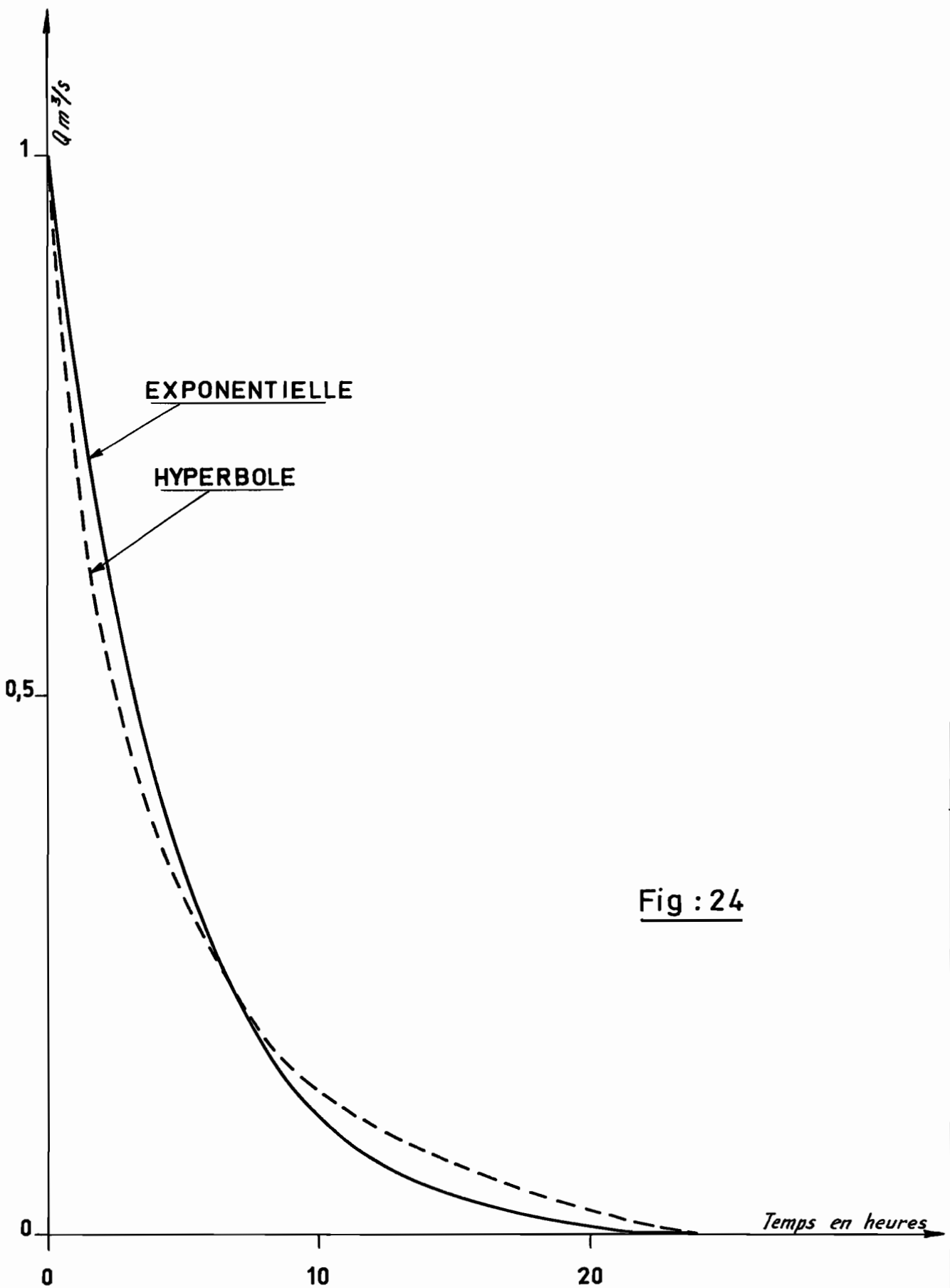


Fig : 24



était indispensable pour apprendre à connaître dans le menu détail les possibilités et les points faibles de l'opérateur.

Peu à peu, on est revenu à une conception plus simple et maintenant classique, de l'analyse de l'hydrogramme : séparation des écoulements par figuration semi-logarithmique, avec ou sans introduction d'écoulement hypodermique suivant qu'on observe double ou simple cassure. La limite entre les différents écoulements est généralement supposée linéaire, quoique certains opérateurs maintiennent un tracé un peu plus compliqué.

L'averse elle-même n'est plus disséquée avec une minutie qui, il faut bien le dire, n'avait pas grande signification, ni physique, ni même paramétrique. A l'O.R.S.T.O.M., les recherches de ces dernières années ont surtout porté sur la variation du coefficient global de ruissellement avec les paramètres : état d'humectation du terrain au début de l'averse et hauteur de l'averse, avec introduction éventuelle de facteurs secondaires tels que la durée du corps. Ces recherches sont loin d'être terminées, mais des résultats fort intéressants sont déjà acquis et ont été publiés dans différents rapports.

Lors de la synthèse, c'est-à-dire de la reconstitution de la crue afférente à une averse donnée, deux cas peuvent se présenter : ou bien l'hydrogramme-type évalué pour un bassin est appliqué à ce même bassin en vue de l'obtention d'un hydrogramme de fréquence donnée, ou bien on désire évaluer une crue sur un bassin non étudié du point de vue hydrologique.

Dans le premier cas, il est bien évident que l'élément "forme" le meilleur possible de l'opérateur de transformation sera l'hydrogramme-type lui-même. Dans le second cas, l'élément "forme" doit être reconstitué d'après la connaissance que l'on a de la géomorphologie du bassin. Mais, pour que la détermination de cet hydrogramme standard, défini par les trois paramètres indépendants  $T_b$ ,  $\alpha$  et  $T_m$ , soit possible, il faut que l'estimation de ces paramètres, lors de l'opération d'analyse, ait été faite de façon consistante, c'est-à-dire avec la plus faible variabilité possible. Il faut également que leur définition pratique, c'est-à-dire leur règle d'établissement, soit telle que les valeurs trouvées soient réellement en relation avec les paramètres géomorphologiques.

On est ainsi amené, dans l'optique de l'hydrogramme standard, à revenir sur l'analyse classique des crues et à définir une nouvelle méthodologie visant à obtenir des estimations plus "consistantes" des paramètres. C'est l'objet du second paragraphe de la présente note.

Il n'est pas question, dans l'avenir, de supprimer l'analyse classique ni de ne pas continuer les recherches concernant l'écoulement intermédiaire. Simplement, il est inutile de donner les caractéristiques des hydrogrammes de ruissellement ainsi obtenus puisqu'aussi bien ces hydrogrammes se suffisent à eux-mêmes et ne peuvent pas être mieux définis que par la courbe qui les représente.

Par contre, on devra parallèlement et obligatoirement effectuer l'analyse standard qui permettra de déterminer les paramètres fondamentaux de l'hydrogramme standard, seuls utilisables pour l'extension géographique des résultats.

Reste le problème de l'estimation du volume ruisselé à faire intervenir pour le calcul du coefficient de ruissellement ou de la lame d'eau écoulée. En général, le volume de l'hydrogramme de ruissellement obtenu par l'analyse classique sera très voisin de celui de l'hydrogramme de ruissellement obtenu par l'analyse standard, la différence portant essentiellement sur l'estimation du temps de base. De toute manière, il devrait être possible de trouver un rapport moyen entre les deux volumes, de sorte que les régressions établies pour le coefficient de ruissellement ou la lame d'eau ruisselée à partir des résultats de l'analyse classique seront valables à un facteur près (en général voisin de 1) pour les valeurs correspondant à l'hydrogramme standard.