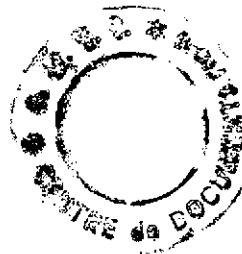
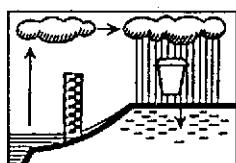


11459



ANALYSE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES DE CRUES

- Applications :
- Prévision
 - Transformation hauteur/débits
 - Simulation des crues
 - Reconstitution de données de base



J.-P. LAMAGAT

SOMMAIRE

I - AVANT-PROPOS	1
1. ECOULEMENTS PERMANENTS ET VARIES	2
1.1. Définitions	
1.2. Relation H/Q et vitesse de propagation	3
1.3. Vitesse de propagation d'une crue	4
1.4. Evaluation des temps de propagation	5
1.4.1. Approche méthodologique	5
1.4.2. Méthodologie pratique	6
1.4.3. Limites opérationnelles	6
2. APPLICATION AU BIEF KOULIKORO - KEMACINA SUR LE NIGER	
2.1. Données de base - Tableaux d'analyse	8
2.2. Bornes de continuité des fonctions temps et hauteurs	8
2.3. Utilisation du modèle	14
3. ETALONNAGE DES STATIONS NON BI-UNIVOQUES	
3.1. Méthodologie pratique	15
3.2. Etalonnage de la station de BAKEL sur le Fleuve SENEGAL	16
3.2.1. Période 1973 - 1974	16
3.2.2. Période 1951 - 1962	25
3.3. Traitement automatique des hauteurs	25
3.4. Prévisions des hauteurs et des débits	29
4. CONCLUSIONS	31
II-ANNEXES	
Programmes d'applications	

AVANT - PROPOS

L'utilisation de la micro-informatique dans le domaine de l'analyse hydrologique ouvre bien des horizons aux Chercheurs. La puissance de calcul et surtout la souplesse du système conversationnel permettent des investigations qui n'étaient pas pensables il y a seulement quelques années.

L'analyse des temps de propagation des ondes de crues est l'exemple type de l'opération qui comporte une impressionnante quantité de calculs absolument infaisables avec les possibilités antérieures, soit par manque de puissance, soit par manque de souplesse.

Dans ce qui suit est exposé une méthodologie analytique appliquée à la modélisation des cours d'eau naturels. Telle qu'elle est présentée la méthode est opérationnelle et donne des résultats très corrects dans les exemples produits en fin de rapport.

Actuellement elle a aussi ses limites mais les études en cours permettent de penser qu'il existe une possibilité d'amélioration des résultats dans le domaine de la de l'amortissement des crues.

L'introduction comme deuxième paramètre de la fonction de variation dans le temps du gradient limnimétrique doit permettre de résoudre les problèmes qui subsistent encore.

Dans une prochaine note seront présentés les résultats de cette extension de l'analyse de la vitesse de propagation des crues.

DAKAR, Septembre 1985

1. ECOULEMENTS PERMANENTS ET VARIES

1.1. Rappel des définitions

Ecoulement uniforme:

- Un écoulement est dit uniforme lorsqu'il se produit dans un canal uniforme (forme et dimension des sections, pente, invariables tout le long de son parcours), et que la profondeur d'eau y est constante pour toute abscisse x . La surface de l'eau est un plan parallèle au radier du canal. La vitesse moyenne de l'eau est constante tout le long du canal (U). La ligne de charge (H) est une droite parallèle à la surface libre et au radier. La pente J de cette ligne de charge, comptée positivement pour une charge décroissante, est égale à la pente i du radier :

$$J = - dH/dx = i = - dh/dx \quad (1)$$

L'écoulement est uniforme lorsque la perte de charge unitaire (perte par frottement), est égale à la pente du radier.

Gradient limnimétrique :

Dans ce qui suit est fait appel à la notion de variation de hauteur par unité de temps. Nous poserons :

$$G = dH/dt$$

G est le GRADIENT LIMNIMETRIQUE exprimé en m/s, pour faciliter l'écriture le gradient sera toujours exprimé en cms/jour.

Extension de la notion d'écoulement uniforme :

Pour un cours d'eau naturel où interviennent des paramètres tels que pertes par évaporation et infiltration il est impossible d'appliquer la notion d'écoulement uniforme telle qu'elle est définie dans le premier §. L'extension de la notion d'écoulement uniforme est effectuée en utilisant celle d'écoulement permanent :

Dans un bief donné d'un cours d'eau naturel, l'écoulement est dit permanent lorsque le gradient limnimétrique y est nul en chaque point. Cela n'implique aucunement que l'équation (1) soit vérifiée. Les pertes mentionnées ci-dessus intervenant, la pente de la ligne d'eau ne sera pas parallèle à la pente moyenne du radier du bief.

Nous considérerons que les propriétés des écoulements uniformes sont applicables aux écoulements permanents, en particulier nous étendrons la définition en considérant que les conditions d'écoulement permanent sont réalisées en une section donnée d'un cours d'eau lorsque le gradient limnimétrique y sera nul : $dH/dt = 0$

Vitesse de propagation d'une onde de crue

Soit la station S1 à l'instant t , à gradient nul. La hauteur d'eau est $H1$, l'écoulement est considéré comme permanent sur le bief.

Provoquons en S1 une perturbation infiniment petite $dH1$. Le gradient limnimétrique étant nul, la relation H/Q est bi-univoque et $Q1 = Q(H1)$.

Le temps de propagation de l'onde de crue pour la cote H_1 en S_1 est celui que mettra la petite perturbation pour arriver en S_2 , la vitesse moyenne de propagation pour H_1 sera égale à :

$$U_1(H_1) = L/T(H_1) \quad (2)$$

Nous considérons que la vitesse moyenne de propagation de l'onde de crue en régime non-permanent pour la cote instantanée H_1 est très proche de celle définie ci-dessus. Cette vitesse est une fonction continue de la cote à la station d'entrée.

1.2. Relation Hauteur/Débit et vitesse de propagation

Si dH_1 est l'amplitude de la perturbation provoquée en S_1 , au temps $t+dt$, cette perturbation aura parcouru la distance :

$$dx = U_1(H_1) * dt \quad (3)$$

A gradient nul, la pente de la ligne d'eau en S_1 peut-être considérée comme très proche de la pente moyenne du radier, soit I_0 cette pente.

D'après CHEZY, la vitesse moyenne dans la section S_1 à gradient nul peut-être exprimée par :

$$V_0 = k * I_0^{0,5} \quad (4)$$

A l'instant $t+dt$ cette vitesse est égale à :

$$V = V_0 + dV \quad (5)$$
$$V = k * (I_0 + dI)^{0,5} \quad (6)$$

Nous pouvons écrire :

$$dI = dH_1/dx = dH_1 * ((1/U_1(H_1))/dt) \quad (7)$$

Pour des facilités d'écriture nous poserons :

$U = U_1(H_1)$ et $g = dH_1/dt = \text{gradient limnimétrique instantané}$.

$$dI = g/U \quad (8)$$

Les équations (4) et (6) peuvent s'écrire :

$$V_0^2 = k * I_0^2$$
$$V^2 = k * (I_0 + dI)^2$$

Le rapport de ces deux équations donne :

$$(V/V_0)^2 = 1 + (dI/I_0) \quad (9)$$

Comme :

$$V/V_0 = Q/Q_0 \quad (10)$$

$$(Q/Q_0)^2 = 1 + (dI/I_0) \quad (11)$$

L'équation (8) permet d'écrire :

$$Q/Q_0 = (1 + (g/(I_0 \cdot U)))^{0,5} \quad (12)$$

Le terme $I_0 \cdot U$ est une fonction continue de H_1 , étant lui-même le produit de deux fonctions continues de H_1 . Dans ce qui suit nous utiliserons l'équation (12) sous une forme plus maniable en ne considérant plus le gradient instantané mais la valeur moyenne de ce dernier en 24 heures, exprimée en cms/jour. Soit G cette valeur moyenne :

$$g = 8,64 \cdot 10^{-6} \cdot G = a \cdot G$$

$$K = a/(I_0 \cdot U)^{0,5}$$
$$Q = Q_0 \cdot (1 + K \cdot G)^{-0,5} \quad (12')$$

Et en posant $y = Q/Q_0$, l'équation (12') s'écrit :

$$y^2 - 1 = K \cdot G \quad (13)$$

En une section donnée où une série de mesures de débits instantanés (ou considérés comme tels) a été exécutée, il sera possible d'évaluer le débit en régime permanent pour tout le marnage, connaissant le gradient limnimétrique ou sa représentation (pour un grand fleuve à variations lentes de niveaux : gradient journalier - dans le cas d'un petit cours d'eau le gradient sera calculé avec un pas de temps court, sa représentation pouvant être ramenée au gradient journalier).

1.3. Vitesse de propagation d'une crue

L'hypothèse que nous formulons est la suivante :

- En écoulement non-permanent la vitesse de propagation d'une onde de crue pour la hauteur H_1 à la station S_1 est très proche de celle d'une perturbation infinitéiment petite qui se produirait en régime permanent dans les mêmes conditions.

Si cette hypothèse est vérifiée, à partir d'observations en écoulements non-permanents il est possible de calculer pour un bief limité par deux stations S_1 et S_2 les deux fonctions continues de H_1 :

$$T = T(H_1) \quad \text{et} \quad H_2 = H_2(H_1)$$

Nous formulons une deuxième hypothèse :

- Les fonctions $T(H_1)$ et $H_2(H_1)$ sont supposées continues dans l'intervalle de variation de H_1 qui correspond au marnage de la station S_1 .

Ceci entraîne que les deux fonctions pourront être représentées par des développements en séries dans l'intervalle de variation de H_1 considéré.

Les hypothèses définies ci-dessus n'ont de valeur qu'en l'absence d'apports aléatoires dans le bief considéré. Les paramètres physiques du bief restant constants et les pertes étant des fonctions continues de la cote H_1 à la station S_1 .

En théorie il faudra déterminer le temps de propagation de l'onde de crue pour chaque hauteur du marnage de l'échelle amont d'un bief pour connaître après correction de ce temps la correspondance en régime permanent entre cotes H_1 et H_2 , soit la fonction $H_2(H_1)$.

En pratique il n'est pas possible de calculer pour chaque valeur observée en S_1 le temps de propagation correspondant. La détermination du temps optimum de propagation se fait par tranche de hauteurs, la méthodologie analytique opérationnelle est exposée dans le § suivant.

1.4. Evaluation des temps de propagation

1.4.1. Approche méthodologique

Soit le bief S_1-S_2 , la hauteur H_1 en S_1 est prise dans ce qui suit comme paramètre des fonctions temps ($T(H_1)$) et régression en régime permanent ($H_2(H_1)$).

Considérons une tranche de hauteur DH_1 quelconque comprise dans le marnage de la station S_1 . L'amplitude de cette tranche restant réduite. Soit n le nombre d'observations comprises dans cette tranche pendant la période que nous utilisons.

Nous considérons que la moyenne des n valeurs de la tranche est représentative de celle-ci. Les paramètres issus de l'analyse seront affectés à cette valeur centrale.

Chacune des n valeurs a été observée à une date donnée D_i , i prenant toutes les valeurs comprises entre 1 et n . Soit T le temps de propagation correspondant à H_{1m} , hauteur moyenne de la tranche. Constituons un échantillon de n valeurs de H_2 observées aux dates D_i+T . Nous assimilons la valeur moyenne H_{2m} à la cote correspondante à H_{1m} en régime permanent, T étant la valeur de la fonction $T(H_1)$.

La détermination de T moyen de la tranche se fait par optimisation de la régression entre la tranche DH_1 et celle des valeurs correspondantes de S_2 .

Le critère retenu pour l'optimisation de T est la minimisation de l'écart entre valeurs observées en S_2 à D_i+T et les valeurs correspondantes calculées à l'aide de la régression établie entre les deux échantillons : Pour T donné il correspond une série de n valeurs de H_2 pour lesquelles est établie une régression linéaire ou polynomiale avec l'échantillon de la tranche H_1 . Les paramètres de cette régression permettent de calculer n valeurs de H_2 à partir des n valeurs de H_1 . L'écart absolu moyen est : Somme des val. abs. de $((H_{2i}-H_{2ci})/n)$, soit: dH_2 .

Faisons varier T dans un intervalle donné, nous cherchons à minimiser la valeur de $dH2$, cette valeur minimale devant être obtenue pour T différent des bornes de son intervalle de variation.

Il suffit donc d'analyser suffisamment de tranches de hauteurs pour décrire le marnage complètement.

Les fonctions $T(H1)$ et $H2(H1)$ admettent des développements en séries sur les intervalles où elles sont continues. Ces intervalles sont déterminés graphiquement et les paramètres des développements en séries sont déterminés par calage sur les valeurs issues des analyses préliminaires.

1.4.2. Méthodologie pratique

Actuellement les analyses sont effectuées automatiquement par ordinateur. Les données de base à introduire sont les suivantes :

- Deux années d'observations journalières consécutives pour chaque station, soit 730 ou 731 hauteurs journalières,

- Le marnage de la station amont doit être couvert par un minimum de 30 tranches de hauteurs $H1$. En général, pour un marnage compris entre 6 et 10 mètres l'amplitude est de 40 cms et le pas de 20 cms, ce dernier pouvant être réduit à 10 cms si l'on veut disposer de davantage de points pour le calage des paramètres des développements en séries.

- Le calcul débute par la tranche la plus basse, un intervalle de temps est fourni à l'ordinateur ainsi que le pas de temps de calcul. Dans le cas du NIGER où les biefs sont importants, le pas de temps est de 12 heures, soit 0,5 jours, les calculs sont menés en fractions de jours.

- L'algorithme utilisé pour l'optimisation du temps de propagation est le suivant :

L'Opérateur fourni à la machine une fourchette de temps, soit T_{min} et T_{max} , et un pas d'incrémentation PT . Le calcul de $dH2$ est effectué pour toutes les valeurs que peut prendre T dans la tranche de temps considérée. Si la valeur minimale de $dH2$ correspond à un temps différent des bornes T_{min} ou T_{max} , les paramètres $H1$ et $H2$ moyen des tranches sont retenus ainsi que T . Si T est l'une des bornes, le calcul recommence avec le même pas de temps, les bornes étant $T-2*PT$ et $T+3*PT$, jusqu'à ce que $dH2$ soit minimisé avec les critères mentionnés ci-dessus.

Le changement de tranche est automatique, les bornes temps sont ajustées par rapport au temps optimisé de la tranche précédente (2 jours avant et après).

1.4.3. Limites opérationnelles

L'approche théorique développée ci-dessus n'a de valeur que pour des sections très rapprochées dans le cas de régimes hydrauliques non-permanents très variés. Dans le cas d'un grand fleuve à variations de niveaux très lentes l'importance des biefs n'est pratiquement pas limitée.

Si le régime de la station amont est très différent de celui de la station aval, par exemple si un amortissement important intervient dans le bief considéré, il en résulte une imprécision importante au niveau de la modélisation et l'amortissement ne peut être traduit correctement. C'est le cas du bief BAKEL - PODOR pour lequel le régime à la station amont présente de très forts gradients limnimétriques qui sont complètement amortis au niveau de l'aval. Pour modéliser un tel amortissement il est nécessaire de rentrer dans le modèle des biefs intermédiaires grâce auxquels il est possible de traduire l'amortissement général en accumulant les amortissements partiels.

~~2. APPLICATION AU BIEF KOULIKORO - KE MACINA SUR LE NIGER~~

2. Données de base - Tableaux d'analyses

Les données de base sont constituées par les observations journalières moyennes des hauteurs aux échelles de crue.

La saisie a été effectuée sous forme de matrice 12*31, les observations manquantes sont affectées de la valeur -99, les fins de mois (29-30-31) sont saisies avec la valeur -100.

Les fichiers sont concaténés puis le programme TRANSLIN les transforme en fichiers à une dimension en éliminant les valeurs -100.

Le programme ATH22 effectue l'analyse automatiquement après introduction des paramètres suivants:

- Noms des stations.
- Noms des fichiers unidimensionnels.
- Bornes $H1\text{min}$ et $H1\text{max}$ de l'analyse.
- Amplitude des tranches de hauteurs, pas de hauteurs.
- Borne du premier intervalle de temps.
- Pas de temps.

Les résultats sont imprimés sous la forme du tableau n°1.

2.2. Bornes de continuité des fonctions temps et hauteurs

Les valeurs contenues dans les colonnes T et $Y\text{moy}$ permettent de déterminer graphiquement (fig. n°2 & 3), en fonctions des valeurs correspondantes de $X\text{moy}$, les bornes des fonctions ci-dessus entre lesquelles elles présentent un caractères de continuité. Les intervalles compris entre ces bornes sont mis en équations du 3ème ordre en résolvant les systèmes linéaires par la méthode de condensation pivotale de GAUSS.

Jusqu'à présent les analyses menées sur le NIGER ont conduit à représenter chaque fonction par 3 développements en série du 3ème ordre au maximum. Chaque courbe est donc traduite par 14 paramètres, 12 pour les 3 intervalles et 2 pour les bornes encadrant l'intervalle central.

Vingt huit paramètres traduisent donc le fonctionnement hydraulique d'un bief. Le tableau n°2 contient les paramètres du modèle de propagation. Les 12 premiers traduisent l'écoulement en régime permanent ($H2 = H2(H1)$), les 2 suivants sont les bornes de validité des équations. Les hauteurs sont exprimées en cms. Les 14 derniers ont la même signification en ce qui concerne les temps de propagation.

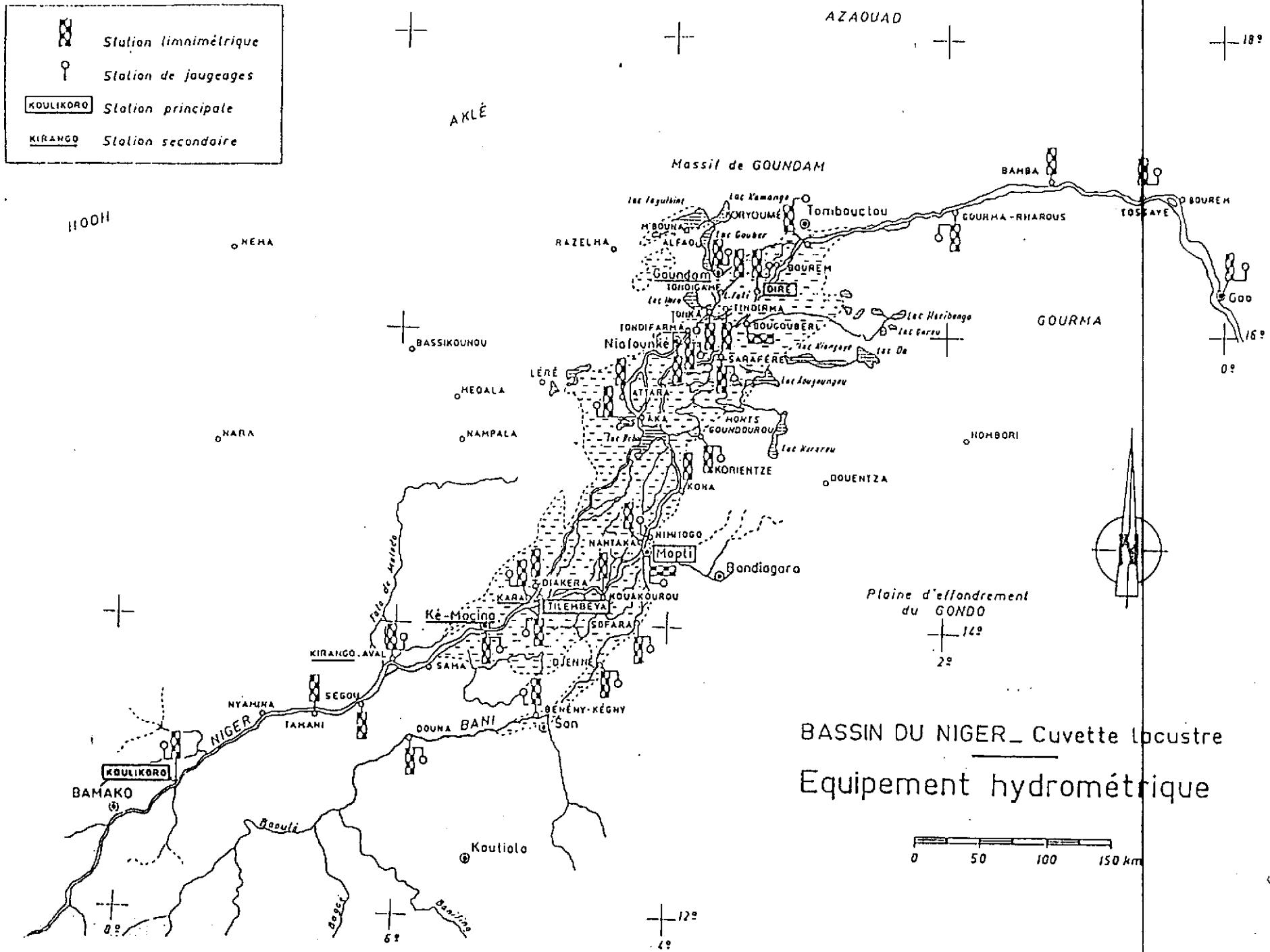


Figure n° 1

ANALYSE du TEMPS de PROPAGATION

Bief: Koulikoro - Ké Macina

Période analyse : 1976 - 1976

Paramètres de l'analyse: 90 à 650 cms

Tranche de hauteur: 50 cms

Pas: 10 cms

DYmoy=	6.9	Rmax= 0.83367	T= 3.50	N= 47	Xmoy= 115	Ymoy= 134
DYmoy=	6.3	Rmax= 0.86054	T= 5.50	N= 49	Xmoy= 122	Ymoy= 139
DYmoy=	4.3	Rmax= 0.86009	T= 5.50	N= 40	Xmoy= 135	Ymoy= 153
DYmoy=	2.7	Rmax= 0.94270	T= 5.50	N= 41	Xmoy= 146	Ymoy= 161
DYmoy=	3.1	Rmax= 0.95997	T= 5.50	N= 48	Xmoy= 156	Ymoy= 170
DYmoy=	3.5	Rmax= 0.94534	T= 5.00	N= 48	Xmoy= 170	Ymoy= 182
DYmoy=	3.7	Rmax= 0.93996	T= 4.50	N= 52	Xmoy= 178	Ymoy= 188
DYmoy=	3.7	Rmax= 0.94713	T= 4.50	N= 54	Xmoy= 186	Ymoy= 196
DYmoy=	4.4	Rmax= 0.94682	T= 4.50	N= 54	Xmoy= 194	Ymoy= 205
DYmoy=	5.2	Rmax= 0.94292	T= 4.00	N= 48	Xmoy= 201	Ymoy= 214
DYmoy=	4.2	Rmax= 0.96317	T= 4.50	N= 43	Xmoy= 212	Ymoy= 226
DYmoy=	4.0	Rmax= 0.96877	T= 4.50	N= 41	Xmoy= 223	Ymoy= 241
DYmoy=	3.6	Rmax= 0.97258	T= 4.50	N= 42	Xmoy= 237	Ymoy= 258
DYmoy=	3.4	Rmax= 0.96469	T= 4.50	N= 41	Xmoy= 248	Ymoy= 271
DYmoy=	3.7	Rmax= 0.96168	T= 4.50	N= 47	Xmoy= 257	Ymoy= 282
DYmoy=	4.3	Rmax= 0.94959	T= 4.50	N= 48	Xmoy= 264	Ymoy= 290
DYmoy=	4.2	Rmax= 0.95258	T= 4.50	N= 43	Xmoy= 271	Ymoy= 298
DYmoy=	4.7	Rmax= 0.95007	T= 4.50	N= 39	Xmoy= 280	Ymoy= 309
DYmoy=	5.6	Rmax= 0.92693	T= 4.50	N= 31	Xmoy= 289	Ymoy= 321
DYmoy=	6.6	Rmax= 0.93645	T= 4.00	N= 31	Xmoy= 306	Ymoy= 340
DYmoy=	5.1	Rmax= 0.92848	T= 4.00	N= 29	Xmoy= 318	Ymoy= 354
DYmoy=	4.6	Rmax= 0.92158	T= 4.00	N= 29	Xmoy= 325	Ymoy= 362
DYmoy=	5.3	Rmax= 0.79145	T= 3.50	N= 26	Xmoy= 334	Ymoy= 370
DYmoy=	5.9	Rmax= 0.80716	T= 3.50	N= 27	Xmoy= 339	Ymoy= 373
DYmoy=	5.8	Rmax= 0.86054	T= 3.50	N= 22	Xmoy= 351	Ymoy= 381
DYmoy=	6.4	Rmax= 0.88322	T= 3.50	N= 21	Xmoy= 367	Ymoy= 395
DYmoy=	6.6	Rmax= 0.87105	T= 3.50	N= 22	Xmoy= 378	Ymoy= 405
DYmoy=	5.6	Rmax= 0.93654	T= 4.50	N= 25	Xmoy= 390	Ymoy= 415
DYmoy=	5.7	Rmax= 0.94753	T= 4.50	N= 32	Xmoy= 397	Ymoy= 425
DYmoy=	5.7	Rmax= 0.94175	T= 4.50	N= 40	Xmoy= 410	Ymoy= 440
DYmoy=	6.1	Rmax= 0.92988	T= 4.50	N= 44	Xmoy= 417	Ymoy= 448
DYmoy=	6.4	Rmax= 0.89570	T= 4.50	N= 40	Xmoy= 423	Ymoy= 457
DYmoy=	7.4	Rmax= 0.89436	T= 4.50	N= 45	Xmoy= 433	Ymoy= 469
DYmoy=	7.8	Rmax= 0.91020	T= 4.50	N= 47	Xmoy= 444	Ymoy= 482
DYmoy=	7.1	Rmax= 0.93339	T= 4.50	N= 48	Xmoy= 456	Ymoy= 499
DYmoy=	7.1	Rmax= 0.91596	T= 4.50	N= 51	Xmoy= 470	Ymoy= 517
DYmoy=	7.4	Rmax= 0.89023	T= 5.00	N= 52	Xmoy= 474	Ymoy= 523
DYmoy=	6.5	Rmax= 0.88868	T= 5.00	N= 44	Xmoy= 481	Ymoy= 533
DYmoy=	6.3	Rmax= 0.91084	T= 5.00	N= 38	Xmoy= 488	Ymoy= 541
DYmoy=	7.9	Rmax= 0.91017	T= 5.50	N= 33	Xmoy= 498	Ymoy= 554
DYmoy=	9.2	Rmax= 0.91380	T= 5.50	N= 28	Xmoy= 515	Ymoy= 576
DYmoy=	10.5	Rmax= 0.78446	T= 5.50	N= 28	Xmoy= 529	Ymoy= 593
DYmoy=	11.8	Rmax= 0.51043	T= 5.50	N= 31	Xmoy= 540	Ymoy= 601
DYmoy=	11.4	Rmax= 0.45507	T= 6.00	N= 44	Xmoy= 551	Ymoy= 608
DYmoy=	10.0	Rmax= 0.65239	T= 6.00	N= 57	Xmoy= 558	Ymoy= 616
DYmoy=	7.1	Rmax= 0.77873	T= 6.00	N= 48	Xmoy= 565	Ymoy= 619
DYmoy=	6.9	Rmax= 0.81756	T= 6.00	N= 45	Xmoy= 570	Ymoy= 623
DYmoy=	7.1	Rmax= 0.80600	T= 6.50	N= 39	Xmoy= 575	Ymoy= 627
DYmoy=	2.1	Rmax= 0.96153	T= 6.50	N= 30	Xmoy= 587	Ymoy= 639
DYmoy=	2.5	Rmax= 0.95169	T= 6.50	N= 15	Xmoy= 602	Ymoy= 648
DYmoy=	2.3	Rmax= 0.94745	T= 6.50	N= 15	Xmoy= 617	Ymoy= 657
DYmoy=	2.3	Rmax= 0.93812	T= 6.00	N= 20	Xmoy= 629	Ymoy= 662
DYmoy=	2.0	Rmax= 0.92513	T= 6.00	N= 24	Xmoy= 640	Ymoy= 667
DYmoy=	1.7	Rmax= 0.90210	T= 5.50	N= 22	Xmoy= 647	Ymoy= 670
DYmoy=	1.6	Rmax= 0.89381	T= 5.50	N= 24	Xmoy= 654	Ymoy= 672
DYmoy=	1.3	Rmax= 0.89685	T= 5.50	N= 25	Xmoy= 659	Ymoy= 673
DYmoy=	1.3	Rmax= 0.87931	T= 5.50	N= 18	Xmoy= 665	Ymoy= 675

Tableau n° 1

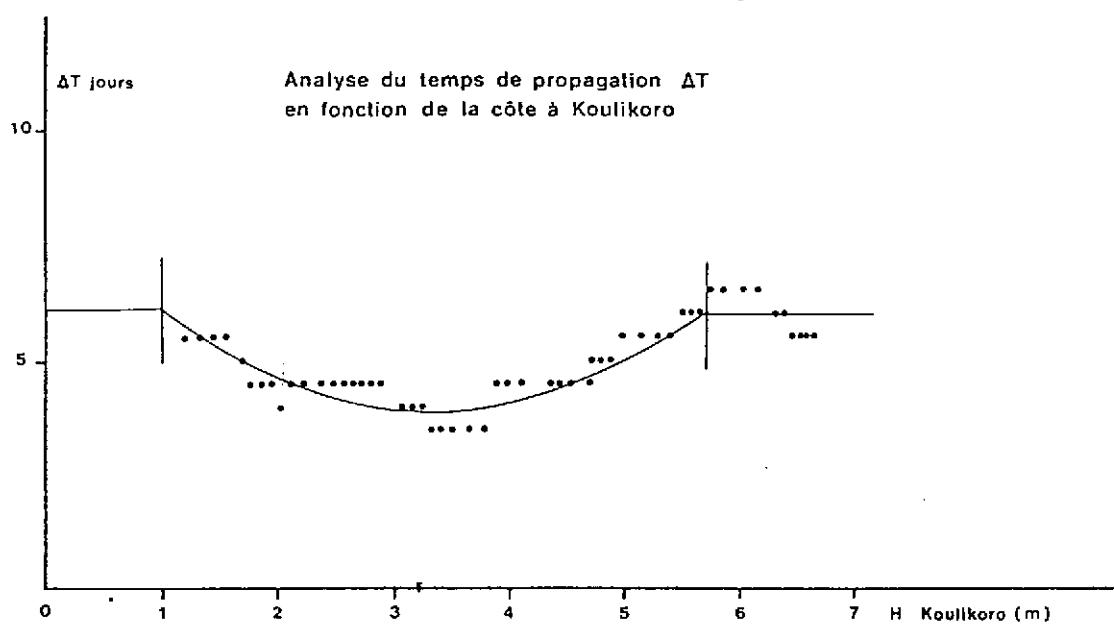
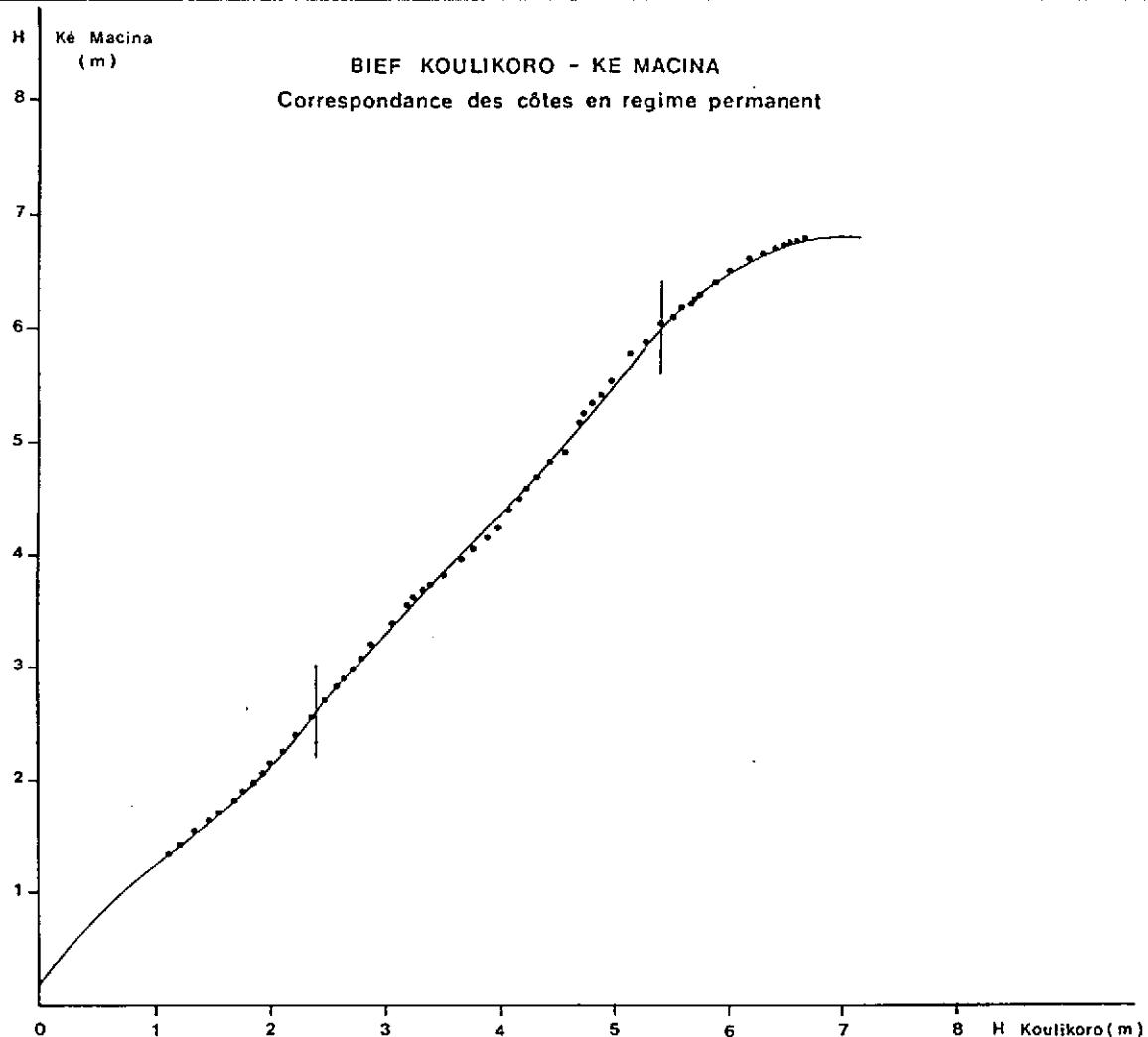


Tableau n° 2

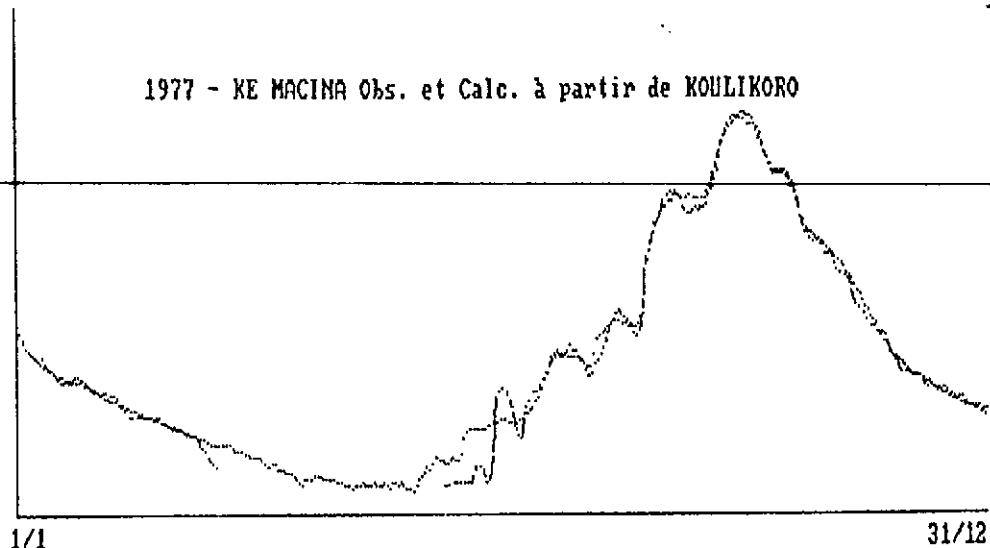
PARAMETRES DU MODELE DE PROPAGATION
BIEF: KOULIKORO / KE MACINA

PERIODE UTILISEE POUR LE CALAGE: 1975 à 1976

1	0.000000000	5	0.000002025	9	0.000000000
2	-0.005147743	6	-0.002056843	10	-0.002666687
3	1.401138200	7	1.758569100	11	3.806692000
4	18.926000000	8	-68.482000000	12	-678.010000000
13	240				
14	540				
15	0.000000000	19	-0.000000018	23	0.000000000
16	0.000000000	20	0.000056136	24	0.000000000
17	0.000000000	21	-0.030914149	25	0.000000000
18	6.100000000	22	8.672000000	26	6.000000000
27	100				
28	570				

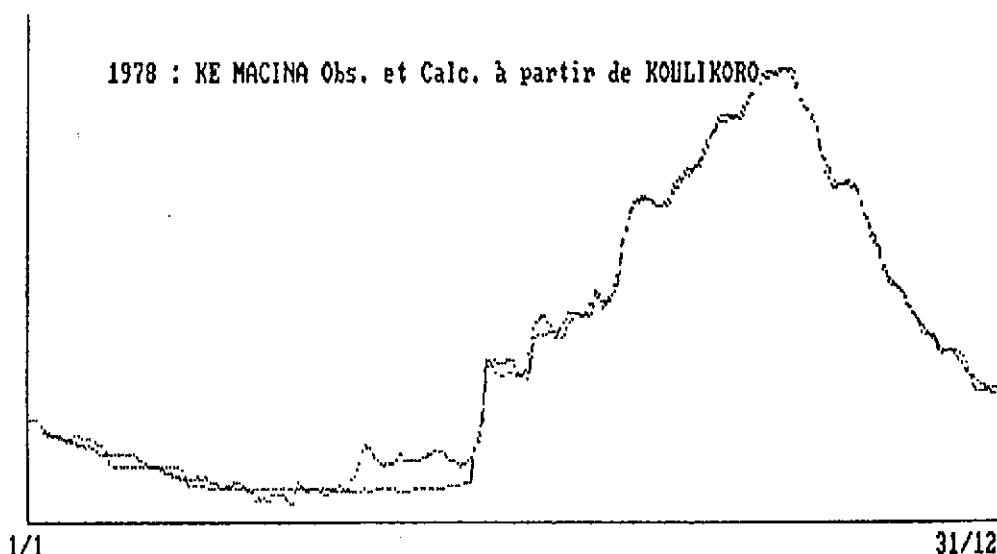
1977 - KE MACINA Obs. et Calc. à partir de KOUlikoro

Figure n° 4



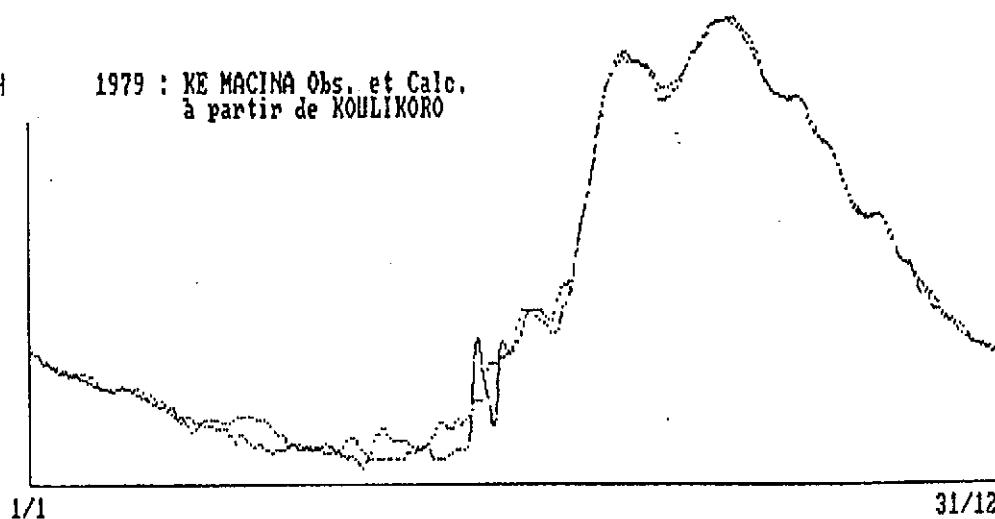
1978 : KE MACINA Obs. et Calc. à partir de KOUlikoro

Figure n° 5



H 1979 : KE MACINA Obs. et Calc.
à partir de KOUlikoro

Figure n° 6



2.3. Utilisation du modèle

Le programme PREVI transforme un limnigramme annuel de la station amont en un limnigramme calculé de la station aval. Il est donc possible de vérifier le calage du modèle en transformant une ou plusieurs années d'observations à la station amont en utilisant le modèle défini à l'aide des observations communes 1975-1976. Les figures n°4-5 et 6 représentent les limnigrammes observés à KE MACINA et ceux calculés par le modèle à partir des hauteurs correspondantes à KOULIKORO. Les écarts constatés au moment de la montée des eaux proviennent des manœuvres du barrage de MARKALA. Dès que la crue est amorcée les hausses de l'ouvrage sont baissées intégralement et le régime redevient naturel.

Il est aisé de constater que le calage est tout à fait correct bien que les données de base utilisées pour le calage (observations journalières 75/76) n'aient fait l'objet d'aucune analyse critique préalable. Il s'agit là de données brutes envoyées par le Lecteur d'échelle.

Le MODELE DE PROPAGATION ainsi calé permet donc d'effectuer plusieurs opérations :

- Simulation de crues artificielles (c'est ce qui est fait ci-dessus pour les années 77-79).
- Reconstitution de données de base à partir de l'une des stations, le modèle pouvant être calé sur la station aval aussi bien que sur l'amont.
- Prévision des hauteurs et débits au moins égale au temps de propagation. Période importante pour les grands fleuves à variations lentes de niveaux (de l'ordre de 60 jours à NIAMEY).

3. ETALONNAGE DES STATIONS NON BI-UNIVOQUES

Nous avons vu au § 1.2. que le débit instantané peut-être exprimé en fonction du débit permanent à cote égale connaissant le gradient de hauteur et le coefficient de correction de gradient :

$$Q = Q_0 \cdot (1 + K \cdot G)^{0,5} \quad (12)$$

avec $Y = Q/Q_0$ il vient :

$$Y^2 - 1 = K \cdot G \quad (13)$$

Nous savons que K est une fonction de I_0 et $U(H)$, donc une fonction continue de H . Pour une cote donnée il existe autant de valeurs du débit que de valeurs du gradient.

Dans le cas de l'étalonnage d'une station, connaissant la hauteur, le débit mesuré, le gradient au moment de la mesure il est possible d'établir une courbe du premier terme de l'équation (13) en fonction de G . La valeur moyenne de K sera égale à la pente de la droite passant au milieu des points :

$$K = (Y^2 - 1)/G \quad (14)$$

En pratique il faut prendre une portion du marnage de la station considérée, tranche de hauteurs située sensiblement en milieu de crue et de décrue qui présente les gradients les plus forts, donc les écarts entre Q mesurés et Q en régime permanent les plus importants. La tranche doit être assez large, de manière à établir une première courbe Q_0 moyenne des mesures utilisées.

3.1. Méthodologie pratique

Les stades de l'analyse sont les suivants:

1 - Paramètres de la courbe provisoire en régime permanent.

2

2 - Calcul des valeurs de $Y^2 - 1$ et report graphique en fonction de G exprimé en cm/jour. Pente de la droite de correction K .

3 - Calcul du débit permanent (Q_0) correspondant à chaque débit mesuré en utilisant K et G :

$$Q_0 = Q/(1 + K \cdot G)^{0,5} \quad (15)$$

4 - Paramètres de la courbe définitive qui correspond au régime permanent à l'aide des Q_0 .

5 - Nouveau cycle de calcul des stades 2 et 3 qui fournit la valeur définitive de K .

6 - Application de la correction à l'aide K définitif à toute les mesures de débits à la station.

7 - Tracé de la courbe d'étalonnage correspondant au régime permanent selon les méthodes habituelles. Tronçons de paraboles dans les exemples qui suivent.

3.2. Etalonnage de la station de BAKEL sur le Fleuve SENEgal

3.2.1 Période 1973 - 1984

La tranche choisie se situe entre les cotes 400 et 600 à l'échelle de crue. Nous disposons de 40 mesures de débits qui nous permettent de calculer les paramètres du 1er tronçon de parabole (régression parabolique). Le gradient est ici exprimé en cms/10heures (différence de hauteurs entre lectures du matin(8h) et du soir(18h) le jour de la mesure.

La première correction conduit à la 2ème courbe d'étalonnage, ses paramètres sont contenus dans le tableau n°3 (BAKEL 2).

Les figures n°7 - 8 et 9 montrent la première courbe moyenne, la correction de gradient qui conduit à la valeur de K:

$$K = 0,003779 \text{ (pour 1 jour)}$$

puis la courbe définitive avec les débits corrigés à l'aide de K.

Le tableau n° 5 contient les résultats de l'analyse. Les différents stades de calculs intermédiaires ne s'y trouvent pas. Les deux dernières colonnes traduisent la réduction de la dispersion après correction de gradient :

$$DQ/Qo = (Q_{mesuré}-Qo)/Qo$$

$$DQc/Qo = (Q_{corrigé}-Qo)/Qo$$

Les synthèses de bas de tableau montrent l'évolution des moyennes des écarts absolus. Pour 90% des points nous constatons que la dispersion est faible, de l'ordre de 2,5% après analyse au lieu de 6 à 7% auparavant.

Cela est confirmé par les autres tronçons directement établis à l'aide du coefficient de correction de gradient issu de l'analyse préliminaire. Les paramètres des tronçons 0-200, 200-400, 600-800, 800-1200 sont calculés à l'aide des débits corrigés de chaque tranche, la correction étant réalisée avec K déterminé pour la tranche 400-600 (voir tableaux suivants n°6 à 9).

Station: BAKEL 1

Paramètres de la transformation H/Q

Nombre de tronçons: 4 Coef. de cor. de gradient: .003779

a=	47.55556	26.00000	0.00000	116.87500
b=	65.33333	312.00000	443.00000	506.25000
Qmin=	32.00000	656.00000	1384.00000	2270.00000
Hmin=	1.00000	4.00000	6.00000	8.00000

Tableau n° 4

Station: BAKEL 2

Paramètres de la transformation H/Q

Nombre de tronçons: 6 Coef. de cor. de gradient: .003779

a=	21.00000	57.94200	52.00000	31.00000	13.00000	187.00000
b=	0.30000	52.83000	195.00000	405.00000	537.00000	541.00000
Qmin=	0.00000	5.40000	172.00000	770.00000	1704.00000	2830.00000
Hmin=	0.20000	0.70000	2.00000	4.00000	6.00000	8.00000

Tableau n° 3

Tableau n° 5

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1972 A 1984

Tranche de hauteurs 400-600 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Y2-1	Q(m3/s)	Qc(m3/s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	27/07/74	513	+	19	+	16,9	1367	1263
2	13/08/74	599	-	13	-	13,8	1590	1693
3	14/08/74	574	-	10	-	16,4	1440	1510
4	16/08/74	541	-	5	-	11,4	1320	1351
5	27/07/75	459	+	64	*		1200	955
6	11/08/75	578	+	24	+	25,8	1790	1622
7	12/08/75	602	-	3	-	15,1	1685	1708
8	16/08/75	582	-	2	+	3,4	1645	1660
9	19/08/75	539,5	-	8	-	3,8	1370	1423
10	21/08/75	494,5	-	8	-	2,6	1160	1205
11	23/08/75	454	-	2	-	0,9	995	1004
12	26/08/75	510	+	7	+	9,8	1310	1270
13	27/08/75	521	0		+	4,2	1330	1330
14	29/08/75	546	+	8	+	10,4	1500	1448
15	30/08/75	572,5	+	14	+	10,9	1650	1554
16	11/10/75	538,5	-	9	-	12,5	1300	1357
17	13/10/75	503	-	8	-	15,3	1120	1163
18	14/10/75	485	-	7	-	12,7	1060	1095
19	12/08/76	474	-	2	*		1140	1150
20	17/08/76	585,5	+	22	+	14,3	1750	1598
21	6/09/76	482,5	-	6	-	5,8	1090	1121
22	23/10/76	423	+	3	+	3,7	890	878
23	10/08/76	453	+	1	+	3,0	1010	1005
24	14/09/76	427,5	0		+	4,2	910	910
25	1/08/80	416	+	8	*		970	937
26	2/08/80	433	+	31	*		1056	933
27	3/08/80	479	+	53	+	45,5	1336	1098
28	7/08/80	514,5	-	20	*		1295	1430
29	8/08/80	485	-	2	*		1204	1215
30	9/08/80	500	+	16	+	16,4	1298	1213
31	10/08/80	524	0		*		1446	1446
32	11/08/80	534	+	11	+	15,3	1468	1400
33	12/08/80	576,5	+	21	+	35,7	1850	1696
34	9/08/81	589,5	-	7	*		1540	1591
35	14/08/82	484	+	34	+	19,1	1233	1078
36	15/08/82	524,5	+	8	+	11,5	1394	1346
37	16/08/82	535,5	+	2	+	4,6	1406	1393
38	17/08/82	534,5	-	7	-	5,1	1334	1378
39	18/08/82	516	-	13	-	10,9	1207	1285
40	19/08/82	485	-	13	-	10,2	1075	1145

Après analyse :

Pour 40 mesures(100%): Moyenne des écarts absolus = 3,06%
 " 36 " (90%) : " " " " = 2,26%
 " 32 " (80%) : " " " " = 1,79%

Avant analyse :

100% des mesures : écart abs. moyen = 6,52%
 90% " " " : " " " " = 6,01%
 80% " " " : " " " " = 5,60%
 (pour les mêmes mesures que ci-dessus)

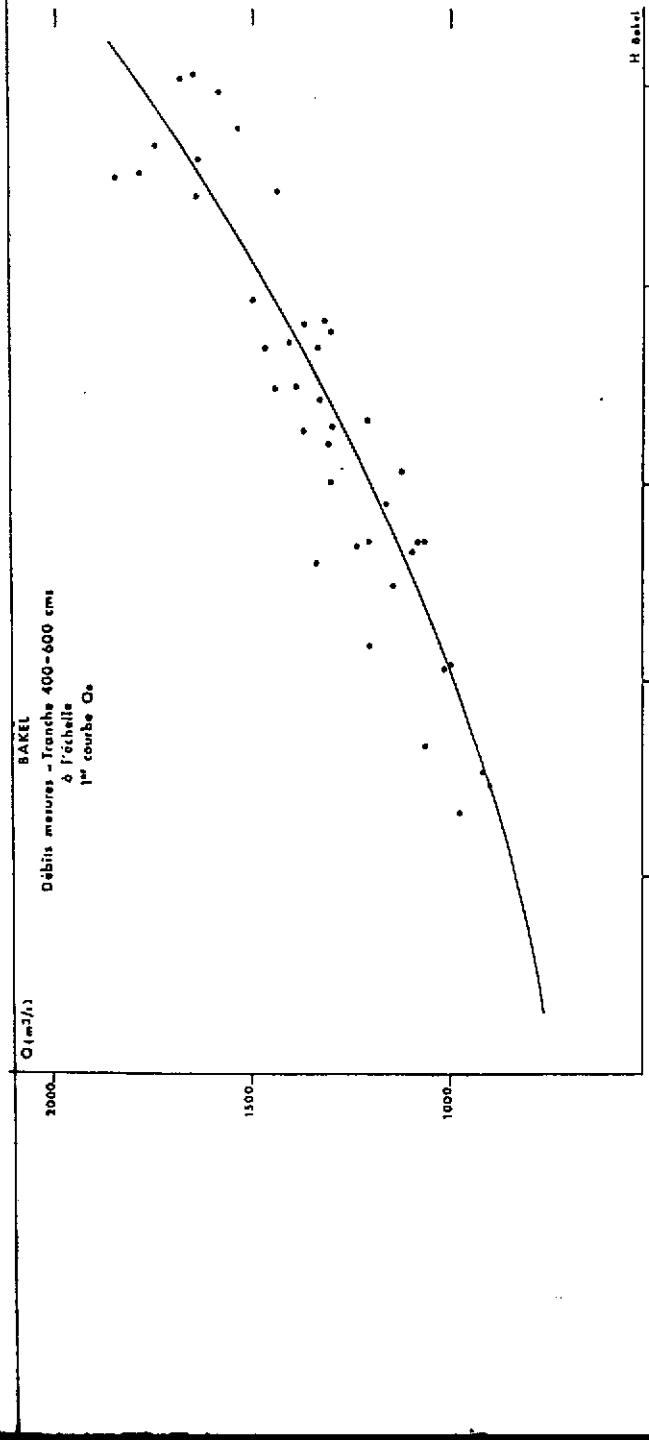


Figure n° 7

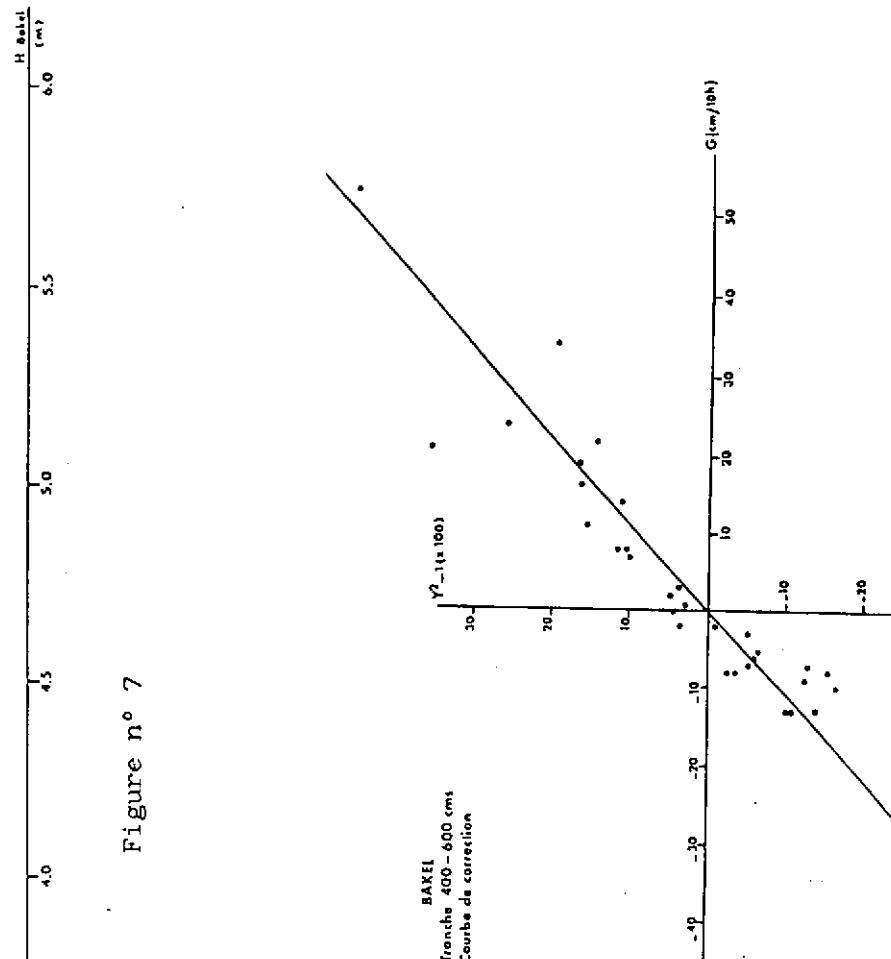


Figure n° 8

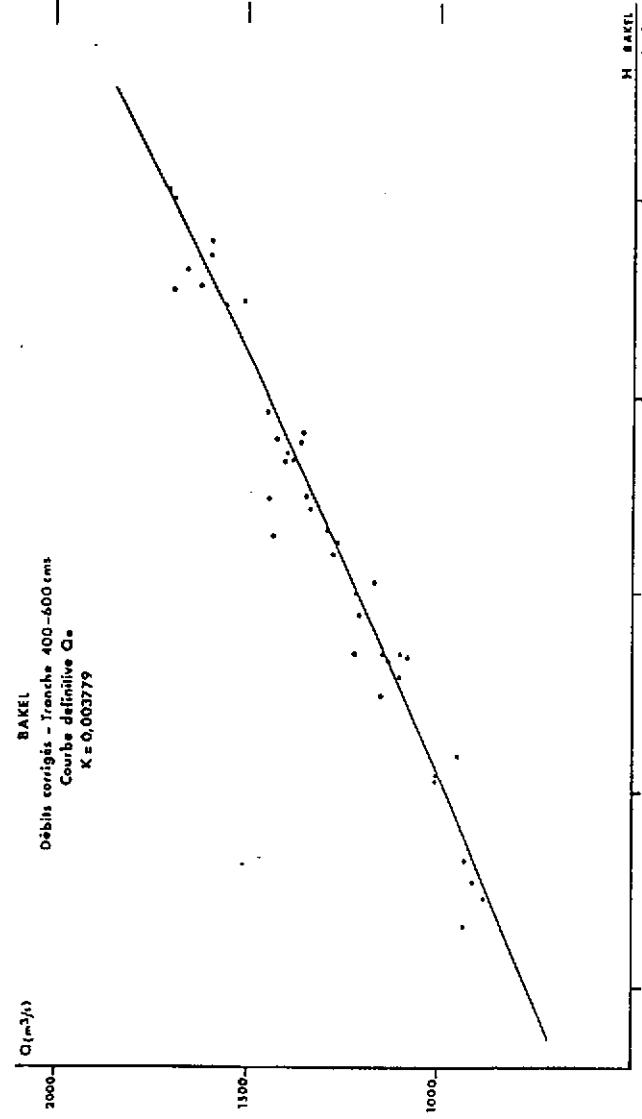


Figure n° 9

Tableau n° 6

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1972 A 1984

Tranche de hauteurs 600-800 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Y2-1	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	24/09/74	777,5	- 14	- 14,1	2500	2676	- 7,3	- 0,8
2	30/07/75	674,5	+ 47	+ 36,9	2470	2068	+ 17,0	- 2,0
3	12/08/75	602	- 3	- 3,4	1685	1708	- 1,7	- 0,4
4	31/08/75	658	+ 54	+ 36,5	2360	1934	+ 16,8	- 4,3
5	1/09/75	753	+ 32	+ 39,6	3020	2659	+ 18,2	+ 4,0
6	1/09/75	775	+ 32	+ 36,9	3140	2764	+ 17,0	+ 3,0
7	16/09/75	792	- 10	- 8,8	2660	2790	- 4,4	+ 0,2
8	23/08/76	694,5	+ 6	+ 15,6	2390	2328	+ 7,5	+ 4,7
9	3/09/80	627	+ 3	- 2,4	1828	1804	- 1,2	- 2,5
10	7/09/81	652,5	- 17	- 7,8	1910	2077	- 4,0	+ 4,4
11	8/09/81	616,5	- 14	- 15,3	1650	1676	- 8,0	- 1,5
12	9/09/81	589,5	- 7	- 12,7	1540	1591	- 6,5	- 3,4
13	12/09/81	616,5	- 3	+ 8,8	1870	1896	+ 4,3	+ 5,7
14	27/08/82	625,5	+ 1	+ 0,5	1846	1838	+ 0,2	- 0,2
15	29/08/82	645	+ 8	+ 3,1	1978	1910	+ 1,5	- 2,0
16	31/08/82	661,5	+ 5	+ 2,3	2062	2017	+ 1,1	- 1,1
17	31/08/82	694	+ 8	+ 5,5	2281	2202	+ 2,7	- 0,8
18	1/09/82	684	- 6	- 1,4	2149	2210	- 0,7	+ 2,1
19	2/09/82	667	- 8	- 10,4	1957	2032	- 5,4	- 1,8
20	3/09/82	656	+ 4	- 2,7	1982	1947	- 1,3	- 3,1
21	4/09/82	676	+ 8	+ 8,0	2172	2097	+ 2,5	- 1,1
22	5/09/82	676	- 11	- 4,8	2068	2180	- 2,4	+ 2,8
23	6/09/82	641,5	- 17	- 6,3	1867	2030	- 2,3	+ 5,2
24	7/09/82	607	- 13	- 13,1	1624	1729	- 6,8	- 0,7

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen = 2,41% (avant analyse 5,90%)

" 90% " " : " " " = 2,13% (" " " 6,10%)

" 80% " " : " " " = 1,66% (" " " 6,14%)

Tableau n° 7

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1972 A 1984

Tranche de hauteurs 0-200 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Y2-1	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	10/05/73	41	0		0,250	0,250		
2	5/06/73	42	0		0,833	0,833		
3	15/02/73	152	- 1		64,8	64,8		
4	12/01/74	120	- 2		43,4	43,6		
5	13/02/74	93	0		19,1	19,1		
6	6/03/74	78	- 1		11,5	11,5		
7	27/03/74	59	- 1		2,60	2,60		
8	30/04/74	45	0		1,17	1,17		
9	17/05/74	38	- 1		0,72	0,72		
10	30/05/74	28	- 1		0,126	0,126		
11	24/03/75	79	- 1		10,6	10,6		
12	5/06/75	36	- 1		0,390	0,390		
13	15/01/76	144	- 1		70,0	70,1		
14	17/01/76	142	- 1		68,5	68,6		
15	17/03/76	84	- 1		14,0	14,0		
16	8/05/76	41	- 0,5		0,430	0,430		
17	28/04/77	60	- 1		4,64	4,65		
18	9/06/77	44	0		1,40	1,40		
19	4/01/78	120	- 2		45,4	45,6		
20	12/02/78	86	0		14,4	14,4		
21	1/05/78	38	0		0,68	0,680		
22	17/01/79	138	- 2		66,0	66,3		
23	26/03/79	70	- 0,5		4,53	4,53		
24	28/04/79	45	- 1		0,900	0,900		
25	30/11/79	198	- 3,5		146	147		
26	16/01/80	118	- 0,5		45,5	45,5		
27	25/03/80	56	- 0,5		4,04	4,04		
28	25/11/80	183	- 1		139	139		
29	7/02/81	90	0		21,2	21,2		
30	15/04/81	48	0		2,63	2,63		
31	16/12/81	150	- 1		78,5	78,5		
32	30/01/82	100	- 1		18,1	18,1		
33	24/02/82	81	- 0,5		13,3	13,3		
34	30/03/82	49	0		2,27	2,27		
35	29/04/82	41	- 0,5		1,59	1,59		
36	24/06/82	20	- 0,5		0,270	0,270		
37	16/12/82	147	- 1,5		84,5	84,7		
38	31/03/83	49	0		3,07	3,07		
39	8/12/83	136	- 1,5		73,4	73,6		
40	24/01/84	92	- 2		19,2	19,3		

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen :							% (avant analyse : %)		
"	90%	"	"	:	"	"	:	("
"	80%	"	"	:	"	"	:	("

Tableau n° 8

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1972 A 1984

Tranche de hauteurs 200-400 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	8/11/75	321	- 2	473	477	- 2,6	- 1,8
2	10/11/75	311	- 3	450	450	- 1,5	- 0,2
3	9/12/75	208	- 1	181	182	- 3,7	- 3,2
4	11/12/75	204	- 1	177	178	- 1,6	- 1,0
5	7/08/76	391	+ 7	780	756	+ 6,2	+ 3,0
6	1/08/80	416	+ 8	970	937	+ 16,1	+ 12,1
7	25/10/80	258	- 2	308	311	+ 1,8	+ 2,8
8	26/10/80	255	- 4	286	291	- 1,0	- 0,3
9	25/11/80	183	- 1	139	140	- 1,0	- 0,3
10	6/11/81	258	- 2	299	302	- 1,2	- 0,2
11	26/07/82	278	+ 1	378	376	+ 5,8	+ 5,3
12	14/10/82	369	- 2	648	654	0,0	+ 0,9
13	4/11/82	274	+ 3	382	367	+ 5,0	+ 6,4
14	14/10/83	315	- 2	427	431	- 8,2	- 7,3
15	30/07/84	396	+ 2	756	749	0,0	- 0,9
16	8/08/84	417	+ 3	755	745	- 10,1	- 11,5
17	13/08/84	393	- 4	688	701	- 7,3	- 5,5
18	22/08/84	409	+ 2	760	753	- 5,8	- 6,7
19	15/09/84	372	- 9	622	649	- 5,9	- 1,9
20	17/09/84	347	- 1	562	565	- 1,3	- 0,8
21	26/09/84	332	- 7	500	517	- 3,8	- 0,6
22	28/09/84	309	0	450	450	+ 0,8	+ 0,8
23	10/10/84	415	+ 6	870	847	+ 4,9	+ 2,1

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen : 3,15% (avant analyse : 4,03%)

" 90% " " : " " : 2,49% (" " : 3,21%)

" 80% " " : " " : 1,59% (" " : 2,46%)

Tableau n° 9

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1972 A 1984

Tranche de hauteurs 800-1200 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Y2-1	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	3/09/74	1061	- 21	- 34,0	4480	4979	- 18,8	- 9,7
2	9/09/74	953	- 1	- 22,7	3600	3616	- 12,1	- 11,7
3	12/09/74	876	- 19	- 22,9	2940	3232	- 12,2	- 3,5
4	14/09/74	823	- 6	- 17,2	2700	2777	- 9,0	- 6,4
5	18/09/74	821	- 7	- 6,8	2850	2945	- 3,5	- 0,2
6	22/09/74	843	+ 1	- 4,4	3025	3011	- 2,2	- 2,7
7	2/09/75	854	+ 44	+ 41,9	3780	3196	+ 19,1	+ 0,7
8	3/09/75	937	+ 36	+ 30,2	4470	3881	+ 14,1	- 0,9
9	4/09/75	1004	+ 15	+ 11,7	4980	4672	+ 5,7	- 0,8
10	5/09/75	1016	- 9	- 5,7	4730	4936	- 2,9	+ 1,3
11	6/09/75	993	- 6	- 0,5	4560	4689	- 0,2	+ 2,6
12	8/09/75	1007	+ 2	- 3,1	4670	4628	- 1,6	- 2,5
13	10/09/75	977	- 11	- 12,7	4080	4300	- 6,6	- 1,5
14	11/09/75	946	- 10	- 7,7	3860	4048	- 3,9	+ 0,7
15	13/09/75	890	- 15	- 3,7	3658	3400	- 1,8	+ 5,6
16	15/09/75	857	- 15	- 7,1	3080	3314	- 3,6	+ 3,7

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen : 2,41% (avant analyse : 5,91%)

" 90% " " : " " " : 2,13% (" " : 6,10%)

" 80% " " : " " " : 1,66% (" " : 6,14%)

3.2.2 Période 1951 - 1962

Nous ne disposons d'aucune mesure pour la période 1963 - 1972.

La correction de gradient est effectuée à l'aide du coefficient calculé pour la période 1973-1984. Les tableaux n°10 et 11 contiennent les résultats de cette application.

La dispersion des mesures corrigées est tout à fait correcte, de l'ordre de 4% pour 90% des mesures.

Les courbes de tarage sont tracées sur la figure n°10. Nous y avons porté la courbe utilisée par C. ROCHETTE dans la MONOGRAPHIE DU FLEUVE SENEgal - édition de 1965, courbe considérée comme bi-univoque par son Auteur. La deuxième courbe qui correspond à la période antérieure à 1963 fait suite à l'analyse ci-dessus pour la même période (paramètres H/Q consignés dans le tableau n°4). La troisième courbe représente les tronçons issus de l'analyse du paragraphe 3.2.1 .

Les deux premières courbes sont très proches. Par contre le détarage qui apparaît sur la figure n°10 est très important. A hauteur égale à l'échelle de crue, le gain en débit est de :

Hauteur à l'échelle de BAKEL : 400 cms	gain : 17,5%
" " " " : 600 "	" : 23,1%
" " " " : 800 "	" : 24,7%
" " " " : 1200 "	" : 29,5%

Il apparaît que ce détarage très sensible se situe à l'intérieur de la période 1962 - 1972. Ce phénomène est intéressant car cela correspond sensiblement à ce qui s'est passé dans le DELTA INTERIEUR DU NIGER exactement à la même époque (fort détarage de la station de DIRE de 1962 à 1966 puis persistance de ce glissement jusqu'en 1974, ensuite équilibre hydraulique stable).

Le cas de DIRE a été étudié en utilisant un modèle calé avant et après la période de détarage, il a permis de préciser exactement l'évolution du phénomène dans le temps et dans l'espace.

Un modèle semblable est en cours de réalisation sur le bief BAKEL - ROSSO. Il permettra probablement de savoir à quel moment exactement à commencer à se produire le détarage et à quelle époque le nouvel équilibre, qui semble exister depuis 1973, s'est installé.

3.3. Traitement automatique des hauteurs

Le programme TRHQREEL transforme automatiquement les matrices de hauteurs moyennes journalières en débits. Le gradient est utilisé sous la forme de différence entre la hauteur du jour et celle de la veille supposée être observée à la même heure (en principe 8h). Il s'agit donc là du gradient journalier.

Tableau n° 10

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1950 A 1962

Tranche de hauteurs supérieures à 800 cms à l'échelle de crue

N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	23/10/50	815	- 32	1960	2140	- 16,5	- 8,9
2	29/10/50	872	- 15	1575	1640	- 7,5	- 3,8
3	31/10/50	633	- 19	1351	1420	- 11,7	- 7,2
4	31/10/50	633	- 21	1513	1600	- 1,1	+ 4,5
5	31/08/51	687	- 25	1657	1770	- 6,4	+ 0,1
6	8/09/51	841	- 11	2829	2910	+ 13,3	+ 16,5
7	25/09/51	792	- 36	2078	2295	- 7,0	+ 2,7
8	28/09/51	690	+ 9	1705	1670	- 4,4	- 6,4
9	6/10/51	1146	+ 15	5600	5400	+ 3,3	- 0,4
10	8/10/51	1158	- 14	5140	5330	- 7,9	- 4,5
11	11/10/51	1122	- 10	4965	5095	- 2,9	- 0,4
12	19/10/51	935	- 9	2700	2760	- 14,7	- 12,7
13	23/10/51	877	- 5	2435	2470	- 10,8	- 9,6
14	31/10/51	880	- 27	2741	2950	- 0,3	+ 7,2
15	12/11/51	689	- 29	1600	1730	- 10,0	- 2,7
16	28/08/51	660	- 36,5	1530	1690	- 7,3	+ 2,6
17	29/08/51	622	- 33	1436	1570	- 3,1	+ 6,1
18	17/09/51	860	- 6	2936	2980	+ 12,2	+ 14,0
19	28/09/51	1022	+ 24	3655	3455	- 7,9	- 13,0
20	21/10/51	855	- 21	2635	2785	+ 2,0	+ 7,8
21	7/09/54	1228	- 7	6440	6560	- 2,1	- 0,3
22	9/09/54	1198	- 27	5662	6090	- 7,7	- 0,8
23	11/09/54	1124	- 38	4675	5190	- 9,0	+ 1,1
24	12/09/54	1088	- 33	4292	4700	- 8,6	0,0
25	14/09/54	1030	- 21	3713	3925	- 8,4	- 3,2
26	16/09/54	1002	- 18	3450	3615	- 1,5	+ 4,1
27	19/09/54	940	- 20,5	2842	3000	- 11,4	- 6,5
28	7/10/54	805	- 55	1812	2130	- 21,1	- 16,8
29	13/08/61	776	+ 53	2577	2290	+ 19,1	+ 5,9
30	17/09/61	1204	- 20	5997	6320	- 3,6	+ 1,6
31	19/09/61	1160	- 30	5487	5950	- 2,1	+ 6,1
32	21/09/61	1089	- 39	4589	5115	- 2,6	+ 8,6
33	23/09/61	1034	- 16	4023	4195	- 1,7	+ 2,5

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen : 5,72% (avant analyse : 7,55%)

" 90% " " : " " : 4,71% (" " : 6,75%)

" 80% " " : " " : 3,93% (" " : 6,27%)

Tableau n° 11

ANALYSE DES MESURES EFFECTUEES A BAKEL DE 1950 A 1962

Tranche de hauteurs 400 à 800 cms à l'échelle de crue

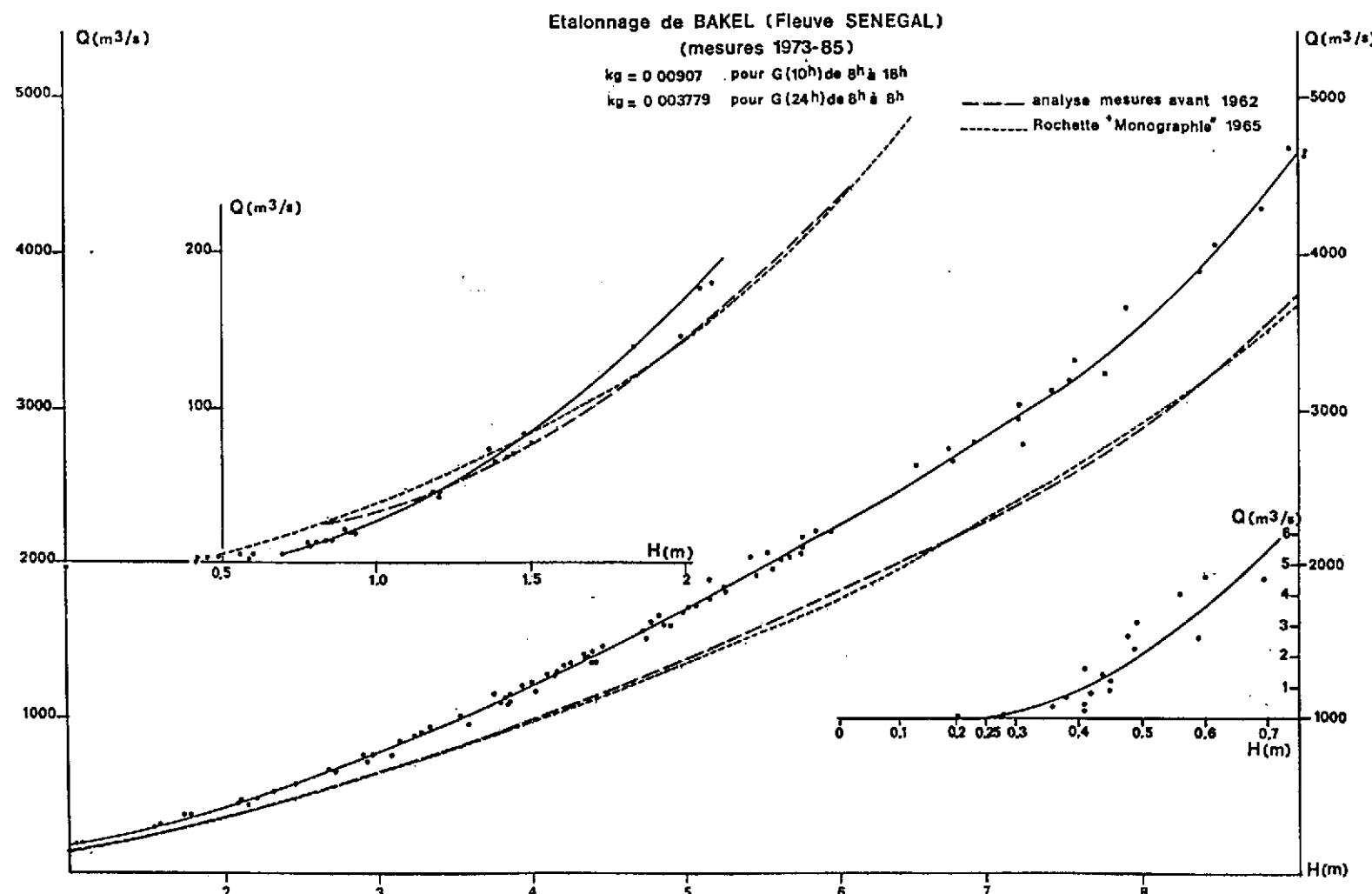
N°	DATE	H(cms)	G(cm/j)	Q(m ³ /s)	Qc(m ³ /s)	DQ/Qo	DQc/Qo
1	23/10/50	815	- 32	1960	2140	- 16,5	- 8,9
2	29/10/50	672	- 15	1575	1640	- 7,5	- 3,8
3	31/10/50	633	- 19	1350	1420	- 11,7	- 7,2
4	31/10/50	633	- 21	1513	1600	- 1,1	+ 4,5
5	4/11/50	555	- 18	1204	1260	+ 0,2	+ 5,0
6	"	"	"	1134	1190	- 5,7	- 1,1
7	8/11/50	497	- 11	1026	1055	+ 4,4	+ 7,4
8	"	"	"	963	991	- 2,0	+ 0,8
9	23/07/51	441	- 20	753	812	- 4,5	+ 3,0
10	31/08/51	687	- 25	1657	1770	- 6,4	+ 0,1
11	25/09/51	792	- 36	2078	2295	- 7,0	+ 2,7
12	28/09/51	690	+ 9	1705	1670	- 4,4	- 6,4
13	12/11/51	689	- 29	1600	1730	- 10,0	- 2,7
14	21/11/51	511	- 14	987	1025	- 4,6	- 1,1
15	26/11/51	444	- 10	772	792	- 3,3	- 0,8
16	28/08/52	660	- 36,5	1530	1690	- 7,3	+ 2,6
17	29/08/52	622	- 33	1436	1570	- 3,1	+ 6,1
18	5/09/52	540	+ 10	1075	1050	- 6,0	- 8,3
19	7/11/52	443	- 13,5	799	827	+ 0,5	+ 4,1
20	15/11/52	363	- 4	493	498	*	*
21	7/10/54	805	- 55	2036	2130	- 21,1	- 16,8
22	12/09/60	812	- 26	2784	2835	*	*
23	13/08/61	776	+ 53	2352	2290	+ 19,1	+ 5,9

Après analyse :

Pour 100% des mesures : écart absolu moyen : 4,73% (avant analyse : 6,97%)

" 90% " " : " " " : 3,87% (" " : 5,73%)

" 80% " " : " " " : 3,41% (" " : 5,79%)



Ce programme a été écrit par pour vérifier ou simuler des hydrogrammes annuels. En pratique, pour effectuer les traductions de hauteurs en débits le gradient est exprimé sous une forme complexe qui tient compte des jours adjacents. Dans le cadre de la MONOGRAPHIE DU FLEUVE NIGER les traductions ont été faites en utilisant :

$$G = \left(\sum_{i=-4}^{-1} S (H_{j+i} - H_j) * (5+i) / i \right) + \left(\sum_{i=1}^4 S (H_{j+i} - H_j) * (5-i) / i \right) / 200 \quad (15)$$

3.4. Prévisions des hauteurs et des débits

Le programme PREVII permet d'effectuer la prévision d'une station amont à une station aval pour une hauteur journalière donnée. Ce programme est édité en annexe. Nous présentons à la page suivante les paramètres du modèle du bief DIRE - TOSSAYE sur le NIGER. Le tableau n°12 contient les 28 paramètres du modèle, la figure n°11 représente une simulation de la crue de 1979 à TOSSAYE réalisée à partir de la même crue de DIRE.

Le tableau n°13 contient des essais d'application du programme PREVII. les résultats de la prévision sont convaincants, les écarts avec les observations sont très faibles (de l'ordre de 1 à 2cms en moyenne) avec un délai de prévision variant de 9 à 19 jours. La prévision de TOSSAYE peut d'ailleurs être améliorée sur le plan délai en effectuant au préalable la prévision de DIRE en utilisant les observations de AKKA (10 à 20 jours suivant la hauteur à AKKA).

PARAMETRES DU MODELE DE PROPAGATION DU BIEFLUIRE / TOSSAYE

PERIODE UTILISEE POUR LE CALAGE: 1975 à 1976

1	0.000004559	5	0.000000000	9	0.000012248
2	-0.002511040	6	0.000000000	10	-0.016717750
3	1.263930000	7	0.773455000	11	6.324558000
4	-10.848000000	8	20.860000000	12	-1107.547000000
13	150				
14	400				
15	-0.000000433	19	-0.000004765	23	0.000000000
16	0.000417997	20	0.006398417	24	0.000000000
17	-0.120543209	21	-2.791486992	25	0.000000000
18	19.558000000	22	408.273000000	26	16.600000000
27	365				
28	520				

Tableau n° 12

NOM DU FICHEIR FM00? FM000170
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 7,11,82
Hauteur amont observée en cms? 440
Cote calculée: 362 cms à la station de TOSSAYE le 19 / 11 / 82 à 20 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,08,82
Hauteur amont observée en cms? 204
Cote calculée: 179 cms à la station de TOSSAYE le 9 / 8 / 82 à 16 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,9,82
Hauteur amont observée en cms? 315
Cote calculée: 264 cms à la station de TOSSAYE le 10 / 9 / 82 à 13 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,12,82
Hauteur amont observée en cms? 425
Cote calculée: 351 cms à la station de TOSSAYE le 12 / 12 / 82 à 20 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,2,82
Hauteur amont observée en cms? 278
Cote calculée: 236 cms à la station de TOSSAYE le 10 / 2 / 82 à 1 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,3,02
Hauteur amont observée en cms? 118
Cote calculée: 103 cms à la station de TOSSAYE le 11 / 3 / 82 à 11 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,7,82
Hauteur amont observée en cms? 104
Cote calculée: 93 cms à la station de TOSSAYE le 12 / 7 / 82 à 1 heures
Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE? 1,0,82

Tableau n° 13

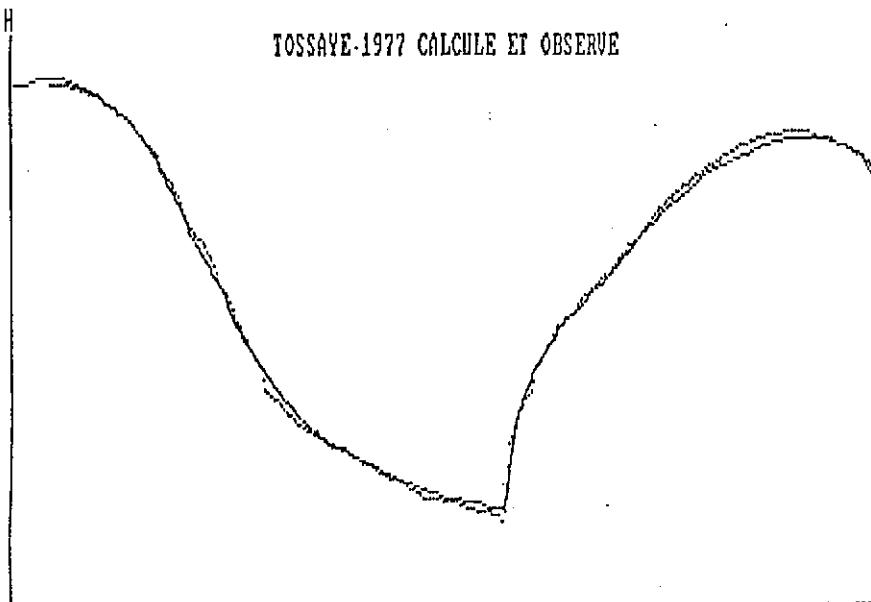


Tableau N° 11

4. CONCLUSIONS

L'utilisation de l'analyse des temps de propagation des ondes de crues permet déjà, dans sa phase opérationnelle actuelle, de réaliser des modèles très simples dont les applications sont faciles à mettre en oeuvre et donnent d'excellents résultats.

Le point sensible de la modélisation présentée dans ce qui précède apparaît dans le calage des paramètres d'un bief qui comporte un fort amortissement. Les limnigrammes de la station amont présentent des maxima secondaires qui disparaissent avec l'amortissement, le modèle ne traduit qu'imparfairement ce genre d'amortissement.

Dans la deuxième phase de recherche nous étudions les fonctions gradients qui induisent les amortissements de crues. Les résultats de ces analyses qui seront publiés dans une prochaine note permettront l'utilisation des modèles à deux niveaux dans tous les cas qui se présentent dans les domaines de PREVISION - SIMULATION - GESTION - TRAITEMENT DES DONNEES DE BASE.

ANNEXES

Programmes d'applications

```

10 REM PROGRAMME DE PREVISION DES HAUTEURS JOURNAIÈRES (+ RM):"PREUIT"
20 REM transformation d'une matrice de hauteurs annuelles de la station amont
30 OPTION BASE 1
40 DEFINT H-1
50 DEFINT P
60 DEFSTR F,S
70 DIM H(12,31),H2(966),P(28),J(366),H(366),HP(366),H(12,31),H(5,3,31),J(12)
80 INPUT "NOM de la station amont-base";$1
90 INPUT "nom de la station aval-prévision";$2
100 INPUT "noms du fichier parnod";F3
110 INPUT "nom des fichiers base et prévision";P(1)
115 INPUT "changements éventuels de zéro des échelles amont(0MM) et aval(0MV) en ces-valeurs algébriques par rapport au zéros utilisés dans l'a
    nalement";DMM,DMV
120 OPEN F3 FOR INPUT AS 1
130 FOR I=1 TO 28:INPUT #1,P(I):NEXT I
140 CLOSE 1
150 OPEN F1 FOR INPUT AS 1
160 K=0
170 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO 31:INPUT #1,H(I,J):IF H(I,J)>-100 THEN 190 ELSE 180
180 K=K+1:H(K)=H(I,J)
190 NEXT J,I
200 KM=K
210 CLOSE 1
220 FOR I=1 TO KM:IF H(I)=99 THEN 370      "CALCUL DES TEMPS ET HAUTEUR DE PRÉVISION
230 H(I)=H(I)-DMM
240 IF H(I)>P(13) THEN 260
250 IF H(I)<P(13) THEN 270 ELSE 260
260 L=0:GOTO 290
270 L=L+50:GOTO 290
280 L=L2
290 H(I)=P(4*L)*H(I)^3+P(4*L^2)*H(I)^2+P(4*L)*H(I)+P(9*L)+1
300 REM CALCUL DU TEMPS DE PROPAGATION
310 IF H(I)>P(27) THEN 330
320 IF H(I)<P(27) THEN 340 ELSE 350
330 L1=0:GOTO 360
340 L1=L:GOTO 360
350 L1=L2
360 T(I)=P(15*L1)*H(I)^3+P(16*L1)*H(I)^2+P(17*L1)*H(I)+P(18*L1)+1
370 H(I)=I
380 FOR I=1 TO KM:IF HP(I)=0 THEN 410      "Calcul des 1er et dernier jours de prévision
400 JMIN=I:JMAX=FIX(I):GOTO 420
410 NEXT I
420 FOR I=KM TO 1 STEP -1:IF HP(I)=0 THEN 440
430 JMAX=I:JMIN=FIX(I):GOTO 450
440 NEXT I
450 FOR L=JMIN+1 TO JMAX+1:IF HP(L)=0 THEN 470
460 H2(L,JMIN)=HP(CMIN)-((HP(CMIN)-HP(L))*((JMIN-1)/(JMAX-1))):GOTO 500
470 NEXT L
480 H2(JMIN)=99
490 FOR I=JMIN+1 TO JMAX:IF HP(I)=0 THEN 520      "Evaluation de la hauteur calculée
510 J=FIX(I):IF J=FIX(I-1) THEN 570
520 IF HP(I-1)=0 THEN 540
530 H2(I)=HP(I)-((HP(I)-HP(I-1))*((I-1)/(I-1))):GOTO 570
540 IF I=JMAX OR HP(I)=0 THEN 560
550 H2(I)=HP(I)-((HP(I)-HP(I+1))*((I+1)-(I+1))):GOTO 570
560 H2(I)=99
570 NEXT I
580 FOR I=1 TO JMIN-1:H2(I)=99:NEXT I      "COMBLEMENT LINÉAIRE DES TROUS
590 FOR I=JMIN+1 TO JMAX:IF H2(I)=0 OR H2(I)=99 THEN 600 ELSE 650
600 FOR L=1 TO 5:IF I=JMAX-4 THEN 630
605 IF H2(I-L)=0 OR H2(I+L)= -99 THEN 620
610 IS=I+L:MS=H2(IS):GOTO 640
620 NEXT L
630 H2(I)= -99:GOTO 690
640 FOR L=1 TO 5:IF H2(I-L)=0 OR H2(I+L)= -99 THEN 660
650 IS=I+L:MS=H2(IS):GOTO 680
660 NEXT L
670 H2(I)= -99:GOTO 690
680 H2(I)=MS-((MS-MS)*((IS-I)/(IS-1))):GOTO 690
690 NEXT I
700 FOR I=1 TO 12:READ JMK(I):NEXT I      "Matrice des hauteurs calculées par le modèle
710 DATA 31,28,31,30,31,30,31,30,31,30,31,31
720 IF I=13:366 THEN JMK(13)=29
730 K=0
740 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO JMK(I)
750 K=I+1:H(I,J)=H2(K):NEXT K
760 NEXT I
770 IF JMK(I)=31 THEN 790
780 FOR I=1+MK(I)+1 TO 31:NEXT I,I+100:NEXT I
790 NEXT I
800 OPEN F2 FOR OUTPUT AS 1
810 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO 31:WRITE #1,H(I,J):NEXT J,I
820 CLOSE 1

```

```
10 REM ENREGISTREMENT DES HAUTEURS MOYENNES JOURNALIERES AVEC IMPRESSION : "STHMLAC"
20 OPTION BASE 1:WIDTH "EP11"; 255
30 DEFINT H-K,N,U
40 DEFSTR F,I
50 INPUT "NOM FICHIER + ANNEE - 1900";F
60 REM 1ère PHASE : ENREGISTREMENT EN MEMOIRE DES HAUTEURS JOURNALIERES
70 DIM H(12,31)
80 OPEN F FOR OUTPUT AS #1
90 FOR I =1 TO 12:PRINT I
100 FOR J=1 TO 31
110 PRINT J;
120 INPUT H1
130 IF H1<>0 THEN H(I,J)=H1 ELSE H(I,J)=-99
140 WRITE #1,H(I,J)
150 NEXT J:PRINT:NEXT I
160 CLOSE #1
170 REM 2ème PHASE : A LA FIN DE CHAQUE ANNEE SAISIE CONTROLE DES VALEURS ENREGISTREES ET CORRECTION(S) S'IL Y A LIEU
180 FOR K=1 TO 12:PRINT TAB(5*K+1) USING " ## ";K;
190 NEXT K:PRINT
200 FOR J=1 TO 31:PRINT USING"## ";J;
210 FOR I=1 TO 12:PRINT USING"#####";H(I,J);
220 NEXT I:PRINT USING" ## ";J
230 NEXT J
240 INPUT "CORRECTION (Y/N)?";T
250 IF T="N" OR T="n" THEN 330
260 REM SOUS PROGRAMME CORRECTIONS
270 INPUT "INDICES (2) + VALEUR A RENTRER";I,J,NU
280 PRINT "Ancienne valeur = ";H(I,J)
290 H(I,J)=NU
300 PRINT "Nouvelle valeur = ";H(I,J)
310 INPUT "Y a-t-il une nouvelle correction à réaliser (Y/N)?"
320 IF T ="Y" OR T="y" THEN 270
330 OPEN F FOR OUTPUT AS 1
340 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO 31:WRITE #1,H(I,J)
350 NEXT J:NEXT I
360 CLOSE 1
370 DIM U(12,31)
380 OPEN F FOR INPUT AS 1
390 FOR I=1 TO 12:FOR J=1 TO 31:INPUT #1,U(I,J):NEXT J,I
400 FOR J=1 TO 31:PRINT USING"## ";J:FOR I=1 TO 12:PRINT USING" ##### ";U(I,J);
410 NEXT I:PRINT USING" ## ";J:NEXT J
420 CLOSE 1
```

```
10 REM PROGRAMME TRANSLIN DE TRANSFORMATION D'UN FICHIER FORMAT(2,12,31) EN FORM
AT (730 OU 731)- "TRANSLIN"
20 OPTION BASE 1
30 DEFINT C,H-N
40 INPUT "NOM DU FICHIER A TRANSFORMER";F$
55 PRINT R3
60 INPUT "NOM du fichier monoindice";FL$
65 PRINT FL$
70 DIM H(2,12,31)
80 OPEN F$ FOR INPUT AS #1
90 OPEN "0",#2,FL$
100 C=0
110 FOR I=1 TO 2:FOR J=1 TO 12:FOR K=1 TO 31
120 INPUT #1,H(I,J,K)
130 IF H(I,J,K)=-100 THEN 160
140 C=C+1
150 WRITE #2,H(I,J,K)
160 NEXT K,J,I
170 PRINT C
180 CLOSE
```

```
10 REM ANALYSE DU TEMPS DE PROPAGATION ENTRE DEUX STATIONS - BIEF SIMPLE -*RTH22P*
20 OPTION BASE 1
30 WIDTH "LPT1:",120
40 DEFSTR F
50 DEFINT I,K,Q,P
60 DEFDBL S
70 DIM H1(731),H2(731),X(731),Y(250),R(30,6)
80 INPUT "NOM DE LA STATION AMONT";S1$
81 INPUT "NOM DE LA STATIONaval";S2$
82 INPUT "PERIODE DE L'ANALYSE";AN1%,AN2%
90 LPRINT CHR$(27);CHR$(69);CHR$(14);"ANALYSE du TEMPS de PROPAGATION"
94 LPRINT
95 LPRINT "Bief: ";S1$;" - ";S2$:LPRINT:LPRINT" Période analyse : ";AN1%;" - ";AN2%:LPRINT:LPRINT CHR$(20)
100 INPUT "NOM FICHIER AMONT";F1
110 INPUT "NOM FICHIERaval";F2
120 OPEN F1 FOR INPUT AS 1
130 OPEN F2 FOR INPUT AS 2
140 FOR I=1 TO 731:INPUT #1,H1(I):INPUT #2,H2(I):NEXT I
150 CLOSE
160 INPUT "Hmin,Hmax,DH,PH";HIMIN,HIMAX,OH,PH
170 INPUT "Tmin,Tmax";T1,T2
180 INPUT "pas de temps";DT
190 LPRINT "Paramètres de l'analyse: ";HIMIN;" à ";HIMAX;" cms"
200 LPRINT "Tranche de hauteur: ";OH;" cms"
210 LPRINT "Pas: ";PH;" cms"
220 LPRINT:LPRIH1
230 FOR H=HIMIN TO HIMAX STEP PH
240 J=0
250 FOR T=T1 TO T2 STEP DT
260 J=J+1:Q=0:SX=0:SY=0:SY2=0:SKY=0
270 FOR K=1 TO 731-I
280 IF H1(K)>H OR H1(K)>DH THEN 350
290 IF H2(FIX(K+I))=-99 OR H2(FIX(K+I+1))=-99 THEN 350
300 Q=Q+1
310 X(Q)=H1(K):Y(Q)=H2(FIX(K+I))+(T-INT(T))*(H2(FIX(K+I+1))-H2(FIX(K+I)))
320 SK=SK+X(Q):SY=SY+Y(Q)
330 SX2=SX2+X(Q)^2:SY2=SY2+Y(Q)^2
340 SKY=SKY+X(Q)*Y(Q)
350 NEXT K
360 MX=SK/0:MY=SY/0:B=(Q*SKY-SX*SY)/(Q*SX2-SX^2):R=(SY-B*SX)/Q
362 SDY=0:FOR I=1 TO 0:SDY=SDY+RBS(Y(I)-(B*X(I)+R)):NEXT I
370 R=(Q*SKY-SX*SY)/SQR((Q*SX2-SX^2)*(Q*SY2-SY^2)):DM=SDY/Q
380 R(J,1)=T:R(J,2)=R:R(J,3)=MX:R(J,4)=MY:R(J,5)=Q:R(J,6)=DM
390 PRINT USING "DYM= #####.## Rmax= #####.## T= #####.## H= ##### X= #####.## Y= #####.##";R(J,6),R(J,2),R(J,1),R(J,5),R(J,3),R(J,4)
410 NEXT T
420 PRINT
430 JM=1
440 FOR I = 2 TO J:IF R(I,6)<R(JM,6) THEN JM=I
445 NEXT I
450 IF JM=1 THEN 460 ELSE 470
460 T2=T1+DT:T1=T1-2*DT:GOTO 240
470 IF JM=J THEN 480 ELSE 490
480 T1=T2-DT:T2=T2+2*DT:GOTO 240
490 PRINT USING "DYM= #####.## Rmax= #####.## T= #####.## H= ##### X= #####.## Y= #####.##";R(JM,6),R(JM,2),R(JM,1),R(JM,5),R(JM,3),R(JM,4)
500 LPRINT USING "Dymoy= #####.## Rmax= #####.## T= #####.## H= ##### X= #####.## Y= #####.##";R(JM,6),R(JM,2),R(JM,1),R(JM,5),CINT(R(JM,3)),CINT(R(JM
    ,4))
510 T1=R(JM,1)-2:T2=T1+2
520 NEXT H
530 END
```

```
10 REM Calcul de prévision journalière de S1 (amont) vers S2 (aval): "PREV1"
20 OPTION BASE 1
30 DEFINT H-M,A
40 DEFDBL P
50 DEFSTR F,S
60 DIM P(28),JM(12),CJM(12)
62 FOR I=1 TO 12:READ JM(I):NEXT I
64 DATA 31,28,31,30,31,31,30,31,30,31,30,31
66 IF (RH1-1900)/4=0 THEN JM(2)=29
70 INPUT "NOM des stations: amont,aval";S1,S2
80 INPUT "NOM DU FICHIER PMOD";FMOD
90 OPEN FMOD FOR INPUT AS 1
100 FOR I=1 TO 28:INPUT #1,P(I):NEXT I
110 CLOSE 1
120 INPUT "Date de l'observation amont:Jour,MOIS,ANNEE";J1,M1,RH1
130 INPUT "Hauteur amont observée en cms";H1
170 ISJ=0
180 FOR I=1 TO 12: ISJ=ISJ+JM(I)=CJM(I)=ISJ:NEXT I
190 J1C=CJM(M1)+J1-JM(M1) 'jour année H1
200 REM CALCUL DE H2
210 IF H1<P(13) THEN 220 ELSE 230
220 L=0:GOTO 240
230 IF H1<P(14) THEN L=4 ELSE L=8
240 H2=P(L+1)*H1^3+P(L+2)*H1^2+P(L+3)*H1+P(L+4)
250 REM CALCUL DU TEMPS DE PROPAGATION
260 IF H1<P(27) THEN 270 ELSE 280
270 L=14:GOTO 290
280 IF H1<P(28) THEN L=18 ELSE L=22
290 DT=P(L+1)*H1^3+P(L+2)*H1^2+P(L+3)*H1+P(L+4)
300 J2C=J1C+FIX(DT):HJ2=CINT((DT-FIX(DT))*24)
310 FOR I=M1 TO 12:IF J2C<CJM(I) THEN 340
320 NEXT I
330 J2C=J2C-CJM(12):RH1=RH1+1:FOR I=1 TO 3:IF J2C<CJM(I) THEN 340
335 NEXT I
340 M2=I
350 IF M2=1 THEN J2=J2C ELSE J2=J2C-CJM(M2-1)
360 PRINT "Cote calculée: ";H2;"cms à la station de ";S2;" le ";J2;"//";M2;"//";RH1
;" à ";HJ2;" heures"
365 GOTO 120
370 END
```

