

M0022/00

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MAGISTER EN HYDRAULIQUE

Présentée par  
Mr BERGHOUT Ali

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

INGENIEUR D'ETAT EN AMENAGEMENT ET GENIE HYDRAULIQUE

THEME

MODELISATION MATHHEMATIQUE DU MECANISME  
HYDRODYNAMIQUE DE L'ENVASEMENT DES RETENUES

Soutenue publiquement le ..05..octobre..2002.....Devant la commission :

Mr KETTAB	A.	Professeur	Président .
Mr BERKANI	M.	C.C	Rapporteur
Mr REMINI	B.	M.C	Examineur
Mr MEDDI	M.	M.C	Examineur
Mlle BENMAMAR	S.	C.C.	Examineur
Mr MATARI		D.G	Ministère de l'Equipements

المدرسة الوطنية المتعددة الفنون  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail  
à la nation Algérienne .

Ali

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à adresser ici nos vifs remerciements à Monsieur Miloud BERKANI , qui a dirigé cette thèse . Les encouragements qu'il nous a toujours prodigués nous ont beaucoup aidé dans les moments difficiles que nous avons traversés.

Que Monsieur le Professeur Ahmed KETTAB , qui a bien voulu présider le jury de notre thèse , trouve ici l'expression de notre sincère gratitude et nous le prions de croire à notre profonde reconnaissance .

Monsieur Boualem REMINI maître de conférence de l'université de BLIDA , Monsieur MEDDI M. maître de conférence de l'université de Mascara , Mlle Sadia BENMAMAR Directrice de Département Hydraulique à l'ENP , ont accepté d faire partie de notre jury : nous les en remercions très sincèrement .

Nous remercions Messieurs DERRAR et BARBARA du département Mathématique de l'Université de Blida et également Monsieur MIHIN S. de l'école Nationale Supérieure de l'Hydraulique de Soumâa .

Enfin, nous remercions Messieurs BERGHOUT M. , BERKAT , AZROU, ISGHI , AGGOUN , GUETTAS , MIHOUBI , KHETTAOUI , KHECHAB ainsi que Mesdemoiselles MOKHTARI et KHERROUBI .

الدراسة بالانتظام الآلي للرسوبيات في صومين اسد واديجاد  
 مناسبات الترسب. من اجل ذلك قمنا باعداد نموذج احصائي  
 للكمية الصلبة جبرولة الكمية السائلة (التدفق المائي) ودراسة  
 ازمطار المسببة لها.

في المرحلة الثانية قمنا بتقدير كمية المياه ودراسة الزمطار المسببة لها  
 في مرحلة زمنية ما، اذيجاد في النهاية كمية المواد العالقة المنقولة  
 عبر الجباري المائية لموض السد.

في المرحلة الثالثة، وبواسطه نموذج رياضي الذي اعد بطريقة الزجاء  
 المتناهي، محدد السرعة في مختلف نقاط حوض اسد وكذا تركيب المياه  
 بالمواد العالقة ومنها اذتسايك الرسوبيات في مختلف نقاط حوض السد.

**RÉSUMÉ :**

Le but de cette étude est d'estimer les apports solides à l'entrée de la retenue d'une part, et d'autre part de localiser les zones de sédimentations dans la retenue. Pour cela, nous avons élaborer un modèle statistique des débits solides en fonction des débits liquides et de l'intensité de pluie, ensuite on passe à une étude de simulation statistique des apports liquide (débits - intensités) afin d'estimer les apports solides. Ces résultats sont considérés comme des conditions à l'entrée de la retenue. Dans cette dernière, l'écoulement est biphasique régi par les équations de Reynolds (la phase liquide) et l'équation de diffusion (phase solide). En ajoutant à ce système les équations de conservation de masse de ces deux phases, ce système forme le système de base de notre modèle. On utilisant les méthodes des éléments finis, pour trouver enfin cinq systèmes d'équations algébriques, leur résolution donne les champs de vitesse et des concentrations dans la retenue durant une crue. L'introduction des résultats de la simulation comme des conditions à l'entrée de la retenue dans le modèle numérique donne les levés batymétriques de la retenue.

**ABSTRACT :**

The aim of this study is to make estimates of the solid alluvia at the entrance of the reservoir, on the one hand, and to locate the sediments zones in the reservoir on the other hand. For this purpose, we've elaborated a statistics model of a solid discharges in relation with liquid outputs and the rain-intensity. Then, we go over to statistical simulation study of liquid alluvia (flow-intensities) in order to estimate the solid ones. These results are considered as conditions for reservoir-entry. In this latter, the flow is double-phased ruled by Reynolds equations (the liquid phase) and the diffusion equation (solid phase). By adding to this system the equation of our model. By using the Finite element method, to found five algebraic equation systems, this solving gives the fields of speed and concentration in the reservoir during a flood. The introduction of the simulation results as conditions for the reservoir-entry in the numerical model gives the reservoir bathymetric rainings.

**Mots clefs :**

Envasement, débits solides, Ecoulements biphasique, diffusion, Crues, Eléments finis, Levés batymétriques

## SOMMAIRE

LISTE DES ALGORITHMES ET DES ORGANIGRAMMES .....	01
INTRODUCTION GENERALE .....	03

### CHAPITRE I

#### GENERALITES SUR L'EROSION, LE TRANSPORT ET LE DEPOTS DES SOLIDES

I.1. Introduction .....	03
I.2. Organigramme général de l'envasement et moyens de lutte .....	05
I.3. Le phénomène d'érosion .....	06
I.4. Facteurs influençants l'érosion .....	06
I.5. Le phénomène de transport solide .....	06
I.6. Le transport par charriage .....	06
I.7. Le transport en suspension .....	08
I.8. Prévision quantitative des matériaux en suspension .....	08
I.9. Prédétermination des volumes des vases dans un barrage .....	10
I.10. Prévision des taux de consolidation des dépôts solides .....	10

### CHAPITRE II.

#### ELABORATION D'UN MODELE STATISTIQUE DE DEBITS SOLIDES EN FONCTION DES DEBITS LIQUIDES ET INTENSITES DES PLUIES

II.1. Introduction .....	14
II.2. Définition d'un modèle statistique et ces avantages .....	14
II.3. Différents sortes de modèles .....	15
II.4. Notion d'approximation .....	16
II.5. Estimation des paramètres du modèle .....	18
II.6. Méthode des moindres carrées pondérées .....	18
II.7. Application .....	20

### CHAPITRE III.

#### ESTIMATION DES APPORTS LIQUIDES ET SOLIDES A L'ENTREE DE LA RETENUE.

III.1. Introduction .....	21
III.2. Simulation dans son aspect général .....	21
III.3. Principe de la simulation statistique .....	21
III.4. Avantages et inconvénients de la simulation .....	22
III.5. Conception d'un modèle de simulation .....	23
III.6. Paramètre temps en simulation .....	23
III.7. Génération des variables aléatoires .....	23
III.8. Approche de simulation .....	26

## CHAPITRE IV.

### FORMULATION DES EQUATIONS DE BASE.

IV.1. Introduction .....	32
IV.2. Mouvement moyen et mouvement d'agitation .....	32
IV.3. Equations de la phase liquide .....	33
IV.4. Equation de la phase solide .....	36

## CHAPITRE V.

### TRANSFORMATION DES EQUATIONS AUX DERIVEES PARTIELLES ( E.D.P) EN SYSTEMES D'EQUATIONS ALGEBRIQUES.

V.1. Introduction .....	39
V.2. Formulation en éléments finis .....	39
V.3. Formulation intégrale - Procédure de GALERKIN .....	40
V.4. Détermination de la fonction d'approximation .....	43
V.5. Intégration dans le temps .....	47

## CHAPITRE VI.

### PROGRAMMATION ET RESOLUTION DES SYSTEMES.

VI.1. Introduction .....	48
VI.2. Organigramme général du programme en éléments finis .....	48
VI.3. Les blocs fonctionnels du programme .....	49
VI.4. Les données .....	50
VI.5. Les conditions initiales et aux limites .....	50
VI.6. Procédure de calcul .....	50
VI.7. Résolution des systèmes .....	59
VI.8. Intégration dans le temps .....	61

## CHAPITRE VII.

### GENERALISATION DU MODELE POUR UNE PERIODE DE TEMPS.

VII.1. Introduction .....	62
VII.2. Hypothèses .....	62
VII.3. Notion de fonction aléatoire .....	62
VII.4. Interpolation des débits liquides et solides des crues par la fonction cubique de spline .....	65
VII.5. Validation des hypothèses .....	68

CHAPITRE VIII.

APPLICATION : CAS DE LA RETENUE DE BENI AMRANE.

VIII.1. Introduction .....	69
VIII.2. Interprétations des résultats .....	69
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	72
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	74
<b>ANNEXES</b> .....	76
<b>ANNEXE 1</b> Données .....	77
<b>ANNEXE 2</b> Résultats du modèle statistique. Station <b>LAKHDARIA GORGES</b> .....	87
<b>ANNEXE 3</b> Justification de l'algorithme de <b>BOX</b> et <b>MILLER</b> .....	96
<b>ANNEXE 4</b> Résultats de traitement de données par le logiciel <b>STATGRAF</b> .....	99
<b>ANNEXE 5</b> Résultats du modèle de simulation pour la station <b>LAKHDARIA GORGES</b> .....	108
<b>ANNEXE 6</b> Résultats du modèle numérique. Crue du 12 OCT. 1981 .....	112
<b>ANNEXE 7</b> Résultats du modèle numérique. Crue du 17 FEV. 1982 .....	122
<b>ANNEXE 8</b> Résultats du modèle général .....	133

## NOTATION

- $\tau_0$  : Contrainte de cisaillement.  
 $\rho, \gamma$  : Poids spécifique de l'eau.  
 $\gamma_1$  : Poids spécifique des matériaux.  
 $d_m$  : Diamètre moyen des matériaux.  
 $h$  : Hauteur en eau d'écoulement.  
 $l$  : Pente de la ligne de charge.  
 $\tau_{cr}$  : Tension tangentielle critique.  
 $v_s$  : Vitesse de chute des sédiments.  
 $D_c, \epsilon_m$  : Coefficient de diffusion.  
 $T_s$  : Apport moyen annuel solide.  
 $W_1$  : Masse volumique de la vase.  
 $u$  : Vitesse suivant x.  
 $v$  : Vitesse suivant y.  
 $\bar{u}$  : Vitesse moyenne suivant x.  
 $\bar{v}$  : Vitesse moyenne suivant y.  
 $u'$  : Fluctuation suivant x.  
 $v'$  : Fluctuation suivant y.  
 $P$  : Pression.  
 $\tau_{xx}$  : Contrainte tangentielle suivant xx.  
 $\tau_{xy}$  : Contrainte tangentielle suivant xy.  
 $\tau_{xz}$  : Contrainte tangentielle suivant xz.  
 $\tau_{yy}$  : Contrainte tangentielle suivant yy.  
 $\tau_{yz}$  : Contrainte tangentielle suivant yz.  
 $C$  : Concentration.  
 $c$  : Coefficient de CHEZY.  
 $\epsilon_x$  : Coefficient de diffusion turbulente suivant x.  
 $\epsilon_y$  : Coefficient de diffusion turbulente suivant y.  
 $U^*$  : Vitesse de cisaillement suivant x.  
 $V^*$  : Vitesse de cisaillement suivant y.  
 $S_x$  : Débit solide suivant x.  
 $S_y$  : Débit solide suivant y.  
 $\xi$  : Abscisse ( système de coordonnées local ).  
 $\zeta$  : Ordonnée ( système de coordonnées local ).  
 $z$  : Hauteur des sédiments.



## LISTE DES ORGANIGRAMMES

1. Organigramme général de l'emvasement des barrages et moyens de lutte.....	5
2. Organigramme des résultats d'une approximation .....	17
3. Organigramme d'application de la méthode des moindres carrées pondérées.....	20
4. Organigramme de conception d'un modèle de simulation .....	22
5. Organigramme de test de KHI DEUX .....	24
6. Organigramme de test d'autocorrection .....	25
7. Organigramme récapitulatif d'ajustement .....	28
8. Organigramme de simulation d'une variable aléatoire BOX-MULLER .....	30
9. Organigramme récapitulatif de simulation .....	31
10. Organigramme général du programme en éléments finis .....	48
11. Organigramme des blocs fonctionnels du programme .....	49
12. Organigramme récapitulatif des caractéristiques numériques d'une fonction aléatoire.	65
13. Organigramme de la méthode spline cubique .....	67
14. Organigramme de validation des hypothèses .....	68

## LISTE DES ALGORITHMES

1. Algorithme de génération des variables aléatoires ( THOMAS ) .....	29
2. Algorithme d'intégration numérique ( HAMMER ) .....	51
3. Algorithme de construction de la matrice de rigidité pour les hauteurs .....	52
4. Algorithme de construction de la matrice de rigidité pour les vitesses .....	53
5-8. Algorithmes de construction des vecteurs forces .....	54-59
9. Algorithme d'intégration dans le temps .....	61

Nous avons tenté dans ce travail, « Modélisation mathématique du mécanisme hydrodynamique de l'envasement des retenues », de simuler le mouvement d'une gouttelette d'eau tombée dans un point du bassin versant, s'écoulant dans les lits affouillables, qui ce sont créés naturellement par cet écoulement, jusqu'à la retenue.

L'écoulement qui érode un tel lit, et qui dépose les sédiments transportés dans la retenue, subit, à son tour, l'influence de la forme du lit qui s'érode et de la retenue qui s'envase.

On se trouve, en fait, placé devant un problème qui semble être un cercle vicieux et qui, par conséquent, ne paraît, de prime abord, pouvoir être résolu, ce problème, toute fois ne peut manquer de séduire le chercheur et d'être important pour le technicien.

Le phénomène de départ est l'érosion. Les produits de l'érosion sont entraînés vers l'aval. Ils peuvent se déposer à la limite des champs contre les obstacles ou se déposer en route avant d'arriver en cours d'eau.

Les sédiments qui parviennent se classent en deux fractions distinctes : le débit solide en suspension et le débit de fond (par charriage). Entre les deux fractions du débit solide, celle qui est la plus facile à mesurer, est la fraction transportée en suspension. Cette fraction est en général, prépondérante, représentant un pourcentage d'environ 90% du débit solide total, non compris les matières dissoutes.

Les matériaux en suspension sont transportés de l'amont vers l'aval jusqu'aux champs où les vitesses de l'eau sont assez réduites pour provoquer le dépôt.

Les phases d'érosion, de transport et de dépôt doivent être soumise chacune à l'étude. Pour cela nous avons consacré le premier chapitre, pour les généralités sur l'érosion, le transport et le dépôt solides ( les trois phases ).

La première phase qui est l'érosion dépend de plusieurs facteurs, on cite le débit liquide ( ruissellement ), intensité de pluie, les caractéristiques topographique, lithologique, couverture végétale etc..

Les deux premiers facteurs climatiques ( débit liquide et intensité de pluie ) sont très variables d'un point à un autre, et pour le même point durant la même crue, c'est pour ça qu'il ne suffit pas de considérer les statistiques annuelles, il faut considérer les statistiques saisonnières à l'échelle des crues, pas à une échelle globale.

Quand on a affaire avec un grand bassin versant, constitué de terrains très hétérogènes, il arrive que la crue soit le résultat d'averse tombant sur des zones plus ou moins érodables.

Il y a très grand intérêt à différencier ces zones, en fonction de leur érodabilité. Cette individualisation permettra d'établir des programmes rationnels de traitement des bassins contre l'érosion. Si on dispose d'un réseau des stations hydrométriques, implanté dans le bassin en fonction de l'érodabilité des zones ( Plus ou moins homogène ), par un traitement

statistique des données à l'échelle des crues, on peut établir un modèle de débit solide en fonction de débit liquide et de l'intensité de pluie, pour chaque zone. ( CHAP. II )

A partir de ces modèles, on fait des simulations statistiques des apports liquides et des intensités des pluies, ce qui donnent les apports solides des zones, le cumul donne les quantités des sédiments transportées par les crues. ( CHAP. III ).

Ces dernières atteignent la retenue en deux phases, la phase liquide régie par les équations de **Reynolds**, tandis que la phase solide est régie par l'équation de diffusion. En ajoutant les équations de conservation de masse des deux phases. Ce système d'équations aux dérivées partielles ( E.D.P ), constitue la base de notre modèle numérique. ( CHAP. IV )

On prend une approximation triangulaire quadratique pour les vitesses et les concentrations et linéaire pour les hauteurs, ces approximations qui assurent la continuité dans les éléments et ainsi qu'aux leurs frontières. En utilisant la procédure de **GALERKIN** et après intégration de ce système des E.D.P , on trouve cinq systèmes d'équations algébriques linéaires dont les matrices de rigidité ne dépendent pas du temps. ( CHAP. V )

Avec l'utilisation de l'outil informatique, on peut calculer les éléments des matrices de rigidité et des vecteurs forces pour former et résoudre les systèmes, à fin de trouver les champs des vitesses, des concentrations dans la retenue, durant une crue. ( CHAP. VI )

L'assemblage des deux parties du modèle ( simulation statistique et le modèle numérique ), nous oblige à faire un lissage des résultats de la première partie, en utilisant le cubique de spline. Pour les considérer comme des conditions à l'entrée de la retenue ou deuxième modèle, pour obtenir en fin les levés batymétriques de la retenue en fonction du temps. ( CHAP. VII )

L'application du modèle est faite sur la retenue de **BENI AMRANE** ( le bassin versant des **ISSERS** ). ( CHAP. VIII )

En fin l'ouvrage est annexé par quelques données et les résultats des modèles.

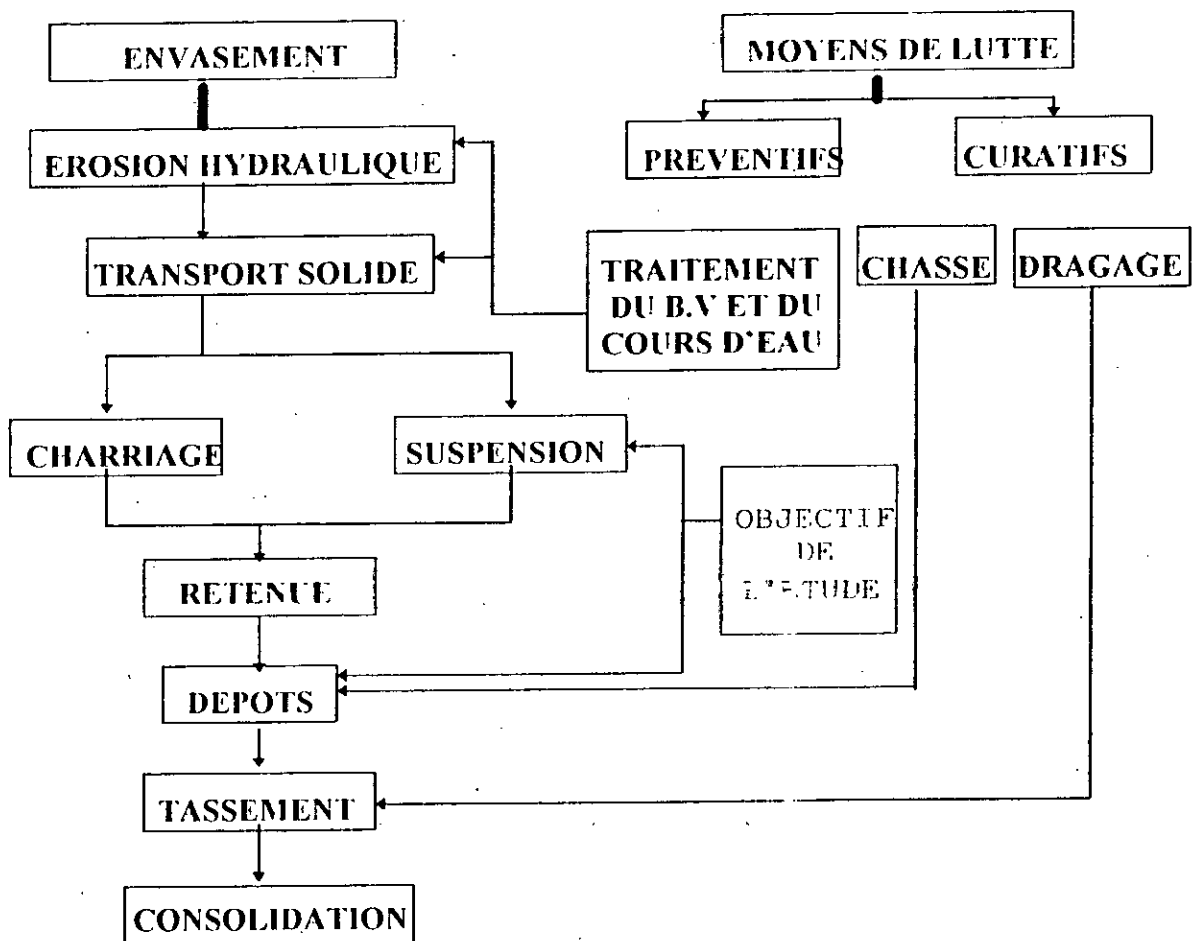
# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR L'EROSION, LE TRANSPORT ET LE DEPOT DES SOLIDES

### 1.1. - Introduction

L'étude d'un phénomène est d'autant plus compréhensif et plus complet si les paramètres causatifs du dit phénomène sont clairement définis. Aussi est-il nécessaire d'aborder le délicat problème du transport des solides par l'eau à l'état de granulats sans cohésion en commençant par les facteurs qui l'induit à partir de l'érosion, qui est la première phase de l'envasement. A la phase du transport, les cours d'eau peuvent donner des débits solides importants, ces derniers se déposent en franchissant la retenue. L'organigramme de ce phénomène est le suivant.

### 1.2. - L'organigramme général de l'envasement et moyens de lutte: [15]



### **1.3. - Le phénomène d'érosion**

Sous l'action d'agents comme le vent, la pluie, l'homme, les animaux etc..., des particules de la couche superficielle du sol peuvent être arrachées et transportées. C'est le phénomène d'érosion.

### **1.4. - Facteurs influençant l'érosion: [12]**

#### **1.4.1. - La nature géologique des sols:**

Les sols en nature d'alluvions à caractère pulvérulent se prêtent beaucoup plus facilement à l'érosion. Les sols rocheux par contre résistent beaucoup et même lorsqu'ils se désagrègent ils donnent naissance à des blocs difficiles à transporter.

#### **1.4.2. - Le relief :**

Les régions montagneuses à fortes pentes favorisent l'érosion comparativement aux régions de plaines.

#### **1.4.3. - Le climat :**

Les climats tropicaux, les climats comportant des précipitations pluviales particulièrement violentes (pays de moussons - pays méditerranéens) sont sujets à d'importants phénomènes érosifs.

#### **1.4.4. - La végétation :**

La végétation exerce une puissante action fixatrice des sols et les protègent donc contre le ruissellement et par conséquent l'arrachement des particules solides (érosion).

### **1.5. - Le phénomène de transport solide :**

On désigne sous le terme de transport solide l'entraînement des solides à l'état granulaire ou particulaire sous l'action de ruissellement sur les versants et l'écoulement dans les cours d'eau. On distingue le transport solide par suspension et par charriage.

### **1.6. - Le transport par charriage [3], [10]**

On dit qu'il y a charriage quand il y a progression des granulats dans le sens du courant en glissant ; en roulant (ou bien en sautant légèrement sur le fond) sous l'action des forces hydrodynamiques. Ce phénomène se produit quand l'énergie turbulente n'arrive plus à vaincre la pesanteur. Dans ce transport la distance entre particules est très faible.

Remarque : On dit qu'il y a saltation quand on observe une suite d'envols et de retombés successifs à des distances relativement appréciables.

## I.6.1. - Caractéristiques du transport par charriage

### I.6.1.1. - Seuil de charriage

La notion de seuil se met en évidence expérimentalement en faisant augmenter progressivement la vitesse de l'eau sur un lit de granulats. En observant le phénomène on constate que les particules ne commencent à bouger que lorsqu'une certaine vitesse est atteinte. Cette vitesse caractéristique du débit de transport solide correspond au seuil du mouvement.

### I.6.1.2. - Conditions d'entraînement des particules solides

On met ce phénomène en évidence en comparant directement la force déstabilisatrice ou motrice encore appelée force tractrice (dû à l'écoulement) à la capacité de résistance des matériaux qui tapissent le fond du lit.

On considère des forces rapportées à l'unité de surface :  
pour la force tractrice SELIM YALIN donne pour un début d'entraînement de matériaux de fond la formule suivante :

$$\tau_o = \gamma h I = A (\gamma_1 - \gamma) \cdot d_m$$

A : coefficient déterminé par la granulométrie

$\gamma_1$  : poids spécifique des matériaux de fond

$\gamma$  : poids spécifique de l'eau

$d_m$  : diamètre moyen de ces matériaux

h : hauteur d'eau en écoulement bidimensionnel correspondant au débit d'entraînement

I : pente de ligne de charge

La résistance des matériaux est exprimée sous la forme d'une tension tangentielle critique.

$$\tau_{cr} = f_2 (d)$$

$f_2$  : est déterminée expérimentalement en écoulement turbulent

d'après ROUSE  $f_2 = 0,06 (\gamma_1 - \gamma)$

et pour MEYER PETER  $f_2 = 0,047 (\gamma_1 - \gamma)$

Le début d'entraînement des particules solides correspond à la condition :

$$\tau_{cr} = \tau_o$$

## **1.7. - Le transport en suspension: [3], [10]**

On dit qu'il y a transport en suspension quand les granulats progressent dans le sens du courant au sein même du liquide sans jamais retomber (l'énergie turbulente suffisant à vaincre le champ de pesanteur) sauf très épisodiquement sur le fond. Dans ce cas les distances entre particules sont assez grandes pour que ces dernières soient peu en contact les unes avec les autres, sauf quand la concentration en particules devient très importante.

### **1.7.1. - Caractéristiques des matériaux transportés par suspension:**

Les matériaux usuels transportés par les fleuves et rivières dans les conditions habituelles d'écoulement que l'on rencontre dans la nature ont des dimensions de l'ordre du millimètre. Ce sont en général des sables fins ou très fins de 0,1 mm environ ou encore des vases ou des argiles dont les dimensions peuvent atteindre une fraction de micron

Dans les cours d'eau algériens, les concentrations moyennes de 10 à 20 g/l avec des valeurs maximales dépassant 100 g/l (lors des crues d'automne).

### **1.7.2. - Cause physique du transport en suspension:**

La turbulence est la cause physique fondamentale du transport des matériaux solides en suspension par l'eau est due à la turbulence, or les écoulements de tous les cours d'eau naturels sont turbulents. Considérons un grain de matériaux caractérisé par sa vitesse de chute en eau calme  $W$ . Soit  $u'$  la fluctuation turbulente de vitesse  $u$ . Si  $u'$  est dirigée vers le haut et est supérieure à  $W$ , le grain va monter à une certaine hauteur et sera alors transporté par la vitesse moyenne locale, avant de redescendre, remonter etc.. Le débit en particules solides ainsi dirigé vers le haut peut être compensé par la tendance des matériaux à tomber, d'où un état d'équilibre qui se traduit par un régime permanent de concentration moyenne à une hauteur donnée.

On peut donc dire en fin de compte que la turbulence agit comme une espèce d'ascenseur plus rempli à la montée qu'à la descente, qui remonte de ce fait les matériaux soumis ensuite à une vitesse moyenne horizontale beaucoup plus élevée qu'au fond.

### **1.7.3. - Répartition des concentrations des particules en suspension:**

On considère un écoulement plan dans un canal infiniment large en régime uniforme. Appelant  $c$  la concentration d'équilibre moyenne à une hauteur donnée, on raisonne suivant **SCHMIDT - ROUSE** de la façon suivante :

La concentration, à tout niveau, est considérée comme une propriété de l'écoulement, diffusée par la turbulence, dans le sens du gradient négatif.



Partant de cette formulation, le transport vers le haut de matière en suspension, est donné par :

$$\gamma = D_c \, dc/dz$$

ou :  $D_c$  : représente le coefficient de diffusion  
 $z$  : la distance verticale mesurée à partir du fond.

Le transport vers le bas est considéré, en un point, comme proportionnel à la concentration moyenne  $c$ , et à la vitesse de sédimentation  $v_s$ .

Donc :  $\gamma = cv_s$

Pour un régime permanent de suspension, ces deux quantités sont égales, et par conséquent :

$$(1) \quad cv_s + D_c \, dc/dz = 0$$

L'intégration de l'équation (1) suivant  $z$  nous donne :

$$C/C_a = e^{-V_s/D_c \, dz} \quad (2)$$

On détermine  $D_c$  en considérant que le coefficient de diffusion des particules solides est égal au coefficient de diffusion de quantité de mouvement. On obtient ainsi :

$$D_c = K U_* y (1 - z/z_0)$$

$$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$$

où :  $K$  : représente la constante universelle de VON KARMAN.  
 $z_0$  : la profondeur de l'écoulement

En intégrant l'équation différentielle (2), on obtient :

$$(3) \quad C/C_a = \left[ \frac{(z_0 - z)/z}{a(z_0 - a)} \right]^A$$

avec :

$$A = V_s / K U_*$$

$A$  : paramètre de suspension

$C_a$  : concentration en un point de hauteur  $a$  au dessus du radier

La formule (3) s'écrit

$$C = C_{ste} (z_0/z - 1)^A \quad (4)$$

et permet d'avoir la concentration des particules en suspension en différents points.

## **I.8. - PREVISION DES QUANTITES DES MATERIAUX EN SUSPENSIONS : 2**

L'ensemble des méthodes de quantification de la matière en suspension est basée sur modèles de conduite, parmi lesquels on cite :

### **I.8.1. - MODELE DE TEXERONT :**

Ce modèle est basé sur la corrélation établie entre l'apport moyen annuel liquide (A) et l'apport moyen annuel solide.

La formule :

$$T_s = a * A^b \text{ (tonnes/km}^2\text{/an)}$$

A : La lame d'eau moyenne annuelle (mm/an)

a,b : paramètres empiriques qui varient en fonction des caractéristiques du terrain.

### **I.8.2. - MODELE DE SOGREA H :**

Ce modèle est inspiré de la relation de **TIXERONT**, remplaçant l'apport moyen annuel liquide par le ruissellement R.

La formule :

$$T_s = a * R^b$$

Actuellement le modèle le plus utilisé en Algérie est celui de **TIXERONT** adapté à l'échelle saisonnière.

On remarque que ces modèles quantifient le transport solides en suspension d'une manière globale à l'échelle saisonnière, annuelle etc.

## **I.9. - PREDETERMINATION DES VOLUME DES VASES DANS UN BARRAGE :**

### **I.9.1. - INTRODUCTION :**

Les sédiments entrant dans une retenue s'y déposent en franchissant le barrage; sont généralement des fines particules en suspension ou déplacées par des courants de densité. Les

caractéristiques des dépôts solides varient d'une retenue à une autre. Les levées batymétriques des retenues et les données recueillies sur les dépôts solides ont permis de déterminer une grande partie des caractéristiques des phénomènes de dépôts. On dispose également des relations empiriques établies à partir des levées batymétriques des retenues et de données obtenues par des prélèvements hydrométriques. Ces relations portent sur le taux de rétention des dépôts et la hauteur de la couche des sédiments au droit du barrage.

### 1.9.2. -TAUX DE RETENTION :

Le taux de rétention d'une retenue est le rapport entre la quantité des sédiments déposés et celle des apports solides totaux : celui-ci dépend du volume et de la granulométrie des sédiments entrants, des débits s'écoulant dans la retenue et des niveaux d'exploitation de la retenue. Les relations empiriques les plus utilisées pour la détermination du taux de rétention sont :

- Relations de **GUIMAN BRUNE** et **M.A.CHURCHIL**. Ces relations ont été améliorées par **B.N. MURTHY**.

La méthode de **GUIMAN BRUNE** fait intervenir le rapport entre la capacité de la retenue et les apports annuels moyens.

La méthode de **Churchil** sur le taux de rétention donne le pourcentage des apports solides traversant la retenue en fonction d'un indice d'alluvionnement. Cet indice est défini comme le rapport entre la période de rétention et la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau à travers la retenue.

### 1.10. - PREVISION DES TAUX DE CONSOLIDATION DES DEPOTS SOLIDES :[5]

Le prélèvement des sédiments déposés au fond des retenues, fournit des informations utiles sur la masse volumique de ces dépôts. La masse volumique des matériaux déposés exprimée en masse sèche par volume unitaire, sert à convertir en volume la masse des apports solides totaux dans la retenue. Les apports solides totaux sont calculés à partir des mesures des sédiments en suspension et charriés.

Les principaux facteurs dont dépend la masse volumique des dépôts solides, dans une retenue sont

- a) Le mode d'exploitation de la retenue.
- b) La texture et les dimensions par particules solides déposées.
- c) Le taux de compaction ( ou la consolidation ) des dépôts solides.

La masse volumique dépend essentiellement du premier facteur.

La méthode de détermination de la masse volumique des sédiments déposés, exposée dans la revue "**SEDIMENTATION CONTROL OF RESERVOIR**", prend en compte les trois facteurs cités ci-dessous. Elle est basée sur la formule de **Miller**.

Les modes d'exploitation des retenues ont été classés comme suit :

type	mode d'exploitation de la retenue
1	sédiments toujours submergés ou pratiquement submergés.
2	creux moyens à considérable en temps normal.
3	retenue vide en temps normal.
4	sédiments dans le lit mineur

Une fois le type de la retenue choisi, on peut estimer la masse volumique initiale des dépôts solides, en utilisant l'équation suivante :

$$W1 = Wc.Pc + Wm.Pm + WsPs \quad (1)$$

W : masse volumique en Kg/M

Wc, Wm et Ws : coefficients respectifs pour l'argile, le silt et le sable donnés par le tableau

type	Wc	Wm	Ws
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Pc, Pm, Ps : pourcentages respectifs d'argile, du silt et du sable.

On note que :

l'argile ..... dimensions < 0,004 mm

Silt : 0,004 mm < dimensions < 0,062 mm

Sable 0,062 mm < dimensions < 2 mm

La masse volumique des sédiments déposés augmente en fonction du temps de séjour passés dans la retenue suivant l'équation :

$$w = w1 + K \log 10 T$$

w : masse volumique après T années.

w1: masse volumique initiale ( d'après l'équation 1)

K : coefficient dépendant de la granulométrie "équation de KOELTZER ".

**MILLER** a formulé l'équation ci dessous qui permet de déterminer approximativement la masse volumique moyenne de tous les sédiments déposés au cours de T années d'exploitation d'une retenue.

$$w_T = w + 0,4343 \cdot K \cdot ((T/(t-1)) (\log_{10}(T)) - 1)$$

$w_T$  : masse volumique après T années.

$w$  : masse volumique initiale

K: constante dépendant de mode d'exploitation et de la granulométrie des sédiments donnée par le tableau :

Type	K		
	sable	silt	argile
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

## CHAPITRE II

# ELABORATION D'UN MODELE STATISTIQUE DE DEBITS SOLIDES EN FONCTION DES DEBITS LIQUIDES ET DES INTENSITES DE PLUIES

### II.1. - INTRODUCTION :

Ce chapitre sera consacré à l'élaboration d'un modèle statistique, qui permet une représentation adéquate d'un phénomène dont le comportement est décrit par les données mesurées aux stations hydrométriques (débits liquides et solides) et pluviométriques (intensité de pluie).

En pratique, cette élaboration dépend essentiellement du concepteur qui doit définir les caractéristiques de son échantillon, on cite entre autre:

- \*La précision de mesure des données
  - \*Les raisons sur lesquelles le décideur s'est basé pour confirmer l'existence d'une relation fonctionnelle entre les variable numérique.
  - \*Possibilité de proposer un modèle précis et de faire des hypothèses à priori sur les données
  - \*La manière d'obtention de l'échantillon statistique.
- en effet, toutes ces caractéristiques vont nous permettre de choisir la méthode la plus efficace pour la manipulation de ces données, ainsi:
- \*La précision de mesure permet le choix entre une interpolation est une approximation.
  - \*La nature de la relation fondamentale (dynamique ou empirique) entre les variables permet le choix entre un modèle de connaissance ou de conduite, respectivement.
  - \*La possibilité de proposer un modèle permet le choix entre une analyse de données ou une approximation de celles-ci par des fonctions analytiques .
  - \*Le choix de l'échantillon donne les perspectives d'utilisation du modèle.

### II.2.- DEFINITION D'UN MODELE STATISTIQUE ET SES AVANTAGES:

Un phénomène (système) hydraulique, physique...etc, peut se concevoir comme étant une relation entre des causes (variables d'entrée) et des conséquences ( variables de sortie ) que l'on peut schématiser comme suit:

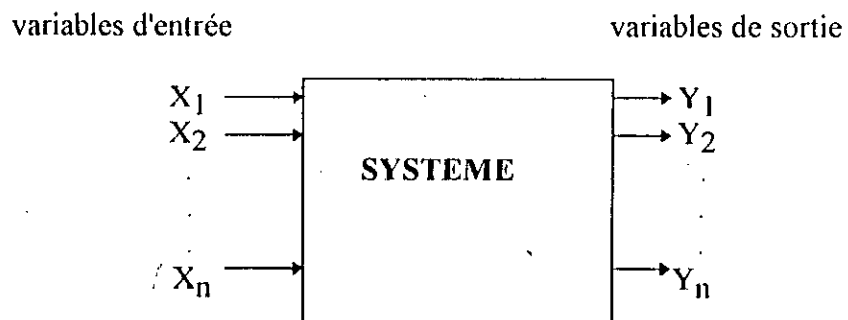


Schéma 3.1

Généralement, l'étude d'un tel phénomène consiste à prévoir l'état ou l'évolution des grandeurs de sortie en réponse à une valeur ou une variation des grandeurs d'entrée à l'aide d'un modèle. Ce modèle est la représentation formelle de connaissances relatives au phénomène considéré.

### **II.2.1.- DEFINITION D'UN MODELE:**

Un modèle est défini comme étant une représentation fonctionnelle entre les variables d'entrée et les variables de sortie.

### **II.2.2.- AVANTAGES D'UN MODELE :**

Parmi les avantages d'un modèle, on cite :

- \* L'exploitation des données mesurées ou expérimentales.
- \* Réduction de l'ensemble de données au nombre de paramètres de modèle, tout en gardant l'information contenue dans les données.
- \* Simulation du comportement de système.
- \* Exploration des conséquences logiques des hypothèses.
- \* Amélioration de la conception des séries de mesures brutes (homogénéité, continuité...).

L'élaboration d'un modèle nécessite un critère ou une procédure de décision portant sur son acceptation ou sur son rejet.

L'inconvénient d'un modèle est lié directement au critère de décision qui pourra nous donner le pourcentage des informations expliquées par le modèle avec un certain risque adopté par le concepteur.

### **II.3. - DIFFERENTES SORTES DE MODELES :**

Selon la base théorique, sur laquelle le modèle est conçu, on distingue deux types de modèles:

#### **II.3.1. - MODELE DE CONNAISSANCE .**

Si la décomposition d'un système en éléments de structure connue et l'établissement des conditions d'équilibre entre ces structures élémentaires sont possibles, on peut exprimer la relation dynamique qui existe entre les variables d'entrée et de sortie du système, on parle alors d'un modèle de connaissance.

#### **II.3.2. - MODELE DE CONDUITE :**

Si l'on a affaire à un système de structure trop complexe, ou si aucune base théorique n'existe pour suggérer une forme représentative de la relation entre les variables d'entrée et de sortie du système alors on doit proposer une relation empirique, et on parle souvent d'un modèle de conduite du système.

En résumé, un modèle de connaissance

$$Y = F(x) + e$$

est caractérisé par l'existence d'un résidu dû à des erreurs systématiques sur les mesures, par contre un modèle de conduite

$$Y = F(x) + \varepsilon$$

est caractérisé par l'existence d'un résidu dû à des fluctuations aléatoires (bruits résultants des variations aléatoires de variables incontrôlables).

La connaissance du type du modèle joue un rôle très important dans l'amélioration du modèle représentatif des données hydrologiques. L'amélioration du modèle de connaissance nécessite une augmentation de la précision des mesures effectuées tandis qu'une amélioration d'un modèle de conduite exige la recherche soit d'autres variables qui influent sur le comportement du phénomène soumis à la modélisation, soit d'autre opérateur de transformation des variables de causes en variables conséquences.

#### REMARQUE:

Le modèle qu'on veut élaborer est un modèle de conduite.

### II.4. - NOTION D'APPROXIMATION:

Une approximation consiste en la représentation algébrique des données qui permet l'utilisation de l'essentiel de l'information contenue dans ces données.

Une telle approximation est utilisée dans le cas de mesure, dont la précision est rendue douteuse à cause de perturbations incontrôlées. L'objectif recherché par celle-ci est d'essayer d'éliminer autant que possible l'influence de bruit de mesure.

#### II.4.1. - QUALITE D'UNE APPROXIMATION:

Soit un ensemble de données numériques  $(Y(X_i) \quad , i=1,n)$  qu'on veut les approximer par une fonction analytique  $Y^*(X_i)$ .

Une bonne approximation consiste à rendre la différence  $Y(X_i)-Y^*(X_i)$  petite dans un certain sens. Afin de celle-ci, on mesure généralement la distance entre la fonction  $Y$  et son modèle  $Y^*$  par l'une des normes suivantes.

L:la norme de Laplace.

$$\|Y - Y^*\|_1 = \sum |Y - Y^*|$$

L:la norme Euclidienne.

$$\|Y - Y^*\|_2 = \sum (Y - Y^*)^2$$

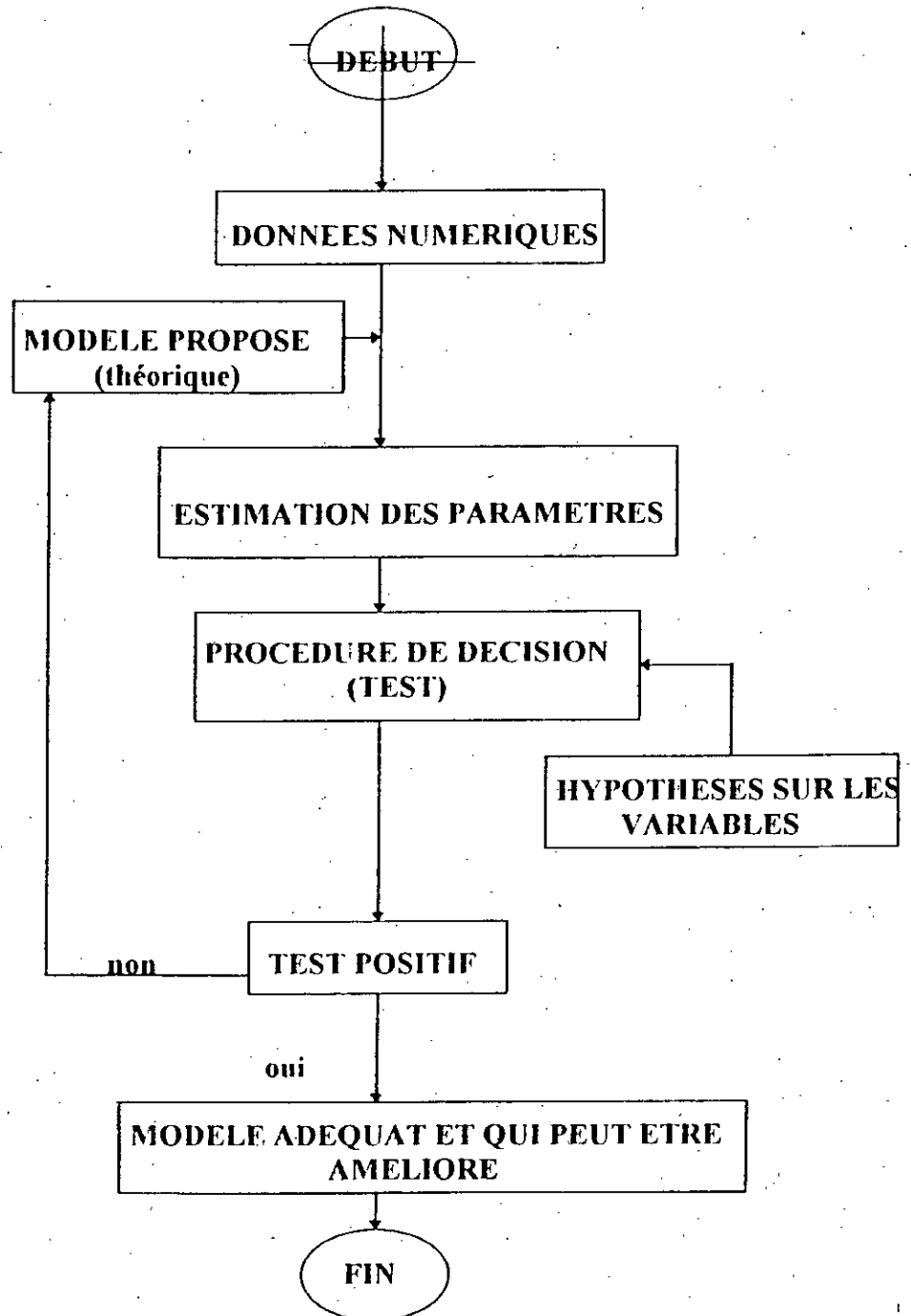


L: la norme de mini -max de Laplace-Tchebitchev

$$\|Y - Y^*\|_{\infty} = \max|Y - Y^*|$$

#### II.4.2. - RESULTAT D'UNE APPROXIMATION:

Le résultat d'une approximation est un modèle jugé par le concepteur comme étant le mieux représentatif des données existantes.



## II.5. - ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE:

En pratique cette estimation n'est pas toujours à la portée du concepteur et avant de procéder à l'élimination. Il est intéressant de vérifier si le modèle proposé est linéaire, linéarisable ou non linéarisable au sens des paramètres et non au sens des variables.

En effet, un modèle est linéaire s'il peut s'écrire sous la forme:

$$Y = C_1.F_1(x) + C_2.F_2(x) + \dots + C_m.F_m(x) \quad (1)$$

où  $F_i$  ne peut dépendre que de  $x$ .

un modèle est linéarisable s'il peut être ramener à la forme (1) par composition par une fonction  $G(x)$ .

Soit  $Y_1 = F(x, c)$  un modèle non linéaire

$$G(Y) = G(F(x, c)) = C_1.F_1(x) + C_2.F_2(x) + \dots + C_m.F_m(x)$$

un modèle linéarisé

Un modèle est non linéarisable s'il ne peut être ramener à la forme (1).

En général, pour les modèles linéaires et linéarisables la méthode des moindres carrées est la plus utilisée pour l'estimation des paramètres. Concernant les modèles non linéarisables, les méthodes de la programmation non linéaire sont inévitables.

## II.6. - METHODE DES MOINDRES CARREES PONDEREES:

La méthode des moindres carrés est un outil mathématique permettant de faire une approximation de données numériques par une fonction analytique.

Elle consiste en la minimisation de la norme L sous un ensemble de contraintes sur les données.

### II.6.1.- FORMULATION MATHÉMATIQUES:

Étant donné un modèle  $Y = F(x, c) + \varepsilon$  où  $\varepsilon$  = résidu.  
 $c$  = paramètres.

L'estimation des paramètres au sens des moindres carrés est faite sous le critère

$$\text{MIN}(((y-F(x,c))^T * (Y-F(x,c))) = \text{Min} (\varepsilon^T, \varepsilon)$$

Dans de nombreux problèmes d'approximation, la norme L est inadéquate du fait que certaines valeurs peuvent être plus précises que d'autres. L'approximation doit être beaucoup plus influencée par les mesures précises que par les autres mesures, pour cela l'introduction d'un coefficient de pondération noté  $W$  ( $W \geq 0$ ) est associé à chaque mesure, ainsi le critère devient:

$$\text{MIN}(\varepsilon^T \cdot W \cdot \varepsilon)$$

où  $W$ : matrice de pondération

En pratique, il existe plusieurs techniques d'introduire le coefficient de pondération, on cite entre autre:

\*Dans le cas où les mesures sont données sur un intervalle de points  $(Y \pm \delta_i)$  alors:

$$W = 1/\delta_i$$

où  $\delta_i$  = l'écart type de l'observation  $Y$

\*Dans le cas où le modèle a été linéarisé, il est souvent possible de tenir grossièrement compte de la transformation due à la linéarisation  $W$  donne par:

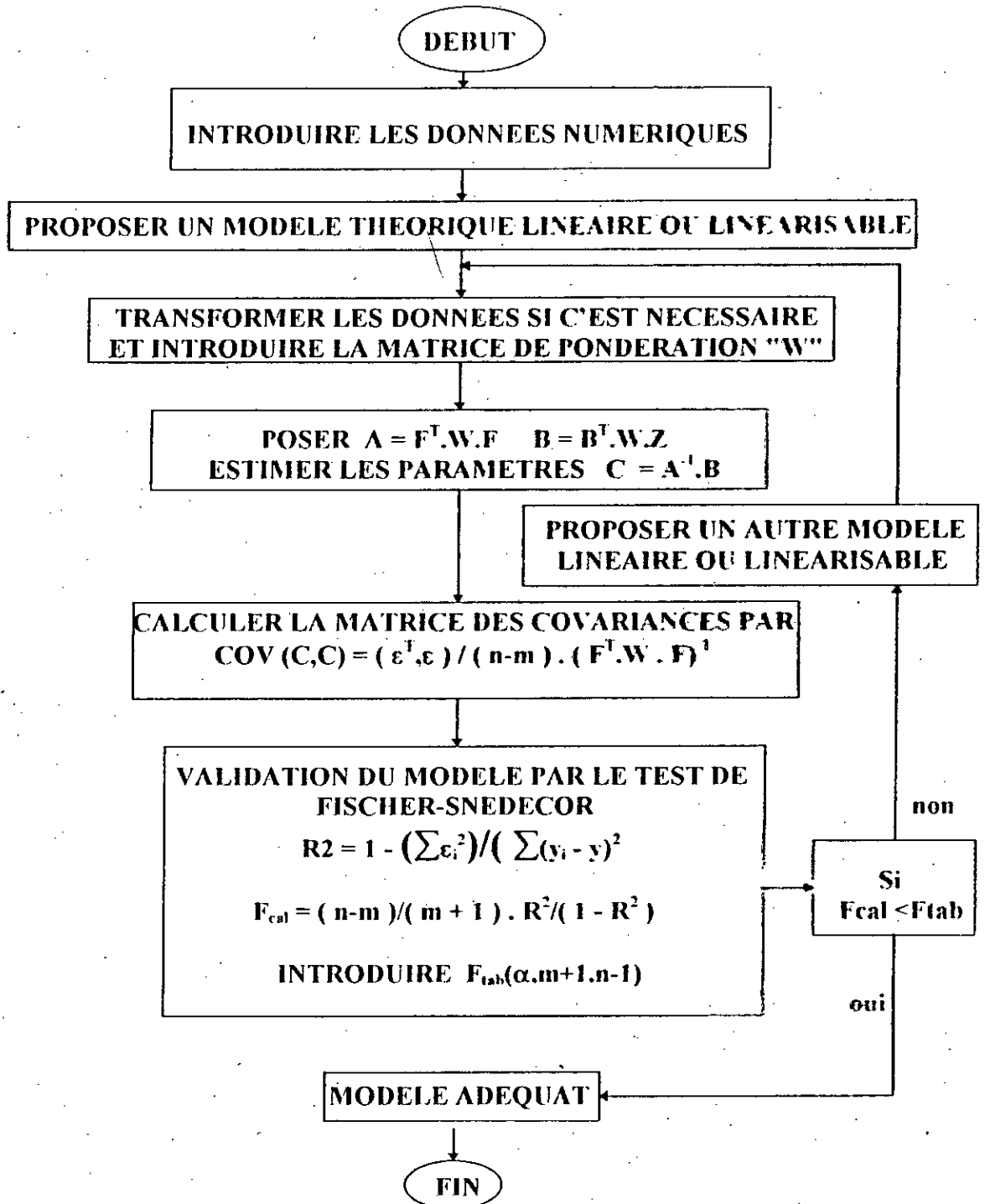
$$W_i = \left[ \left[ \left[ \frac{\partial E_i}{\partial \varepsilon_i} \right]_{\varepsilon_i=0} \right]_{E_i=0} \right]^{-1} \quad i = 1, \dots, n$$

telque:  $y_i^* - y_i = \varepsilon_i$  et  $Y_i^* - Y_i = E_i$

$y_i$  est la transformation de  $Y_i$  par linéarisation

## II.7.- APPLICATION:

### ORGANISATION D'APPLICATION DE LA METHODE DES MOINDRES CARRES PONDEREES



## CHAPITRE III

# ESTIMATION DES APPORTS LIQUIDES ET SOLIDES A L'ENTREE DE LA RETENUE DE LA RETENUE

### III.1.- INTRODUCTION:

Dans le but de faire une estimation des apports liquides et solides à l'entrée de la retenue, nous proposons de procéder à cela par une méthode de simulation statistique permettant de fournir un outil, plus ou moins efficace, pour aboutir à une telle estimation.

### III.2. - SIMULATION DANS SON ASPECT GENERAL:

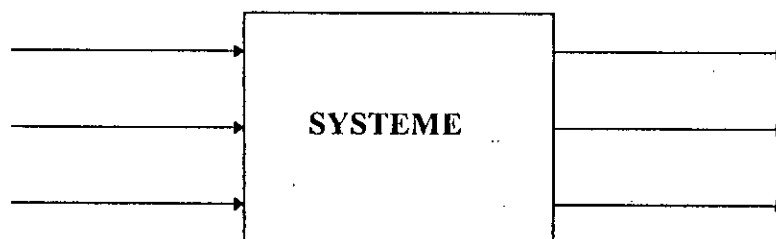
La simulation est une technique permettant d'étudier le comportement d'un système d'une manière artificielle. Elle peut être considérée comme une méthode appropriée à l'étude de systèmes complexes .

Dans de nombreux problèmes pratiques la simulation peut être substituée à l'expérimentation réelle, on cite en particulier les cas suivants:

- Les coûts d'expérimentation réelle sont trop élevés.
- La non reproductibilité de l'expérimentation réelle (expérimentation destructive).
- Dans des conditions opérationnelles irréalisables tels que les phénomènes naturels.

### III.3. - PRINCIPE DE LA SIMULATION STATISTIQUE:

La simulation statistique repose sur le principe de la méthode de **Monté-carlo**, qui consiste à injecter dans le système pour estimer ,à la sortie, les caractéristiques opératives du phénomène soumis à expérimentation



échantillon statistique

caractéristiques opérations

Schéma 1

### III.4. - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA SIMULATION:

Comme toute approche scientifique, la simulation présente des avantages et des inconvénients. Il est nécessaire de souligner, tout d'abord, qu'une simulation dans certains cas donne des résultats inacceptables et elle est considérée comme étant un travail supplémentaire dans le cas où le développement analytique d'une étude est possible.

Parmi les avantages on cite:

- Possibilité de résoudre des problèmes complexes pour explorer des nouveaux modes d'exploitation
- Ne nécessite pas une grande connaissance mathématique.
- Plus flexible que la modélisation mathématique.
- Simulation d'un processus, évoluant sur une longue durée, en quelques minutes.

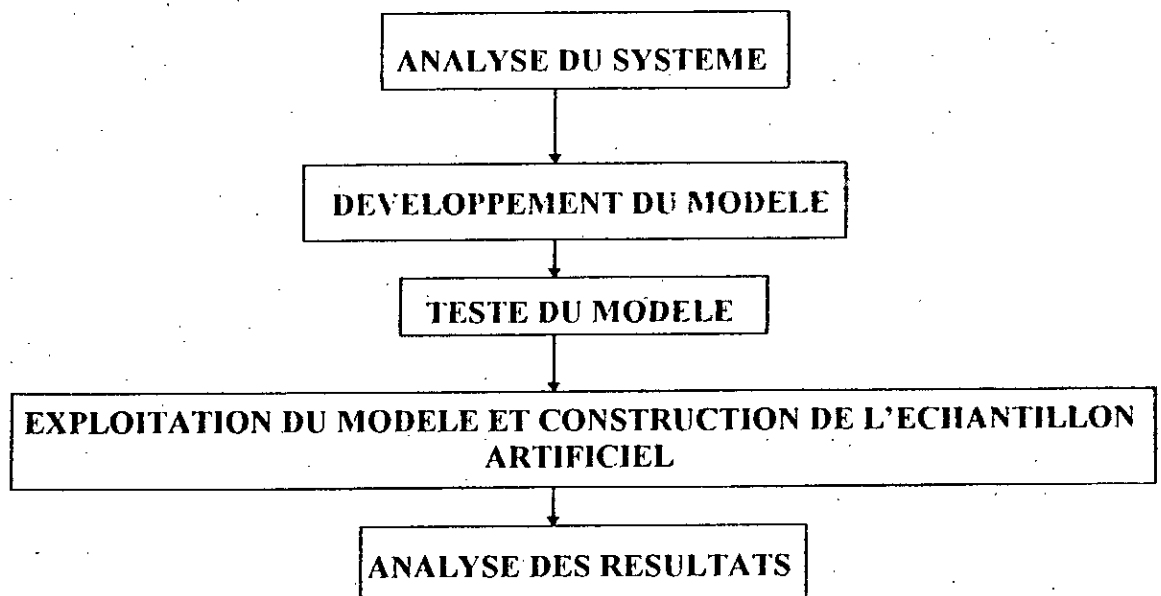
Parmi les inconvénients on cite

- Nécessite beaucoup de dépenses (construction du modèle et programmation)
- Les résultats sont approximatifs.
- Nécessite un temps considérable à la validation.

### III.5. - CONCEPTION D'UN MODELE DE SIMULATION:

La manière de construction d'un modèle de simulation dépend du phénomène soumis à l'étude. Sa conception est basée essentiellement sur l'analyse de ce dernier. Elle consiste à l'identification des composants du système et les relations existantes entre les différents paramètres qui le régissent.

D'une manière générale la conception d'un modèle de simulation passe par les étapes suivantes



### **III.6. - PARAMETRE TEMPS EN SIMULATION:**

Le paramètre temps est très important dans la conception du modèle de simulation. C'est ainsi qu'une analyse complète sur l'évolution du système durant le temps est nécessaire pour qu'on puisse aboutir à une simulation qui reflète fidèlement l'expérimentation réelle.

Dans ce contexte , on distingue deux types de simulation:

#### **III.6.1.- SIMULATION PAR HORLOGE (METHODE SYNCHRONE):**

Dans ce cas, le modèle change d'état pendant le temps et on doit procéder à une bonne discrétisation de l'intervalle du temps, sur lequel s'étend l'étude.

La mise à jour de l'état du système est assurée par l'ensemble des événements qui se réalisent durant l'intervalle du temps.

Une bonne discrétisation consiste à choisir une unité de temps  $dt$  assez petite, pour que la perte d'information relative aux mesures durant les crues qui se réalisent pendant  $dt$  soit presque négligeable. Par contre, si  $dt$  est important, un nombre conséquent d'événements (point de mesures ) sera négligé .

#### **III.6.2.- SIMULATION PAR EVENEMENT ( METHODE ASYNCHRONE ):**

Dans ce type de simulation, un changement dans l'état du système est provoqué par l'occurrence d'un événement, le pas du temps est variable d'un événement à un autre.

### **III.7.- GENERATION DES NOMBRES ALEATOIRE:**

Dans une simulation, la génération des nombres aléatoires est primordiale, en général, elle se fait suivant une loi uniforme sur l'intervalle  $[0,1]$  , par différents procédés.

#### **III.7.1.- PROCEDES PHYSIQUES:**

Parmi lesquels on cite:

- Jeu de pile ou face.
- Source de particules radioactives qui arrivent sur un compteur.
- Utilisation des fluctuations de niveau de bruit d'une lampe électrique.
- Un dispositif à balle.

L'inconvénient de ces procédés réside dans la séquence qui est non reproductible, d'où l'impossibilité de faire des tests.

#### **III.7.2. - PROCEDES ALGORITHMIQUES:**

Ils sont simples à réaliser, mais ils nécessitent des critères pour la vérification de l'aspect aléatoire des nombres générés ainsi que leur appartenance à une loi uniforme.

Pour construire un tel algorithme et du faite qu'il doit être programmé; on doit prendre soins qu'il soit récursif (pour économiser l'espace mémoire) et que sa périodicité soit assez longue que possible, parmi les procédés algorithmiques on cite:

- procédé de Von Newman
- procédé de Thomas
- procédé congruentiels (additif, multiplicatif et mixte)

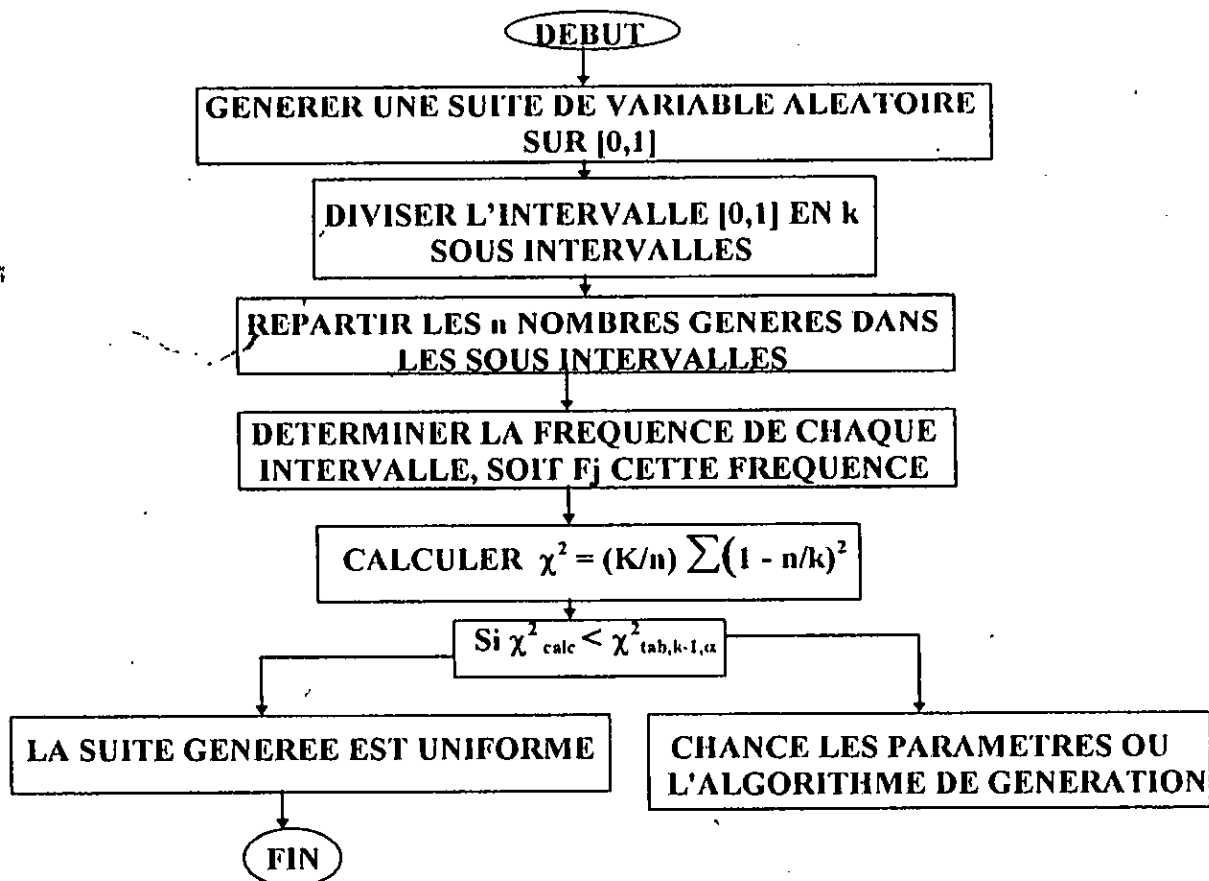
### III.7.3. - VALIDATION D'UN GENERATEUR DE NOMBRE ALEATOIRES:

Un générateur est dit de bonne qualité statistique (valide) s'il vérifie les deux condition suivantes:

- 1- Les nombres générés sont issus d'une loi uniforme.
- 2- Ils sont indépendants, c'est à dire l'absence de corrélation entre les nombres générés

#### III.7.3.1.- TEST DE KHI-DEUX:

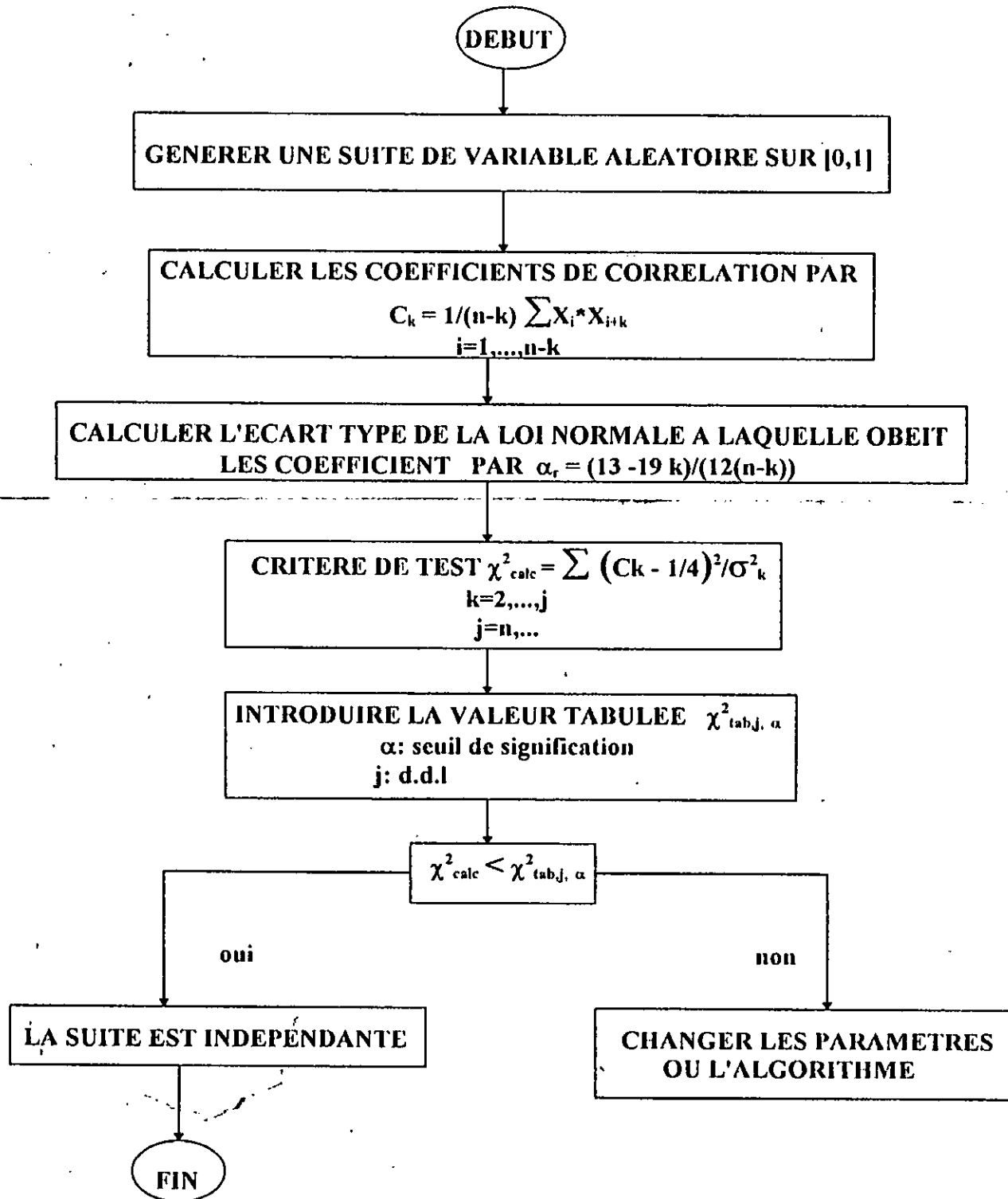
C'est un test d'uniformité dont le critère de décision fait appel à la loi de khi-deux, nous le présentons sous forme d'organigramme.





### III.7.3.2. - TEST D'AUTO CORRELATION:

Il est utilisé pour tester l'aspect aléatoire de la suite générée. Nous le présentons sous forme d'organigramme:



### III.8. - APPROCHE DE SIMULATION:

La première approche consiste à construire un échantillon artificiel des débits solides à partir de leur fonction de répartition.

Une telle approche est rejetée pour la raison que les réalisations de la variable aléatoire, débit solide, ne sont rien que des réponses à des réalisations des variables aléatoires, débit liquide et intensité de la pluie, tel qu'il est montré dans le chapitre précédent.

La deuxième approche, que nous avons jugé meilleure que la précédente et qui fait appel au modèle d'ajustement, consiste à réaliser par simulation un échantillon à deux dimensions ( débit liquide et intensité de pluie ) des variables de cause, qui seront injectées dans le modèle d'ajustement, pour en tirer la réalisation de la variable conséquence ( débit solide ).

En pratique cette approche est justifiée par le fait que l'occurrence de l'événement débit solide n'est possible que s'il y a occurrence des événements débits liquides et intensités de pluie.

#### III.8.1.- MISE EN OEUVRE DE LA DEUXIEME APPROCHE:

##### III.8.1.1.-ESTIMATION DES LOIS DE PROBABILITE DES VARIABLES DE CAUSE

Cette estimation se fait en plusieurs étapes.

##### III.8.1.1.1.- REPARTITION DE LA STATISTIQUE D'OBSERVATION EN CLASSES:

En générale, le nombre de classes est donné par la formule suivante:

$$k = \langle \log (N) \rangle$$

où N : taille de l'échantillon

$\langle x \rangle$  : partie entière de x

L'amplitude des classes est donnée par:  $E = (\max_i(X_i) - \min_i(X_i))/k$

##### III.8.1.1.2 TABLEAU DE FREQUENCE:

CLASSE	EFFECTIF	FREQUENCE
[ ... ]	n <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>
.	.	.
.	.	.
[ ... ]	n <sub>l</sub>	F <sub>l</sub>
.	.	.
.	.	.
[ ... ]	n <sub>l</sub>	F <sub>l</sub>

### III.8.1.1.3.- HISTOGRAMME DE FREQUENCE ET LISSAGE:

Un lissage doit se faire selon le critère: "la surface sous la courbe de lissage doit être égale à la surface sous l'histogramme"

### III.8.1.1.4.- PROPOSITION DE LA LOI QUI AJUSTE LA COURBE DU LISSAGE ET ESTIMATION DES PARAMETRES :

Pour l'estimation des paramètres, on utilise soit la méthode **MAXIMUM DE VRAI SEMBLANCE** ou la méthode des moments.

#### a/Méthode M.M.V:

**-Définition de la fonction de vrai semblance:** c'est la densité  $f_n(x_1, \dots, x_n, \theta)$  de l'échantillon  $(x_1, \dots, x_n)$ .

Si l'échantillon est formé de variables aléatoires indépendantes la fonction de vrai semblance devient:

$$f_n(x_1, \dots, x_n, \theta) = \prod_{i=1, \dots, n} f_i(x_i, \theta) ; \quad \theta: \text{paramètres}$$

#### -Méthode M.M.V (Méthode de Fisher):

Etant donnée la réalisation d'un échantillon, la méthode consiste à estimer la valeur de  $\theta$  pour laquelle cette réalisation est la plus probable, en d'autre terme, il s'agit de trouver un estimateur de  $\theta$  pour lequel, la fonction de vrai semblance est maximale.

#### b/Méthode des moments:

L'idée de cette méthode est d'essayer d'estimer les paramètres d'une loi, en rapprochant les moments empiriques, calculés à partir de l'échantillon, des moments théoriques de mêmes ordre.

le moment empirique d'ordre "r" est donné par

$$M_r = 1/n \sum_{i=1, \dots, n} X_i^r$$

Le moment théorique de même ordre est donnée par:  $M_r = E[X^r]$

où  $E[X^r]$  est l'espérance mathématique de X

### III.8.1.1.5.- TEST D'AJUSTEMENT:

Cette étape consiste à tester deux hypothèses:

$$H_0 : F(x) = F_0(x)$$

$$H_1 : F(x) \neq F_0(x)$$

Où  $F(x)$  est une fonction de répartition d'une variable aléatoire X inconnue  
 $F_0(x)$  est la fonction de répartition d'une loi uniforme.

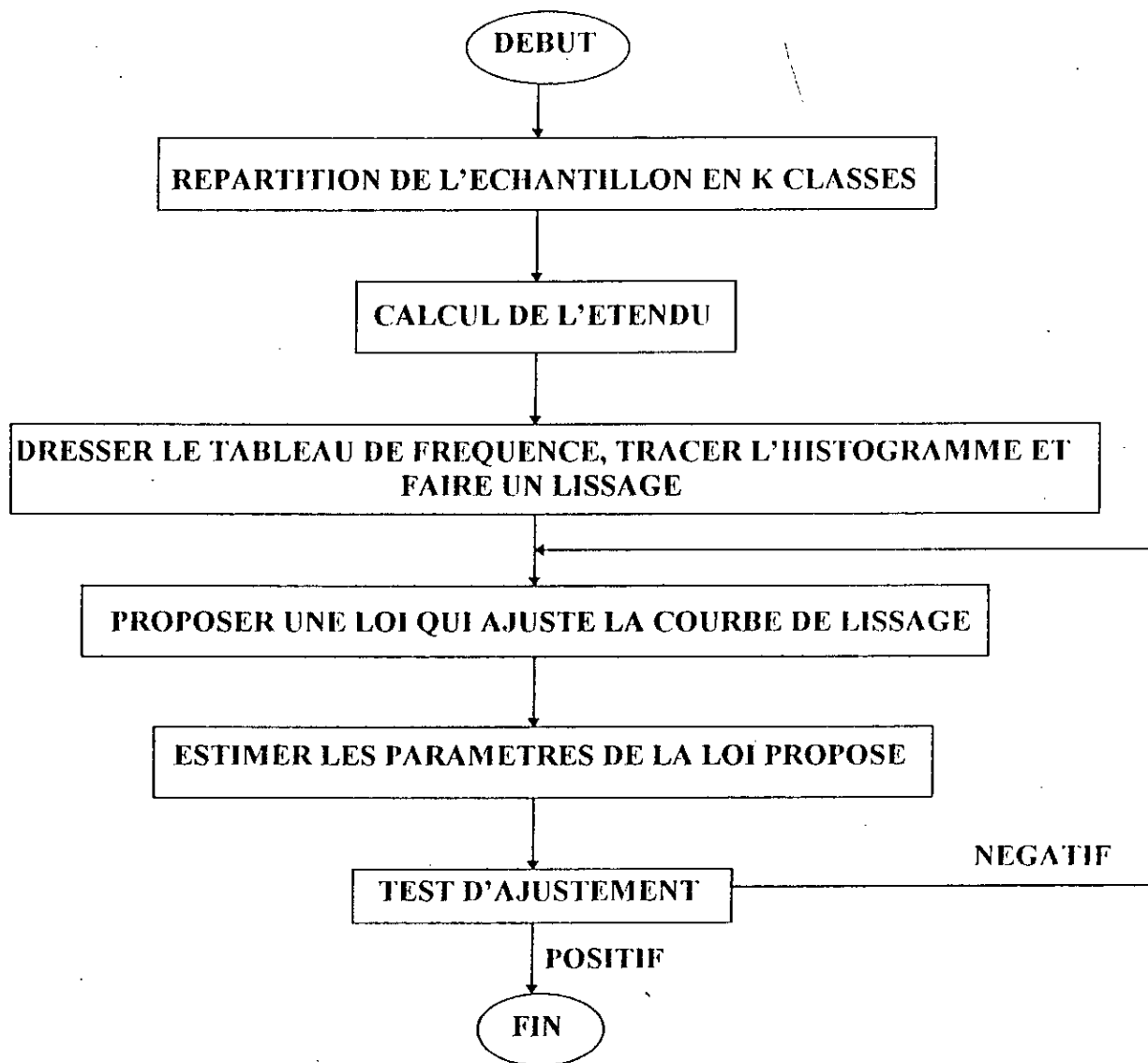
Le critère de test est donné par :

$$\chi^2_{\text{abs}} = \sum ((n_i - N.P_i)^2 / N.P_i) \quad i=1, \dots, k$$

Si  $\chi^2_{\text{abs}} < \chi^2_{\text{tab}, k-1, \alpha}$  alors on accepte l'hypothèse  $H_0$

Si non, on rejette l'hypothèse  $H_0$

### III.8.1.1.6. - ORGANIGRAMME RECAPITULATIF :



### **III.8.2.- MODELE DE SIMULATION :**

#### **III.8.2.1.- PARAMETRE TEMPS :**

Comme illustré dans le chapitre 2, le système change d'état d'une façon continue, et nous voulons que ce modèle de simulation donne l'état du système à chaque instant. Cela est pratiquement irréalisable, donc nous optons pour une simulation par horloge.

Dans le but de minimiser la perte d'information ( événements de crues ), La discrétisation du temps sera à un pas  $\Delta t$  autant petit que possible.

#### **III.8.2.2.- DETERMINATION DE LA TAILLE DE L'ECHANTILLON ARTIFICIEL :**

Supposons que la prédiction va se faire sur K années. Pendant ces K années, nous estimons la durée cumulée ( $\tau$ ) des crues qui peuvent avoir lieu.

Soit  $\Delta t$  l'intervalle d'avancement du temps de simulation. La taille de l'échantillon artificiel pour chaque variable de cause (du débits liquides et intensités de pluie) est de :

$$m = \tau / \Delta t$$

#### **III.8.2.3. - GENERATION DES NOMBRES ALEATOIRES SUR [0,1] :**

Pour la génération des nombres sur [0,1] nous allons présenter l'algorithme de Thomas, qui a répondu positivement aux tests d'uniformité et d'autocorrélation (voir chapitre VIII et Annexe).

##### **Algorithme de Thomas:**

**Soit  $y_0$  un nombre aléatoire.**

**Etape(1): Calculer  $X = k.y_{i-1}$**

**Etape(2): Prendre  $y_i = \langle x \rangle$**

**$i:=i+1$  aller à étape(1)**

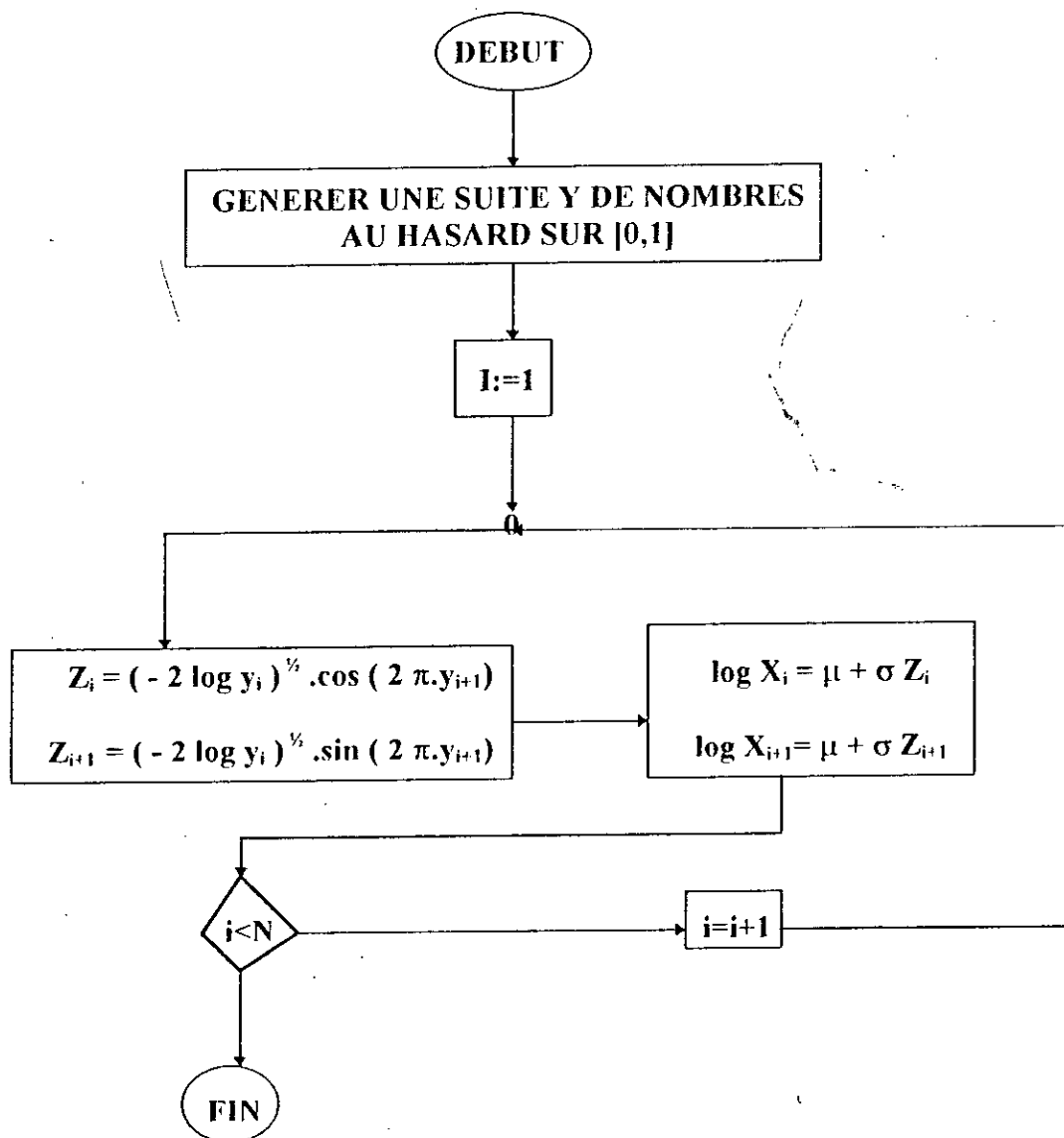
où  $\langle x \rangle$  = partie décimale de x

##### **Remarques:**

\*L'ajustement des lois de probabilités des deux variables de cause (débits liquides et intensités de pluie) suivent une loi log normal (voir chapitre VIII et annexe).

### III.8.2.4.- SIMULATION D'UNE LOI LOG NORMALE:

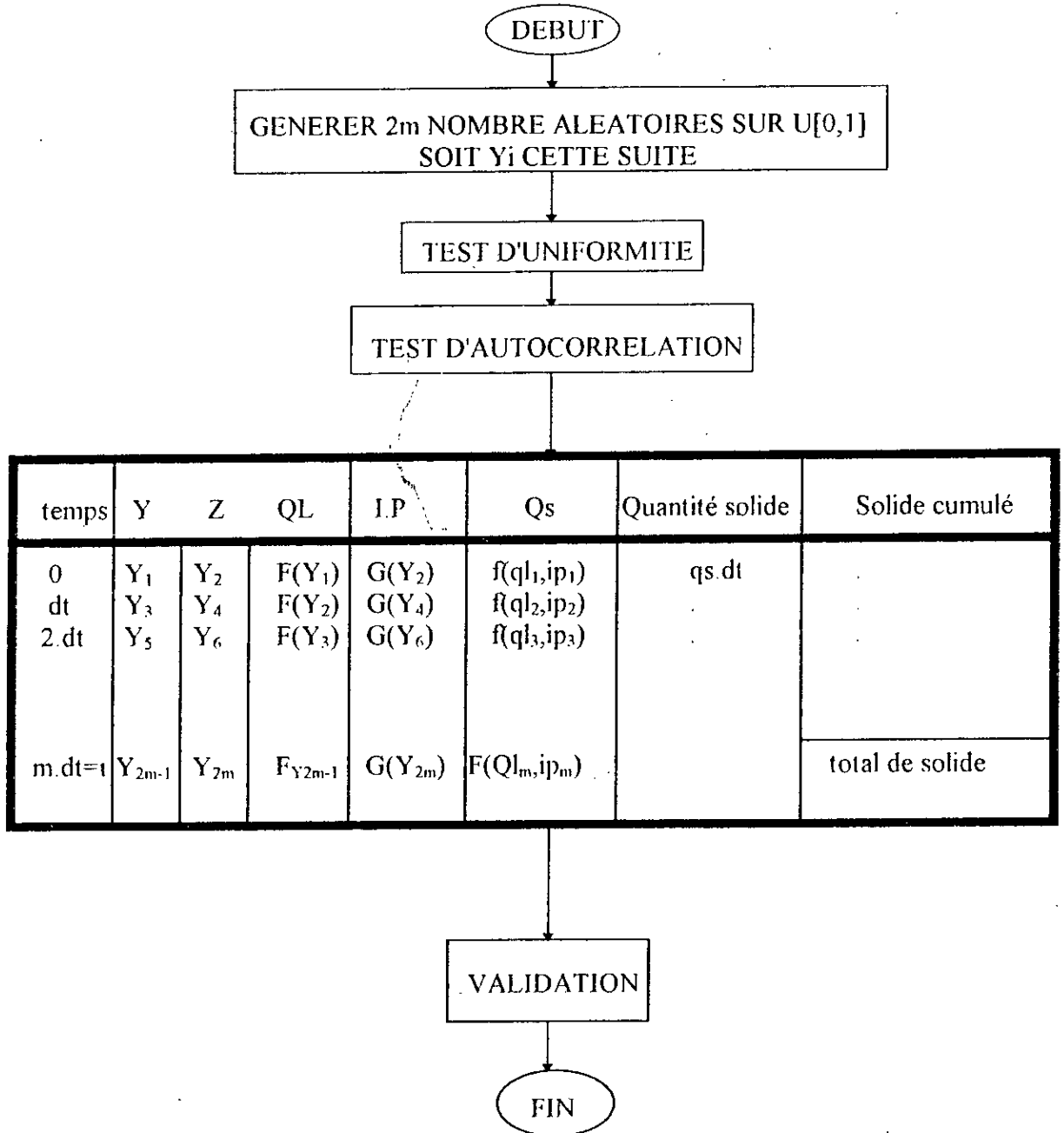
Pour la simulation d'une variable aléatoire suivant une loi log normale, on utilise souvent l'algorithme de **Box-Muller**, dont l'organigramme est présenté ci-dessous:



L'apport solide pendant un intervalle de temps dt est calculé par la relation suivante:

$$\text{APPORT SOLIDE} = \text{DEBIT SOLIDE} \cdot dt = f(\text{débit liquide, intensité}) \cdot dt$$

### III.8.2.5.- ORGANIGRAMME RECAPITULATIF:



## CHAPITRE IV

### FORMULATION DES EQUATIONS DE BASE

#### IV.1.-INTRODUCTION:

L'écoulement dans les retenues étant biphasique (liquide-solide) et turbulent pendant les crues, ce chapitre aura donc pour but de formuler les équations caractérisant la phase liquide (équations de continuité et de Reynolds) et la phase solide (équation de diffusion et équation de conservation de masse).

#### IV.2. – MOUVEMENT MOYEN ET MOUVEMENT D'AGITATION :

Le mouvement de turbulence est toujours désordonné et instationnaire. Afin de résoudre les équations il faut spécifier les conditions initiales des variables en tout point et en chaque instant, ce qui est délicat. On va décomposer la valeur instantanée de chaque variable en une valeur moyenne et une valeur fluctuante. Nous posons :

$$U = \bar{U} + U' \quad \text{et} \quad V = \bar{V} + V' \quad \text{où}$$

U et V sont respectivement les valeurs instantanées de la vitesse suivant les directions x et y.

$\bar{U}$  et  $\bar{V}$  les valeurs moyennes de la vitesse

$U'$  et  $V'$  les fluctuations de la vitesse

avec

$$\bar{U} = 1/T \int_0^{t_0+T} U dt \quad \text{et} \quad \bar{V} = 1/T \int_0^{t_0+T} V dt$$

Le mouvement d'agitation n'est pas permanent et imprévisible, en un point donné il varie avec le temps.

Au même instant, il n'est pas non plus le même en deux points différents voisins ou non.

Dans cette analyse les fluctuations apparaissent comme des variables aléatoires.



### IV.3. EQUATIONS DE LA PHASE LIQUIDE

#### IV.3.1. EQUATION DE CONTINUTE

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Intégrons cette équation suivant la profondeur :

On aura :

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_0^h \frac{\partial v}{\partial y} dz = 0$$

En utilisant la règle de dérivation d'une intégrale, nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz = \int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dz + u(h) \frac{\partial h}{\partial x}$$

d'où :

$$\int_0^h \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz - u(h) \frac{\partial h}{\partial x}$$

de même :

$$\int_0^h \frac{\partial v}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h v dz - v(h) \frac{\partial h}{\partial y}$$

L'équation du mouvement de la surface libre étant :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left[ u(h) \frac{\partial h}{\partial x} + v(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right]$$

L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

### IV.3.2. EQUATIONS DE REYNOLDS

Ces équations dérivent des équations de la dynamique des fluides qui s'écrivent suivant les directions de x et de y comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \end{array} \right.$$

considérons d'abord l'équation de continuité ( mouvement instantané ).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

soit :

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v}{\partial y}} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0$$

L'équation de contiuité en moyenne est :

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v}{\partial y}} = 0$$

On en déduit aussi :

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0$$

Considérons maintenant les équations dynamiques.

Intéressons nous d'abord au premier membre auquel on ajoute l'équation de continuité :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + u \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \right)$$

L'équation du mouvement suivant l'axe des x devient :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left( \rho x - \frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \right)$$

En posant  $u = \bar{u} + u'$  et  $v = \bar{v} + v'$ , et on applique les caractéristiques des variables aléatoires, on trouve

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = \rho x - \frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau'_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau'_{xz}}{\partial z} \right)$$

où  $\tau'_{xx}, \tau'_{xy}$  et  $\tau'_{xz}$  représentent les tensions en tenant compte des fluctuations ( tensions de Reynolds ).

De même on trouve pour l'équation suivante l'axe des Y

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} - \bar{u} \frac{\partial v}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho y - \frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{\partial \tau'_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau'_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau'_{yz}}{\partial z} \right)$$

avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- 1- Répartition hydrostatique des pressions
- 2- Répartition uniforme des vitesses sur chaque verticale, c'est à dire chaque vitesse calculée représente une moyenne sur la verticale.
- 3- Forces de pesanteur négligeables.
- 4- Le fluide est supposé incompressible.
- 5- Les contraintes de frottements sur le fond sont opposées à la direction de l'écoulement et sont proportionnels au module de la vitesse et les frottements à surface libre sont nuls.
- 6- On néglige les pertes ( infiltration, évaporation ... etc )

Le système d'équations qui régit la phase liquide est :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g}{c'^2 h} u \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{g}{c'^2 h} v \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

**REMARQUE** : on a ôté les symboles  $\bar{\quad}$  de la moyenne afin de rendre la représentation simple.

$c'$  : représente le coefficient de CHEZY.

#### IV.4. - EQUATIONS DE LA PHASE SOLIDE

##### IV.4.1 - EQUATION DE DIFFUSION.

Dans un fluide considéré comme un milieu continue, une substance neutre diffuse selon la loi de FICK.

$$\text{Flux} = - D \text{ grad } C$$

Le flux étant la quantité de substance qui traverse l'unité de surface pendant l'unité de temps.

**C** : représente la concentration de substance dans le fluide au voisinage de la substance élémentaire considéré.

**D** : représente la diffusivité

Si on considère un écoulement plan, la loi de Fick pour un fluide en mouvement se traduit mathématiquement par :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_m \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_m \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

ou  $\epsilon_m$  : représente un coefficient de diffusion.

Lorsque l'écoulement est turbulent les grandeurs qui figurent dans l'équation sont des fonctions aléatoires du temps et de l'espace.

Si on applique à cette équation le traitement habituel en mécanique de l'écoulement turbulent en posant :

$$\overline{C} = \overline{C} + C' \quad ; \quad \overline{V} = \overline{V} + V' \quad \text{et} \quad \overline{U} = \overline{U} + U'$$

On obtient en prenant la moyenne et en négligeant la diffusion moléculaire, l'équation ponctuel de la diffusion :

$$\frac{\partial \overline{c}}{\partial t} + \overline{U} \frac{\partial \overline{c}}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \overline{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial \overline{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial \overline{c}}{\partial y} \right)$$

où  $\epsilon_x$  et  $\epsilon_y$  sont les coefficients de diffusion turbulente.

Remarque :

Pour simplifier l'écriture on remplacera par la suite  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$  et  $\bar{C}$  respectivement par  $U$ ,  $V$  et  $C$

#### IV.4.2. - DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE MELANGE $\epsilon_x$ & $\epsilon_y$

L'équation de diffusion est fonction des coefficients de mélange  $\epsilon_x$  et  $\epsilon_y$  qui sont également fonction de plusieurs paramètres hydrauliques telles que le type de canal, sa largeur, sa profondeur, sa rugosité et les conditions d'écoulement. De nombreuses expériences ont été faites pour déterminer ces coefficients. Nous nous intéresserons à celles faites dans les canaux irréguliers et les cours d'eau naturels. [ 12 ].

#### Coefficient de mélange transversal $\epsilon_y$

Des expériences ont été faites par des chercheurs tels que YOTSUKURA et AL (1970) HOLLY et ABRAHAM (1973) dans les canaux à ciel ouvert. Ces expériences ont montré que plus le canal est affecté d'irrégularités plus le rapport  $\epsilon_y/dU^*$  est grand.

d'où  $\epsilon_y/dU^* \cong 0,6 \pm 50 \%$

Edler a proposé :

$$\epsilon_y = 0,2 H U^* + 6 H V^*$$

#### Coefficient de mélange longitudinal $\epsilon_x$

Pour ce coefficient ELDER a proposé :

$$\epsilon_x = 0,2 H V^* + 6 H U^*$$

où :  $d$  : profondeur locale (m)

$U^*$  : vitesse de cisaillement suivant l'axe x (m/s)

$V^*$  : vitesse de cisaillement suivant l'axe y (m/s)

Avec :  $U^* = \sqrt{\tau_{xy}/\rho}$        $V^* = \sqrt{\tau_{yx}/\rho}$

#### IV.4.3 : EQUATION DE CONSERVATION DE MASSE:

L'équation de conservation de masse de la phase solide dans la retenue est:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(S_x)}{\partial x} + \frac{\partial(S_y)}{\partial y} = 0$$

où

- Z est la hauteur des sédiments
- $S_x$  est le débit solide suivant l'axe X
- $S_y$  est le débit solide suivant l'axe Y

Le système d'équations final se présente comme suit :

$$\left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g}{c^2 h} u \sqrt{u^2 + v^2} \right) = 0$$

$$\text{III} \quad \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{g}{c^2 h} v \sqrt{u^2 + v^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(S_x)}{\partial x} + \frac{\partial(S_y)}{\partial y} = 0$$

## CHAPITRE V

# TRANSFORMATION DES EQUATIONS AUX DERIVEES PARTIELLES EN SYSTEMES D'EQUATIONS ALGEBRIQUES.

### V.1. - INTRODUCTION :

C'est une étape importante dans les méthodes aux éléments finis, elle peut se faire, en utilisant les méthodes des moindres carrés, collocation par point, Ritz ou Galerkin, mais avant cela, on doit remplacer les fonctions inconnues dans le système d'équations aux dérivées partielles par leurs polynômes d'approximations.

### V.2. - FORMULATION EN ELEMENTS FINIS

Approximation des inconnues par des fonctions polynomiales

$$U = \sum_{i=1}^N \phi_i(x, y) U_i(t)$$

$$V = \sum_{i=1}^N \phi_i(x, y) V_i(t)$$

$$h = \sum_{i=1}^N \phi_i(x, y) h_i(t)$$

$$C = \sum_{i=1}^N \phi_i(x, y) C_i(t)$$

$$Z = \sum_{i=1}^N \phi_i(x, y) Z_i(t)$$

Pour les hauteurs, on utilise une approximation triangulaire linéaire. Pour les vitesses et les concentrations, on utilisera une approximation triangulaire quadratique.

### V.3. - FORMULATION INTEGRALE - PROCEDURE DE GALERKIN

Les équations aux dérivées partielles étant connues, la méthode de **Galerkin** conduit directement aux formulations intégrales.

#### Procédure de Galerkin

Soit l'équation :

$$\iint Y (L (U) + F) d \Omega = 0$$

où F : fonction inconnue appelée sollicitation

Posons  $Y = \delta U = \langle P \rangle [ \delta a ]$  pour tout  $[ \delta a ]$

où  $\delta U$  est la variation de U

$[ \delta a ]$  : variations des paramètres d'approximation  $[ a ]$

L'équation (III-13) devient donc :

$$W = \iint \delta U (L (U) + F) d \Omega = 0$$

Comme W doit s'annuler pour tout  $[ \delta a ]$  la relation précédente est équivalente au n équations algébriques :

$$W_1 (a) = \iint P_1 (\langle L (P) \rangle \{ a \} + F) d \Omega = 0$$

$$W_n (a) = \iint P_n (\langle L (P) \rangle \{ a \} + F) d \Omega = 0$$

Pour que le système converge il suffit que :

- La base polynomiale soit complète
- Les fonctions U et leurs dérivées soient continues :

L'application de la méthode de **Galerkin** aux équations du système de base donne la formulation suivante de l'équation de Reynolds suivant l'axe des X.

$$\iint \left[ \frac{1}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} + \left( \frac{g}{c^2 h} u \sqrt{u^2 + v^2} \right) \right] \delta u d \Omega = 0$$

On procède de même pour les autres équations du système.



$\delta U$ ,  $\delta S$ ,  $\delta h$  et  $\delta c$  sont les variations de  $U$ ,  $V$ ,  $h$  et  $c$  qu'on développe en fonction des variations aux noeuds comme suit :

$$\delta U = \sum_{I=1}^N \phi_I(x, y) \delta U_I(t)$$

$$\delta V = \sum_{I=1}^N \phi_I(x, y) \delta V_I(t)$$

$$\delta h = \sum_{I=1}^N \phi_I(x, y) \delta h_I(t)$$

$$\delta c = \sum_{I=1}^N \phi_I(x, y) \delta C_I(t)$$

$$\delta Z = \sum_{I=1}^N \phi_I(x, y) \delta Z_I(t)$$

En remplaçant  $\delta U$ ,  $U$  et  $h$  par leurs fonctions de développement respectives dans l'équation on obtient :

$$\iint (\phi_i \phi_j d\Omega) \frac{\partial U_I}{\partial t} = - \left( \iint \sum_{I=1}^N \left( \sum_{K=1}^N (U_{KI} - U_j) \phi_{KI} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + V_{KI} U_j \phi_{KI} \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \right) \right)$$

$$+ g h_j \frac{\partial h_j}{\partial x} \phi_I d\Omega - \left( \frac{g}{h c^2} \iint u \sqrt{u^2 + v^2} \right) d\Omega = F_{xi}$$

On procède de même pour l'équation suivant l'axe des  $Y$ , en changeant les  $U$  et  $V$  respectivement par  $V$  et  $U$  et

$$\frac{\partial h_j}{\partial x} \text{ par } \frac{\partial h_j}{\partial y}$$

$$\begin{aligned}
 \left( \iint \varphi_i \varphi_j d\Omega \right) \frac{\partial c_l}{\partial t} = & - \iint \sum_{j=1}^N \left( \sum_{k=1}^N (U_{kj} C_j \varphi_{kj} \frac{\partial \varphi_l}{\partial x} \right. \\
 & \left. + V_{kj} C_j \varphi_{kj} \frac{\partial \varphi_l}{\partial y} \right) + C_j \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial \varphi_l}{\partial x}) + C_j \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial \varphi_l}{\partial y}) \varphi_l d\Omega
 \end{aligned}$$

Pour ces équations  $N = 6$

Pour les équations de conservations de masse des deux phases (liquide et solide) on aura respectivement :

$$\begin{aligned}
 \left( \iint \varphi_i \varphi_j d\Omega \right) \frac{\partial h_l}{\partial t} = & - \iint \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=1}^N (U_{kj} h_j) \frac{\partial (\varphi_{kj} \varphi_j)}{\partial x} \right. \\
 & \left. + V_{kj} h_j \frac{\partial (\varphi_{kj} \varphi_j)}{\partial y} \right) \varphi_l d\Omega = F_{hl}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left( \iint \varphi_i \varphi_j d\Omega \right) \frac{\partial z_l}{\partial t} = & - \iint \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=1}^N (S_x \frac{\partial (\varphi_{kj} \varphi_j)}{\partial x} \right. \\
 & \left. + S_y \frac{\partial (\varphi_{kj} \varphi_j)}{\partial y} \right) \varphi_l d\Omega = F_{zl}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left( \iint \varphi_i \varphi_j d\Omega \right) \frac{\partial c_l}{\partial t} = & - \iint \sum_{j=1}^N \left( \sum_{k=1}^N (U_{kj} C_j \varphi_{kj} \frac{\partial \varphi_l}{\partial x} \right. \\
 & \left. + V_{kj} C_j \varphi_{kj} \frac{\partial \varphi_l}{\partial y} \right) + C_j \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial \varphi_l}{\partial x}) + C_j \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial \varphi_l}{\partial y}) \varphi_l d\Omega
 \end{aligned}$$

pour ces deux dernières équations  $N = 3$

#### V.4. - DETERMINATION DE LA FONCTION D'APPROXIMATION $\phi(x, y)$

##### Transformation d'une intégrale

La transformation d'une intégrale permet de passer de l'intégration d'une fonction sur l'écoulement réel  $V_e$  à une intégration plus simple sur l'élément de référence  $V_r$ .

$$\int_{V_e} f(x,y) dx dy = \int_{V_r} f(x(\xi, \zeta), y(\xi, \zeta)) \det J d\xi d\zeta$$

Pour les hauteurs  $h$  ( pour la phase liquide ) et  $Z$  ( pour la phase solide )  
 a) Choix de la base polynomiale

$$\langle P \rangle = \langle 1 \quad \xi \quad \zeta \rangle$$

b) Evaluation des matrices élémentaires

$$[P_n] \text{ et } [P_n]^{-1}$$

$$[P_n] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [P_n]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\xi_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \zeta_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

c) Calcul de  $\langle \phi \rangle = \langle P \rangle [P_n]^{-1}$

i	$\phi_i(\xi, \zeta)$
1	$1 - \xi - \zeta$
2	$\xi$
3	$\zeta$

Evaluation de :

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi}$$

i	$\partial \phi_i / \partial \xi$	$\partial \phi_i / \partial \zeta$
1	-1	-1
2	1	0
3	0	1

La matrice jacobienne s'exprime par :

$$J_{h,c} = \begin{bmatrix} \left\langle \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \right\rangle \\ \left\langle \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \right\rangle \end{bmatrix} \quad \langle X_i, Y_i \rangle$$

Pour les vitesses U et V et les concentrations

- Base polynomiale

$$\langle P \rangle = \langle 1 \quad \xi \quad \zeta \quad \xi^2 \quad \xi \zeta \quad \zeta \rangle$$

- Evaluation de  $[P_n]$  et  $[P_n]^{-1}$

$$[P_n] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1/2 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix}$$

$$[P_n]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 4 \\ 2 & -4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -4 & 0 & 4 & 0 & -4 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & -4 \end{bmatrix}$$

$$\xi_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/2 \\ 1 \\ 1/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\zeta_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/2 \\ 1 \\ 1/2 \end{bmatrix}$$

- Evaluation de  $\phi$

$$\langle \phi \rangle = \langle P \rangle \cdot |P_n\rangle^{-1}$$

i	$\phi_i(\xi, \zeta)$
1	$1 - 3\xi - 3\xi - 2\xi^2 + 4\xi\zeta + 2\xi^2$
2	$4\xi - 4\xi^2 - 4\xi\zeta$
3	$-\xi + 2\xi^2$
4	$4\xi\zeta$
5	$-\zeta + 2\zeta^2$
6	$4\zeta - 4\zeta\xi - 4\xi^2$

Evaluation de  $\partial\phi_i/\partial\xi$  et  $\partial\phi_i/\partial\zeta$

i	$\partial\phi_i/\partial\xi$	$\partial\phi_i/\partial\zeta$
1	$-3 - 4\xi + 4\zeta$	$-3 + 4\xi + 4\zeta$
2	$4 - 8\xi - 4\zeta$	$-4\xi$
3	$-1 + 4\xi$	0
4	$4\zeta$	$4\xi$
5	0	$-1 + 4\zeta$
6	$-4\zeta$	$4 - 4\xi - 8\zeta$

La matrice jacobienne s'exprime par :

$$J_{U,V} = \begin{bmatrix} \langle \frac{\partial\phi_i}{\partial\xi} \rangle \\ \dots \\ \langle \frac{\partial\phi_i}{\partial\zeta} \rangle \end{bmatrix} \begin{matrix} u \\ \dots \\ u \end{matrix} \quad \langle x_i \ y_i \rangle$$

Pour le calcul des forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_c$  et  $F_h$  on est amené à exprimer  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial x}$  et  $\frac{\partial \varphi_i}{\partial y}$  en fonction de  $\xi$  et  $\zeta$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \left[ \frac{1}{(\sum (\partial \varphi_i / \partial \xi) x_i)} \right] + \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \left[ \frac{1}{(\sum (\partial \varphi_i / \partial \zeta) x_i)} \right]$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \left[ \frac{1}{(\sum (\partial \varphi_i / \partial \xi) y_i)} \right] + \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \left[ \frac{1}{(\sum (\partial \varphi_i / \partial \zeta) y_i)} \right]$$

On pose

$$R = \left[ \int \int \varphi_i \varphi_j d\Omega \right] \frac{\partial b}{\partial t} \text{ avec } b = U, V, c, h \text{ et } Z$$

Toutes les équations se présentent donc sous la forme :

$$[R] \left[ \frac{\partial b}{\partial t} \right] = [F]$$

D'où on tire

$$\left[ \frac{\partial b}{\partial t} \right] = [R]^{-1} [F]$$

qu'on intègre dans le temps.

Les composantes  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_c$ ,  $F_h$  et  $F_z$  ont été définies auparavant en fonction des composantes de la vitesse ( $u$ ,  $v$ ),  $c$ ,  $h$  et  $Z$ .

c'est à dire  $f(t + \Delta t) = f(U(t), W(t), c(t), h(t) \text{ et } Z(t))$   
où  $\Delta t$  est le pas de temps.

## V.5. - INTEGRATION DANS LE TEMPS

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{U(t+\Delta t) - U(t)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{V(t+\Delta t) - V(t)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{c(t+\Delta t) - c(t)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(t+\Delta t) - h(t)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{Z(t+\Delta t) - Z(t)}{\Delta t}$$

Avec  $F_x = f(u(t), v(t), h(t))$

$$F_y = f(u(t), v(t), h(t))$$

$$F_h = f(u(t+\Delta t), v(t+\Delta t), h(t))$$

$$F_c = f(u(t+\Delta t), v(t+\Delta t), h(t+\Delta t), c(t))$$

$$F_z = f(u(t+\Delta t), v(t+\Delta t), c(t+\Delta t), h(t))$$

Donc si à  $t = 0$  les paramètres  $U$ ,  $V$ ,  $c$ ,  $h$  et  $Z$  sont connus, on peut les calculer à chaque instant  $t$  positif.

**Remarque :** Les systèmes trouvés sont linéaires, leurs matrices de rigidité ne dépendent pas du temps. Ce résultat est très important parcequ'il nous donne la possibilité de triangulariser les matrices de rigidité avant l'intégration par rapport au temps.

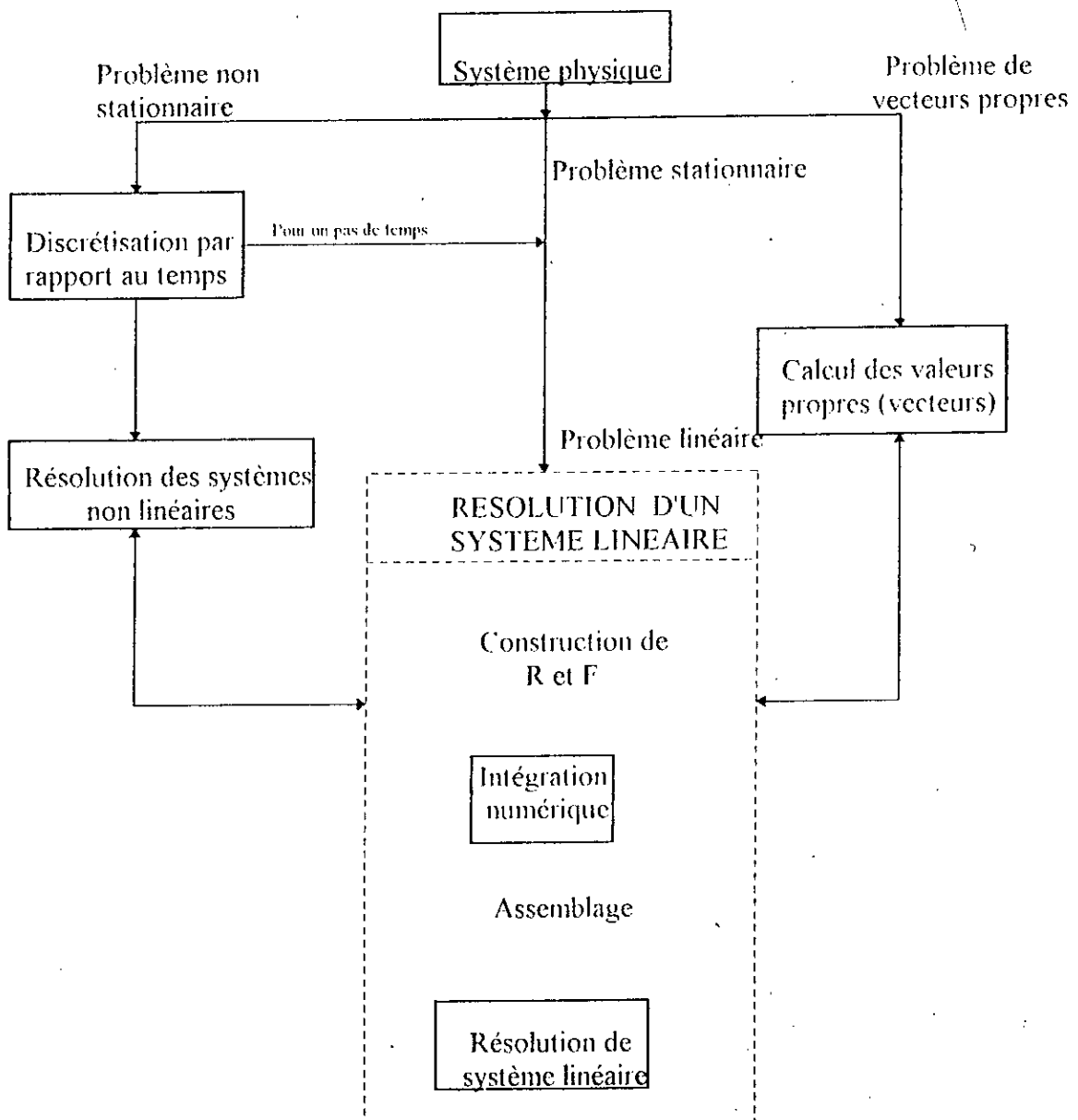
## CHAPITRE VI

### PROGRAMMATION ET RESOLUTION DES SYSTEMES

#### VI.1. - INTRODUCTION

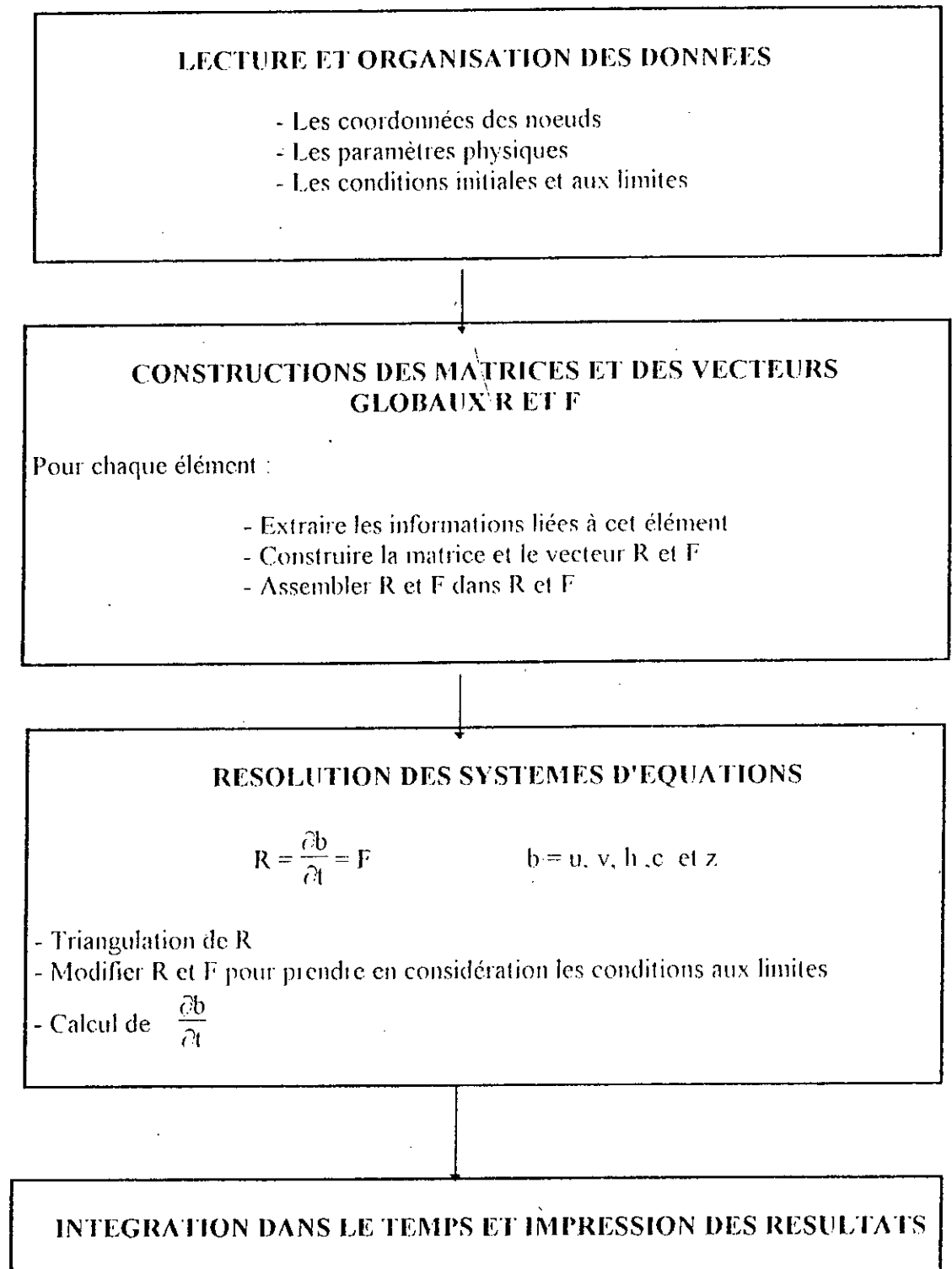
Depuis longtemps les mathématiques sont considérées comme la longue des sciences, actuellement l'informatique partage cette tâche avec les mathématiques. Dans le domaine de la modélisation l'outil informatique est indispensable dans toutes les étapes de calcul.

#### VI.2. - ORGANIGRAMME GENERAL DU PROGRAMME EN ELEMENTS FINIS





### VI.3 - LES BLOCS FONCTIONNELS DU PROGRAMME



## VI.4. - LES DONNEES

Pour chaque plan d'eau  $\Lambda$

- Le nombre de triangle est  $NK(\Lambda)$
- Le nombre total des noeuds des arrêts des triangles qui correspond à la discrétisation linéaire est  $N1$
- Le nombre total des noeuds des arrêts des triangles correspond à la discrétisation quadratique est  $N2$
- Les coordonnées des noeuds des arrêts des triangles sont  $x, y, z$  et  $h$  du plan d'eau.

Pour chaque triangle  $I$ , on a donc :

$$N1(I, J) \quad J = 1, 2, 3$$

$$N2(I, J) \quad J = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

- Les noeuds qui correspondent aux conditions aux limites

## VI.5. - LES CONDITIONS INITIALES ET AUX LIMITES

A l'échelle de la crue, les conditions initiales sont données par le plan d'eau dans la retenue, tandis que les conditions aux limites sont :

- Les vitesses suivant les normales aux frontières sont nulles.
- Les vitesses, les concentrations et les hauteurs à l'entrée de la retenue sont données à partir des hydrogrammes et turbiditégrammes de crues.

## VI.6. - PROCEDURE DE CALCUL

### VI.6.1. - INTEGRATION NUMERIQUE

Pour cette partie on peut utiliser les méthodes suivantes :

#### a) Les méthodes produits

Elles consistent à utiliser dans chaque direction  $\xi$  et  $\zeta$  une intégration numérique à une dimension. Si nous utilisons  $r_1$  points dans le sens  $\xi$  et  $r_2$  points dans le sens  $\zeta$ , la méthode de Gauss intègre exactement le produit d'un polynôme en  $\xi$  d'ordre  $2r_1 - 1$  et d'un polynôme en  $\zeta$  d'ordre  $2r_2 - 1$ .

La méthode produit utilise  $r = r_1 \cdot r_2$  points, elle intègre tous les monômes.

$$\xi^i \zeta^j \quad \text{tel que } \begin{aligned} 0 \leq i \leq 2r_1 - 1 \\ 0 \leq j \leq 2r_2 - 1 \end{aligned}$$

## b) les méthodes directes

C'est l'extension à deux dimensions des méthodes d'intégration numérique à une dimension.

$$\iint_{\Omega} y(\xi, \zeta) d\xi d\zeta = \sum_{i=1}^r W_i y(\xi_i, \zeta_i)$$

Nous pouvons en particulier construire des méthodes de type **GAUSS** de type **HAMMER** qui intègrent tous les monômes d'ordre  $m$  :

$$\xi^i \zeta^j \text{ tels que } i + j \leq m$$

De telles méthodes utilisent moins de points que les méthodes produit et sont plus utilisées pour les éléments triangulaires.

### VI.6.2. - PROGRAMME D'INTEGRATION NUMERIQUE GENERAL

Il est souhaitable d'organiser les programmes d'intégration numériques de manière à ce qu'ils soient valables pour les méthodes "directes" ou pour les méthodes produites ; et pour divers types d'éléments à une, deux ou trois dimensions. La mise de toutes les formules d'intégration numérique sous forme général se fait comme suit :

$$I = \sum_{L=1}^r W_L Y(\xi_L)$$

A une dimension  $W_L = W_i$

A deux dimensions :

- méthodes produit :  $W_L = W_i W_j$   $r = r_1 \dots r_2$
- méthodes directes :  $W_L = W_i$

où  $\xi_{Lj}$  représente les coordonnées du  $L$ ème point d'intégration correspondant à  $W_L$   
 $r$  le nombre total de points d'intégration

L'organigramme d'intégration se réduit alors dans tous les cas à une simple boucle.

INTEGRALE = 0

POUR L = 1 à r

INTEGRALE = INTEGRALE +  $W_L Y(\xi_L)$

### VI.6.3. - ALGORITHME DE CONSTRUCTION DES MATRICES R ET DES VECTEURS FORCES F

Pour les hauteurs on notera la matrice par R1 et pour les vitesses et les concentrations on le notera par R2

#### VI.6.3.1. - Algorithmes de construction de R1 et R2

$$R = \int \int \phi_i \phi_j \det(j) d\xi d\zeta$$

a) Pour les hauteurs: R1

```

POUR K = 1 à NK (A) ( triangles )
  POUR I = 1 à 3 (Noeuds)
    POUR L = 1 à Nb (Points d'intégration de HAMMER )
      LIRE  $\phi_i^L(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$ 

      POUR L = 1 à Nb
        DET =  $\left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \xi} X(NI(K,I)) \right) \right]^3 \left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \zeta} Y(NI(K,I)) \right) \right] -$ 
 $\left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \zeta} X(NI(K,I)) \right) \right]^3 \left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i^L}{\partial \xi} Y(NI(K,I)) \right) \right]$ 

        POUR I = 1 à 3
          POUR J = 1 à 3
            POUR L = 1 à Nb
              R1 (NI(K,I), NI (K,J)) = R1 (NI(K,I), NI (K,J) )
              + W (  $\phi_i^L(NI (K,I)) \cdot \phi_j^L(NI(K,J))$  ) . DET
    
```

b) Pour les vitesses et les concentrations R2

POUR K = 1 à NK (A) ( Triangles)

POUR I = 1 à 6 (Nœuds )

POUR L = 1 à Nb ( Points d'intégration de HAMMER )

LIRE  $\phi_i^l(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$

POUR L = 1 à Nb

$$\text{DET} = \left[ \sum_{I=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \xi} X(N1(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{I=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \zeta} Y(N1(K,I)) \right) \right] -$$

$$\left[ \sum_{I=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \zeta} X(N1(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{I=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_i^l}{\partial \xi} Y(N1(K,I)) \right) \right]$$

POUR I = 1 à 6

POUR J = 1 à 6

POUR L = 1 à Nb

$$R2(N2(K,I), N2(K,J)) = R2(N2(K,I), N2(K,J))$$

$$+ W_L (\phi^L(N2(K,I)) \cdot \phi^L(N2(K,J))) \cdot \text{DET}$$

VI.6.3.2. - ALGORITHME DE CONSTRUCTION DES VECTEURS FORCES :  
 Fx, Fy, Fc, Fh et FZ.

a) Algorithme de Fx :

$$F_x = - \left( \iint \sum_{j=1}^N \left( \sum_{k1=1}^N (U_{k1} U_j \phi_{k1} \frac{\partial \phi_j^u}{\partial x} + V_{k1} U_j \phi_{k1} \frac{\partial \phi_j^v}{\partial y}) + g h_j \frac{\partial h_j}{\partial x} \right) \phi_j d\Omega - \left( \frac{g}{h c^2} \iint u \sqrt{u^2 + v^2} \right) d\Omega \right)$$

POUR K = 1 à NK(A)

POUR I = 1 à 6

POUR L = 1 à Nb

LIRE  $\phi_j^l(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$

POUR L = 1 à Nb

$$DET = \left[ \sum_{l=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \xi} X(NI(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{l=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \zeta} Y(NI(K,I)) \right) \right] - \left[ \sum_{l=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \zeta} X(NI(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{l=1}^6 \left( \frac{\partial \phi_j^l}{\partial \xi} Y(NI(K,I)) \right) \right]$$

POUR I = 1 à 6

POUR K1 = 1 à 6

POUR J = 1 à 6

POUR L = 1 à Nb

$$\mathbf{F}_{1X}(N_2(K,I)) = \mathbf{F}_{1X}(N_2(K,I)) +$$

$$W \left[ U(N_2(K,K1)) U(N_2(K,J)) \cdot \frac{\partial \phi^L(N_2(K,K1))}{\partial x} \right.$$

$$\left. (N_2(K,J)) + V(N_2(K,K1)) \cdot U(N_2(K,J)) \cdot \frac{\partial \phi^L(N_2(K,K1))}{\partial y} \right.$$

$$\left. + gh(N_2(K,J)) \cdot \frac{\partial \phi^L(N_2(K,J))}{\partial x} \right]$$

$$\phi^L(N_2(K,I)) \cdot \text{DET}$$

$$\mathbf{F}_{2X}(N_2(K,I)) = \mathbf{F}_{2X}(N_2(K,I)) +$$

$$\left[ U(N_2(K,I)) \sqrt{U(N_2(K,I))^2 + V(N_2(K,I))^2} / h(N_2(K,I)) \right]$$

$$\phi^L(N_2(K,I)) \cdot \text{DET}$$

$$\mathbf{F}_X(N_2(K,I)) = \mathbf{F}_{1X}(N_2(K,I)) + (g/c^2) \mathbf{F}_{2X}(N_2(K,I))$$

Pour le vecteur force  $\mathbf{F}_y$  on a le même algorithme que pour  $\mathbf{F}_x$  en remplaçant U par V, x par y et vis versa là où est nécessaire.

#### b) Algorithme de $F_h$

$$\mathbf{F}_h = - \iint \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (U_{ki} h_j) \frac{\partial (\phi_{k1}^u \phi_j^h)}{\partial x} + V_j h_{ki} \frac{\partial (\phi_j^v \phi_{k1}^h)}{\partial y} \right) \phi_i d\Omega$$

POUR K = 1 à NK(A)

POUR I = 1 à 3

POUR L = 1 à 4

$$\text{LIRE } \phi_i(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$$

POUR L = 1 à 4

$$\text{DET} = \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} X(N1(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} Y(N1(K,I)) \right) \right] -$$

$$\left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} X(N1(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} Y(N1(K,I)) \right) \right]$$

POUR I = 1 à 3

POUR KI = 1 à 3

POUR J = 1 à 3

POUR L = 1 à 4

$$F_h(N1(K,I)) = F_h(N1(K,I)) +$$

$$W \left[ U(N1(K,KI)) h(N1(K,J)) \cdot (\phi^L(N1(K,KI))) \frac{\partial \phi^L}{\partial x}(N1(K,J)) \right.$$

$$\left. \phi^L(N1(K,J)) \cdot \frac{\partial \phi^L}{\partial x}(N1(K,J)) \right] +$$

$$V(N1(K,KI)) h(N1(K,J)) \cdot (\phi^L(N1(K,KI))) \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(N1(K,J)) +$$

$$\left. \phi^L(N1(K,J)) \cdot \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(N1(K,J)) \right] \phi^L(N1(K,I)) \text{ Det}$$



c) Algorithme de Fc

$$F_c = - \iint \sum_{I=1}^3 \left( \sum_{J=1}^3 (U_{KI} C_J \phi_{KI} \frac{\partial \phi_J}{\partial x} + V_{KI} C_J \phi_{KI} \frac{\partial \phi_J}{\partial y}) + C_J \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon x \frac{\partial \phi_J}{\partial x}) + C_J \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon y \frac{\partial \phi_J}{\partial y}) \right) \phi_I d\Omega$$

POUR K = 1 à NK(L)

POUR I = 1 à 3

POUR L = 1 à 4

$$\text{LIRE } \phi_i(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$$

POUR L = 1 à 4

$$\text{DET} = \left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} X(NI(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} Y(NI(K,I)) \right) \right] -$$

$$\left[ \sum_{J=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} X(NI(K,I)) \right) \right] \left[ \sum_{I=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} Y(NI(K,I)) \phi^L(NI(K,K1)) \right) \right]$$

POUR I = 1 à 3

POUR K1 = 1 à 3

POUR J = 1 à 3

POUR L = 1 à 4

$$F_c(NI(K,I)) = F_c(NI(K,I)) + W \left[ U(NI(K,K1)) C(NI(K,J)) \right.$$

$$\left. \left( \phi^L(NI(K,K1)) \frac{\partial \phi^L}{\partial x}(NI(K,J)) + V(NI(K,K1)) C(NI(K,J)) \right) \right.$$

$$\left. \phi^L(NI(K,K1)) \cdot \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(NI(K,J)) \right] - C(NI(K,J)) \cdot \epsilon x$$

$$\frac{\partial \phi^L}{\partial x}(NI(K,J)) - C(NI(K,J)) \epsilon y \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(NI(K,J)) \phi^L(NI(K,I)) \text{ ] Det}$$

d) Algorithme de FZ

$$F_Z = - \iint (\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (U_{ki} C_{kj} h_j) \frac{\partial (\phi_{k1}'' \phi_{k1}' \phi_j^h)}{\partial x} + V_j C_{ij} h_{ii} \frac{\partial (\phi_j' \phi_j' \phi_{k1}^h)}{\partial y}) \phi_i d\Omega$$

POUR K = 1 à NK(A)

POUR I = 1 à 3

POUR L = 1 à Nb

LIRE  $\phi_i(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi}(\xi, \zeta), \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta}(\xi, \zeta)$

POUR L = 1 à Nb

$$DET = \left| \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} X(NI(K,I)) \right) \right| \left| \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} Y(NI(K,I)) \right) \right| -$$

$$\left| \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} X(NI(K,I)) \right) \right| \left| \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} Y(NI(K,I)) \right) \right|$$

POUR I = 1 à 3

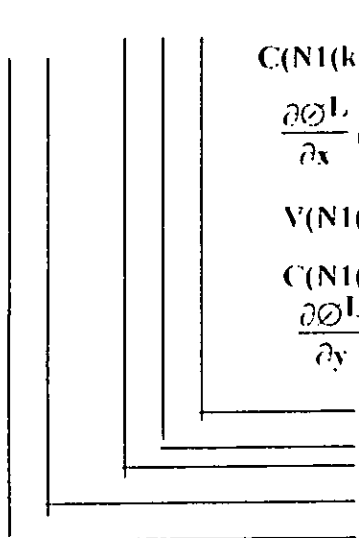
POUR KI = 1 à 3

POUR J = 1 à 3

POUR L = 1 à 4

$$F_Z(NI(K,I)) = F_Z(NI(K,I)) +$$

$$W_i \left[ U(NI(K,K1)) h(NI(K,J)) \cdot (\phi^L(NI(K,K1))) \frac{\partial \phi^L}{\partial x} NI(K,J) \right]$$



$$\begin{aligned}
 & C(N1(k,k1)) \cdot (\phi^L(N1(k,k1)) + \phi^L(N1(k,j)) \frac{\partial \phi^L}{\partial x}(N1(k,j))) \cdot \\
 & \frac{\partial \phi^L}{\partial x}(N1(k,j)) \cdot C(N1(k,j)) + \\
 & V(N1(k,k1)) \cdot h(N1(k,j)) \cdot (\phi^L(N1(k,k1)) \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(N1(k,j)) \\
 & C(N1(k,k1)) \cdot (\phi^L(N1(k,k1)) + \phi^L(N1(k,j)) \cdot \\
 & \frac{\partial \phi^L}{\partial y}(N1(k,j))) \cdot C(N1(k,k1)) \quad \left| \phi(N1(k,j)) \text{ Det} \right.
 \end{aligned}$$

### VI.7. - RESOLUTION DES SYSTEMES :

La résolution du système d'équations

$$[\mathbf{R}] = \{ \mathbf{U}_n \} = \{ \mathbf{F} \} \quad (16) \quad \text{avec } U_n = \frac{\partial h}{\partial y}$$

est une étape importante de la méthode des éléments finis.

Les méthodes de résolution de systèmes linéaires peuvent être classées en deux catégories :

- a) Les méthodes directes qui conduisent à la solution en un nombre d'opérations connu a priori
- b) Les méthodes itératives qui, conduisent à la solution par une succession d'améliorations d'une solution approchée; le nombre d'itérations nécessaire étant difficile à prévoir et dépendant de la matrice [R].

La différence entre les deux types de méthodes réside dans la sensibilité des premières aux erreurs d'arrondi et le nombre d'opération est moins important. Par contre, les deuxièmes sont plus simples à programmer et demandent moins d'espace en mémoire.

Nous utiliserons les méthodes directes étant donné que les conditions aux limites l'exigent.

Les étapes sont les suivantes :

- 1 - Triangularisation des matrices de rigidité
- 2 - Résolution du système triangulaire supérieur

## VI.7.1. - TRIANGULARISATION DES MATRICES R1 ET R2:

La triangularisation du système consiste à éliminer les inconnues  $U_s$ ,  $S = 1, 2, \dots, n-1$  dans les équations  $S+1$  à  $n$ .

L'élimination de  $U_s$  se fait de la manière suivante :

- Exprimer  $U_s$  en fonction de  $U_{s+1}, U_{s+2}, \dots, U_n$  et  $F_s$  en utilisant l'équation  $s$
- Reporter l'expression de  $U_s$  précédente dans les équations  $s+1, s+2, \dots, n$

Après élimination de  $U_s$  cette inconnue n'apparaît plus dans les équations  $s+1$  à  $n$  ; il y a donc des zéro dans la colonne  $s$  sous la diagonale. Après élimination des inconnues  $U_1$  à  $U_{n-1}$ , la matrice  $[R]$  est triangulaire supérieure. L'élimination de chaque inconnue  $U_s$  modifie  $[R]$  et  $\{F\}$

Notons  $\{R_s\}$  et  $\{F_s\}$  la matrice et le second membre après élimination des inconnues  $1, 2, 3, \dots, S$ , la matrice  $[R_0]$  étant la matrice  $[R]$  initiale :

$$[R] = [R_0] \text{ et } \{F_0\} = \{F\} \text{ système original}$$

éliminer  $U_1$  dans les équations 2 à  $n$

$$[R_1] \text{ et } \{F_1\}$$

éliminer  $U_2$  dans les équations 3 à  $n$

$$[R_2] \text{ et } \{F_2\}$$

éliminer  $U_s$  dans les équations  $S+1$  à  $n$

$$[R_s] \text{ et } \{F_s\}$$

éliminer  $U_n$  dans les équations  $n$

$$[S] = [R_{n-1}] \text{ et } \{F_{n-1}\} = \{F'\} \text{ système triangulaire}$$

L'algorithme se présente comme suit :

```

POUR S = 1 à N - 1
  POUR I = S + 1 à N
    C = RIS / RSS
    FI = FI - C · FS
  POUR J = S + 1 à N
    R = RIJ - CRIJ

```

Remarque : Pour chaque plan d'eau on refait ce travail

### VI.7.2. - RESOLUTION DES SYSTEMES :

La résolution se fait à partir de la dernière équation en calculant successivement  $U_n, U_{n-1}, \dots, U_1$

L'algorithme se présente comme suit :

```

POUR I = N - 1 à 1
  UI = (FI - ∑J=I+1N RIJ UJ) / R

```

### VI.8. - INTEGRATION DANS LE TEMPS

La dimension du temps est divisée en un nombre de petites intervalles (aussi petit que possible)

Les résultats obtenus à la limite de chaque intervalle de temps sont considérés comme conditions initiales pour le pas du temps suivant.

```

POUR t = 0 à T final ( avec un pas de Δt )
  POUR I = N - 1 à 1
    UI = (FI - ∑J=I+1N RIJ UJ) / R
  Ut+Δt (I) = Ft (I) · Δt + Ut (I)

```

(IV-2)

## CHAPITRE VII

# GENERALISATION DU MODELE POUR UNE PERIODE DE TEMPS

### VII.1.- INTRODUCTION:

L'établissement d'un modèle permettant la généralisation pour une période de temps nécessite les données homogènes et continues dans le temps. Les résultats de la simulation statistique sont des vecteurs c.a.d des fonctions discontinues, pour les injecter dans le modèle numérique, on doit passer par un lissage Cubique de spline.

Et pour compléter les données des crues collectées, dans lesquelles il n'y a pas de continuité sur l'observation de leur comportement, vu l'importance qu'elles puissent apporter pour notre étude.

A la suite de ces insuffisances relevées, nous avons jugé nécessaire d'en apporter un moyen statistique basé sur des hypothèses que nous présenterons dans ce qui suit, et ce la pour permettre une contribution de toutes les crues à la construction de notre modèle.

### VII.2.- HYPOTHESES:

Les deux hypothèses sont:

1/ Toutes les crues ont une même allure dans une échelle unitaire

$$t \in [0,1] \quad \text{et} \quad q \in [0,1]$$

2/L'allure de ces crues est une fonction moyenne d'une certaine fonction aléatoire.

### VII.3.- NOTION DE FONCTION ALEATOIRE (F-A):

Une fonction aléatoire qu'on note :  $X(t)$  est une grandeur aléatoire variant durant l'événement ou l'expérience.

La théorie des fonctions aléatoires a pour objet l'étude de phénomènes aléatoires. Elle est d'autant plus étendue et riche que celle des variables aléatoires.

#### VII.3.1.- DEFINITION:

Une fonction aléatoire peut durant l'expérience adopter une forme quelconque, inconnue d'avance. La valeur prise par une fonction aléatoire lors d'un événement d'une expérience est appelée réalisation, notée:  $X(t)$ . Une série d'expérience sur une F-A donne une famille de réalisation de cette fonction.

#### REMARQUE:

- \* Une réalisation d'une fonction est une fonction non aléatoire
- \* Une fonction aléatoire possède en même temps les propriétés d'une fonction aléatoire et d'une variable aléatoire.

### VII.3.2.- CARACTERISTIQUES NUMERIQUES DES FONCTIONS ALEATOIRES:

Les caractéristiques numériques (moyenne, espérance, variance et covariance) d'une fonction aléatoire sont un outil très souple et puissant. Elles permettent de résoudre assez simplement un grand nombre de problèmes pratiques. Elles sont en générale des fonctions.

### VII.3.3.- ESPERANCE MATHEMATIQUE:

L'espérance mathématique d'une fonction aléatoire est une fonction non aléatoire notée:  $Mx(t)$  qui toute valeur de l'argument  $t$  est égale à l'espérance mathématique de la section correspondante de la fonction aléatoire.

Elle peut être interprétée comme étant une certaine fonction moyenne autour de laquelle varient les diverses réalisations de cette fonction aléatoire.

### VII.3.4.- VARIANCE:

On appelle variance des fonctions aléatoires (dans notre cas les hydrogrammes et les turbiditégrammes), une fonction non aléatoire notée:  $Dx(t)$  dont la valeur, pour un pas de temps  $t$  donné, est égale à la variance de la section correspondante des fonctions aléatoires.

Pour un  $t$  fixé, la variance de la fonction aléatoire caractérise la dispersion des réalisations possibles de la fonction aléatoire par rapport à la moyenne, sa racine carrée est l'écart quadratique moyen de la F-A.

### VII.3.5.- FONCTION DE CORRELATION:

On appelle fonction de corrélation d'une fonction aléatoire, une fonction non aléatoire de deux arguments notée  $K_n(t,t')$  qui pour tout couple de la valeur  $(t,t')$  est égale à la covariance des sections correspondantes de la fonction aléatoire.

### REMARQUE:

$$K_n(t,t')=D_n(t)$$

En résumé, les caractéristiques fondamentales d'une fonction aléatoire sont l'espérance mathématique et la fonction de corrélation.

### VII.3.6.-CARACTERISTIQUES PROBABILISTES DES FONCTIONS ALEATOIRES:

Dans chaque section, la fonction aléatoire devient une variable aléatoire dont la fonction de répartition est une fonction à un seul argument.

La fonction de répartition d'un système de variable aléatoire de  $m$  équations et une fonction à  $m$  arguments.

En pratique cette caractéristique probabiliste est abandonnée du fait que l'approximation d'une fonction aléatoire par un système de variables aléatoire sera meilleure autant que le nombre d'arguments augmente.

### VII.3.7.- DETERMINATION EXPERIMENTALE DES CARACTERISTIQUES NUMERIQUES D'UNE FONCTION ALEATOIRE:

Soit  $X(t)$  une fonction aléatoire et étant donnée  $n$  réalisations de cette fonction. Pour déterminer les caractéristiques numériques d'une telle fonction, nous allons suivre la démarche suivante.

\* Considérons plusieurs sections de la fonction aléatoire, ces sections sont obtenues par discrétisation de l'argument aux points  $t_1, t_2, \dots, t_m$ .

\* Enregistrons les  $n$  valeurs prises par la F-A à chaque valeur de l'argument  $X_i(t_k)$   $i=1, n; k=1, m$  les résultats sont données dans le tableau suivant:

$X(t)$ \ $t$	$t_1$	...	$t_k$	...	$t_m$
$X_1(t)$	$X_1(t_1)$	...	$X_1(t_k)$	...	$X_1(t_m)$
$X_2(t)$	$X_2(t_1)$	...	$X_2(t_k)$	...	$X_2(t_m)$
...	...	...	...	...	...
$X_i(t)$	$X_i(t_1)$	...	$X_i(t_k)$	...	$X_i(t_m)$
...	...	...	...	...	...
$X_n(t)$	$X_n(t_1)$	...	$X_n(t_k)$	...	$X_n(t_m)$

\* On obtient donc  $n$  réalisations sur un système de  $m$  variables aléatoires.

\* L'espérance mathématique en chaque section est estimée par la moyenne de la variable aléatoire  $x(t_k)$ .

$$M_x(t_k) = \left[ \sum X_i(t_k) \right] / n$$

\* La variance en chaque section est donnée par:

$$D_x(t_k) = \left[ \sum (X_i(t_k) - M_x(t_k))^2 \right] / (n-1)$$

qui est un estimateur de la variance.

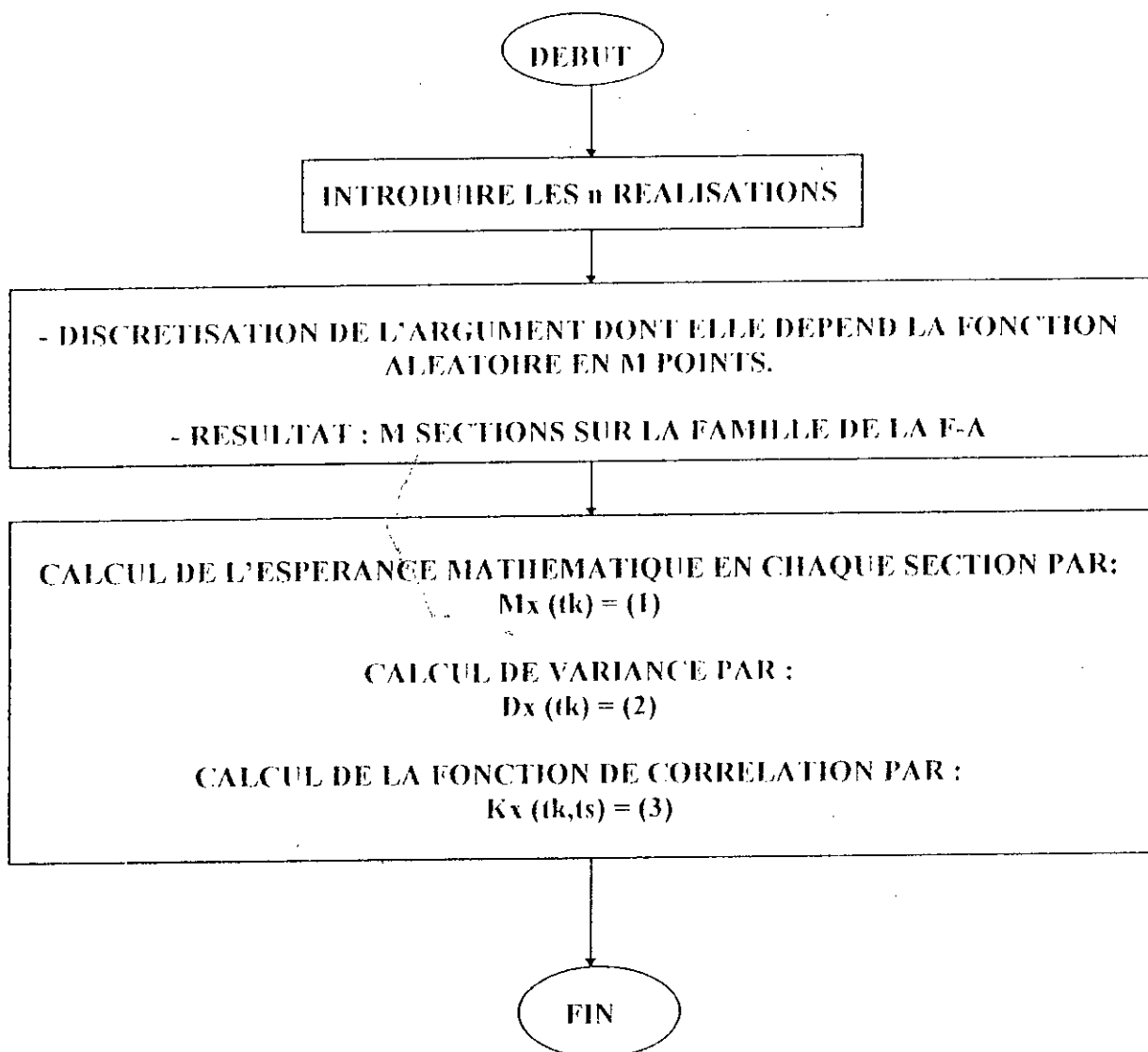
\* Les covariances sont données par :

$$K_x(t_k, t_s) = \left[ \sum (X_i(t_k) - M_x(t_k)) * (X_i(t_s) - M_x(t_s)) \right] / (n-1)$$

est un estimateur sans biais



### VII.3.8.- ORGANIGRAMME RECAPITULATIF :



### VII.4.- INTERPOLATION DES DEBITS LIQUIDES ET SOLIDES DES CRUES PAR LA FONCTION CUBIQUE DE SPLINE:

#### VII.4.1.- INTRODUCTION:

Elle permet une représentation complète de l'information contenue dans les données. Dans notre cas elle complète les données des débits solides durant les crues où il y a un nombre suffisant de données de débits liquides et insuffisant de débits solides.

Les polynômes d'interpolation cités ci-dessus, sur de nombreux points d'appuis comportent trop de paramètres ce qui nécessite des nombreux calculs, pour pallier à ces difficultés, d'autres méthodes consistent à déterminer des polynômes d'interpolation de bas degré sur des sous intervalles consécutifs. Ces méthodes peuvent aboutir à un approximant avec des points de discontinuité (aux extrémités des sous intervalles)

Dans ce cas les fonctions spline sont les seuls approximants dont les dérivées sont continues, c'est à dire convenables pour approximer une fonction quelconque avec un grand nombre de points d'appuis

#### VII.4.2.- PRESENTATION DE LA FONCTION SPLINE:

On appelle fonction spline d'ordre  $m$  fonction  $S(x)$  tel que:

$S(x_j) = y_j$  (propriété d'interpolation)  
 $S(x)$  est un polynôme de degré inférieur ou égale à  $m$  sur chaque sous intervalle  $(x_i, x_{i+1})$   
 $S(x)$  et ses dérivées d'ordre  $(m-1)$  est une fonction continue sur  $(x_0, x_n)$ .

Le plus utilisé des fonctions splines est le spline cubique c'est à dire  $m=3$ , définie par

$$S(x) = (X_{i+1} - X)^3 * Z_i / (6 * h_i) + (X - X_i)^3 * Z_{i+1} / (6 * h_i) + (Y_i / h_i - Z_i * h_i / 6) * (X_{i+1} - X) + (X_{i+1} - X) + (Y_{i+1} / h_i - Z_{i+1} * h_i / 6) * (X - X_i)$$

Ayant les conditions

$$\begin{aligned} S''(x_i) &= Z_i = S''_{i-1}(X_{i+1}) \\ S''(x_{i+1}) &= Z_{i+1} = S''_{i+1}(X_{i+1}) \\ h_i &= X_{i+1} - X_i \\ S_i(x_i) &= Y_i; S_i(X_{i+1}) = Y_{i+1} * S'_i(X_{i+1}) = S'_{i+1}(X_{i+1}) \end{aligned}$$

Il n'existe alors que  $(n-1)$  points à deux intervalles consécutifs, on ne peut avoir donc que  $(n-1)$  équations linéaires avec  $(n+1)$  inconnues  $Z_i$

Pour obtenir une solution  $(Z_0, \dots, Z_n)$  il faut spécifier deux conditions supplémentaires de régularité

$Z_0$  et  $Z_n$  les valeurs de la fonction au niveau du premier et du dernier point d'intervalle. Dans notre cas c'est les valeurs des débits liquides et solides à l'entrée de la retenue juste avant l'arrivée de la crue et à la fin de la crue

Sous forme matricielle on aura donc:

$$A * Z = Y \quad Z = A^{-1} * Y$$

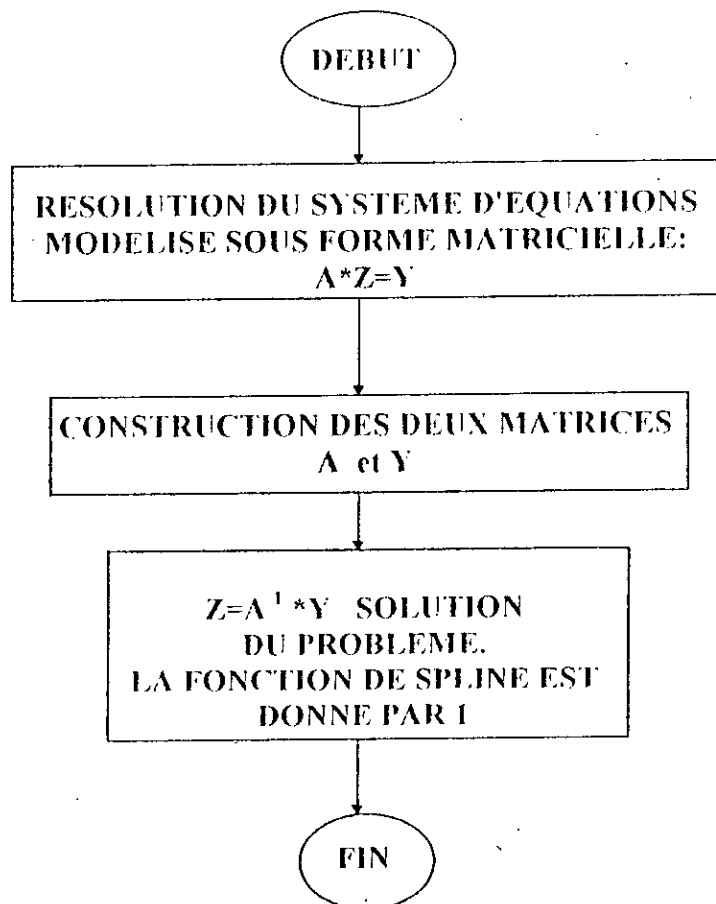
Avec :

$$\begin{bmatrix} 2(h_0 + h_1) & h_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & h_2 & 2(h_2 + h_3) & h_3 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{n-3} & 2(h_{n-3} + h_{n-2}) & h_{n-2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots \end{bmatrix}$$

C'est la matrice A

$$Y = \langle 6 \left( \frac{Y_2 - Y_1}{h_1} - \frac{Y_1 - Y_0}{h_0} \right) - h_0 * Z_0, \dots, 6 \left( \frac{Y_n - Y_{n-1}}{h_{n-1}} - \frac{Y_{n-1} - Y_{n-2}}{h_{n-2}} \right) - h_{n-1} * Z_n \rangle$$

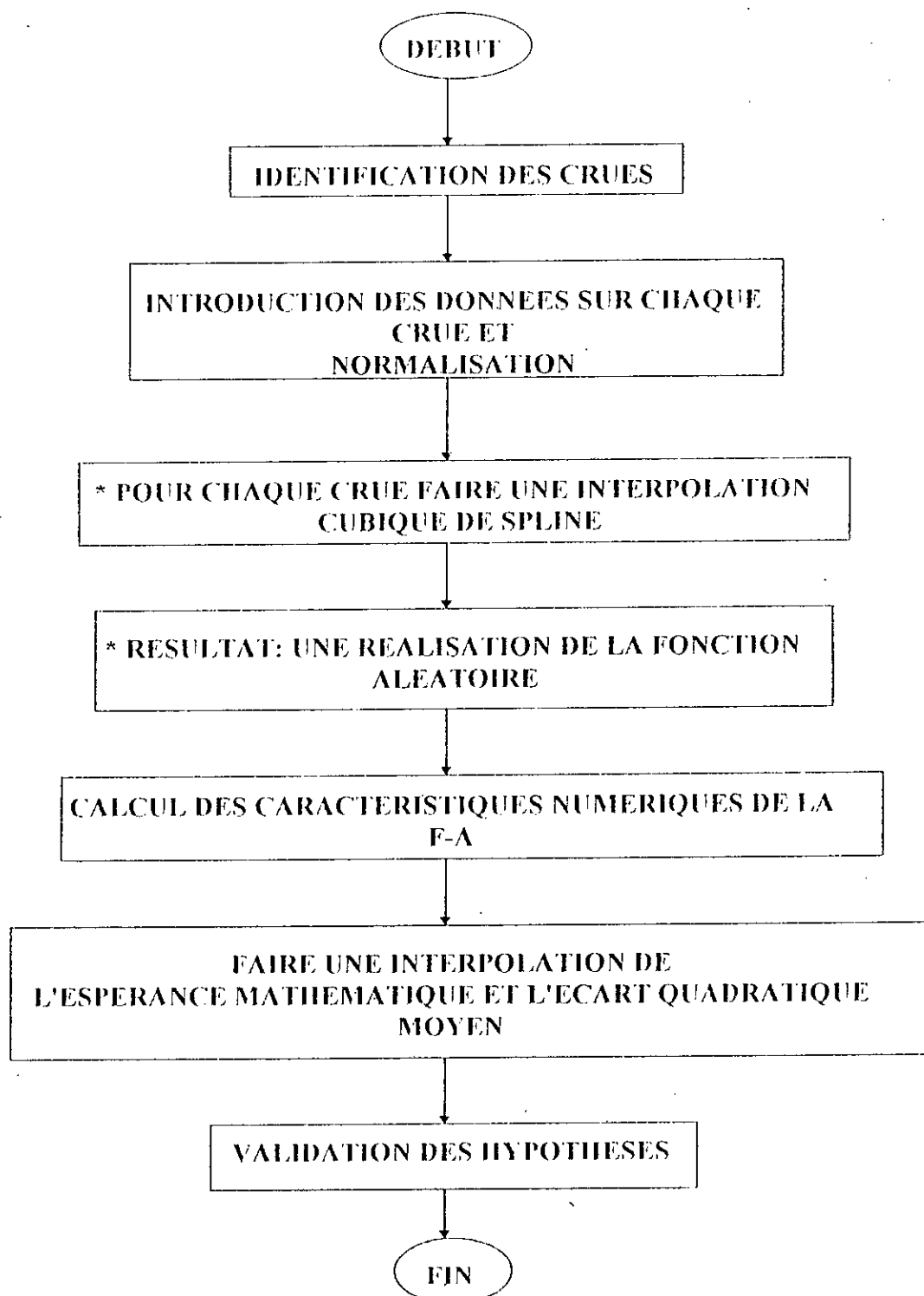
#### VII.4.3.- ALGORITHME DE LA METHODE SPLINE CUBIQUE:



Si  $Y_i$  prend les données mesurées des débits liquides (solides) et  $h_i$  sont des pas de temps, alors le résultats  $Z$  représente les valeurs des débits liquides (solides) aux temps voulues.

## VII.5.-VALIDATION DES HYPOTHESES:

Pour vérifier les hypothèses présentées dans le deuxième paragraphe, nous avons proposé l'organigramme suivant:



## CHAPITRE VIII

### APPLICATION: CAS DE LA RETENUE DE BENI AMRANE

#### VIII.1. - INTRODUCTION :

Nous avons choisi ce barrage du fait qu'il se remplit 05 à 06 fois par ans, ce qui nous facilite à suivre l'évolution spatiale et temporelle de la vase

Le barrage est situé sur l'oued ISSER, qui avec une pente de 4 m/km transporte une eau fortement chargée de solide, constitué de limons et de sables fins

Le bassin versant du site couvre une superficie de 3710 km<sup>2</sup>. Le poids moyen annuel des sédiments qui traversant le barrage est de 67 millions de tonnes, sur ces 67 millions de tonnes 4 5 hm<sup>3</sup> restent dans la retenue.

#### VIII.2.- INTERPRETATION DES RESULTATS :

- Pour toutes les zones ( stations pluviométriques ), le meilleur ajustement des débits solides en fonctions des débits liquides et intensités de pluie est de forme  $Q_s = A Q_l^b Int^c$

- Les variables aléatoires débit liquide et intensité de pluie suivent des lois log normale

Les résultats trouvés mettent en évidence l'évolution de la vitesse et de la concentration dans le temps, ainsi que leur répartition dans l'espace de la retenue durant une crue.

\* A l'échelle d'une crue :

D'après les résultats représentés sur les pages ( 112. ...132 )

- Cas des vitesses :

L'évolution des vitesses dans le temps suit l'hydrogramme de crue, avec un certain décalage, tandis que leurs répartitions dans l'espace, on remarque la formation de trois rouleaux de recirculation dans trois zones différentes A, B et C



La zone A est caractérisée par :

- Une variation considérable des vitesses dans l'espace, pour un temps donné, la variation des vitesses dépasse 0.3 m/s sur une distance de 10 m
- Une grande variation des coordonnées du centre de rouleaux de recirculation dans le temps ( plus de 20 m) entre le début et la fin de la crue.

La zone B :

Dans cette zone, les vitesses sont inférieures aux vitesses de la zone A, et leurs variations dans l'espace sont moyennes.

La zone C :

Cette zone est caractérisée par :

- Une grande superficie
- Des vitesses faibles, qui ne dépassent pas 0.25 m/s
- Une variation faible dans l'espace.

#### **CAS DES CONCENTRATIONS :**

Contrairement à la distribution des vitesses, pour les concentrations, la zone A est caractérisée par une moyenne concentration avec une très grande variation dans l'espace.

La zone B caractérisée par une faible concentration et une faible variation dans l'espace.

La zone C est caractérisée par une forte concentration et une grande variation dans l'espace.

En conclusion, La répartition des concentrations dans la retenue, dépend essentiellement des vitesses et de leurs variations dans l'espace.

Elles sont inversement proportionnelles aux vitesses, et pour un pas de vitesse  $\Delta v$ , on remarque que  $\Delta c$  équivalent dépasse  $60 \cdot \Delta v$ .

La comparaison entre les résultats des deux crues ( 12/10/81 et 17/02/82 ) qui atteignent la retenue dans deux plans d'eau initiaux différents et avec des turbidités différentes, on remarque que la structure est la même, est la variation consiste dans l'emplacement des centres des rouleaux de recirculation.

Le dernier point de l'application, celui de l'évolution de la vase dans le temps et dans l'espace :

Dans la première année, la vase forme deux deltas au pied de la digue et à l'entrée de la retenue, avec des hauteurs de vase importantes sur l'axe de la retenue. Tandis que, pour les quatre années qui suivent, la vase se répartie sur les deux rives du plan de la retenue et cela due au changement du plan topographique.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail ne constitue qu'une modeste contribution à l'élaboration d'un modèle mathématique, de simulation du phénomène de l'envasement des retenus.

Le modèle établi s'avère utile pour la détermination:

- de la localisation des zones de provenances des sédiments.
- des périodes de fortes érodabilités.
- des distances de transport.
- des quantités des sédiments transportées par les cours d'eau.
- de la localisation des zones de dépôt dans la retenue ( zones de chasse et de dragage)
- de la localisation des zones d'affouillement dans la retenue.
- des hauteurs de sédiments déposées, dans chaque point durant le temps.
- de la qualité de l'eau dans les points d'aspiration des stations de pompage.

Les résultats de ce modèle ne sont qu'approximatifs, du fait que ce dernier est élaboré avec des hypothèses simplificatrices, pour les améliorer, nous proposons:

- d'améliorer la première partie, en injectant des données en fur et à mesure.
- d'étudier plus profondément les conditions aux limites (couche limite turbulente).
  - \* Vitesses de frottement.
  - \* Vitesses critiques d'arrachement des particules solides.
  - \* De prendre en considération la saltation des particules solides durant une crue.
  - \* De prendre en considération la chasse des sédiments, en ajoutant à l'équation de continuité de la phase liquide les débits sortants comme conditions aux limites, pour déduire des débits solides chassés.



\*D'injecter le mode d'exploitation de la retenus.

\*De prendre en considération le tassement et la consolidation des sédiments dans la retenue.

Si on arrive à améliorer ce modèle par les recommandation cités au paravent, ce dernier peut être considéré comme un protocole d'exploitation de la retenus, dans le but, non seulement de localiser les zones de chasse ou de dragage, mais pour chasser maximum de sédiments par minimum d'eau ( minimiser le taux de rétention de la retenue ) et préserver les organes sensibles du barrage.

-De prendre en considération les zones de dépôts dans l'emplacement du vidange de fond pour minimiser les distances de transport des sédiments chassés.

En fin, avec quelques modifications, le modèle peut servir pour d'autres applications.

-On ajoute aux coefficients de diffusion turbulente, les termes dus à la diffusion moléculaire, le modèle numérique (la deuxième partie ) peut servir comme modèle de diffusion des polluants dans les cours d'eau et dans les retenues.

-On change les conditions aux limites, le modèle peut-être utile dans le domaine de la sédimentologie marine, ou celui de la pollution dans les zones des rejets des centrales thermiques.

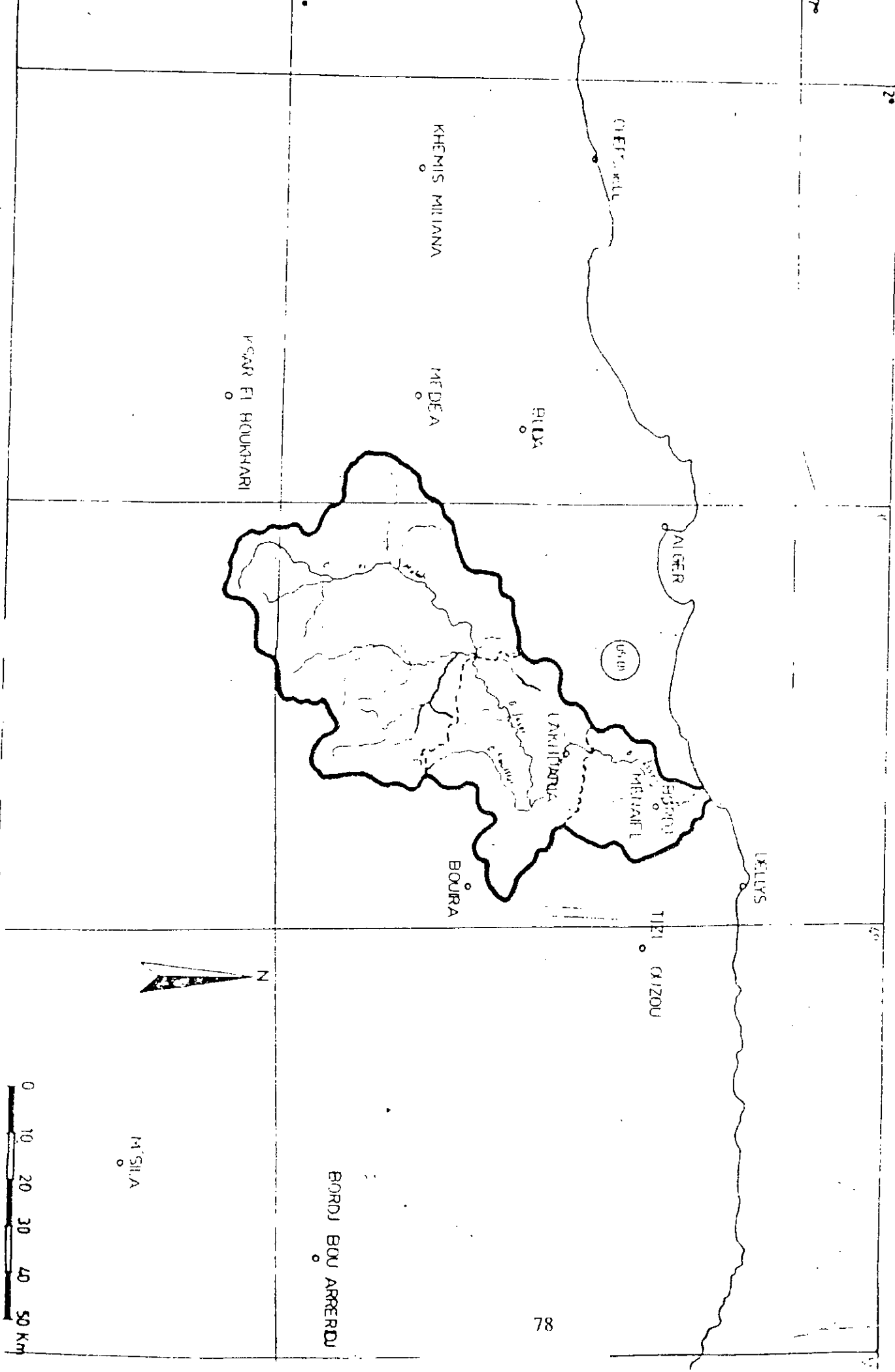
En résumé, les modèle établi dans cette thèse est une étape dans la modélisation de la sédimentologie et la diffusion.

## BIBLIOGRAPHIE

1. **A.N.R.H**                      **Annuaire hydrologique de l'ALGERIE**                      **1977-1978**
2. **Barbara M.et**                      **Estimation des apports solide à l'éxitoire**  
**Derrar A.**                      **d'un bassin versant ( TAFNA).**  
Thèse d'ingéniorat, Institut des Mathématiques Appliquées de Blida 1992.
3. **Bernard Q.**                      **Traité d'Hydraulique fluviale et torrentielle appliquée, Tome II**  
Edition **EYROLLES PARIS 1984.**
4. **Boumahrat M.**                      **Méthodes numériques**  
**Et Gourdin M.**                      **Editions O.P.U 1983.**
5. **Commission Internationale des Grands Barrages**  
**Sedimentation control of reservoir**  
**Bulletin N° 52 1972**
6. **Comolet R.**                      **Mécanique expérimentale des fluides Tome I**  
Editions **MASSON ÀRIS 1976**
7. **Gouyri D**                      **Une présentation de la méthode des éléments finis**  
**G.Touzot**  
**MALOINE S.A Editeur 1979**
8. **Hadj Rabia N.**                      **Contribution à l'étude du modèle numérique bidimentionnelle de**  
**transport de sédiments en suspension**  
**Thèse de Magister E.N.P 1994**
9. **Hug M.**                      **Mécanique des fluides appliquées aux problèmes d'aménagement**  
**et d'énergie**                      **Edition EYROLLES 1961**
10. **Lallavsky S.**                      **Précis d'hydraulique fluvial**                      **DUPOND EYROLLES 1962**
11. **Morice B.**                      **Barrages mobiles et ouvrages de dérivation à partir des rivières**  
**transportant des matériaux solides**  
Edition **EYROLLES PARIS 1984**
12. **Mihin S.**                      **Etude hydrodynamique de la concentration des particules solides en**  
**suspension durant une crue sur modèle mathématique.**  
**Thèses d'ingeniorat E.N.S.H 1994**
13. **Moise S et**                      **Itérations et approximations**  
**Hermann M.**                      **Edition EYROLLES PARIS 1988**
14. **Pechon P. et**                      **Modélisation numérique des écoulements à surface libre**  
**Hervouet J.M**                      **La houille blanche N° : 02 1991**
15. **Remini B.**                      **Etude hydrodynamique de l'envasement des retenues sur expérimentale.**  
**Thèse de Magister E.N.P 1991**
16. **Quittard P. et**                      **Cours statistiques TOME I**  
**Lignelet M.**                      **Edition O.P.U 1983**

17. **Timatine A.** Etude de la variation de la concentration d'un polluant dans un cours d'eau sur modèle numérique  
Thèse d'ingénieur, Institut de chimie industrielle, Université de Blida 1994.
18. **William H.** Numerical recipes  
**Saula T.**  
**Brian P.**  
**Vetterlang T.**
19. **Zech Y.** et **Vanski M.** Fourier analyses for testing a finite method in shallow water problems
20. **BERGHOUT A.** Etude hydrodynamique de l'envasement des retenues sur modèle mathématique.  
Thèse d'ingénieur, ENSH Blida 1991.
21. **Onishi Y.** "Sediment contaminant transport model"  
J.hydr, div, ASCE, 107 (9), pp 1089-1107 (1981).
22. **Haden and Shen** "Numerical simulation of mixing in natural rivers"  
J.hydr, div, ASCE, 110 (4), pp 393-408 (1979).
23. **Holly, FM, Jr, and Nerat, G.**  
"Field calibration of stream tube dispersion model"  
J.hydr, div, ASCE, 109 (11), pp 1455-1470 (1983).
24. **Verboom, G.K.**  
"The advection -dispersion equation for an anisotropic medium solved by fractional-step methods"  
Mathematical model for environmental problems.  
(proc.Int.conf) University of Southampton , pp 299-312 (1975)
25. **G.K.Y. Luk, Y.L.Lau, and W.E.Watt.**  
"Two dimensional mixing in rivers with unsteady pollutant source"  
Journal of environmental engineering vol 116, N° 1 February, (1990).
26. **Lars Ekbjerg and Peter Justesen.**  
"An explicit scheme for advection- diffusion modeling in two-dimensions"  
Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering (ISVA) Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark. 1990
27. **Tawutchi Tingsanchali**  
"Stability analysis of two-dimensional depth-averaged model"  
Journal of Hydraulic engineering vol 115, N° 9 September, (1989).

# ANNEXES



CARACTERISTIQUES DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES

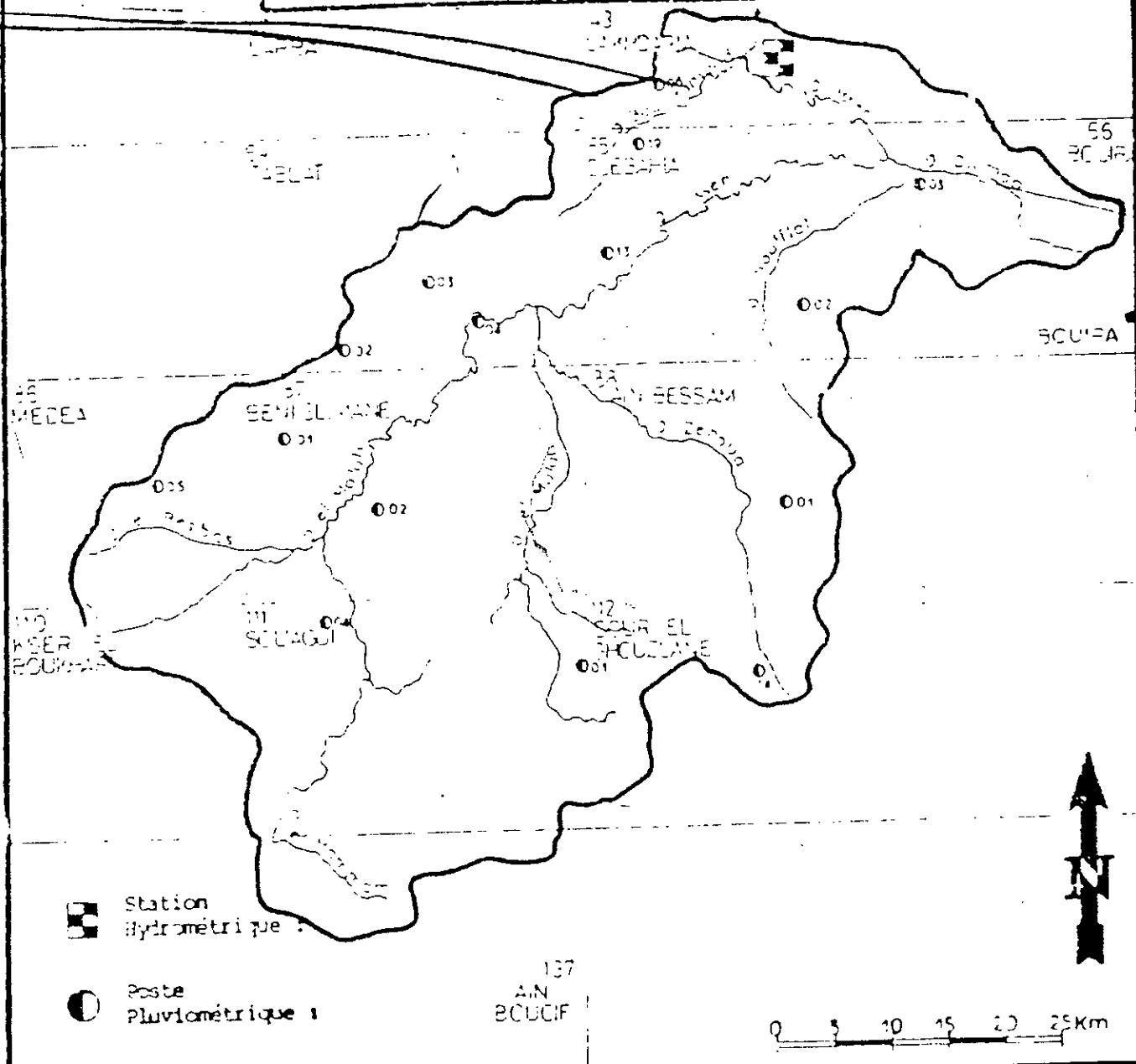
CODE	NOM DE LA STATION	X	Y	LONGITUDE	10111001	10111002
09 02 02	MULLERE	542.85	362.50	03 10' 30"	36 20' 55"	875
09 02 03	LAPAL DRY	554.75	365.80	03 10' 45"	36 26' 41"	450
09 02 05	RAMI SAIRONE	546.70	376.00	03 10' 40"	36 14' 15"	400
09 03 04	FOUR DE LA TRAILLE	559.15	364.00	03 11' 00"	36 20' 51"	370
09 04 02	FOUR DE KIBALIS	584.00	363.40	03 12' 00"	36 23' 00"	200
09 04 03	DALLIGNA	594.80	363.45	03 12' 00"	36 20' 41"	500
09 04 04	LOZFOU	571.10	361.65	03 12' 00"	36 13' 06"	450
09 04 05	LOZFOU	570.00	369.50	03 16' 45"	36 17' 16"	50
09 05 06	LEZIBARIN GORGE S	594.50	366.10	03 16' 10"	36 15' 20"	415
09 05 10	P. MAILLEFEIN	591.00	350.25	03 15' 15"	36 19' 00"	22

PLUIES MENSUELLES

ANNEE : 1978-1979

IPOSTES :	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	MAXJ	ANNEE :
: 9- 2- 2:	8.5	121.4	91.6	21.8	68.9	116.9	87.1	69.4	23.6	1.7	0.0	8.1	43.7	619.0 :
: 9- 2- 3:	0.0	88.5	67.6	23.8	33.8	167.2	92.4	50.0	15.2	24.5	0.4	0.0	61.2	563.4 :
: 9- 3- 2:	0.5	77.0	49.4	4.5	50.1	86.3	47.9	29.0	14.4	6.4	0.0	3.3	23.3	368.8 :
: 9- 3- 4:	0.0	50.9	71.1	18.6	35.7	114.8	60.9	25.4	9.4	4.0	1.5	*****	*****	***** :
: 9- 4- 2:	0.0	39.7	119.8	12.5	126.7	*****	38.6	*****	4.0	6.2	1.5	2.0	*****	***** :
: 9- 4- 3:	13.4	63.7	91.4	21.4	65.6	152.4	117.9	66.4	14.4	8.7	6.1	7.9	50.0	629.3 :
: 9- 4- 6:	6.1	106.7	87.9	36.9	70.1	224.1	168.4	56.5	15.0	0.7	0.6	4.2	80.5	782.2 :
: 9- 5- 2:	6.8	65.9	93.2	43.8	62.8	189.4	133.5	48.7	9.6	4.3	*****	14.3	*****	***** :
: 9- 5- 6:	10.4	107.6	124.1	41.8	55.2	185.5	158.7	80.3	27.0	17.4	11.9	*****	*****	***** :
: 9- 5- 10:	9.5	89.9	57.4	48.8	51.7	146.9	84.4	66.8	9.0	2.0	0.0	0.0	49.5	566.4 :

STATION: LAKHDARIA  
 CODE: 109\_05\_01 SUBD: Isser



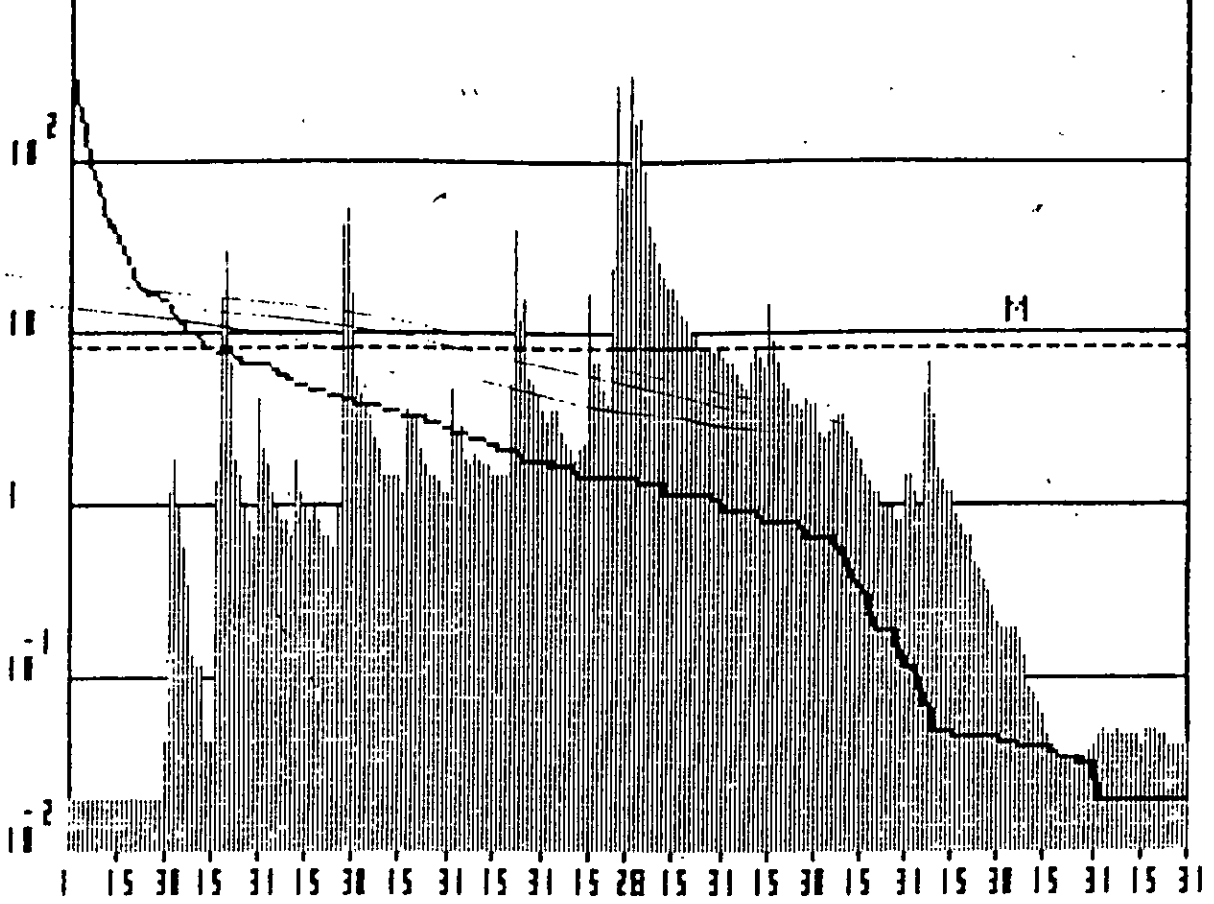
DONNEES MORPHOMETRIQUES

X	=	79.10		Longueur du rectangle équivalent	=	28.2	km
Y	=	330.75		Longueur du thalweg principal	=	200	km
Altitude minima	=	90	m	Densité de drainage	=	53	km <sup>2</sup> /km
Altitude maxima	=	1810	m	Indice de compacité	=	1.20	
Altitude moyenne	=	710	m	Indice de pente de Roche	=	0.11	
Surface	=	1335	km <sup>2</sup>	Coefficient de Torrentialité	=	20.5	
Trésimètre	=	270	km				



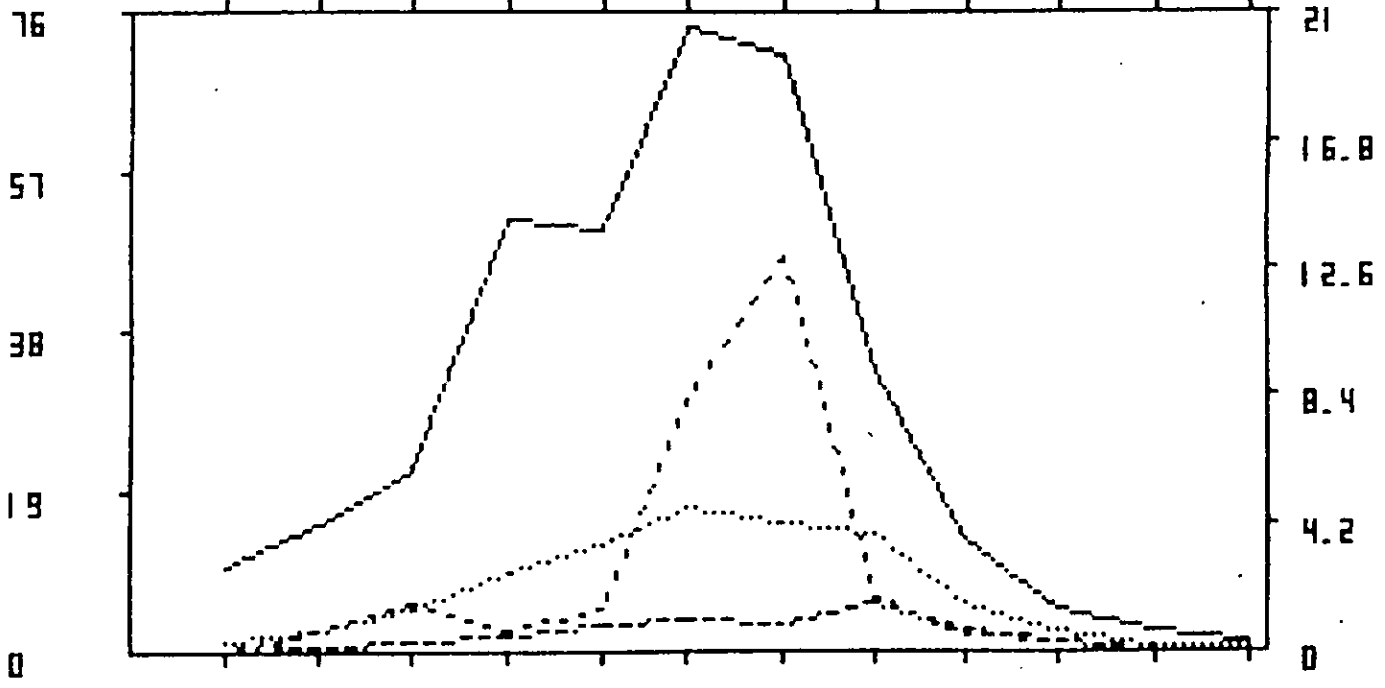
M3/S

10<sup>3</sup>



PRECIP

S O N D J F M A M J J A S O N D



OUED ISSER A LAKHDARIA  
1978 - 1979

SURFACE DU BASSIN VERSANT: 3615. KM2

STATION MISE EN SERVICE EN  
NOMBRE D'ANNEES D'OBSERVATIONS

CODE

9- 5- 1  
1954

EQUIPEMENT LIMNIGRAPHIQUE HL LP EQ JM TC SB TS MG

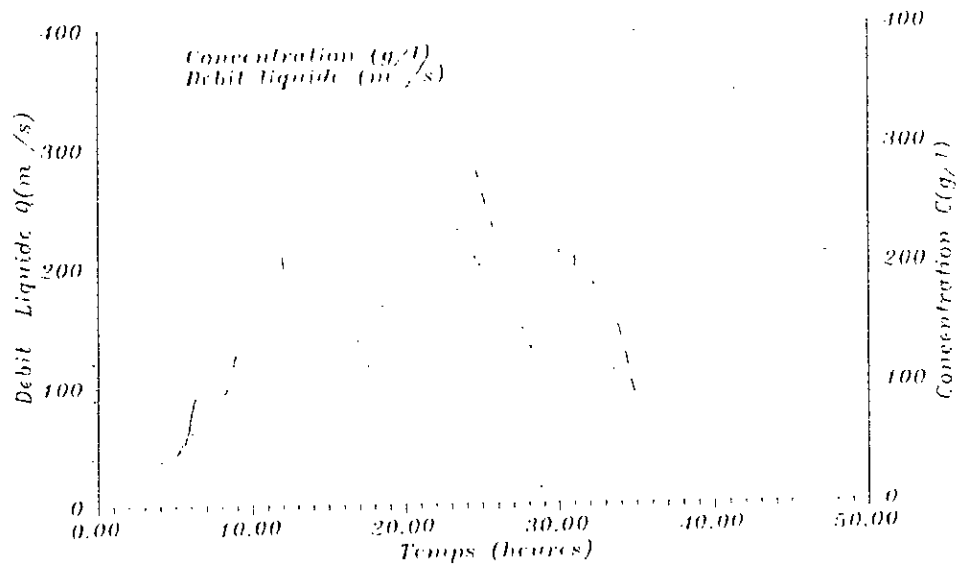
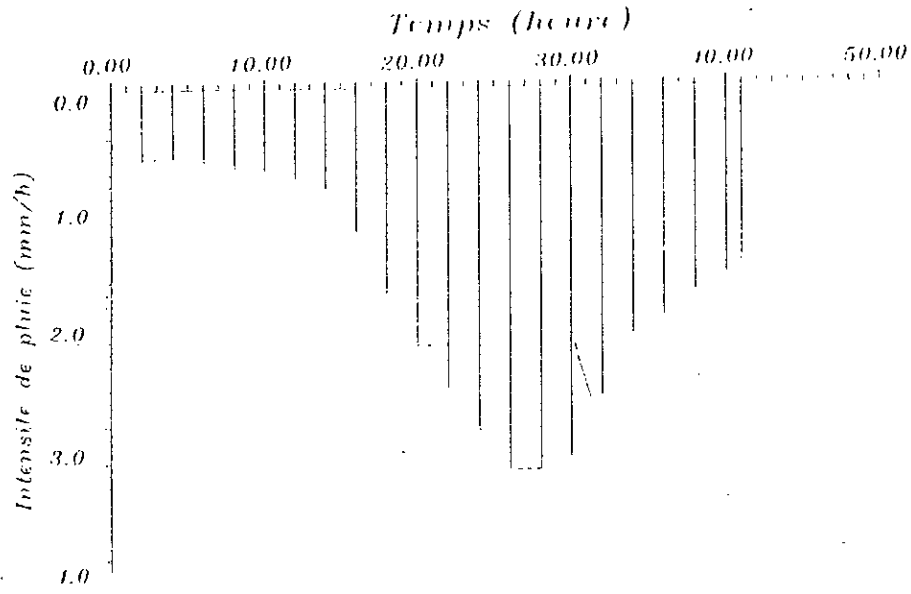
17

	JOUR	SEPT	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	ANNEE
	1	.020	.044	4.09	7.94	1.22	3.58	83.0	6.98	3.83	1.53	.194	.042	
	2	.020	.044	2.05	5.39	4.76	3.32	326.	6.72	3.10	1.53	.194	.042	
	3	.020	1.21	1.70	4.34	3.95	3.10	175.	6.72	2.67	1.22	.194	.046	
	4	.020	1.88	1.22	3.83	2.45	3.58	161.	6.72	2.45	1.08	.194	.049	
	5	.020	.948	1.22	3.58	2.88	3.32	184.	6.19	2.45	.948	.194	.046	
	6	.020	.680	.948	3.32	2.23	3.58	90.1	5.66	2.67	1.22	.194	.046	
	7	.020	.572	.814	3.10	1.88	2.67	59.6	5.13	3.10	4.32	.194	.046	
	8	.020	.356	.814	2.45	1.70	2.67	44.2	5.13	2.88	6.89	.175	.049	
	9	.020	.356	.814	2.05	1.53	2.23	35.3	4.86	3.32	3.38	.138	.049	
	10	.020	.140	.814	1.88	2.02	2.05	30.2	4.34	3.32	2.07	.120	.046	
DEBIT	11	.020	.116	.680	1.53	1.88	1.88	25.7	6.66	2.88	1.60	.091	.046	
	12	.020	.116	1.39	1.53	1.88	1.88	21.9	8.39	2.67	1.34	.081	.046	
	13	.020	.116	1.88	1.53	1.70	1.70	19.7	7.25	2.45	1.13	.072	.046	
MOYEN	14	.020	.044	1.22	1.53	1.70	2.05	17.9	5.66	2.45	1.23	.072	.046	
	15	.020	.044	.948	1.53	1.53	2.23	17.9	6.45	2.05	1.23	.062	.042	
JOURNALIER	16	.020	.044	.814	1.22	1.53	16.9	16.9	12.1	1.88	.920	.052	.042	
	17	.020	.044	.814	1.22	1.53	10.1	15.6	14.7	1.70	.871	.046	.049	
	18	.020	1.40	.948	1.35	1.53	6.72	13.7	9.24	1.53	.772	.039	.046	
(M3/S)	19	.020	4.58	.814	3.59	1.53	6.72	12.5	6.72	1.35	.723	.035	.049	
	20	.020	15.9	.814	3.32	1.53	4.86	11.6	5.66	1.35	.674	.034	.049	
	21	.020	30.6	.680	2.67	1.53	4.86	10.7	5.13	1.22	.674	.033	.046	
	22	.020	6.92	.680	3.01	4.88	3.83	10.4	4.60	1.22	.635	.032	.046	
	23	.020	3.26	.680	2.05	39.3	3.93	9.81	4.09	1.08	.480	.032	.046	
	24	.020	1.88	.572	1.70	10.4	24.9	9.24	3.83	.948	.448	.032	.046	
	25	.020	1.53	.572	1.53	12.2	271.	8.39	3.83	.948	.416	.033	.042	
	26	.020	1.22	.993	1.53	16.0	277.	8.10	3.83	.948	.384	.034	.042	
	27	.020	.948	16.6	1.53	6.58	73.0	7.82	3.58	.948	.320	.035	.042	
	28	.020	.814	43.7	1.35	5.39	95.2	7.82	4.09	.814	.295	.035	.042	
	29	.020	.680	55.8	1.35	4.09		7.82	3.83	.814	.270	.035	.042	
	30	.020	.680	17.4	1.22	4.94		7.53	3.83	.814	.219	.036	.042	
	31		2.27		1.22	4.34		7.53		.948		.039	.042	

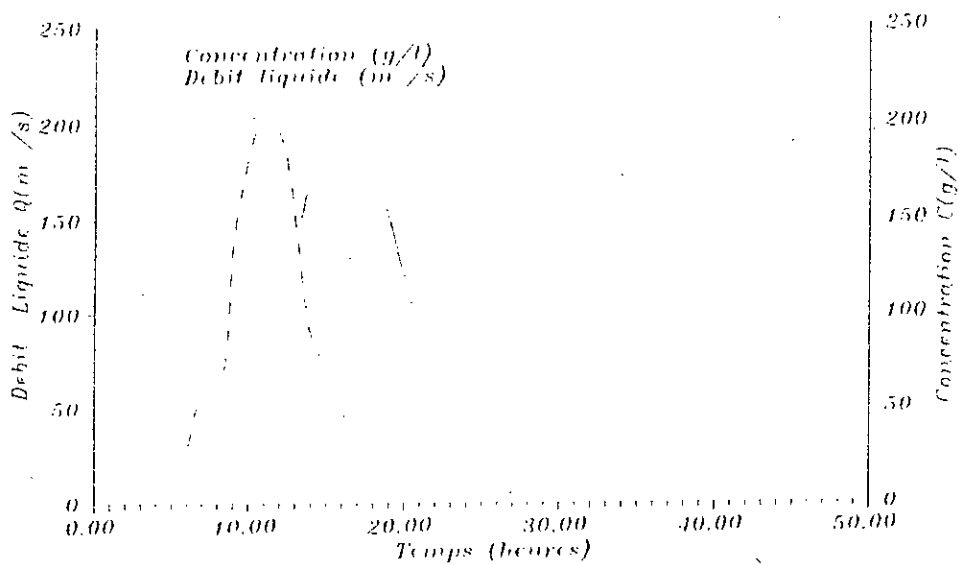
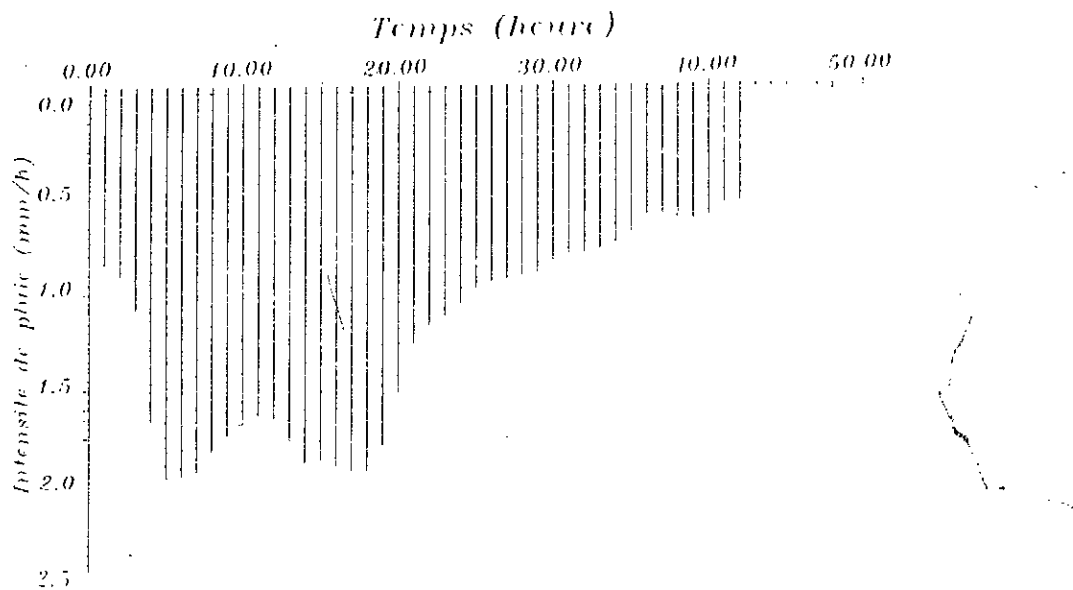
DEBIT	MAXIMUM	.020	62.1	83.4	17.2	85.9	901.	541.	20.4	3.83	12.2	.194	.049	
INSTANTANE	JOUR	1	21	29	19	23	25	2	16	1	7	1	4	
(M3/S)	MINIMUM	.020	.044	.572	.948	.948	1.70	7.53	3.58	.814	.219	.037	.042	
	JOUR	1	1	24	19	2	13	30	27	.28	30	23	1	
DEBIT	ANNUEL	.020	2.56	5.42	2.43	4.86	29.9	47.0	6.07	1.96	1.25	.389	.045	8.27
MOYEN (M3/S)	INTERANN.													13.7
MODULE (L/S/KM2)		.006	.709	1.50	.672	1.34	8.28	13.0	1.68	.542	.358	.025	.012	2.31
VOLUME ECOULE (MM3)		.052	6.87	14.0	6.51	13.0	72.4	126.	15.7	5.25	3.35	.238	.121	263.
LAME ECOULEE (MM)		.014	1.90	3.88	1.80	3.60	20.0	34.8	4.35	1.45	.927	.066	.033	72.3
LAME INTERANNUELLE (MM)														119.

		TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION												
APPORT (1000T)		.000		3327	6.91	637.	1144	1127	82.4	.000	2352	.000	.000	
CONCENTRATION (G/L)		.000		237.	1.06	49.0	15.8	8.95	5.24	.000	702.	.000	.000	
		SALINITE												
APPORT (1000T)														
CONCENTRATION (G/L)														

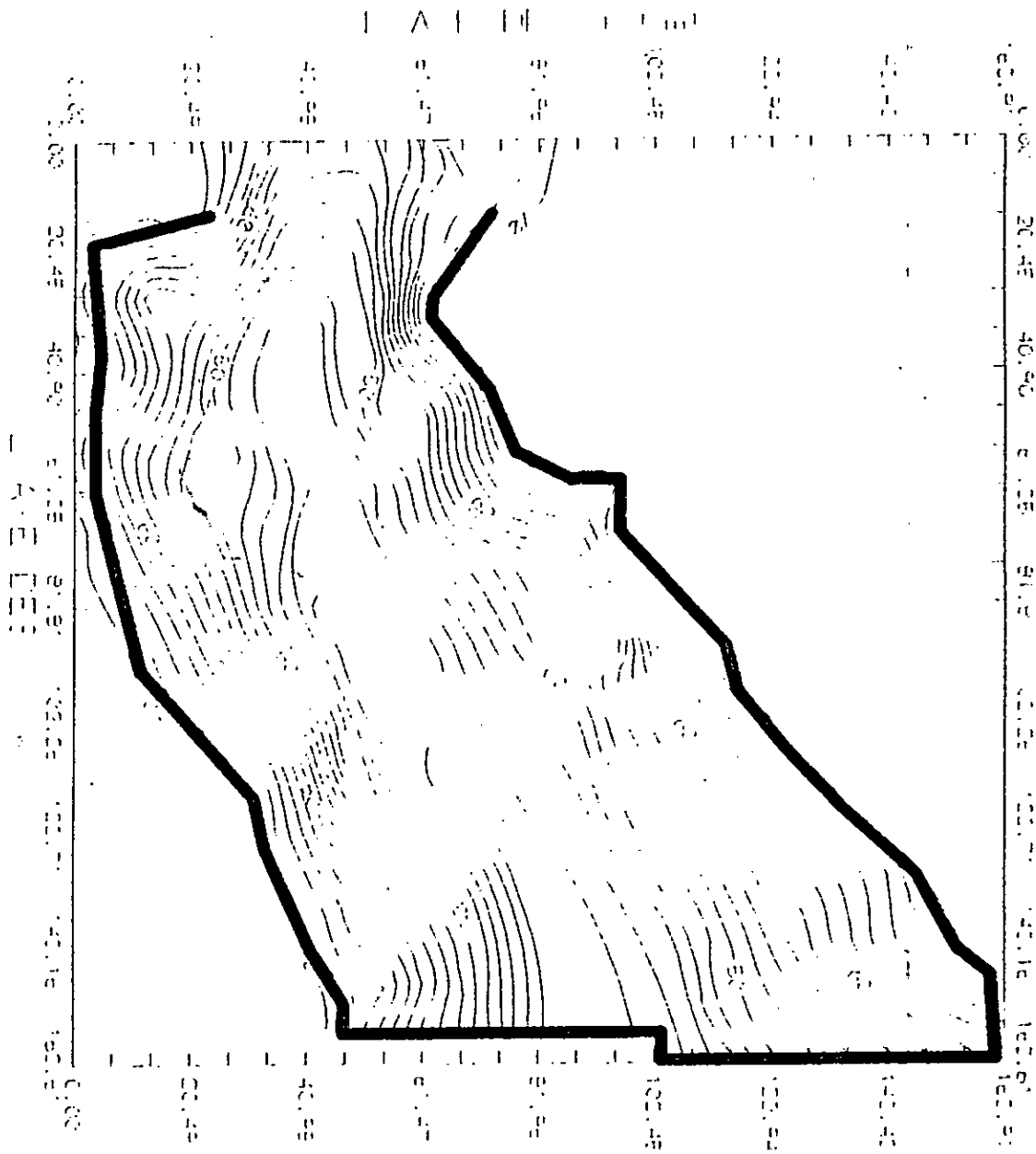
# CRUE DU 12 OCT 1981



# CRUE DU 17 FEV 1982



PLAN TOPOGRAPHIQUE DE LA PETITE COURMAYEUR



## ANNEXE 2

### RESULTATS DU MODELE STATISTIQUE STATION LAKHIDARIA GORGES

Qs = Z , Ql = X, Int = Y

$$Z = a * (X^b) * (Y^c)$$

7.9582900000E+02	3.0430000000E+00	5.7000000000E-02
1.1193300000E+03	3.6380000000E+00	6.1000000000E-02
3.8284400000E+03	1.0820000000E+01	2.6100000000E-01
5.9882200000E+03	1.7300000000E+01	7.1000000000E-01
2.1586550000E+04	6.3781000000E+01	1.3630000000E+00
3.6628140000E+04	1.1071400000E+02	2.4000000000E+00
4.4721420000E+04	1.3842900000E+02	2.6880000000E+00
4.4557640000E+04	1.4128600000E+02	2.2650000000E+00
2.8306560000E+04	9.2000000000E+01	1.4590000000E+00
1.8127190000E+04	6.0428000000E+01	9.9800000000E-01
1.2510010000E+04	4.2800000000E+01	5.7900000000E-01
9.4572600000E+03	3.3230000000E+01	4.7600000000E-01
8.1577600000E+03	2.9460000000E+01	4.8000000000E-01
7.3572400000E+03	2.7328000000E+01	4.7200000000E-01
5.5505000000E+03	2.5148000000E+01	3.8400000000E-01
5.5505000000E+03	2.1224000000E+01	3.8400000000E-01
5.3872800000E+03	2.1224000000E+01	1.6210000000E+00
5.0094400000E+03	2.0352000000E+01	1.5320000000E+00
4.9021200000E+03	1.9916000000E+01	1.5320000000E+00
5.0552700000E+03	1.9916000000E+01	1.5320000000E+00
5.5646700000E+03	2.1660000000E+01	1.3260000000E+00
6.4340600000E+03	1.9916000000E+01	1.3260000000E+00
9.5385700000E+03	2.0788000000E+01	1.4740000000E+00
9.9137900000E+03	2.0788000000E+01	2.0630000000E+00
9.9576700000E+03	1.9480000000E+01	2.2990000000E+00
1.1832530000E+04	1.9044000000E+01	2.0040000000E+00
1.2886210000E+04	2.2533000000E+01	1.8270000000E+00
1.4684210000E+04	2.6020000000E+01	1.6800000000E+00
1.1718210000E+04	2.5148000000E+01	1.5320000000E+00
1.0399430000E+04	2.3840000000E+01	1.4740000000E+00
8.0058300000E+03	2.2532000000E+01	1.4740000000E+00
1.0445470000E+04	2.1660000000E+01	1.3260000000E+00
1.2469510000E+04	2.0352000000E+01	1.2080000000E+00
1.2825210000E+04	1.9916000000E+01	1.1790000000E+00
1.3988360000E+04	1.9480000000E+01	1.1600000000E+00
1.0329650000E+04	1.9044000000E+01	1.1600000000E+00
7.9830700000E+03	1.8608000000E+01	1.1200000000E+00
5.9936000000E+03	1.8608000000E+01	1.0000000000E+00
5.1270210000E+03	1.8600000000E+01	9.2000000000E-01
4.2939800000E+03	1.8600000000E+01	9.2000000000E-01
4.4040000000E+01	5.7270000000E+00	2.7000000000E-02
9.2664000000E+01	6.0250000000E+00	2.8000000000E-02
1.4587100000E+02	6.0250000000E+00	3.1000000000E-02
1.9449500000E+02	6.3230000000E+00	3.1000000000E-02

2.5461500000E+02	6.6220000000E+00	3.1000000000E-02
4.0471500000E+02	7.5170000000E+00	3.1600000000E-02
6.2353300000E+02	9.0080000000E+00	4.0000000000E-02
7.7642700000E+02	8.4120000000E+00	4.0000000000E-02
1.1467600000E+03	8.7100000000E+00	4.0000000000E-02
1.9028200000E+03	1.1780000000E+01	4.5000000000E-02
3.7569790000E+03	2.0352000000E+01	1.1200000000E-01
8.2865900000E+03	3.0780000000E+01	1.3500000000E-01
1.2173282000E+04	3.8600000000E+01	2.7000000000E-01
2.5722200000E+04	7.6000000000E+01	3.8700000000E-01
3.0429000000E+04	9.2000000000E+01	4.3200000000E-01
3.2052863000E+04	1.0685000000E+02	5.3600000000E-01
3.2961600000E+04	1.2985400000E+02	6.9300000000E-01
3.5398230000E+04	1.7700000000E+02	1.5970000000E+00
3.6507780000E+04	2.2600000000E+02	1.6780000000E+00
2.6792720000E+04	2.0490000000E+02	1.6420000000E+00
2.2546420000E+04	1.8320000000E+02	1.6200000000E+00
1.8345420000E+04	1.5900000000E+02	1.1700000000E+00
1.3211350000E+04	1.1450000000E+02	1.0000000000E+00
1.1376460000E+04	9.8600000000E+01	9.5600000000E-01
9.4611600000E+03	8.2000000000E+01	7.1500000000E-01
8.7688800000E+03	7.6000000000E+01	7.1100000000E-01
8.5067200000E+03	7.9000000000E+01	7.0200000000E-01
5.7690000000E+03	6.0000000000E+01	6.6000000000E-01
3.4690100000E+03	4.1000000000E+01	6.5700000000E-01
2.0120310000E+03	3.2700000000E+01	3.3900000000E-01
8.8063700000E+02	2.8620000000E+01	2.5800000000E-01
2.8995600000E+02	2.5148000000E+01	2.3000000000E-01
3.9200000000E+01	2.1660000000E+01	2.2800000000E-01
3.9200000000E+01	2.1660000000E+01	2.3400000000E-01
2.1274000000E+02	2.3404000000E+01	2.5600000000E-01
2.2859000000E+02	2.5148000000E+01	2.7100000000E-01
2.2859000000E+02	2.5148000000E+01	2.7100000000E-01
4.6518000000E+02	2.5584000000E+01	2.7500000000E-01
4.6518000000E+02	2.5584000000E+01	2.8200000000E-01
4.7304000000E+02	2.6020000000E+01	3.1400000000E-01
7.6901000000E+02	2.8200000000E+01	3.4000000000E-01
9.2332000000E+02	3.1740000000E+01	3.5100000000E-01
1.2082400000E+03	3.2220000000E+01	3.6800000000E-01
1.5584800000E+03	3.3230000000E+01	3.7900000000E-01
1.8701700000E+03	3.4290000000E+01	3.9000000000E-01
2.2493200000E+03	3.4290000000E+01	4.1000000000E-01
2.7248100000E+03	3.5350000000E+01	4.2300000000E-01
3.4060200000E+03	3.7470000000E+01	4.5800000000E-01
4.2759300000E+03	3.7470000000E+01	4.8600000000E-01
5.2176600000E+03	3.9200000000E+01	5.2100000000E-01
6.5052400000E+03	4.1000000000E+01	5.4400000000E-01
7.2496200000E+03	4.4728000000E+01	5.5300000000E-01
8.2914400000E+03	4.6914000000E+01	5.6400000000E-01



8 8885100000E+03	5 0675000000E+01	5 8500000000E-01
9 3563000000E+03	5 1462000000E+01	6 2200000000E-01
1 2721530000E+04	5 1462000000E+01	7 5900000000E-01
1 5108130000E+04	5 3825000000E+01	7 5900000000E-01
1 8676480000E+04	5 5400000000E+01	9 2200000000E-01
2 7635200000E+04	6 0428000000E+01	1 0190000000E+00
3 4362000000E+04	8 0000000000E+01	1 1040000000E+00
4 1230570000E+04	9 0000000000E+01	1 1870000000E+00
5 0511300000E+04	9 8600000000E+01	1 3020000000E+00
5 8288510000E+04	1 0685700000E+02	1 6380000000E+00
7 0826260000E+04	1 1450000000E+02	2 0460000000E+00
9 1795410000E+04	1 2985700000E+02	2 0460000000E+00
1 0199475000E+05	1 5300000000E+02	1 7360000000E+00
1 0014003000E+05	1 6500000000E+02	1 6530000000E+00
9 8885430000E+04	1 5300000000E+02	1 5990000000E+00
9 9977460000E+04	1 4700000000E+02	1 4100000000E+00
1 0105733000E+05	1 4100000000E+02	1 2150000000E+00
8 7432200000E+04	1 3557100000E+02	1 1720000000E+00
7 8803420000E+04	1 1450000000E+02	1 1500000000E+00
7 7116140000E+04	1 0080000000E+02	1 1410000000E+00
7 3596320000E+04	9 6400000000E+01	9 8500000000E-01
6 4763200000E+04	9 6400000000E+01	8 1600000000E-01
5 8382960000E+04	9 2000000000E+01	7 2500000000E-01
5 1022240000E+04	8 0000000000E+01	6 5100000000E-01
4 5658510000E+04	7 2162000000E+01	6 0300000000E-01
4 3310610000E+04	6 3741000000E+01	5 8600000000E-01
4 1463610000E+04	5 7076000000E+01	5 6000000000E-01
3 8695430000E+04	5 5400000000E+01	5 3600000000E-01
3 6600120000E+04	5 3037000000E+01	5 1900000000E-01
3 4647890000E+04	5 0675000000E+01	5 0900000000E-01
3 1908520000E+04	4 9100000000E+01	5 0300000000E-01
3 1404870000E+04	4 7643000000E+01	4 6000000000E-01
2 9752520000E+04	4 7643000000E+01	4 4900000000E-01
2 7234920000E+04	4 6186000000E+01	4 4500000000E-01
2 6456820000E+04	4 5457000000E+01	4 3800000000E-01
2 4598770000E+04	4 3400000000E+01	4 3400000000E-01
2 0126080000E+04	4 2800000000E+01	4 2100000000E-01
1 3955770000E+04	4 1000000000E+01	4 1200000000E-01
1 1751950000E+04	4 1000000000E+01	4 0600000000E-01
1 0853850000E+04	4 0400000000E+01	4 0100000000E-01
9 8248500000E+03	4 0400000000E+01	3 9500000000E-01
9 6665400000E+03	3 9800000000E+01	3 9000000000E-01
8 1748200000E+03	3 8600000000E+01	3 8600000000E-01
8 8560300000E+03	3 8000000000E+01	3 7300000000E-01
1 0073900000E+04	3 7470000000E+01	3 6200000000E-01
1 0282960000E+04	3 7470000000E+01	3 5800000000E-01
9 9746100000E+03	3 6940000000E+01	3 6200000000E-01
1 1047960000E+04	3 6940000000E+01	3 6800000000E-01
1 1221400000E+04	3 5350000000E+01	3 7300000000E-01

1.2468530000E+04	5.7076000000E+01	3.7900000000E-01
1.3091920000E+04	6.4619000000E+01	4.9500000000E-01
1.2468530000E+04	6.5457000000E+01	6.5100000000E-01
1.0282960000E+04	4.9100000000E+01	6.9800000000E-01
1.4527550000E+04	3.8600000000E+01	1.2410000000E+00
1.4097920000E+04	3.5350000000E+01	9.4100000000E-01
1.1900730000E+04	3.3230000000E+01	7.9400000000E-01
7.1411000000E+03	3.2700000000E+01	7.3800000000E-01
4.9122300000E+03	3.2220000000E+01	7.0500000000E-01
3.8559700000E+03	3.2220000000E+01	6.9400000000E-01
6.4436700000E+03	3.2220000000E+01	1.9140000000E+00
6.2312600000E+03	3.4290000000E+01	2.0660000000E+00
6.8124200000E+03	3.7470000000E+01	2.2790000000E+00
7.4542100000E+03	4.1000000000E+01	2.5030000000E+00
9.2367300000E+03	4.6186000000E+01	2.7750000000E+00
1.1790790000E+04	4.9887000000E+01	3.0110000000E+00
1.4511630000E+04	5.4612000000E+01	3.3070000000E+00
1.8865170000E+04	5.9590000000E+01	3.5430000000E+00
2.0042500000E+04	6.2105000000E+01	3.5070000000E+00
3.1615170000E+04	5.7076000000E+01	3.0710000000E+00
3.4243880000E+04	4.7643000000E+01	2.5030000000E+00
2.8584370000E+04	3.9800000000E+01	2.2200000000E+00
2.7496620000E+04	3.7470000000E+01	2.1840000000E+00
2.6568470000E+04	3.6940000000E+01	2.1840000000E+00
2.6192670000E+04	3.6410000000E+01	2.1490000000E+00
2.3830700000E+04	3.5880000000E+01	2.1020000000E+00
1.9570030000E+04	3.5350000000E+01	2.0660000000E+00
1.5424610000E+04	3.4290000000E+01	2.0310000000E+00
1.1221400000E+04	3.5350000000E+01	2.0670000000E+00
8.9976300000E+03	3.4820000000E+01	2.0310000000E+00
6.9636500000E+03	3.4290000000E+01	2.0080000000E+00
4.3637400000E+03	3.3760000000E+01	1.9720000000E+00
3.6828700000E+03	3.3760000000E+01	1.9130000000E+00
5.1034000000E+02	2.2968000000E+01	3.2200000000E-01
6.3782000000E+02	2.3404000000E+01	3.2200000000E-01
7.8005000000E+02	2.4712000000E+01	3.5700000000E-01
9.3609000000E+02	2.5148000000E+01	3.7200000000E-01
1.1175700000E+03	3.0300000000E+01	4.3100000000E-01
1.5146900000E+03	4.1000000000E+01	6.2000000000E-01
2.2775500000E+03	3.6410000000E+01	6.9400000000E-01
2.2246500000E+03	4.2200000000E+01	7.0400000000E-01
2.8130500000E+03	4.4728000000E+01	8.1800000000E-01
3.2298000000E+03	6.0428000000E+01	1.0710000000E+00
4.6994800000E+03	6.0428000000E+01	1.5520000000E+00
5.6633400000E+03	8.3320000000E+01	1.7310000000E+00
6.4137600000E+03	7.2162000000E+01	1.8000000000E+00
6.1656800000E+03	7.4000000000E+01	1.8500000000E+00
6.3323200000E+03	7.6000000000E+01	1.9190000000E+00
6.2216000000E+03	8.0000000000E+01	2.0430000000E+00

6.0656400000E+03	8.4000000000E+01	2.2320000000E+00
7.1199000000E+03	9.8600000000E+01	2.3900000000E+00
6.9610400000E+03	9.6400000000E+01	1.8840000000E+00
6.9610400000E+03	9.6400000000E+01	1.7950000000E+00
6.9993000000E+03	9.0000000000E+01	2.2320000000E+00
6.6042800000E+03	8.2000000000E+01	2.0680000000E+00
7.0822000000E+03	8.5000000000E+01	2.0680000000E+00
7.8376900000E+03	8.3000000000E+01	1.8840000000E+00
7.9155000000E+03	7.5000000000E+01	1.7110000000E+00
7.4400500000E+03	6.3781000000E+01	1.4880000000E+00
7.5061500000E+03	5.8752000000E+01	1.3730000000E+00
7.4746700000E+03	5.3825000000E+01	1.2990000000E+00
7.5464600000E+03	5.2250000000E+01	1.2650000000E+00
7.6002300000E+03	5.0675000000E+01	1.2640000000E+00
8.1269600000E+03	5.2250000000E+01	1.2150000000E+00
7.4401000000E+03	4.6186000000E+01	1.1060000000E+00
7.0879600000E+03	4.4000000000E+01	1.0760000000E+00
6.7504300000E+03	4.3400000000E+01	1.0510000000E+00
6.3291600000E+03	4.2200000000E+01	1.0410000000E+00
6.0626200000E+03	4.2800000000E+01	1.0410000000E+00
5.7060900000E+03	4.2800000000E+01	1.0420000000E+00
4.9692800000E+03	4.3400000000E+01	1.0510000000E+00
4.0018200000E+03	4.4728000000E+01	1.0760000000E+00
3.1885700000E+03	4.2200000000E+01	1.0660000000E+00
2.5051000000E+03	4.1000000000E+01	1.0260000000E+00
1.5940800000E+03	4.1000000000E+01	1.0160000000E+00
1.1219100000E+03	4.0400000000E+01	1.0020000000E+00
7.8046000000E+02	2.8620000000E+01	2.7050000000E+00
1.3007700000E+03	2.8620000000E+01	3.5160000000E+00
3.0330500000E+03	4.7667000000E+01	5.0230000000E+00
4.6693800000E+03	5.7076000000E+01	5.6030000000E+00
4.7914000000E+03	4.7914000000E+01	5.2550000000E+00
6.0812600000E+03	5.1462000000E+01	4.4430000000E+00
5.2176600000E+03	4.1000000000E+01	3.8640000000E+00
6.3157300000E+03	3.8600000000E+01	3.6120000000E+00
7.2812700000E+03	3.6410000000E+01	3.3810000000E+00
7.7924000000E+03	3.4290000000E+01	3.2840000000E+00
8.5925900000E+03	3.3760000000E+01	3.1870000000E+00
8.7863900000E+03	3.2220000000E+01	3.0910000000E+00
9.0792700000E+03	3.1260000000E+01	3.0520000000E+00
8.5308500000E+03	3.0300000000E+01	2.8980000000E+00
7.7119500000E+03	3.0300000000E+01	2.9360000000E+00
7.0618300000E+03	2.9880000000E+01	2.8980000000E+00
5.7037900000E+03	2.9880000000E+01	2.8980000000E+00
1.7587000000E+02	9.6740000000E+00	2.0600000000E-01
1.7587000000E+02	9.6740000000E+00	2.1500000000E-01
1.8209000000E+02	1.0016000000E+01	2.4300000000E-01
1.9452000000E+02	1.0700000000E+01	2.6100000000E-01
2.1852000000E+02	1.2020000000E+01	3.0700000000E-01

3 9977000000E+02	1 4660000000E+01	5 0900000000E-01
7 8701000000E+02	2 8860000000E+01	6 9300000000E-01
8 7864000000E+02	3 2220000000E+01	7 8900000000E-01
1 0218000000E+03	3 7470000000E+01	8 7200000000E-01
1 0853400000E+03	3 9800000000E+01	9 1800000000E-01
1 8907200000E+03	4 1600000000E+01	1 0090000000E+00
5 0379700000E+03	4 6186000000E+01	1 0870000000E+00
9 8200000000E+03	4 9100000000E+01	1 1790000000E+00
1 5886080000E+04	5 4612000000E+01	1 2670000000E+00
2 3499620000E+04	5 8752000000E+01	1 3810000000E+00
2 9370620000E+04	6 4619000000E+01	1 5000000000E+00
3 0024120000E+04	6 8899000000E+01	1 6290000000E+00
2 8253200000E+04	7 4009000000E+01	1 7440000000E+00
2 1271380000E+04	7 8000000000E+01	1 8130000000E+00
1 4544000000E+04	8 0000000000E+01	1 8360000000E+00
1 0180000000E+04	8 0000000000E+01	1 7900000000E+00
5 5267200000E+03	7 6000000000E+01	1 6430000000E+00
3 7528400000E+03	6 8809000000E+01	1 4310000000E+00
4 5162700000E+03	6 2105000000E+01	1 3310000000E+00
7 0502000000E+03	5 5400000000E+01	1 2020000000E+00
1 2898300000E+04	5 0676000000E+01	1 0420000000E+00
1 6399180000E+04	4 1000000000E+01	8 7200000000E-01
1 8637930000E+04	3 5350000000E+01	7 8900000000E-01
2 0541120000E+04	3 4290000000E+01	7 6600000000E-01
1 7799960000E+04	3 3760000000E+01	7 8000000000E-01
1 4338700000E+04	3 4290000000E+01	8 0300000000E-01
1 0598010000E+04	3 4290000000E+01	8 0300000000E-01
7 7123000000E+03	3 5350000000E+01	7 8900000000E-01
5 2958300000E+03	3 6410000000E+01	7 9900000000E-01
3 9719600000E+03	3 6410000000E+01	7 6600000000E-01
2 6091900000E+03	3 5880000000E+01	7 8000000000E-01
1 2853200000E+03	3 5350000000E+01	7 8000000000E-01
9 6399000000E+02	3 5350000000E+01	7 8900000000E-01
7 2652000000E+02	3 9963000000E+01	4 1000000000E-01
7 2652000000E+02	3 9963000000E+01	4 1000000000E-01
7 2652000000E+02	3 9094000000E+01	4 0400000000E-01
1 0660900000E+03	3 9094000000E+01	3 9900000000E-01
1 0186700000E+03	3 7355000000E+01	3 8900000000E-01
1 4530500000E+03	3 9963000000E+01	3 7900000000E-01
2 6534900000E+03	4 1702000000E+01	3 9400000000E-01
4 7385400000E+03	4 3441000000E+01	4 2000000000E-01
9 0360000000E+03	4 5180000000E+01	4 3400000000E-01
1 0251950000E+04	4 7780000000E+01	4 5100000000E-01
2 2510550000E+04	4 9526000000E+01	4 7600000000E-01
2 9825460000E+04	5 1265000000E+01	4 7600000000E-01
3 3301590000E+04	5 3873000000E+01	5 0200000000E-01
3 1343470000E+04	5 5612000000E+01	5 1800000000E-01
2 3981890000E+04	5 7351000000E+01	5 3300000000E-01
1 4276880000E+04	4 9090000000E+01	5 6400000000E-01

1 1217310000E+04	6 1698000000E+01	5 9400000000E-01
8 0736200000E+03	6 3437000000E+01	6 1900000000E-01
5 6083400000E+03	6 1698000000E+01	6 4200000000E-01
5 5292600000E+03	6 0828000000E+01	6 2500000000E-01
6 5403200000E+03	5 9959000000E+01	6 1500000000E-01
6 0661500000E+03	5 5612000000E+01	6 1500000000E-01
4 0277700000E+03	4 4310000000E+01	5 9400000000E-01
2 2270300000E+03	4 0833000000E+01	5 1200000000E-01
1 4530500000E+03	3 9963000000E+01	4 6100000000E-01
1 4214500000E+03	3 9094000000E+01	4 1600000000E-01
1 4214500000E+03	3 9094000000E+01	4 0400000000E-01
1 0423600000E+03	3 8224000000E+01	3 9900000000E-01
1 0186700000E+03	3 7357000000E+01	3 9300000000E-01
1 3266300000E+03	3 6486000000E+01	3 8300000000E-01
1 6582800000E+03	3 6486000000E+01	3 7900000000E-01
1 6582800000E+03	3 6486000000E+01	3 7500000000E-01
1 6187400000E+03	3 5616000000E+01	3 6900000000E-01
1 2634000000E+03	3 4747000000E+01	3 6900000000E-01
1 2317600000E+03	3 3877000000E+01	3 6900000000E-01
1 2001700000E+03	3 3008000000E+01	3 6300000000E-01
1 1685700000E+03	3 2139000000E+01	3 5300000000E-01
7 9238000000E+02	2 9057000000E+01	3 3400000000E-01
7 9238000000E+02	2 9057000000E+01	3 1200000000E-01
5 4045000000E+02	2 9728000000E+01	3 1200000000E-01
5 5267000000E+02	3 0400000000E+01	2 9700000000E-01
5 5267000000E+02	3 0400000000E+01	3 0100000000E-01
5 4903000000E+02	3 0200000000E+01	3 0700000000E-01
5 4540000000E+02	3 0000000000E+01	3 0700000000E-01
1 4034900000E+03	7 7200000000E+01	8 9300000000E-01
2 1052400000E+03	7 7200000000E+01	9 1200000000E-01
4 3959200000E+03	8 0600000000E+01	9 7400000000E-01
6 4429900000E+03	8 8600000000E+01	1 1370000000E+00
1 3591360000E+04	1 2460000000E+02	1 7170000000E+00
2 2028700000E+04	1 7310000000E+02	2 0070000000E+00
2 2028700000E+04	1 7310000000E+02	1 9770000000E+00
2 1405133000E+04	1 6820000000E+02	1 8720000000E+00
2 1261050000E+04	1 5595000000E+02	1 7980000000E+00
2 8353270000E+04	1 5595000000E+02	1 7980000000E+00
3 6575960000E+04	1 4370000000E+02	1 6750000000E+00
4 2513000000E+04	1 4615000000E+02	1 6750000000E+00
4 0524700000E+04	1 4860000000E+02	1 7050000000E+00
3 4542550000E+04	1 4615000000E+02	1 7050000000E+00
3 3640000000E+04	1 6820000000E+02	1 8140000000E+00
3 9163190000E+04	1 6570000000E+02	1 8140000000E+00
5 0471130000E+04	1 6330000000E+02	1 9320000000E+00
5 9795660000E+04	1 7310000000E+02	1 9020000000E+00
5 5045130000E+04	1 6820000000E+02	1 9760000000E+00
3 8446750000E+04	1 5105000000E+02	1 8490000000E+00
1 7483090000E+04	1 2020000000E+02	1 5710000000E+00

1.3616820000E+04	1.0700000000E+02	1.3150000000E+00
1.9035500000E+04	1.0470000000E+02	1.2250000000E+00
2.3722190000E+04	1.0010000000E+02	1.1830000000E+00
3.4518270000E+04	9.3200000000E+01	1.1180000000E+00
4.5501670000E+04	8.6300000000E+01	1.0320000000E+00
5.6484210000E+04	8.6300000000E+01	9.9800000000E-01
6.2614440000E+04	8.4000000000E+01	9.8600000000E-01
6.4476770000E+04	8.0600000000E+01	9.7400000000E-01
6.0396980000E+04	7.5500000000E+01	9.5100000000E-01
5.2328630000E+04	7.3800000000E+01	8.9800000000E-01
4.4277780000E+04	7.3800000000E+01	8.5800000000E-01
3.0149330000E+04	7.2100000000E+01	8.4700000000E-01
2.0707690000E+04	6.7000000000E+01	8.3500000000E-01
1.5628140000E+04	6.1400000000E+01	8.0000000000E-01
1.3188330000E+04	5.5800000000E+01	7.4200000000E-01
1.8260550000E+04	5.5800000000E+01	6.6600000000E-01
2.4504170000E+04	5.8600000000E+01	6.3800000000E-01
2.6791280000E+04	6.1400000000E+01	6.5400000000E-01
1.9271860000E+04	5.3000000000E+01	6.8400000000E-01
1.0170000000E+04	5.0850000000E+01	6.5400000000E-01
9.2445000000E+02	5.0850000000E+01	5.9600000000E-01
9.2445000000E+02	5.0850000000E+01	5.8000000000E-01

les coefficients alpha[i]

4.4628810211E+00

1.1583794861E+00

4.1385477950E-01

epsilon carree = 1.2582176996E+00

la matrice des VAR, COVAR

0.17 -0.04 0.02

-0.04 0.01 -0.00

0.02 -0.00 0.01

coefficient de determination

Rcarree = 9.8430804968E-01

pour la valeur de fichier = 1.2300000000E+02

Fcalec = 5.5983795266E+03

modèle adéquat

## ANNEXE 3

### JUSTIFICATION DE L'ALGORITHME DE BOX et MILLER

## JUSTIFICATION DE L'ALGORITHME DE BOX & MULLER.

Cette algorithmme est utilisé pour la génération des nombres aléatoires distribués suivant une loi normale ou lognormale.

Soient  $U_1$  et  $U_2$  deux variables aléatoires distribuées uniformément sur  $[0,1]$ .

Montrons que :

$$y_1 = \sqrt{-2 \log U_1} \cos(2\pi U_2)$$

$$y_2 = \sqrt{-2 \log U_1} \sin(2\pi U_2)$$

sont deux variables aléatoires indépendantes distribuées suivant  $N(0,1)$ .

Soient  $X_1$  et  $X_2$  deux variables aléatoires indépendantes distribuées suivant une loi normale réduite  $N(0,1)$  telle que :

$$X_1 = \Gamma \cos \theta$$

$$X_2 = \Gamma \sin \theta$$

$$\Gamma \geq 0$$

$$0 \leq \theta < 2\pi$$

Considérons  $V(X_1, X_2)$ , le vecteur aléatoire d'ordre 2, complètement défini par sa fonction de répartition :

$$F(x,y) = P(X_1 \leq x \text{ et } X_2 \leq y)$$



sa densité de probabilité est définie par :

$$f(x,y) = \frac{\partial^2 F(x,y)}{\partial x \partial y} \quad \text{si } F \text{ est dérivable à l'ordre 2}$$

Si  $X_1$  et  $X_2$  sont indépendantes alors

$$F(x,y) = F(x,\infty) \cdot F(\infty,y)$$

où  $F(x,\infty)$  et  $F(\infty,y)$  désignent les fonctions de répartition marginales de  $x$  et  $y$  respectivement.

La densité de probabilité de couple  $X_1, X_2$  s'écrit :

$$f(X_1, X_2) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(X_1^2 + X_2^2)\right)$$

D'où la densité de couple  $(\Gamma, \theta)$  :

$$g(\Gamma, \theta) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{\Gamma^2}{2}\right) \cdot \Gamma$$

C'est à dire :

$$g(\Gamma, \theta) = \exp\left(-\frac{\Gamma^2}{2}\right) d\left(\frac{\Gamma^2}{2}\right) \cdot d\theta$$

donc :  $\theta$  est distribuée uniformément sur  $[0, 2\pi]$

$\Gamma^2$  est distribuée suivant une loi exponentielle (1/2)

Il en résulte que si  $U_1$  et  $U_2$  sont distribuées uniformément sur  $[0,1]$  et sont indépendantes alors  $\sqrt{-2 \log U_1}$  et  $2\pi U_2$  sont distribuées comme  $\Gamma$  et  $\theta$  respectivement.

D'où le résultat puisque  $X_1 = \Gamma \cos \theta$  et  $X_2 = \Gamma \sin \theta$ .

## ANNEXE 4

### RESULTATS DE TRAITEMENT DE DONNEES PAR LE LOGICIEL STATGRAF

# Débits Liquides.

## FREQUENCY TABULATION

CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
AT OR BELOW		3.04		1	.00257	1	.00257
1	3.04	10.47	6.76	17	.04370	18	.04627
2	10.47	17.91	14.19	5	.02314	27	.06941
3	17.91	25.34	21.67	43	.11054	70	.17995
4	25.34	32.77	29.05	54	.13887	124	.31877
5	32.77	40.20	36.49	85	.21851	209	.53729
6	40.20	47.63	43.92	46	.11825	255	.65557
7	47.63	55.07	51.35	31	.07969	286	.73527
8	55.07	62.50	58.78	27	.06941	313	.80468
9	62.50	69.93	66.21	14	.03599	327	.84067
10	69.93	77.36	73.65	9	.02314	336	.86381
11	77.36	84.79	81.08	13	.03342	349	.89723

ME

## FREQUENCY TABULATION

CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
12	84.79	92.23	88.51	6	.01542	355	.91265
13	92.23	99.66	95.94	8	.02057	363	.93322
14	99.66	107.09	103.37	4	.01028	367	.94350
15	107.09	114.52	110.81	5	.01285	372	.95635
16	114.52	121.95	118.24	1	.00257	373	.95892
17	121.95	129.38	125.67	0	.00000	373	.95892
18	129.38	136.82	133.10	3	.00771	376	.96663
19	136.82	144.25	140.53	3	.00771	379	.97434
20	144.25	151.68	147.96	1	.00257	380	.97691
21	151.68	159.11	155.40	3	.00771	383	.98462
22	159.11	166.54	162.83	1	.00257	384	.98719
23	166.54	173.98	170.26	0	.00000	384	.98719

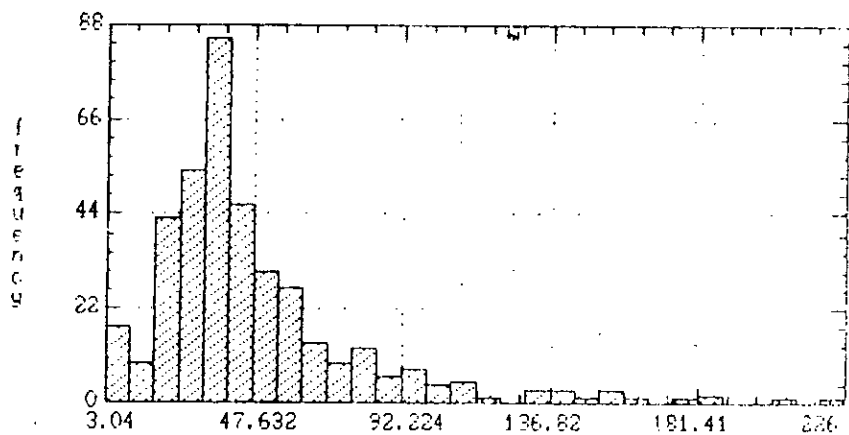
ME

## FREQUENCY TABULATION

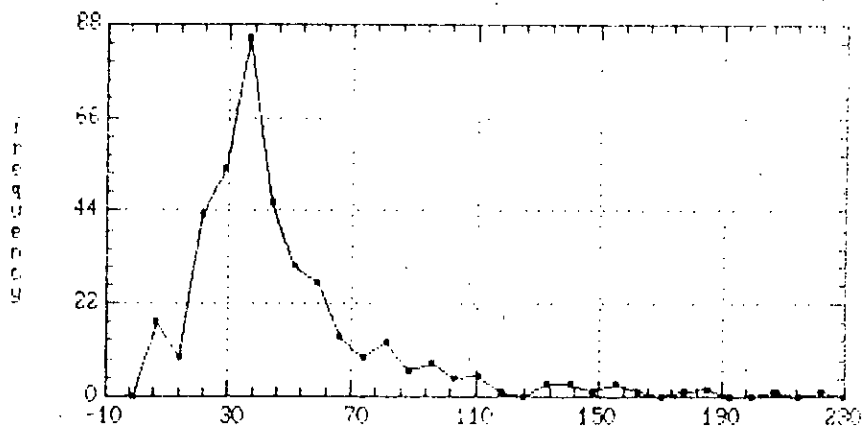
CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
24	173.98	181.41	177.69	1	.00257	385	.98976
25	181.41	188.84	185.12	2	.00514	387	.99490
26	188.84	196.27	192.56	0	.00000	387	.99490
27	196.27	203.70	199.99	0	.00000	387	.99490
28	203.70	211.14	207.42	1	.00257	388	.99747
29	211.14	218.57	214.85	0	.00000	388	.99747
30	218.57	226.00	222.28	1	.00257	389	1.00000
ABOVE	226.00			0	.00000	389	1.00000

MEAN = 47.847      STANDARD DEVIATION = 32.707      MEDIAN = 38.6

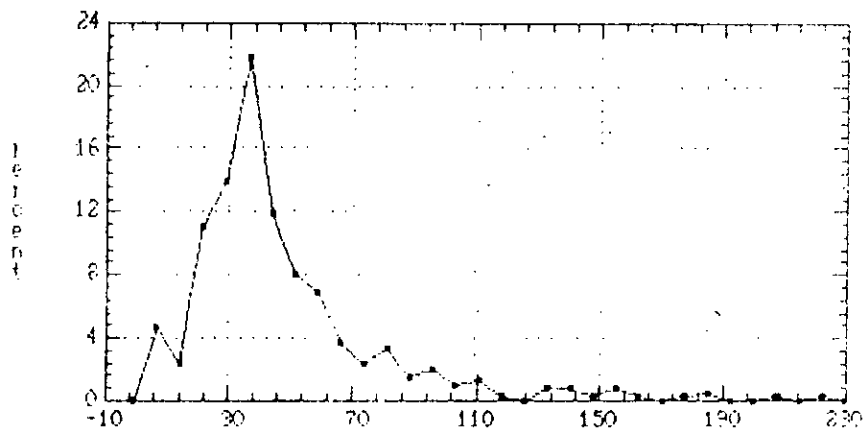
Frequency Histogram



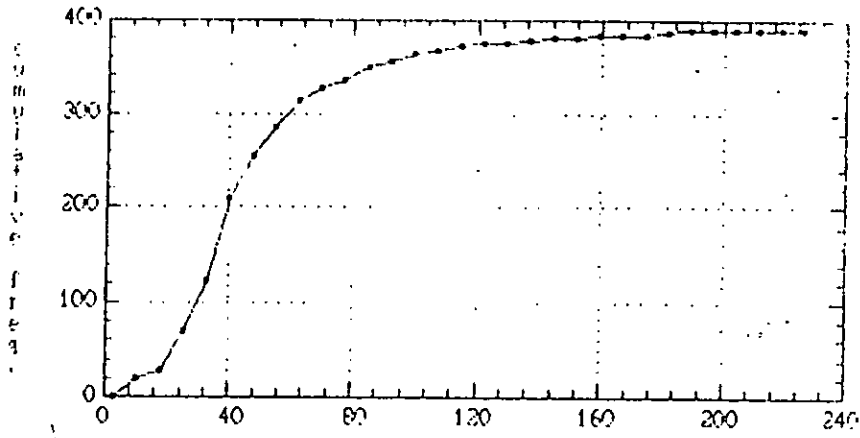
Frequency Polygon



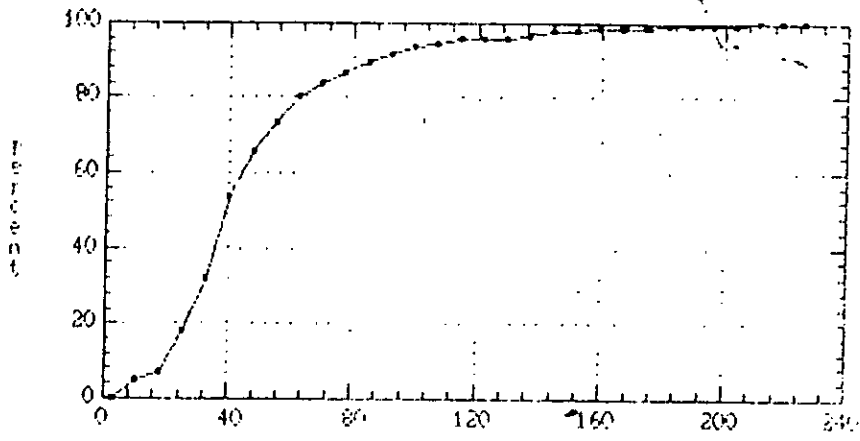
Relative Frequency Polygon



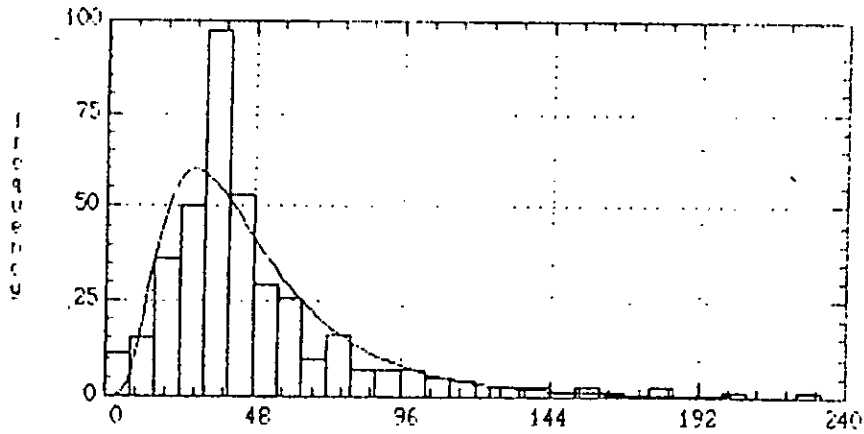
Cumulative Frequency Polygon



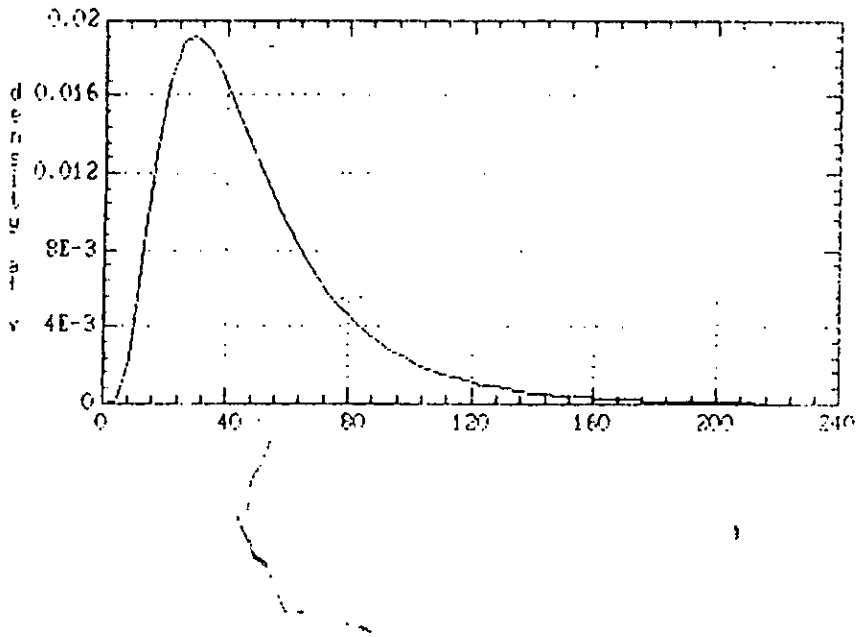
Cumulative Relative Frequencies



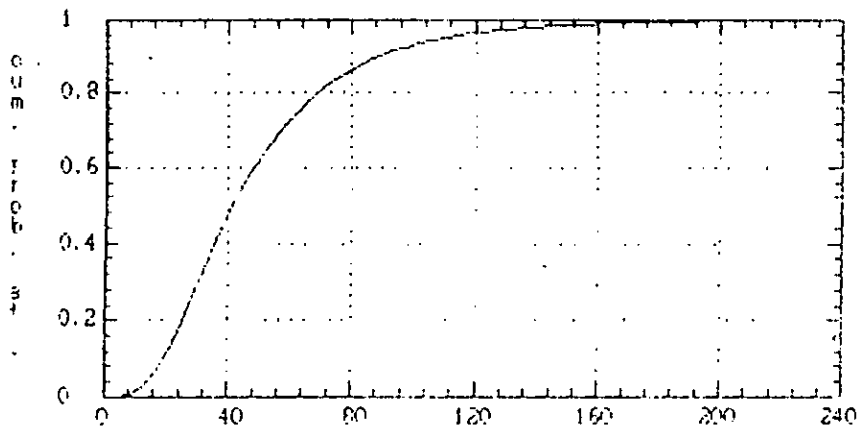
Frequency Histogram



Prob. Density Fcn. - lognormal



Cum. Dist. Fcn. - lognormal



# Intensités de pluie.

FREQUENCY TABULATION

CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
07	0.9270	1.0270	1.0	1	.00796	1	.00796
1	1.0270	1.2129	1.120	19	.05305	23	.06101
2	1.2129	1.3987	1.306	20	.05568	93	.11669
3	1.3987	1.5846	1.492	62	.16446	155	.28115
4	1.5846	1.7705	1.678	46	.12702	201	.40817
5	1.7705	1.9563	1.863	32	.08836	233	.49653
6	1.9563	2.1422	2.049	27	.07401	260	.57054
7	2.1422	2.3281	2.235	20	.05505	280	.62559
8	2.3281	2.5139	2.421	19	.05279	299	.67838
9	2.5139	2.6998	2.607	17	.04505	298	.72343
10	2.6998	2.8857	2.793	15	.03979	313	.76322
11	2.8857	3.0715	2.979	20	.05505	333	.81827

\*E

FREQUENCY TABULATION

CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
12	2.0715	2.2574	2.164	3	.00887	34	.02714
13	2.2574	2.4433	2.350	5	.01326	39	.04040
14	2.4433	2.6291	2.536	4	.01061	43	.05101
15	2.6291	2.8150	2.722	3	.00796	46	.05897
16	2.8150	3.0009	2.908	4	.01061	50	.06958
17	3.0009	3.1867	3.094	6	.01592	56	.08550
18	3.1867	3.3726	3.280	3	.00796	59	.09346
19	3.3726	3.5585	3.466	4	.01061	63	.10407
20	3.5585	3.7443	3.651	1	.00265	64	.10672
21	3.7443	3.9302	3.837	1	.00265	65	.10937
22	3.9302	4.1161	4.023	0	.00000	65	.10937
23	4.1161	4.3019	4.209	0	.00000	65	.10937

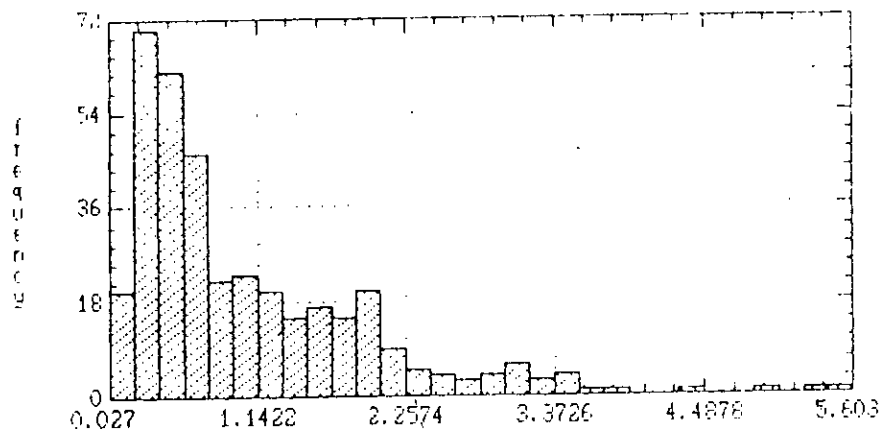
\*E

FREQUENCY TABULATION

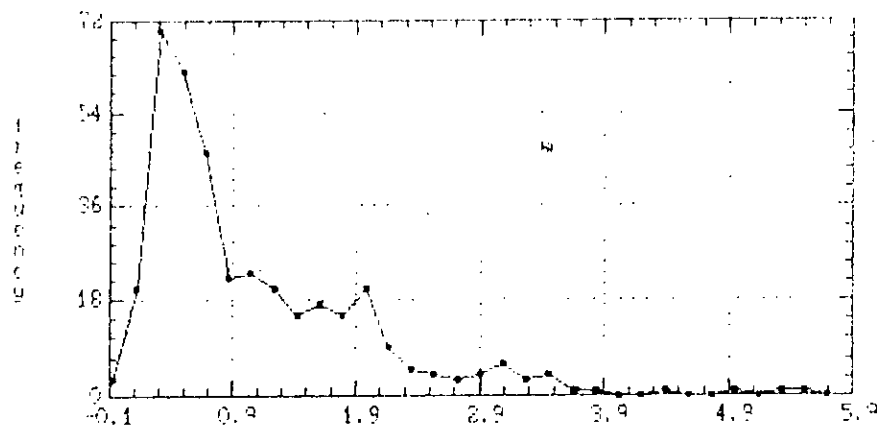
CLASS	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	MIDPOINT	FREQUENCY	RELATIVE FREQUENCY	CUMULATIVE FREQUENCY	CUM. REL. FREQUENCY
24	4.3019	4.4878	4.395	1	.00265	66	.11202
25	4.4878	4.6737	4.581	0	.00000	66	.11202
26	4.6737	4.8595	4.767	0	.00000	66	.11202
27	4.8595	5.0454	4.952	1	.00265	67	.11467
28	5.0454	5.2313	5.138	0	.00000	67	.11467
29	5.2313	5.4171	5.324	1	.00265	68	.11732
30	5.4171	5.6030	5.510	1	.00265	69	.12000
ABOVE	5.6030			0	.00000	69	.12000

MEAN = 1.0592    STANDARD DEVIATION = 0.91666    MEDIAN = 0.71

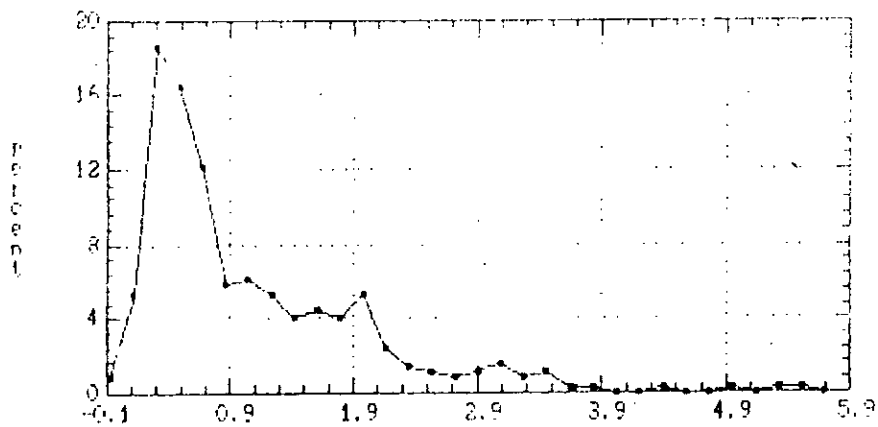
Frequency Histogram



Frequency Polygon

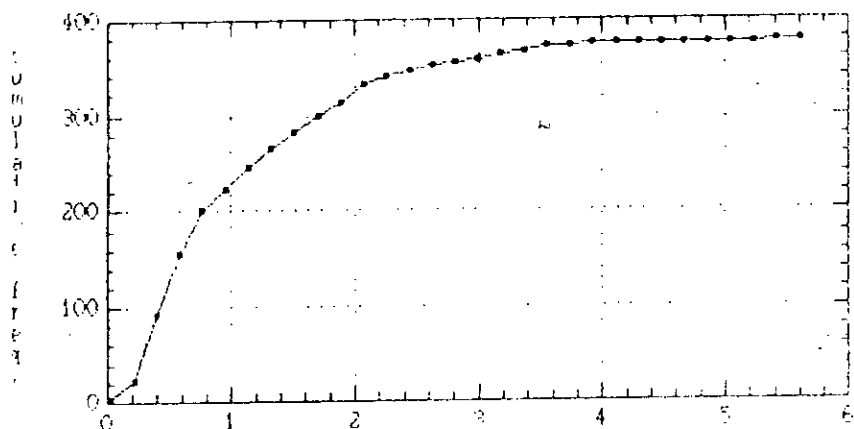


Relative Frequency Polygon

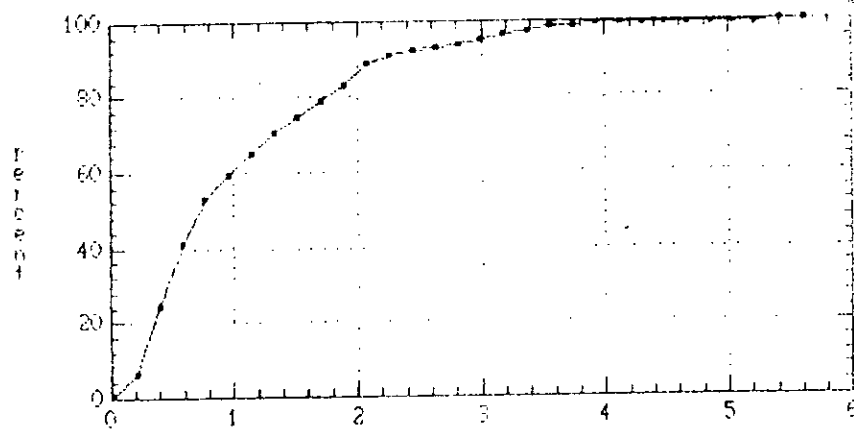




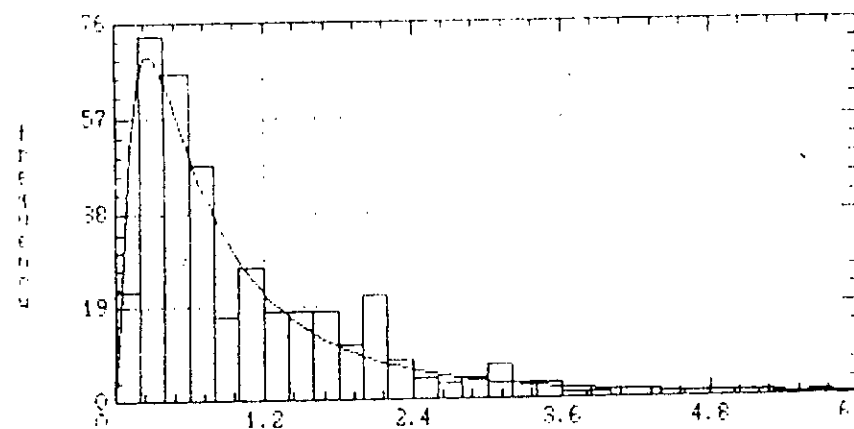
Cumulative Frequency Polygon



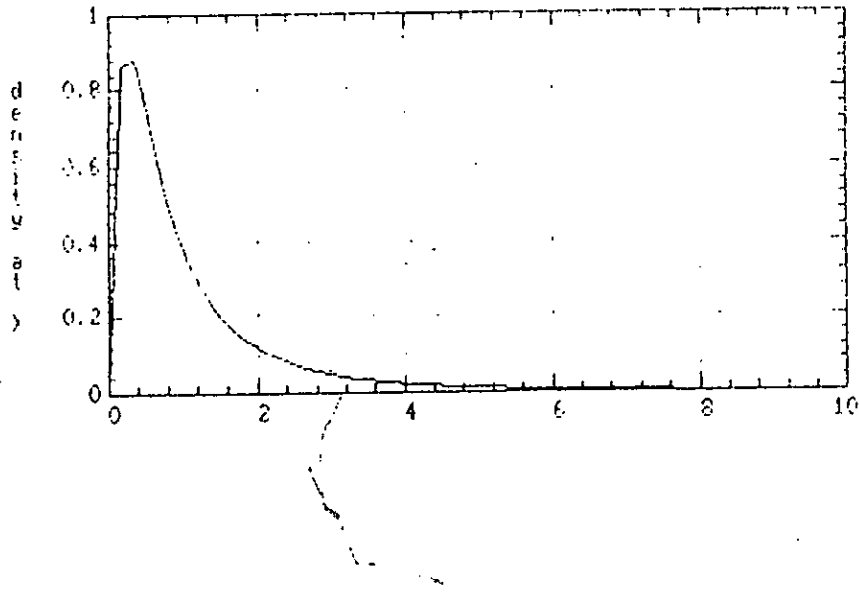
Cumulative Relative Frequencies



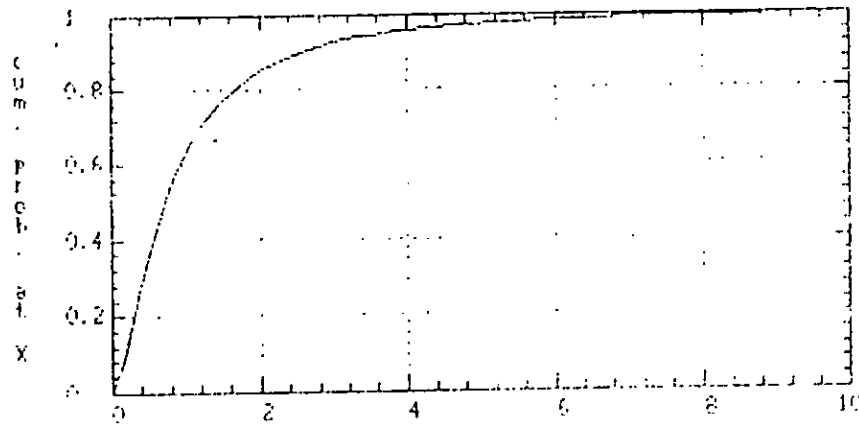
Frequency Histogram



Prob. Density Fcn. - lognormal



Cum. Dist. Fcn. - lognormal



## ANNEXE 5

### RESULTATS DU MODELE DE SIMULATION POUR LA STATION DE LAKHIDARIA GORGE

la durée cumulée des crues pour la période considérée 4.50000000000000E+0002

la valeur tabulée de Fischer,449,alpha : 5.32100000000000E+0003

la valeur tabulée de Fischer,450,alpha : 5.32100000000000E+0003

### GENERATION DE THOMAS

x[1]=0.37163  
x[2]= 3.40100000030361E-0002  
x[3]= 9.18270000081975E-0001  
x[4]= 7.93290002213325E-0001  
x[5]= 4.18830059759784E-0001  
  
x[1791]= 9.79497527529020E-0001  
x[1792]= 4.46433243283536E-0001  
x[1793]= 5.36975686554797E-0002  
x[1794]= 4.49834353697952E-0001  
x[1795]= 1.45527549844701E-0001  
x[1796]= 9.29243845806923E-0001  
x[1797]= 8.95838367869146E-0002  
x[1798]= 4.18763593246695E-0001  
x[1799]= 3.06617017660756E-0001  
x[1800]= 2.78659476840403E-0001

.....  
"c'est une loi UNIFORME"  
.....

.....  
"les nombres générés sont INDEPENDANTS"  
.....

.....  
"la moyenne = 4.87716926825215E-0001"  
.....

.....  
"la variance = 8.23755441265348E-0002"  
.....

CONSTRUCTION DE L'ECHANTILLON ARTIFICIEL

```

-----
qs[1]= 4.93946276590824E+0004 ----- ql[1]= 1.74464829229750E+0002
===== Ip[1]= 2.44223310607049E+0000
qs[2]= 1.59380026087761E+0006 ----- ql[2]= 1.34589017635956E+0003
===== Ip[2]= 3.56794423029060E+0001
qs[3]= 8.67744820868969E+0003 ----- ql[3]= 4.98523784519639E+0001
===== Ip[3]= 1.21553579913052E+0000
qs[4]= 1.02501017499566E+0004 ----- ql[4]= 5.56980345514021E+0001
===== Ip[4]= 1.33310117957262E+0000
qs[5]= 3.00008346292973E+0004 ----- ql[5]= 8.49491827564780E+0001
===== Ip[5]= 5.49586344429554E+0000

```

```

qs[888]= 2.87157583908141E+0004 ===== ql[888]= 9.27263111200882E+0001
===== Ip[888]= 3.86635657057559E+0000
qs[889]= 9.23559900419414E+0003 ===== ql[889]= 5.28490646838327E+0001
===== Ip[889]= 1.20010513117631E+0000
qs[890]= 2.50368252121210E+0005 ===== ql[890]= 2.05605554085923E+0002
===== Ip[890]= 7.84371958465781E+0001
qs[891]= 1.05936328914165E+0004 ===== ql[891]= 5.43110244102427E+0001
===== Ip[891]= 1.54968698119774E+0000
qs[892]= 1.33944581711143E+0004 ===== ql[892]= 7.09983358344762E+0001
===== Ip[892]= 1.28998170577870E+0000
qs[893]= 8.50874061839283E+0003 ===== ql[893]= 4.96430059667910E+0001
===== Ip[893]= 1.17286537297514E+0000
qs[894]= 2.46377610161006E+0004 ===== ql[894]= 8.60913924443303E+0001
===== Ip[894]= 3.28600530058611E+0000
qs[895]= 9.12460044910014E+0003 ===== ql[895]= 5.07872197077959E+0001
===== Ip[895]= 1.30309486016449E+0000
qs[896]= 1.51912498888493E+0005 ===== ql[896]= 4.16139222842176E+0002
===== Ip[896]= 3.23857144323483E+0000
qs[897]= 1.54759314868546E+0006 ===== ql[897]= 2.08686170992628E+0003
===== Ip[897]= 9.71066851798969E+0000
qs[898]= 2.58728936134875E+0004 ===== ql[898]= 9.39277392330114E+0001
===== Ip[898]= 2.89731894739816E+0000
qs[899]= 8.89864327041805E+0003 ===== ql[899]= 5.13208097734023E+0001
===== Ip[899]= 1.19090630369647E+0000
qs[900]= 1.38255855310440E+0006 ===== ql[900]= 1.44576687170938E+0003
===== Ip[900]= 2.06876049931452E+0001

```

la quantite solide pessimiste pour la periode consideree: 46.835943896866E+0006 Tonnes.

la quantite solide optimiste pour la periode consideree 38.02661313239336E+0006 Tonnes.

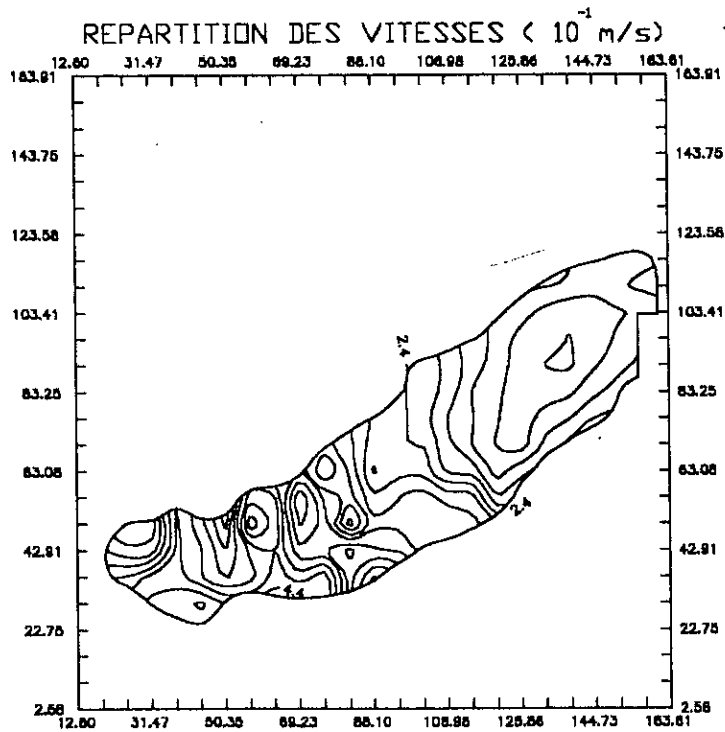
FIN D'EXECUTION

## ANNEXES 6 & 7

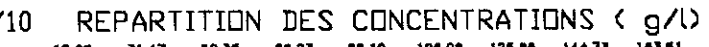
### RESULTATS DU MODELE NUMERIQUE

---

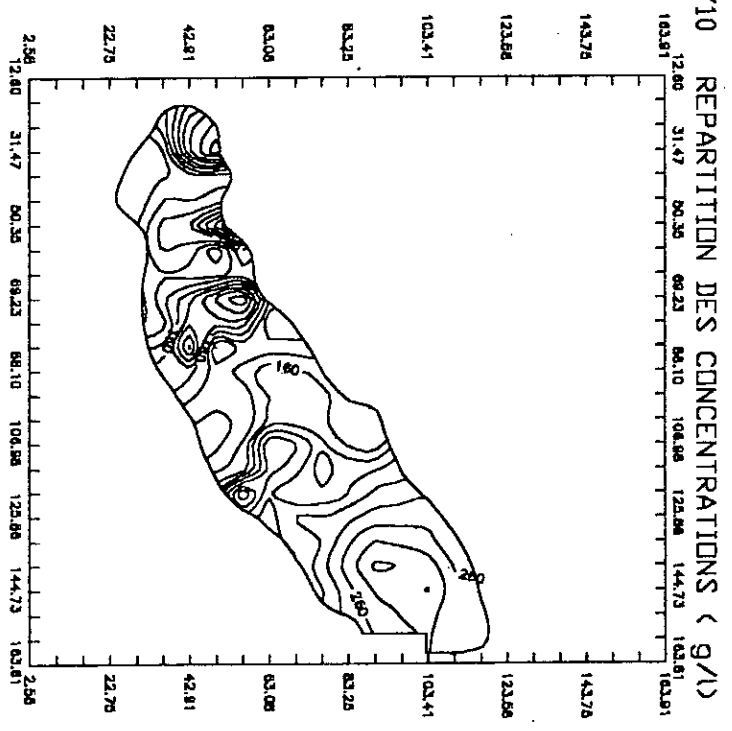
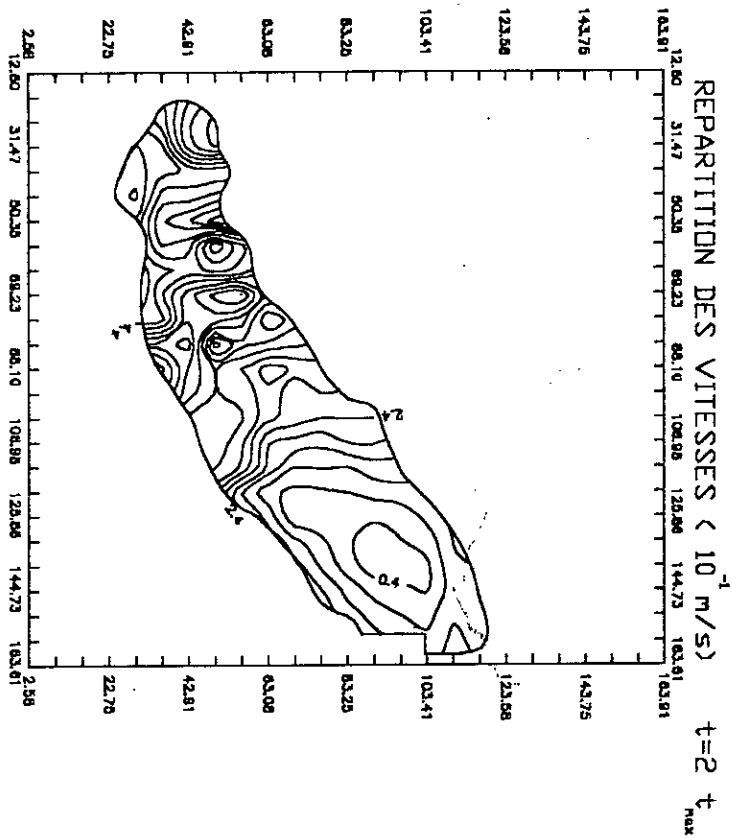
CRUE 1	PAGE 113 AU 122
CRUE 2	PAGE 123 AU 132

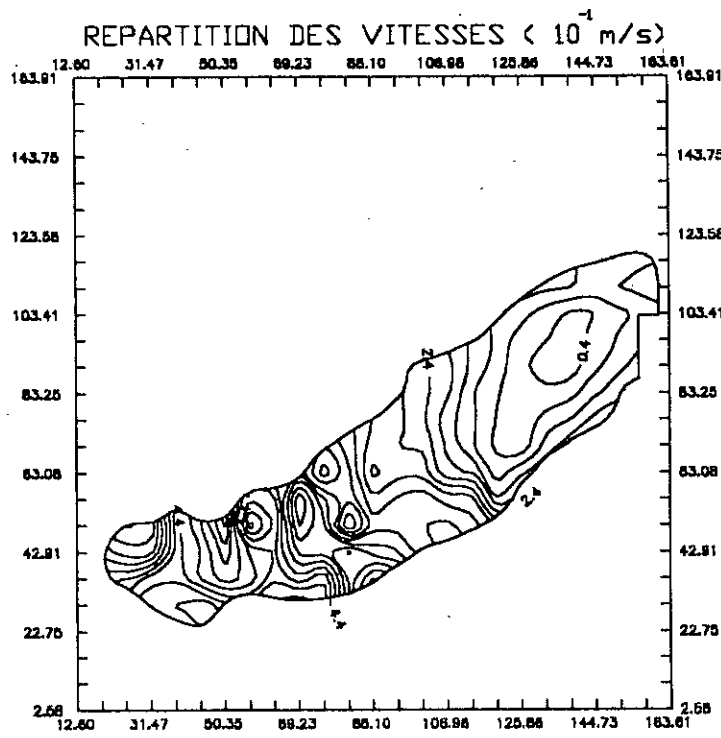


$t = t_{max}$

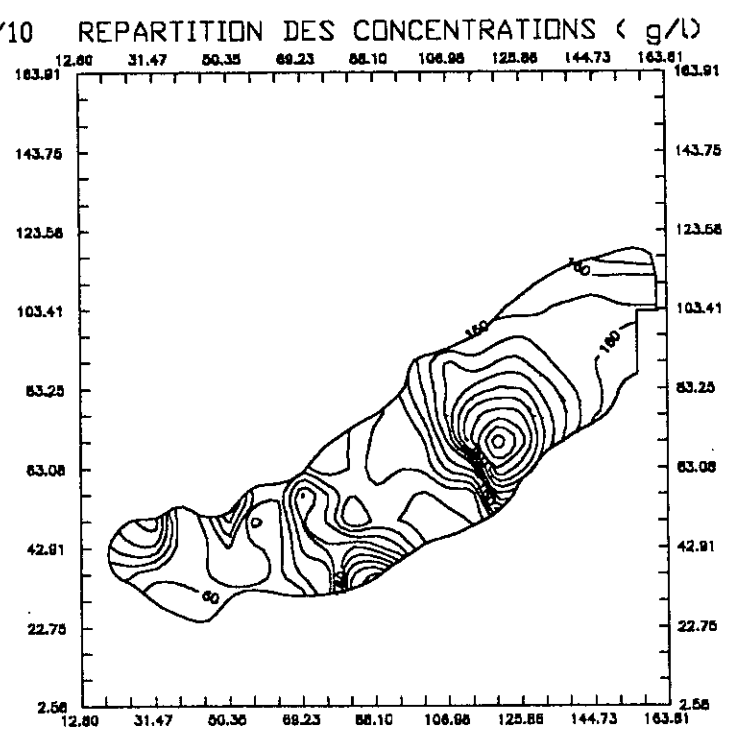


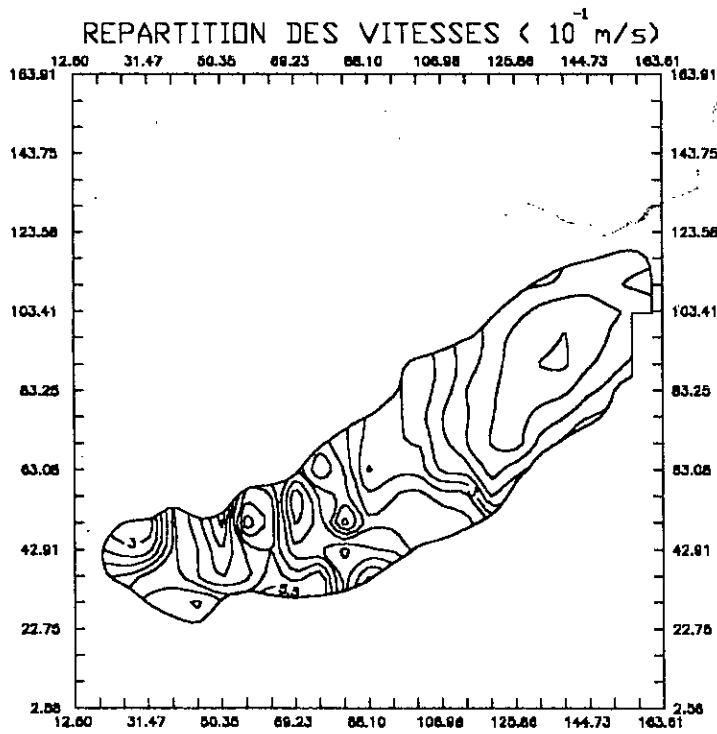




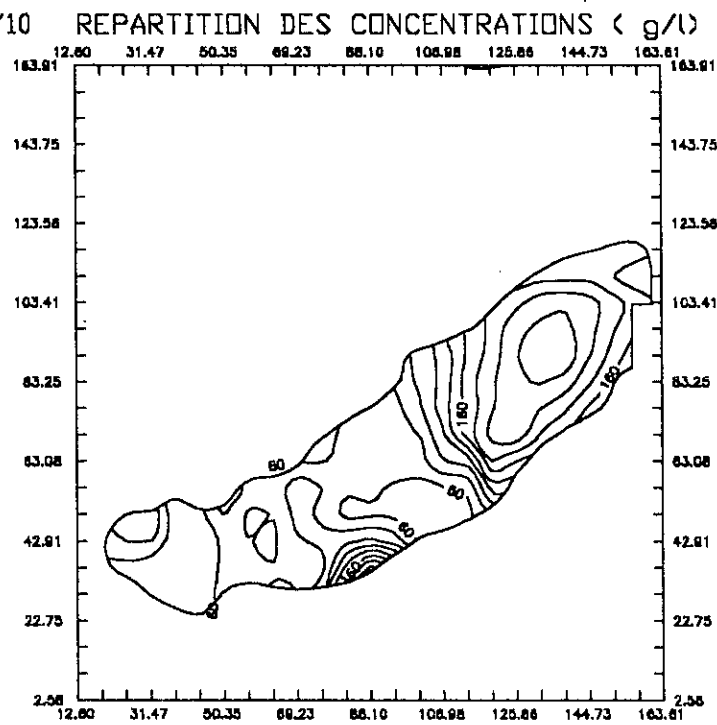


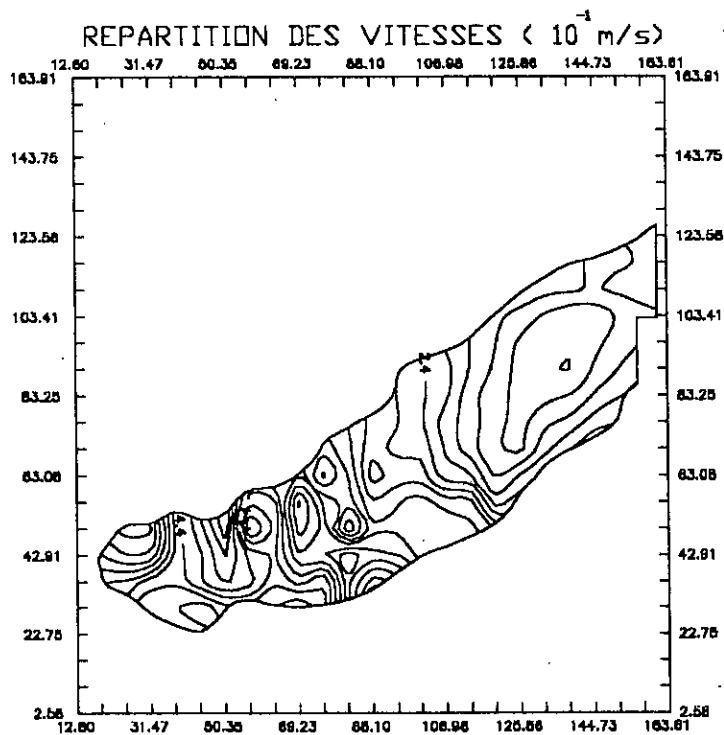
$t = 3 t_{max} / 10$



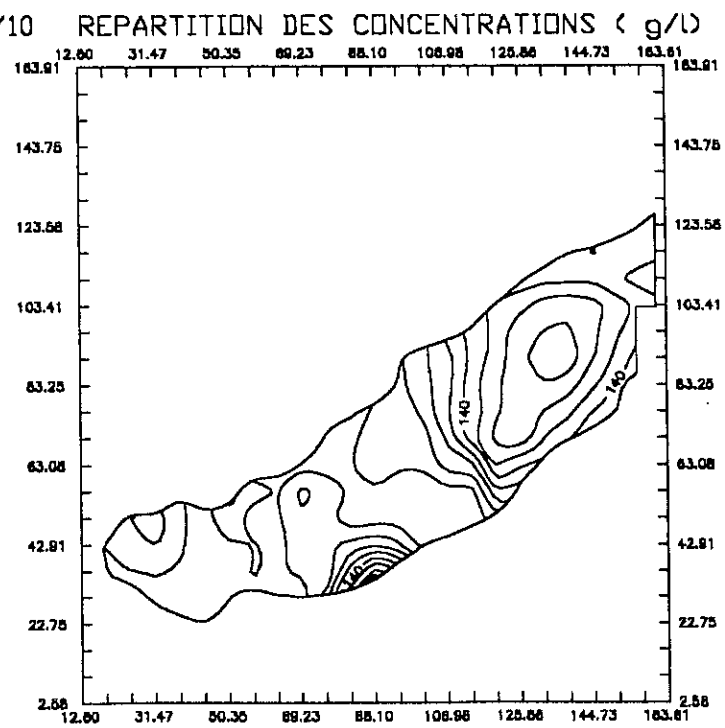


$t = 4 \frac{t_{max}}{10}$





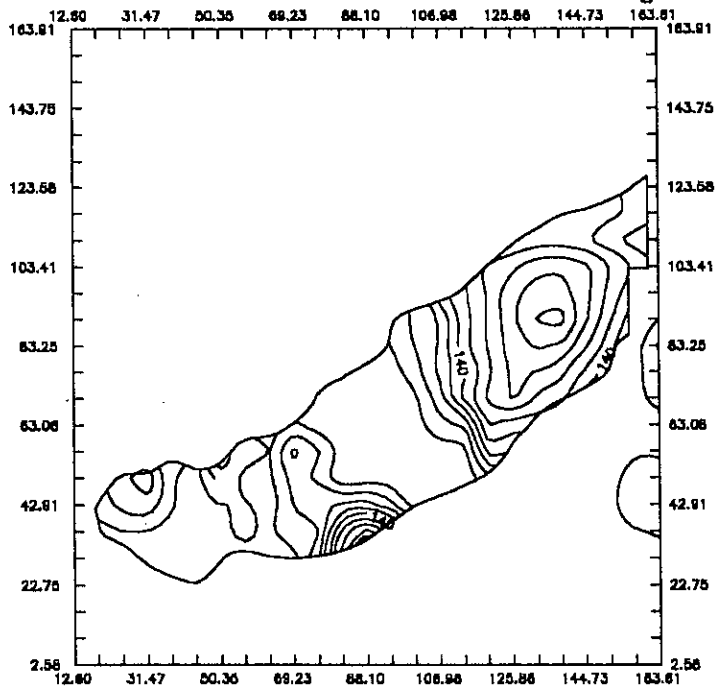
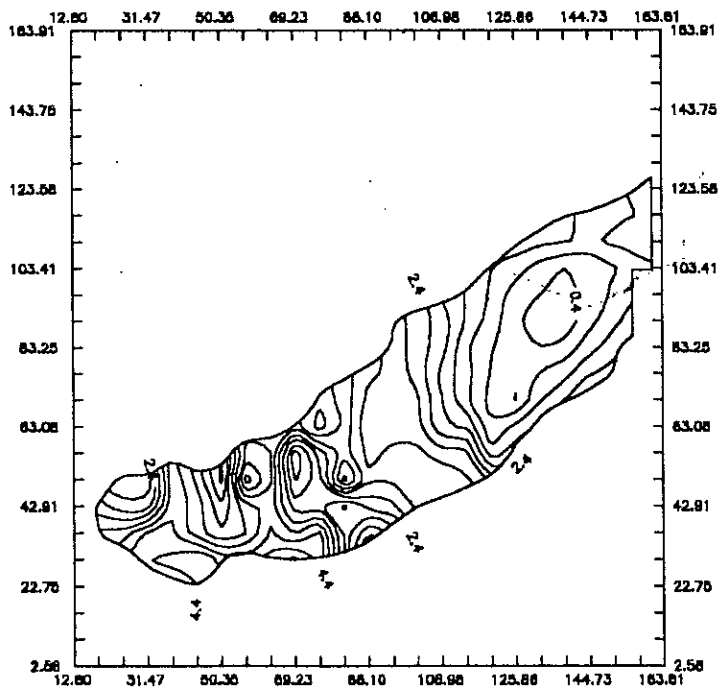
$t = 5 t_{\text{max}} / 10$

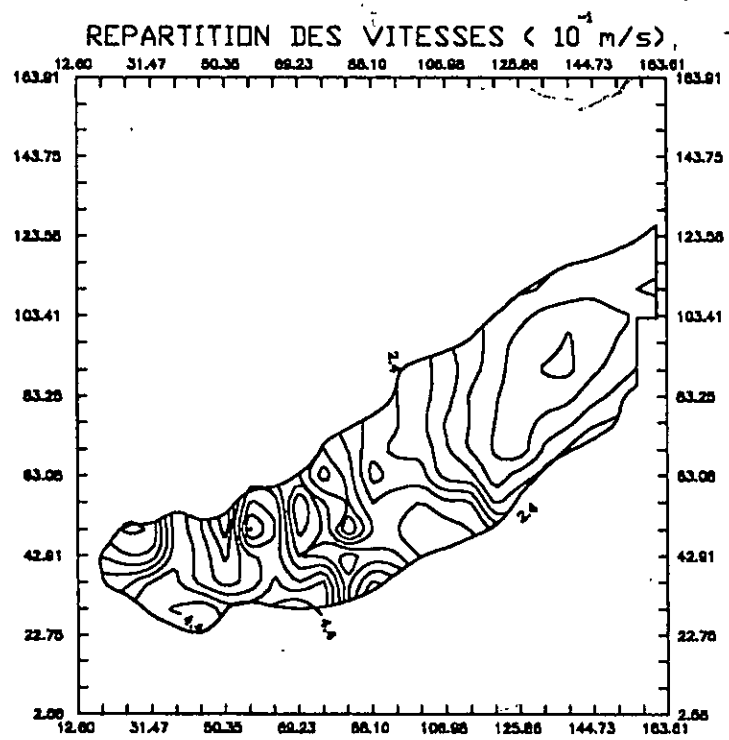


REPARTITION DES VITESSES ( $10^{-1}$  m/s)

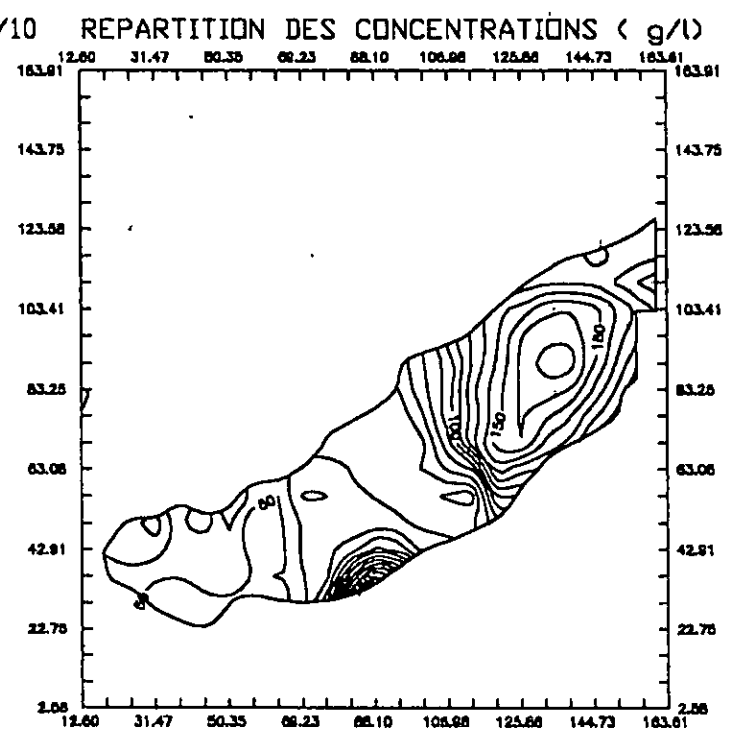
$t = 6 t_{max} / 10$

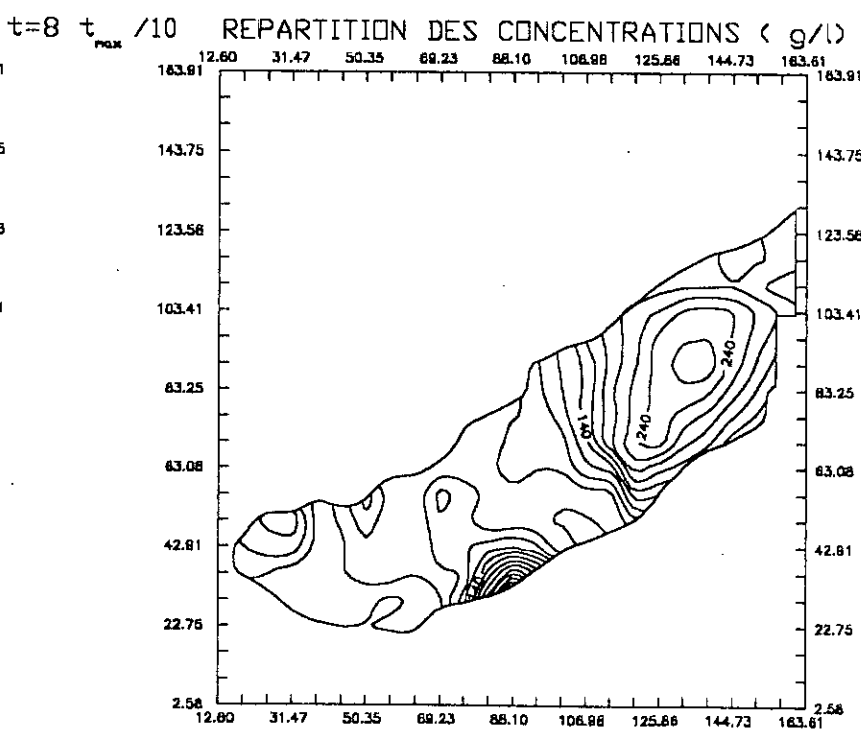
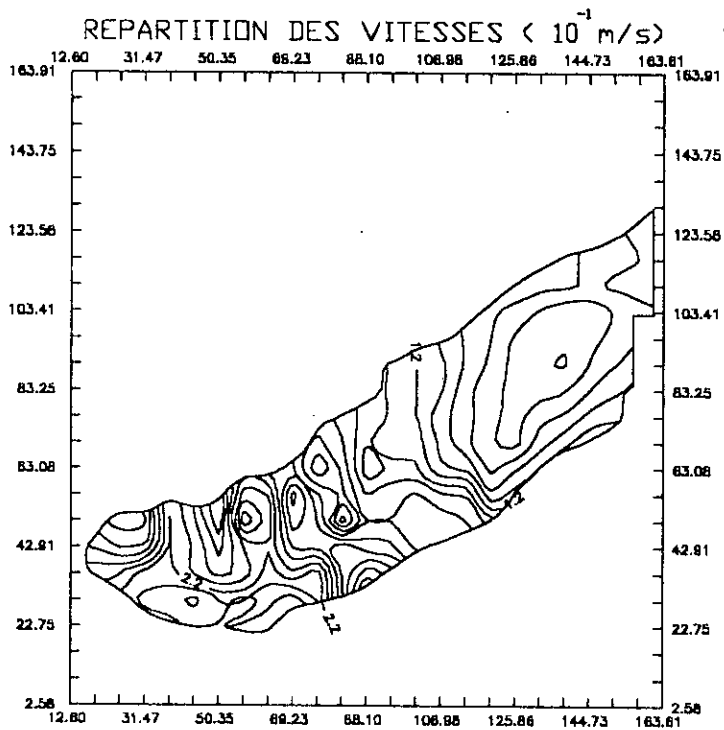
REPARTITION DES CONCENTRATIONS (g/l)

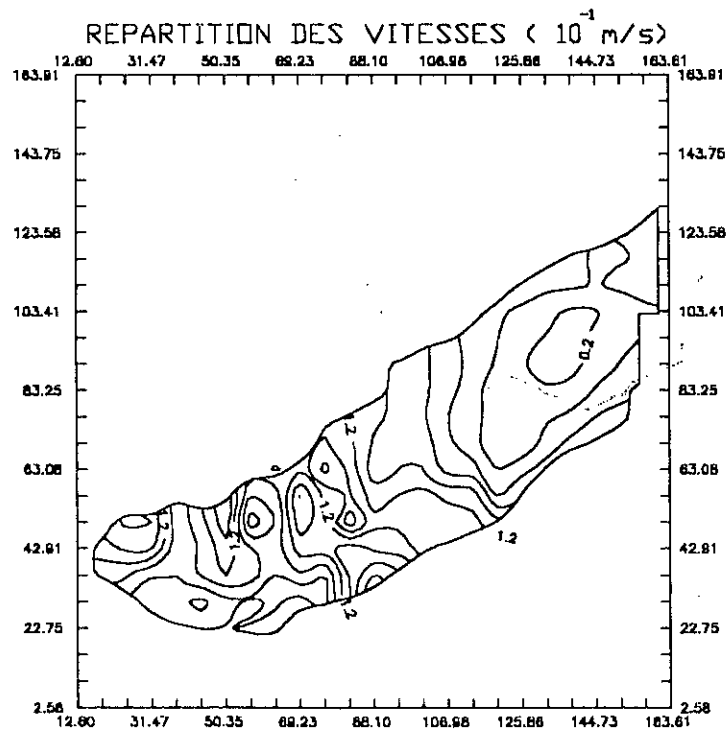




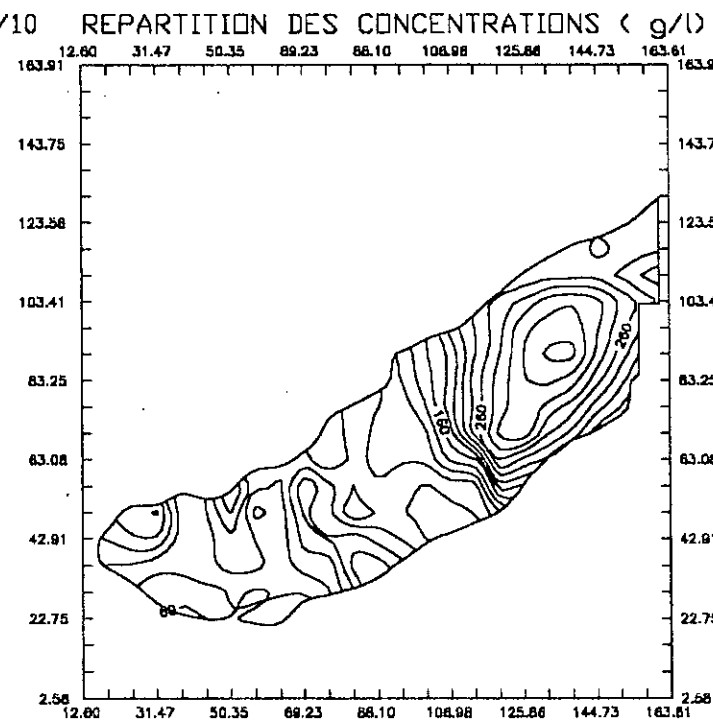
$t=7 t_{max} / 10$



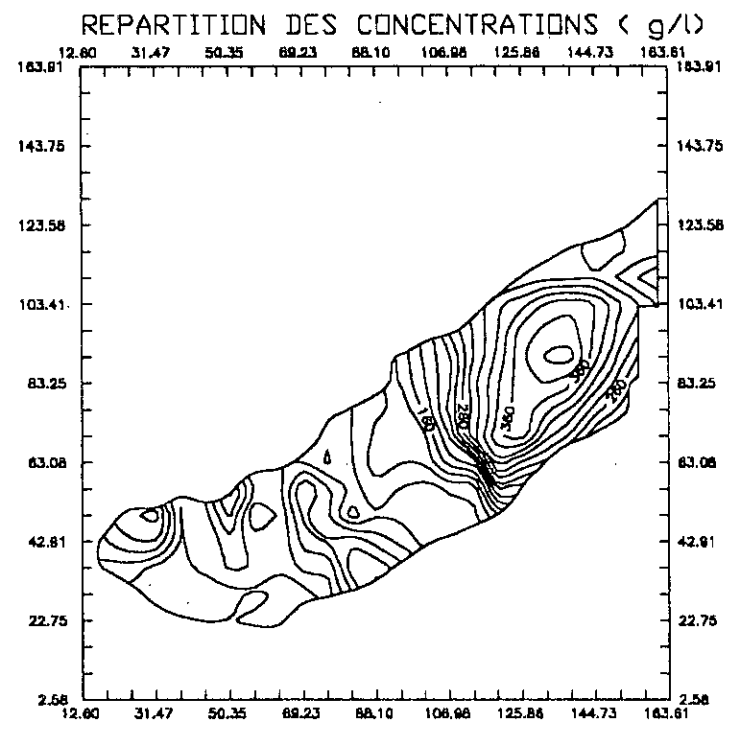
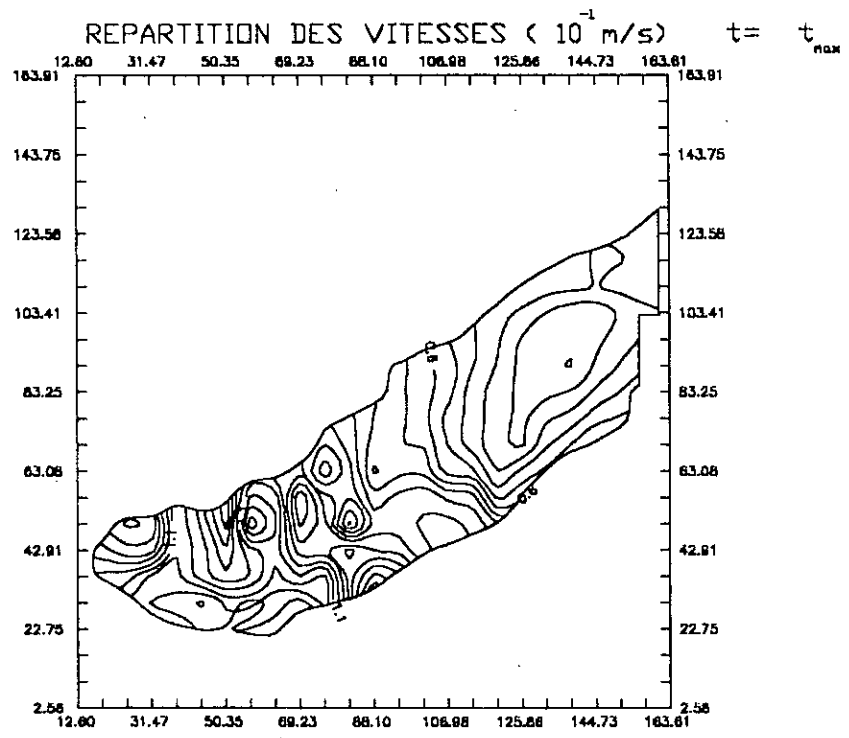


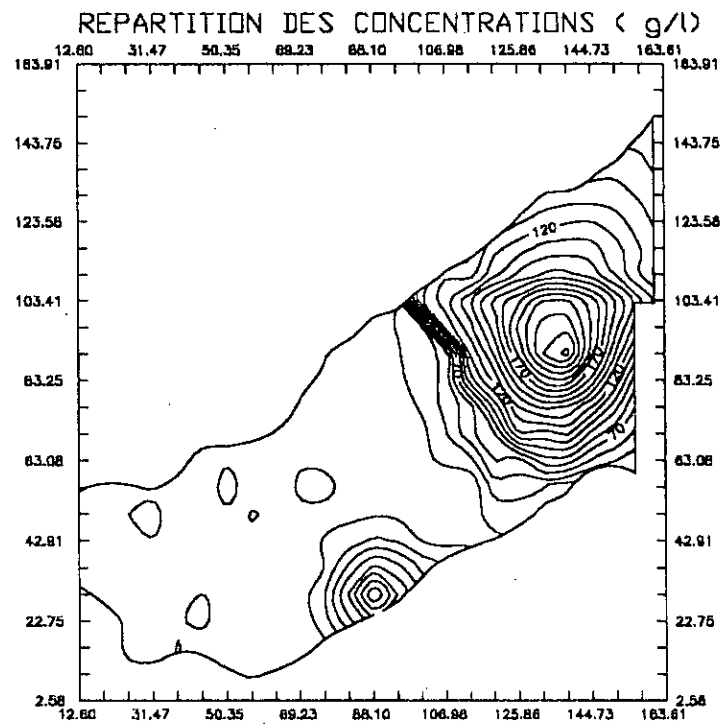
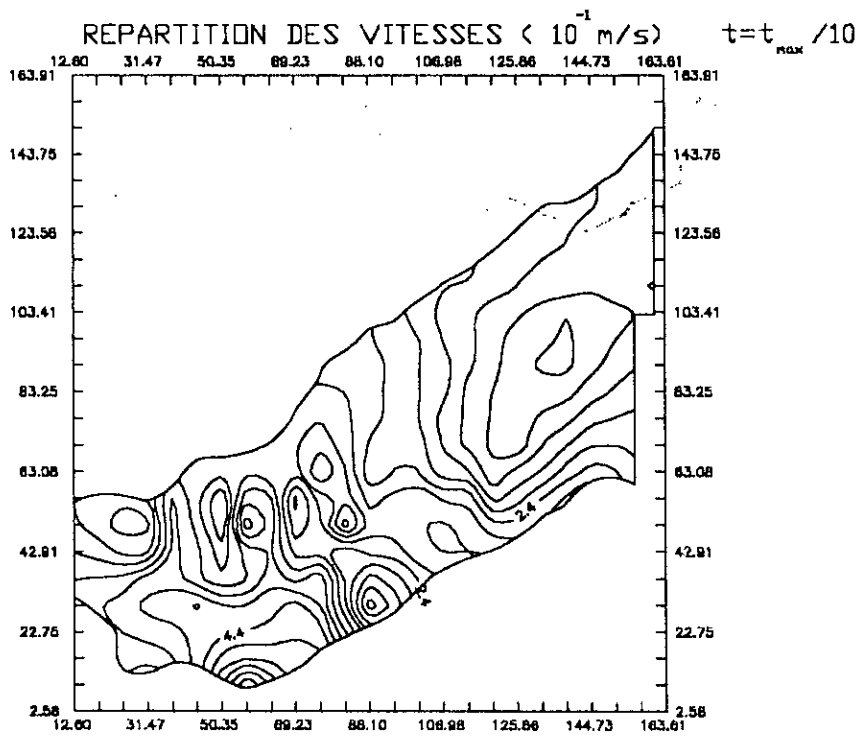


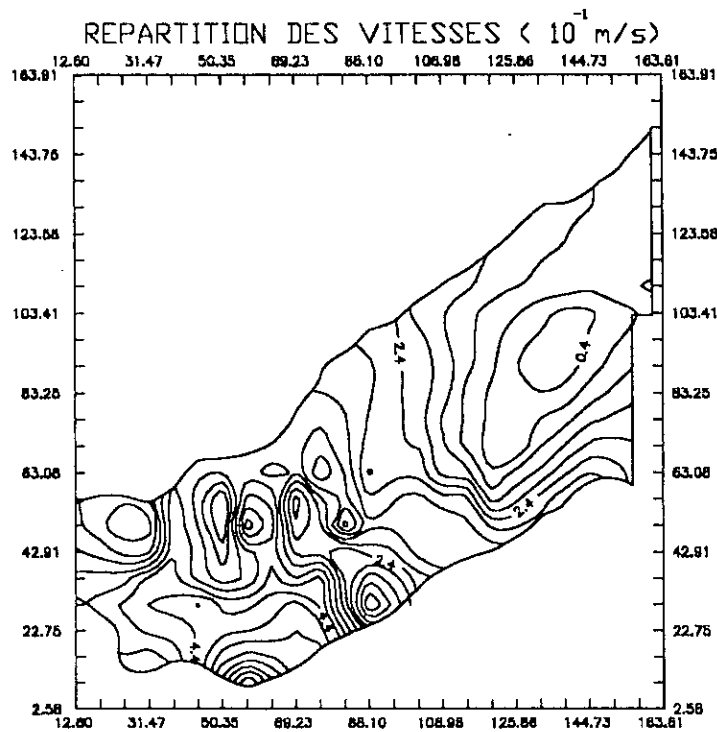
$t = 9 \frac{t_{max}}{10}$



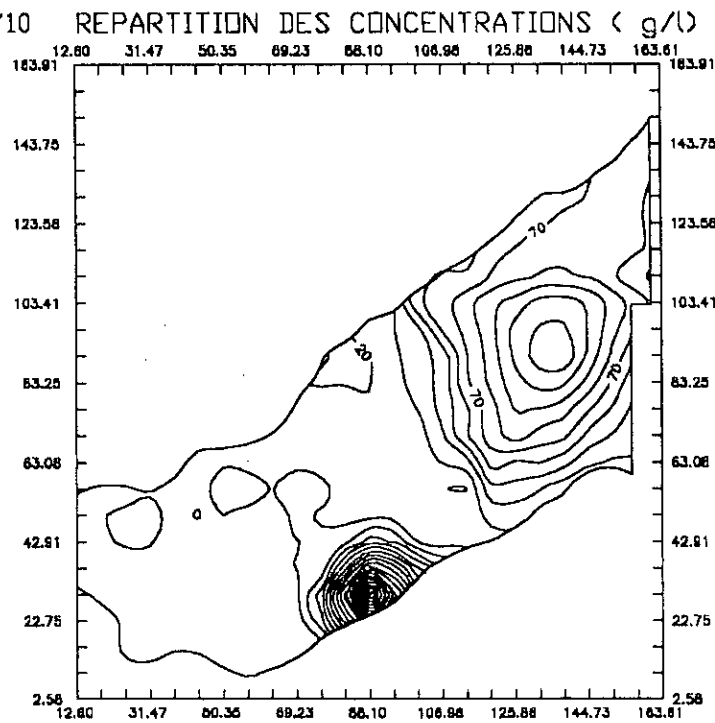


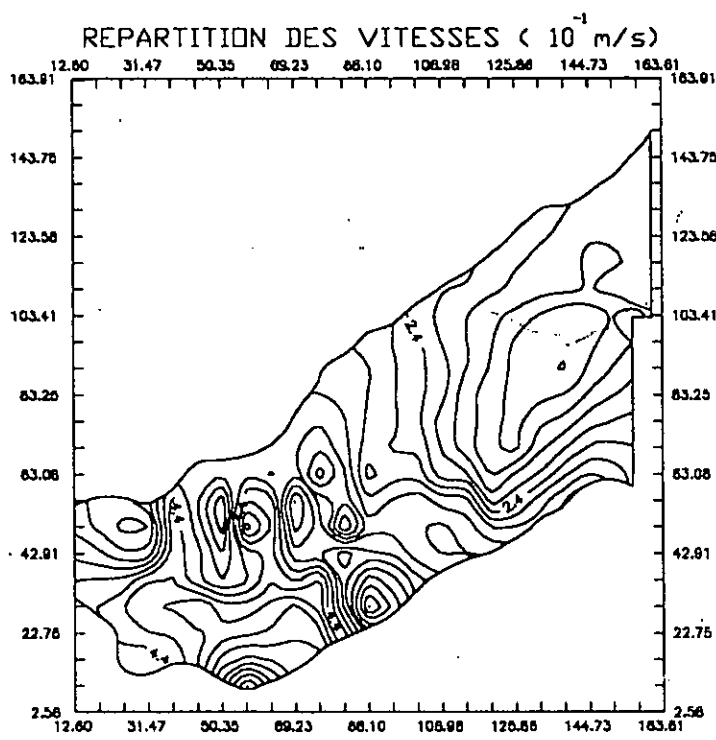




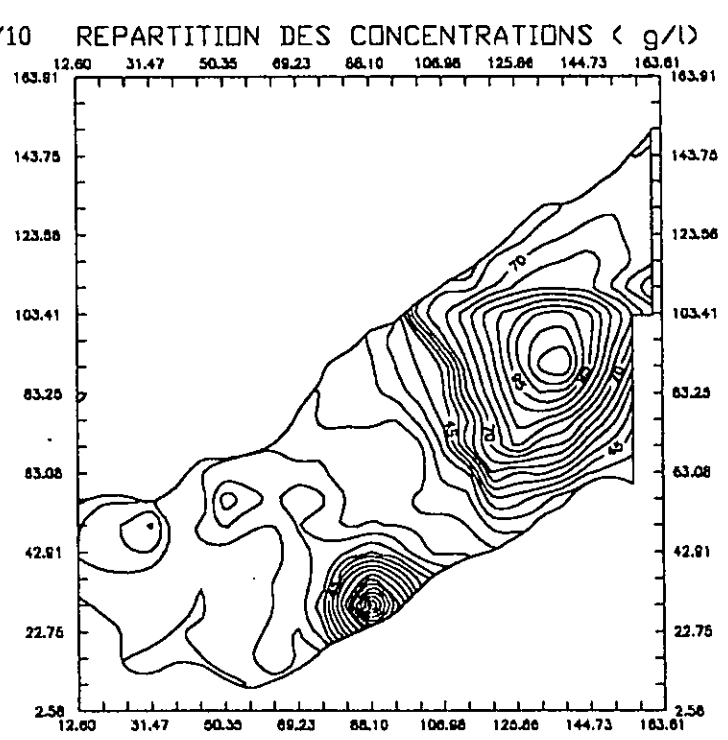


$t = 2 \frac{t_{max}}{10}$





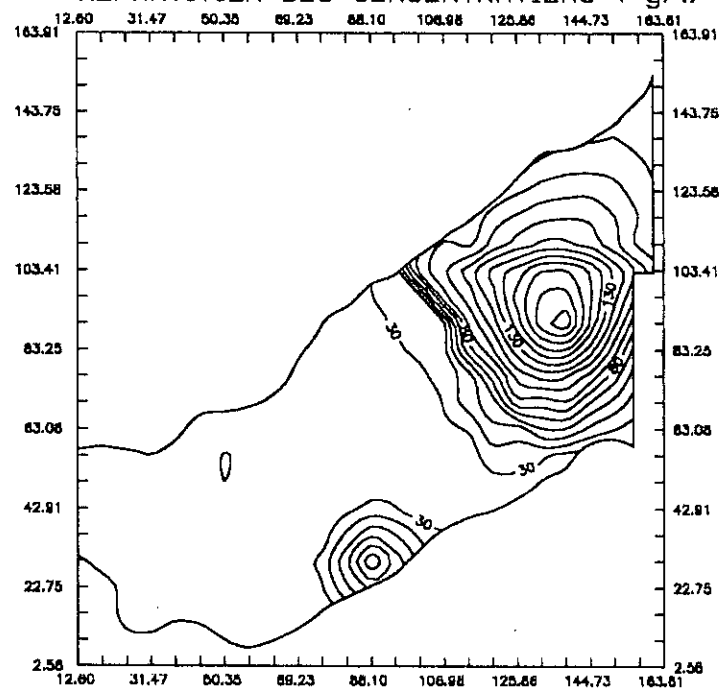
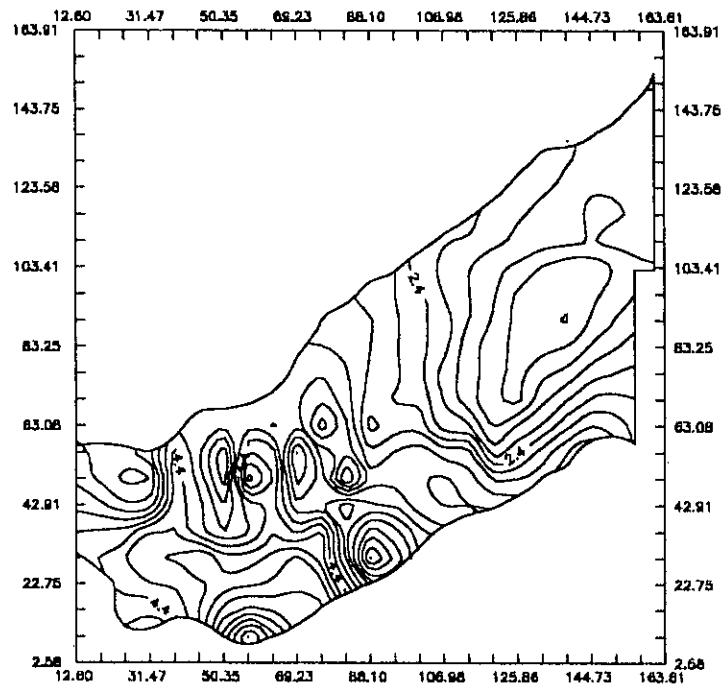
t=3 t<sub>max</sub>/10

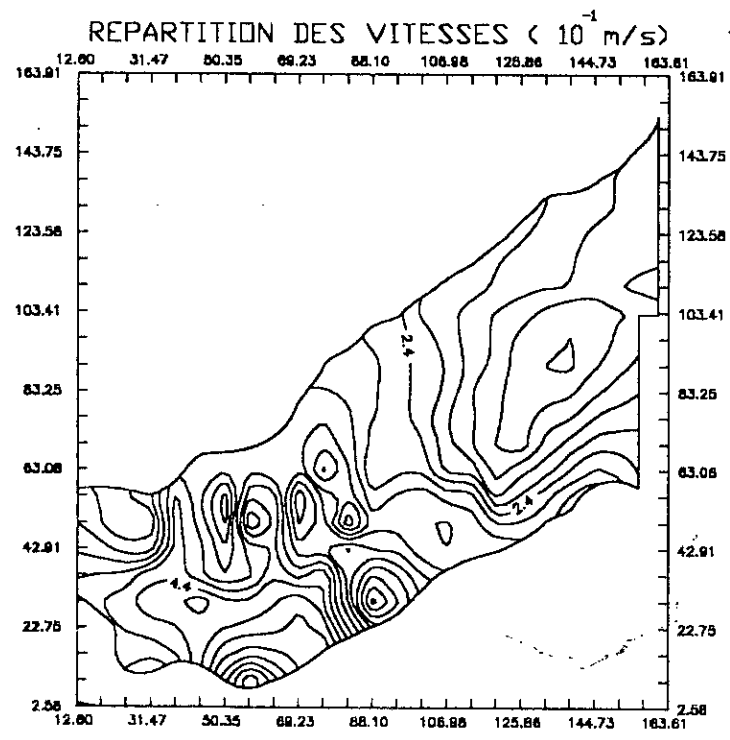


REPARTITION DES VITESSES ( $10^{-1} \text{ m/s}$ )

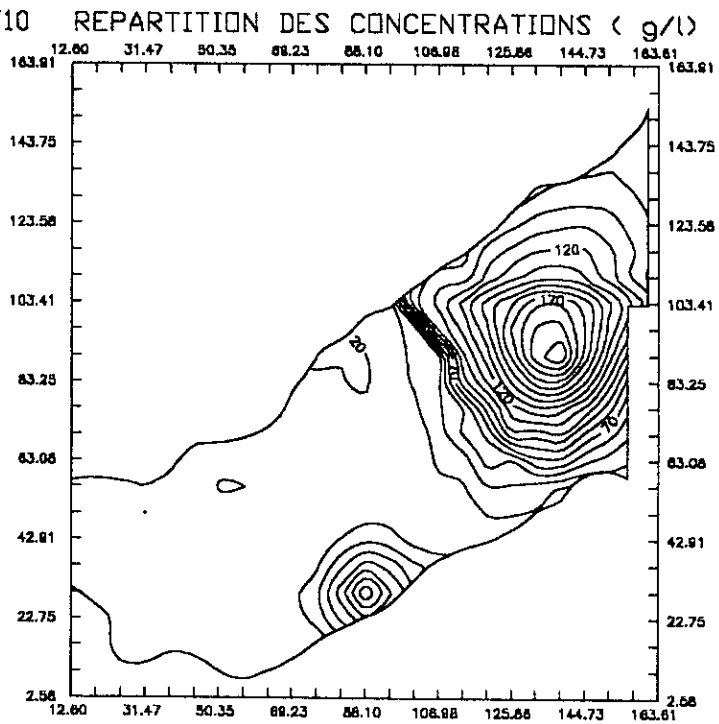
$t = 4 t_{\text{max}} / 10$

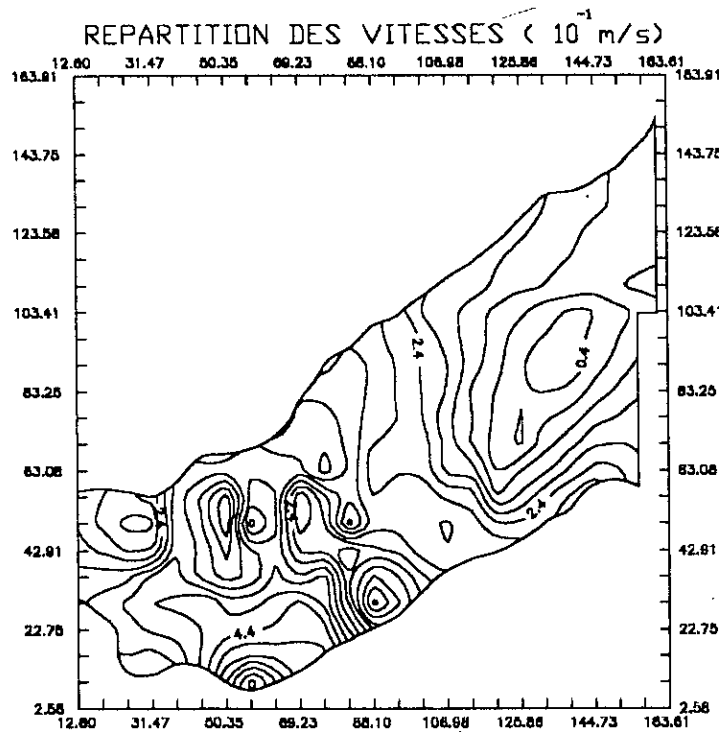
REPARTITION DES CONCENTRATIONS ( $\text{g/l}$ )



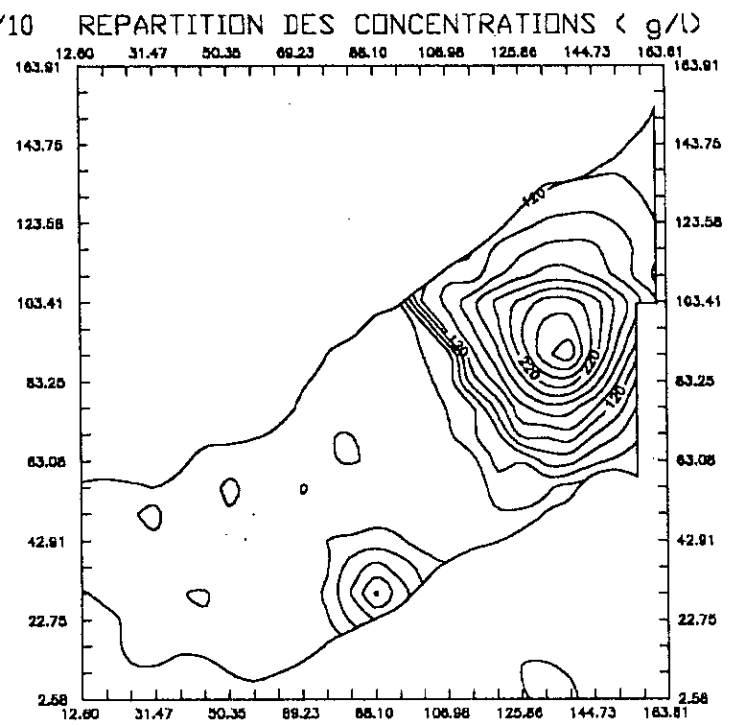


$t = 5 t_{max} / 10$





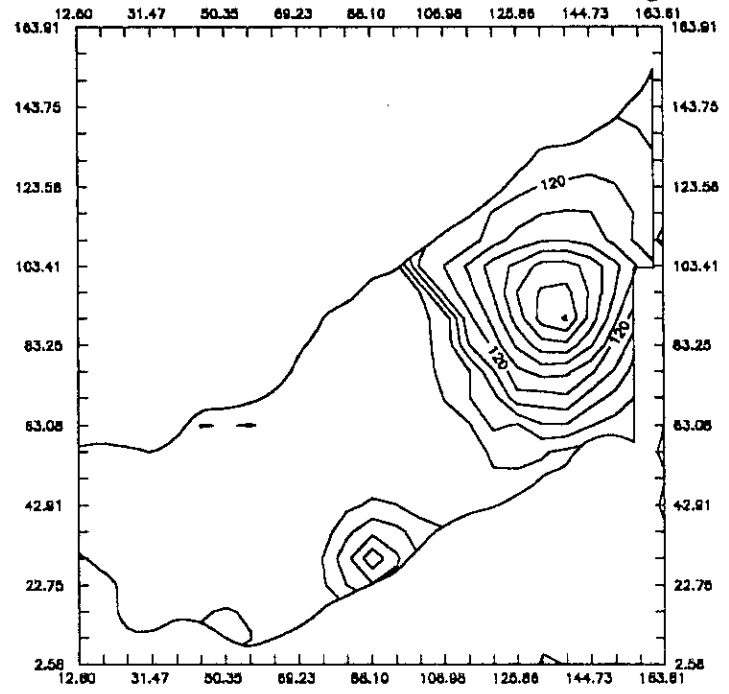
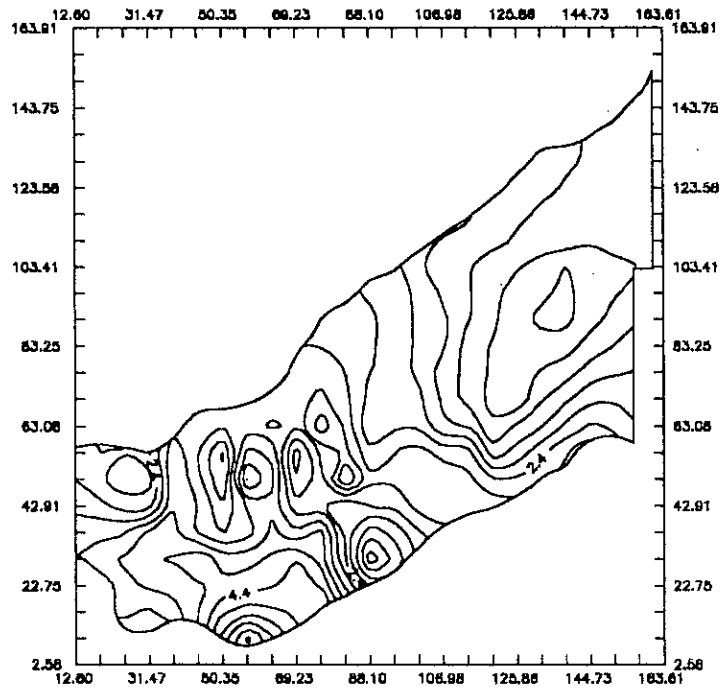
$t = 6 \frac{t_{max}}{10}$



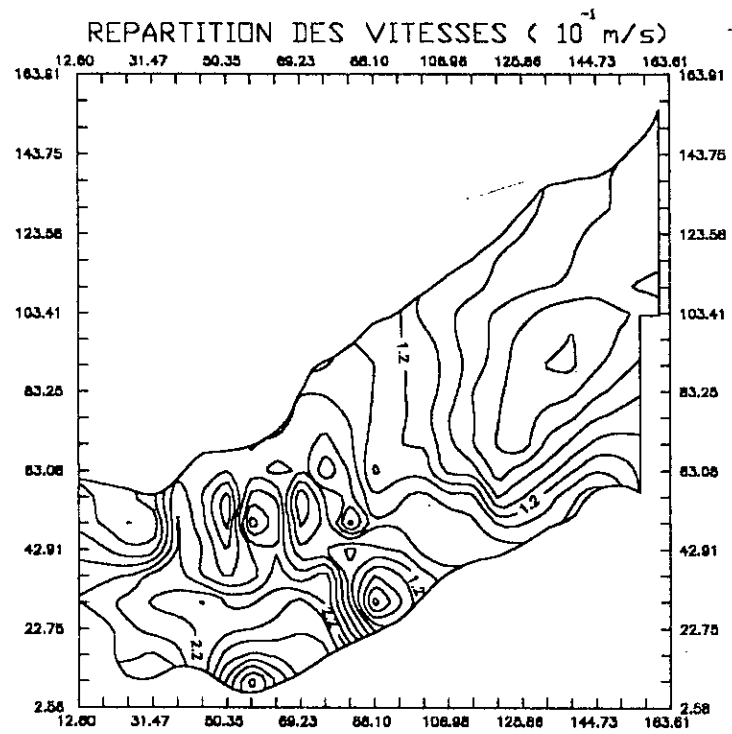
REPARTITION DES VITESSES ( $10^{-1}$  m/s)

$t = 7 t_{max} / 10$

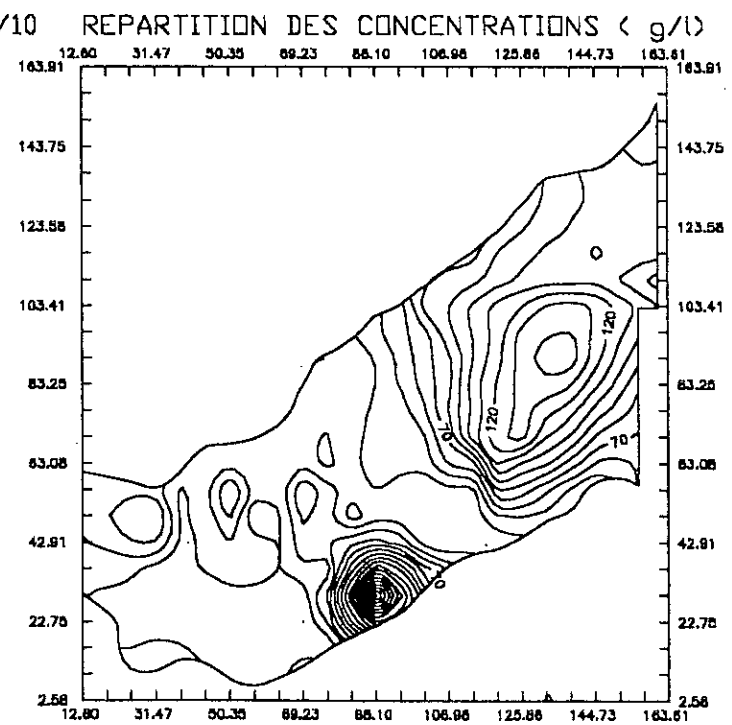
REPARTITION DES CONCENTRATIONS (g/l)

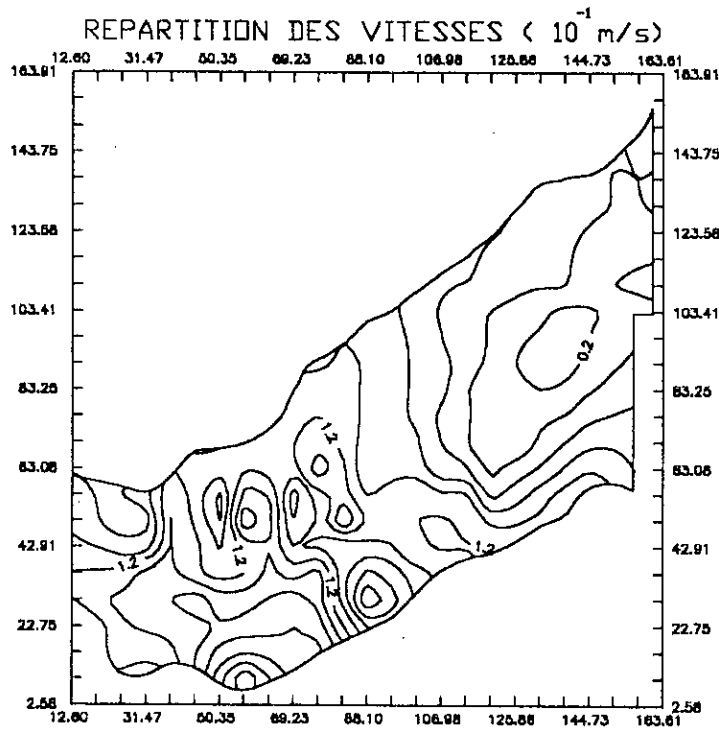




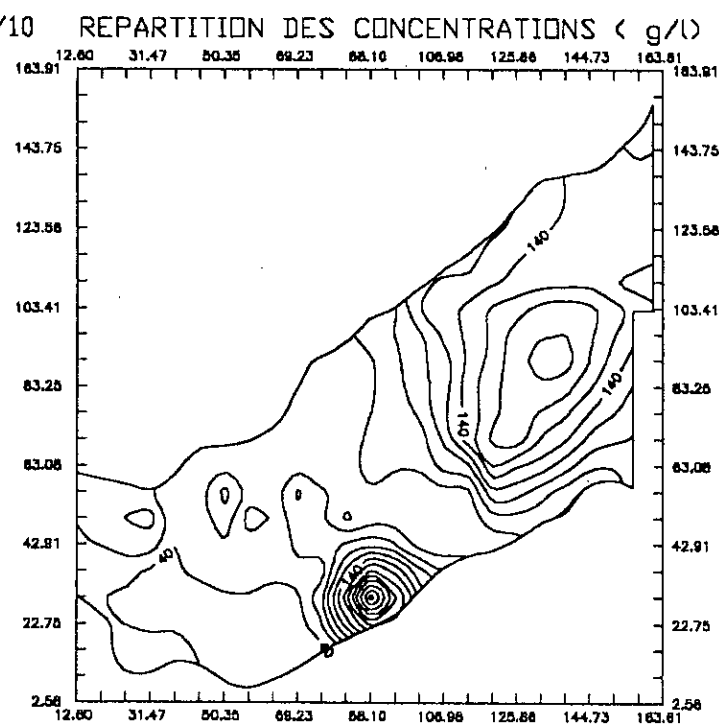


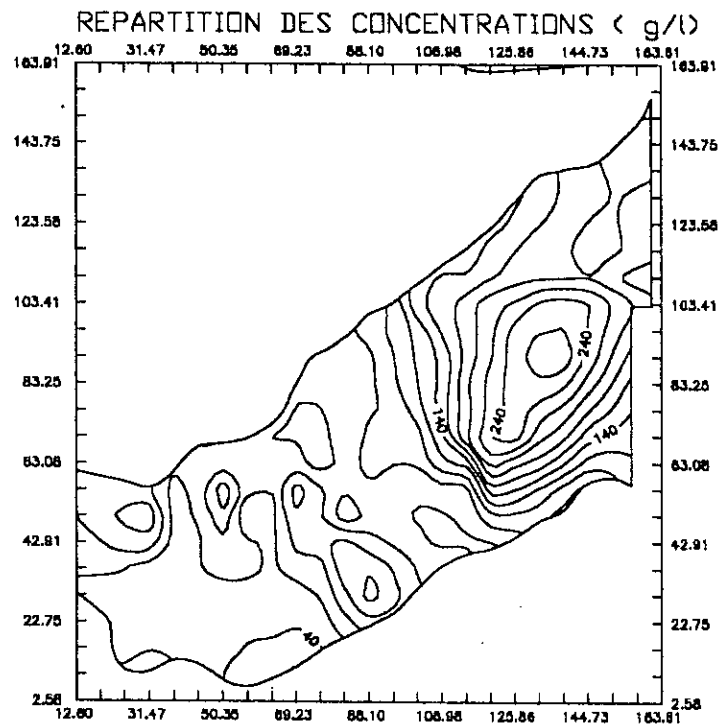
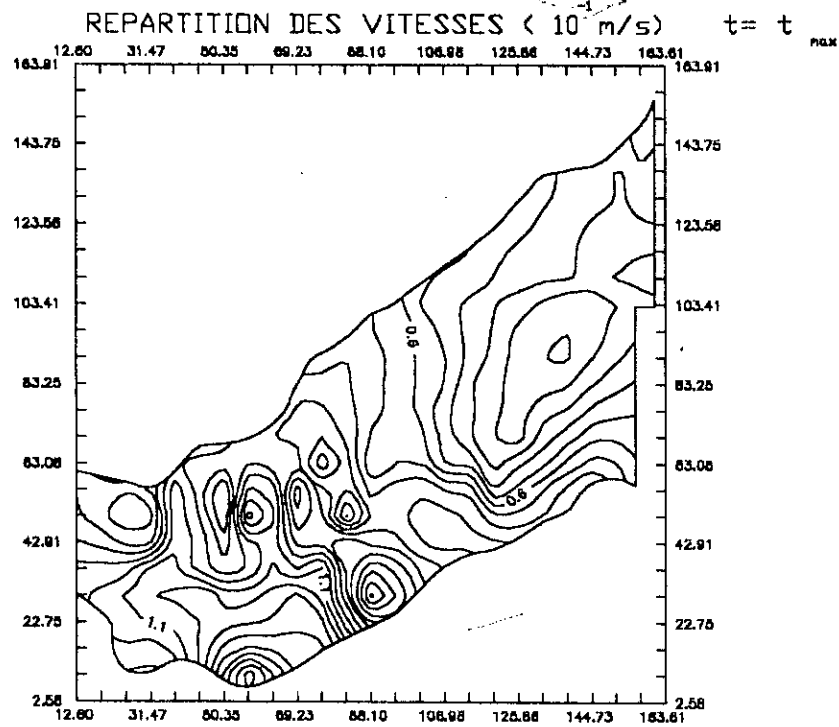
$t=8 t_{max} / 10$





t=9 t<sub>max</sub> /10

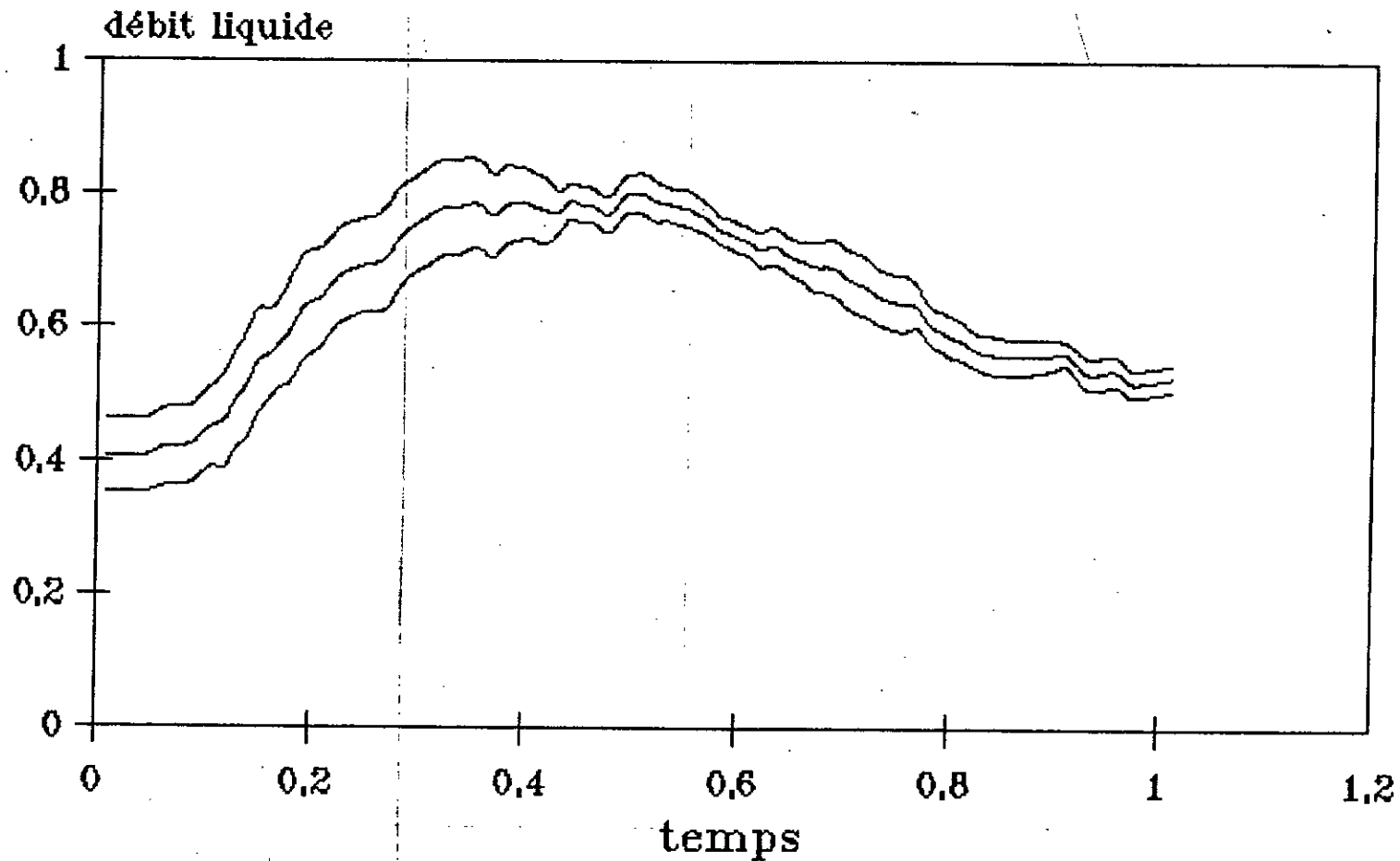




---

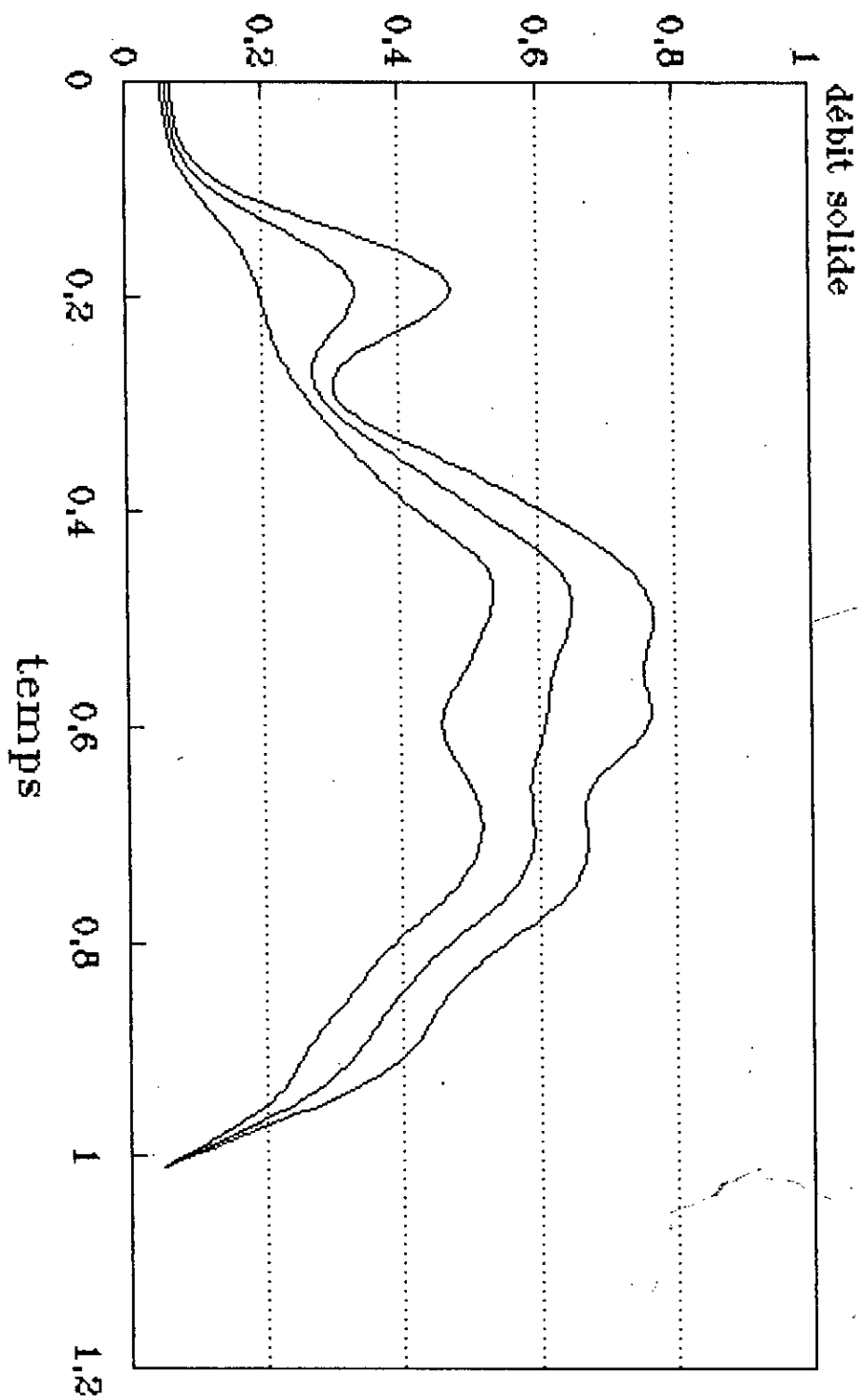
**ANNEXE 8**  
**RESULTATS DU MODELE GENERAL**

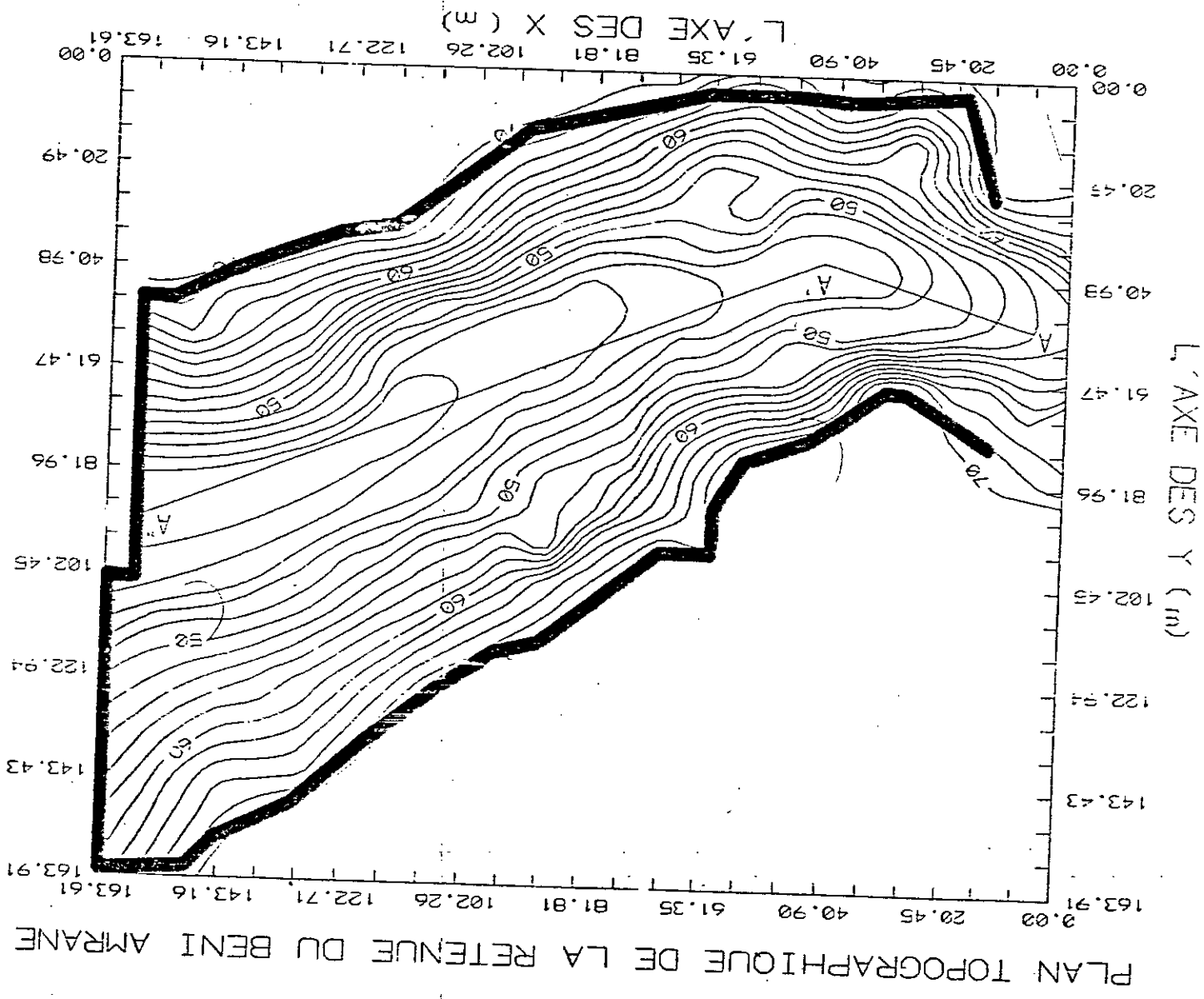
# l'enveloppe de la courbe débit liquide(unitaire)



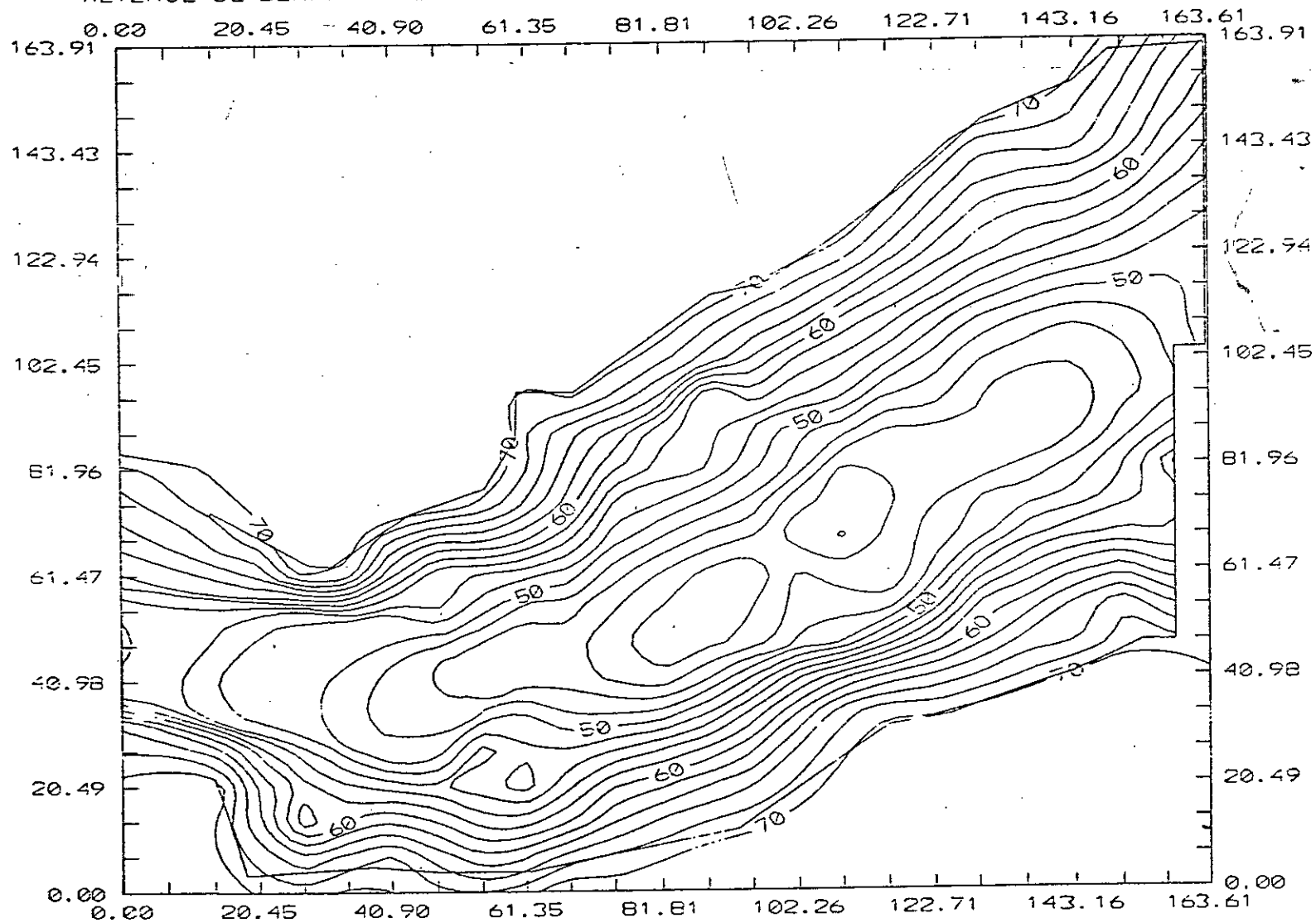
# crue unitaire moyenne

## débit solide



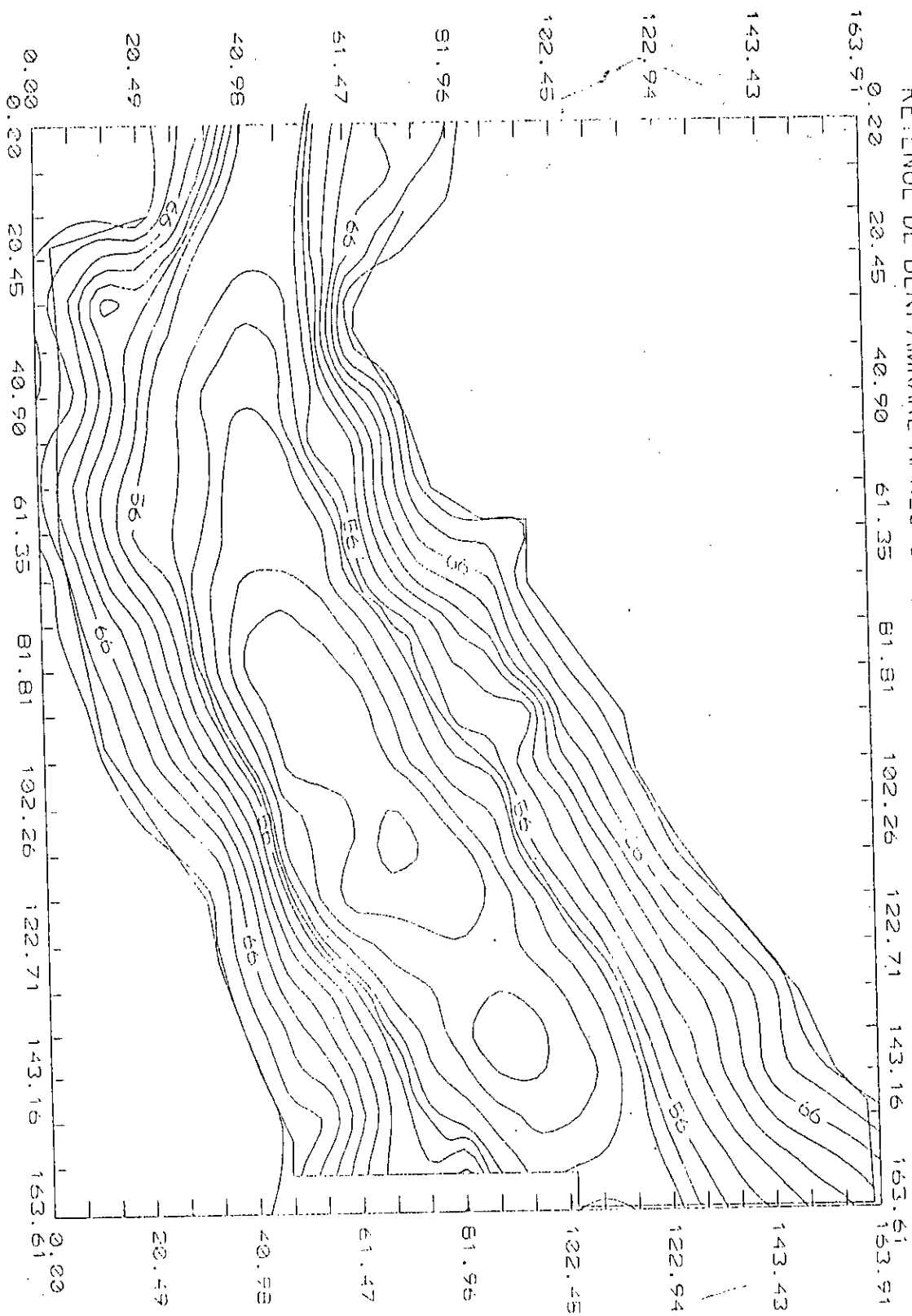


# REIENUE DE BENI AMRANE APRES UNE ANNEE D'EXPLOITATION

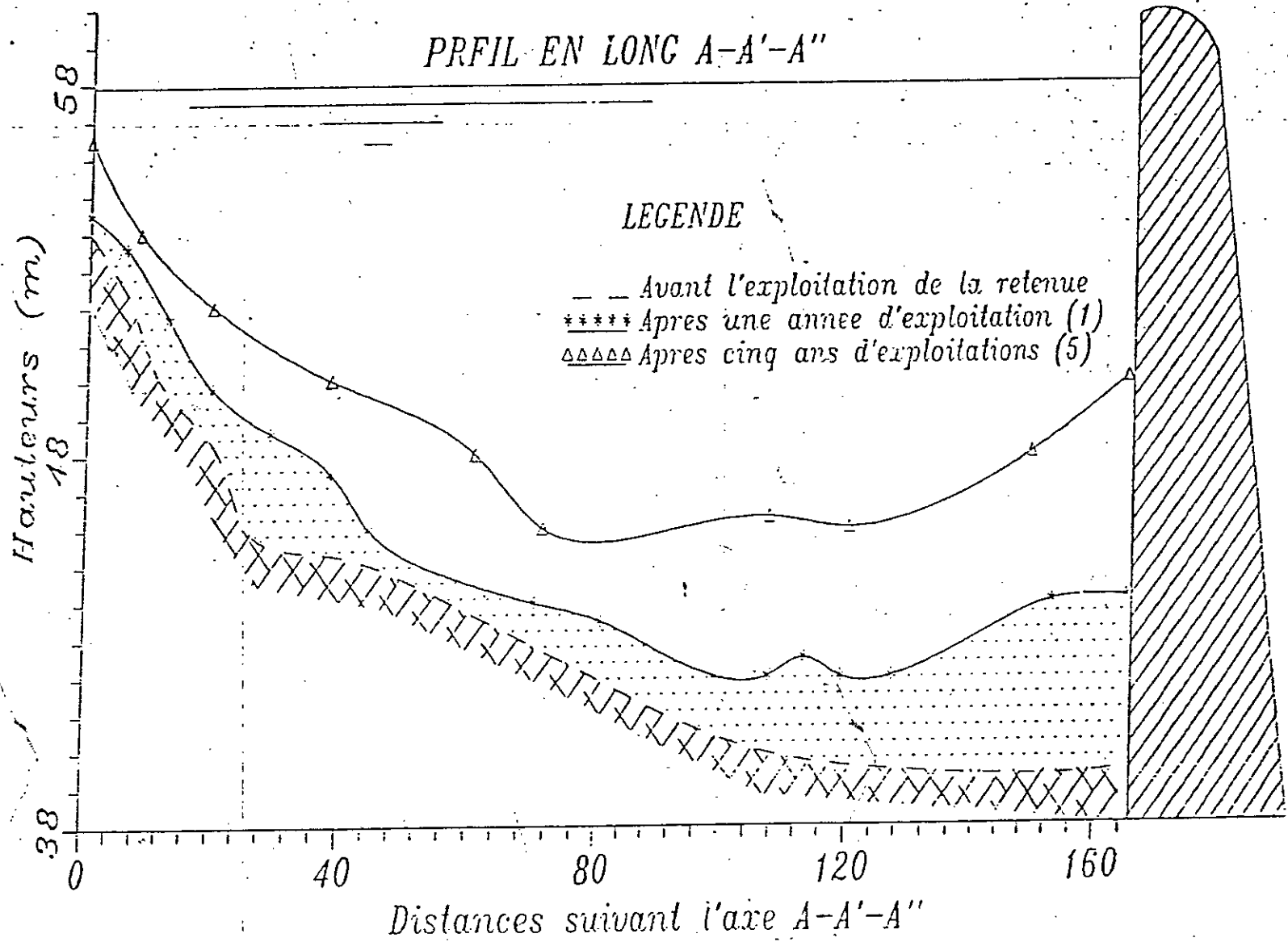




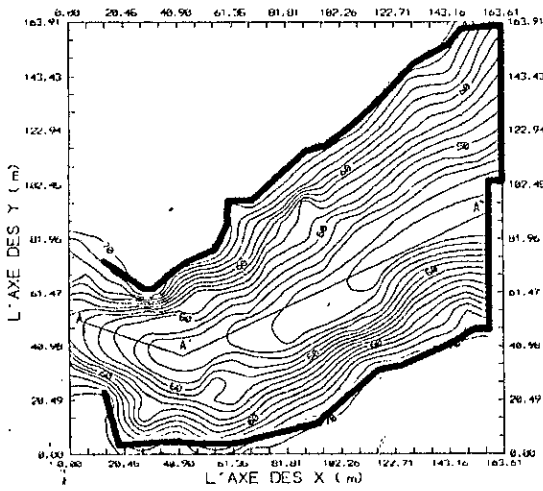
RELEVÉ DE BENI AMRANE APRES CINQ ANS D'EXPLOIATION



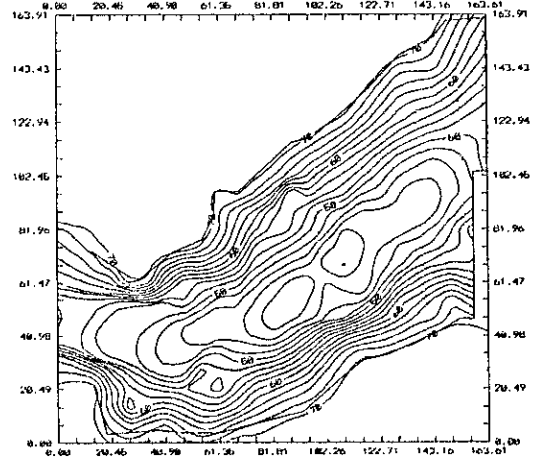
PRFIL EN LONG A-A'-A''



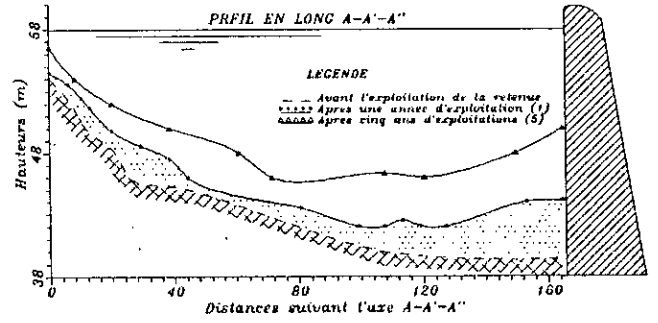
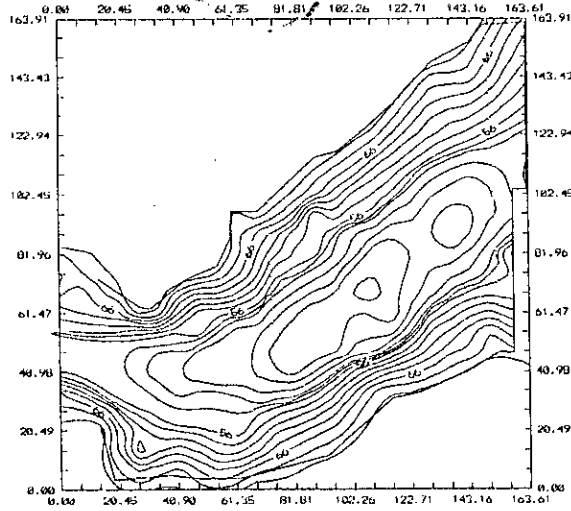
PLAN TOPOGRAPHIQUE DE LA RETENUE DU BENI AMRANE



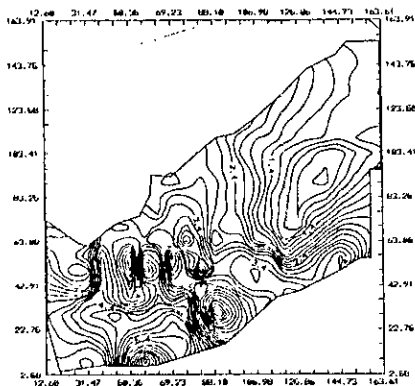
LE LAC DE BENI AMRANE APRES UN ANNEE D'EXPLOITATION



LE LAC DE BENI AMRANE APRES CINQ ANS D'EXPLOITATION

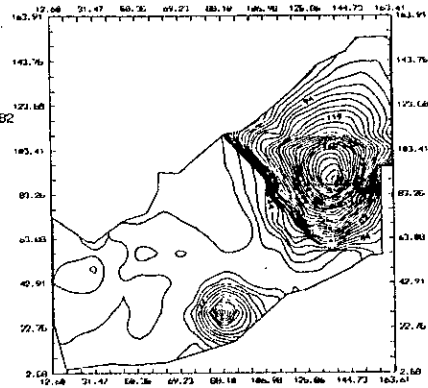


REPARTITION DES VITESSES ( $10^{-1}$  m/s)



CRUE DU 17 FEV 1982  
L = 284

REPARTITION DES CONCENTRATIONS (g/l)



CRUE DU 17 FEV 1982  
L = 284