

MESSAHLI
6/94

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie Hydraulique

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

**Contribution à la modélisation statistique des
transports solides en suspension.**

Proposé par:

Dr M. BERKANI

Etudié par:

Mr Med OUAMER BENHADJ

Mr Hamid BOUCHELKIA

Dirigé par:

Dr M. BERKANI

Mr B. REMINI

Promotion

Juin 1994

E.N.P. 10, Avenue Hacen Badi El-Harrach - Alger

DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A ma mère et mon père, à qui je dois tout .

A tous ceux qui me sont chers .

M^{me} Ouamer .

Je dedie ce modeste travail :

- A mon père comme geste de remerciement pour son soutien morale et les sacrifices consentis à mon égard.
- A ma mère, ce cher être qui n'a jamais cessé de s'inquiéter sur moi, dans les moments les plus pénibles, de me soutenir et de m'encourager pour parvenir à achever ma formation.
- A mon frère et mes soeurs.
- A tous mes proches et tout (es) mes amis (es).

Kamid .

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre sincère reconnaissance à monsieur M.BERKANI Docteur-Ingénieur et Maître de conférence à L' E.N.P.; pour nous avoir inspiré le sujet de notre travail et nous avoir guidé et orienté dans notre présente étude avec compétence et bienveillance. Qu'il veuille trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons aussi notre gratitude à monsieur B-REMENI; qui n'a jamais manqué de nous aider avec la plus grande sympathie.

Nous sommes très reconnaissant à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous ne saurions oublier, l'ensemble du personnel de L' E.N.P. et l'ensemble du personnel du département d'hydrologie de L'A.N.R.H., pour la serviabilité et la compréhension qu'ils nous ont toujours manifesté.

Que toutes les personnes non citées, mais qui nous ont largement aidés trouvent ici l'expression de notre gratitude la plus sincère.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CONTRIBUTION A LA MODELISATION

STATISTIQUE DES TRANSPORTS

SOLIDES EN SUSPENSION

الموضوع:

إسهام في دراسة نموذجية إحصائية لنقل الجزيئات الصلبة المعلقة.

الملخص:

يعتبر هذا العمل حوصلة للمعارف المتحصل عليها في ميدان نقل الجزيئات الصلبة.

تحليل لتصرفات الترسيبات، الذي يمكننا من تصوير مختلف الضواهر، التي تؤدي إلى نقل ثم ترسب هذه المواد.

من جهة أخرى، يمكننا هذا التحليل من تقييم تقريبي لمختلف الإمكانيات التي تخص التنبؤ بالروافد الصلبة.

لهذا الهدف، خصصنا دراسة نموذجية بسيطة من أجل التنبؤ برواسب الترسيب المعلقة.

Subject:

Contribution to the statistic modelisation of suspended-sediment transport.

Abstract:

This study is synthesis of previous works about the sediment transport phenomenon.

An analysis of behaviour of sediment, we allow to describe the different phenomena converging in carrying, removal and settling of these sediment.

Besides, some possibilities in prediction sediment yields.

For this aim, a statistic modelisation is employed to prediction suspended-sediments yields.

Sujet:

Contribution à la modélisation statistiques des transports solides en suspension.

Résumé:

Ce travail est une synthèse des connaissances acquises dans le domaine du transport solides.

Une analyse du comportement des sédiments nous permet de décrire les différents phénomènes qui concourent à l'entraînement, du transport et au dépôt de ces matériaux.

Par ailleurs, cette étude nous permet d'évaluer sommairement les possibilités des moyens de prévision des apports solides.

A cette fin, une modélisation statistique simple a été mise pour la prévision des apports de sédiments en suspension.

T A B L E D E M A T I E R E S

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION	11
--------------------	----

P A R T I E - I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE POUR LES PROBLEMES D'EROSION, TRANSPORT SOLIDE ET SEDIMENTATION DANS LES BASSINS VERSANTS.....	13
--	----

CHAPITRE I : Processus d'érosion dans les bassins versants.....	15
---	----

I.1 Généralités.....	15
----------------------	----

I.1.1 Les types d'érosion	15
---------------------------------	----

I.1.2 Caractéristiques des bassins versants.....	16
--	----

I.2 Les interfluves.....	16
--------------------------	----

I.2.1 Les processus d'altérations.....	17
--	----

I.2.2 Influence du climat.....	17
--------------------------------	----

I.2.3 Facteurs topographiques.....	18
------------------------------------	----

I.2.4 Facteurs géologiques.....	20
---------------------------------	----

I.2.5 Couvert végétal.....	20
----------------------------	----

I.2.6 Occupation des terres.....	20
----------------------------------	----

I.3 Réseau de drainage.....	21
-----------------------------	----

CHAPITRE II : Le transport solide.....	22
--	----

II.1 Généralités.....	22
-----------------------	----

II.1.1 Transport solide.....	22
------------------------------	----

II.1.2 Ecoulement turbulent.....	22
----------------------------------	----



II.2	Transport par charriage.....	23
II.2.1	Généralités	23
II.2.2	Description du phénomène.....	24
II.2.3	Pavage du fond.....	25
II.3	Transport par suspension.....	26
II.3.1	Généralités.....	26
II.3.2	Description du phénomène.....	26
II.4	Séparation entre charriage et suspension.....	28
CHAPITRE III:	Alluvionnement des retenus.....	29
III.1	Généralités.....	29
III.1.1	Modification artificielle.....	29
III.1.2	Apports solides aux retenues.....	29
III.2	Mécanisme de l'envasement.....	30
III.2.1	Comportement des sédiments grossiers.....	30
III.2.2	Comportement des sédiments fins.....	30
III.3	Influence des différentes caractéristiques de la retenue sur l'envasement.....	33
III.4	Effet de l'alluvionnement des retenues.....	35
III.5	Maîtrise de l'alluvionnement des retenues.....	36
CHAPITRE IV:	Prévisions des apports solides.....	37
IV.1	Introduction.....	37
IV.2	Ampleur d'érosion en ALGERIE.....	37

IV.3	Différentes méthodes de prévision des apports solides	40
IV.3.1	Méthodes empiriques	40
IV.3.2	Application des équations de transport solide	41
IV.3.3	Méthodes par modélisation	42
IV.4	Modèles de quantification en ALGERIE	43
IV.4.1	Modèle de TIXERONT	43
IV.4.2	Modèle de SOGREAH	44
CHAPITRE V: Méthodes de défense contre l'érosion et la sédimentation		45
V.1	Introduction	45
V.2	Les interfluves	45
V.2.1	Procédés agrotechniques	46
V.2.2	Restauration des forêts	46
V.2.3	Procédés hydrotechniques	47
V.3	Les cours d'eau	47
V.3.1	Revêtement des berges	47
V.3.2	Freinage de l'écoulement	47
V.3.3	Aménagements hydrauliques	48

P A R T I E - II

MODELISATION STATISTIQUES DES SEDIMENTS EN SUSPENSION.....	49
CHAPITRE I: Position du problème et analyse statistique.....	50
I.1 Introduction.....	50
I.2 Notion d'échantillonnage.....	51
I.2.1 Population et échantillon.....	51
I.2.2 Paramètre d'une population.....	52
I.2.3 Estimation par intervalles de confiances.....	53
I.3 Recueil de données.....	54
I.4 Traitement des données.....	55
I.4.1 Homogénéité et stationnarité.....	55
I.4.2 Indépendance et stationnarité.....	57
I.4.3 Détection des valeurs hors position.....	57
CHAPITRE II: Elaboration d'un modèle par approximation des données.....	59
II.1 Introduction	59
II.2 Modélisation.....	60
II.3 Modèle statistique.....	61
II.4 Avantage d'un modèle.....	61
II.5 Notion d'approximation.....	62
II.5.1 Qualité d'une approximation.....	62
II.5.2 Estimation des paramètres du modèle.....	63
II.5.3 Méthodes des moindres carrés.....	63

II.6	Validité du modèle.....	64
II.6.1	Coefficient de corrélation.....	64
II.6.2	Test de corrélation.....	65
II.7	Précision d'une corrélation.....	66
CHAPITRE III:	Régime des débits liquides.....	68
III.1	Introduction.....	68
III.2	Courbe des débits classés.....	69
III.2.1	Construction géométrique de la courbe des débits classés.....	69
III.2.2	Courbe relative à N années et probabilité d'un débit journalier.....	70
III.2.3	Débits caractéristiques.....	71
III.2.4	Les débits moyens.....	71
III.3	Estimation des lois de probabilité des variables de causes	72
III.3.1	Répartition de la statistique d'observation en classes.....	72
III.3.2	Tableau de fréquence	73
III.3.3	Courbe de fréquence des débits.....	73
III.4	Ajustement à une courbe de distribution théorique des fréquences.....	74
III.4.1	Test d'ajustement.....	75
III.5	Estimation des apports solides en suspension.....	75
CHAPITRE IV:	Organigramme d'application.....	77

CHAPITRE V: Estimation des apports solides à l'exutoire du bassin versant (TAFNA).....	85
V.1 Introduction.....	85
V.2 Données sur les sédiments	85
V.3 Données sur les débits liquides du cours d'eau.....	87
V.4 Recherche de relation entre débits solides en suspension et débits liquides.....	87
V.5 Courbe des débits classés.....	89
V.6 Estimation des apports solides en suspension.....	91
V.7 Application à l'échelle saisonnière.....	94
V.8 Interprétation des résultats.....	96
V.9 Travail futur.....	98
CONCLUSION.....	100
Annexe I: Les droites d'ajustement saisonnière.....	103
Annexe II: Les courbes des débits classés saisonnières.....	110
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	117

Pour bénéficier de l'eau des rivières et réduire la force destructive des crues, l'homme a construit des aménagements hydrauliques comme les digues et les barrages. Ces interventions humaines peuvent altérer radicalement l'équilibre dynamique atteint par l'évolution naturelle des cours d'eau et modifier par conséquent leurs profils.

Donc, le trait d'union qui existe entre le barrage et l'environnement revêt de nos jours une signification importante.

La dégradation par envasement de ces barrages, cela est du à une perturbation du transit naturel des sédiments qui sont piégés dans les eaux calmes des retenues, qu'elles comblent progressivement avec le temps. A terme, cela pose de graves problèmes pour le maintien et la préservation du potentiel hydraulique mobilisé à un prix de revient élevé.

Ce phénomène est sans aucun doute, la conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants et c'est aussi la cause principale de la réduction de la capacité des réservoirs de notre pays, ou l'eau, de part de son insuffisance et sa mauvaise répartition constitue un facteur limitant notre développement économique.

Il est intéressant de noter, que chaque année l'infrastructure hydrotechnique Algérienne, est amputée d'une capacité estimée à 20 millions de m³. Ce qui correspond à la capacité d'un barrage tel que celui de FERGOUG.

Cependant l'un des problèmes les plus importants en hydrologie reste la prévision sur les conséquences causées par les apports solides et les perspectives sur l'état d'un futur barrage, et cela pour permettre d'adopter les solutions les solutions les plus appropriées du dévasement.

Introduction

Cette prédétermination entre dans la doctrine d'établissement d'un projet d'ouvrage hydraulique.

En effet la raison principale qui justifie l'importance d'une telle étude réside dans le caractère essentiel et vital d'une infrastructure hydraulique.

Pour cela de nombreuses études sur l'érosion et ses conséquences ont été entreprises dans divers pays, mais la complexité du phénomène, son caractère irrégulier et aléatoire n'ont pas permis d'aboutir rapidement à des résultats satisfaisants.

La difficulté de cerner globalement les facteurs qui entrent en jeu et l'interdépendance de ces facteurs rendent difficile la construction de modèles théoriques rationnels et cohérents.

Pour cette effet, on a essayé d'élaborer un outil simple, facile à mettre en oeuvre et directement utilisable pour l'estimation des apports solides, à l'exutoire du bassin versant; l'avantage que représente est l'intégration du ruissellement comme le facteur principalement influençant l'érosion.

Le principale but à atteindre, avec la présente thèse est d'abord une synthèse bibliographique sur l'érosion, les transports solides dans les cours d'eau et l'envasement des barrages, puis une contribution à la modélisation statistiques des sédiments en suspension pour l'estimation des apports solides, à partir d'une corrélation établie entre débits liquides et débits solides en suspension et d'une étude du régime des débits liquides dans le cours d'eau.

PREMIERE PARTIE

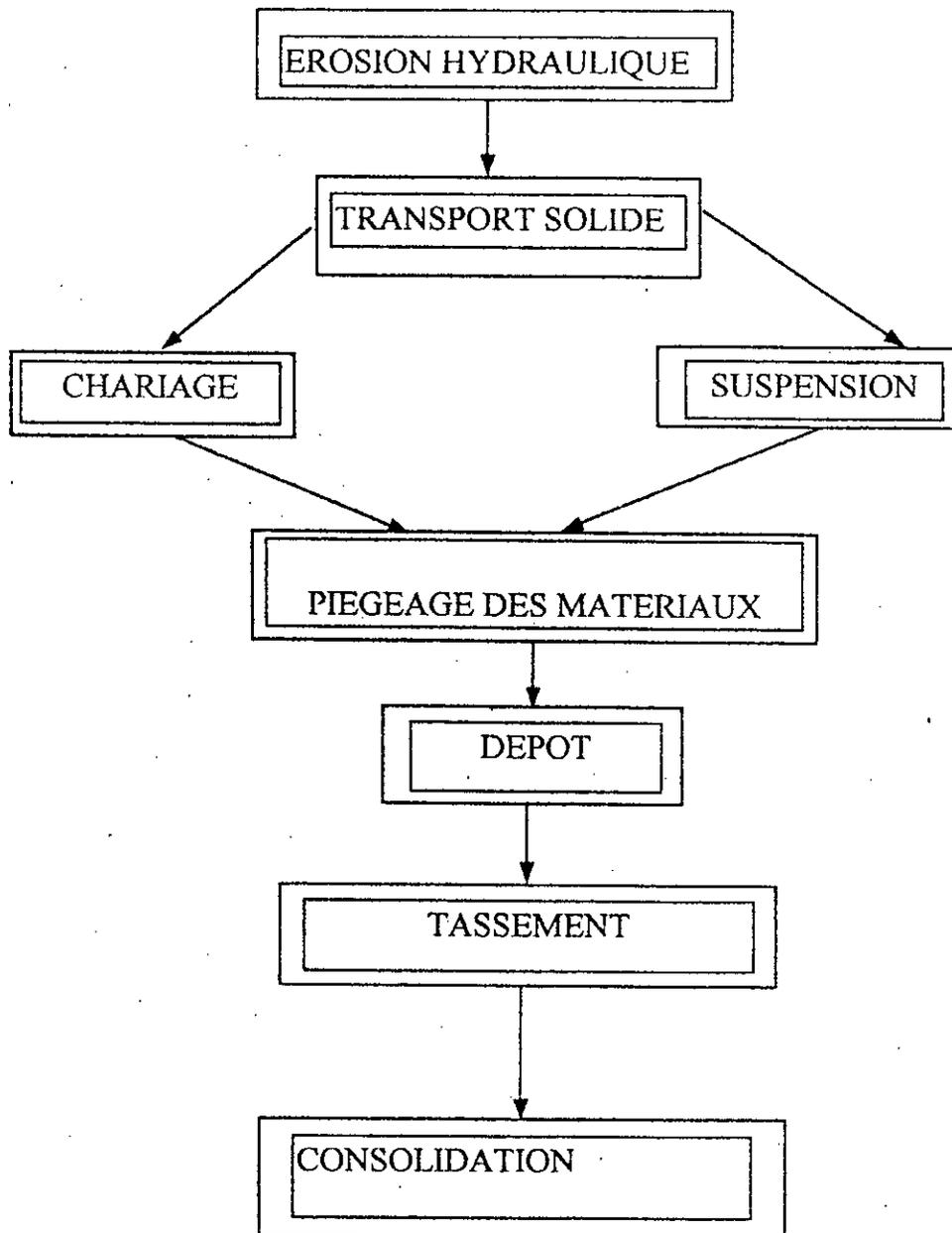
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR

LES PROBLEMES D'EROSION,

TRANSPORT SOLIDE ET SEDIMENTATION

DANS LES BASSINS VERSANTS.

PROCESSUS D'ENVASEMENT : fig 1.1



CHAPITRE IPROCESSUS D'ÉROSION DANS LES BASSINS VERSANTSI. 1. GénéralitésI. 1. 1. Les types d'érosion

L'érosion, c'est le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roche de leur position initiale par l'eau et les autres agents géologiques tels que le vent, la glace et les vagues.

Ainsi, l'érosion est un phénomène naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges. Ce phénomène est souvent désigné par les termes d'érosion géologique, l'érosion des sols et l'érosion linéaire (l'érosion des berges ou du fond du lit).

L'érosion géologique est celle qui sculpte la surface de la terre, créant les montagnes, les vallées et les plaines d'inondation, dans les conditions naturelles ou relativement plus perturbées.

L'érosion des sols est plus étroitement liée aux terres agricoles car, par définition, le sol est constitué des matériaux minéraux ou organiques, non consolidés, qui sont propres au développement des cultures.

L'érosion des réseaux de drainage, c'est l'érosion des berges et du fond des chenaux par l'écoulement.

I. 1. 2. Caractéristiques des bassins versants :

Dans un bassin fluvial ou bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leur emplacement d'origine, leur déplacement et leur dépôt dépendent de nombreuses caractéristiques du bassin.

Ces caractéristiques peuvent être soit physiques, soit hydrologiques, et sont fortement interdépendantes.

- ◊ Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influant sur l'érosion et le transport solide sont : le relief, la nature géologique, les sols, la végétation, l'occupation des terres et la morphologie du réseau de drainage.

Outre les caractéristiques d'un bassin, il y a deux zones géologiques distinctes utiles pour évaluer aussi bien l'érosion que le transport solide, ce sont les interfluves et le réseau de drainage.

- ◊ Les caractéristiques hydrologiques comprennent les facteurs climatiques : précipitations et températures qui sont importantes pour le développement d'un bon couvert végétal.

Précipitations et écoulements jouent aussi un rôle capital pour l'érosion et les transports solides. Le volume et l'intensité des précipitations jouent tout deux un rôle important dans le processus d'érosion par la suite de leur effet dans la dynamique du détachement des particules des sols sans protection.

I. 2. Les interfluves :

Les interfluves d'un bassin versant ont été définis comme tout ce qui n'est pas du réseaux de drainage. Ils représentent en général 95% ou plus de la surface totale.

Les particules de sol sont délogées par le choc des gouttes de pluie à la surface du sol avec des vitesses atteignant 9ms^{-1} . L'impact des gouttes de pluie fournit une intense force hydrodynamique au point d'impact (Mutchler Young, 1979). Une fois détachée, la particule est mise en mouvement par le rejaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol et entraînée par l'écoulement le long de la pente.

L'efficacité de ces processus est déterminée par les facteurs suivants :

I. 2. 1. Les processus d'altération :

Les altérations qui se produisent dans les interfluves conduisent éventuellement à la formation de sols. Quoique l'eau et la roche soient considérés ordinairement comme les éléments de base des phénomènes d'altération, d'autres paramètres interviennent : minéraux, éléments chimiques, matières organiques, température et relief.

L'altération peut être qualifiée de mécanique, c'est la désintégration de la roche par l'eau et le vent, ou de chimique; c'est la décomposition de la roche par l'eau par une action chimique.

I. 2. 2. Influence du climat :

Certaines influences climatiques constituent une partie du processus d'altération. Les changements de température, la hauteur de précipitation et le vent ont des effets prépondérants sur l'altération mécanique.

Pluie et écoulement sont les deux phénomènes hydrologiques qui ont le plus d'importance pour l'érosion des sols. Hauteur de pluie et formes des averses sont ensembles des facteurs clefs de l'érosion.

La pluie est essentiellement à l'origine de l'érosion par son impact sur les particules des sols qu'elle détache ainsi des matériaux de surface. Il s'ensuit par conséquent que l'intensité de la pluie est un facteur clé pour déterminer la quantité de sédiments arrachés au sol. Une fois les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement de sédiments des interfluves vers le réseau de drainage. Les autres facteurs climatiques exerçant une influence sur l'érosion des sols par la pluie et les ruissellements sont la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime des vents.

La relation établie par Langbein et Schumm (1958) entre hauteur de pluie efficace et érosion spécifique, en utilisant les résultats d'environ 100 stations de mesure des Etats-Unis, est un instrument utile pour évaluer l'érosion des sols (fig.I-1-1).

1. 2. 3. Facteurs topographiques :

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité de drainage et l'importance des vallées et des plaines d'inondation.

les fortes pentes avec un écoulement rapide sont en général à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie, des sols et de la protection de la couverture végétale.

Le relief d'un interfluve, définit par le gradient de la pente, c'est-à-dire la dénivellée entre point haut et point bas divisée par la distance en ligne droite entre ces deux points, a été utilisé par Schumm et Hadley (1961), cherchant une relation entre ce facteur et l'érosion spécifique (fig.I-1-2).

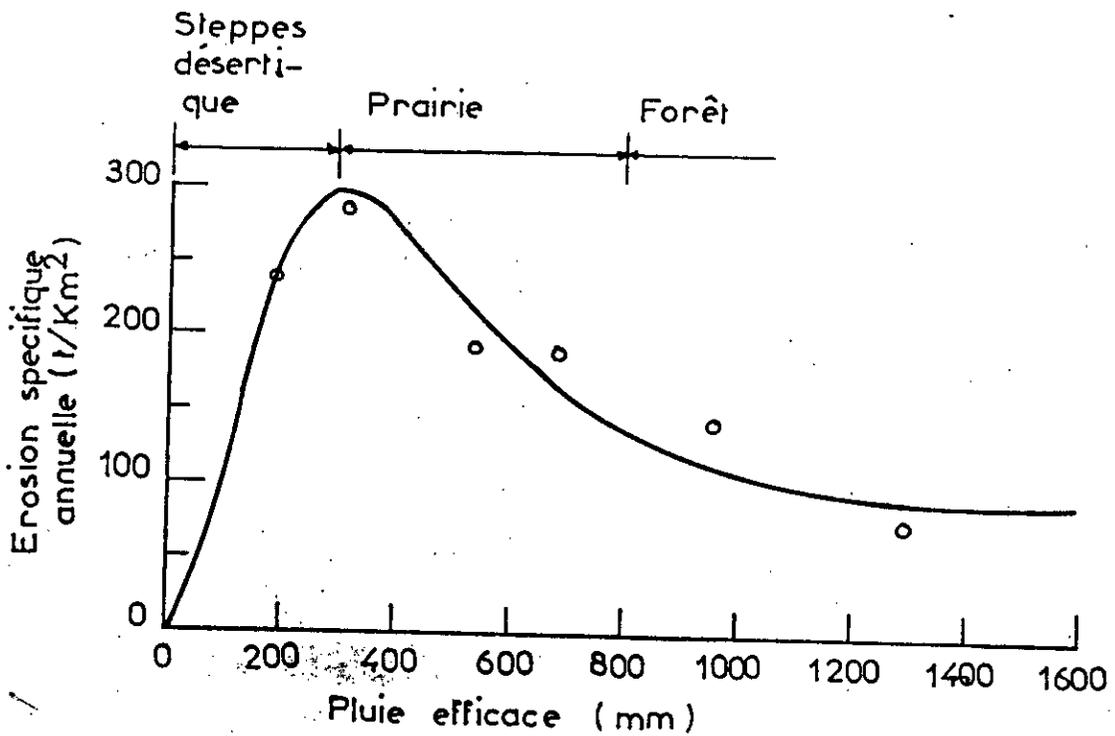


FIG I.1.1 Diagramme schématique montrant la variation de l'érosion spécifique en fonction du climat.

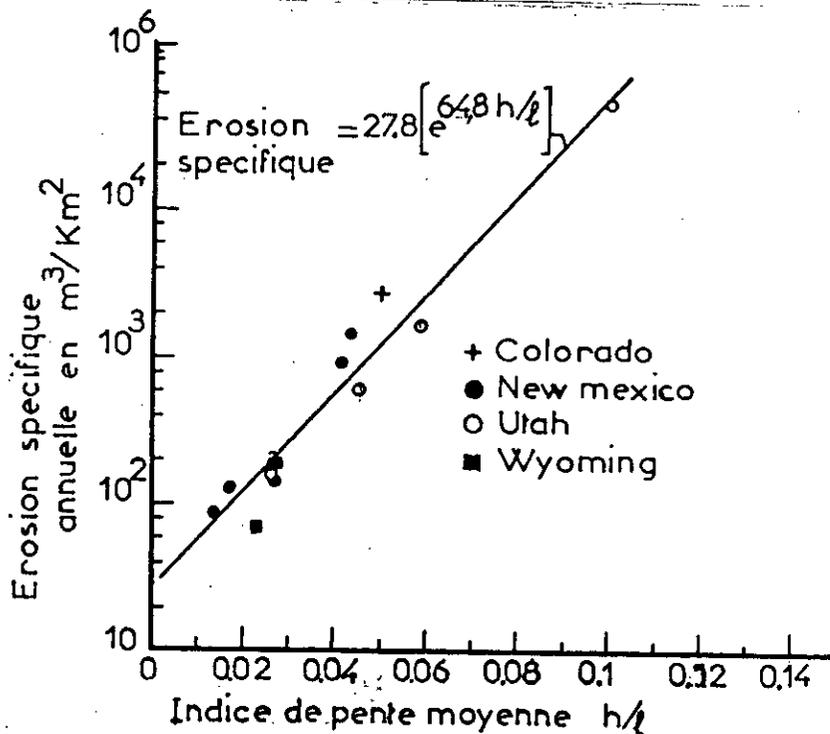


Fig I.1.2 : Exemple de relation entre l'indice de pente et l'érosion spécifique.

I. 2. 4. Facteurs géologiques :

Ce sont les facteurs géologiques relatifs aux roches de surface qui sont importants en matière d'érosion. Si les roches sont exposées à la pluie, au vent et aux forces de gravité, il peut y avoir désagrégation. Les roches les plus résistantes et les formations cohérentes produisent peu de sédiments. Les dépôts alluviaux peuvent être cités comme très érodibles.

La répartition granulométrique est une caractéristique fondamentale pour l'érosion de tous les sols.

I. 2. 5. Couvert végétal :

Un bon couvert végétal limite l'érosion en dissipant l'énergie de la pluie, favorise l'infiltration et s'oppose à toutes les formes d'érosion, que ce soit celle de l'eau, celle du vent ou celle due à la gravité.

Le couvert végétal peut être classé en trois types généraux : Végétation arbustive des zones désertiques, prairies et forêts.

La figure I-1-1 montre les relations entre ces types de végétation et la hauteur de pluie.

I. 2. 6. Occupation des terres :

L'occupation, sauf en des lieux éloignés et inhabités, est en rapport direct avec les activités humaines.

Les activités ayant la plus grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage et l'abattage du bois.

I. 3. Réseau de drainage :

Erosion, transport solide et dépôts sont des phénomènes naturels permanents dans les cours d'eau. Dans le haut des bassins, les cours d'eau sont pentus et les vitesses sont élevées, il se produit une érosion locale et un creusement général du chenal considéré. Plus à l'aval, le creusement naturel du lit s'atténue, mais les berges sont vulnérables à l'érosion.

Les différences de résistance conduisent à des modifications localisées du réseau hydrographique, les chenaux peuvent s'élargir ou se réaligner.

L'érosion dans les cours d'eau se traduira par un transport solide dans le sens de l'écoulement et éventuellement, il sera accompagné d'une déformation à grande échelle du lit.

CHAPITRE IILE TRANSPORT SOLIDEII. 1. Généralités :II. 1. 1. Transport solide :

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. L'eau trouve la puissance nécessaire par ce transport dans la perte de charge qu'elle subit, ensuite, elle met en jeu deux types de mécanismes : le charriage et la suspension, qui sont les deux types principaux du transport solide.

La répartition entre ces deux types de mécanisme dépend essentiellement de la dimension des matériaux, rapportés à la vitesse de l'eau et à la turbulence de l'écoulement.

En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant.

II. 1. 2. Ecoulement turbulent :

La couche limite est caractérisée par de forts gradients de vitesse, jouant un rôle dominant dans la création de la turbulence.

Ainsi, un écoulement est turbulent lorsque les caractéristiques: vitesse, pression et température peuvent être décrites par des fonctions aléatoires du temps et de l'espace pour lesquelles on peut définir des valeurs moyennes.

Il peut être modéliser par un courant moyen horizontal permanent et des fluctuations de vitesse tridimensionnelles : u' , v' et w' .

La turbulence de l'écoulement est le moteur du transport solide. Sur le fond du lit, elle est responsable du départ des particules qui se produit lorsque les fluctuations de la force tractrice dépassent un certain seuil. Ces particules peuvent être charriées sous l'action des fluctuations turbulentes lesquelles, sont dans ce cas particulièrement complexes à décrire puisqu'à proximité d'une paroi poreuse rugueuse et irrégulière.

Ces fluctuations turbulentes sont également responsables du maintien des matières en suspension quand elles sont comparables aux effets de gravité. Ainsi, du fait de la turbulence, l'interaction locale liquide-solide a un caractère aléatoire.

II. 2. Transport par charriage :

II. 2. 1. Généralités :

Le transport par charriage est l'un des principaux types du transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les plus gros éléments qui contribuent à la formation et à l'équilibre du lit, principalement la pente.

Ces éléments sont transportés sur le fond par roulement, glissement et par sauterie. La direction du mouvement est un gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles.

Il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond mais Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées :

- 1- Il y a un échange de particules permanent et intense entre la charge de fond en mouvement et le lit.
- 2- La charge de fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait par à-coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.
- 3- Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité de transport solide et de la composition des sédiments.
- 4- Les vitesses de déplacement des différentes particules individuelles varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.

II. 2. 2. Description du phénomène :

Sur un lit de matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrodynamiques.

- ◇ Les forces de pesanteur, sont des forces stabilisatrices ou capacité de résistance à l'entraînement.
- ◇ Les forces hydrodynamiques sont des forces déstabilisatrices (traînée et portance), dues à l'écoulement.

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique « τ_c ».

Donc les grains constituant l'interface solide -liquide ayant un poids et un coefficient de frottement fini, ils ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond « τ » dépasse la valeur « τ_c ». Ce mouvement de granulats se traduira par un transport solide sur le fond dans le sens de l'écoulement.

La contrainte sur le fond de la rivière s'exprime par

$$\tau = \rho g R J$$

ou J est la pente de charge régulière de l'écoulement et R représente le rayon hydraulique de la rivière.

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil, et l'analyse très simplifiée pour le début du mouvement revient à comparer directement la force déstabilisatrice due à l'écoulement, à la capacité de résistance au mouvement des matériaux qui tapissent le fond du lit.

II. 2. 3. Pavage de fond :

Dans les rivières naturelles, avec un fond constitué de matériaux caractérisés par une grande dispersion granulométrique, les grains les plus petits peuvent être déplacés pour une certaine vitesse du courant, tandis que les plus gros sont moins facilement emportés, ils sont arrangés en couche d'une épaisseur réduite, protègent les couches inférieures des sédiments. Cette couche de surface a un effet protecteur sur les couches sous-jacentes. On désigne ce phénomène par le terme de « Pavage du lit ».

Au cours de ce pavage, le courant liquide va avoir tendance à se charger de matériaux correspondant aux granulométries dont le débit critique d'entraînement est dépassé, mais en laissant sur place les plus gros qui vont constituer une couche protectrice qui arrêtera l'érosion.

Lorsque le pavage est terminé, le transport solide s'interrompt

Il reste que le pavage du lit est un phénomène complexe qui dépend aussi bien du débit et de la profondeur que de la forme du lit et de sa composition granulométrique.

II. 3. Transport par suspension :

II. 3. 1. généralités :

Le transport par suspension est le deuxième type du transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins, qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide.

Ces éléments fins du transport solide sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des quantités d'éléments fins, qui proviennent de l'érosion des bassins versants, due au ruissellement des eaux de pluie.

II. 3. 2. Description du phénomène :

La suspension, c'est-à-dire le maintien des particules en mouvement à une certaine distance au-dessus du fond, est un phénomène dû uniquement à la turbulence de l'écoulement.

Les étapes composant ce mode de transport sont :

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche turbulente s'accroissent également. On arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire bien définie; au lieu de cela, elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Donc la condition fondamentale de maintien des particules en suspension est par conséquent la production d'énergie turbulente dans le liquide. Les fluctuations transmettent cette énergie aux particules en empêchant aussi leur mouvement vers le fond.

Une formule donnée par W. Kresser, définit le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consistent à définir la vitesse « U » d'écoulement du liquide pour lequel la poussée du liquide sur les grains de diamètre « D » permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans les écoulements naturels en rivière.

Ce critère correspond à la formule :

$$U^2 = 360.g.D$$

Mais on peut la mettre aussi sous la forme :

$$\tau = 360. (\gamma.g / C^2).D.$$

En désignant par « τ » la tension tangentielle de l'écoulement qui correspond à l'apparition des phénomènes de suspension, par « γ » le poids volumique du liquide et par « C » le coefficient de Chezy :

$$\text{puisque on a : } U = C.(h.J)^{1/2} \quad \tau = \gamma.h.J.$$

En désignant par « h » la hauteur du liquide qui s'écoule et par « J » la perte de charge régulière (pente de la ligne d'énergie).

II.4. SEPARATION ENTRE CHARIAGE ET SUSPENSION :

La répartition d'un matériau de granulométrie donnée entre transport en suspension et chariage, dépend d'ailleurs étroitement des caractéristiques de l'écoulement qui le supporte : un même matériau peut être en suspension si la turbulence est forte, ou en chariage si elle est faible.

On dit par contre qu'il y a saltation quand il y a une suite d'envols et de retombées successives. Donc les particules en saltation peuvent faire partie alternativement de la charge en suspension et de la charge de fond.

Il est clair que la distinction entre ces deux types n'est pas si abrupte, et une frange intermédiaire possède à la fois les deux phénomènes: rien n'est complètement tranché encore dans ces mécanismes qui sont très complexes.

Mais cette distinction est commode intellectuellement et surtout techniquement. d'ailleurs au niveau de la mesure, ces deux modes de transport sont dissociés : le débit de chariage est mesuré par piégeage alors que la concentration en matière de suspension est obtenue par prélèvement d'eau.

CHAPITRE IIIALLUVIONNEMENT DES RETENUESIII. 1. Généralités :III. 1. 1. Modification artificielle :

Laissées à leurs cours naturels les rivières transportent progressivement jusqu'à la mer , des quantités importantes de sédiments arrachés aux versants par ruissellement des eaux de pluie.

En aménageant ces cours d'eau par la construction de barrages on modifie le transit naturel de ces sédiments qu'on piège dans les eaux calmes des retenues qu'elles comblent progressivement avec le temps . A terme , cela pose de graves problèmes pour le maintien et la préservation du potentiel hydraulique mobilisé à un prix de revient élevé .

III. 1. 2. Apport solides aux retenues:

Les sédiments des cours d'eau sont transportés sous forme de charriage et en suspension .

A l'entrée d'une retenue , le transport de ces derniers diminue par suite de la chute brutale de la vitesse du cours d'eau ; les plus grossiers s'y déposent immédiatement , quand aux éléments fins , plus légers, ils continuent leur trajet en suspension jusqu'à se déposer en eaux mortes ou` ils se décantent lentement .

Cette décantation s'effectue là ou` en général les vitesses deviennent nulles, soit dans les sections mouillées les plus larges au pied amont du barrage . L'intensité de ces

phénomènes varie beaucoup avec l'environnement général; l'hydrologie , le couvert végétale , le degré d'altération des roches ,le réseau hydrographique alimentant la retenue ,...

Aussi les caractéristiques des dépôts solides varient d'une retenue à une autre . Les dépôts peuvent avoir un caractère permanent ou ,dans certain cas , du fait de débits de crue élevé et un niveau bas de la retenue, ils peuvent progresser dans celle-ci .

III. 2. Mécanismes de l'envasement:

La construction d'un barrage modifie les conditions d'écoulement du débit solide , aussi bien pour le transport en charriage que pour le transport en suspension .

III. 2. 1. Comportement des sédiments grossiers :

Les matériaux transportés par charriage en tête de la retenue , c'est à dire, vers l'extrémité , en amont de la courbe de remous (fig.I.3.1) , sous la forme d'un delta . Ils progressent vers le barrage au fur à mesure des apports .

III. 2. 2. Comportement des sédiments fins :

Ces matériaux transportés en suspension se déposent au fond de la retenue à l'aval du remous solide . Le dépôt a lieu soit par décantation sur place , soit après transport dans la retenue par les courants de densités .

Beaucoup d'auteurs ont étudié ce phénomène , on peut en citer le principal , DUQUENNOIS qui distingue ces deux comportements en fonction du régime de l'écoulement amont :

1-S'il est torrentiel : les eaux chargées plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité (fig.1.3.2).

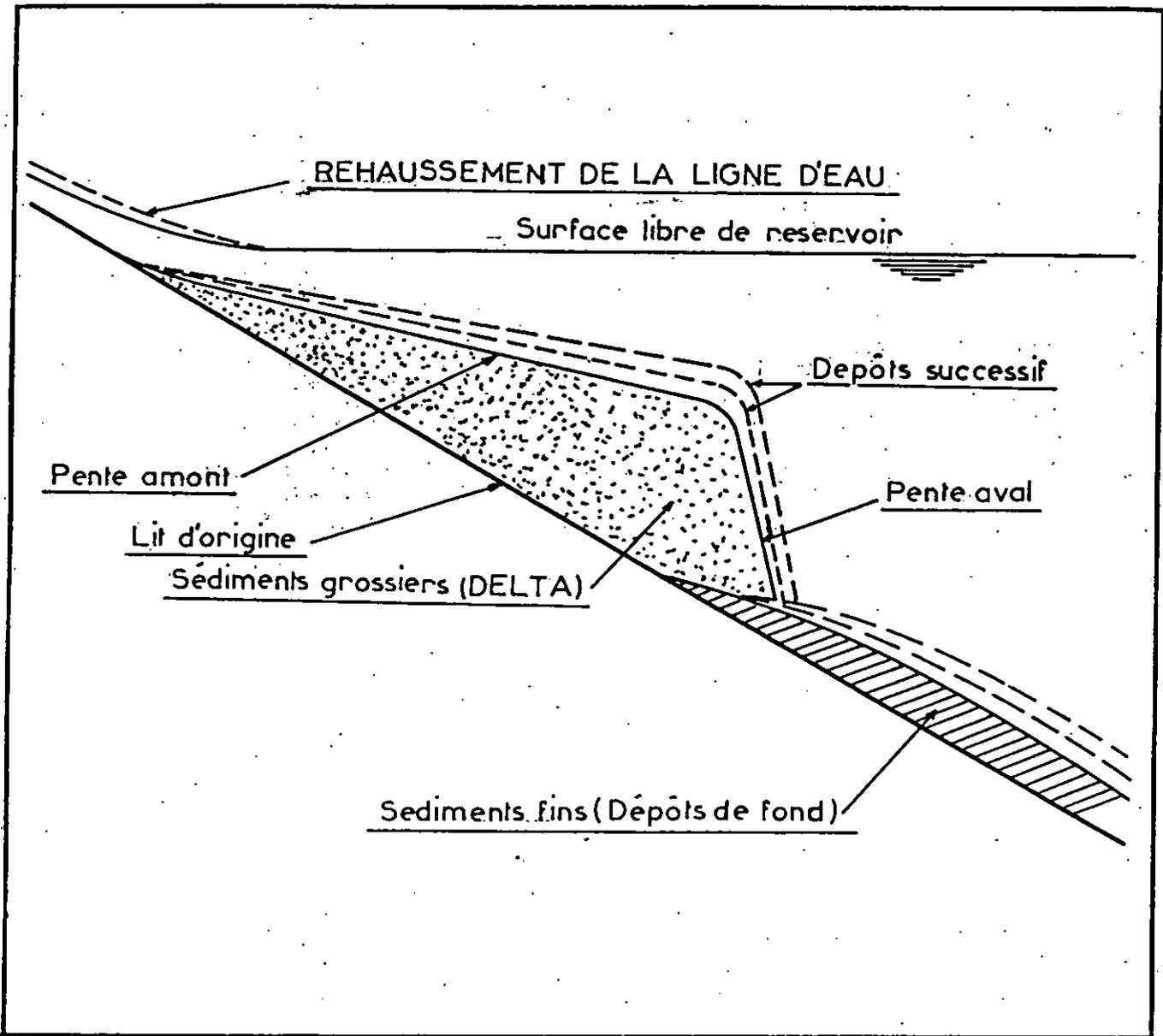


FIG.1.3.1 COMPORTEMENT DES SEDIMENTS GROSSIERS.

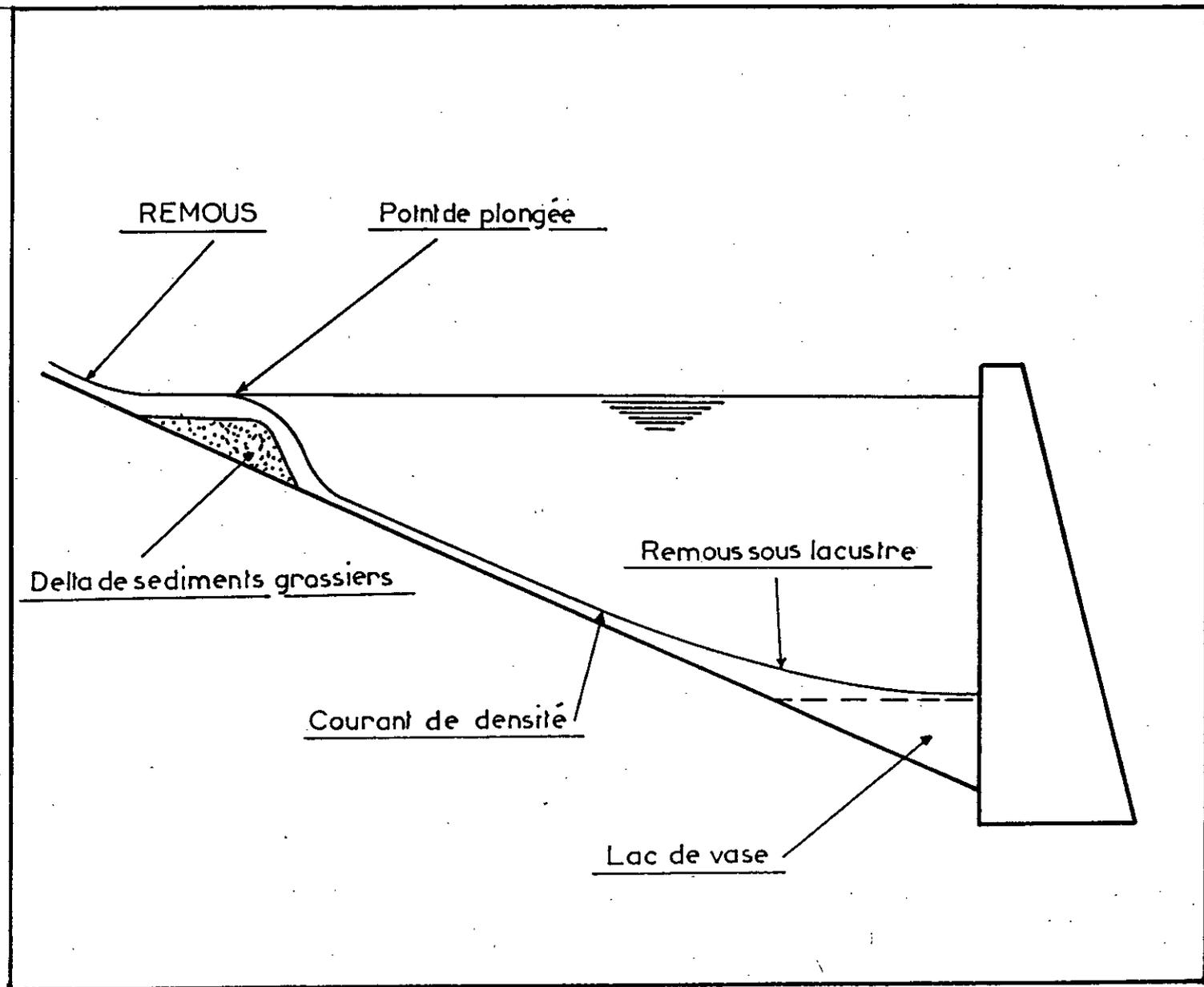


FIG.3.2 COMPORTEMENT DES SEDIMENTS FINS.

Ce courant se présente en général, comme un écoulement plus ou moins individualisé et d'une eau de densité légèrement différente de celle qui l'entoure.

2-S'il est fluvial : il ne se forme de courant de densité que pour des débits et concentrations dont les apports sont suffisamment élevés. Si ce n'est pas le cas et qu'il y'ai un écart de température entre les apports et les eaux calmes de la retenue, il se forme, un courant de densité qui peut s'écouler au fond de la retenue et transporter les vases jusqu'au pied du barrage. Elles s'y accumulent en l'absence du soutirage de fond en formant un lac de vase dans lequel les particules se sédimentent et se consolident.

Si les températures entre les apports et les eaux calmes du lac sont voisines, le courant de densité ne se forme pas et les sédiments fins sont tributaires de la gravité, de la turbulence et des écoulements dans la retenue.

Les particules argileuses ont une vitesse de chute très faible, qui les empêcherait de se sédimenter. Cependant la salinité des eaux lacustres est suffisante (0,5 g/l) pour produire la floculation de ces particules. Les flocons ainsi formés ont une vitesse de chute beaucoup plus importante (0,1 mm/s).

Une fois déposées au fond, les vases sont susceptibles de former des coulées boueuses vers les parties les plus basses de la retenue. lorsqu'elles sont stabilisées et en absence de mouvements dans la retenue, les dépôts se consolident en se débarrassant de leurs eaux interstitielles.

III. 3. Influence des différentes caractéristiques de la retenue sur l'envasement:

En raison de la variété des types de retenues, il existe plusieurs facteurs qui modifient la présentation donnée par DUQUENNOIS, dont les principaux sont :

a) Influence de la topographie de la retenue :

La topographie de la retenue modifie l'envasement en modifiant les conditions de l'écoulement des courants . Cet effet est peu étudié et difficile à quantifier mais déterminant pour la localisation des dépôts ,tels que :

- Une forme tortueuse de la retenue pousse les sédiments vers l'amont .
- Un élargissement des vallées est le siège de dépôt et de disparition des courants de densités.
- Les méandres créent des zones d'eaux calmes qui favorisent les dépôts .

b) Influence du taux de renouvellement de la retenue :

Le taux de renouvellement de la retenue (rapport : capacité/apport liquide annuel) a une grande importance pour le mécanisme de l'envasement ; il détermine le pourcentage des sédiments entrants dans la retenues et piégés ,« efficacité de piégeage». G.Brune a étudié cela sur 44 réservoirs américains.

c) influence du mode d'exploitation du réservoir :

Un marnage important peut avoir deux effets :

- D'une part , la remise en mouvement de sédiment dans la partie découverte de la retenue , ou` la rivière va en général retrouver son lit d'origine et creuser son chenal parmi les sédiments précédemment déposés , de plus des talus glissent du fait de l'érosion progressive due au rétablissement du cours d'eau .
- D'autre part , dans la partie de la retenue restant immergée , la baisse des pressions interstitielles provoque des ruptures d'équilibre des sédiments déposés qui

peuvent se manifester par des coulées boueuses ou des glissements de talus selon leur état de consolidation .

Ainsi , l'exploitation de la retenue à un niveau bas déplace l'alluvionnement vers l'aval . Ceci explique que dans la pratique on n'observe pas toujours un classement granulométrique régulier en fonction de la distance du barrage .

d) influence de présence d'affluents :

Des affluents se jetant dans la retenue perturbent le mécanisme classique de l'envasement , surtout s'ils sont eux-mêmes chargés en sédiments .

e) Influence de la présence de végétation :

La végétation existant au fond de la retenue peut retenir une grande partie des sédiments et empêche probablement le maintien de tout courant de densité en raison de la rugosité ainsi créée . De plus elle accélère la consolidation des argiles par le drainage naturel .

III. 4. Effet de l'alluvionnement des retenues :

Les principaux facteurs dont dépend l'alluvionnement des retenues , à savoir ; les apports solide , le temps de retention de ces apports , la densité des dépôts , le volume des sédiments déposés , réduisent la capacité de stockage disponible et affectent la durée de vie de la retenue . Ce qui pose un problème supplémentaire aux ingénieurs chargés des approvisionnements en eau , qui comptent sur la capacité des réservoirs pour la stocker pendant le cycle pluviométrique annuel .

Aussi , ce problème a des effets appréciables sur la rentabilité des schémas d'aménagement proposés . En effet , des eaux très chargées en matériaux solides com-

promettent le bon fonctionnement des prises d'eau , des réseaux d'irrigation , des ouvrages hydroélectriques ...

Ainsi , le phénomène d'envasement des retenues est , sans aucun doute , la conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants et c'est aussi la cause principale de la réduction de la capacité des réservoirs de notre pays , ou l'eau , de part son insuffisance et sa mauvaise répartition , constitue un facteur limitant notre développement économique .

III. 5. Maîtrise de l'alluvionnement des retenues :

Parmi les procédés de lutte contre l'alluvionnement des réservoirs , sont schématiquement préconisés deux aspects : Prévention et dévasement .

Le premier aspect consiste à empêcher l'arrivée de sédiments dans la retenue , il s'agit d'agir à la source même du débit , en diminuant l'action du ruissellement par le reboisement du bassin versant et la plantation de banquettes (voir le chapitre V) : Le second aspect utilisé est , d'une part , l'évacuation des sédiments par vidange de fond et l'emploi des courants de densité par soutirage sélectif et d'autre part , le dévasement par moyen mécanique . Ce dernier est plus fréquemment utilisé , notamment lorsque les consignes d'exploitation interdisent toute perte d'eau . Son application à un type de barrage déterminé nécessite une connaissance approfondie du comportement des sédiments fins dans le mécanisme de l'envasement . Ce dernier reste en fait l'une des études les plus complexes en raison de la multiplicité des types de retenues et les principaux facteurs qui peuvent influencer sur l'envasement .

CHAPITRE IVPREVISION DES APPORTS SOLIDESIV. 1. Introduction :

L'érosion et le transport solide sont partout présent mais méconnu .Ils sont responsable de phénomènes de très grande ampleur en milieu naturel :

- Défertisation des terres de culture ;
- Envasement des retenues de barrage , des ouvrages de prise et des canaux d'irrigation entraînant la diminution des potentialités hydrauliques ;
- Ensablement des ports ;
- Rehaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation .

IV. 2. ampleur d'érosion en Algérie :

En Algérie septentrionale , les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socio-économiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène d'érosion et du transport solide .

Le taux d'érosion spécifique atteint par les pays de l'Afrique du nord , les valeurs les plus importantes du monde , voir tableau I.4.1 .

Les travaux de DEMMAK (1982) sur l'érosion et le transport solide , ont montré que le taux d'érosion spécifique , atteint au nord Algérien les valeurs les plus élevées du Maghreb dépassant $2000\text{t/Km}^2/\text{an}$, sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Télien (Rhiou , Sly , Fodda , Mazfran , Isser , Soumam ...). Il atteint $4000\text{t/Km}^2/\text{an}$ sur la chaîne des côtiers de Dahra .

L'intensité du phénomène se manifeste essentiellement en périodes de crues . C'est ainsi que les fortes crues de mars 1974 d'une durée de trois jours , ont drainé 30 million de tonnes de sédiments dans la région Algéroise pour les bassins versants côtiers.

La quantité moyenne annuelle du sol érodé en Algérie est environs de 180 millions de tonnes . Une quantité importante de ces sédiments est transportée progressivement à travers le réseau hydrographique jusqu'au retenues . Ces matériaux seront piégés dans les eaux calmes de ces dernières , diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau .

A titre d'informations , la capacité des retenues Algériennes est tombée durant la période de 1940 à 1980 de 1160 à 560 millions de m^3 . Par exemple le bassin versant de l'Oued Chellif ou encore le barrage de Gherib dont la capacité initiale qui était de 280 millions de m^3 en 1939 s'est retrouvée à 150 millions de m^3 en 1977 et seulement 120 millions de m^3 en 1980 ce qui montre une perte de 30 millions de m^3 en trois années .

Il en est de même pour le barrage de l'Oued Fodda dont la capacité initiale était de 228 millions de m^3 en 1932 est descendue à 109 millions de m^3 en 1977.

En fait , la majorité des barrages Algériens ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'années , on note au passage que la durée de vie d'un barrage est la période durant laquelle sa capacité est supérieur à sa capacité initiale de 50% .

Il est rare cependant , que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, abandonner un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit d'un réservoir destiné à l'alimentation en eau potable ou à l'irrigation , dont les intérêts socio-économique justifient une garantie de service illimité.

Tableau I.4.1

Pays	Rivière	Bassin versant Km ²	Volume spécifique moyen de transport solide (t/Km ² /an)	Précipitation moyenne annuelle (mm)
Chine	<i>Jaune</i>	<i>715000</i>	<i>2640</i>	<i>470</i>
	<i>Yang</i>	<i>1025000</i>	<i>491</i>	<i>800</i>
	<i>King</i>	<i>57000</i>	<i>7190</i>	
Inde	<i>Damodar</i>	<i>200000</i>	<i>1400</i>	<i>1200</i>
	<i>Kosi</i>	<i>61000</i>	<i>2800</i>	<i>1800</i>
	<i>Mohunadi</i>	<i>132000</i>	<i>465</i>	<i>1380</i>
Iran	<i>Sefid rud</i>	<i>55000</i>	<i>750</i>	
soudan	<i>Abbara</i>	<i>1000000</i>	<i>650</i>	
afrique du nord	<i>Agrioum</i>	<i>657</i>	<i>3400</i>	<i>760</i>
	<i>Sebou</i>	<i>3470</i>	<i>320</i>	<i>660</i>
U.S.A.	<i>Colorado</i>	<i>35000</i>	<i>735</i>	
	<i>Mississippi</i>	<i>2977000</i>	<i>50</i>	
Italie	<i>P6</i>	<i>53500</i>	<i>300</i>	<i>1100</i>
France	<i>Isère</i>	<i>11750</i>	<i>615</i>	<i>1100</i>
	<i>Eroc</i>	<i>990</i>	<i>700</i>	<i>1400</i>
	<i>Durance</i>	<i>3580</i>	<i>150</i>	<i>200</i>

Ainsi une compréhension des mécanismes de l'érosion et de transport solide s'avère indispensable pour une bonne prévision de l'état future des retenues.

IV. 3. Différentes méthodes de prévision des apports solides:

La détermination quantitative des modifications au niveau des bassins versants exige la mise en oeuvre d'un programme détaillé pour : recueillir les données de bases ; choisir les méthodes nécessaires , aussi bien à l'analyse des phénomènes qu'à la prédiction des modifications futures .

Donc la mise au point de méthodes pour l'évolution du transport solide demeure l'objectif fondamental de la recherche de sédimentologie .

Actuellement , plusieurs méthodes sont utilisées pour prévoir les apports solides aux retenues . la plupart d'entre elles se fondent , soit directement , soit indirectement sur les résultats des mesures , par prélèvement d'échantillons ou sur les levées topographiques des retenues . Ces méthodes sont de trois types différentes , par fois combinées :

- 1- Méthodes empiriques .
- 2- Application des équations du transport solide ;
- 3- Méthodes par modélisation .

IV. 3. 1. Méthodes empiriques :

Ces méthodes très utilisées , faibles dans de nombreux cas , consistent à prévoir les apports de sédiments à partir des relations empiriques découlant des mesures directes , établies au sein du système rivière-réservoir :

- Soit , par la collecte des échantillons de débits solides en suspension et au fond nécessaires pour déterminer le transport solide total à une station de mesure .

- Soit , par des levées topographiques des retenues existantes ceux qui par comparaison avec les initiaux , donnent le volume de sédiments accumulés .

On utilise alors les données sur les apports de sédiments obtenues de l'une ou de l'autre façon pour fournir une information sur le transport de sédiments , soit d'un bassin versant déterminé soit par extrapolation , de zones ayant des caractéristiques relatives à la production des sédiments proches de celles du bassin fournissant les données ci-dessus .

Dans bien des cas ,on peut en faire une étude statistique pour établir des méthodes empiriques en vue de prévisions plus générales .

IV. 3. 2. Application des équations du transport solide :

On utilise de nombreuses formules de transport solide pour estimer approximativement le taux d'apports solides .

Toutes donnent une évaluation du débit solide total ou du débit solide de charriage dans les conditions d'écoulement bien précis .

Les équations prédisant les changements dus aux forces érosives sont très généralement désignées par l'expression « équation de transport de fond » . La plus ancienne d'entre elles, est celle de BOYS (1879) , suivie par les équations de nombreux chercheurs dont une , développée par EINSTEIN (1950) parmi celles qui font le plus appel aux méthodes de statistiques .

Pour la prévision à l'aide de formules de transport solide il faut disposer des données de terrain sur l'hydraulique du chenal et matériaux du lit , qui sont facteurs primordiaux .

Le type de données disponibles sont très souvent déterminant pour choisir une équation convenable .

La difficulté essentielle pour l'ingénieur sera donc la sélection d'un petit nombre de formules et d'adapter la moyenne des résultats en écartant même certaines valeurs qui apparaissent excessives .

Alors que beaucoup de chercheurs estiment que ces formules n'ont qu'un usage limité quelqu'en soit leur justification physiques , elles restent imprécises .

La seule façon d'apprécier la validité des formules est de comparer leur résultats à des mesures directes du débit solide faites en nature .

IV. 3. 3. Méthodes par modélisation :

Deux sortes de modèles peuvent être distingués : mathématiques et physiques .

- Le modèle mathématique : L'ordinateur grâce à ses possibilités de calcul automatique à grandes vitesses , donne le moyen de simuler les processus physiques par « modélisation mathématique » . Toute fois , l'utilisation de la modélisation mathématique pour le calcul de l'érosion de sol et des transports solides reste limitée , cela vient de la complexité du problème de la définition du transport des sédiments à la surface d'un sol et de la complexité de quelques solutions numériques . car à la base de tout modèle mathématiques, il y' a un programme de fonctionnement , ce programme est fondé sur les équations hydrodynamiques .

Reste l'objectif recherché par la modélisation mathématique de l'érosion des sols ,est de donner la quantité de sédiments provenant d'un bassin versant en un temps donné ainsi que sa composition . Dans ce modèle mathématique on peut faire varier les conditions climatiques du modèle ainsi que les facteurs d'érodibilité.

- Le modèle physique : Le modèle réduit est encore un outil pour simuler les processus physiques . La nécessité d'employer un modèle réduit résulte en générale d'une difficulté qu'on ne peut résoudre à l'aide des formules mathématiques de la mécanique des fluides ou des transports solides .

Mais le modèle physique reste coûteux devant le modèle mathématique. Et la transposition des résultats à la nature nécessite le respect des règles de similitudes qui peuvent limiter les possibilités d'études sur ces modèles.

Alors la simulation de l'évolution du profil d'un système rivière-réservoir des points de vue physique et mathématiques est une tâche nécessaire , mais délicate . L'aspect principal auquel un modèle physique ou mathématique doit répondre est de présenter , avec le plus de précision possible , la physique des phénomènes intervenants dans l'écoulement diphasique (liquide-solide) .

IV. 4. Modèles de quantification en Algérie :

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

IV. 4. 1. Modèle de TIXERONT :

Ce modèle est basé sur les corrélations établies entre l'apport moyen annuel liquide (A) et l'apport annuel moyen solide, à partir de données d'observations des oueds Algériens et Tunisiens:

$$Q_s = a \cdot A^b \text{ (tonnes/Km}^2\text{/an)} \quad \text{avec } b = 0,15.$$

A: Lamé d'eau ruisselé en mm/an

a: coefficient empirique qui varie en fonction de la perméabilité du terrain, il varie de 8,5 à 3200.

Pérmeabilité élevée	:	$8,5 < a < 74$.
Pérmeabilité moyenne	:	$75 < a < 349$.
Pérmeabilité moyenne à faible	:	$350 < a < 1399$.
Pérmeabilité faible	:	$1400 < a < 3199$.
Impérmeables	:	$a > 3200$.

IV. 4. 2. Modèle de SOGRÉAH :

Ce modèle est calqué sur la relation de TIXERONT, l'apport moyen étant remplacé par le ruissellement de crue (R):

$$Q_s = a.R^b \text{ (tonnes/Km}^2\text{/an)}$$

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

CHAPITRE VMETHODES DE DEFENSE CONTRE L'EROSION ET LA
SEDIMENTATIONV. 1. Introduction:

L'érosion accélérée et le dépôt de sédiments posent souvent de sérieux problèmes et sont la cause de modifications de l'environnement dans les bassins versants, à savoir, la destruction du couvert végétal et l'érosion des sols.

Du fait que l'érosion des sols est étroitement corrélée avec le ruissellement, la maîtrise de ce dernier est particulièrement importante .

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation, reposent sur l'étude de leur nature et de leur évolution .

Le but des dispositifs de défense est de réduire ou d'éliminer les effets négatifs des processus observés .

V. 2. Les interfluves:

Les moyens de lutte contre l'érosion dans les interfluves peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- 1- Procédés agrotechnique;
- 2-Réstauration des forêts ;
- 3- Procédés hydrotechniques ;

V. 2. 1. Procédés agrotechniques:

Un des procédés agrotechnique les plus efficaces est le choix des cultures adaptées, en tenant compte de leur capacité à protéger le sol.

Les herbes pérennes protègent de l'érosion et forment une couche fixant le sol, restaurent sa structure améliorant la capacité d'absorption et réduisant l'érodibilité.

Une autre méthode de protection consiste à cultiver selon les directions perpendiculaires à l'écoulement, parallèlement aux courbes de niveau.

V. 2. 2. Restauration des forêts:

Lorsque la reforestation est possible, c'est un moyen efficace de conservation des sols. Les différents types de plantations ci-après sont particulièrement importants:

1- Ceinture forestière sur les terres agricoles pour régulariser le ruissellement, améliorer l'infiltration et protéger l'érosion éolienne.

2- Bandes de forêts et bouquets d'arbres à l'intérieur du réseau hydrographique (dessin des chenaux d'écoulements) le long des ravines pentues et des vallées soumises à une forte érosion.

Les ceintures forestières protègent les sols de différentes façons . Elles réduisent la vitesse du vent et améliorent le micro-climat. Les ceintures forestières sont très efficaces lorsqu'elles sont plantés en lignes perpendiculaires au ruissellement (le long des courbes de niveau), l'écoulement peut alors être dispersé et l'infiltration favorisée .

Cependant, une mauvaise disposition des ceintures forestières peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation de nouvelles régoles.

V. 2. 3. Procédés hydrotechniques:

Les procédés hydrotechnique de protection comportent certains types de structures et ne sont utilisés que si cela se justifie économiquement, ou si d'autres procédés sont révélés non efficaces.

Ces procédés comprenant les fossés d'infiltration, les barrages de rétention avec de grandes surfaces de retenues, des terrasses le long des courbes de niveau, etc...

V. 3. Les cours d'eau:

L'érosion du réseau hydrographique est souvent la cause de difficultés et de pertes financières. Aussi est t-il nécessaire de rechercher les moyens de protection contre l'érosion.

Il n'y a pas de méthodes universelles et l'on doit tenir compte de nombreux facteurs, notamment du prix et de la disponibilité surplace des matériaux de construction ainsi que risques encourus. Nous avons retenu ici comme critère de classification la fonction des ouvrages.

V. 3. 1. Revêtement des berges :

Le mode de protection des berges, le plus courant est la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion comme les enrochements, le béton, végétation naturelle, etc..., et disposé directement sur le talus de la berge.

V. 3. 2. Freinage de l'écoulement:

On peut obtenir un freinage de l'écoulement, en mettent en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution, locale de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables, le dépôt des sédiments et la croissance de végétation le long des berges.

V. 3. 3. Aménagement hydraulique:

Les barrages et autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant la maîtrise de débits très élevés sous une forte charge.

On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour dissiper l'énergie des écoulements à grande vitesse et pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage.

On utilise couramment les dispositifs suivants:

1- Bassin de dissipation.

2- Sauts de ski.

DEUXIEME PARTIE

CONTRIBUTION A LA MODELISATION

STATISTIQUES DES TRANSPORTS

SOLIDES EN SUSPENSION .

CHAPITRE IPOSITION DU PROBLEMEET ANALYSE STATISTIQUE .I. 1. Introduction :

Les premières mesures systématiques et standardisées des transports solides en suspension ont débuté en 1946 à la station hydrométrique de TRAILLE qui contrôle le haut bassin de l'oued ISSER.

Par la suite , au fur et à mesure de l'équipement des stations, ces mesures ont été étendues à une trentaine de stations sur les bassins des côtières CONSTANTINOIS, SEYBOUSES, côtières ALGEROIS, CHELIFF, TAFNA, MACTA, HODNA, SOUMMAM.

Après une interruption d'une dizaine d'années , ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrométrique national.

Un nombre important de données sur les transports en suspension ont ainsi été accumulées durant la période 70/90, qui nous a permis d'entreprendre une étude générale sur l'érosion, les écoulements solides et l'envasement des barrages.

Le principal but à atteindre avec la présente étude est l'exploitation de cet important nombre de données des cours d'eau pour l'estimation de la masse des sédiments en suspension transportés au cours du temps.

Une démarche générale a été conçue pour cela, elle comporte les actions suivantes:

- * Collectes des données contribuant au phénomène à étudier.
- * Un traitement statistique et informatique de ces données.
- * Une fois le traitement et la filtration de ces données sont achevés, l'information doit être représentée par un modèle adéquat présentant le lien entre les variables causes (débits liquides) et les variables conséquences (débits solides en suspension).
- * Etude du régime des débits liquides du cours d'eau par une analyse fréquentielle.
- * Enfin une estimation de la masse des sédiments en suspension transportés par combinaison entre le modèle des sédiments en suspension et la courbe de fréquences cumulées des débits liquides.

I. 2. Notion d'échantillonnage :

I. 2. 1. Population et échantillon :

Nous souhaitons souvent, en pratique, pouvoir tirer des conclusions valides à propos d'une population. Au lieu de considérer le groupe entier, ce qui est impossible en hydrologie statistiques, vu la taille infinie de la population, nous sommes conduits à n'envisager qu'une partie de celui-ci que l'on appelle un échantillon.

En général un échantillon de taille N peut-être décrit par les variables aléatoires $X_i, i = \overline{1, N}$.

1. 2. 2. Paramètres d'une population :

Les paramètres d'une population sont estimés à partir d'un échantillon représentatif.

a. Moyenne d'un échantillon :

La moyenne de l'échantillon est la variable aléatoire \bar{X} tel que:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

On note \bar{X} l'estimation, à partir d'un échantillon, de la moyenne μ de la population.

b. Variance d'un échantillon :

La variance σ^2 d'une population est inconnue, en pratique, à partir d'un échantillon de taille N et de moyenne \bar{X} , on peut estimer la variance de la population considérée par S^2 tel que:

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}$$

c. Ecart-type d'un échantillon:

On appelle écart-type la racine carrée de la variance. L'écart-type d'une population σ , peut être estimer à partir d'un échantillon par S tel que :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

d. Covariance :

La covariance est une autre grandeur qui apparaît dans le cas de deux variables aléatoires X et Y (ou plus).

On note $\sigma_{xy} = \text{cov}(X, Y)$; la covariance d'une population à deux variables aléatoires, elle est inconnue. A partir d'un échantillon de taille N peut être décrit par les couples de variables aléatoires (X_i, Y_i) , $i = \overline{1, N}$, et de moyennes estimées \bar{X} , \bar{Y} respectivement de X et Y, on peut estimer la covariance de la population considérée par S_{xy} tel que:

$$S_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{N}$$

1. 2. 3. Estimation par intervalles de confiance:a) Intervalle de confiance de la moyenne:1-Echantillon étendus ($N \geq 30$):

En fixant l'erreur à α on peut donc déterminer un intervalle $[\bar{X}_{\alpha/2}, \bar{X}_{1-\alpha/2}]$ contenant \bar{X} à un niveau de confiance de $(1-\alpha)$, l'intégrale est déterminée par la formule:

$$\bar{X} \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Où $U_{1-\alpha/2}$ est une variable normale centrée réduite.

2-Petits échantillons ($N < 30$) « test de STUDENT »:

Dans ce cas, on utilise la distribution de STUDENT:

$$\bar{X} \pm t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}$$

ou' t : est une variable déterminée dans le tableau de STUDENT pour une erreur α et un degré de liberté $\bar{\nu} = N - 1$.

B) *Intervalle de confiance de la variance:*

1- $N \leq 100$: pour cela on effectue le test de Khi-deux :

$$\frac{S\sqrt{N}}{\chi_{1-\alpha/2}} \leq \sigma \leq \frac{S\sqrt{N}}{\chi_{\alpha/2}}$$

Ou' χ^2 : est une variable déterminée dans le tableau de Khi-deux pour une erreur α et un degré de liberté $\bar{\nu} = N - 1$.

2- $N > 100$: pour cela on effectue :

$$\sigma \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{2 \cdot N}}$$

Ou' : $U_{1-\alpha/2}$: variable normale centrée réduite pour une erreur α .

I. 3. Recueil des données :

on utilise les données recueillis dans le but de prédire l'effet d'érosion, de sédimentation et pour établir des relations empiriques entre les facteurs contribuant au phénomène.

Pour notre présente étude deux échantillons sont nécessaires:

- * Un échantillon représentatif de couples de valeurs (débits liquides - débits solides en suspension) nécessaire pour l'établissement d'un modèle présentant le lien entre variables causes et variables conséquences. La taille de

l'échantillon nécessaire pour définir un modèle adéquat doit être suffisamment large.

- * Pour l'étude du régime des débits liquides (variables causes) du cours d'eau, les données sont évidemment constituées par la série des observations des débits relatifs à une période aussi longue que possible.

I. 4. Traitement des données :

une analyse comportant des méthodes statistiques exige que les données soient bien organisées et bien stockées pour être analysées et plus tard mises à disposition pour parvenir à une décision ou une conclusion.

Lors de la collecte et de l'analyse des données, on doit toujours avoir présent à l'esprit un fait primordial: La valeur vraie de la variable mesurée n'est pas connue.

La plupart des données recueillies constituent des échantillons nécessaires à une définition approximative de cette vraie valeur.

Donc les échantillons, ainsi sélectionnés en forme de série de données, doivent satisfaire à certains critères statistiques suivant le cas de leur utilisation, à savoir: homogénéité, indépendance, stationnarité et refléter la réalité.

I. 4. 1. Homogénéité et stationnarité :

Le test MANN-WHITNEY pour l'homogénéité et la stationnarité consiste à partager la série à contrôler en deux sous-échantillons de taille P et Q ($P \leq Q$).

L'échantillon combiné de taille $N = P + Q$ est rangé dans l'ordre croissant.

Le test (M-W) considère les quantités :

$$V = R - P \cdot (P+1)/2$$

$$W = P \cdot Q - V$$

avec:

R : somme des rangs des éléments du premier échantillon (taille P) pris dans la série combinée.

V et W sont calculés à partir de R, P et Q.

W peut se calculer de la même manière pour l'échantillon 2 suivant l'échantillon 1.

La statistique U du test (M-W) est définie par le min (V,W).

Lorsque $N > 20$ et $P, Q > 3$ et sans aucune hypothèse que les deux échantillons dérivent de la même population, U est approximativement normalement distribuée avec

$$\text{Var}(U) = \left(\frac{P \cdot Q}{N(N-1)} \right) \cdot \left(\frac{N^3 - N}{12} \cdot \sum T \right)$$

avec:

$T = (J^3 - J)/12$, où J est le nombre d'observations ayant la même rang. La somme $\sum T$ s'effectue pour les deux échantillons.

Pour un test de degrés de signification α , la quantité $|U| = \left| \frac{(U - \bar{U})}{\sqrt{\text{Var}(U)}} \right|$ est comparée à la variable $U_{\alpha/2}$ de la normale $N(0,1)$ correspondant à la probabilité au dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < U_{\alpha/2} \rightarrow$ le test d'homogénéité à $\alpha\%$ du niveau de signification est accepté.

I. 4. 2. Indépendance et stationnarité :

Le test de WALD et WILFORVITZ pour l'indépendance et la stationnarité :

soit un échantillon de taille N (X_1, X_2, \dots, X_N) , le test (W-W) considère la statistique R définie par:

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i \cdot X_{i+1} + X_1 \cdot X_N$$

dans ce cas, si les éléments de l'échantillon sont indépendants alors R suit une distribution normale de moyenne et de variance respectives:

$$\bar{R} = \frac{(S_1^2 - S_2)}{N-1}$$

$$\text{var}(R) = \frac{S_2^2 - S_4}{N-1} - \bar{R}^2 + \frac{S_1^4 - 4 \cdot S_1^2 \cdot S_2 + 4 \cdot S_1 \cdot S_3 + S_2^2 - 2 \cdot S_4}{(N-1) \cdot (N-2)}$$

avec:

$$S_j = \sum (X_i - \bar{X})^j$$

La quantité $U = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{\text{var}(R)}}$ suit la distribution normale standard $N(0,1)$,

et peut être utilisé pour tester l'hypothèse d'indépendance au niveau α , en comparant $|U|$ avec le déviateur $U_{\alpha/2}$ de la $N(0,1)$ correspondant à la probabilité de dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < U_{\alpha/2} \rightarrow$ l'hypothèse d'indépendance est acceptée à $\alpha\%$ du niveau de signification.

I. 4. 3. Détection des valeurs hors position :

Pour appliquer le test de SEVRUK et GEIGER, il faut faire l'hypothèse que les logarithmes des valeurs de l'échantillon sont normalement distribués.

Pour appliquer le test (S-G), deux quantités sont calculées:

$$X_H = \exp(\bar{X} + K_N \cdot S)$$

$$X_L = \exp(\bar{X} - K_N \cdot S)$$

$$\exp \equiv e$$

ou \bar{X} , S sont respectivement la moyenne et l'écart-type du logarithme naturel de l'échantillon.

K_N est la statistique de (G-B) tabulée pour différentes tailles d'échantillons et pour divers niveaux de significations. Pour un niveau de signification de 10% le polynôme approché suivant, proposé par PILTON et AL (1985), est utilisé dans le logiciel H.F.A. pour l'estimation des valeurs tabulées.

$$K_N = -3,62201 + 6,28446 N^{1/4} - 2,49835 N^{1/2} + 0,491436 N^{3/4} - 0,037911 N$$

ou N est la taille de l'échantillon.

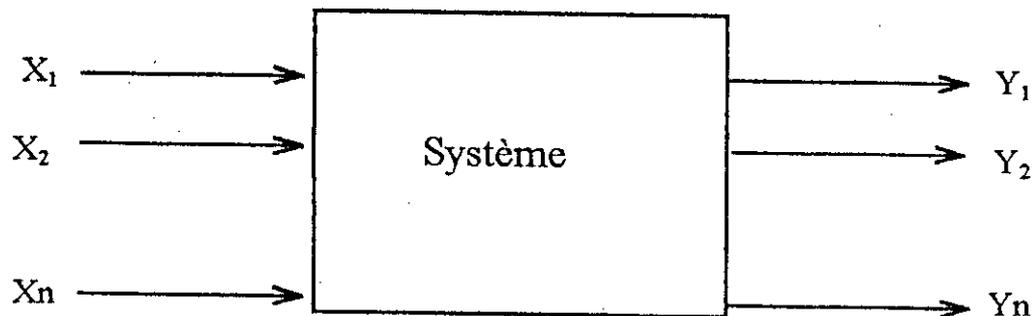
En appliquant le test de (S-G) quelques valeurs l'échantillon supérieures à X_H sont considérées être des grands hors position et d'autres inférieures à X_L sont considérées être des petits hors position.

Remarque:

Ce dernier test est utilisé dans le cas d'ajustement à une courbe de distribution théorique des fréquences.

CHAPITRE IIELABORATION D'UN MODELEPAR APPROXIMATION DES DONNEESII. 1. Introduction :

Un phénomène (système) hydraulique, 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:



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 chapitre, nous allons le consacrer pour l'élaboration d'un modèle permettant une représentation adéquate d'un phénomène dont le comportement est décrit par les données statistiques.

En pratique, cette élaboration du modèle dépend essentiellement du décideur qui doit définir quelques caractéristiques de son échantillon statistique, on cite entre autres:

⇒ la précision de mesure de données,

⇒ les raisons pour lesquelles le décideur s'est basé pour confirmer l'existence d'une relation fonctionnelle entre les variables,

⇒ possibilité de proposer un modèle précis et de faire des hypothèses à priori sur les données.

En effet, toutes les caractéristiques vont nous permettre de choisir la méthode la plus efficace pour la manipulation de ces données, ainsi:

⇒ la précision des mesures permet le choix entre une interpolation et une approximation,

⇒ la nature de la relation fondamentale entre les variables permet le choix entre un modèle de connaissance ou statistique.

II. 2. Modélisation :

L'ingénieur a souvent à prendre des décisions au sujet de phénomènes dont il ne connaît le comportement qu'à partir de données mesurées.

Dans certains cas, la connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle précis, déterministe que l'on nomme modèle de connaissance; qui exprime la relation existante entre les variables d'entrée et de sortie du système.

Mais, souvent, on ignore les mécanismes précis du phénomène ou encore, les mesures effectuées sur le phénomène peuvent être influencées par les variations aléatoi-

res de variables incontrôlables. On peut alors proposer un modèle statistique dont on cherchera à estimer les paramètres à partir de l'échantillon de mesures.

II. 3. Modèle statistique :

Les mesures effectuées sur les grandeurs soumises à des perturbations sont souvent difficiles à synthétiser et l'information qu'elles contiennent sont difficilement utilisables sans une technique de représentation algébrique de ces données.

Alors, on doit proposer une relation empirique, et on parle souvent d'un modèle statistique du système représentative de la relation entre les variables d'entrée et de sortie.

En résumé, un modèle statistique:

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

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

Ainsi, l'amélioration du modèle exige la recherche soit d'autres variables qui influent sur le comportement du phénomène, soit d'autre opérateur de transformation des variables de causes en variables conséquences.

Remarque :

le modèle qu'on veut élaborer est un modèle statistique.

II. 4. Avantages d'un modèle :

Parmi les avantages d'un modèle:

⇒ l'exploitation des données expérimentales,

- ⇒ réduction de l'ensemble de données au nombre de paramètres de modèle, tout en gardant l'information continue dans les données,
- ⇒ simulation du comportement de système,
- ⇒ exploitation des conséquences logiques des hypothèses,
- ⇒ amélioration de la conception de la réalité.

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

II. 5. Notions d'approximation :

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

Une telle approximation est utilisée dans le cas de mesures dont la précision est rendue douteuse à cause de perturbation incontrôlées. Son but est d'essayer d'éliminer autant que possible l'influence de bruits de mesure.

II. 5. 1. Qualité d'une approximation :

Soit un ensemble de données $(Y(X_i), i = \overline{1, N})$ qu'on veut 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.

Pour réaliser ceci, on mesure généralement la distance entre la fonction Y et son modèle Y^* par l'une des normes suivantes:

$$L_1 : \text{la norme de laplace : } \|Y - Y^*\|_1 = \sum_{i=1}^N |Y_i - Y_i^*|$$

L_2 : la norme euclidienne : $\|Y - Y^*\|_2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2$

L_∞ : la norme de minimax de LAPLACE - TCHEBYTCHEV : $\|Y - Y^*\|_\infty = \text{Max}_{i=1,N} |Y_i - Y_i^*|$

II. 5. 2. Estimation des paramètres du modèle :

En pratique, avant de procéder à l'estimation, il est intéressant de vérifier si le modèle proposé est linéaire, linéarisable ou non, au sens des variables et non pas au sens des paramètres.

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

$$Y = AX + B \quad (1)$$

Un modèle est linéarisable s'il peut être ramener à la forme (1) par un changement de variables.

En général, pour les modèles linéaires ou linéarisables, la méthode des moindres carrés est la plus utilisée pour l'estimation des paramètres, concernant les modèles non linéarisables, l'appel aux méthodes de la programmation non linéaire est inévitable.

II. 5. 3. Méthode des moindres carrés :

La méthode des moindres carrés est un outil mathématique permettant de faire une approximation de données par une fonction analytique. Elle consiste en la minimisation de la norme L_2 .

Définition :

Parmi toutes les droites qui approchent un ensemble donné de points, la droite présentant la propriété L_2 est la meilleure droite d'ajustement.

La droite présentant cette propriété est dite s'ajuster aux données au sens des moindres carrés et est appelée une droite de régression des moindres carrés.

En appliquant la définition, nous pouvons montrer que la droite des moindres carrés approche l'ensemble des points $(X_1, Y_1), \dots, (X_N, Y_N)$ et a pour équation:

$$Y = A.X + B$$

Où les constantes A et B sont données par:

$$A = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum(X - \bar{X})^2},$$

$$B = \bar{Y} - A.\bar{X}$$

L'équation de droite s'écrit:

$$Y = A.X + B = A(X - \bar{X}) + \bar{Y}$$

Ceci montre que la droite passe par le point (\bar{X}, \bar{Y}) , centre de gravité des données.

En fonction de la variance et de la covariance, la droite des moindres carrés pour Y sur X s'exprime:

$$Y - \bar{Y} = \frac{S_{XY}}{S_X^2}(X - \bar{X}) \quad (2)$$

II. 6. Validité du modèle :

II. 6. 1. Coefficient de corrélation :

On est amené à déterminer statistiquement le degré de validité d'une relation de régression par la détermination d'un coefficient de corrélation et l'étude de sa signification.

Par définition, on appelle coefficient de corrélation la quantité R telle que:

$$R = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y},$$

de (2) on a:
$$\frac{Y - \bar{Y}}{S_Y} = R \frac{X - \bar{X}}{S_X}$$

le coefficient de corrélation R est toujours compris entre -1 et $+1$. Il vaut ± 1 dans le cas d'une liaison fonctionnelle parfaite, il vaut 0 dans le cas contraire.

II. 6. 2. Test de corrélation :

Suivant la figure II.2.1, on peut calculer les variances:

$$V_T = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}$$

$$V_C = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{1} = R^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$V_R = \frac{\sum (Y_i - Y)^2}{N-2} = \frac{(1-R^2) \sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N-2}$$

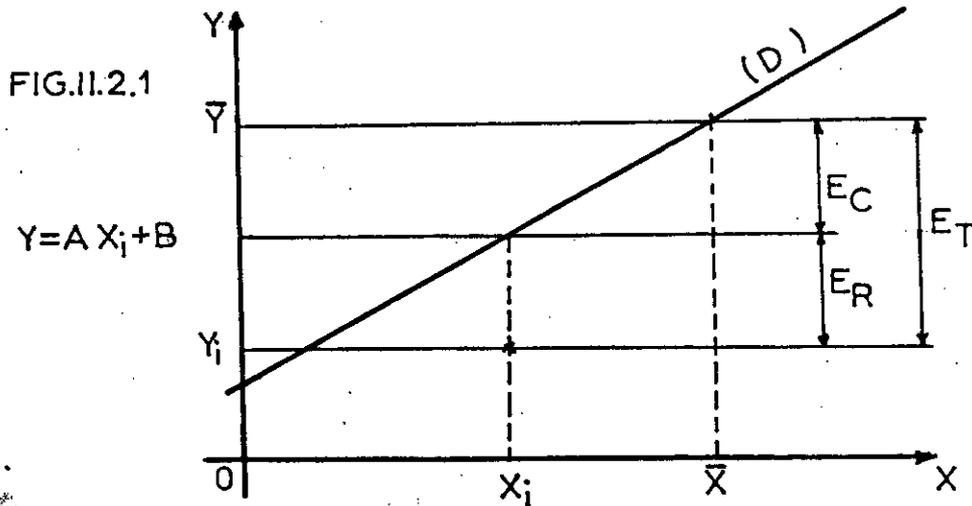
On montre que si les variables X et Y sont normales, le rapport:

$$F = \frac{V_C}{V_R} = \frac{R^2 (N-2)}{1-R^2}$$

est une variable aléatoire de FISCHER - SNEDECOR à $v_1 = 1$ et $v_2 = N-2$, degrés de liberté.

On peut donc tester que le modèle est adéquat (que la régression est significative) avec un risque α quand:

$$F > F_{\alpha}(1, N-2)$$



E_C : écart dû à la régression.

E_R : écart résiduel.

E_T : écart total.

(D) : droite de régression Y en X.

II. 7. Précision d'une corrélation « intervalle de prédiction » :

A partir de l'équation de la droite de régression, connaissant X_i on peut déterminer Y_i .

En fixant l'erreur à α , on peut donc déterminer un intervalle contenant Y_i à un niveau de confiance de $(1 - \alpha)$, l'intervalle est déterminé par la formule:

$$Y_i \pm \frac{t_{1-\alpha/2}}{\sqrt{N-2}} S_Y \sqrt{(1-R^2) \left(N+1 + \frac{N(X_i - \bar{X})^2}{S_X^2} \right)}$$

Où t est une variable déterminée dans le tableau de STUDENT pour une erreur α et un degré de liberté $\nu = N - 1$.

Notons que pour les grandes valeurs de N , les limites de confiance de la population théorique sont données par:

$$Y_i \pm U_{1-\alpha/2} \sqrt{V_R}$$

Où $U_{1-\alpha/2}$: est une variable normale centrée réduite pour une erreur α .

V_R : variance résiduelle, déjà calculée.

CHAPITRE IIIREGIME DES DEBITS LIQUIDES.III. 1. Introduction :

Les relevés de débits effectués pendant une longue série d'années à une station de jaugeage, forment un ensemble important de chiffres et de graphiques qu'il convient de dépouiller et de classer suivant des méthodes qui facilitent leur analyse et permettent d'en tirer les éléments intéressant l'hydrologue et l'ingénieur.

Il est souvent utile de visualiser une distribution statistique au moyen d'une représentation graphique. On peut avoir recours à différentes sortes de diagrammes selon le type de variables étudiées et l'utilisation envisagée (les diagrammes en escalier, polygonaux, cumulatifs, ... etc.).

Une autre technique notamment employée, qui fait interpréter des observations d'un événement hydrologique en terme de probabilité d'apparition, cette méthode statistique est basée sur l'analyse de la fréquence.

Encas de la présentation des débits moyens journaliers l'emploi de la série complète serait justifié pour des études tendant à déterminer le nombre de jours,

ou le pourcentage de temps pendant lequel le débit du cours d'eau s'est maintenu au-dessus d'une valeur déterminée (courbe des débits classés).

III. 2. Courbe des débits classés :

Si on enregistre, chaque jour, dans une station de jaugeage, le débit moyen journalier, au terme de l'année, on obtient une série de 365 valeurs qui représentent le classement chronologique des débits moyens journaliers.

Cependant pour l'étude statistique des débits, au autre classement monotone par valeurs soit croissantes soit décroissantes. La courbe représentative obtenue est dite « courbe des débits classés ».

III. 2. 1. Construction géométrique de la courbe des débits classés:

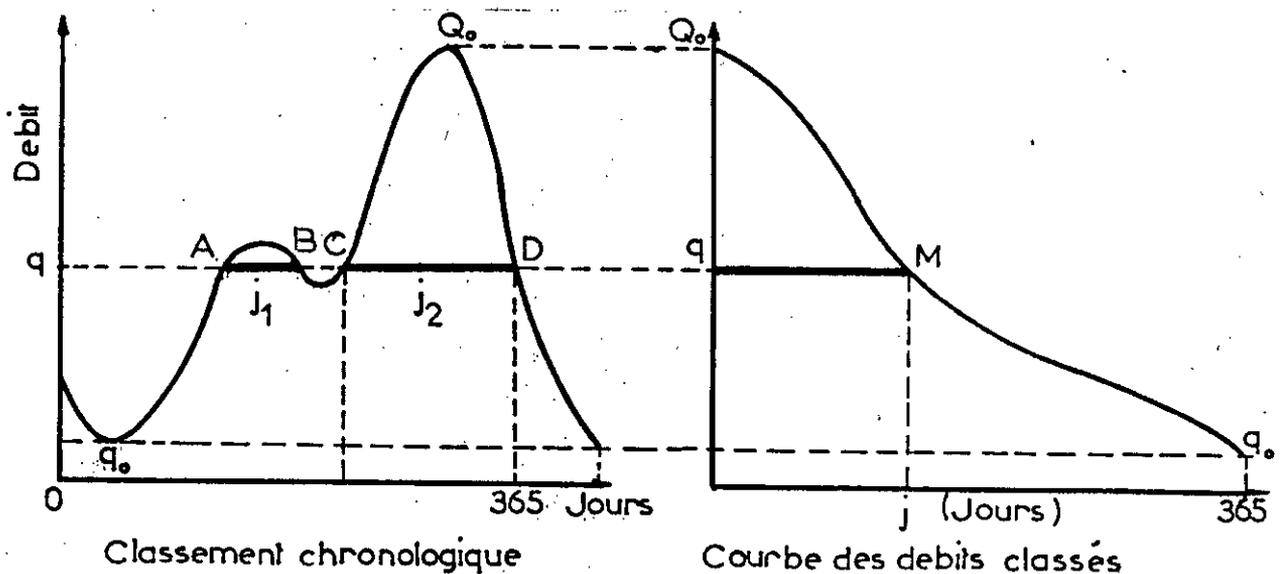


FIG. II.3.1

Si on considère la courbe des débits classés par valeurs décroissantes le premier point représentera le débit maximum de l'année Q_0 . Le dernier point correspond au débit le plus faible de l'étiage q_0 . Un point quelconque de la courbe, sera tel que son ordonné « q » sera la valeur du débit journalier q atteint ou dépassé pendant le nombre de jour « j », correspondant à son abscisse.

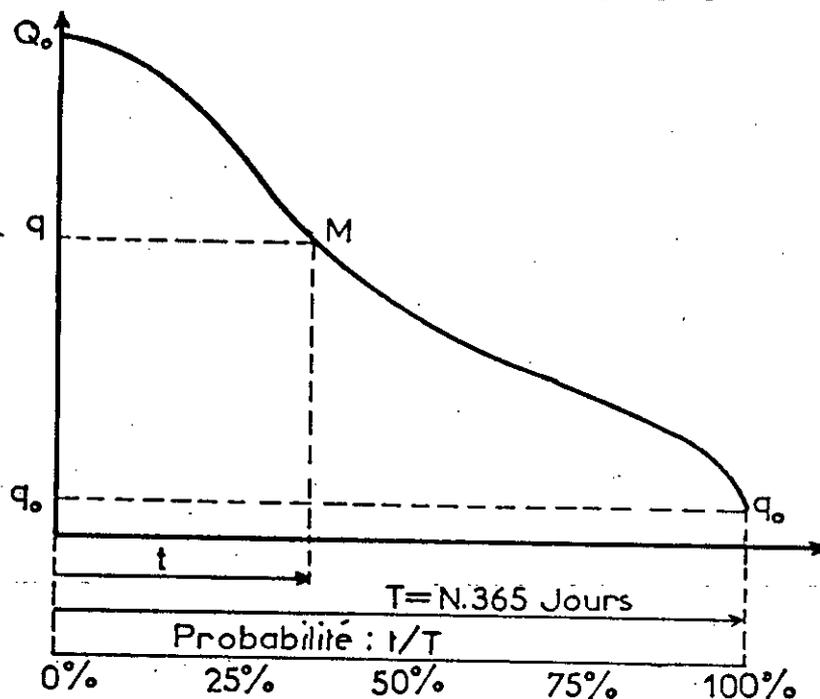
On peut tracer directement la courbe des débits classés à partir de la courbe de classement chronologique, comme le montre la figure II.3.1. La courbe chronologique intercepte sur l'horizontale l'ordonnée q , un certain nombre de segments AB, CD... dont la longueur totale est $j = j_i + j_{i+1} + \dots$, j représente, en effet, le nombre de jours pendant lesquels les débits journaliers ont été supérieurs à q . D'où le point $M(q, j)$ de la courbe des débits classés.

III. 2. 2. Courbe relative à N années et probabilité d'un débit journalier :

On peut classer les débits relatifs à une longue période de N années d'observations. Exemple : au début de 30 ans, on aura à classer 10950 valeurs. La courbe correspondante des débits classés, nous fera connaître, en partant d'un très grand nombre de cas observés, la probabilité pour que le débit de la rivière soit supérieur à un débit donné q (donc compris entre q et Q_0). En effet, si « t » est l'abscisse relative au débit « q » et « T » l'abscisse maximum, relative au débit q_0 , on voit que la probabilité pour que le débit de la rivière soit supérieur à q est t / T (rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas observés).

On peut d'ailleurs graduer les abscisses en pourcentage qui permet la lecture de la probabilité.

FIG. II. 3.2



III. 2. 3. Débits caractéristiques :

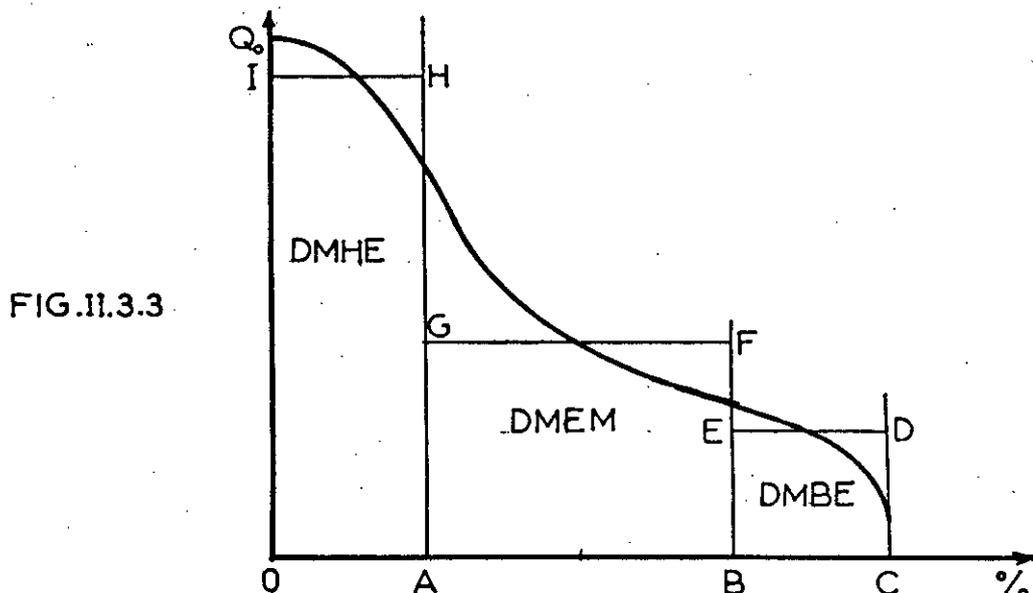
La notion des débits caractéristiques et de débits classés moyens permet la comparaison entre les cours d'eau. On définit les débits caractéristiques suivants :

- ⇒ Débits caractéristiques maximum (DCM) : le débit dépassant 10 jours par an.
- ⇒ Débit moyen caractéristique (DC_6) : le débit dépassant 6 mois par an (débit de fréquence 0,5).
- ⇒ Débit caractéristique de 1 , 3 ou 9 mois (DC_1 ; DC_3 ; DC_9) : les débits dépassants respectivement 1 ,3 ou 9 mois par an.
- ⇒ Débit caractéristique d'étiage (DCE) : débit dépassant 355 jours par an.

Ces débits caractéristiques permettent de tracer une première esquisse des débits classés.

III. 2. 4. Les débits moyens :

on définit les débits moyens de hautes eaux (DMHE), d'eaux moyennes (DMEM), de basses eaux (DMBE) et le débit moyen journalier



DMHE = aire délimitée par la courbe sur OA \cong aire du rectangle (OAHI).

DMEM = aire délimité par la courbe sur AB \cong aire du rectangle (ABFG).

DMBE = aire délimité par la courbe sur BC \cong aire du rectangle (DBCE).

Le débit moyen journalier = aire délimité par la courbe des débits classés sur OC.

III. 3. Estimation des lois de probabilités des variables causes :

Cette estimation se fait en plusieurs étapes.

III. 3. 1. Répartition de la statistique d'observations en classes :

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

$$K = \langle \text{Log}_2(N) \rangle + 1$$

Ou : N : taille de l'échantillon

$\langle X \rangle$: partie entière de X.

L'amplitude des classes (intervalle de classe) est donné par:

$$H = \frac{\text{Max}(X_i) - \text{Min}(X_i)}{K} \quad i = \overline{1, N}$$

On classe les débits X_i observés, par groupes (classes) : tous les débits compris entre X_i et $X_i + H$, leur nombre est n_i (effectif). On obtient ainsi K rectangles juxtaposés de même largeur H de hauteurs différentes f_i avec:

$$f_i = n_i/N \text{ probabilité pour qu'un débit soit constaté entre } X_i \text{ et } X_i + H.$$

On visualise la représentation au moyen d'un histogramme. Figure II.3.4.

III. 3. 2. Tableau de fréquences :

classe	effectif	fréquences
$[X_1 , X_2]$	n_1	f_1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$[X_K , X_{K+1}]$	n_K	f_K

Tab II.3.1 tableau de fréquences.

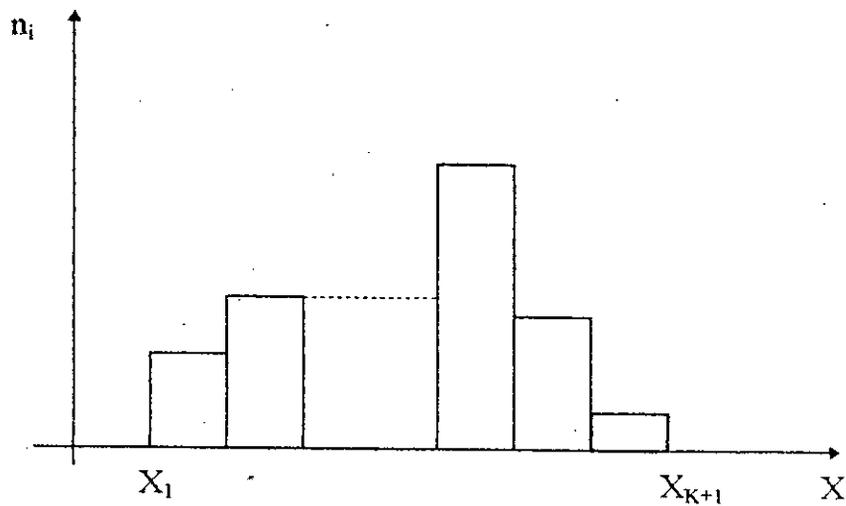


FIG.II.3.4 HISTOGRAMME

III. 3. 3. Courbe de fréquences des débits :

On pourra tracer, en joignant les milieux des côtés supérieurs des rectangles, une ligne polygonale dite : polygonale de fréquence.

Même chose , si on présente les fréquences cumulées F_i au lieu de f_i , on aura le polygonale de fréquence cumulées.

Pour H très petit et N extrêmement grand, on obtient une courbe continue, dite courbe de fréquence et une courbe de fréquence cumulée.

On peut estimer ces deux courbes par un lissage qui doit se faire selon le critère:

« La surface sous la courbe de lissage doit être égale à la surface sous l'histogramme ou bien l'histogramme cumulatif pour la deuxième courbe ».

Remarque :

La courbe de fréquence cumulée des débits moyens journaliers est la courbe des débits classés.

III. 4. Ajustement à une courbe de distribution théorique des fréquences :

Une utilisation très répandue aujourd'hui; des méthodes d'ajustement, à la courbe des fréquences des débits observés, d'une courbe de distribution théorique telle que celles de GALTON, de PEARSON, de GUMBEL, etc...

On cherchera la meilleure répartition théorique de probabilité représentant l'échantillon.

Remarque :

L'expérience montre que la courbe des fréquences des débits moyens journaliers des cours d'eau ne satisfait pas à la loi de GAUSS car elle n'est pas symétrique. Mais la loi de GAUSS est susceptible de nombreuses généralisation par le simple changement de variable.

GIBRAT a montré que la distribution de GALTON correspondant à une distribution « Gaussienne » de $\text{Log } X$, s'adapte bien aux courbes de fréquences des débits moyens journaliers (courbes des débits classés) de nombreuses rivières.

III. 4. 1. Test d'ajustement :

Cette étape consiste à tester l'hypothèse:

$$f(X) = f_0(X)$$

Où: $f(X)$: la loi de probabilité inconnue d'une variable aléatoire X (débit),

$f_0(X)$ est la loi de probabilité théorique.

Le critère de test de Khi-deux est donné par:

$$\chi_{obs}^2 = \sum_{i=1, K} \frac{(n_i - N \cdot P_i)^2}{N \cdot P_i}$$

si $\chi_{obs}^2 < \chi_{\alpha}^2$ alors on accepte l'hypothèse si non on rejette l'hypothèse.

Où χ_{α}^2 est une variable déterminée dans le tableaude Khi - deux pour une erreur α et un degré de liberté $\nu = K - 1$

avec: n_i : effectif de la classe i

N : taille de l'échantillon

P_i : probabilité théorique de la classe i

K : nombre de classes.

III. 5. Estimation des apports solides en suspension :

l'estimation de la masse des sédiments en suspension se fait en plusieurs étapes:

⇒ diviser la courbe de fréquence cumulée des débits liquides en plusieurs intervalles de fréquence $[f_i, f_{i+1}]$,

⇒ calculer les débits liquides atteints ou dépassés Q_i ; correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquence,

⇒ pour chaque débit liquide Q_i on calcule le débit solide en suspension Q_{si} , en utilisant le modèle statistique $Q_s = f(Q)$,

⇒ évaluer le débit moyen journalier du transport solide en suspension par:

$$Q_s = \sum_i [Q_{si} \cdot (f_{i+1} - f_i)].$$

CHAPITRE IVORGNIGRAMME GENERAL

Le programme général de calcul comporte un programme principale et quatre sous programmes, qui sont présentés sous forme d'organigrammes :

- 1.Organigramme principal.
- 2.Organigramme de choix des échantillons représentatifs.
- 3.Organigramme d'élaboration d'un modèle par approximation des données.
- 4.Organigramme de l'étude fréquentielle des débits liquides .
- 5.Organigrammes d'estimations des apports solides en suspension.

NOTATIONS :

Q : débit liquide.

Q_s : débit solide en suspension.

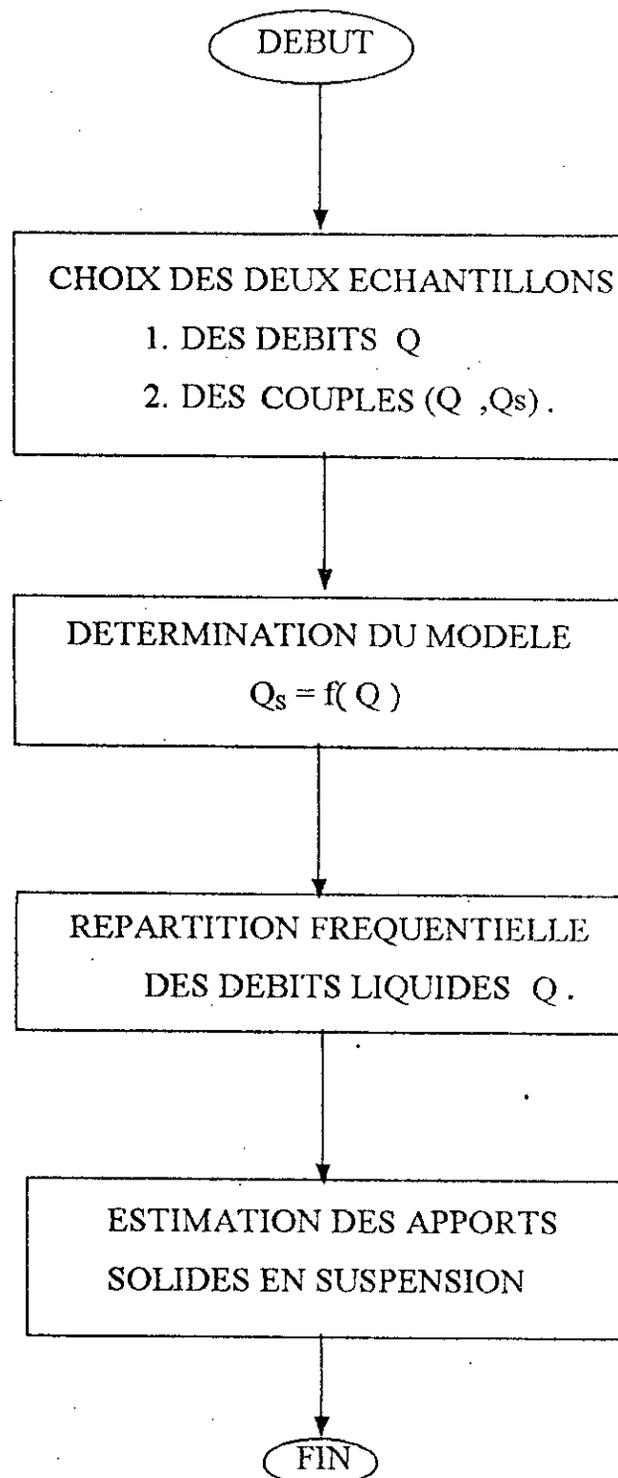
$Q_s=f(Q)$: modèle.

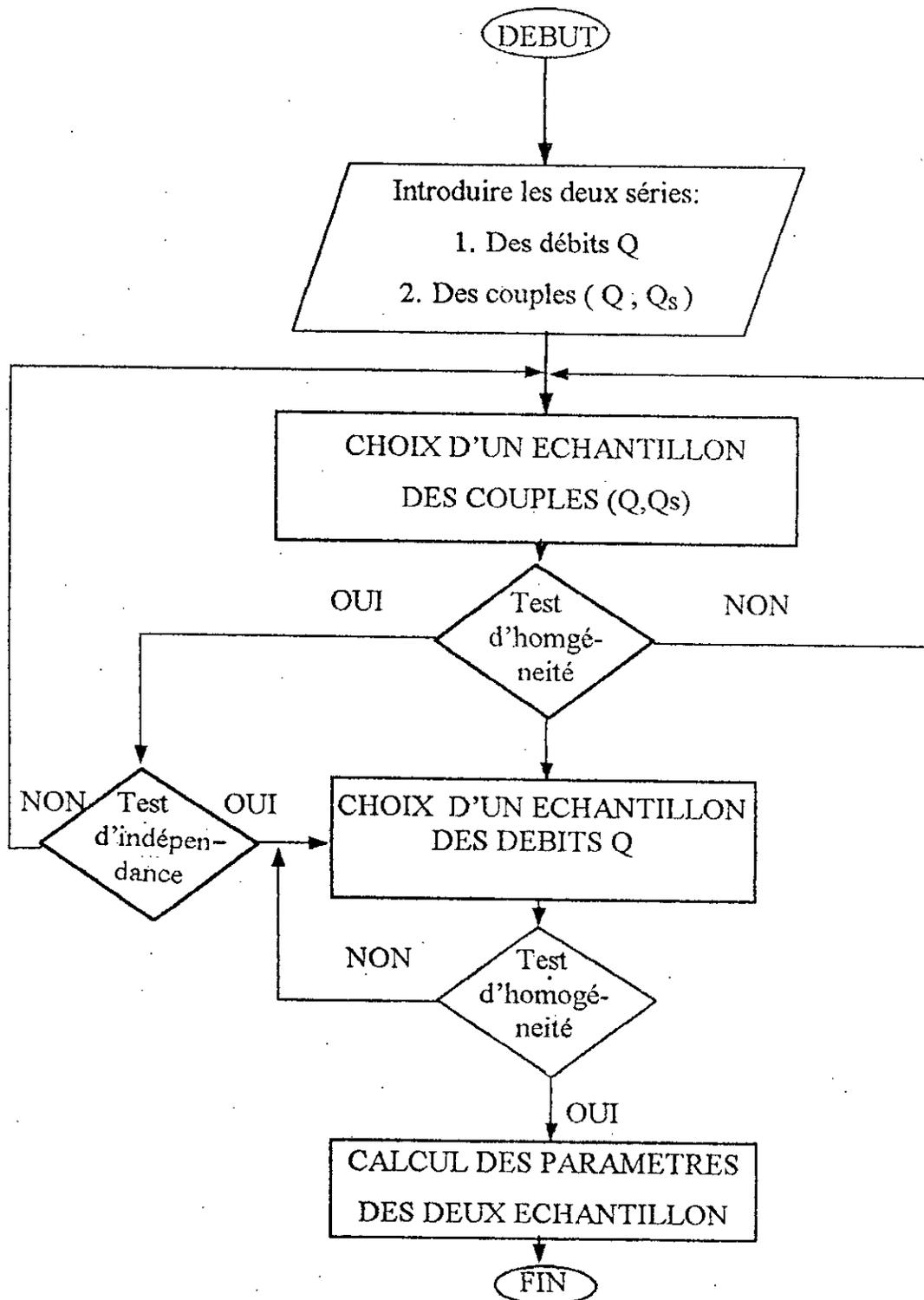
K : Nombre de classes des débits Q.

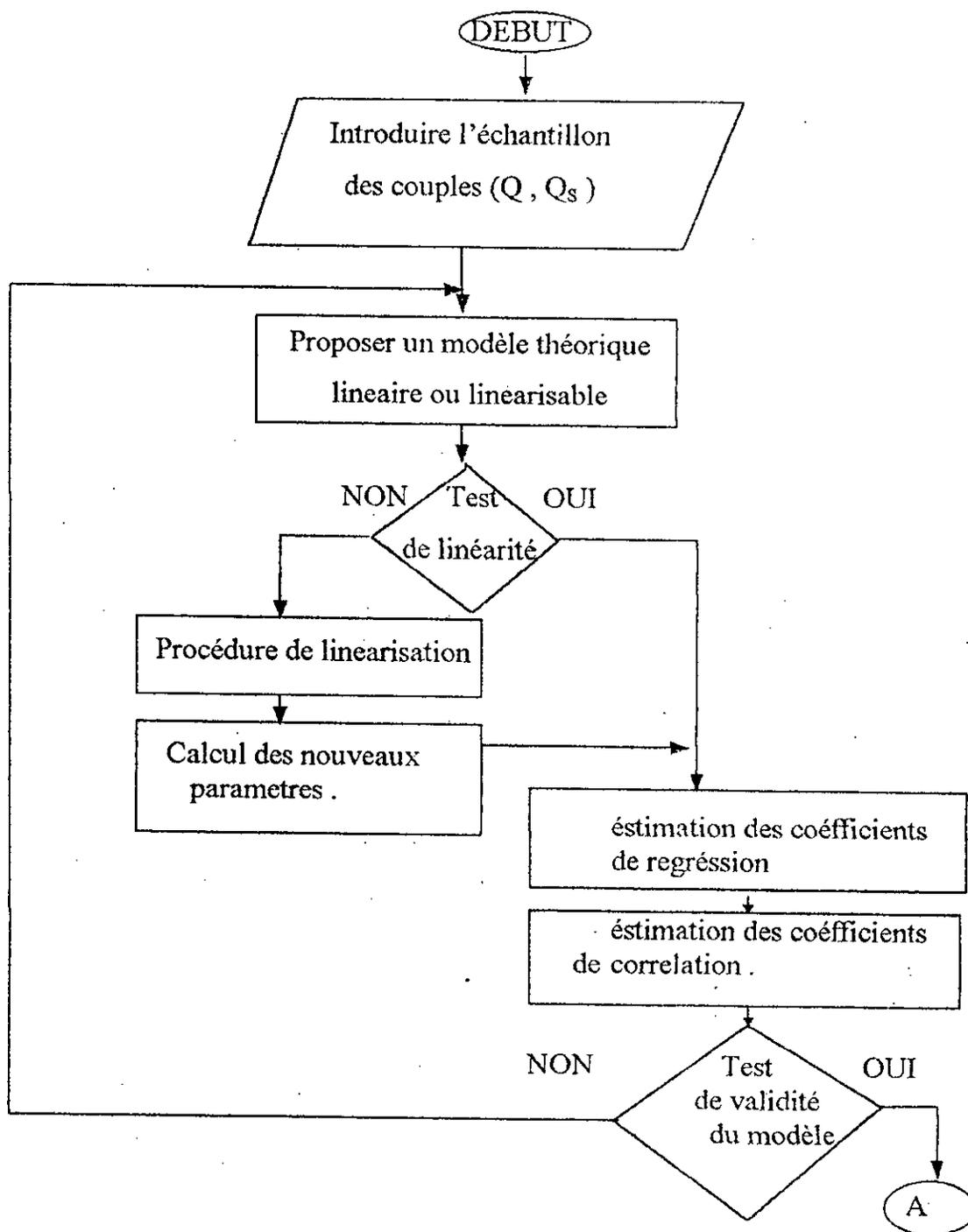
H : Amplitudes des classes.

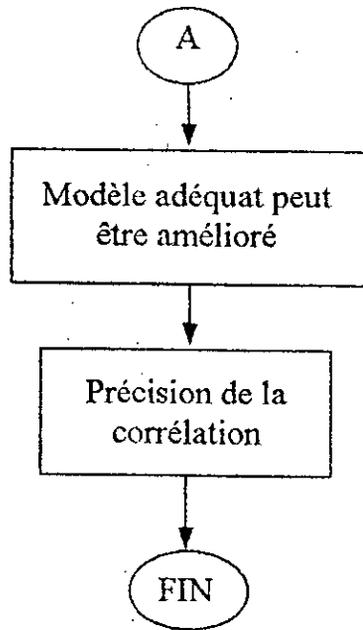
M :Nombre des sous intervalles de fréquence.

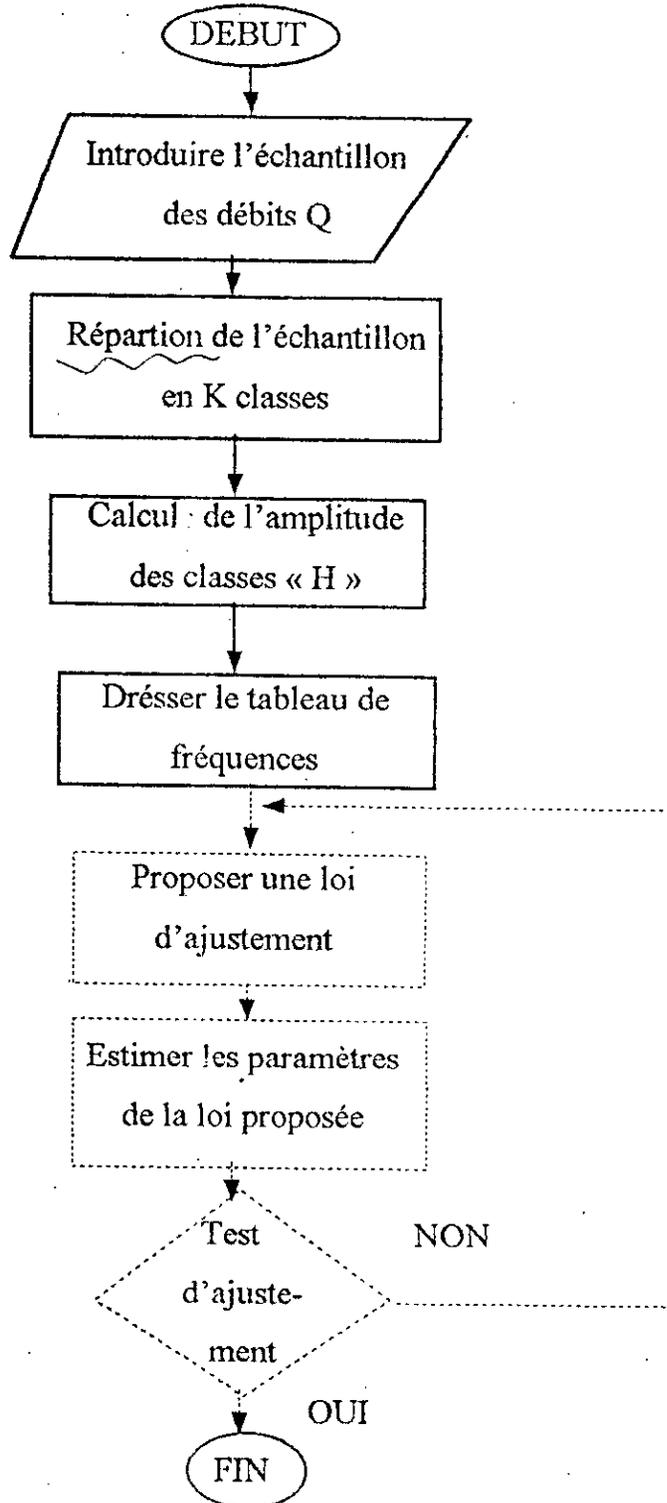
E :Etendu de l'intervalle de fréquence.

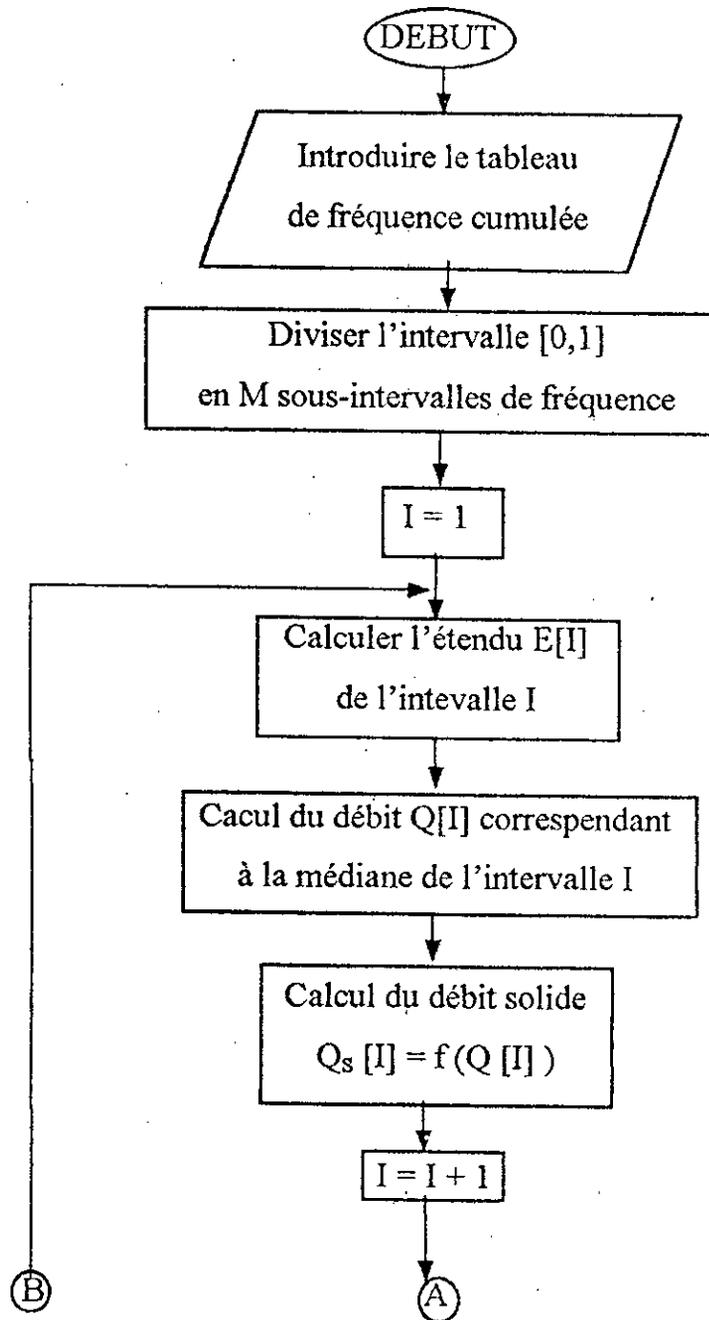
IV. 1. Organigramme principale:

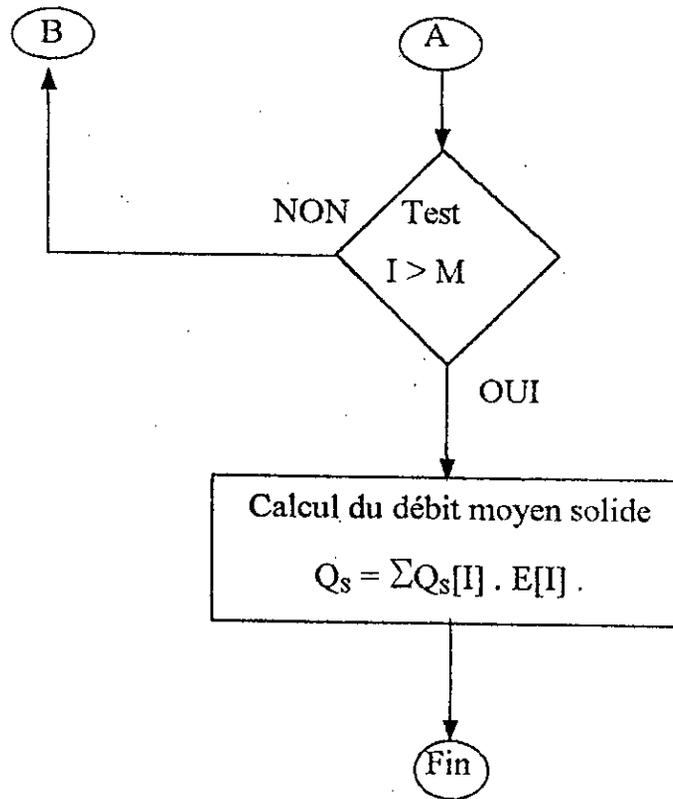
IV. 2. Organigramme de choix des échantillons:

IV. 3. Organigramme d'élaboration du modèle:



IV. 4. Organigramme d'étude fréquentielle des débits liquides :

IV. 5. Organigramme d'estimation des apports solides en suspension :



CHAPITRE V
ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES A L'EXUTOIRE DU
BASSIN VERSANT (TAFNA)

V. 1. Introduction :

Le bassin de TAFNA à la station hydrométrique de « PIERRE DU CHAT » a été choisie pour servir d'application de cette technique d'estimation des apports solides en suspension.

Le bassin versant TAFNA est situé à l'extrême nord-ouest du pays, qui s'étend jusqu'au territoire Marocain.

Cette région est dominée par le massif jurassique des monts de Tlemcen, constitué de calcaires dolomitique perméable et très résistant.

La fig.II.4.1, présente la carte du bassin fluvial avec quelques caractéristiques géomorphologiques de ce même bassin.

V. 2. Données sur les sédiments :

La serie disponible sur les transports solides en suspension est recueillie à la station hydrométrique « PIERRE DU CHAT » à l'exutoire du bassin de TAFNA, sur une période d'observation 80 /90.

Le fichier ainsi disponible présente les hauteurs d'eau « H » en « cm » et les concentrations correspondantes en « g / l » (mesures instantanées).

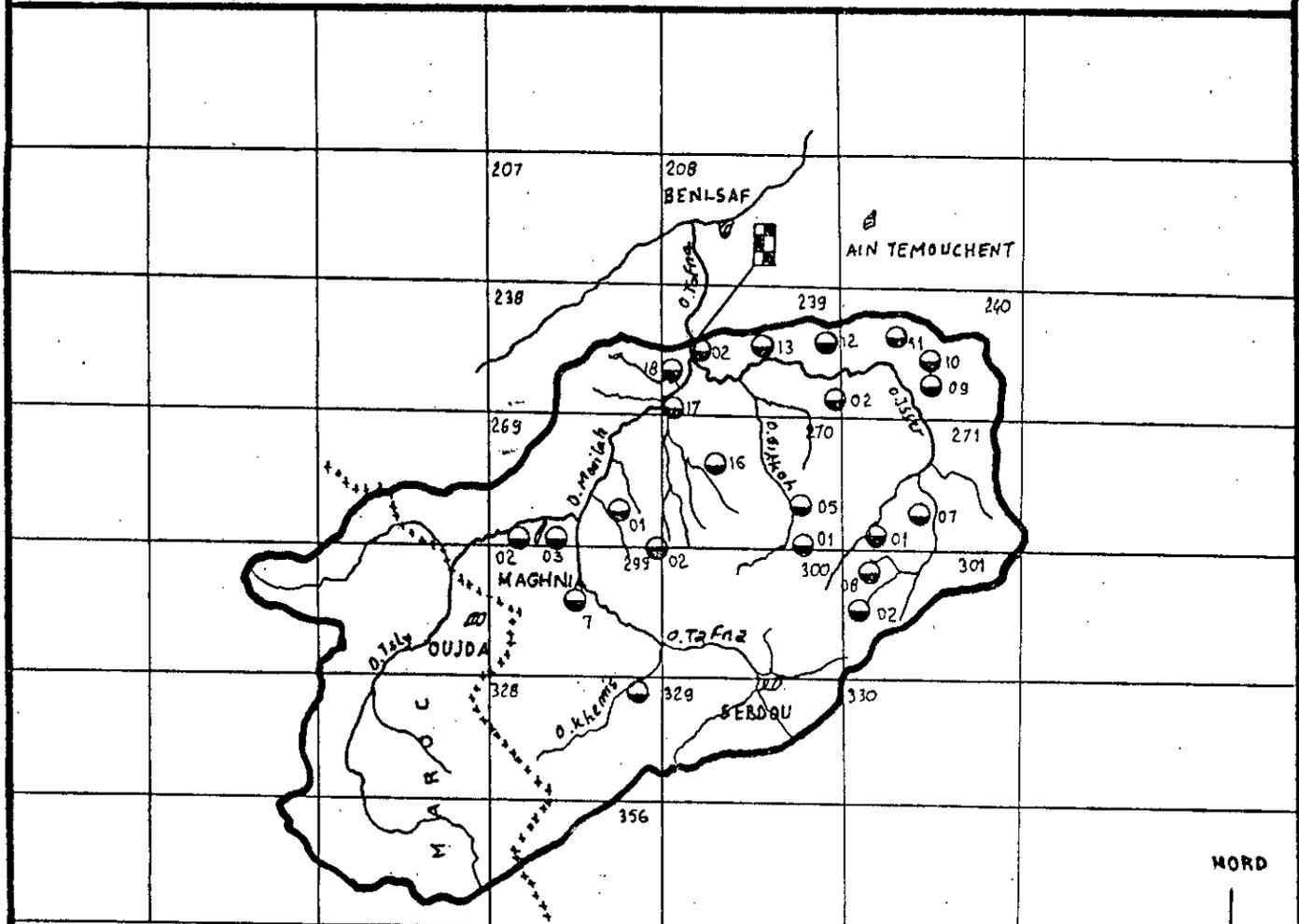
A partir des données de base des fichiers hauteurs d'eau- concentrations, on calcul les débits moyens journaliers aussi bien pour les débits liquides que pour les débits solides en suspension; après avoir calculer:

FIG.II.4.1

STATION: PIERRE DU CHAT

Code: 16-08-01

Oued: TAFNA



-  Station hydrométrique
 Poste pluviométrique

0 10 20 30 40 50 Km

DONNEES MORPHOMETRIQUES

X :122.30
 Y :213.12
 Altitude minima (m) :50
 Altitude maxima (m) :1824
 Altitude moyenne (m) :780
 Surface (Km) :6900
 Périmètre (Km) :350

Longueur du rectangle équivalent (Km) :115
 Longueur du thalweg principal (Km) :160
 Densité de drainage (Km/Km) :
 Indice de compacité :1.18
 Indice de pente de roche :
 Coefficient de torrentialité :

- * Les débits liquides instantanés: Ces débits sont calculés en (m^3 / s) à partir de la côte H lue à l'échelle de la station de jaugeage, en utilisant la courbe de tarrage $Q = f(H)$ de la dite station.
- * Les débits solides en suspension instantanés: les débits liquides instantanés sont transformés en débits solides en suspension instantanée (Kg / s), en multipliant ces débits par les concentrations correspondantes (g / l).

V. 3. Données sur les débits liquides du cours d'eau :

Les relevés des débits liquides effectués à la station de jaugeage « PIERRE DU CHAT » sont disponibles sous forme d'un fichier donnant les débits moyens journalier sur une période d'observation 58 /90.

V. 4. Recherche de relation entre débits solides en suspension et débits liquides:

L'application de cette technique dans notre cas a été abordée de la façon suivante:

- *les relations sont établies à l'échelle des débits liquides moyens journaliers aussi bien pour les débits liquides que pour les débits solides en suspension,

- *un premier examen des données de débits liquides moyens et des débits solides en suspension moyens journaliers correspondantes, observées durant la période 80 /90, nous a permis de sélectionner un échantillon suffisant et représentatif des couples de valeurs d'une taille:

$$N = 200$$

- *les couples de valeurs sélectionnées sont rapportées sur un papier Log-Log (figure II.4.2), ce tracé démontre que la forme du nuage de points autorise un ajustement linéaire.

- On pose donc le modèle linéaire:

$$Y = A.X + B$$

tel que:

$$X = \text{Log}(Q) \quad \text{et} \quad Y = \text{Log}(Q_s)$$

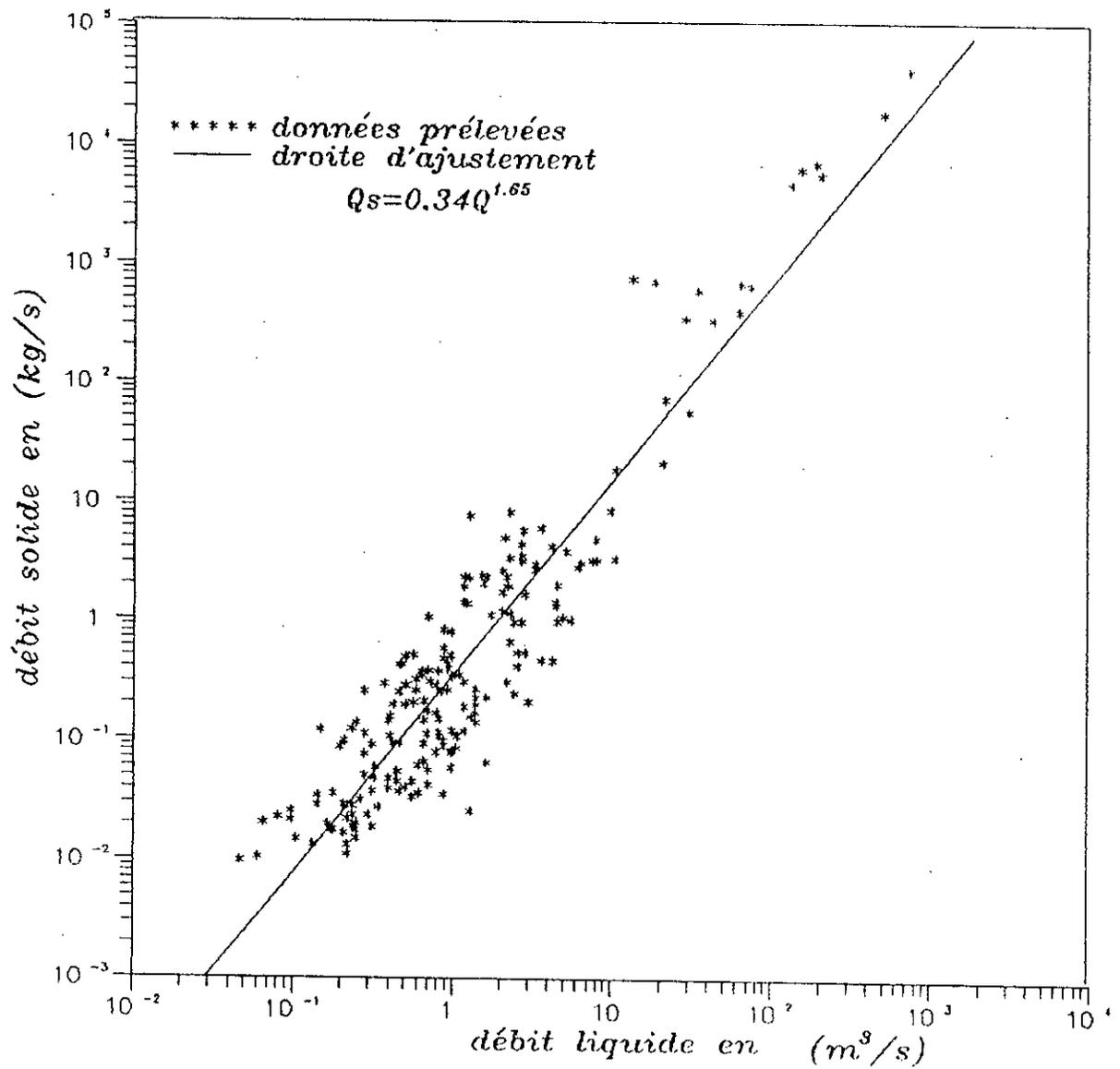


FIG.II.4.2:

DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, STATION PIERRE DU CHAT)

avec:

Q : débit liquide en m^3/s

Q_s : débit solide en suspension en Kg /s

Donc, la relation recherchée:

$$Q_s = K.Q^A \quad \text{avec } K = 10^8$$

*Des calculs élémentaires conduisent aux cinq résultats suivants qui contiennent toute l'information utile:

Les moyennes	$\bar{X} = 7,33 \cdot 10^{-2}$	$\bar{Y} = -3,54 \cdot 10^{-1}$
Les écarts-types	$S_x = 0,72$	$S_y = 1,28$
les coefficients de corrélation	$R = 93\%$	

*On en déduit tout d'abord les estimations A et B:

$$A = 1,65$$

$$B = -0,47$$

*Le modèle ainsi déduit est de la forme:

$$Q_s = 0,34 \cdot Q^{1,65}$$

C'est la relation trouvée entre débits solides en suspension (Kg /s) et débits liquides (m^3/s).

*Pour l'intervalle de prédiction de ce modèle pour un niveau de confiance de 95% est:

$$Q_s \pm 8,35 \text{ Kg /s (voir figure II.4.3)}$$

V. 5. Courbe des débits classés :

En se basant sur les données des débits liquides moyens journaliers observés durant la période 58 /90, on a sélectionné une série complète de ces débits; la plus large possible, qui s'étend de 1967 à 1982 d'une taille:

$$N = 5330$$

Les caractéristiques estimées de cette série sont:

- la moyenne des débits : $\bar{X} = 8,54 m^3/s$,

- l'écart-type : $S = 33,64 m^3/s$

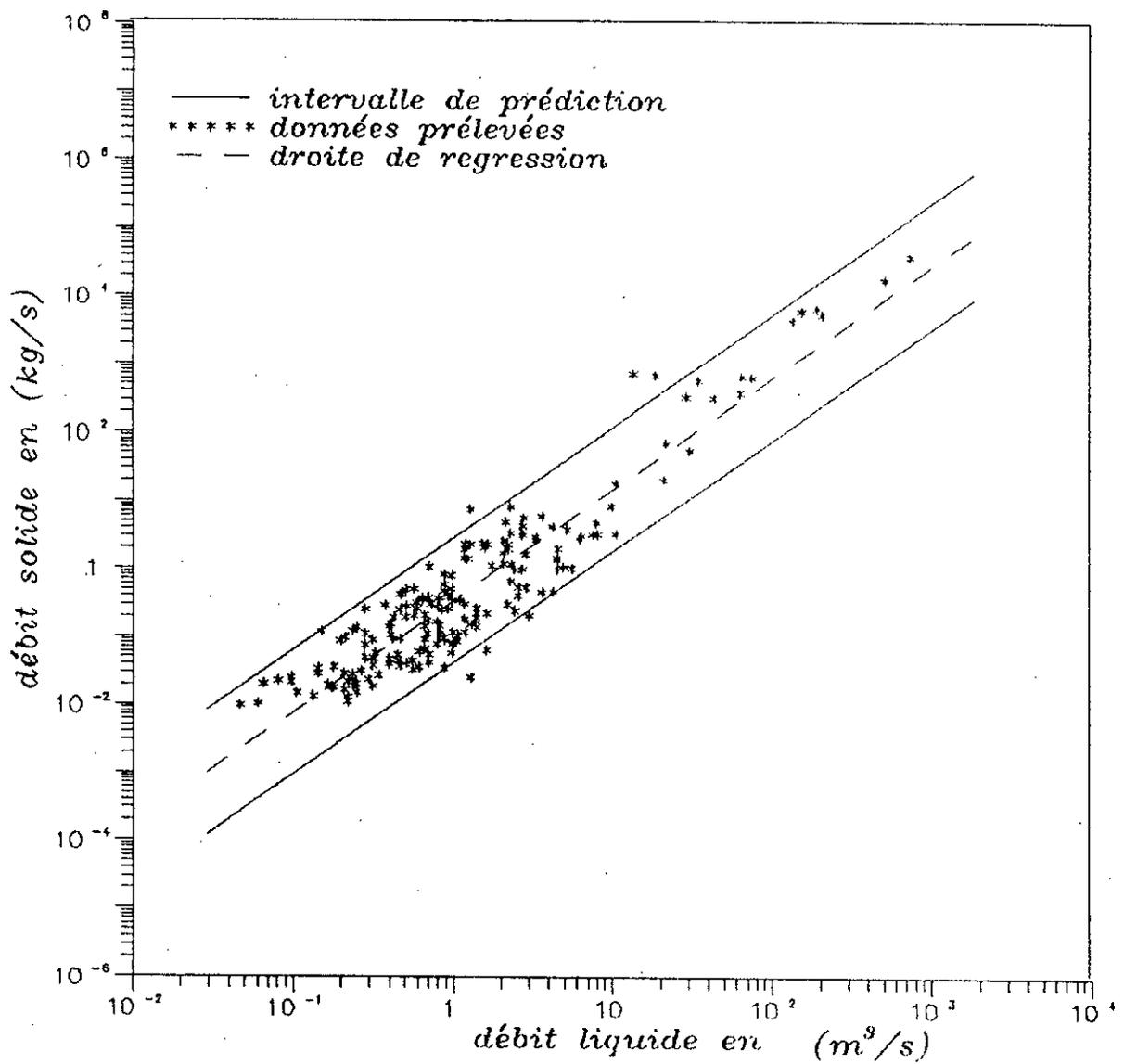


FIG.II.4.3: L'INTERVALLE DE PREDICTION

Les estimations par intervalle de confiance de ces caractéristiques pour un niveau de confiance de 95% sont:

- la moyenne : $\bar{X} \pm 0,90 \text{ m}^3 / \text{s}$,

- l'écart-type : $S \pm 0,64 \text{ m}^3 / \text{s}$.

La répartition de la statistique d'observation en classes nous a permis de tracer la courbe des débits classés (courbe des fréquences cumulées des débits liquides moyens journaliers) de cette série (figure II.4.4).

V. 6. Estimation des apports solides en suspension :

Le modèle des sédiments en suspension $Q_s = 0,34.Q^{1,65}$, combinée avec la courbe des débits classés (figure II.4.4) suivant les étapes citées dans le paragraphe III-5, fournit en résultat la masse de sédiments en suspension transportés dans le cours d'eau de TAFNA à différents pas de temps, tel qu'il est calculé dans le tableau II.4.1.

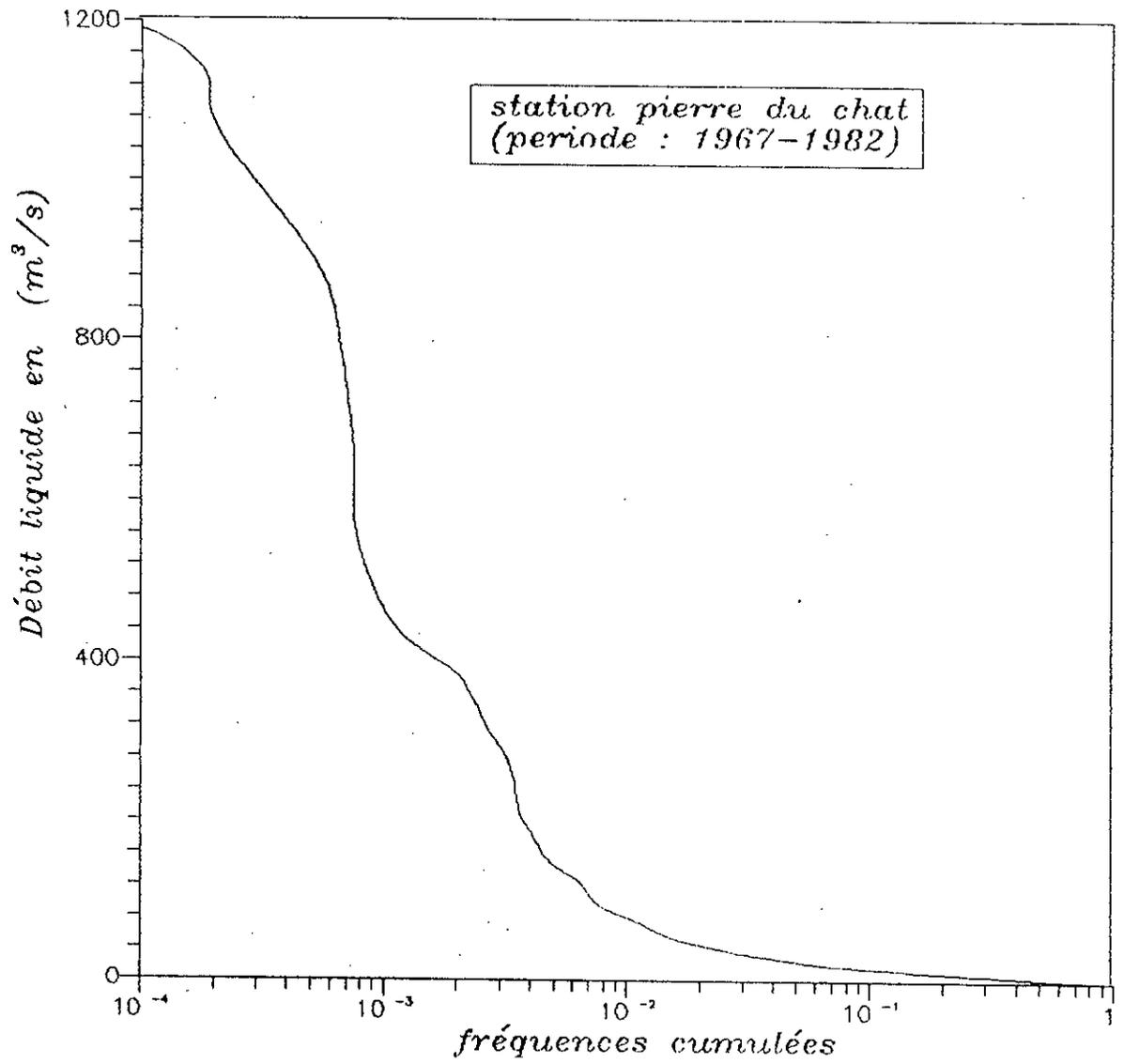


FIG.II.4.4: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA)

Tab.II.4.1 : Calcul des charges en sédiments du bassin TAFNA à la station PIERRE DU CHAT.

1	2	3	4	5	6	7
Bornes %	Interv alles	Média nes	Q (m ³ /s)	Qs (Kg/s)	Col 2 . Col 4 100	Col 2 . Col 5 100
0 - 0,01	0,01	0,005	1192,15	40497,53	0,119	4,000
0,01 - 0,03	0,02	0,02	1066,64	33706,10	0,213	6,710
0,03 - 0,05	0,02	0,04	941,17	27417,81	0,188	5,450
0,05 - 0,09	0,04	0,07	744,70	18631,51	0,298	7,420
0,09 - 0,1	0,01	0,95	470,58	8736,41	0,047	0,840
0,1 - 0,3	0,2	0,2	374,11	5983,25	0,748	11,930
0,3 - 0,5	0,2	0,4	188,23	1926,26	0,376	3,820
0,5 - 0,9	0,4	0,7	115,50	860,48	0,463	3,390
0,9 - 1	0,1	0,95	78,43	454,34	0,078	0,420
1 - 5	4	3	33,72	112,87	1,349	4,480
5 - 9	4	7	16,47	34,56	0,779	1,350
9 - 10	1	9,5	15,68	31,90	0,157	0,280
10 - 50	40	30	7,84	10,17	3,137	4,020
50 - 90	40	70	4,32	3,81	1,730	1,520
90 - 100	10	95	0,00	0,00	0,000	0,000
					9,68	55,64

Calculs :

* Charge annuelle de sédimentation :

$$Q_s \text{ (annuel)} = Q_s \cdot 3,154 \cdot 10^4 = 55,64 \cdot 3,154 \cdot 10^4 = 1,755 \cdot 10^6 \text{ T/an.}$$

* Apport spécifique de sédiments en suspension :

$$T_s = Q_s \text{ (annuel)} / \text{surface} = 1,755 \cdot 10^6 / 6900 = 254,35 \text{ T/Km}^2 \text{/an.}$$

* Concentration :

$$Q(\text{annuel}) = Q \cdot 3,154 \cdot 10^7 = 9,68 \cdot 3,154 \cdot 10^7 = 305,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an.}$$

$$C = Q_s / Q = 1,755 \cdot 10^3 / 305,30 = 5,75 \text{ g/l}$$

V. 7. Appli cation à l'échelle saisonnière :

Compte-tenu de l'influence saisonnière sur le phénomène des transports solides, nous avons naturellement cherché à établir des relations saisonnière entre débits liquides moyens journaliers et les débits solides en suspension moyens journaliers, et de tracer les courbes des débits classés saisonnières.

Pour les données de la station étudiée des groupements effectués suivant les saisons:

(1) AUTOMNE (Septembre - Octobre - Novembre),

(2) HIVER (Décembre - Janvier - Février),

(3) PRINTEMPS (Mars - Avril et Mai),

(4) ETE (Juin - Juillet - Aout);

SAISONS HUMIDES (AUTOMNE ET HIVER)

SAISONS SECHES (PRINTEMPS ET ETE)

* Le tableau II.4.2, donne pour la station étudiée les valeurs des coefficients de régression des relations saisonnières ainssi que les coefficients de corrélation corespondants. Les équations de régressions logarithmiques (ANNEXE I) sont de la forme:

$$\text{Log } (Q_s) = A \cdot \text{Log } (Q) + B$$

les relations recherchées sont de la forme :

$$Q_s = K \cdot Q^A \quad \text{avec} \quad K = 10^B$$

Tab II.4.2: RELATIONS SAISONNIERES, DEBITS LIQUIDE - DEBITS SOLIDES AU PAS DU TEMPS JOURNALIER.

SAISONS	NOMBRE DE POINTS	COEFFICIENTS DE LA DROITE DE REGRESSION			Coéfficient de corrélation	Relations
		A	B	K		
(1)	100	1,80	- 0,260	0,55	0,91	$0,55.Q^{1,80}$
(2)	100	1,63	-0,420	0,38	0,91	$0,38.Q^{1,63}$
(3)	100	1,46	- 0,275	0,53	0,88	$0,53.Q^{1,46}$
(4)	30	1,40	- 0,376	0,42	0,82	$0,42.Q^{1,40}$
Humides	200	1,68	- 0,346	0,45	0,91	$0,45.Q^{1,68}$
Sèches	130	1,45	- 0,30	0,50	0,86	$0,50.Q^{1,45}$

* Le tableau II.4.3, donne la taille et les paramètres estimés des series saisonnières pour le tracé des courbes des débits classés saisonnières (annexe II).

* Le tableau II.4.4, donne les estimations des débits liquides et solides en suspension saisonnière, calculés suivant les étapes citées avant.

TAB.II.4.3 : SERIES SAISONNIERES DES DEBITS LIQUIDES MOYENS JOURNALIERS

Saisons	Taille	moyenne avec intervalle de confiance	Ecart-type avec intervalle de confiance
(1)	1270	$5,19 \pm 0,80$	$14,67 \pm 0,57$
(2)	1350	$11,54 \pm 1,33$	$24,86 \pm 0,94$
(3)	1380	$14,65 \pm 3,10$	$58,84 \pm 2,19$
(4)	1310	$2,09 \pm 0,09$	$1,58 \pm 0,06$
Humides	2650	$8,48 \pm 0,8$	$20,75 \pm 0,56$
Seches	2690	$8,55 \pm 1,61$	$42,62 \pm 1,14$

TAB.II.4.4 : CALCUL SAISONNIERE DES CHARGES EN SEDIMENTS

Saisons	(1)	(2)	(3)	(4)	Humides	Seches
Q (m ³ /s)	6,62	11,45	15,14	2,15	9,12	10,21
Qs (Kg/s)	52,10	48,90	75,42	1,42	49,30	36,72

Calculs:

A/ Regroupement des 4 saisons:

* Charge annuelle des sédiments en suspension:

$$Q_s(\text{annuel}) = \sum Q_s(\text{saisonnieres}) = 1,405 \cdot 10^6 \text{ tonnes/an.}$$

* Apports spécifiques de sédiments en suspension :

$$T_s = Q_s(\text{annuel})/\text{surface} = 1,405 \cdot 10^6 / 6900 = 203,63 \text{ tonnes/Km}^2/\text{an}$$

B/ Regroupement des saisons humides et saisons seches :

* Charges annuelle de sédiments en suspension :

$$\begin{aligned} Q_s(\text{annuel}) &= Q_s(\text{saisons humides}) + Q_s(\text{saisons seches}). \\ &= 7,752 \cdot 10^5 \text{ tonnes} + 5,806 \cdot 10^5 \text{ tonnes} = 1,360 \cdot 10^6 \text{ tonnes/an.} \end{aligned}$$

* apports spécifiques de sédiments en suspension :

$$T_s = Q_s(\text{annuel})/\text{surface} = 1,360 \cdot 10^6 / 6900 = 197,10 \text{ tonnes/Km}^2/\text{an.}$$

V. 8. Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus peuvent être discutés à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif.

a. Sur le plan qualitatif :

les résultats du modèle d'ajustement à deux dimensions (débit liquide, débit solide) obtenus sont, pour le moins, non décevants.

* Le coefficient de corrélation à l'échelle annuelle est largement significatif du fait que 93% de la variation des débits solides est expliquée par le modèle établi.

*A l'échelle saisonnière, le degré de signification du coefficient de corrélation varie d'une saison à une autre, mais les liaisons débit liquide-débit solide reste en général significatifs.

Une autocorrélation existe entre les variables explicatives. En pratique, cette liaison est justifiée par le fait que l'occurrence de l'événement débit solide n'est possible que s'il y a occurrence de l'événement débit liquide.

Les parties non expliquées par le modèle peuvent être dues à des fluctuations aléatoires (des variations aléatoires) résultantes par suite de la discontinuité spatio-temporelle du processus érosion-transport.

L'amélioration de ces modèles exige la recherche d'autres variables qui influent sur le comportement du phénomène.

Ainsi, les relations établies entre débit liquide et débit solide peuvent servir de base pour:

- * le comblement des lacunes d'observation et par suite, l'évaluation des apports solides à différents pas de temps.
- * L'amélioration des paramètres statistiques des séries courtes des débits solides par corrélation avec les séries longues des débits liquides.
- * L'interprétation du phénomène des transports solides.

b. Sur le plan quantitatif :

La quantité des sédiments en suspension fournie par le bassin versant étudié (apport du bassin versant) paraît faible et pourtant, soumis à des conditions physiques et climatiques très variables, mais rien ne précise l'ordre de grandeur de l'écart entre la réponse et la réalité, puisque même l'application du modèle de TIXERONT donne des valeurs faibles ($< 300T/Km^2/an$).

Ce bassin de TAFNA paraît moins érodable avec un apport solide spécifique inférieur à $260 tonnes/Km^2/an$; cela est dû au fait que ce bassin est perméable et est très résistant.

On remarque que l'application à l'échelle saisonnière a donné des résultats (apport solide du bassin) plus faibles, on peut expliquer cela par le problème de l'échelle temps, car une moyenne peut masquer l'intensité et la variabilité des phénomènes extrêmement irréguliers.

Enfin, on considère les résultats qualitatifs comme les plus importants.

V. 9. Travail futur :

Dans cette étude, une contribution à la modélisation statistique pour l'évaluation des apports solides a été appliquée, où la suspension seule a été prise en considération. Les résultats obtenus sont très encourageant, mais il est évident qu'une étude plus poussée doit être envisagée.

Les points suivants sont intéressants pour apporter une amélioration à cette technique et généraliser son utilisation:

a. La deuxième approche que nous avons jugé meilleure que la précédente et qui fait appel au modèle d'ajustement, consiste à réaliser des échantillons multidimensionnels (débit liquide et intensité de la précipitation) des variables de cause qui seront injectées dans le modèle d'ajustement, pour en tirer la réalisation de la variable conséquence (débit solide), puisque l'irrégularité pluviométrique contribue à accroître l'agressivité climatique sur le processus érosion -transport solide.

b. Pour les besoins de la conception et la gestion, le modèle d'ajustement devrait être amélioré afin de couvrir le transport par charriage.

c. Aborder le problème de la révision des débits solides à l'échelle de l'événement de crue, car l'intensité du phénomène se manifeste essentiellement en périodes de crues. C'est ainsi que les fortes crues de Mars 1974 qui ont touché particulièrement la région de l'algérois ont transité en 3 jours près de 30 millions de tonnes de sédiments à travers les bassins cotier de l'algérois.

d. Pour d'autres travaux, il est intéressant aussi d'entreprendre une étude factorielle du phénomène, afin de mettre en évidence les principaux facteurs qui entrent en jeu.

Ainsi, les résultats qui seront estimés pourront être considérés comme plus réalistes et comparables aux données recueillies in situ. Par conséquent, on devrait aussi concentrer les efforts à des récoltes correctes de données.

CONCLUSION

La présente thèse vient de s'ajouter aux travaux théoriques, expérimentaux et numériques effectués dans le domaine du transport solide dans les cours d'eau. Malgré toutes ces études, il n'existe aucun modèle théorique ou procédure de calcul à l'époque actuelle, qui puisse être acceptée comme parfaite, cela est dû au fait que les paramètres régissant ce phénomène sont très complexes et parfois mal connus, d'autre part, il est très difficile de déterminer avec précision les relations entre eux.

Dans de telles circonstances, on a essayé à travers ce travail d'éclaircir ce phénomène, en effectuant d'une part une synthèse bibliographique sur les différents mécanismes courants au transport solide, d'autre part, de contribuer à une modélisation statistique du transport solide en suspension pour l'évaluation des apports solides transportés par le cours d'eau, afin de mieux cerner le dimensionnement des ouvrages hydro-techniques d'accroître leur durée de vie, de réduire le coût de réalisation et d'améliorer leur exploitation.

A la lumière de notre étude nous noterons les points suivants:

- La genèse, les transports et dépôts des sédiments sont des processus très complexes : ils englobe l'érosion des sols, le dépôt au pied des versants le sapement et effondrement des berges, le transport dans le réseau hydrographique, le charriage de fond, la transformation et eutrophisation des cuvettes, l'ensablement des estuaires et la formation des deltas. Ces processus à discontinuité temporelle et spatiale restent difficiles à quantifier individuellement, chacun d'entre eux étant étroitement lié.

CONCLUSION

- Si la technologie des ouvrages de dérivation, d'accumulation, de captage, de mise en oeuvre d'équipements hydromécaniques, etc... , progresse, les problèmes posés par le transport solide restent toujours complexes.

- La mise au point de méthodes pour l'évaluation des apports solides demeure l'objectif fondamental de la recherche en sédimentologie.

- Le transport solide est sans doute le domaine de l'hydraulique le plus mal connu à ce jour; si DE SAINT VENANT a pu il y'a un siècle , établir les fameuses équations qui font toujours autorité dans la modélisation hydraulique, il n'existe rien encore d'équivalent en transport solide.

- Nous pouvons dire que jusqu'à présent les méthodes d'étude du transport des sédiments étaient coincées en quelque sorte entre:

⇒ D'une part, les études analytiques, d'où de très sévères contraintes ; les formules ne pouvaient être que relativement pauvres vis à vis de la complexité des paramètres.

⇒ D'autre part, les contraintes également profondes des modèles physiques , et notamment celles découlant des lois de similitude.

Avec la disposition des techniques de collectes de données sur les apports (solides, liquides, ...) disponibles à l'heure actuelle à l'A.N.R.H. est le développement rapide de l'informatique, nous sommes convaincus que le travail que nous avons présenté donnera une possibilité de contrôler et d'étudier les résultats de l'exploitation de ces techniques pour la détermination et la prévision des apports solides en tout point du territoire.

Pour conclure, cette étude nous ne pouvons la qualifier de parfaite car ceci ne présente qu'une étape d'une étude à laquelle peuvent s'ajouter d'autres projets.

CONCLUSION

Donc le travail effectué, ne prétend recouvrir l'ensemble des problèmes présents dans le vaste domaine de l'hydraulique de la sédimentation. La contribution à la modélisation des transports solides en suspension que nous avons présentée ici, a plus modestement l'ambition de fournir un outil de prévision des apports solides transportés par les cours d'eau; pouvant ainsi permettre une étude plus poussée.

ANNEXE I

LES DROITES D'AJUSTEMENT

SAISONNIERES

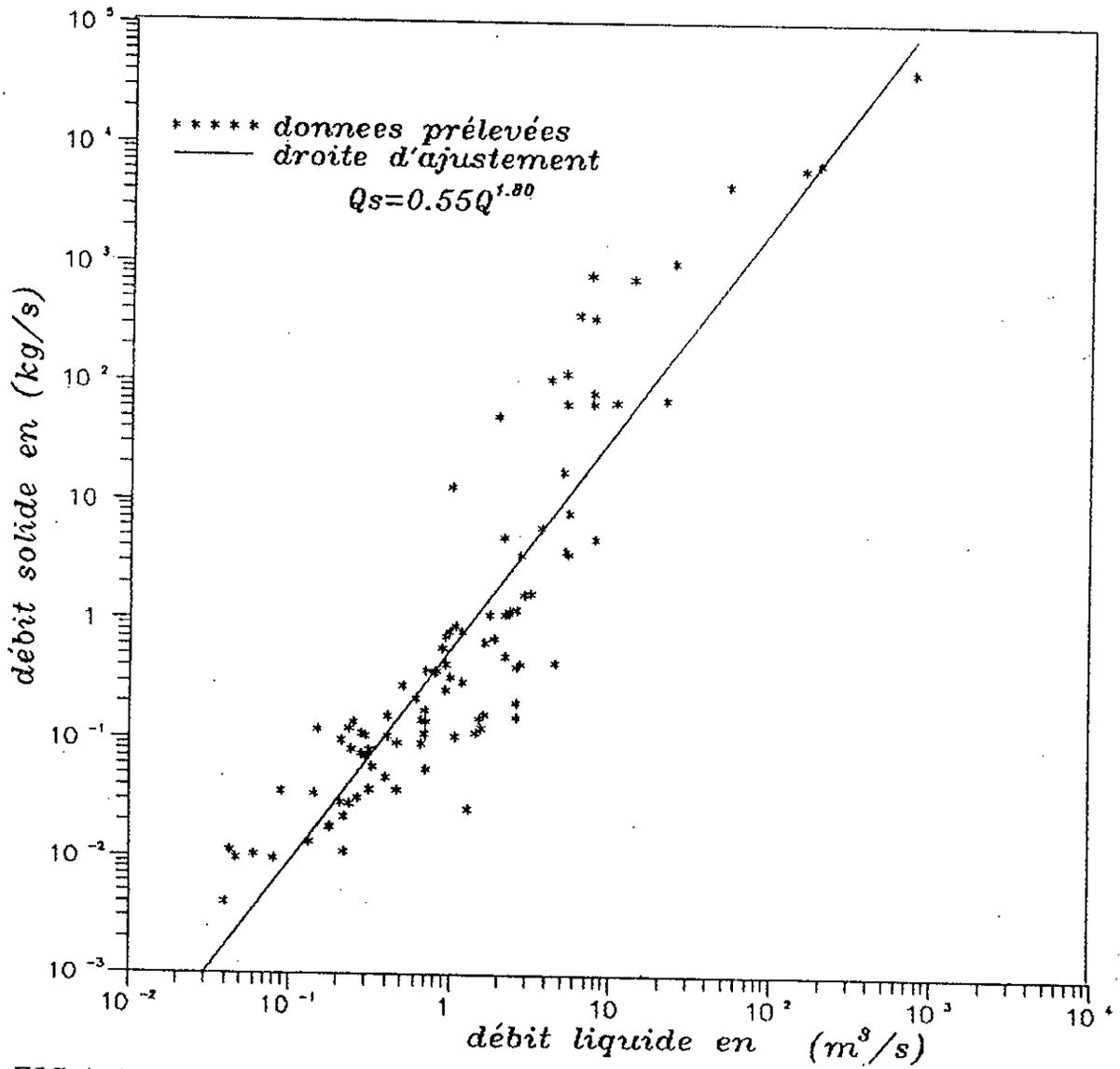


FIG.A.1.1:
DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, SAISONS D'AUTOMNES)

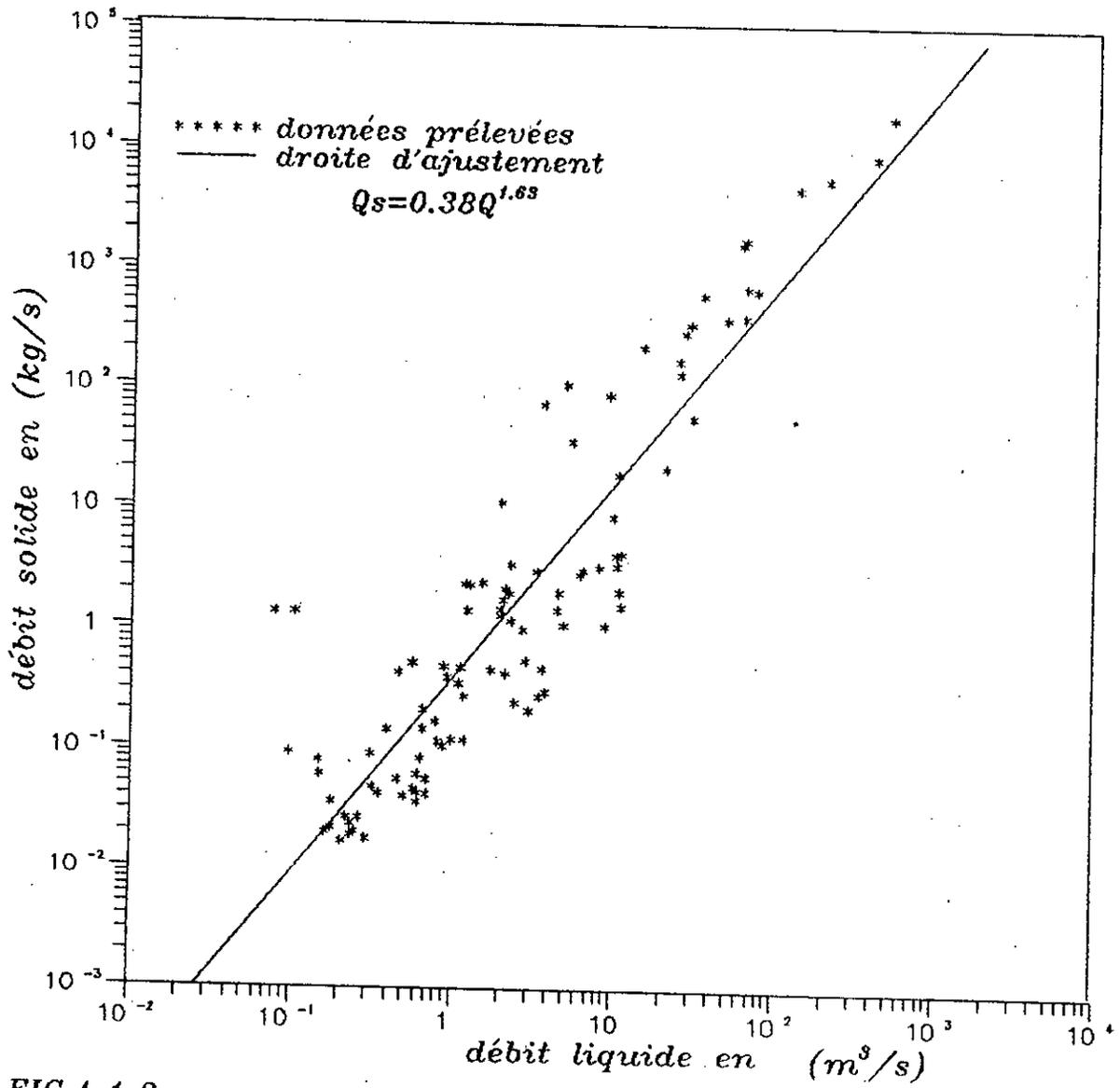


FIG.A.1.2:
DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, SAISONS D'HIVER)

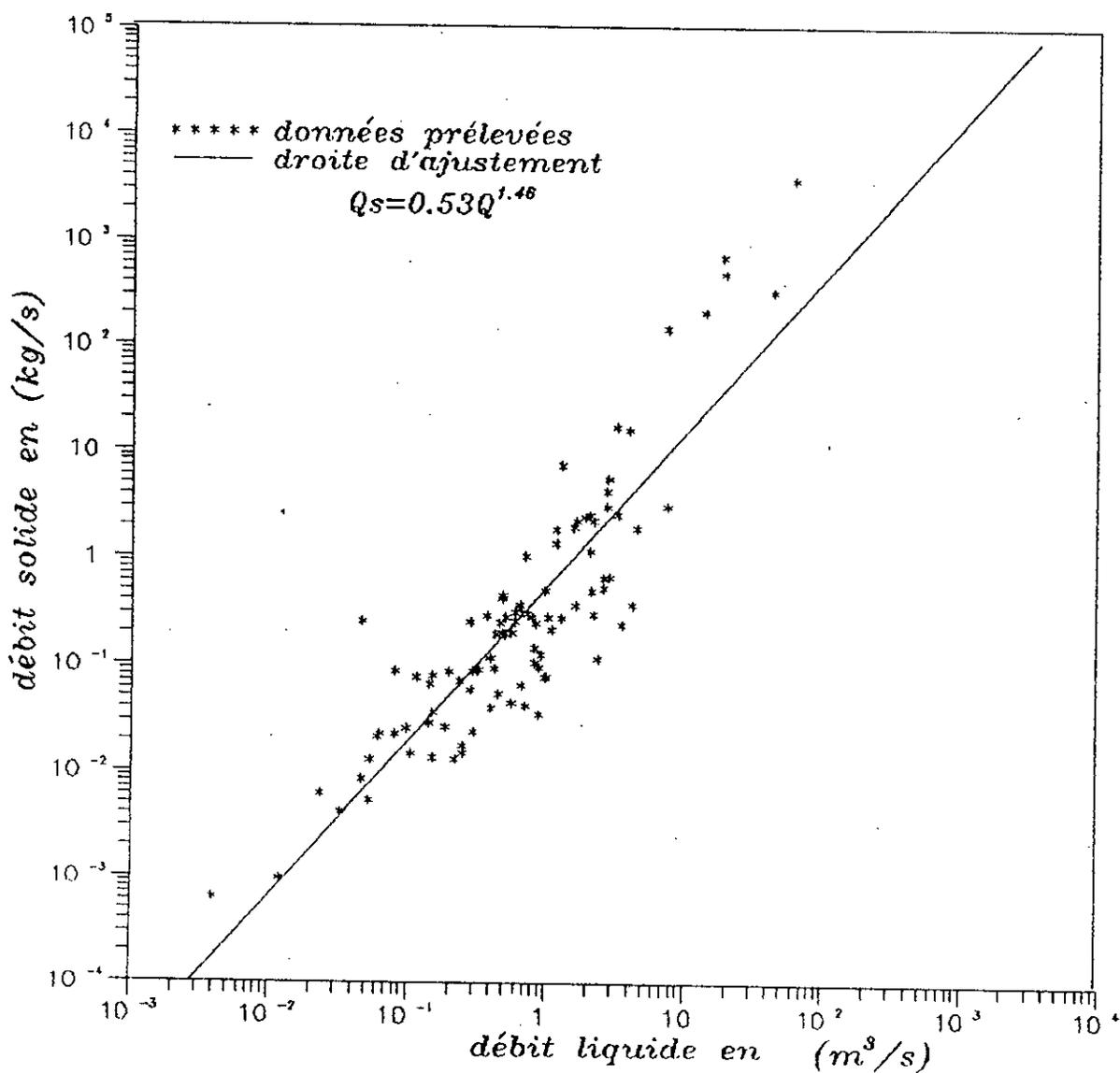


FIG.A.1.3:
DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, SAISONS DE PRINTEMPS)

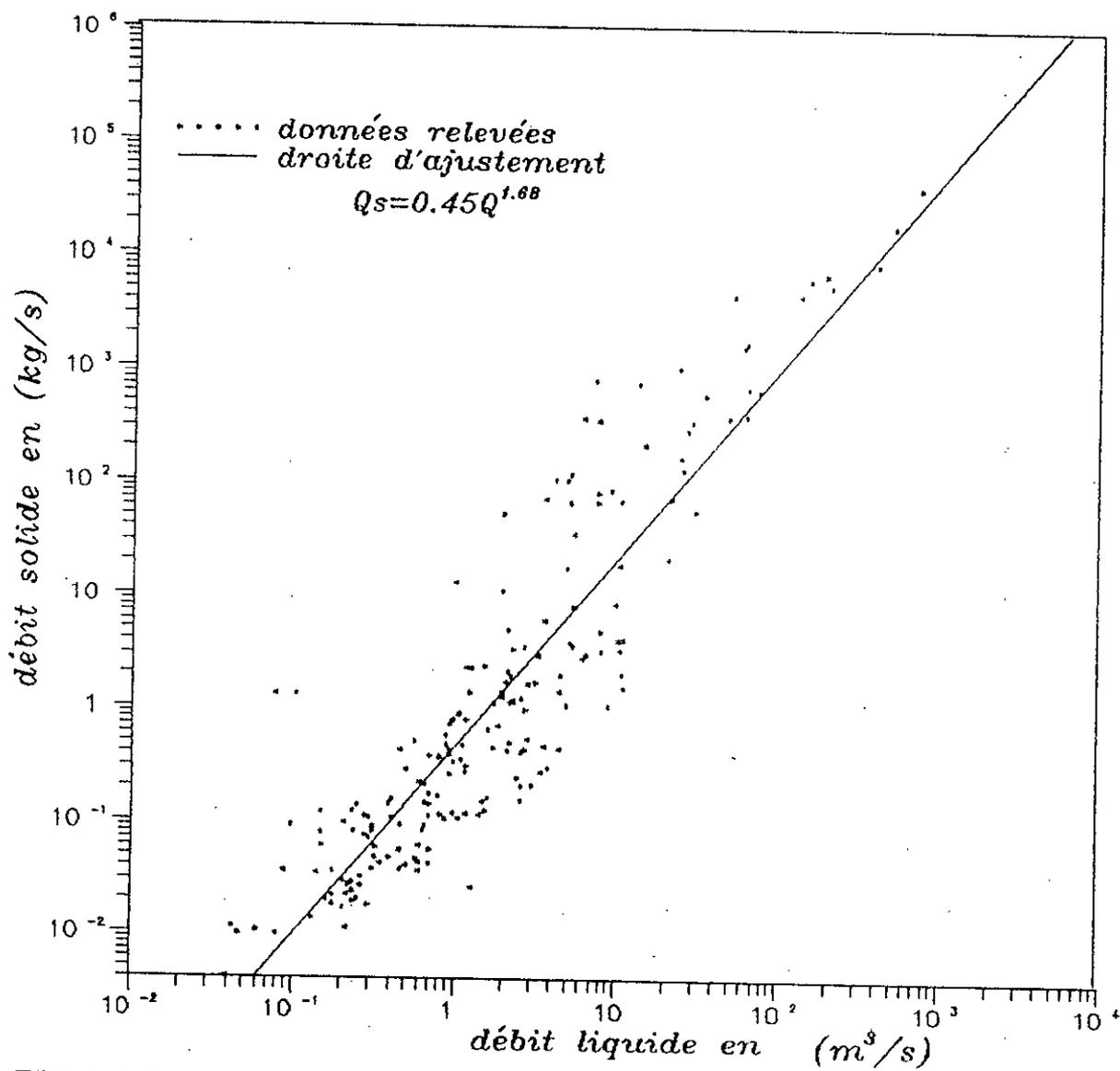


FIG.A.1.5:
DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, SAISONS HUMIDES)

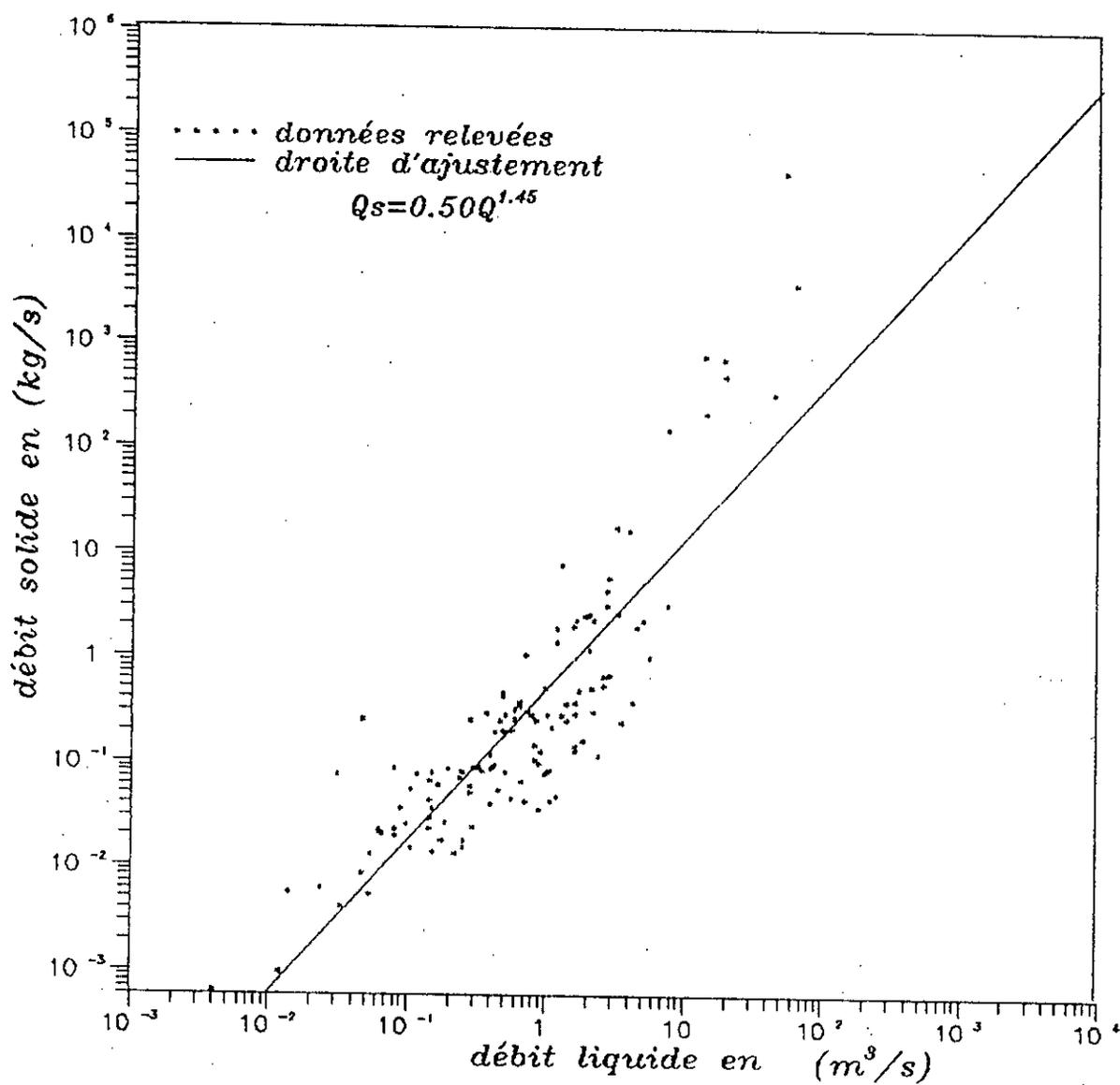


FIG.A.1.6:
DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
(BASSIN TAFNA, SAISONS SECHES)

ANNEXE II

LES COURBES DES DEBITS CLASSES

SAISONNIERES

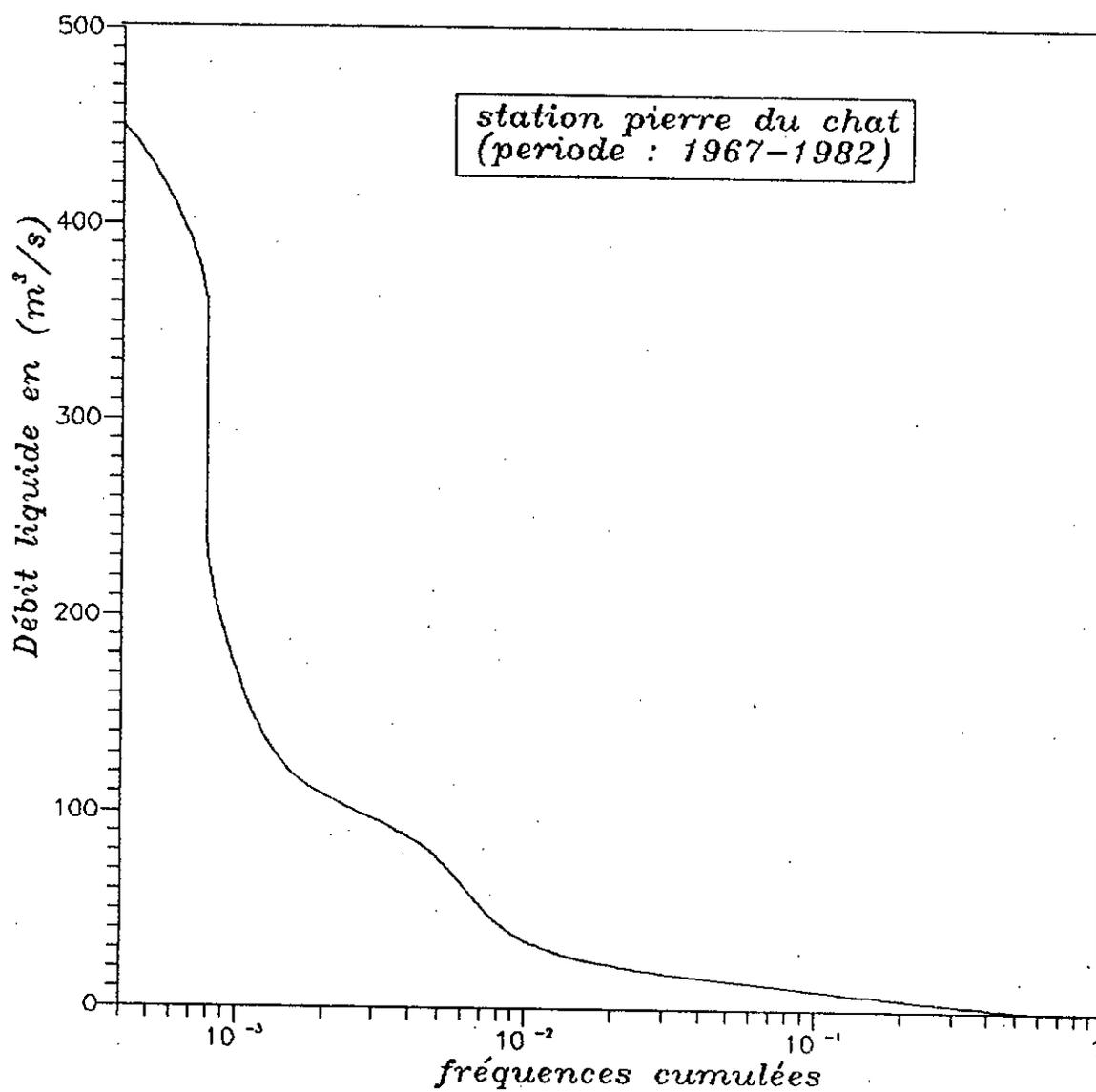


FIG.A.2.1: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS D'AUTOMNE)

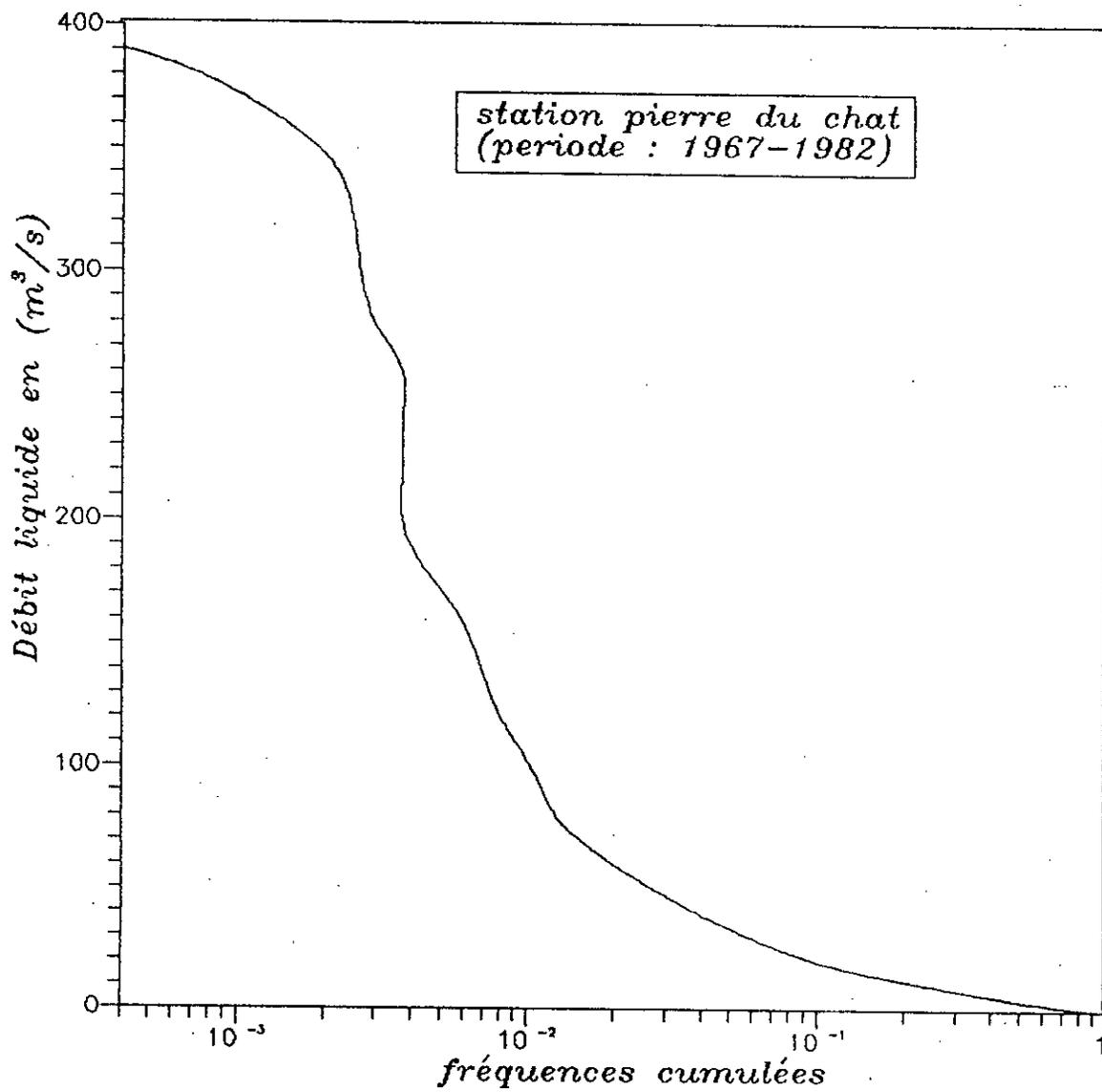


FIG.A.2.2: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS D'HIVER)

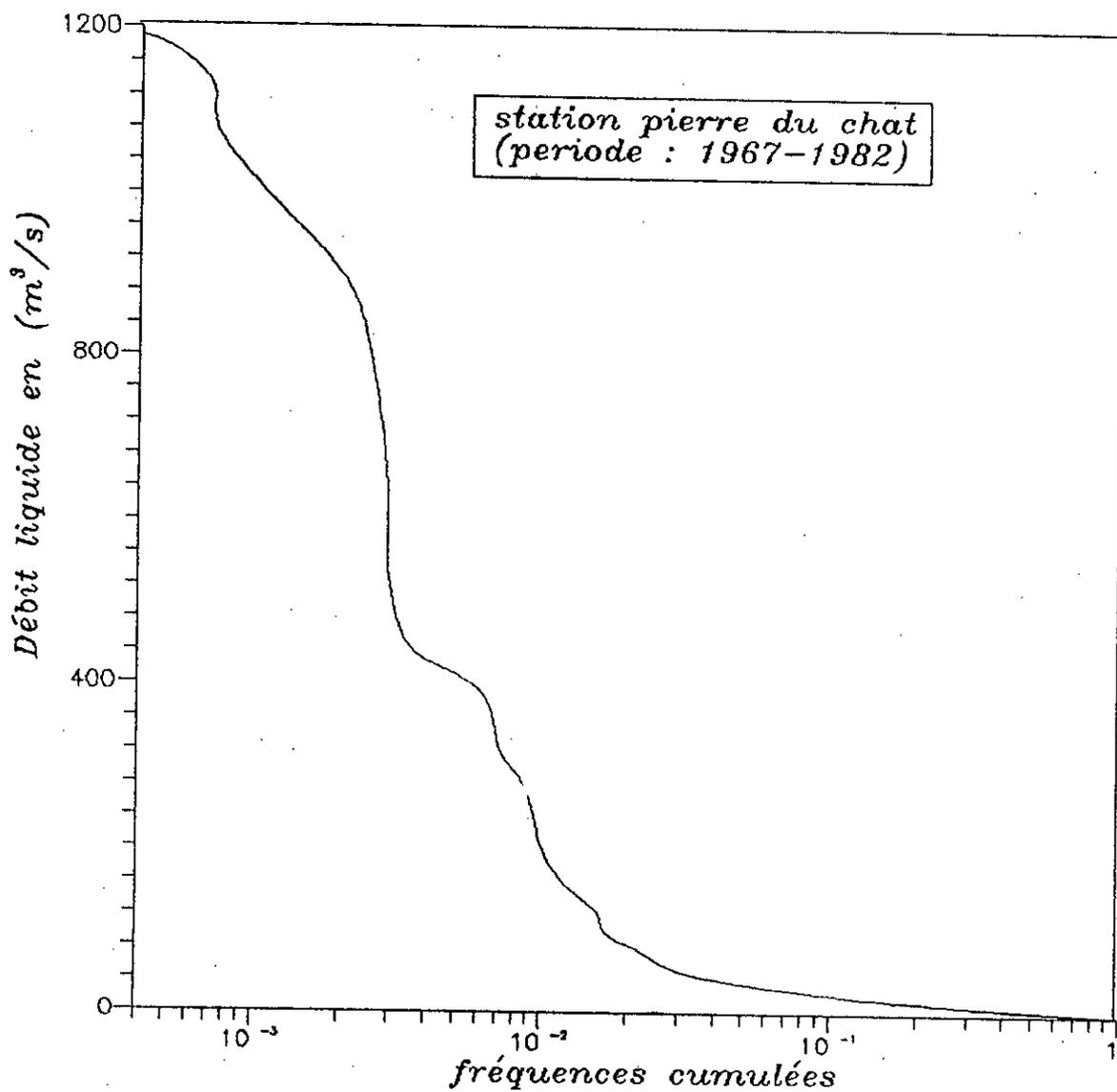


FIG.A.2.3: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS DU PRINTEMPS)

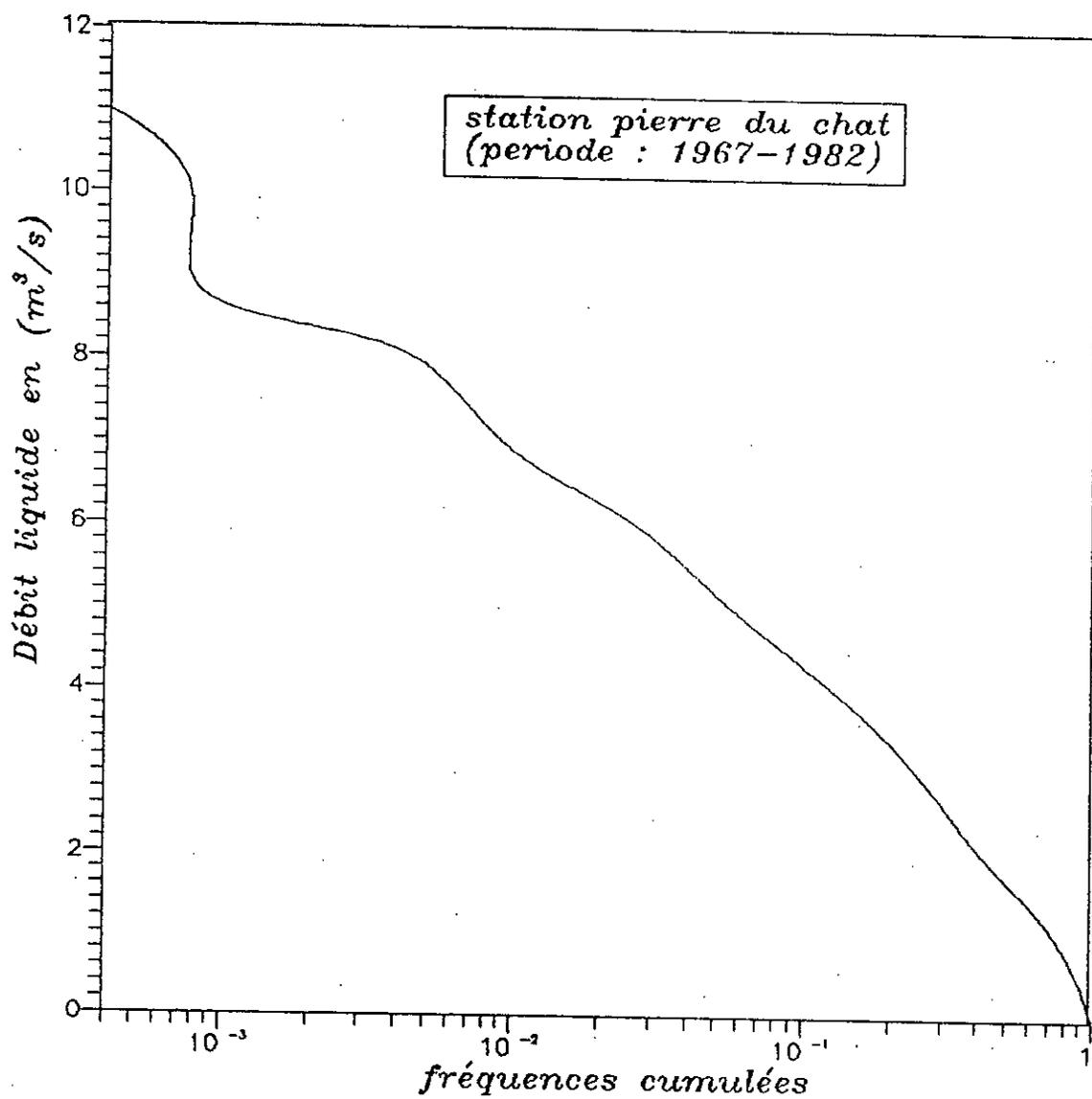


FIG.A.2.4: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS D'ETE)

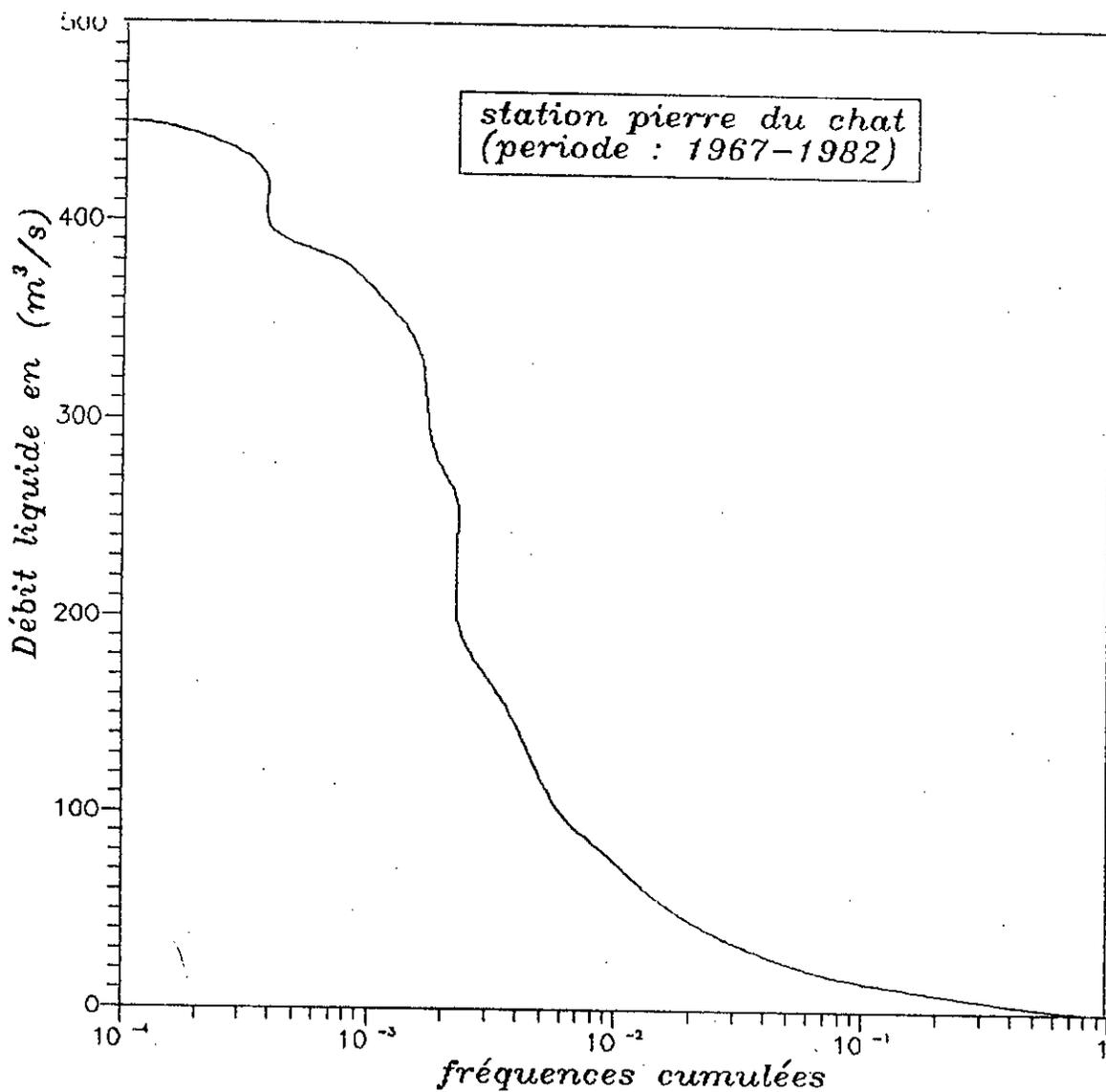


FIG.A.2.5: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS HUMIDES)

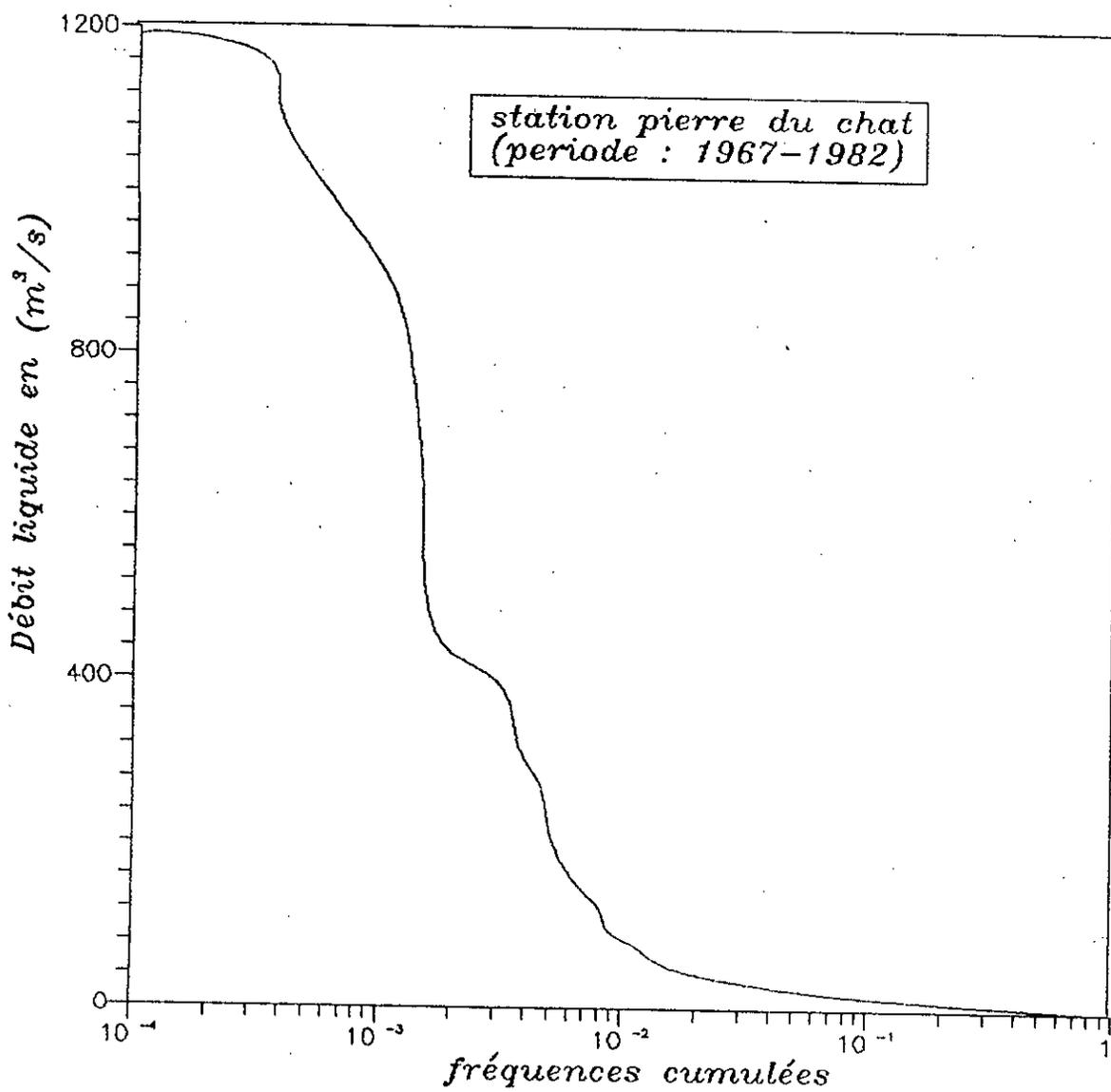


FIG.A.2.6: COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN TAFNA, SAISONS SECHES)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. A.S.C.E : « Sediment Control Methodes » , American Society of Civil Engineers, Hydraulics Division, April 1973.
- [2]. BENBLIDIA : « Cours d'hydrologie », Ecole d'ingénieurs des travaux publiques d'Alger, photocopié, 1973.
- [3]. BOUVARD.M : « Barrages mobiles et ouvrages de dérivation » , Edition Eyrolles. PARIS ,1984.
- [4]. BOWKER.A.H: « Méthodes statistiques de l'ingénieur », Edition Dunod, Paris, 1965.
- [5]. BRUNE.G.M. « Trape efficiency of reservoirs », Transaction of American Geophysical Union, vol.34,N° 3,p.407-418,1953.
- [6]. BUREAU OF RECLAMATION : Feasibility Design Report Tao Vaca Dam, U.S.Dept. Interior,1967.
- [7]. CHOW.V.T: « Applied hydrology » , McGRAW-HILL Edition, Singapore, 1988.
- [8]. DEMMAK.A : « Etude sur l'érosion et le transport solide » Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de PARIS ,1982.
- [9]. DUQUENNOIS : »Sédimentation dans les barrages réservoirs et moyen de lutte », colloque international, Université de LIEGE , 4 et 5 Mai 1969.
- [10]. GOURDIN.A : « Méthodes numériques appliquées », O.P.U.ALGER,1991.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [11]. GUPTA.R.S: « Hydrology and hydraulic systems », Pentrice Hall Edition, New Jersey.U.S.A,1989.
- [12]. HENENSAL-P: « L'érosion extrême des sols par l'eau: approche quantitative et mécanismes », Rapport de recherche L.P.C. N° 138, PARIS , Mars 1986.
- [13]. LARRAS.J : « hydraulique et granulats », Edition Eyrolles, PARIS, 1982.
- [14]. LINSLEY.R.K : « Hydrology for Engineers », International Student Edition; Singapore , 1984.
- [15]. MACHANE.R : « L'hydraulique de la sédimentation des retenues: Une approche par modèle mathématique de la formation de deltas » thèse d'ingénieur, E.N.P. d'Alger, 1993.
- [16]. MOREAU.M : « Statistique appliquée à l'expérimentation » ; Edition Eyrolles, PARIS, 1979.
- [17]. NAKATO.T : « Mississipi River Shoaling : a diagnostic study », American Society of Civil Engineers, Hydraulics Division, NOVEMBER 1979.
- [18]. REMENIERAS.G : « L'hydrologie de l'ingénieur », Edition Eyrolles, PARIS, 1972.
- [19]. REMINI.B : « Etude hydrodynamique du mécanisme d'envasement », Thèse de Magistère, E.N.P d' ALGER, 1990.
- [20]. SPIEGEL.M.R : « Probabilités et statistiques », McGRAW-HILL Edition, NEWYORK, 1975.