

25.06.  
13-14

Beilwin - fin de dur.

10/96

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE DE POLYTECHNIQUE  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Departement : Génie hydraulique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### THÈME

**Contribution à la modélisation des pluies de courte durée**

Proposé par :

Mr. M. CHERRARED

Etudié par :

Mr. M. IBRAHIM  
Mr. A. HANAFI

Dirigé par :

Mr. M. CHERRARED

PROMOTION

Juin 1996

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية  
MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique  
Département : Génie hydraulique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### THÈME

**Contribution à la modélisation des  
pluies de courte durée**

Proposé par :

Mr. M. CHERRARED

Etudié par :

Mr. M. IBRAHIM  
Mr. A. HANAFI

Dirigé par :

Mr. M. CHERRARED

PROMOTION

Juin 1996

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail à mes parents, à qui je dois tout.  
A ma famille et à tous ceux qui me sont chers.

Abderrezak.

Je dédie ce modeste travail à mes parents.  
A mon frère et ami Amar et à tous ceux qui ont mon estime.

Mourad.

## AVANT - PROPOS

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Mr M.CHERRARED, qui en dirigeant ce travail nous a fait profiter de sa connaissance, de ces conseils, de son aide et son soutien et de l'intérêt bienveillant qu'il nous a témoigné. Qu'il soit remercié pour les nombreuses discussions, que nous avons eu, et par l'intérêt qu'il montre à notre travail.

Nous tenons aussi notre remerciement à Mr. CHAABANE pour sa serviabilité avec la plus grande sympathie qu'il nous a toujours manifesté. Qu'il trouvera ici l'expression de notre profonde gratitude.

On tient à présenter également nos sincères remerciements aux ingénieurs et techniciens du service de climatologie de l'A N R H en particulier, Mr. ALILI pour l'aide qui nous a été offerte.

Que l'ensemble des enseignants de l'école nationale polytechnique (E. N. P) qui ont contribué à notre formation trouve à travers ces quelques lignes l'expression de notre humble reconnaissance.

Enfin, nous voulons exprimer nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

هذا البحث عبارة عن مساهمة تدخل في إطار مشروع شامل لإنشاء خريطة تساقط الأمطار قصيرة المدة ، وبصفة خاصة محاولة تعميم منحنيات الشدة - المدة - التواتر ( ش . م . ت ) جهويا .

الفكرة الأساسية للبحث تكمن في ربط الشدة المتوسطة القصوى بالإرتفاع اليومي للأمطار ، من خلال معطيات مأخوذة من محطة قياس ارتفاع وشدة الأمطار .

## Abstract

This present study is a contribution to a global project for establishment of a cartography of short duration rainfall, in particular the regionalisation of Intensity Duration - Frequency curves.

The basic idea of this study is to fasten the mean maximal intensity with the pluviometric height by an empirical models.

## Résumé

Ce present travail est une contribution qui entre dans le cadre d'un projet global d'établissement d'une cartographie des pluies de courte durée, et en particulier la regionalisation des courbes d'intensité - durée - fréquence ( I. D. F ).

L'idée de base de cette étude est de lier l'intensité moyenne maximale à la hauteur pluviométrique journalière par modèles empiriques à partir des données recueillies dans une station mixte ( pluviométrique, pluviographique ).

# ERRATA

Page	Erreur	Correction
27	pluie isolées	pluies isolées
30	de la pluie, isolée	de la pluie isolée,
33	$E(\xi_i \xi_j) = 0$	$E(\xi_i \xi_j) = 0$
39	manière	manière
49	la table e présente	La table se présente
55	Intervalle	Intervalles
55	à 3 heur	à 3 heures
79	été imposées	été inspirées
79	et celui	est celui

Introduction générale ..... 1

Chapitre I.

Critique et Traitement des Données

I. 1. Introduction ..... 4

I. 2. Nature des problèmes ..... 5

I. 3. Source des données ..... 5

I. 4. Choix de la station ..... 6

I. 5. Dépouillement préliminaire ..... 6

    I. 5. 1. Fichier pluviométrique ..... 6

    I. 5. 2. Fichier pluviographique ..... 8

        a. Procédé de digitalisation ..... 8

        b. Critique de la digitalisation ..... 9

        c. Format de fichier adopté par l'ANRH ..... 12

    I. 5. 3. Problèmes rencontrés dans les fichiers pluviographiques et pluviométriques ..... 13

        a. Fichier pluviographique ..... 13

        b. Fichier pluviométrique ..... 14

I. 6. Contrôle des données ..... 14

    I. 6. 1. Détection des anomalies ..... 15

        a. Fichier pluviométrique ..... 15

        b. Fichier pluviographique ..... 16

    I. 6. 2. Etude graphique de la relation  $H_{PG} = f(H_{PV})$  ..... 18

        a. Ajustement ..... 18

        b. Application à l'échelle saisonnière ..... 19

    I. 6. 3. Correction des anomalies ..... 19

I. 7. Traitement des données pluviographiques ..... 23

    I. 7. 1. Nouveau format du fichier pluviographique ..... 23

## Chapitre II.

### Traitement Statistique et Analytique

II. 1. Evaluation des paramètres .....	26
II. 1. 1. Choix des paramètres à analyser .....	26
II. 1. 2. Calcul de $I_M$ ( intensité moyenne maximale ) .....	28
II. 2. Notion d'échantillonnage .....	31
II. 2. 1. Population et échantillon .....	31
II. 2. 2. Paramètres d'une population .....	31
a. Moyenne d'un échantillon .....	31
b. Variance d'un échantillon .....	31
c. Ecart-type d'un échantillon .....	32
d. Covariance .....	32
II. 2. Méthodes régressives - Corrélacion .....	32
II. 3. 1. Introduction .....	32
II. 3. 2. Modélisation .....	33
a. Ajustement par un modèle de régression linéaire .....	33
b. Transformation des variables .....	34
c. Estimation des paramètres par la méthode des .....	34
moindres carrés	
d. Propriétés statistique des estimateurs .....	37
II. 3. 3. Equation de la l'analyse de la variance .....	39
II. 3. 4. Coefficient de détermination .....	43
II. 3. 5. Estimation de Biais de $\sigma^2$ .....	44
II. 3. 6. A N O V A de la table de régression .....	47
a. le F-test de la signification d'une régression .....	47
b. Table de l'analyse de la variance .....	49
II. 3. 7. Autre test d'hypothèse sur $\beta$ - Intervalle de .....	49
confiance pour $\beta$ et $\alpha$	
II. 3. 8. L'examen des résidus .....	50
II. 3. 9. Les points aberrants ( outliers ) .....	52



## Chapitre III.

### Etude et Recherche de Modèles

III. 1. Introduction .....	54
III. 2. Définitions et remarques .....	55
III. 3. Etude de la répartition $H_{PG} = f(\text{Durée de la pluie})$ .....	55
III. 4. Etude de la relation $I_M = f(H_{PV})$ .....	57
III. 4. 1. Prise en compte de toute la période d'observation .....	57
a). Interprétation .....	57
III. 4. 2. Prise en compte de l'effet saisonnier .....	57
III. 5. Etude des relations $I_M = f(I)$ et $\frac{I_M}{I} = f(H_{PV})$ .....	62
III. 5. 1. Interprétation .....	62
III. 6. Prise en compte d'un coefficient de " remplissage " .....	65
III. 6. 1. Résultats et interprétations .....	68
III. 7. Conclusions .....	68
III. 8. Perspectives .....	79
<b>Organigrammes généraux</b> .....	<b>81</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>91</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>93</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>118</b>

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

---

La particularité du climat Algérien pose avec acuité le problème de la maîtrise de la gestion rigoureuse des ressources hydriques, du fait de l'irrégularité et de la rareté de sa pluviométrie.

Des études hydrologiques plus ou moins poussées sont indispensables dès le début de la mise sur pied de tout projet d'aménagement hydraulique ( A E P Assainissement Drainage, irrigation ... ). Le dimensionnement, la sécurité et la bonne exploitation des ouvrages hydrauliques sont toujours liés à une évaluation efficace des différents éléments du bilan hydrologique.

Mis à part les débits d'un cours d'eau - seul paramètre du bilan hydrologique d'un bassin pouvant être mesuré globalement avec une précision acceptable - les autres paramètres hydrologiques, tels que les précipitations, l'évaporation, etc ..., ne peuvent être qu'estimés par des modèles empiriques généralement établis à partir des séries de données observées sur des périodes de durée souvent insuffisantes. En outre, ces mesures couvrent la plupart du temps des zones géographiques insuffisantes, comme c'est le cas du réseau pluviographique en Algérie.

L'avenir de la recherche hydrologique est strictement conditionné par la qualité et la pérennité des réseaux de mesure permanents, indispensables à la mise en oeuvre d'une politique de l'eau cohérente à long terme.

Tel qu'il est conçu et étant donné l'irrégularité du régime pluviométrique de l'Algérie, le réseau d'observations de la pluviométrie de l'Agence nationale des ressources hydriques ( A N R H ) n'est pas suffisamment dense pour pouvoir répondre aux besoins des applications opérationnelles et/ou aux objectifs de développement. Il est intéressant de noter que le réseau pluviométrique de la Grande Bretagne comporte environ 6800 stations mixtes, sur une superficie dix (10) fois plus petite que celle de l'Algérie, ce qui est équivalent à une densité quatre (04) fois plus forte qu'en France ( G. Réménieras).

Ce déficit est encore plus significatif quant il s'agit de mesures pluviographiques ( intensités instantanées des précipitations ), puisqu'un poste pluviométrique sur dix seulement dispose d'un pluviographe ( associé au pluviomètre ) en fonctionnement permanent.

Pour pallier le mieux possible au manque d'enregistrements pluviographiques indispensables à la gestion de l'environnement urbain ( en particulier le dimensionnement des réseaux d'assainissement pluvial ), il est nécessaire de recourir à la modélisation mathématique ( statistique ).

## INTRODUCTION GENERALE

---

Notre présent travail représente une modeste contribution qui entre dans le cadre d'un projet global d'établissement d'une cartographie des pluies de courte durée, initié par l'A N R H, il concerne en particulier la régionalisation de courbes Intensité - Durée - Fréquence ( I D F ), sur toute la partie nord du territoire Algérien.

L'idée de base de cette étude est d'élaborer des modèles empiriques à partir de données recueillies dans une station mixte ( pluviographique " PG " et pluviométrique " PV " ), les données " PV " servant au calibrage des modèles. Ces modèles seront par la suite applicable aux stations " PV " pour générer les tracés " PG " les plus probables afin de combler le déficit d'information. Cette solution est certes moins exacte que celle basée sur la densification du réseau de mesure, mais elle est incontestablement la plus accessible actuellement dans notre pays.

L'étude est réalisée selon le plan suivant :

Après une étude critique et un traitement des données pluviométriques et pluviographiques de base dans le CHAPITRE I. Une analyse statistique des paramètres à modéliser et une présentation théorique de la méthode de corrélation a constitué l'essentiel du CHAPITRE II.

Le troisième chapitre est consacré à la recherche de modèles en vue de trouver une relation stochastique entre l'intensité moyenne maximale et la hauteur pluviométrique journalière.

Finalement une conclusion générale et des perspectives seront proposées.

## **Chapitre I**

# ***CRITIQUE ET TRAITEMENT DES DONNEES***

## I. 1. INTRODUCTION :

L'observation représente incontestablement la base de la climatologie. Les séries de données qui en découlent sont appelées " *séries chronologique* " lorsqu'elles sont classées par ordre de succession dans le temps.

L'étude et le traitement de ces données en grandes quantités permet de tirer les enseignements propres à suggérer des hypothèses et à infirmer ou confirmer la validité de certains empirismes.

Les facteurs déterminants dans l'organisation rationnelle des observations sont les suivants :

- L'emplacement des postes d'observation ;
- La densité du réseau ;
- La fréquence des observations ;
- La durée et la régularité des mesures ;
- La nature et la qualité des instruments ;
- La précision à recommander ainsi que la standardisation des méthodes et des instruments.

Quelque soit le soin apporté aux campagnes de mesures, l'utilisation et la conservation des données hydrologiques ne peuvent être envisagées sans un minimum d'opérations de contrôle et de correction destinées à leur conférer un certain label de qualité.

L'objectif premier est donc la détection et l'atténuation dans la mesure du possible, des erreurs d'observation. Il faut cependant rappeler qu'il est impossible de détecter toutes les erreurs existantes et si une série originale comporte trop d'erreurs significatives, il est préférable de la rejeter.

## I. 2. NATURE DES PROBLEMES :

Les mesures des paramètres pluviométriques ( hauteur et intensités de pluie ) peuvent consister en :

- Une lecture directe sur des pluviomètres ;
- Un dépouillement d'enregistrements pluviographiques ( hauteurs cumulées en fonction du temps ).

Toutes ces mesures peuvent comporter des erreurs de natures différentes pouvant être classées en deux catégories :

Les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles. Les erreurs systématiques sont dues à des causes produisant des effets constants ou légèrement variables dans le temps. Les séries qui en résultent sont alors dites " *inconsistantes* ". Les erreurs accidentelles surviennent inopinément et ne peuvent être prévues ni évitées. Elles sont dues à des causes soudaines qui introduisent des déviations sensibles au sein des séries de données. Ces dernières sont alors dites " *non homogènes* " ou " *hétérogènes* ".

Le problème réside alors dans la recherche des mesures à adopter afin d'en réduire l'influence durant l'exploitation des séries de données considérés.

## I. 3. SOURCE DES DONNEES :

Les données pluviométriques et pluviographiques utilisées dans le cadre de cette étude ( Région de l'est Algérien ) nous ont été aimablement fournies par l' A N R H. La période d'observation considérée s'étale sur 16 ans de 1976 à 1992. Les données sont présentées sous la forme de :

- Un listing de la série chronologique des hauteurs de pluie journalières obtenu par la saisie des données existantes sur les fichiers originaux (de Septembre 1976 à Août 1993 ).
- Une série chronologique de bandes pluviographiques originales appelées pluviogrammes ( de Octobre 1976 à Juin 1992 ), leur dépouillement permet de connaître les hauteurs instantanées des précipitations sur toute la durée d'observation.

La première tâche au niveau de l'A N R H a consisté à faire le dépouillement des enregistrements pluviographiques par un digitaliseur piloté par un micro-ordinateur de type PC - 486 DX 2 66 Mhz. Le programme de digitalisation a été développé en langage Basic par les techniciens de l'agence.

Notons ici que pour des raisons évidentes, le pluviomètre et le pluviographe étudiés et dépouillés doivent appartenir à la même station. En effet, l'objectif étant la recherche de modèles empiriques applicable à des données pluviographiques, il est nécessaire que les données correspondantes des deux séries soient relatives à la même pluviométrie, au même instant, au même endroit.

#### **I. 4. CHOIX DE LA STATION :**

Le choix de la station à étudier a été dicté par deux critères essentiels :

- Existence dans la station d'un pluviomètre et d'un pluviographe en même temps.
- Fonctionnement continu des deux appareils durant les 15 à 20 dernières années.

Il faut ajouter à ces critères le fait que l'ANRH peut recommander le choix d'une station particulière afin de pallier au manque de données digitalisées dans certaines régions du pays. Cela doit contribuer à l'enrichissement de la base de données pluviographique de l'ANRH.

#### **I. 5. DEPOUILLEMENT PRELIMINAIRE :**

##### **I. 5. 1. Fichier pluviométrique ( PV ):**

Le fichier des hauteurs pluviométriques obtenu après la saisie est organisé de la manière suivante :

- Au début de chaque année hydrologique, le code de la station est inscrit " 140631 " suivi de l'année en question ( fig I-1 ).
- Les colonnes correspondent au 12 mois de l'année hydrologique de Septembre à Août.
- les lignes correspondent au nombre de jours du mois ( 31 jours au maximum ).
- Les hauteurs de pluie sont données en 1/10 de mm.

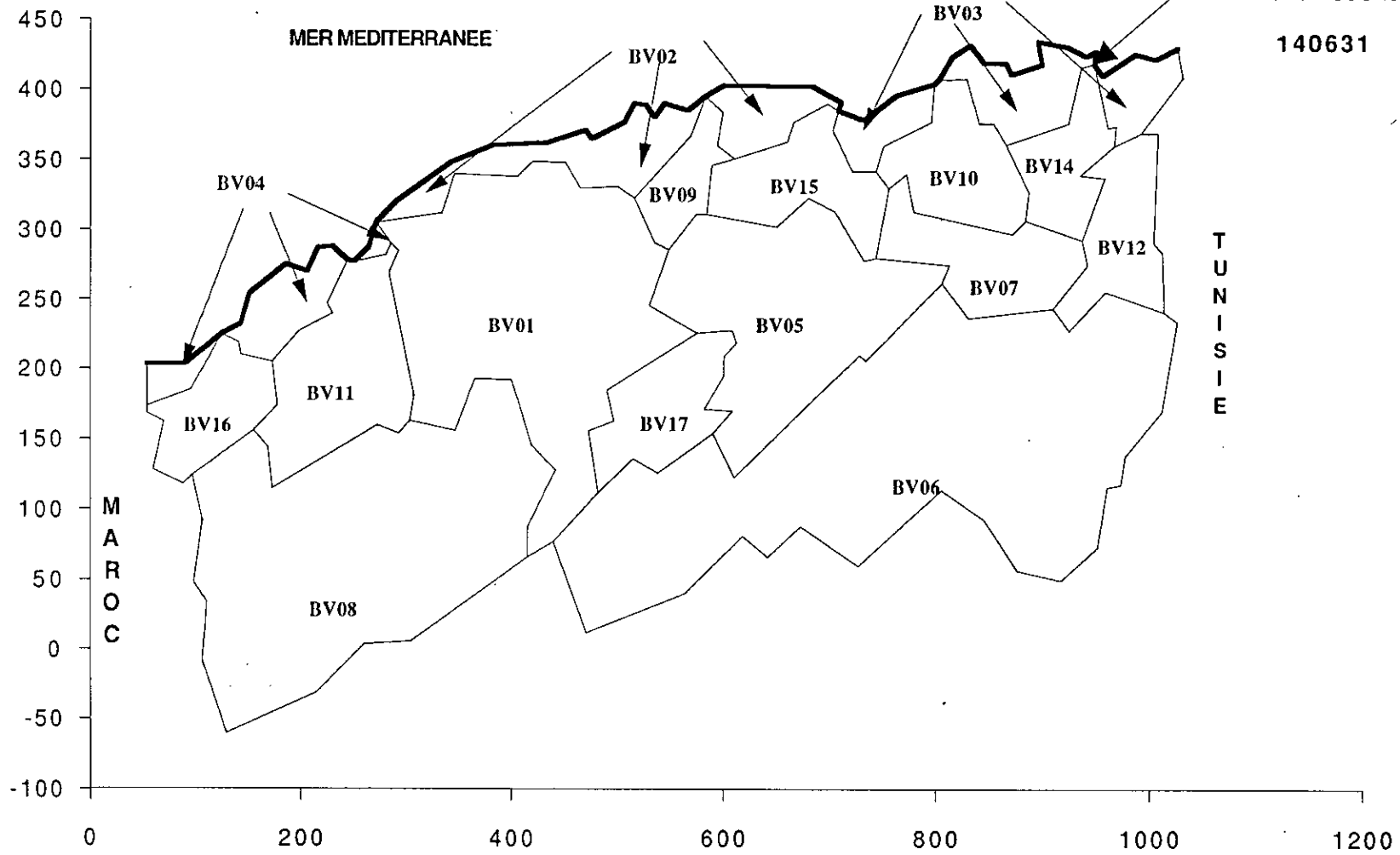


Carte N°1 : Carte des Bassins-Versants de l'ALGERIE du Nord

Station étudiée :

Pont Bouchet

140631





- Une pluie isolée peut contenir plusieurs précipitations intermittentes le temps d'arrêt de précipitation étant inférieur à quatre ( 04 ) heures.

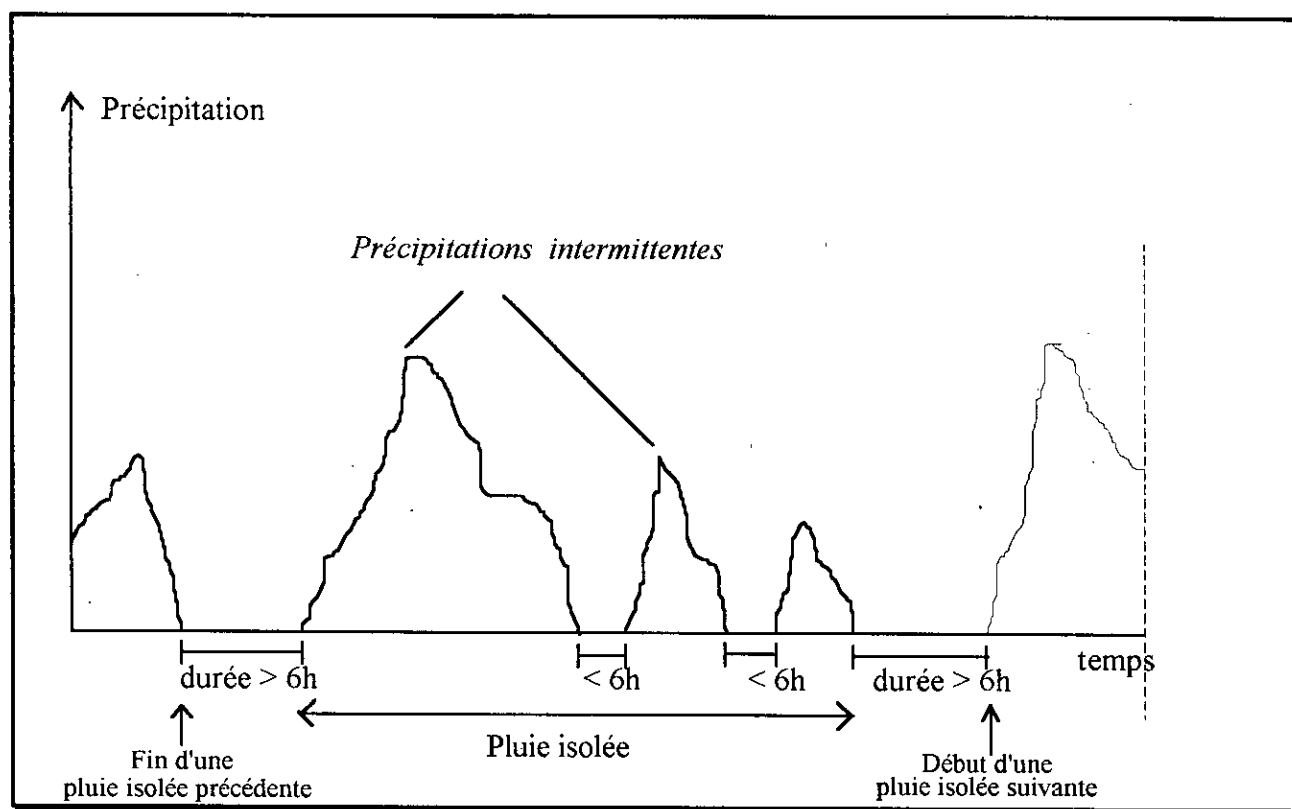


fig . I-2 : Principe de définition des pluies isolées .

- Une pluie isolée de précipitation totale inférieure ou égale à cinq millimètres n'est pas comptabilisée.

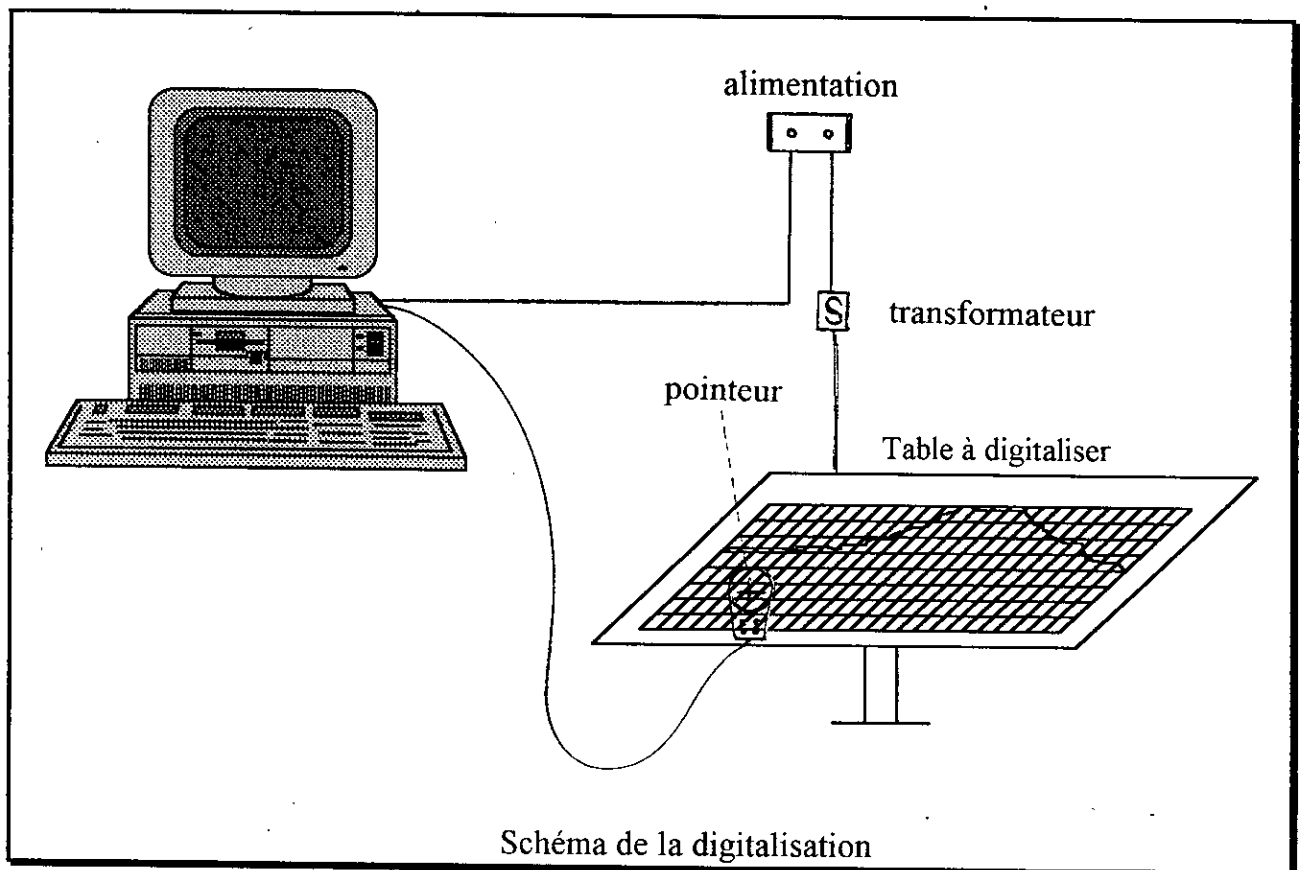
• Digitalisation des pluies isolées ; chaque pluie isolée est caractérisée par, un point de début, des points intermédiaire et un point final. Ces points sont séparés par des intervalles à intensité constante ( pente constante de la courbe enregistrée ) ( fig .I-3 ).

#### b). Critique de la digitalisation :

- La critique la plus sévère concerne le fait qu'il faut à chaque fois estimer manuellement le cumul total de la pluie. Le logiciel de digitalisation évalue de son côté le total. Si l'écart est supérieur en plus ou moins à 0.5 mm, il faut refaire l'opération. Le problème est plus aigu si la pluie isolée dure plus d'une journée.

- La deuxième critique concerne la convention de considérer deux pluies comme étant distinctes seulement si elles sont séparées par au moins six ( 06 ) heures de temps sec. Ce temps est jugé trop long compte tenu du climat et du relief locaux. Il aurait été préférable de l'abaisser à quatre ( 04 ) heures.

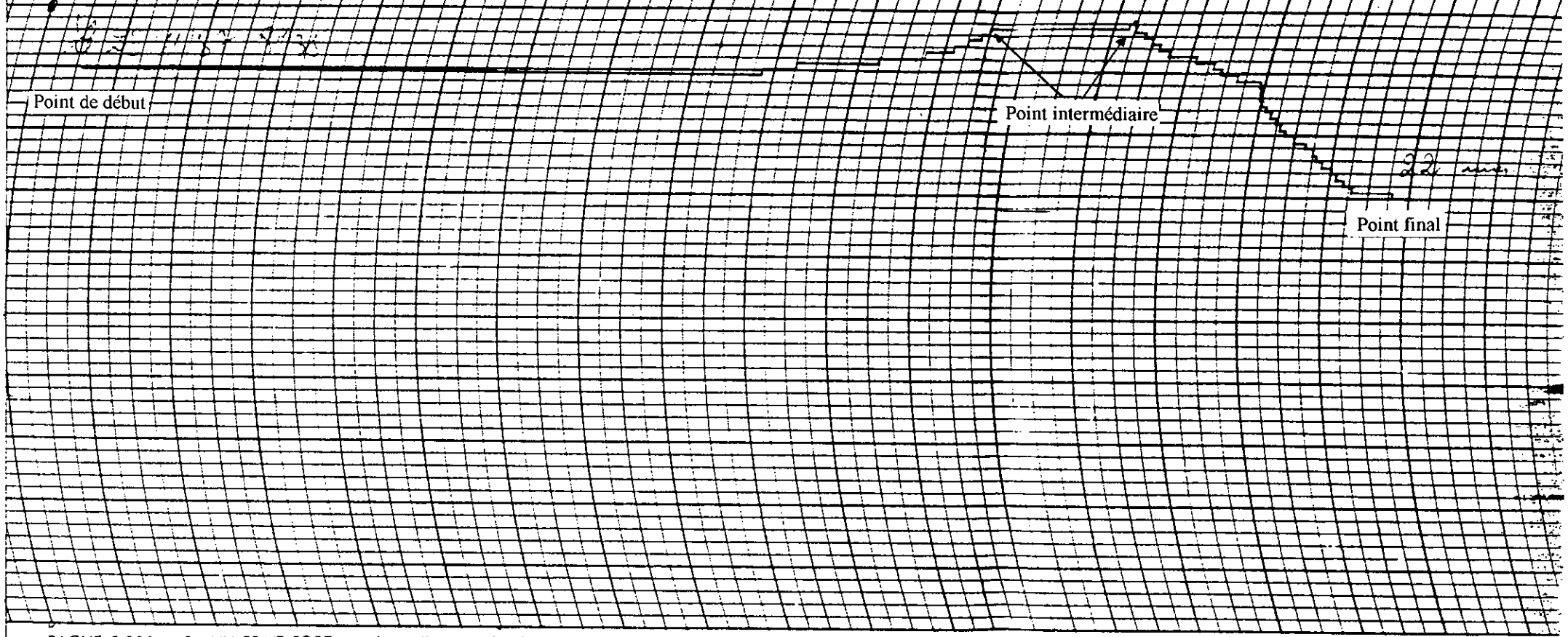
- La troisième critique concerne le fait que les pluies cumulant moins de cinq millimètres ne sont pas comptabilisés. Or nous sommes intéressés par leurs intensités au regard du ruissellement dans le bassin versant et on ne peut dans ce cas considérer leur cumul sans tenir compte de leur durée. Nous obtenons ainsi des situations anormales où des pluies cumulant tout juste six millimètres en huit ( 08 ) heures sont comptabilisées bien que leur intensité soit très faible, tandis que d'autres cumulant 4.5 millimètres en moins d'une heure sont écartées bien que leur intensité soit conséquente.



# PLUVIOGRAPHE A AUGETS BASCULEURS - MODELE M.N.

Hauteur de la bague au-dessus du sol :

8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 0 1 2



BAGUE 2.000 cm<sup>2</sup> : UN TRAIT FORT tous les millimètres de pluie - BAGUE 400 cm<sup>2</sup> : UN TRAIT FIN tous les millimètres de pluie.

Pour obtenir le T.U. ajouter, retrancher

fig. I. 3 : Principe de la digitalisation des pluies.

c). Format de fichier adopté par l' A N R H :

La digitalisation est un procédé de transformation des données brutes sur bandes pluviographiques ( pluviogrammes ) de la station étudiée, en fichier de données numériques ( digitalisées ). Chaque fichier est de la forme suivante ( colonne par colonne ) ( fig .I-4 ).

- Code de la station ( répété pour chaque pas de temps ) ;
- Date de la pluie [ année, mois, jour ] (répété pour chaque pas de temps);
- Un code qualité " 7 " ;
- Liste des points en coordonnées ( temps cumulé [ heure ], hauteur de pluie cumulée [ mm ] ) ;
- code " 1 " ;

A noter également que les relevés se font de 8 heures à 8 heures.

Code de station	Dates	Code qualité	Horaire	Hauteur cumulée
140631	19761010	7	15.05	0.1
140631	19761010	7	15.10	3.8
140631	19761010	7	15.12	5.7
140631	19761010	7	15.19	8.0
140631	19761010	7	15.23	8.0
140631	19761010	7	15.29	11.0
140631	19761010	7	15.36	14.0
140631	19761010	7	15.52	16.1
140631	19761010	7	16.12	16.2
140631	19761010	7	16.19	17.2
140631	19761010	7	16.39	17.4
140631	19761010	7	17.54	20.5
140631	19761010	7	18.09	22.1
140631	19761010	7	18.29	22.1
140631	19761010	7	18.48	23.7
140631	19761010	7	19.05	26.7
140631	19761010	7	19.41	26.7
140631	19761010	7	19.42	27.3
140631	19761030	7	13.34	0.0
140631	19761030	7	13.42	3.3
140631	19761030	7	13.48	6.1
140631	19761030	7	13.54	8.6
140631	19761030	7	13.59	8.7
140631	19761030	7	14.29	10.0
140631	19761030	7	15.33	10.6
140631	19761030	7	20.51	11.0
140631	19761030	7	2.05	11.6

fig . I - 4 : Exemple de format du fichier pluviographique de l' A N R H .

### I. 5. 3. Problèmes rencontrés dans les fichiers " PG " et " PV " :

#### a). Fichier " PG " :

Les principaux types de problèmes rencontrés sont relatifs au mode de stockage des pluies isolées. Ces problèmes sont illustrés par les exemples suivants :

##### a). 1. Cas d'une pluie isolée couvrant plus d'une journée ;

Par exemple pour une pluie isolée s'étendant sur trois jours consécutifs ( 24, 25 et 26 février 1978 ), on a :

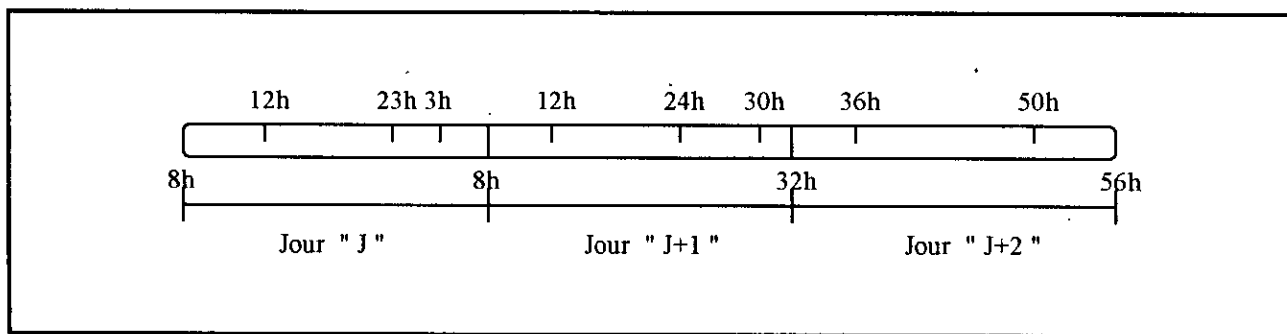


fig . I-5 : Exemple de format de stockage d'une pluie isolée couvrant 3 jours consécutifs ( fichier A N R H ) .

- La date conserve la valeur du début le long des trois jours de pluie ( c'est à dire le 24 / 02 / 1978 ) ;

- Les horaires sont comptés avec des valeurs supérieures à 23 heures à partir du deuxième jour de la pluie, comme le montre le schéma ci-dessus ( fig . I-5 ) .

##### a). 2. Cas de plusieurs pluies isolées le même jour :

Soit deux pluies isolées enregistrées le même jour ( le 10 / 04 / 1983 par exemple ).

Au niveau du fichier on remarque que :

- La première pluie conserve la date du jour même.

- La deuxième pluie est décalée au jour suivant, (c'est à dire le 11 / 04 / 1983 ). Si au deuxième jour commence une autre pluie isolée, celle-ci est à son tour décalée au troisième jour ( c'est à dire 12 / 04 / 1983 ), etc...

a). 3. On signale également un autre problème relatif aux chiffres significatifs des horaires dans le fichier.

Par exemple la valeur " 10 , 33 heures ";

Le chiffre " 33 " est pris en minutes au lieu des heures, ce qui rendrait la lecture des valeurs plus souple.

**b). Fichier " PV " :**

L'exploitation du fichier pluviométrique à son état initial brut nous a posé quelques difficultés dans le traitement des données, en raison de la non conformité de sa structure pour les besoins des traitements informatiques.

Cette liste de problèmes relatifs aux fichiers pluviographiques et pluviométriques n'est évidemment pas exhaustive. Mais elle en constitue les principaux.

Nous avons rencontré aussi d'autres difficultés, informatiques notamment généralement inévitables dans ce genre de traitement. Certaines auraient pu l'être si nous avions pu disposer de notices d'explications relatives aux fichiers et données traitées.

Ces problèmes nous ont engendrés dans leur ensemble des contraintes de programmation relatives à la critique des données et au traitement statistique traité dans le chapitre suivant.

## **I. 6. CONTROLE DES DONNEES :**

En climatologie la notion de précision ne revêt pas le même sens qu'en science physique de laboratoire. Les raisons de cela sont faciles à imaginer. La plupart du temps elles sont dues au fait que l'environnement où sont réalisées les mesures hydrologiques est presque toujours non homogène et soumis à des déviations continues.

En outre il faut mentionner l'écart plus ou moins important qui peut exister entre les valeurs mesurées et la réalité et qui peut influencer négativement les résultats des études effectués. En effet, les données disponibles résultent des mesures effectuées par des opérateurs souvent différents avec des instruments disparates selon le cas, sur des sites variables et pendant des périodes de temps assez longues.

Il faut donc s'attendre à un nombre non négligeable d'erreurs et d'irrégularités qui risquent de tenir la qualité des mesures. Ces écarts peuvent être dus à :



Des erreurs d'exécution des mesures, des pertes de données, des défauts au sein de l'instrumentation, des lacunes de mesure, de mauvaises estimations des valeurs manquantes, des altérations durant la transcription et la transmission des données, etc ... Il est par conséquent nécessaire d'effectuer une critique adéquate de la qualité des séries de données avant leur utilisation pour des besoins d'étude et d'exploitation.

L'objectif recherché est celui de filtrer ces données et de détecter les éventuelles déviations excessives et valeurs suspectes, afin de minimiser leur impact sur le modèle à élaborer.

### **I. 6. 1. Détection des anomalies :**

Pour la mise en ordre des fichiers de données, et avant la détection des anomalies susceptibles d'y exister, il est nécessaire d'étudier la cohérence entre les mesures pluviométriques et pluviographiques en comparant les deux fichiers du point de vue correspondance des journées observées.

Deux cas de figure peuvent se présenter :

- Données existantes dans le fichier pluviométrique et introuvables dans le fichier pluviographique: Ces données sont éliminées.
- Données existantes dans le fichier pluviographique seulement : on remplace alors les données correspondantes manquantes dans le fichier pluviométrique en évaluant le cumul journalier des hauteurs pluviographiques et en les injectant dans la relation liant  $H_{PG}$  et  $H_{PV}$ . On obtient ainsi les hauteurs pluviométriques ( $H_{PV}$ ) les plus probables.

#### **Remarque :**

L'étude graphique de la relation  $H_{PV}$  et  $H_{PG}$  est traitée dans la partie ( I. 5. 2 ).

Les autres types d'anomalies sont propres à chaque procédé de mesure. On va les traiter séparément.

#### **a). Fichier " PV " :**

Certaines hauteurs enregistrées dans le fichier pluviométrique représentent le cumul de deux jours et plus. Elles sont dues aux absences fréquentes de l'observateur.

La répartition de ces cumuls sur les jours correspondants a été faite de la façon suivante ( voir exemple ) :

**Exemple :**

Soit  $H_c$  la hauteur cumulée relevée par le pluviomètre sur deux jours,  $J_1$  et  $J_2$ . Et soit  $H_{1PG}$  et  $H_{2PG}$  les hauteurs relevées par le pluviographe durant les même journées.

Soient les deux fractions suivantes :

$$fact1 = \frac{H_{1PG}}{H_{1PG} + H_{2PG}}$$

$$fact2 = \frac{H_{2PG}}{H_{1PG} + H_{2PG}}$$

$H_c \cdot fact1$  = Hauteur moyenne journalière " PV " correspondante au jour  $J_1$ .

$H_c \cdot fact2$  = Hauteur moyenne journalière " PV " correspondante au jour  $J_2$ .

D'autre part, il existe des manques d'observations qui peuvent s'étaler sur des périodes pouvant atteindre trois mois consécutifs. L'examen des bordereaux pluviométriques a permis de confirmer que ces données étaient réellement inexistantes.

**b). Fichier " PG " :**

Concernant les données pluviographiques le défaut d'observation est beaucoup plus sensible comparé aux anomalies des fichiers " PV ". Ceci est dû au fait que le pluviographe appareil enregistreur automatique, et donc organe ou ensemble d'organes à transmission mécanique ou électronique, est exposé à des arrêts et / ou à des dérèglages inopinés. Afin d'éviter ce genre de lacunes et prévenir ces incidents, il est nécessaire de procéder à des contrôles et nettoyages périodiques fréquents.

Les données " PG " manquantes sont dues :

- soit à un arrêt total de l'instrumentation durant un ou plusieurs jours  
-----> manque " total " ;
- Soit à un arrêt partiel de l'instrumentation durant moins d'une journée  
-----> manque " partiel " .

Sur un total de 15 années, le manque d'observation est estimé à :

- 506 Jours de manque " total ", et
- 114 Jours de manque " partiel "

Toutes ces journées ont été recensées, saisies et stockées dans un fichier appelé " *fichier anomalies* ".

En confrontant les 506 jours correspondant au manque " *total* ", aux dates correspondantes sur le fichier " PV ", 61 jours seulement enregistrent des pluies supérieures à 5 mm avec un total de 501,9 mm en terme de hauteur d'eau précipitée.

Les journées partiellement observées se subdivisent, quand à elles, en deux parties :

- Pour la majeure partie, l'arrêt de l'appareil est précédé d'un temps sec, soit 105 jours au total.
- Pour les 9 jours restants il y a eu un enregistrement de pluie avec avarie de l'appareil de mesure durant la même journée.

Toujours en se rapportant au fichier pluviométrique, on a comptabilisé 12 jours ayant une pluviométrie supérieure au seuil fixé par le logiciel de digitalisation (... qui est de 5 mm ), la hauteur cumulée relative à cette durée est de 146 mm.

	En terme de nombre de jours	En terme de précipitations ( mm )	En terme de % de la précipitation totale $\geq 5$ mm
Précipitation totale " PV " $\geq 5$ mm	582	8 165,9	100
Précipitation totale " PV " $< 5$ mm	902	1 609,5	16,46
Précipitation totale	1484	9 775,4	/
Manque total de données	61	501,9	6,15
Manque partiel de données	12	146,0	1,78
Anomalies " PG " calculées à partir du pluviomètre	73	647,9	6,62

Tableau I-1 : Tableau récapitulatif des résultats de contrôle des données pluviographiques dépouillées.

### I. 6. 2. Etude Graphique de la relation $H_{PG} = f(H_{PV})$ :

#### a). Ajustement :

Au terme de l'étude critique et une fois les données minutieusement contrôlées puis stockées dans de nouveaux fichiers, on procède à leur comparaison par la vérification de la concordance ( chronologique et quantitative ) en recherchant les points incohérents vis à vis des dates et des hauteurs cumulées.

L'étude graphique consiste donc à contrôler l'homogénéité des données en utilisant un ajustement linéaire de type  $Y = a * X$  . Le nuage de points devrait s'approcher le plus possible de la première bissectrice. Le principe de la méthode est le suivant :

Soit ces deux séries  $X_i$  et  $Y_i$  supposées homogènes. La relation liant  $X_i$  à  $Y_i$  doit être du type :

$$Y_i = a * X_i \quad \text{avec " a " proche de 1 .}$$

Le coefficient " a " peut être déterminé par la méthode des moindres carrés :

$$a = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Avec  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$  et  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

n : Nombre de points de mesures.

Le coefficient de corrélation est :

$$r = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

D'après la droite d'ajustement ( fig 1- 6 ), on peut dire qu'il y a une très bonne cohérence entre les données, d'où en conclusion que l'homogénéité chronologique et quantitative est effectivement vérifiée.

**b). Application à l'échelle saisonnière :**

Dans le but de rechercher une relation saisonnière entre l'intensité moyenne maximale et la hauteur journalière pluviométrique, on a tracé deux courbes d'après deux groupements effectués suivant les saisons.

- (1) Saison humide ( Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars ).
- (2) Saison sèche ( Avril, Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre ).

De l'examen des deux graphes, on constate que l'effet saisonnier n'intervient pas sur la cohérence des données.

	Nombre de points " N "	Coefficient de la droite de régression " A "	La moyenne sur HPV	La moyenne sur HPG	Coefficient de corrélation	Relation
Série complète	532	1,06428	10,8633	11,9844	0,986	HRG = 1,06428 * HPV
Saison humide	411	1,0675	11,0457	12,219	0,987	HPG = 1,0675 * HPV
Saison sèche	121	1,04979	10,2438	11,1876	0,982	HPG = 1,04979 * HPV

Tableau I-2 : Tableau récapitulatif des résultats de l'ajustement .

**I. 6. 3. Correction des anomalies :**

Ce sont les anomalies citées en ( I. 5. 1 ) relatives aux données existantes dans le fichier " PG " et manquante dans le fichier " PV " .

A partir de la droite d'ajustement obtenue précédemment, et qui s'écrit sous la forme suivante :

$$Y = 1,06428 * X$$

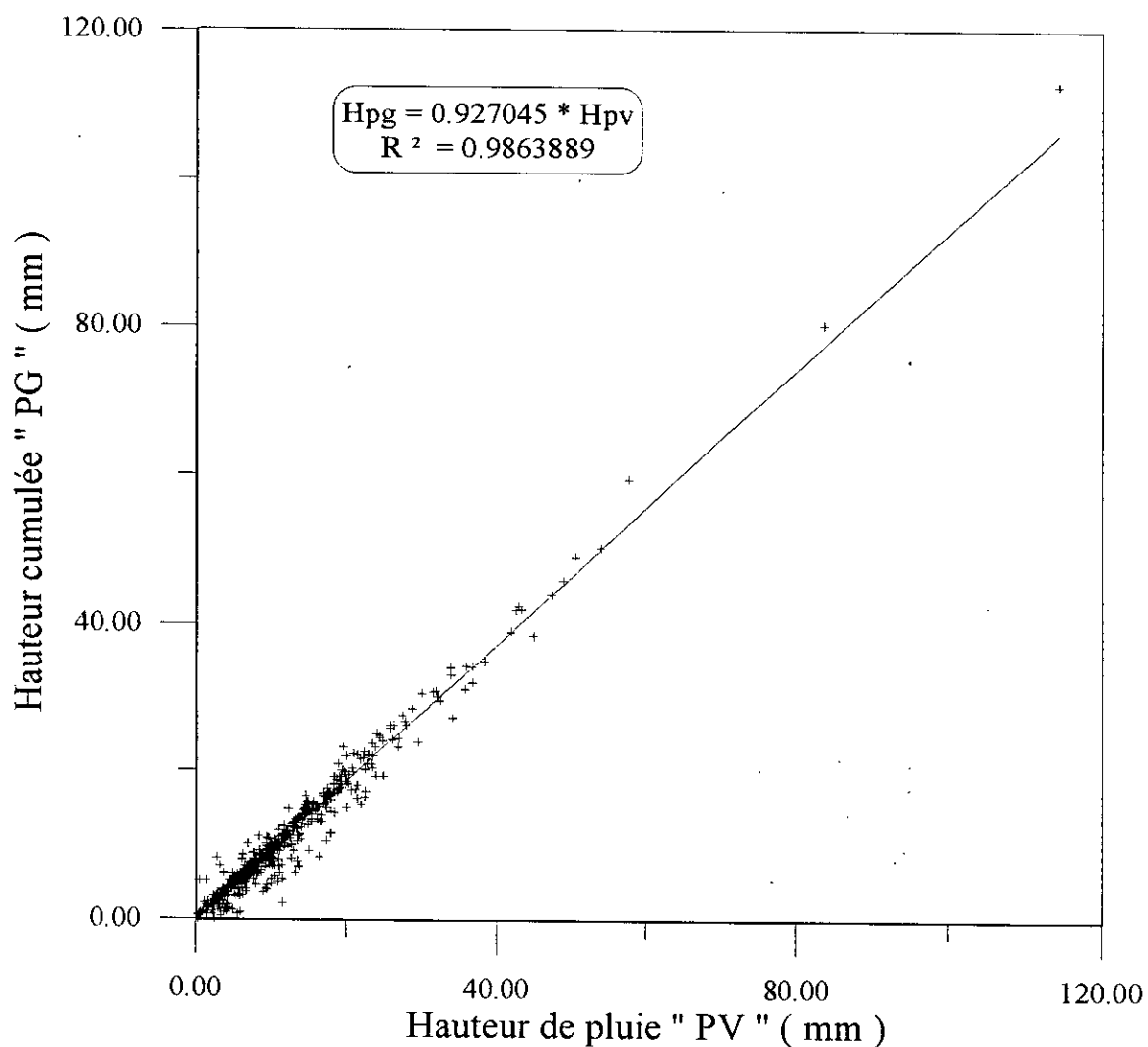


fig . I. 6 : Contrôle de la concordance des données pluviométriques et pluviographiques pour toute la période d'observation

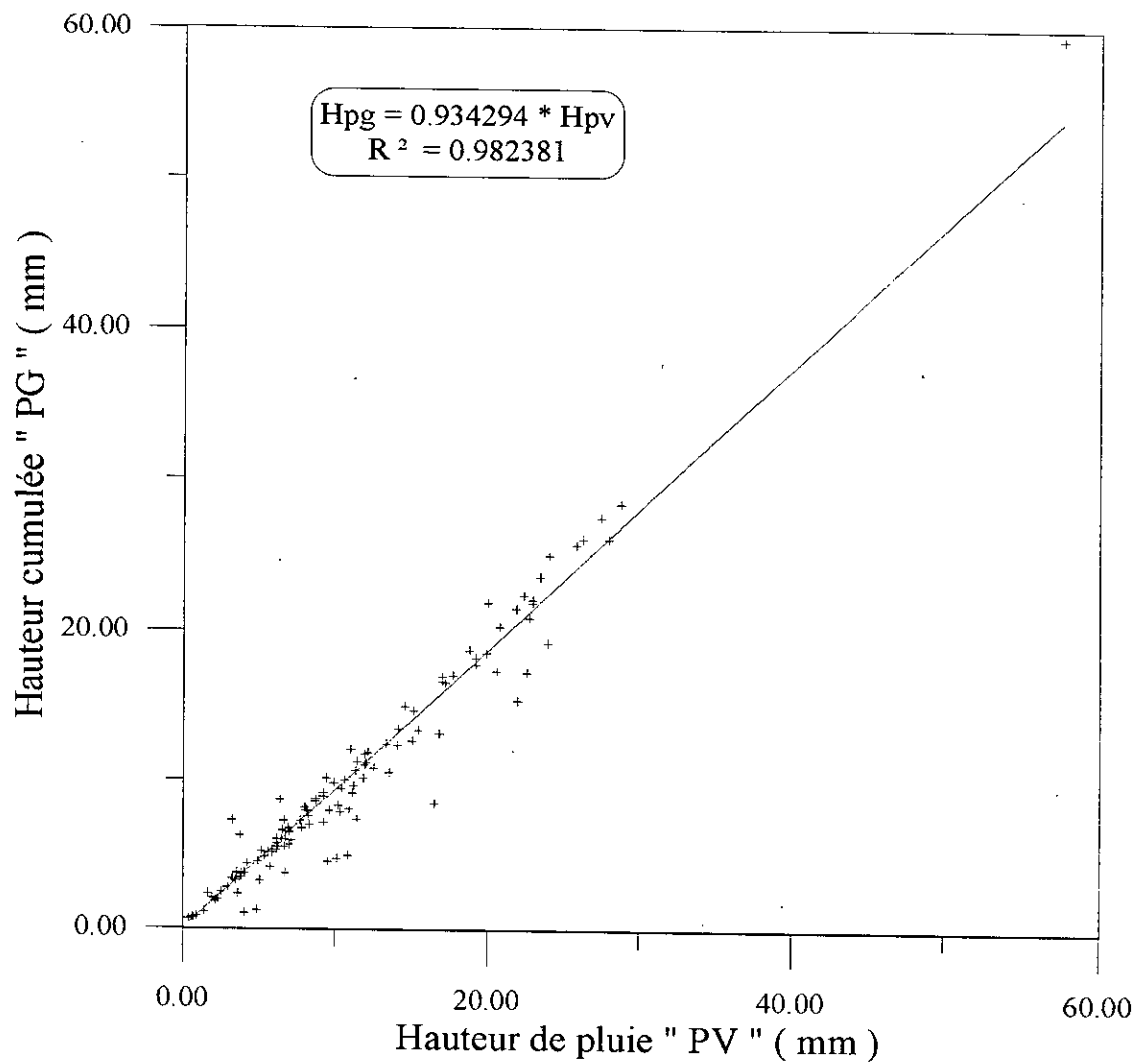


fig . I. 7. : Contrôle de la concordance des données pluviométriques et pluviographiques sur la saison sèche ( Avril à Septembre )

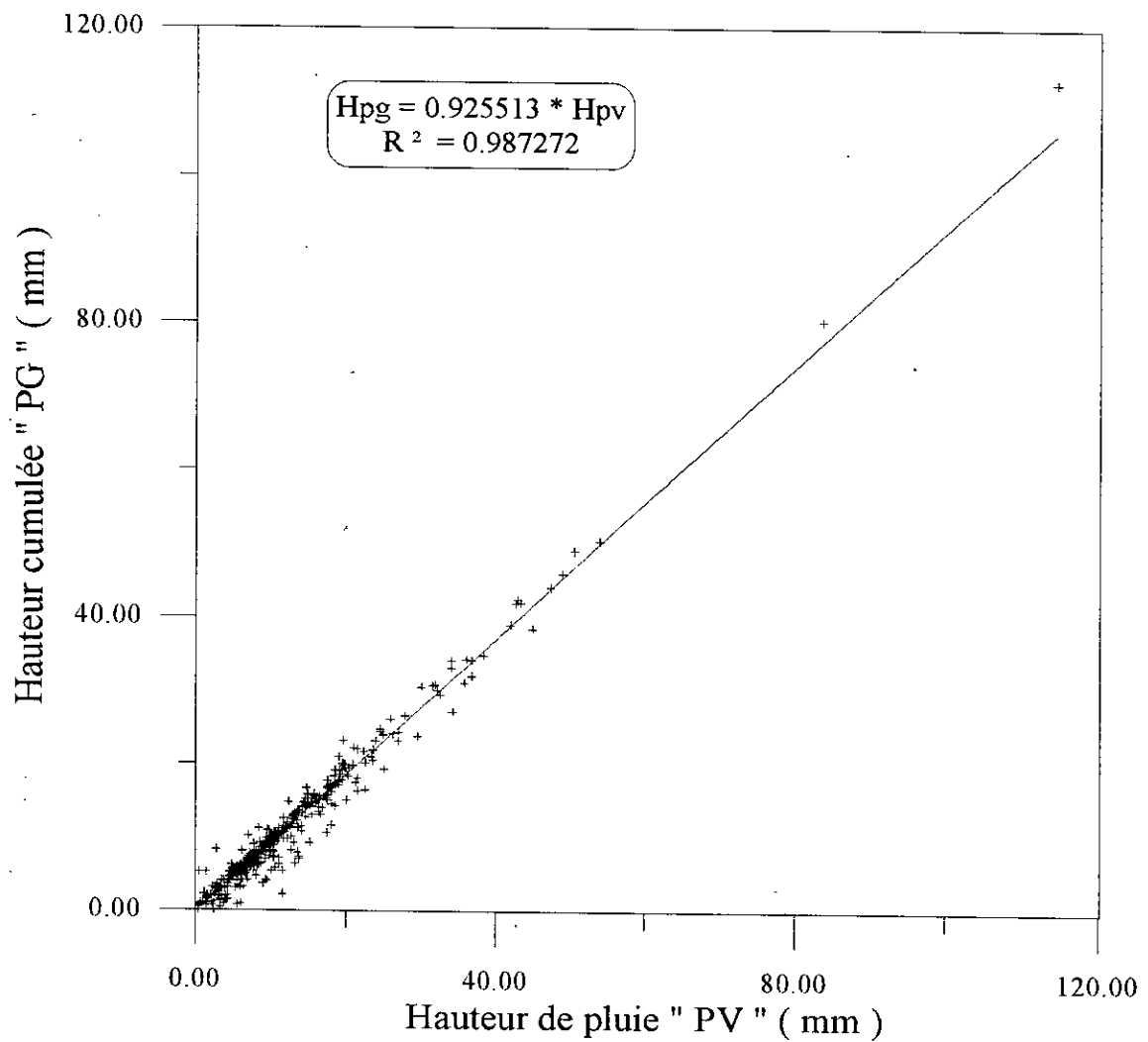


fig . I. 8 : Contrôle de la concordance des données pluviométriques et pluviographiques sur la saison humide ( Octobre à Mars ).



$$\text{c.à.d : } H_{PG} = 1.06428 * H_{PV}$$

où X est la valeur recherchée, on peut avoir une bonne estimation des hauteurs pluviométriques manquantes.

Quant à la méthode consistant à calculer la hauteur pluviométrique " H<sub>PV</sub> " à partir du cumul journalier des hauteurs " PG ", elle ne peut être admise comme solution, car elle ne prend pas en compte les écarts susceptibles d'exister entre des valeurs obtenues par deux procédés de mesure différents. Ce qui peut avoir une influence non négligeable sur le modèle à élaborer.

## **I. 7. TRAITEMENT DES DONNEES PLUVIOGRAPHIQUES :**

### **I. 7. 1. Nouveau format du fichier " PG " :**

Le format du fichier obtenu par digitalisation adopté par l'A N R H ne représente pas d'une façon exhaustive le passé pluvieux de la station et ne correspond pas à un stockage optimal puisqu'on note des redondances d'information inutiles. Il en résulte des contraintes pratiques de programmation dans la critique et le traitement des données, qui sont toutefois surmontables.

A cet effet nous avons adopté un nouveau format beaucoup plus souple basé sur la notion de pluie isolée et contenant toutes les informations utiles ( fig . I-9 ).

Ce format a été adopté selon les objectifs globaux fixés par l'A N R H, qui comprennent en outre l'élaboration d'une cartographie de pluies instantanées ( courbes I D F, pluie de projet, ... ).

Code station		$\Delta t$ (min)		$\Delta H$ (mm)												
140631																
19761010	15.05															
53.8	21.9	7	2.3	4	0.0	6	3.0	7	3.0	16	2.1	20	0.1	7	1.0	20
19761030	13.34															
83.3	82.8	6	2.5	5	1.1	30	0.3	64	0.6	318	0.4	314	0.6	9	0.3	208
19761222	13.42															
83.3.4	19.0.1	105	4.2	36	0.0	20	0.8	22	0.1	38	2.9					
19770104	17.35															
25.0.3	14.0.9	79	0.0	10	1.0	37	0.0	34	0.5	21	2.0	27	0.0	10	0.9	
19770108	19.02															
10.1.5	21.0.1	1	0.5	60	0.2	20	0.5	3	2.0	14	1.0	60	0.0	10	1.4	16
19770112	18.06															
47.0.4	44.2.0	34	0.1	27	0.9	44	0.1	100	0.6	1	0.4	233	0.1	75	0.4	25
19770123	8.13															
23.0.8	31.3.4	14	0.5	10	2.5	18	0.6	308	0.1	1	0.4					
19770409	14.43															
30.0.5	40.0.3	43	1.2	97	0.4	57	1.6	35	0.5	23	0.9	55	0.1	2	0.5	
19770419	1.39															
10.4	42.0.6	12	0.8	31	2.7	11	0.8	7	0.0	14	1.1	13	0.4	11	0.7	15
19770430	17.06															
2.5.5	87.3	7	3.3	10	2.6	20	1.0									
19770517	18.10															
15.1.1	49.0.3	18	1.7	66	0.9	6	1.0	84	0.2	88	0.3	16	1.6	6	1.5	10
19770601	17.52															
4.1.6	112.0	30	0.3	34	2.6	81	1.6	122	0.7	25	0.4	24	2.6	54	2.0	2
19770802	8.12															
8.1.6	7.1.4	0	0.1	6	1.4	2	0.8	0	0.0	4	0.9	0	0.1	1	0.3	
19770818	5.48															
8.1.3	21.0.1	24	2.8	35	1.0	28	3.2	52	0.0	23	0.9	5	2.0	0	0.1	2
19770926	22.55															
7.1.4	73.0.8	4	1.1	6	3.0	38	0.4									
19770928	12.52															

fig. I-9 : Format définitif du fichier de données pluviographique élaboré.

## Chapitre II

# *TRAITEMENT STATISTIQUE ET ANALYTIQUE*

## II. 1. EVALUATION DES PARAMETRES :

### II. 1. 1. Choix des paramètres à analyser :

Nous nous plaçons ici dans l'optique de respecter l'objectif pour lequel cette étude a été initiée, qui est - rappelons le - de pallier au manque de données pluviographique nécessaire à la réalisation d'une cartographie des courbes I D F ( régionalisation des courbes, intensité, durée, fréquence ).

Après avoir achever le dépouillement et le traitement préliminaire des données brutes, on entame l'étude statistique, qui nécessite alors un choix judicieux des variables aléatoires à utiliser. Ce choix est réalisé comme suit :

- Concernant les mesures pluviométriques, nous disposons de hauteurs journalières indépendantes qui constituent l'échantillon des variables aléatoires H.

- La deuxième variable aléatoire relative aux mesures pluviographiques est l'intensité moyenne maximale  $I_M$  ( ce choix étant dicté par l'objectif cité plus haut ).

La variable aléatoire H est une donnée brute lue directement à partir du fichier " PV ", tandis que  $I_M$  est une valeur déduite du fichier " PG " par le procédé de calcul qui sera décrit dans le paragraphe suivant.

La valeur de  $I_M$  calculée étant liée à la notion de pluie isolée, il est par conséquent utile de définir les différents cas possibles en se référant à l'intervalle de temps durant lequel sont effectués les relevés ( qui est de 24 heures ).

- 1 er cas : Une pluie isolée par jour.
- 2 ème cas : Plus d'une pluie isolée par jour.
- 3 ème cas : Une pluie isolée qui s'étend sur plusieurs jours.

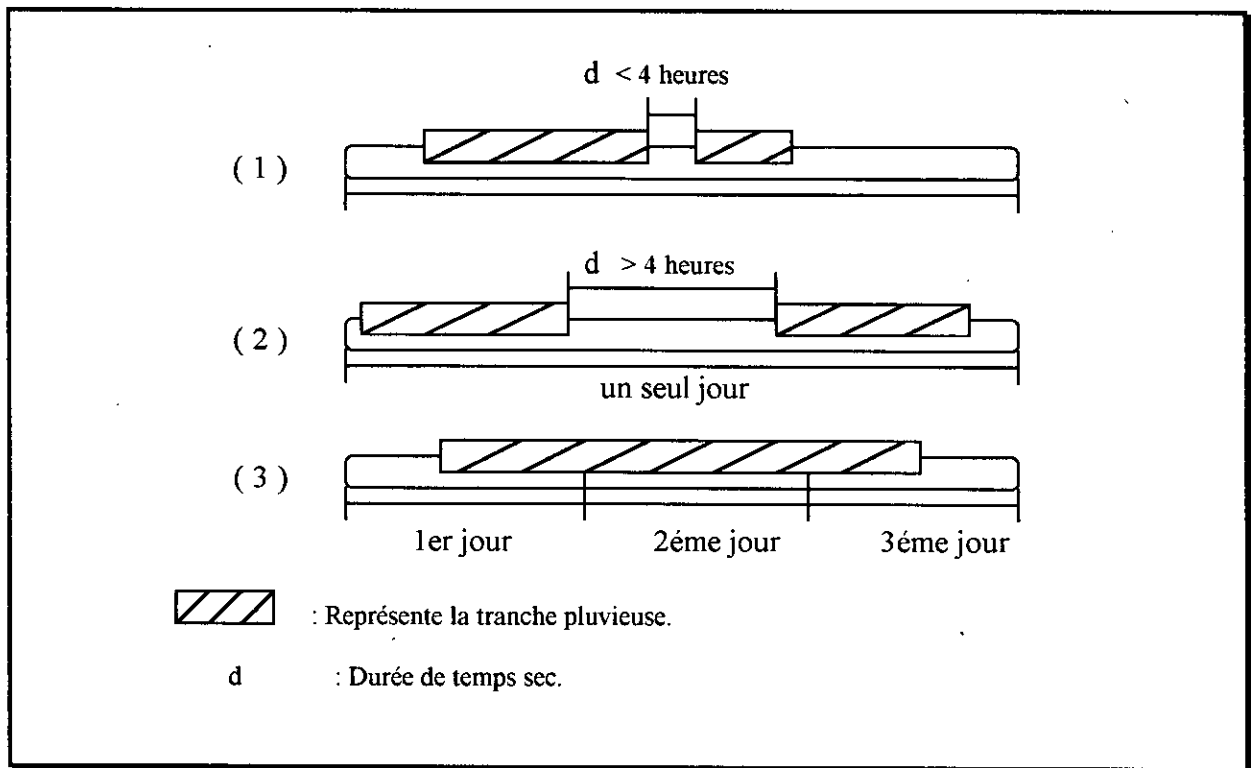


fig - II. 1 : Exemple de la schématisation des différents cas de pluie isolées.

Essayons d'associer Pour chacun des cas précédents l'intensité des pluies aux hauteurs correspondantes :

- Le premier cas est le plus simple ;  $I_M$  est calculée pour une seule pluie isolée avec  $H$  correspondante qui est la hauteur totale journalière pluviométrique.

- Pour le deuxième cas, on doit affecter à chaque pluie la fraction correspondante de  $H$  " PV " journalière ; c'est à dire faire la répartition de  $H$  " PV " sur les pluies isolées de la journée.

### Exemple :

Soit  $H_{PV}$  la hauteur pluviométrique relative à une journée pluvieuse pendant laquelle il y a eu deux pluies isolées.  $H_{1PG}$  et  $H_{2PG}$  sont les hauteurs cumulées correspondant aux deux pluies isolées.

Calculons les deux fractions suivantes :

$$fac_1 = \frac{H_{1PG}}{H_{1PG} + H_{2PG}}, \quad fac_2 = \frac{H_{2PG}}{H_{1PG} + H_{2PG}}$$

$H_{1PV} = fac_1 \cdot H_{PV}$  : Hauteur " PV " correspondante à la 1ere pluie isolée.

$H_{2PV} = fac_2 \cdot H_{PV}$  : Hauteur " PV " correspondante à la 2ème pluie isolée.

• Dans le troisième cas, les valeurs correspondantes des cumuls pluviométriques et plviographiques se déduisent aisément à partir des fichiers de données.

Le modèle recherché est une corrélation entre  $I_M$  et  $H$  " PV " dont la forme générale est la suivante :

$$I_M = f ( H, \text{paramètres} )$$

Le but de ce modèle est la détermination des intensité moyenne maximale "  $I_M$  " à partir des hauteurs pluvométriques "  $H_{PV}$  " journalières brutes, cependant, il apparaît très complexe d'introduire le deuxième et le troisième cas dans cette étude, car il est impossible d'appliquer le modèle à une station dépourvue d'un enregistreur pluviographique. A cause de cette contrainte, on ne peut donc utiliser que le premier cas ( une pluie isolée par jour ) pour tout le reste de cette étude.

### II. 1. 2. Calcul de $I_M$ ( intensité moyenne maximale ) :

L'intensité moyenne se définit par le rapport entre la hauteur d'eau tombée pendant un certain temps  $\Delta t$ , et la durée de cet intervalle.

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Avec :

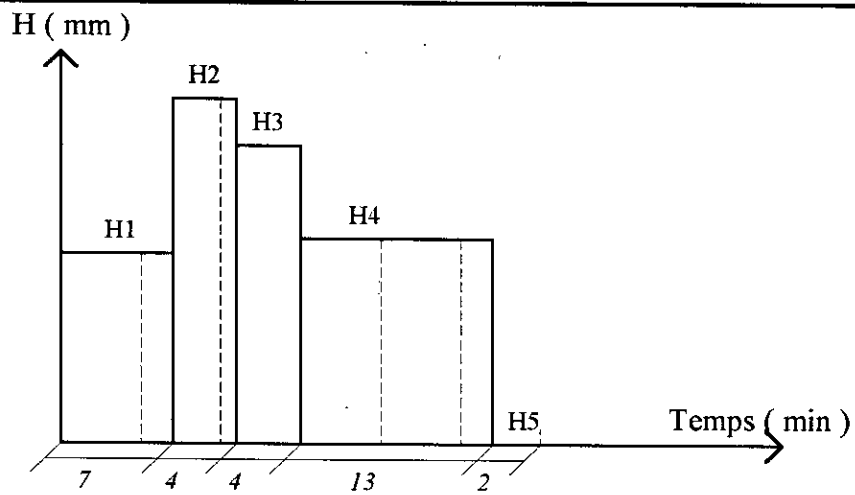
$I$  : Intensité moyenne.

$\Delta h$  : Hauteur de pluie recueillie pendant la durée  $\Delta t$ .

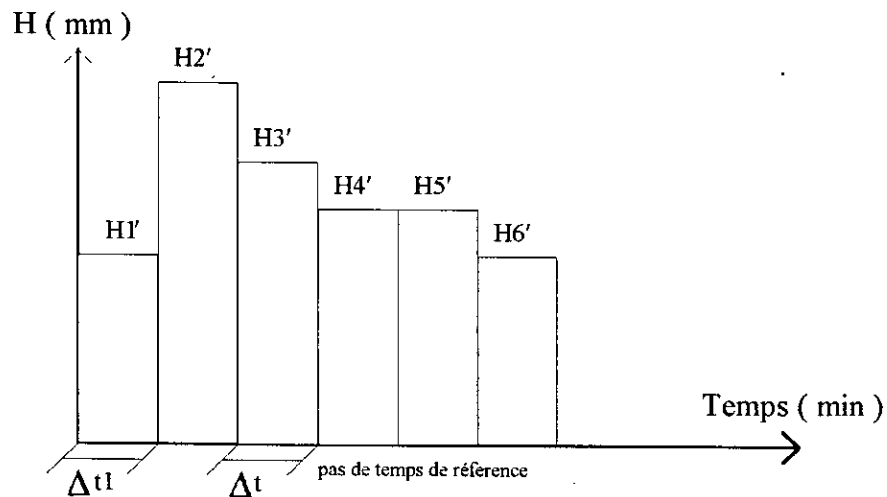
En pratique, l'intervalle de temps à considérer est généralement compris entre quelques minutes et quelques heures.

L'évaluation de l'intensité moyenne maximale, pour chacune des pluies isolées, est effectuée de la manière suivante :

• Dans un premier temps, on détermine sur le pluviogramme de l'averse examinée les intensités moyenne, sur la base d'un pas de temps  $\Delta t$  constant pour toute la durée de la pluie. Les hyétogrammes 1 et 2 de la figure ( fig. II. 2 ), illustrent le passage d'un pas de temps variable à un pas de temps constant.



( 1 ) Hyetogramme à pas de temps variable



( 2 ) Hyetogramme à pas de temps constant

( fig - II. 2 )

Où :

$$H'_1 = \frac{\Delta t}{7} H_1$$

$$H'_2 = \frac{(7 - \Delta t)}{7} H_2 + \frac{(\Delta t - 2)}{4} H_3$$

$$H'_3 = \frac{(4 - 3)}{4} H_2 + \frac{(4)}{4} H_3$$

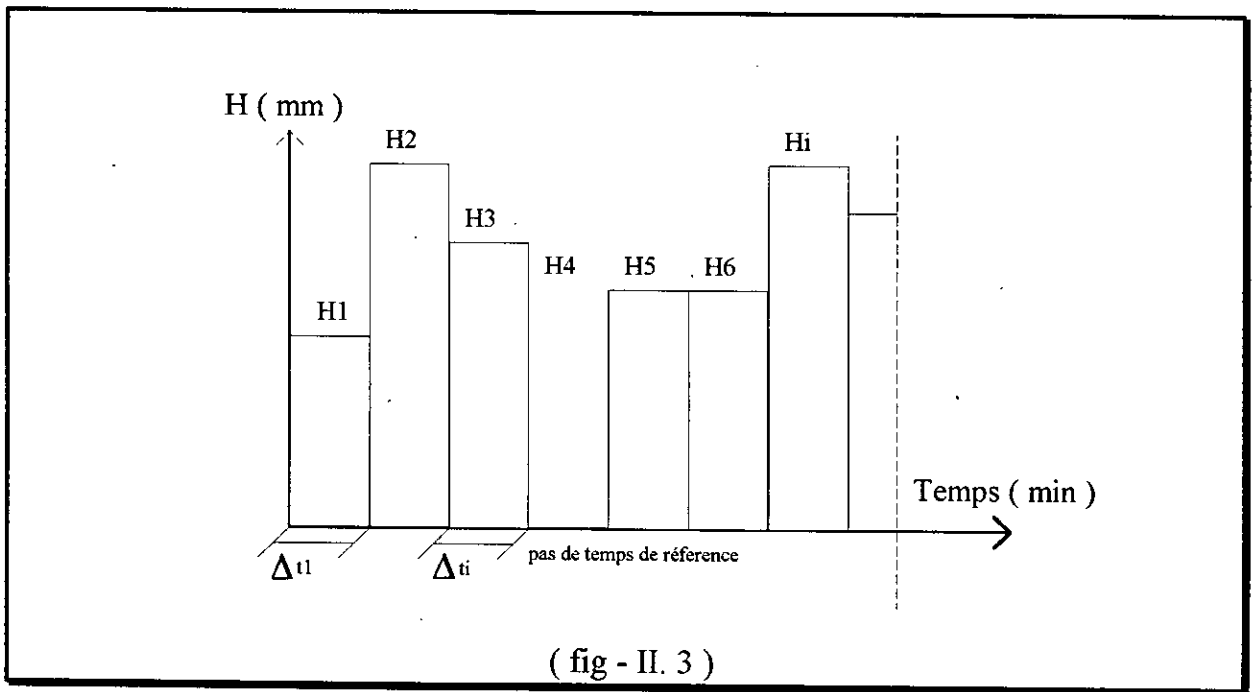
$$H'_4 = H'_5 \frac{\Delta t}{13} H_4$$

$$H'_6 = \frac{(13 - 2\Delta t)}{13} H_4 + \frac{(2)}{2} H_5$$

avec  $H_5 = 0$

Dans le cas de notre étude, le pas de temps de référence  $\Delta t$  a été fixé à cinq ( 05 ) minutes.

• Par la suite, on effectue un balayage sur toute la durée de la pluie, isolée en utilisant un procédé basé sur le calcul d'une moyenne mobile.



Soit :

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_i = \Delta t$$

D : Intervalle de calcul, de l'intensité moyenne maximale  $I_M$ .

$\Delta t$  : Pas de temps de référence (  $\Delta t = 5 \text{ min}$  ).

N : Nombre de pas de temps  $\Delta t$  de la pluie isolée. C'est la partie entière du rapport de la durée de la pluie sur "  $\Delta t$  " plus " 1 ".

C : Nombre de pas de temps  $\Delta t$  inclus dans l'intervalle D. C'est le rapport de D sur  $\Delta t$ .

$$C = \frac{D}{\Delta t}$$

On définit la hauteur de pluie moyenne suivante :

$$H(K)_{\text{moy}} = \frac{\sum_{I=K}^{K+C-1} H(I)}{C} ; \quad K = 1, 2, \dots, N.$$



$H(K)_{\text{moy}}$  représente la hauteur moyenne relative à l'intervalle de temps  $D$ .

Et on obtient en fin de compte; l'intensité moyenne maximale exprimée en [ mm / heure ].

$$I_M = \frac{\text{Max} [ H(1)_{\text{moy}}, H(2)_{\text{moy}}, \dots, H(N)_{\text{moy}} ]}{D}$$

L'évaluation de l'intensité moyenne maximale de chaque averse a été effectuée pour cinq valeurs différentes de l'intervalle de temps  $D$ , à savoir : cinq (05), dix (10) quinze (15), vingt (20) et trente (30) minutes.

## II. 2. NOTION D'ECHANTILLONNAGE :

### II. 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  $X_i, i = 1, N$ .

### II. 2. 2. Paramètres d'une population :

Les paramètres de 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  $\mu$  de la population.

#### b). Variance d'un échantillon :

La variance  $\sigma^2$  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  $\sigma$ , peut être estimé 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  $(X_i, Y_i)$ ,  $i = 1, N$ , 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 :

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

## II. 3. METHODES REGRESSIVES - CORRELATION :

### II. 3. 1. Introduction :

L'étude des phénomènes climatiques et plus généralement des phénomènes naturels traite des situations très complexes, faisant intervenir de nombreux paramètres.

Compte tenu de l'importance de la masse de données, l'utilisateur est amené à user de moyens de traitement efficaces et rapides, pour une analyse concrète des séries chronologiques ( précipitation, température ) s'étendant sur plusieurs années.

Dans certains phénomènes naturels soumis à des variations aléatoires, tel que la pluviométrie, aucune relation physique sensible ne peut exister entre les différentes variables caractéristiques, ce qui conduit à essayer de formuler ces données par des équations mathématiques ( lois empiriques) valables permettant de prédire les valeurs de certaines variables (réponses), à partir de certain paramètres.

L'Objet de la méthode de régression est précisément l'étude, à partir d'un échantillon d'observations aléatoires de la liaison stochastique entre la variable Y dépendante et la variable X indépendante dans la population d'où a été tiré l'échantillon.

La démarche correspondante consiste essentiellement à :

- Etudier, à l'aide des informations d'un échantillon, la régression en spécifiant le type de fonction représentant la courbe de régression de Y en X, c'est à dire le lieu géométrique de la moyenne conditionnelle Y en fonction de X, et en précisant la variabilité de Y autour de cette courbe.

- Utiliser cette analyse de la régression en vu de pouvoir répondre convenablement à certaines questions de signification, comparaison, prédiction ... qu'on peut être amené à se poser relativement à la population d'où l'échantillon étudié a été tiré.

### II. 3. 2. Modélisation

#### a). Ajustement par un modèle de régression linéaire :

On dispose de n couple  $(x_i, y_i)$  ;  $i = 1, \dots, n$  , constituant un n - échantillon d'observations indépendantes de ( X, Y ).

On suppose vraie l'hypothèse :

$$E(Y / X) = \alpha + \beta . X \quad (\text{II-1})$$

Notre modèle de ligne droite sera tel que  $Y_i$ , seront en relation linéaire avec les  $X_i$ , mis à part les erreurs éventuelles.

Dans la population concernée par l'étude, on admet

	$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$	$i = 1, \dots, n$
$H_1:$	$E(\varepsilon_i) = 0$	$\forall i$
$H_2:$	$Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$	$\forall i$
	$E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0$	$\forall i \neq j$
$H_3:$	$\varepsilon_i \rightarrow N(0, \sigma)$	$\forall i$

$\varepsilon_i$  est une erreur, ou une perturbation, aléatoire supposée de moyenne nulle ( $H_1$ ), de variance  $\sigma^2$  et de covariance nulle avec les autres  $\varepsilon_i$  ( $H_2$ ) quelque soit  $i$ , tandis que  $H_3$  spécifie en plus, le type de loi de cette erreur, la loi normale.

On ne peut parler de corrélation entre Y et X que si X est aléatoire.

### b). Transformation des variables :

Suivant l'allure du nuage des points représentatifs de l'échantillon, on peut "lineariser" le nuage en adoptant une transformation de l'une ou des deux variables, pourvu toutefois que, après transformation, le modèle reste linéaire par rapport aux paramètres à estimer.

Par exemple les relations suivantes peuvent être linéarisées comme suit :

Equation	Changement de variable		Equation transformée
	$y^* =$	$x^* =$	
$y = \alpha x^\beta$	$\log y$	$\log x$	$y^* = \log \alpha + \beta x^*$
$y = \alpha x^{\beta x}$	$\log y$	$x$	$y^* = \log \alpha + \beta x$
$y = \alpha + \beta \log x$	$y$	$\log x$	$y = \log \alpha + \beta x^*$
$y = \frac{x}{\alpha x - \beta}$	$\frac{1}{y}$	$\frac{1}{x}$	$y^* = \log \alpha - \beta x^*$

Tableau - II. 1

### Terminologie :

$y_j$  : Variable *dépendante* ou *variable gauche*.  
Variable *expliquée* ou *régressante*.

$x_j$  : Variable *Indépendante* ou *variable droite*.  
Viable *explicative* ou *régresseur*.

### c) Estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés :

La méthode des moindres carrés due à Gauss reprend sur l'échantillon la propriété que  $E(Y/X) = \alpha + \beta X$  est la meilleure approximation de Y par X en moyenne quadratique. On cherche donc à ajuster au nuage de points ( $x_i, y_i$ ) une droite d'équation  $\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$  de telle sorte que  $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  soit minimal.

$\hat{y}$ ,  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  sont des estimations de  $y$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement.

La méthode de détermination de  $\alpha$  et  $\beta$  est la suivante :

On cherche à minimiser :

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2$$

$$\Omega = F(\alpha, \beta)$$

$\hat{\alpha}$  et  $\hat{\beta}$  sont solutions de :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Omega}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0 \\ \frac{\partial \Omega}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0 \end{cases}$$

Ceci nous donne comme équations normales :

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i - n \hat{\alpha} - \hat{\beta} \sum_{i=1}^n x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i - \hat{\alpha} \sum_{i=1}^n x_i - \hat{\beta} \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \end{cases}$$

1ère équation  $\rightarrow \hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{\hat{\beta}}{n} \sum x_i$

Ainsi  $\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x}$  (II-2)

Substituant dans la 2ème équation, on obtient :

$$\hat{\beta} = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad \text{(II-3)}$$

pour les calculs, c'est la forme la plus convenable, mais dans la littérature, la forme utilisée est la suivante :

[ en remarquant d'abord que ;

$$\begin{aligned} \bullet \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) &= \sum x_i y_i - \bar{x} \sum y_i - \bar{y} \sum x_i + n \bar{x} \bar{y} \\ &= \sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \\ &= \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n} \end{aligned}$$

$$\bullet \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - n \bar{x}^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad ]$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{II-4});$$

Que l'on note  $\hat{\beta} = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$  (II-5)

On peut remarquer enfin que :

$$\hat{\beta} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} - \frac{\bar{y} \sum (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{II-6})$$

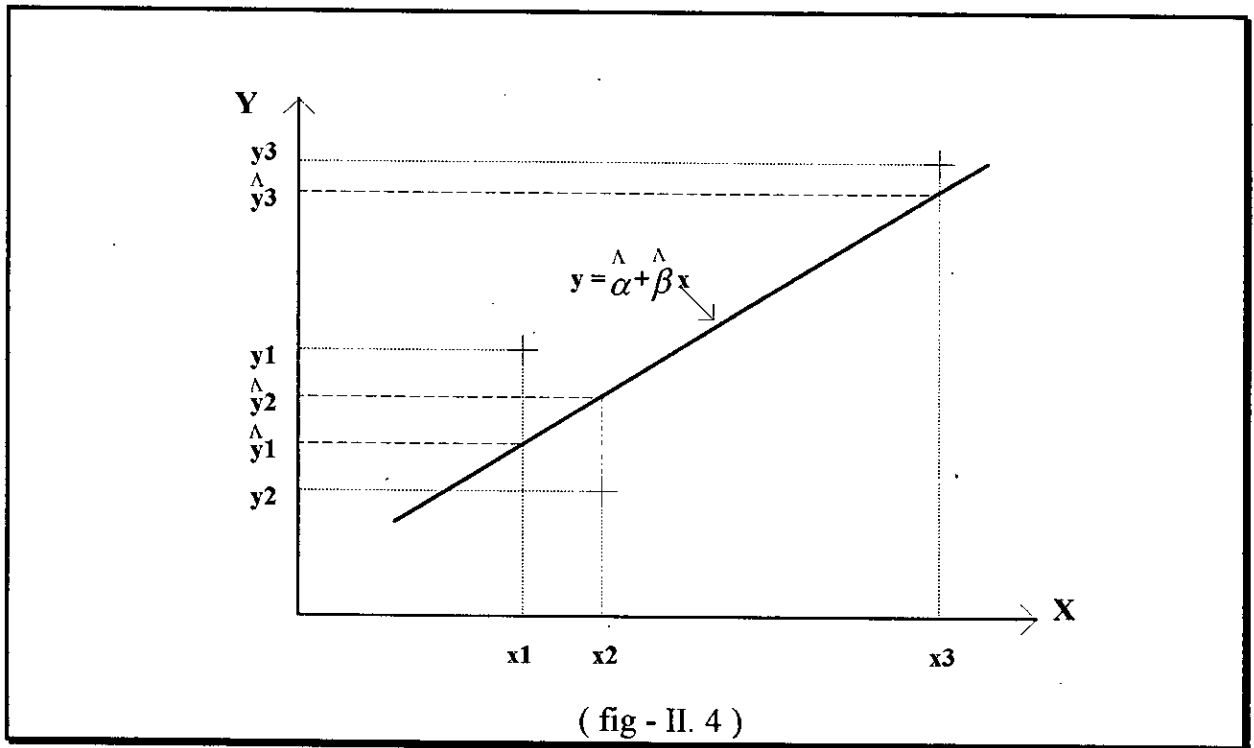
En résumé, les estimateurs des moindres carrés des paramètres sont :

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \left[ = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \right] = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}$$

et notre droite *ajustée* peut s'écrire

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} + \hat{\beta} x_i \quad (\text{II-7})$$



Puisque les  $y_i$  et les  $x_i$  dans le cas de la régression, sont des réalisations de variables aléatoires, il ne faut pas perdre de vue que  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\hat{\alpha}$  et  $\hat{\beta}$ , sont des réalisations de variables aléatoires.

**d). Propriétés statistiques des estimateurs :**

$\hat{\alpha}$  et  $\hat{\beta}$  sont eux mêmes des variables aléatoires. Montrons que ce sont des estimations sans biais de  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement.

$$\hat{\beta} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

$$E(\hat{\beta}) = \frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sum \{ (x_i - \bar{x}) E(y_i) \}$$

$$(E(y_i) = E(\alpha + \beta x_i + \varepsilon_i) = \alpha + \beta x_i)$$

$$\begin{aligned}
 E(\hat{\beta}) &= \frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sum \{ (x_i - \bar{x})(\alpha + \beta x_i) \} \\
 &= \frac{\alpha \sum (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} + \beta \frac{\sum x_i (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\
 &= \beta \frac{\sum (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \beta
 \end{aligned}$$

(où:  $\sum (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}) = \sum x_i (x_i - \bar{x}) - \bar{x} \sum (x_i - \bar{x})$ )

Ainsi :  $E(\hat{\beta}) = \beta$  (II-8)

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad \text{et} \quad E(\hat{\alpha}) = E(\bar{y}) - \bar{x} E(\hat{\beta})$$

Maintenant,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{1}{n} \sum (\alpha + \beta x_i + \varepsilon_i)$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \{ n\alpha + \beta \sum x_i + \sum \varepsilon_i \}$$

$$\bar{y} = \alpha + \beta \bar{x} + \frac{1}{n} \sum \varepsilon_i \quad (= \alpha + \beta \bar{x} + \varepsilon)$$

et  $E(\bar{y}) = \alpha + \beta \bar{x}$

donc  $E(\hat{\alpha}) = \alpha + \beta \bar{x} - \beta \bar{x} = \alpha$

Ainsi  $E(\hat{\alpha}) = \alpha$  (II-9)

On peut facilement calculer  $\text{Var}(\hat{\beta})$

$$\text{Var}(\hat{\beta}) = \text{Var} \left\{ \frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2} [(x_1 - \bar{x})y_1 + (x_2 - \bar{x})y_2 + \dots + (x_n - \bar{x})y_n] \right\}$$

$$\text{Var}(\hat{\beta}) = \left( \frac{1}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^2 [(x_1 - \bar{x})^2 \sigma^2 + (x_2 - \bar{x})^2 \sigma^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \sigma^2]$$

$$\text{Var}(\hat{\beta}) = S_{\hat{\beta}}^2 = \frac{\sigma^2}{S_{XX}} \quad \text{(II-10)}$$



de même :

$$\text{Var}(\hat{\alpha}) = \sigma^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (\text{II-11})$$

$$\text{Var}(\hat{\alpha}) = \sigma^2 \left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}} \right)$$

$$\text{cov}(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \frac{-\bar{x}}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sigma^2$$

$$\text{cov}(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \frac{-\bar{x}}{S_{xx}} \sigma^2 \quad (\text{II-12})$$

### II. 3. 3. Equation de l'analyse de la variance :

Ayant ajusté des observations, avec une ligne droite, on voudra maintenant savoir si celle-ci donne une représentation *adéquate* des données.

Une manière de répondre à cette question est *d'évaluer la proportion* de la variance totale des données expliquées par l'ajustement linéaire.

Une mesure utile de la variation totale de  $y_i$  est  $\sum (y_i - \bar{y})^2$  ; la somme des carrés des déviations des  $y_i$  de leur moyenne - Cette quantité sera d'autant plus grande que la variation l'est aussi -

On peut scinder cette quantité de la manière suivante :

Considérons  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  où  $\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i$  est la valeur ajustée correspondante à  $x_i$ .

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 &= \sum \left\{ (y_i - \bar{y}) - (\hat{y}_i - \bar{y}) \right\}^2 \\ &= \sum (y_i - \bar{y})^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 - 2 \sum (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y}) \end{aligned}$$

Or  $\hat{y}_i = \bar{y} + \hat{\beta} (x_i - \bar{x}) \rightarrow \hat{y}_i - \bar{y} = \hat{\beta} (x_i - \bar{x})$

Ainsi :

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \hat{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{y}) &= \hat{\beta} \sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) \\ &= \hat{\beta} S_{XY} = \hat{\beta}^2 S_{XX} \\ &= \hat{\beta}^2 \sum (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \sum \left[ \hat{\beta} (x_i - \bar{x}) \right]^2 \\ &= \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \end{aligned}$$

Donc ;  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 - 2 \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$

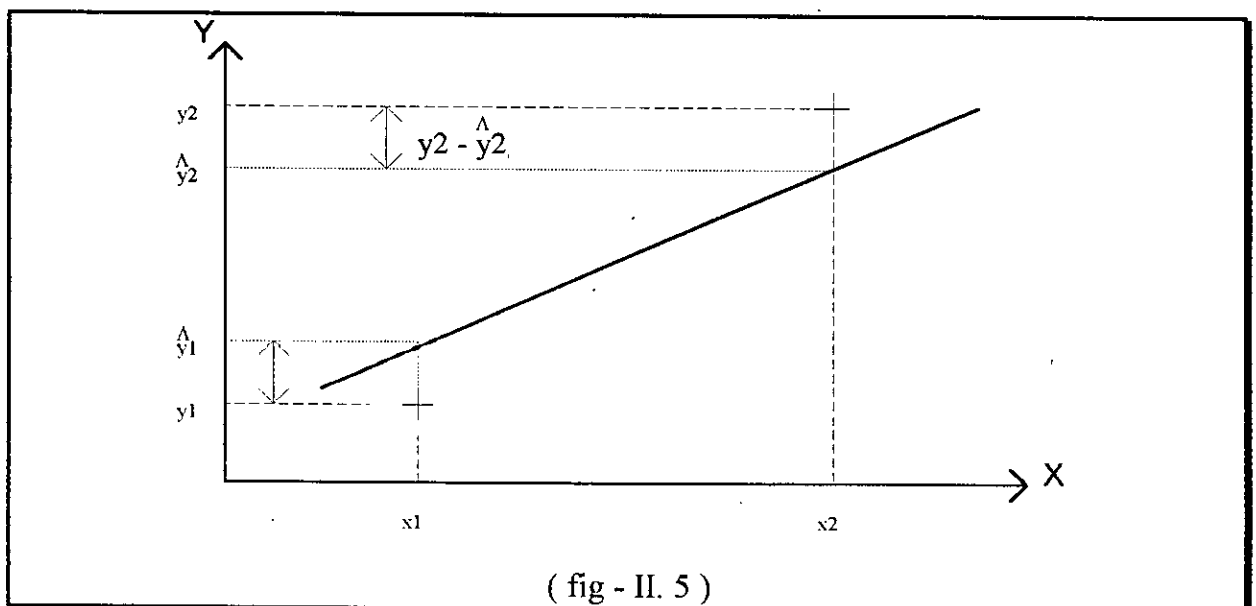
$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 - \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

En rearrangeant :

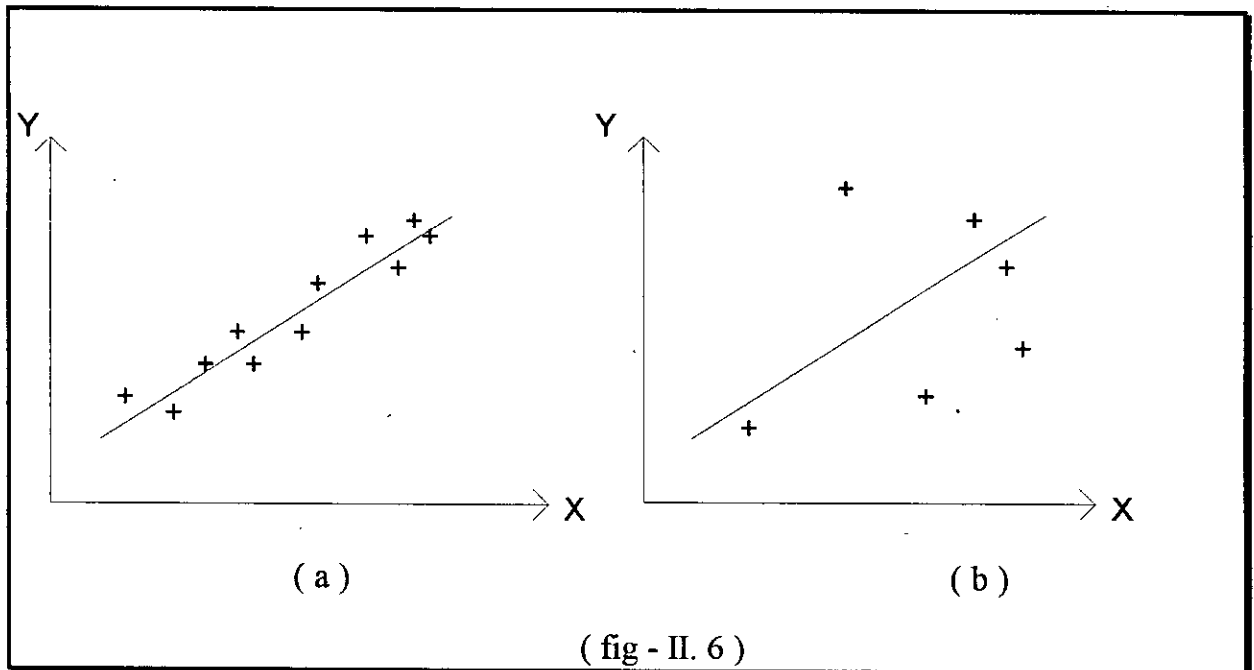
$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II-13})$$

• *Le premier membre de l'inégalité représente la variation totale des  $y_i$  ; la somme des carrés des déviations des  $y_i$  de leur moyenne.*

• *Le second terme du second membre est la somme des carrés des déviations des observations  $y_i$  des points correspondants sur la droite ajustée. Comme cela se voit sur le schéma ;*



Ceci nous donne une *mesure directe* - de " *l'exactitude* " (ou de la proximité ) de l'ajustement - si elle est " *petite* ", l'ajustement est très bon, et il est raisonnable de supposer que cette quantité, en fait, mesure *uniquement* les *erreurs d'expérimentation* ( fig - II. 6 - (a) ) ; mais si elle est " *grande* ", la suggestion est que *l'ajustement linéaire est inadéquat* ( fig - II. 6 - (b) ).



Il est bien sur très *difficile* de *formaliser* un critère adéquat de " *petitesse* ". Cette quantité est souvent appelée *somme des carrés résiduelles* ou *variation résiduelle*. Elle représente " *la quantité de variation, restante après l'ajustement par une droite* ".

• Le premier terme du second membre représente la somme des carrés des *déviations* des  $\hat{y}_i$  de leur moyenne  $\bar{y}$  ( les  $\hat{y}_i$  ont aussi  $\bar{y}$  comme moyenne ) c'est une mesure de la *variabilité* des  $\hat{y}_i$ , donc de *l'escarpement* de la droite de régression - On l'appelle souvent *somme des carrés dues à la régression* ou *variation expliquée par la régression* -

L'équation ( II-13 ) peut se résumer donc à :

$$\text{Var total} = \text{Vreg} + \text{Vres} \quad (\text{II-14})$$

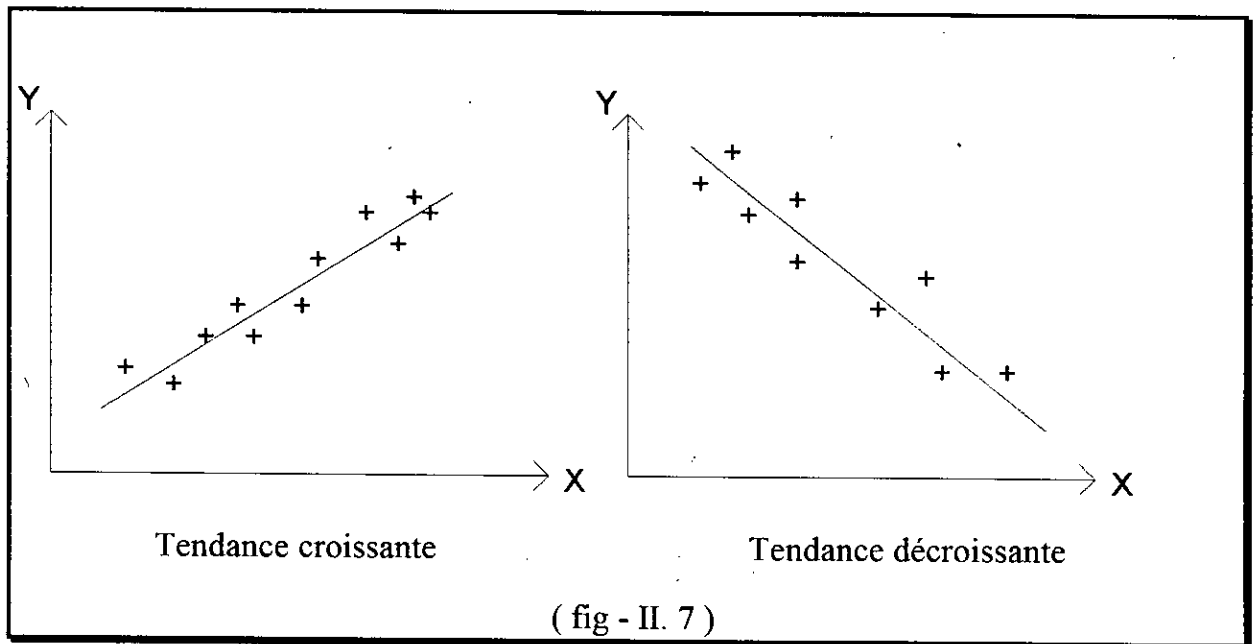
$$T = D + A$$

T : " Total variation " (Somme des carrés totale)

D : " Sum of squares due to regression " (Somme des carrés due à la regression)

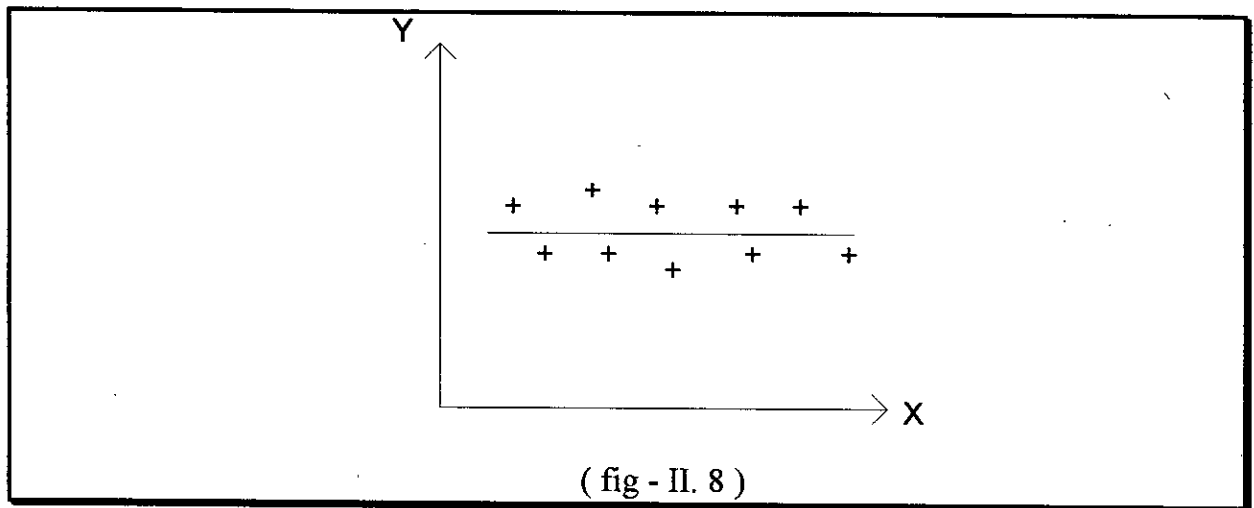
A : " Sum of squares about regression " (Somme des carrés résiduelle).

Dans l'équation ( II-14 ), l'idéal serait que  $V_{reg}$  soit très grand et  $V_{res}$  très petit ce qui indiquerait une tendance linéaire croissante ( ou décroissante ) bien définie, qui expliquerait la plus grande partie de la variation dans les données.



**Remarque :**

Si les deux quantités sont petites, ceci indique que les points sont presque " plats ", auquel cas nous n'avons pas du tout besoin d'un modèle du type  $y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$  mais plutôt d'un modèle du type  $y_i = Constante + \varepsilon_i$ .



D'un autre côté, si le premier terme est " *grand* ", nous devons être prudents dans nos conclusions, comme décrit plus haut.

### II. 3. 4. Coefficient de détermination :

Les règles énoncées plus haut peuvent être *synthétisées* en calculant le rapport de la somme des carrés dues à la *régression* à la *variation totale*.

Ce rapport souvent noté  $r^2$  ou  $(R^2)$  est appelé *coefficient de détermination* :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{II-13})$$

$R^2$  est utilisé, en quelque sorte *in formellement*, comme mesure de la *qualité* de la l'ajustement. Par construction, sa valeur varie entre " 0 " et " 1 ".

Plus sa valeur se rapproche de " 1 ", plus l'ajustement est meilleur. C'est certainement une mesure utile, mais à interpréter avec prudence.

Note :

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \\ &= \beta^2 \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \\ &= \left( \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^2 \cdot \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \end{aligned}$$

$$R^2 = \frac{\left\{ \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right\}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

$R^2$  est le carré du coefficient de corrélation empirique des  $X_i$ ,  $Y_i$ , qui représente lorsqu'il est multiplié par 100 une autre expression de  $R^2$  en %, à savoir la portion de variation totale expliquée par l'équation de régression obtenue.

**Remarque :**

On utilise par fois le coefficient de corrélation qui est la racine carrée du coefficient de détermination  $R^2$ , il est toujours compris entre " -1 " et " 1 ". Il vaut  $\pm 1$  dans le cas d'une liaison fonctionnelle parfaite, il vaut " 0 " dans le cas contraire.

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

**II. 3. 5. Estimation de biais de  $\sigma^2$  :**

En supposant que le modèle d'une ligne droite est réellement correct (convenable, du moins ), on peut directement montrer que :

$$\begin{aligned} E(\text{variation résiduelle}) &= E(\text{somme des carrés résiduelle}) \\ &= E(A) = (n - 2) \sigma^2 . \end{aligned}$$

Ce qui veut dire que la *somme des carrés résiduelle*, divisée par  $(n - 2)$  est un estimateur *sans biais* de  $\sigma^2$ .

$$E\left(\frac{A}{n-2}\right) = \sigma^2 \tag{II-16}$$

$\frac{A}{n-2}$  est souvent appelé le carré moyen résiduel, et nous le dénoterons par  $s^2$ .

$$s^2 = \frac{A}{n-2}$$

**Démonstration de ( II-16 ).**

On doit montrer que 
$$E\left[\frac{1}{n-2}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2\right] = \sigma^2$$

On a : 
$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x_i = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} + \hat{\beta} x_i$$

$$\begin{aligned}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 &= \sum\left(y_i - \bar{y} - \hat{\beta}(x_i - \bar{x})\right)^2 \\ &= \sum(y_i - \bar{y})^2 + \hat{\beta}^2 \sum(x_i - \bar{x})^2 - 2\hat{\beta} \sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \\ &= \sum(y_i - \bar{y})^2 + \hat{\beta}^2 \sum(x_i - \bar{x})^2 - 2\hat{\beta} \sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \\ &\quad \left( \text{car } \hat{\beta} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \right)\end{aligned}$$

$$\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum(y_i - \bar{y})^2 - 2\hat{\beta}^2 \sum(x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{II-15})$$

Maintenant :

$$\begin{aligned}E\left[\frac{1}{n-2}\left\{\sum(y_i - \bar{y})^2 - 2\hat{\beta}^2 \sum(x_i - \bar{x})^2\right\}\right] &= E\left[\frac{1}{n-2}\left\{S_{yy} - 2\hat{\beta}^2 S_{xx}\right\}\right] \\ &= \frac{1}{n-2}\left\{\sum E[(y_i - \bar{y})^2] - \sum(x_i - \bar{x})^2 - E\left[\hat{\beta}^2\right]\sum(x_i - \bar{x})^2\right\}\end{aligned}$$

Utilisant le résultat classique pour toute variable aléatoire Z :

$$E(Z) = \text{Var}(Z) + \{E(Z)\}^2,$$

On a :

$$\begin{aligned}\bullet \quad E\left[\hat{\beta}^2\right] &= \text{Var } \hat{\beta} + \left(E(\hat{\beta})\right)^2 \\ E\left[\hat{\beta}^2\right] &= \frac{\sigma^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} + \beta^2\end{aligned} \quad (\text{II-18})$$

$$\begin{aligned}
 E[(y_i - \bar{y})^2] &= \text{Var}(y_i - \bar{y}) + E[(y_i - \bar{y})]^2 \\
 E[(y_i - \bar{y})] &= E(y_i) - E(\bar{y}) = \alpha + \beta x_i - \alpha - \beta \bar{x} \\
 &= \beta (x_i - \bar{x})
 \end{aligned}$$

$$\{E[y_i - \bar{y}]\}^2 = \beta^2 (x_i - \bar{x})^2$$

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(y_i - \bar{y}) &= \text{Var}\left[y_i - \frac{1}{n}(y_1 + y_2 + \dots + y_n)\right] \\
 &= \text{Var}\left[y_i - \frac{1}{n}y_i - \frac{y_1 + y_2 + \dots \text{tout les } y_j \text{ sauf } y_i \dots + y_n}{n}\right]
 \end{aligned}$$

Les deux termes ( 1 ) et ( 2 ) sont indépendants.

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(y_i - \bar{y}) &= \text{Var}\left(y_i - \frac{1}{n}y_i\right) + \text{Var}\left\{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n y_j\right\} \\
 &= \text{Var}\left[\left(1 - \frac{1}{n}\right)y_i\right] + \text{Var}\left\{\frac{1}{n}\sum_{j \neq i}^n y_j\right\}
 \end{aligned}$$

Ainsi :

$$\begin{aligned}
 \text{Var}(y_i - \bar{y}) &= \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \text{Var}(y_i) + \left(\frac{1}{n}\right)^2 (n-1) \text{Var}(y_i) \\
 &= \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \sigma^2 + \frac{n-1}{n^2} \sigma^2
 \end{aligned}$$

$$\text{Var}(y_i - \bar{y}) = \left(\frac{n-1}{n}\right) \sigma^2$$

Donc 
$$E[(y_i - \bar{y})^2] = \left(\frac{n-1}{n}\right) \sigma^2 + \beta^2 (x_i - \bar{x})^2 \tag{II-17}$$



Pour conclure :

$$\begin{aligned}
 E\left(\frac{1}{n-2}\sum\left(y_i - \hat{y}\right)^2\right) &= E\left[\frac{1}{n-2}\left(S_{YY} - \beta^{\wedge 2} S_{XX}\right)\right] \\
 &= \frac{1}{n-2}E\left[S_{YY} - S_{XX} E\left(\beta^{\wedge 2}\right)\right] \\
 &= \frac{1}{n-2}\left[\sum_{i=1}^n E\left(\left(y_i - \bar{y}\right)^2\right) - S_{XX}\left(\frac{\sigma^2}{S_{XX}} + \beta^2\right)\right] \\
 &= \frac{1}{n-2}\left[n - \frac{(n-1)}{n}\sigma^2 + \beta^2 S_{XX} - \sigma^2 - \beta^2 S_{XX}\right] \\
 &= \frac{(n-2)\sigma^2}{n-2}
 \end{aligned}$$

et donc 
$$E\left[\frac{1}{n-2}\sum\left(y_i - \hat{y}\right)^2\right] = \sigma^2$$

On peut noter Au passage, que le carré moyen résiduel est un bon moyen de tester la " justesse " de l'ajustement - En effet, si nous avons la chance d'avoir un estimateur " externe " de  $\sigma^2$  ( cela peut venir par exemple, d'une longue expérience ou d'une autre expérimentation ... ), on peut le comparer à  $S^2$  grâce, par exemples, à un F-test. S'ils ne sont pas significativement différents, l'ajustement linéaire pourrait être adéquat -

### II . 3. 6. A N O V A de la table de régression :

#### a). Le F-test de la signification d'une régression :

Sachant que les  $y_i$  sont des variables aléatoires, toute fonction des  $y_i$  est aussi une variable aléatoire ; deux fonctions particulières sont ainsi définies :

$$\frac{\text{Somme des carrés due à la régression}}{1} = \frac{D}{1}$$

$$\frac{\text{Somme des carrés résiduelle}}{n-2} = \frac{A}{n-2}$$

$$\frac{\frac{D/}{1}}{\frac{A/}{n-2}}$$

(II- 20)

Si  $\beta = 0$ , cette quantité est distribuée selon :

$$\frac{\frac{\sigma^2 \chi_1^2}{1}}{\frac{\sigma^2 \chi_{n-2}^2}{n-2}} = F_{1,n-2} \quad (\text{II-21})$$

( En supposant que D et A sont indépendants )

$\chi_1^2$  : est une KHI-DEUX à 1 degré de liberté

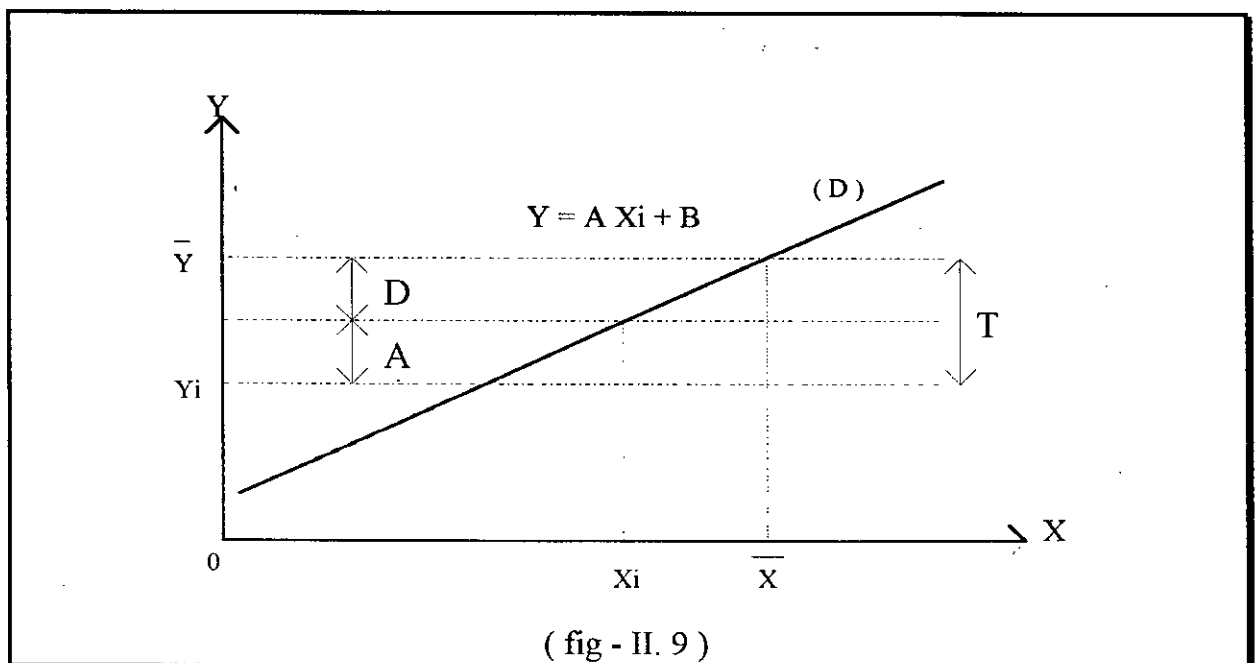
$\chi_{n-2}^2$  : est une KHI-DEUX à ( n - 1 ) degrés de liberté

$F_{1,n-2}$  : est une Fischer à 1 et ( n - 2 ) de degrés de liberté

Ainsi, on peut tester l'hypothèse  $\beta = 0$  en comparant le ratio  $F = \frac{D/1}{A/n-2}$  avec

$F_{1,n-2}$  à 100 ( 1 -  $\alpha$  ) % de point de cette distribution ( les grandes valeurs étant significatives ), où  $\alpha$  : est le risque d'erreur. ( Ne pas confondre, malgré l'idendité de l'écriture, le coefficient  $\alpha$  de la droite de régression et le risque d'erreur  $\alpha$  ).

Il est très important de se rappeler ce que cela signifie : supposons l'existence d'une droite de régression, nous pouvons affirmer que la pente n'est pas égale à zéro.



**b). Table de l'analyse de la variance :**

La table e présente comme suit :

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F - observé	F - tabulé
Due à la régression	$D = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	1	$D/1$	$\frac{D/1}{A/n-2}$	$F_\alpha (1, n-2)$
Résiduelle	$A = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	n - 2	$A/n-2$		
Total	$T = \sum (y_i - \bar{y})^2$	n - 1	/	/	

Tableau - II. 2

**II. 3. 7 Autre test d'hypothèse sur  $\beta$  -Intervalle de confiance pour  $\beta$  et  $\alpha$ :**

Une autre approche alternative pour les tests d'hypothèse concernant  $\beta$  est disponible : il s'agit de celle utilisant la distribution t ( student ).

Ainsi, tester  $\beta = 0$  de cette manière est équivalent au F test décrit plutôt. car nous avons :

$$(t_v)^2 = F_{1,v} \text{ et } \left[ \frac{\hat{\beta} - \beta}{\frac{S_{\hat{\beta}}}{\sqrt{S_{XX}}}} \right]^2 = \frac{\hat{\beta}^2 S_{XX}}{S_{\hat{\beta}}^2} = \frac{D/1}{A/n-2}$$

$\beta$  étant remplacé par 0.

L'intervalle de confiance pour  $\beta$  est déterminé de manière suivante. par exemple, pour intervalle de confiance à 95 %, et notant par  $t_{n-2}$  ( à 5 % ) le point ( bilatéral ) de  $t_{n-2}$ , nous avons :

$$0.95 = P \left\{ -t_{(n-2,0.05)} < \frac{\hat{\beta} - \beta}{S_{\hat{\beta}} / \sqrt{S_{XX}}} < t_{(n-2,0.05)} \right\}$$

$$0.95 = P \left\{ \hat{\beta} - t_{(n-2,0.05)} \frac{S_{\hat{\beta}}}{\sqrt{S_{XX}}} < \beta < \hat{\beta} + t_{(n-2,0.05)} \frac{S_{\hat{\beta}}}{\sqrt{S_{XX}}} \right\}$$

d'où :

$$\hat{\beta} - t_{(n-2,0.05)} \frac{S_{\hat{\beta}}}{\sqrt{S_{XX}}} < \beta < \hat{\beta} + t_{(n-2,0.05)} \frac{S_{\hat{\beta}}}{\sqrt{S_{XX}}}$$

de même

$$\hat{\alpha} - t_{(n-2,0.05)} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^2}{S_{XX}}} S_{\hat{\alpha}} < \alpha < \hat{\alpha} + t_{(n-2,0.05)} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^2}{S_{XX}}} S_{\hat{\alpha}}$$

**II. 3. 8. L'examen des résidus :**

Il s'applique pour des situations où un modèle est ajusté, et où les résidus présentent une variation inexplicable.

Les résidus sont définis comme étant les n différences  $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$  (i = 1, ....., n).

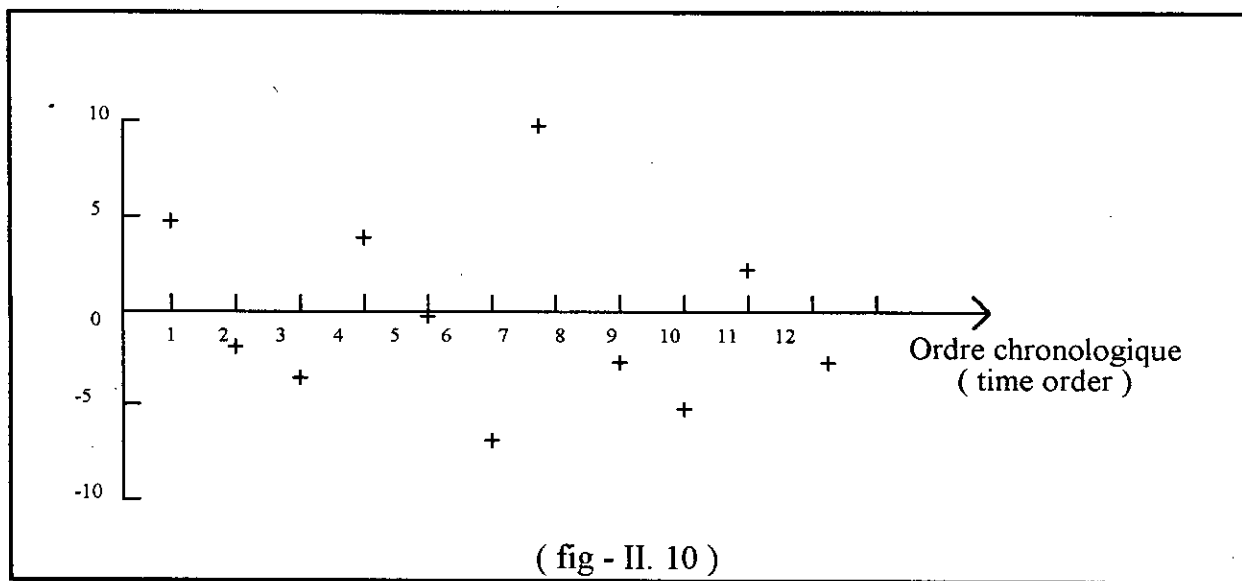
Ils représentent la différence entre ce qui est actuellement observé et ce qui est prédit par l'équation de régression - C'est, la quantité que l'équation de régression a été incapable d'expliquer.

On rappelle que les  $\varepsilon_i$  doivent vérifier certaines hypothèses qui sont : l'indépendance, la moyenne nulle, la variance constante "  $\sigma^2$  ", et ils doivent également suivre une distribution normale.

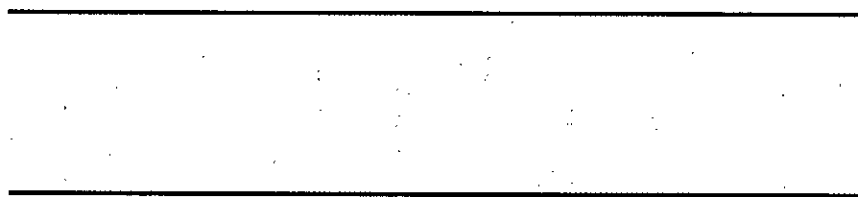
Il existe plusieurs méthodes ( toutes graphiques ) de l'examen des résidus, parmi ces méthodes citons la méthode dite " Time sequence plot " :

**Exemple :**

L'analyse d'une régression a donné lieu à onze résidus  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{11}$  qui sont : 5, - 2, - 4, 4, 0, - 6, 9, - 2, - 5, 3, - 2. Supposant que ces résidus ont eu lieu dans l'ordre chronologique dans lequel ils sont donnés ( voir diagramme de la fig - II. 10 ).



Les différents points représentés dans ce diagramme ont l'impression de former une " bande " horizontale au tour de la valeur nulle ( fig - II. 11 ).



(fig - II. 11 )

Cela s'explique par le fait que l'effet chronologique des observations ( effectuées à long terme ) n'influence pas les données.

Les autres cas illustrés dans la ( fig - II. 12 ) nous permettent de conclure que l'effet temporel n'a pas été pris en compte.

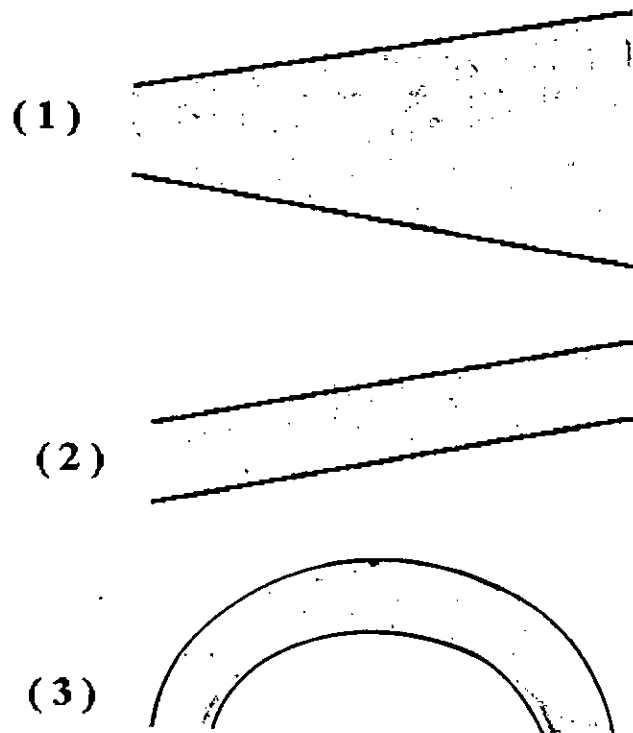


fig - II. 12

( 1 ) La variance n'est pas constante mais augmente avec le temps, cela signifie qu'une analyse par moindres carrés pondéré doit être effectuée .

( 2 ) Un terme temporel linéaire doit être inclus dans le modèle.

( 3 ) Deux termes temporels ( linéaire et quadratique ) doivent être inclus dans le modèle.

### II. 3. 9. Les points aberrants ( outliers ) :

Il existe parmi les  $\varepsilon_i$  des points aberrants. Ce sont des valeurs qui dépassent de loin le reste des  $\varepsilon_i$  en valeurs absolues. Ils représentent des cas particuliers incohérents avec l'ensemble des données. Il s'ensuit que les points aberrants doivent être soumis à un examen particulier afin de connaître les raisons de leur présence. Le rejet automatique des points aberrants n'est pas toujours la meilleure manière de procéder.

Dans certains cas ces points peuvent fournir des informations que les autres données ne possèdent pas, cela est due au fait qu'ils ( outliers ) proviennent d'une exceptionnelle combinaison de circonstances qui peut être d'un intérêt vital quant aux résultats escomptés de l'étude.

## **Chapitre III**

# ***ETUDE ET RECHERCHE DE MODELES***

### III. 1. INTRODUCTION

Depuis que les aménagements hydrauliques ont commencé à être conçus à l'échelle régionale, leur échelle a gagné en complexité tant à cause de grand nombre de facteurs internes ou environnants, que des liens, souvent fort subtils, entre les divers composants.

Le modèle mathématique a vu grandir son importance comme instrument de synthèse et de prévision le plus adéquat .

En effet, les processus physiques intervenant dans le cycle de l'eau sont fondamentalement complexes. Certains d'entre eux, telles que les précipitations par exemple revêtent un caractère aléatoire au regard des connaissances actuelles. Aussi est-il délicat d'établir de façon exhaustive les théories physiques propres à chacun des éléments du cycle et de trouver des liens déterministes entre eux. Les hydrologues sont cependant, souvent contraints, de représenter l'évolution de ces processus par des modèles mathématiques plus ou moins complexes, images imparfaites de la réalité .

Un modèle mathématique est d'après KARPLUS, " Un ensemble d'équations caractérisant un système réel appelé prototype, de telle sorte qu'au moins un certain nombre de liens entre des sollicitations externes et des réponses correspondantes soient représentés de façon adéquate " .

La représentation schématique d'un phénomène (système) hydraulique, peut se concevoir comme étant une relation entre les sollicitations auxquelles le système est soumis ( variables d'entrée) et la réponse du système (variables de sortie) (Fig III - 1) .

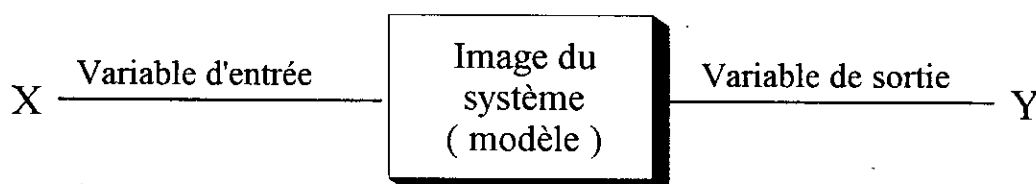


fig . III. 1 : Principe de la modélisation.

Généralement l'étude d'un tel phénomène consiste à prévoir l'état ou l'évolution des grandeurs de sortie ou réponse à une valeur ou une variation des grandeurs d'entrées à l'aide d'un modèle.



Parmi l'amas de modèles mathématiques utilisées en hydrologie, on distingue en particulier les modèles statistiques de régression et de corrélation qui développent des relations empiriques calées à l'aide de données expérimentales, et les quantifient en termes de coefficient de corrélation, bande de confiance et test de signification. Dans ce type de modèles, les données utilisées sont de nature discrète avec les intervalles de discrétisation fixés préalablement.

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes étapes de la recherche d'une dépendance stochastique susceptible d'exister entre les deux variables aléatoires intensité moyenne maximale ( $I_M$ ) et la hauteur pluviométrique journalière ( $H_{PV}$ ).

### III. 2. DEFINITIONS ET REMARQUES :

Soient les différentes définitions suivantes des différentes variables utilisées :

$H_{PG}$  : hauteur pluviographique journalière [ mm ].

$H_{PV}$  : hauteur pluviométrique journalière [ mm ].

$I_M$  : intensité moyenne maximale [ mm / h ] sur un intervalle de temps  $D_i$  choisis précédemment, à savoir : cinq (05), dix (10), quinze (15), vingt (20) et trente (30) minutes.

$I$  : intensité moyenne journalière [ mm / h ].

$H_{MAX}$  : hauteur de pluie moyenne maximale correspondant à  $I_M$  [ mm ].

- L'échantillon sélectionné correspond au nombre total de journées pluvieuses pendant lesquelles il n'y a eu qu'une pluie isolée.
- La taille de l'échantillon s'est avérée égale à  $N = 223$  pour toute la période d'observation.
- les graphes correspondants aux intervalles de temps 10, 15, 20 et 30 minutes sont représentés en *ANNEXES*.

### III. 3. ETUDE DE LA REPARTITION $H_{PG} = f(\text{durée de la pluie})$ :

Cette présentation graphique permet d'une part de rechercher s'il existe une corrélation éventuelle entre les hauteurs pluviographiques journalières et la durée de la pluie et d'autre part de mieux voir les possibilités de classification des pluies pour réduire l'influence des paramètres lors de la modélisation. La figure III. 2 montre le caractère aléatoire de cette répartition (à une même hauteur " PG ", correspondent des durées de pluies différentes). On constate également que la durée de pluies isolées varie entre 6 minutes à 3 heures.

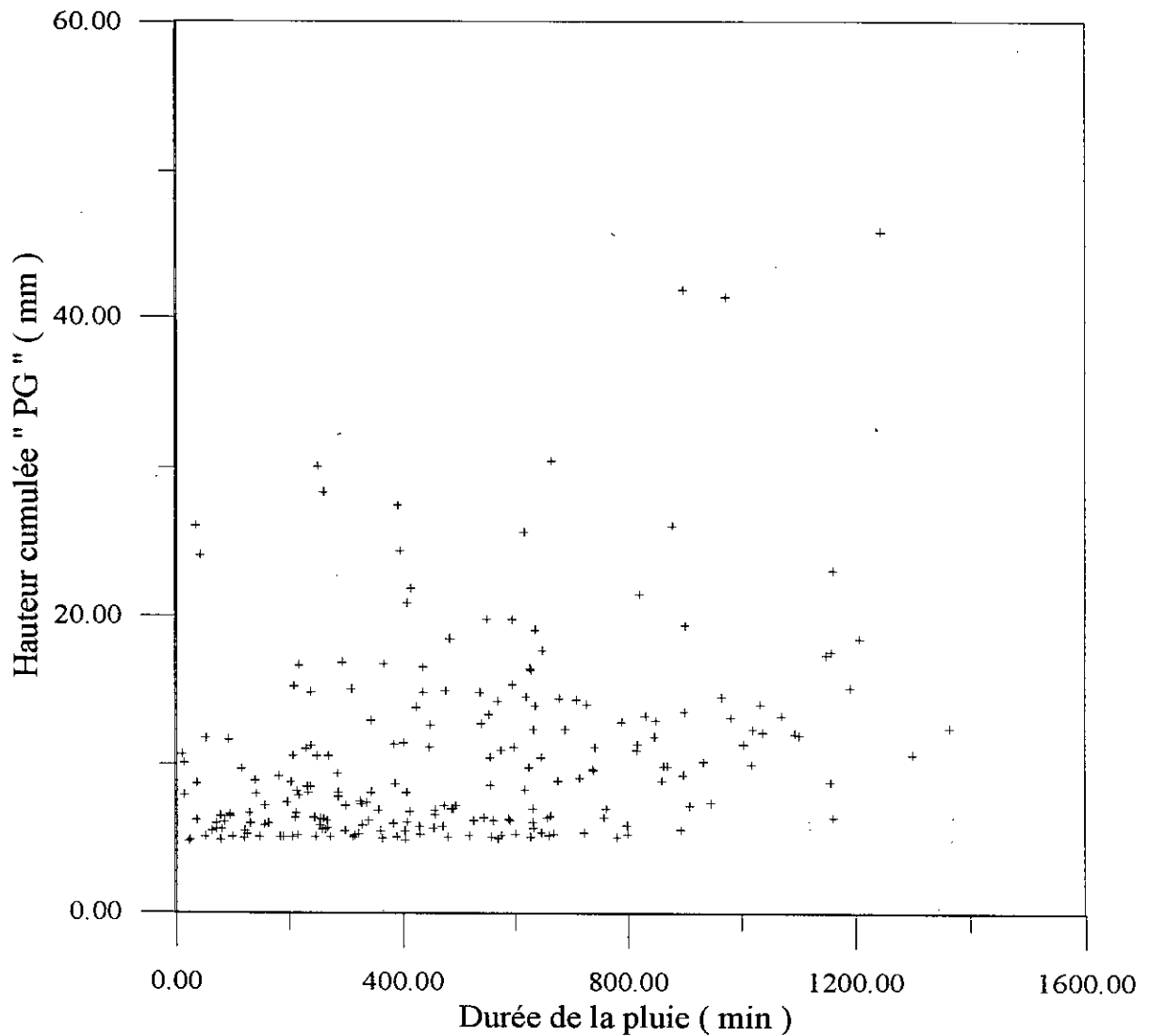


fig . III. 2 : Représentation graphique de Hpg en fonction de la durée de pluie pour toute la période d'observation

### III. 4. ETUDE DE LA RELATION $I_M = f ( H_{PV} )$ :

#### III. 4. 1. Prise en compte de toute la période d'observation :

Dans cette étude, on fait intervenir les deux variables choisies dans l'approche proposée initialement (  $I_M = f ( H_{PV}, \text{Paramètres} )$  ) pour voir s'il existe une possibilité de proposer un modèle global en utilisant la totalité des observations.

Pour ce faire, il est nécessaire de représenter le nuage de points relatif aux deux échantillons au moyen des valeurs appariées  $I_M (i)$ ,  $H_{PV} (i)$  des grandeurs  $I_M$  et  $H_{PV}$ . Le résultat obtenu est représenté par la fig - III. 3.

#### a). Interprétation :

Les observations qu'on peut faire sont les suivants :

1) Absence d'une tendance significative de tous les nuages de points obtenues. Cette dispersion confirme donc ce qui a été dit précédemment concernant *l'irrégularité et l'aspect aléatoire* des pluies en Algérie.

$I_M$  dépend de la forme de la pluie et non pas de sa hauteur totale, c'est donc une *caractéristique de forme de la pluie*.

3) La densité des nuages de points est beaucoup plus importante pour  $I_M$  variant entre 0 à 15 mm/h pour  $I_M$  et  $H_{PV}$  compris entre 0 et 20 millimètres. Ces intervalles contiennent la majorité des pluies les plus fréquemment enregistrées.

4) L'intervalle de temps  $D_i$  n'a pratiquement aucune influence sur l'allure des nuages de points obtenues. Sauf que si on augmente  $D_i$  davantage le nuage de points va tendre vers une droite  $y = X / D_i$  ( lorsque  $D_i$  tend vers la durée maximale des pluies ).

Toujours dans le cadre de la recherche d'une corrélation entre  $I_M$  et  $H_{PV}$ , nous avons pensé représenter les logarithmes décimaux de ces variables ( $\log [ I_M ]$ ,  $\log [ H_{PV} ]$ ) qui montre un léger rétrécissement du nuage de points, mais tout en ayant une variance importante ( homosédasticité non vérifier ); ce qui rend difficile l'établissement d'une loi d'ajustement adéquate ( fig . III. 4 ).

#### III. 4. 2. Prise en compte de l'effet saisonnier :

L'échelle saisonnière choisie est la suivante :

Saison humide : [ Octobre à Mars ] fig . III. 5 (a).

Saison sèche : [ Avril à Septembre ] fig . III. 5 (b).

d'après les deux figures précédentes, il est clair que l'effet saisonnier n'a aucune influence sur la répartition  $I_M = f ( H_{PV} )$ . Aucune tendance générale n'apparaît et la dispersion maintient son caractère aléatoire.

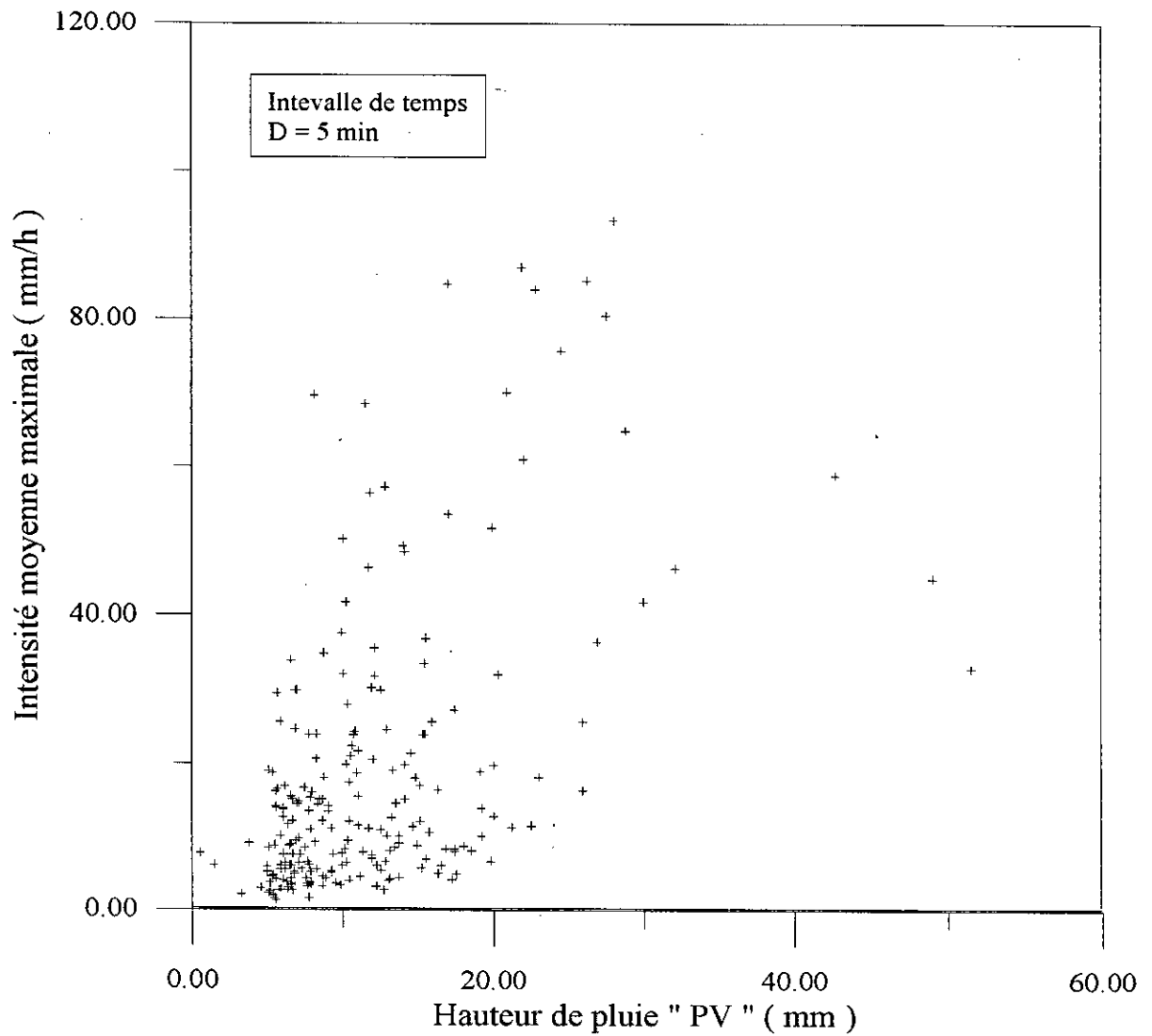


fig . III. 3 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour toute la période d'observation

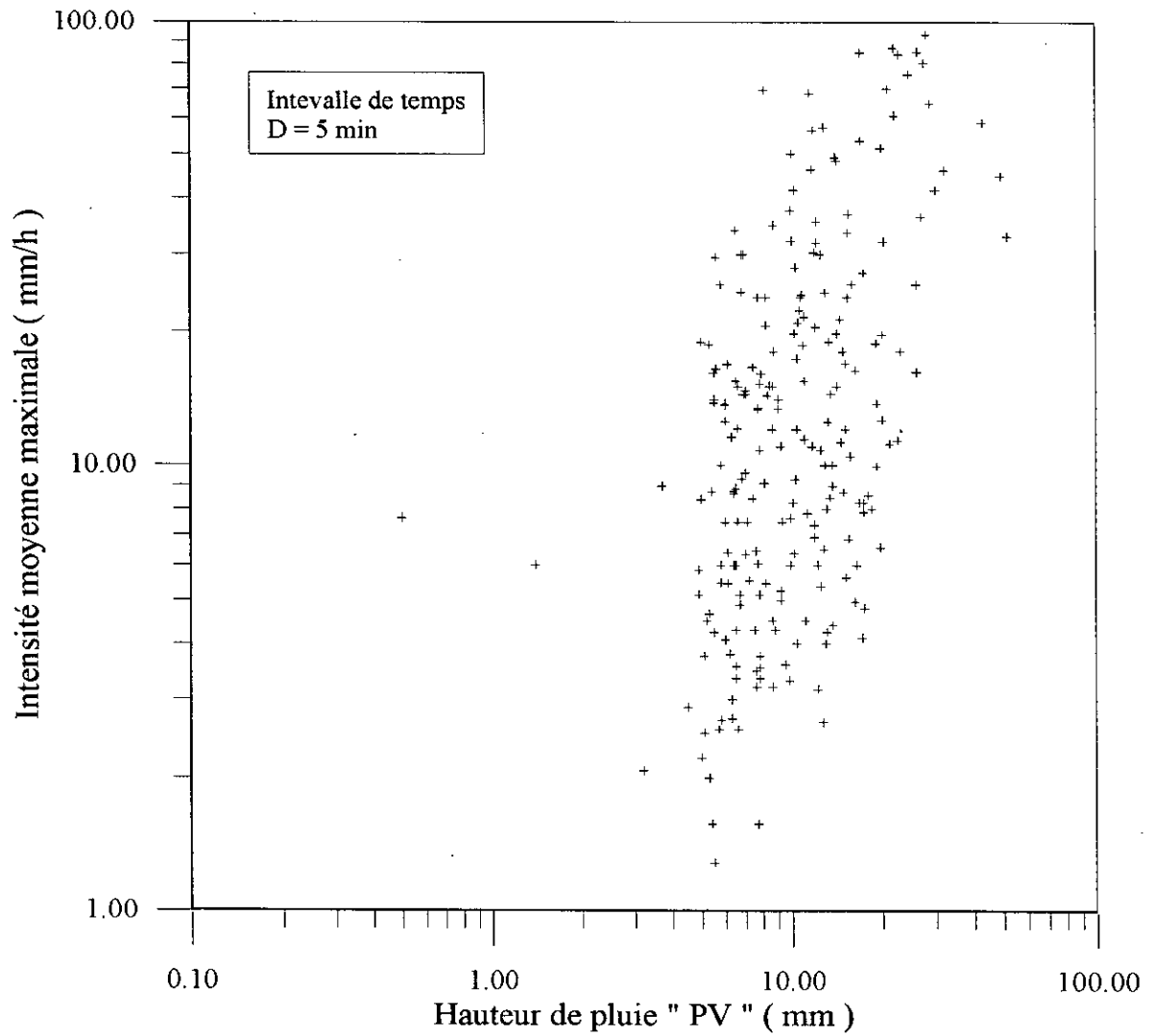


fig . III. 4 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " sur une echelle bilogarithmique pour toute la période d'observation

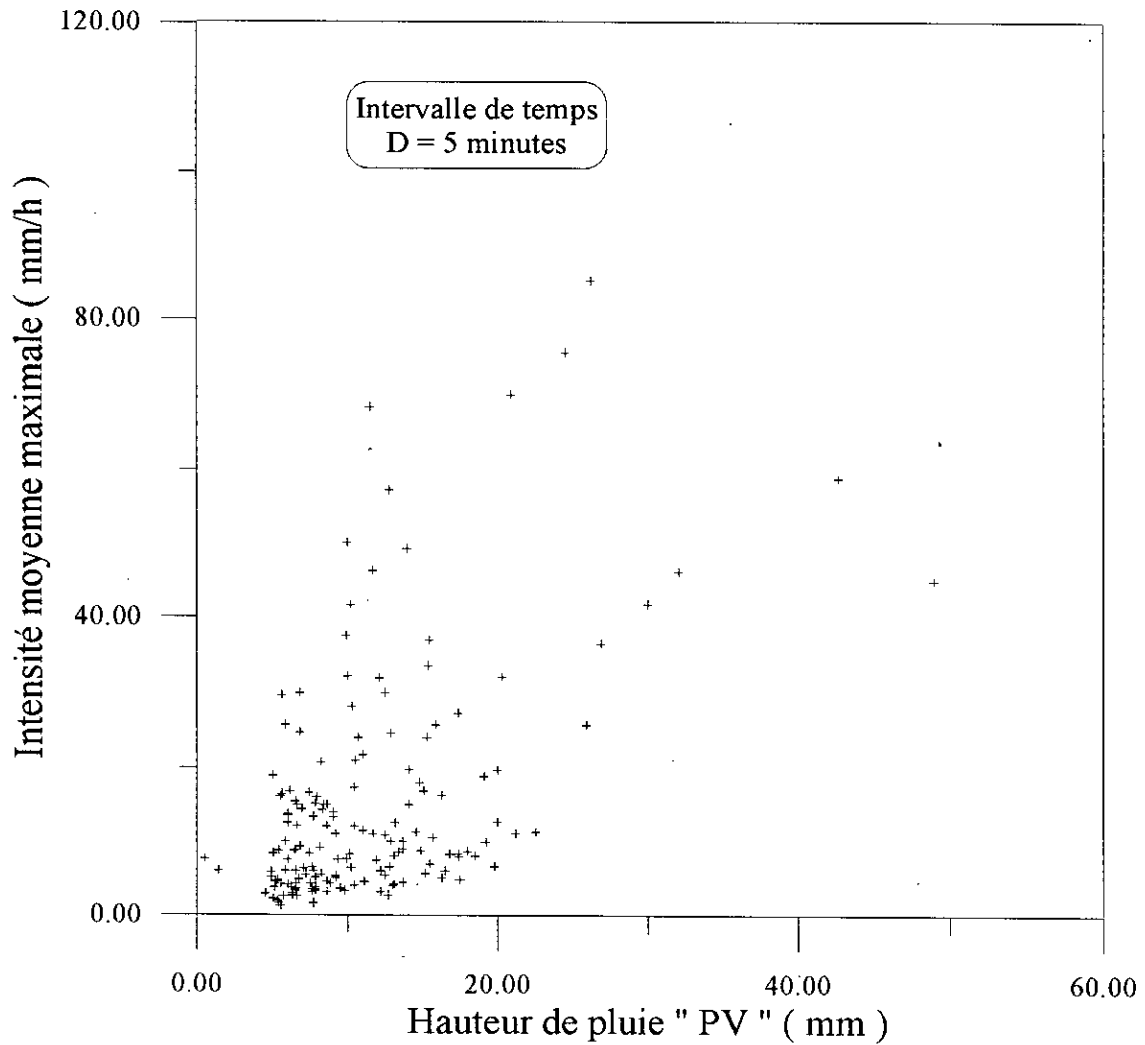


fig . III. 5. (a) : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " saisons humides ( Octobre à Mars )

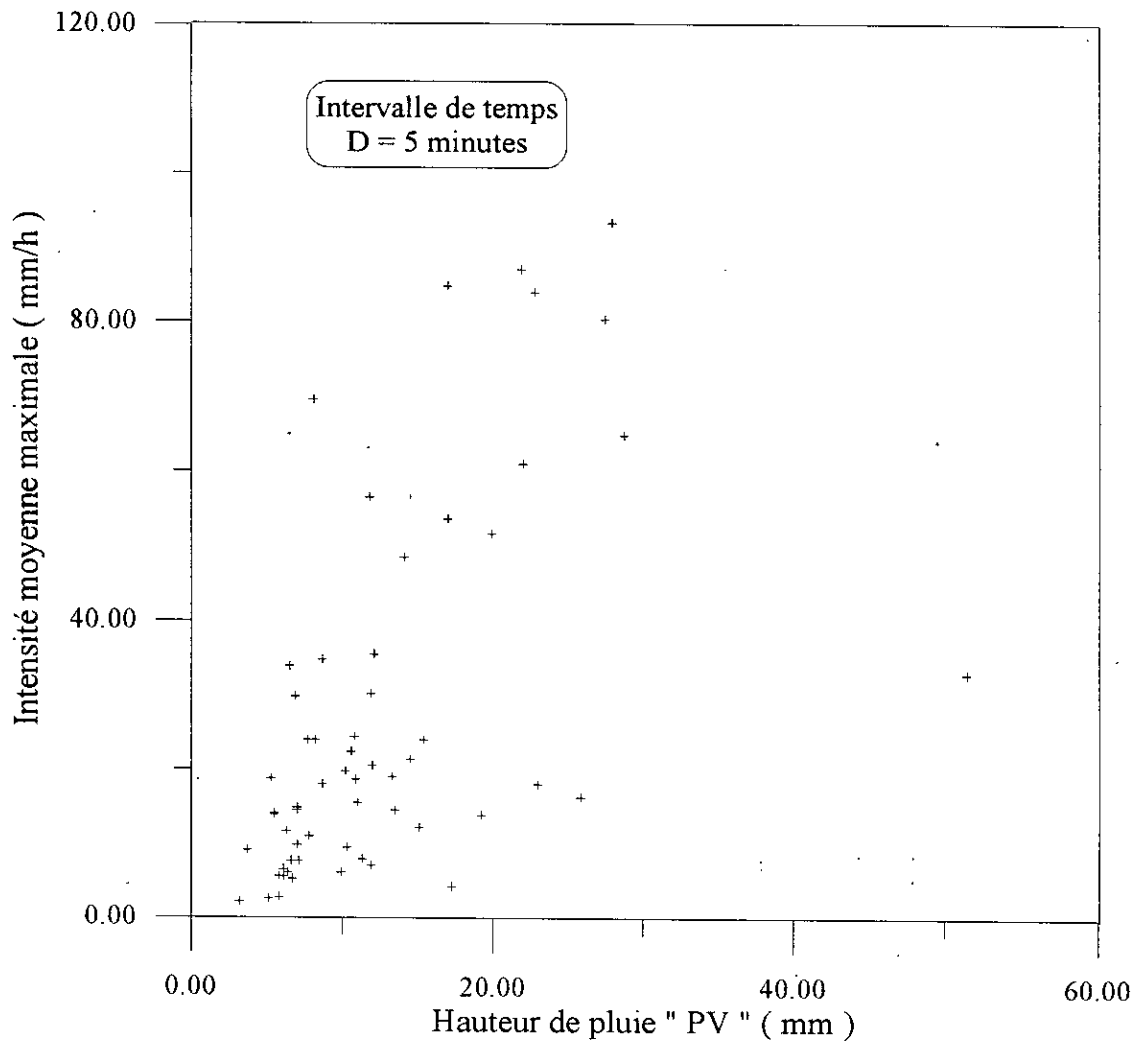


fig . III. 5. (b) : Representation graphique de " Im " en fonction de " Hpv " pour les saisons sèches ( Avril à Septembre )

### III. 5. ETUDE DES RELATIONS $I_M = f(I)$ et $\frac{I_M}{I} = f(H_{PV})$ :

Un paramètre supplémentaire a été introduit dans le but de rechercher une corrélation meilleure que celle établie à l'aide du paramètre " H " à partir des observations existante, ce paramètre est l'intensité moyenne journalière pluviographique ( I ) définie ainsi :

$$I = \frac{H_{PG} \text{ journalière}}{\text{durée de la pluie}} \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$$

Cette nouvelle variable " I ", a été introduite de deux manière différentes :

$$I_M = f(I) \quad (\text{fig. III. 6}).$$

$$\delta = f(H_{PV}) \quad (\text{fig. III. 7}).$$

où :  $\delta$  est un coefficient addimensinnel défini comme étant le rapport entre l'intensité moyenne maximale et l'intensité moyenne journalière.

$$\delta = \frac{I_M}{I}$$

Ce coefficient permet de réduire les erreurs de même origine pouvant affecter à la fois  $I_M$  et  $I$ .

#### III. 5. 1. Interprétation :

- $I_M = f(I)$ .

- Absence de toute tendance pouvant caractériser la liaison entre  $I_M$  et  $I$ .

- La plus grande densité des points est comprise dans des intervalles bien défini.

- $\frac{I_M}{I} = f(H_{PV})$ .

- Les même remarques précédentes pouvant être faite pour ce cas également.



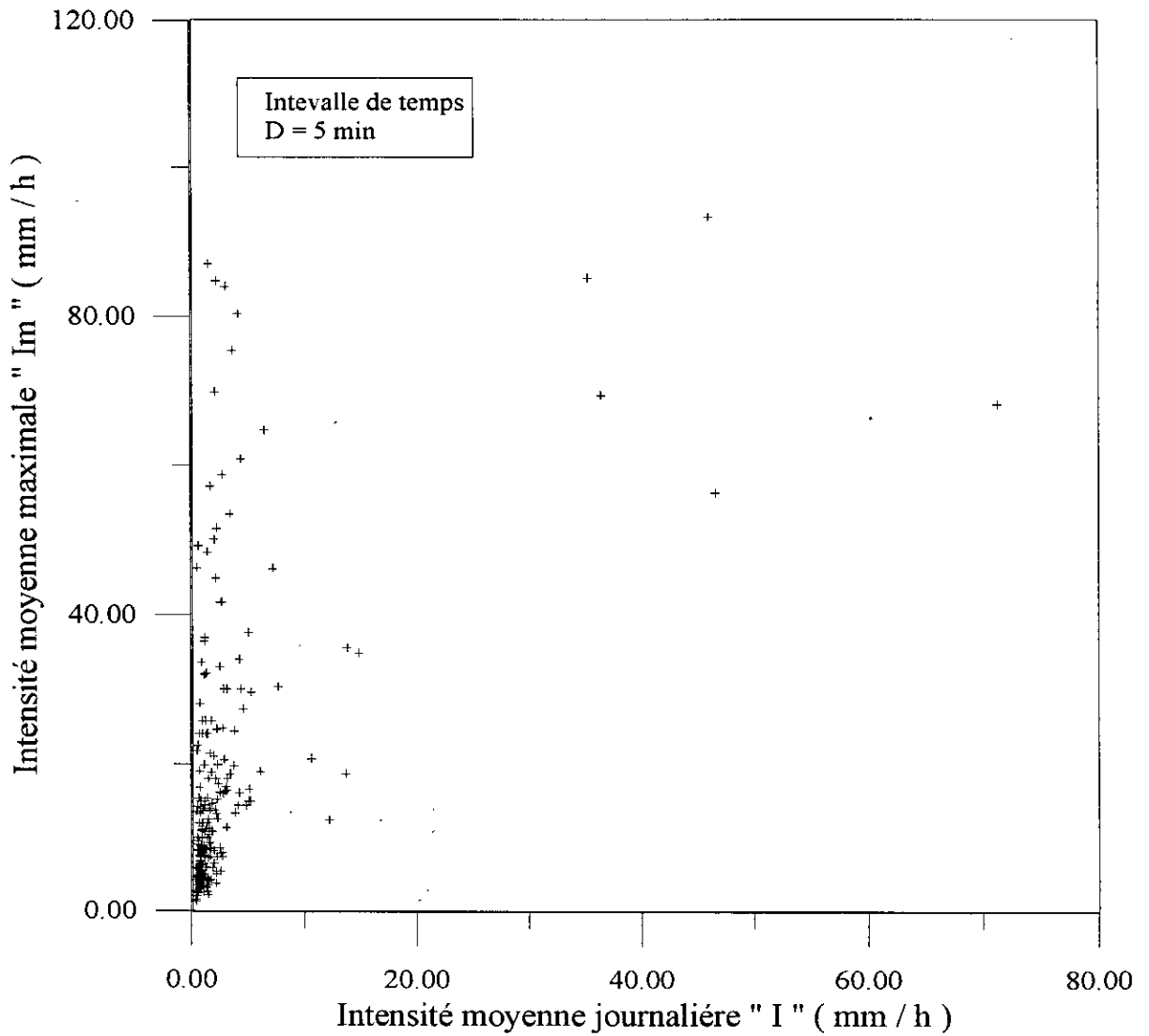


fig . III. 6 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $I$  " pour toute la période d'observation

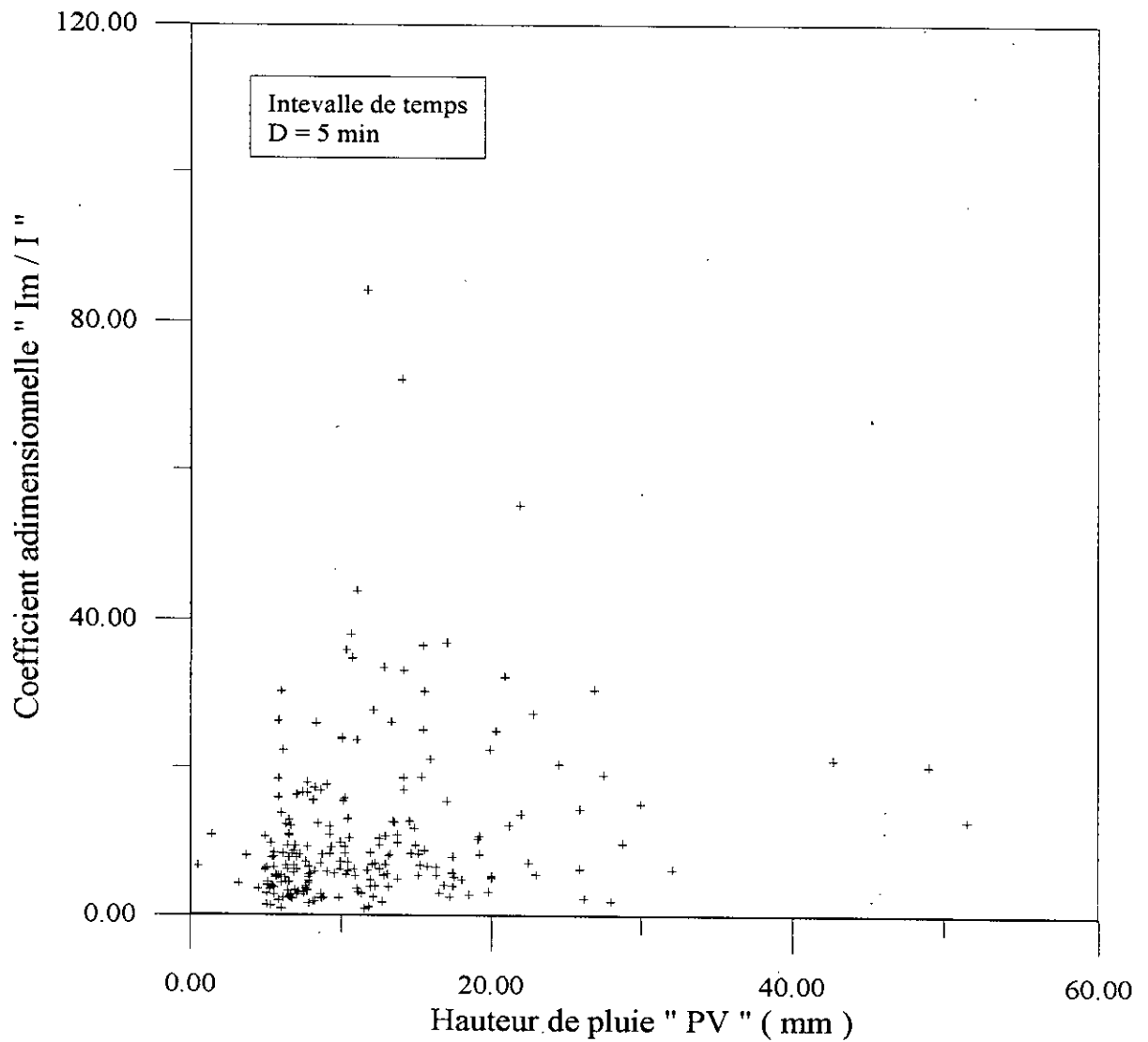
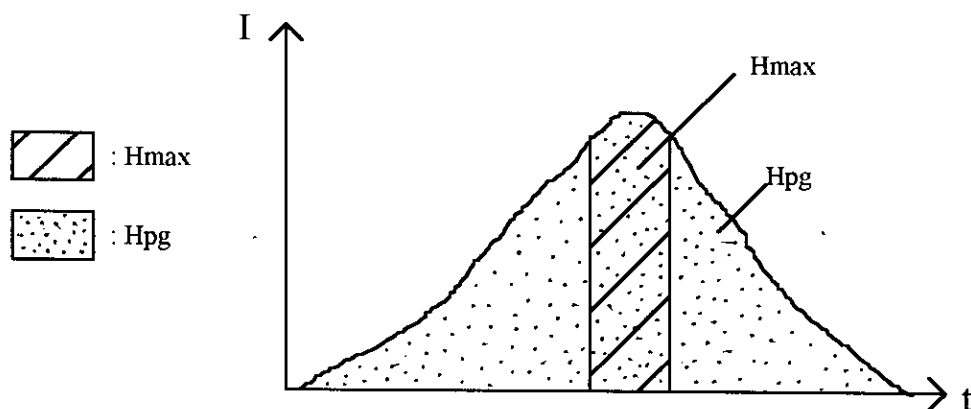


fig . III. 7 : Representation graphique du coefficient adimensionnelle "  $Im / I$  " en fonction de la hauteur journalière "  $H_{pv}$  " pour toute la période d'observation

### III. 6. PRISE EN COMPTE D'UN COEFFICIENT DE " remplissage " $\gamma = \frac{H_M}{H_{PG}}$ :

Le coefficient de remplissage  $\gamma = \frac{H_M}{H_{PG}}$  est un paramètre addimensionnel qui représente le rapport entre la hauteur moyenne maximale ( correspondante à  $I_M$  ) et la hauteur de précipitation totale sur la durée pluvieuse de calcul ( fig . III. 8 ).



( fig - III. 8 )

L'étude graphique de la variation chronologique de  $\gamma$  ( sur toute la période d'observation ) donne la répartition de la figure III. 9.

A partir du nuage obtenu, on essaye de subdiviser l'espace plan en « classes » définies par des bandes horizontales. Chaque classe étant relative à un intervalle de variation de  $\gamma$  définis sur la base de deux critères :

- Respecter une certaine densité de points obtenus, de manière à avoir des classes représentatives ( dans le sens du nombre de points de chaque classe ).
- La variation du rapport  $\gamma$  doit être petite afin de pouvoir rassembler dans chaque classe des pluies ayant des caractéristiques homogènes et proches.

Les couples (  $I_M$  ,  $H_{PV}$  ) des valeurs sélectionnées par classes ont fait l'objet d'une étude graphique de corrélation. Les différents tracés montrent que la forme des nuages de points obtenu autorise un ajustement linéaire ( fig . III. 10 ).

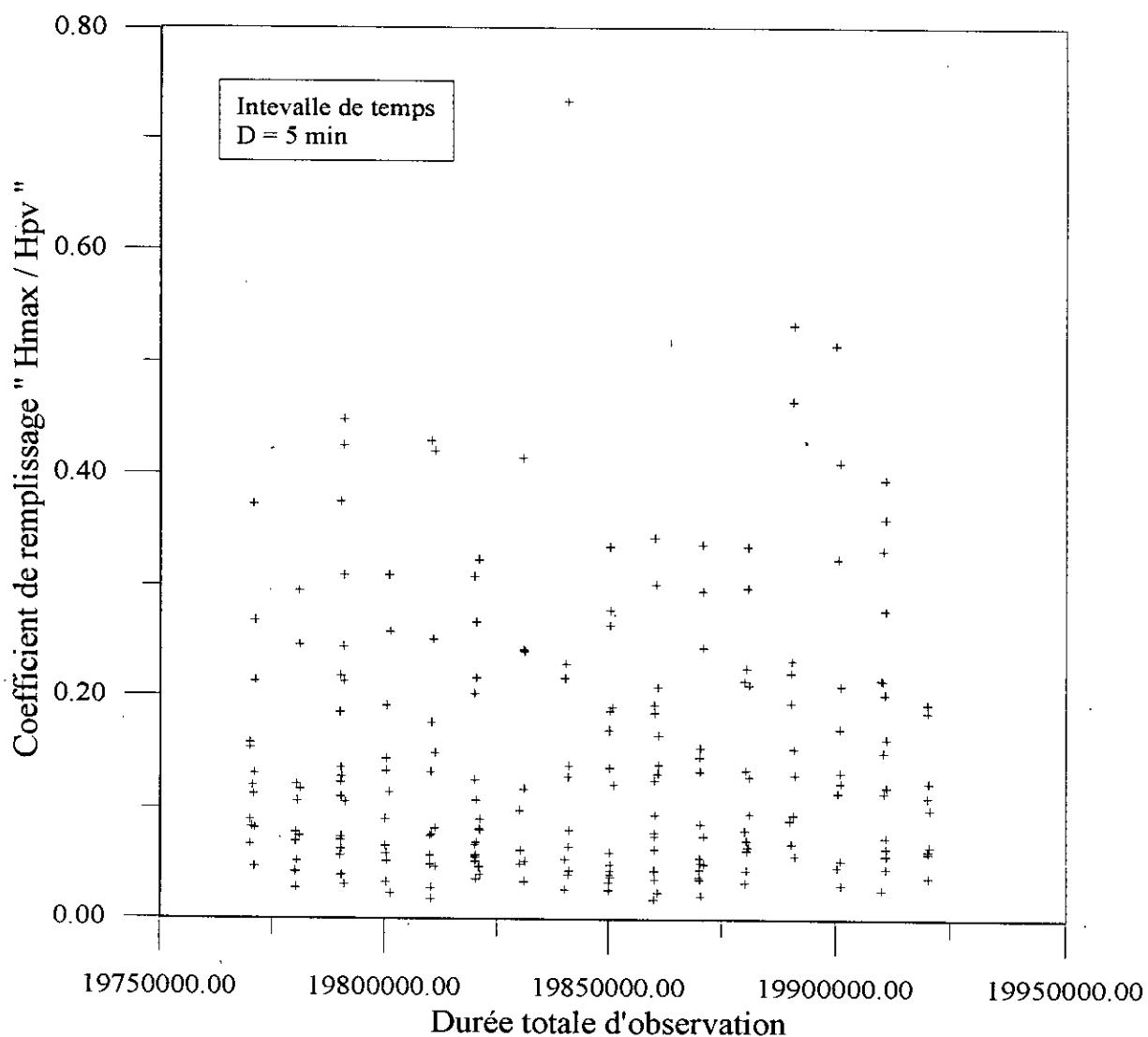


fig . III. 9 : Représentation graphique de la variation du coefficient de remplissage " Hmax / Hpv " en fonction de la période d'observation

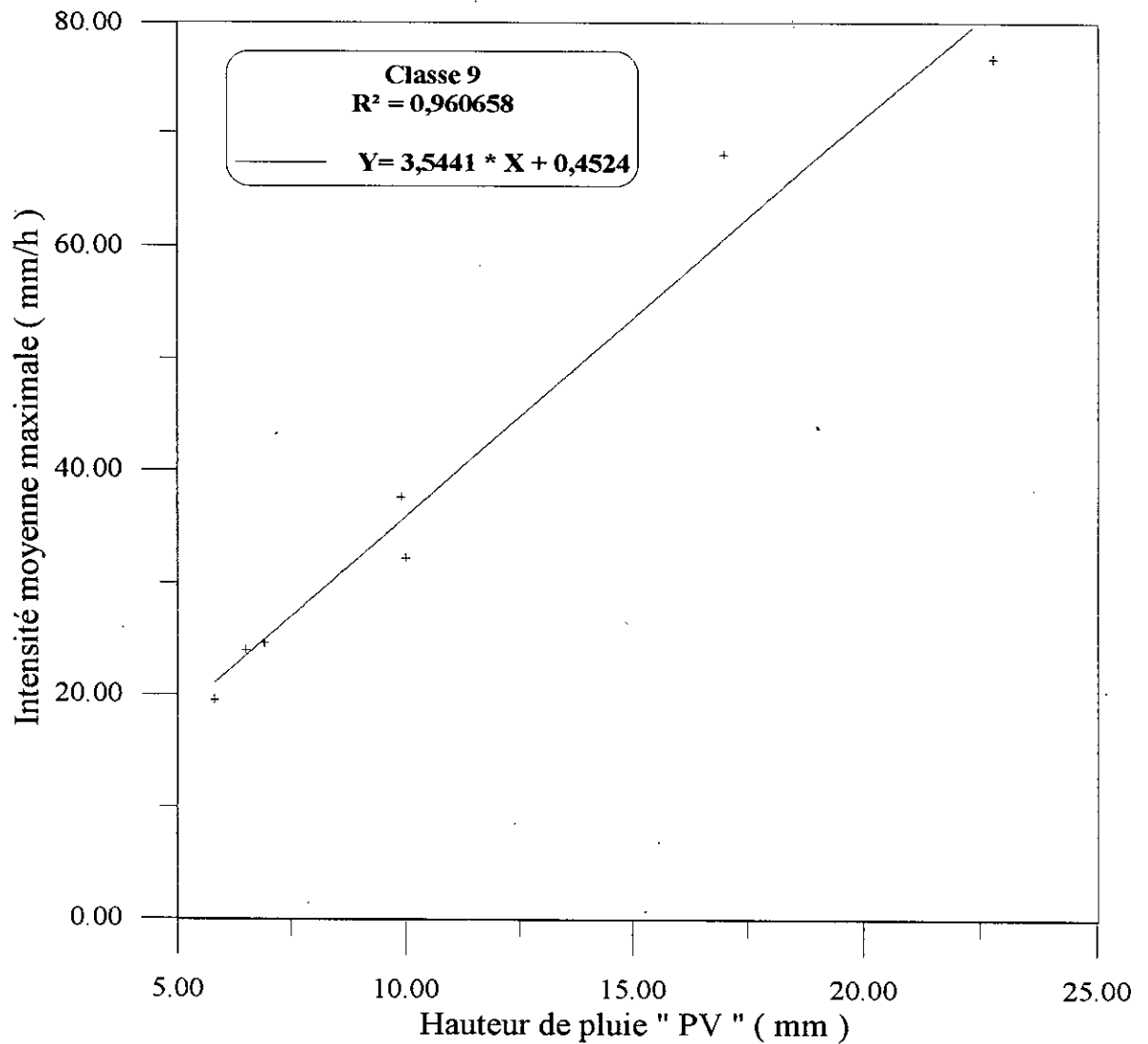


fig . III. 10 : Droites de régression de " Im " en fonction de " Hpv " pour la classe 9 et pour l'intervalle de temps " D = 10 min "

### III. 6. 1. Résultats et interprétations :

Comme prévu, l'ajustement par des droites de l'ensemble des classes a donné lieu à de bons résultats.

Statistiquement parlant, les coefficients de détermination ( $R^2$ ) des différents groupes d'observations sont dans l'ensemble largement significatifs au seuil de 5 %, bien qu'on note une légère croissance lorsque le nombre de points est petit.

Les tableaux ci-dessous ( tab. III-1 ), ( tab. III-2 ) et ( tab . III-3 ) présentent l'ensemble des paramètres statistiques des modèles obtenues.

Afin de mieux apprécier le degrés de rigidité des modèles obtenues, une analyse de la variance de chaque classe est présentée dans les tableaux III-4, 5, 6, 7 et 8.

En examinant les résultats du test, on remarque que les valeurs de F-observé sont largement supérieures à celles du F-tabulé, ce qui conforte l'idée que la *corrélation* est *significative*.

Les parties non expliquées par les modèles peuvent être dues à des fluctuations aléatoires résultant du choix des intervalles des différentes classes.

### III. 7. CONCLUSIONS :

Nous pouvons conclure, à la lumière de tout ce qui précède, ce qui suit :

- Des études effectuées avant la classification; il résulte que le point commun entre tous les graphes obtenus est la confirmation de l'irrégularité et de l'hétérogénéité de la pluviométrie en Algérie. Cela rend la recherche d'un modèle global assez laborieuse et au résultat improbable. D'où l'idée du recours à une modélisation par classes.

En outre, une période d'observation plus longue nous aurait sûrement permis de dégager des voies d'investigation assez intéressantes. Une durée d'observation suffisante nous aurait par exemple permis d'intégrer dans notre étude la notion de valeurs extrême ou de fréquence.

- La modélisation au moyen d'une classification des pluies a permis de filtrer le phénomène pluviométrique de ses composantes chaotiques.

L'étude de la relation  $I_M = f(H_{pv})$  à l'échelle saisonnière et mensuelle a réitéré les résultats obtenus dans le cas de la prise en compte de toute la période.

L'hétérogénéité des précipitations est donc la caractéristique dominante quelque soit la discrétisation de l'échelle des temps choisis.

Intervalle de temps "D <sub>i</sub> " (minutes)	Classes		paramètres de la droite de régression		Nombre de Points " N "	Moyenne		coefficient de détermination " R <sup>2</sup> "	Relations
	N <sup>o</sup>	Intervalle correspondant	" $\hat{\alpha}$ "	" $\hat{\beta}$ "		sur " I <sub>M</sub> "	sur " H <sub>PV</sub> "		
5	1	0,00 ≤ γ ≤ 0,04	0,484153	0,305223	28	3,78929	10,8286	0,743367	I <sub>M</sub> = 0,484153 + 0,305223 H <sub>PV</sub>
	2	0,04 ≤ γ ≤ 0,07	-0,526222	0,633406	51	7,52549	12,7118	0,911904	I <sub>M</sub> = -0,526222 + 0,633406 H <sub>PV</sub>
	3	0,07 ≤ γ ≤ 0,10	0,192811	0,919732	28	9,8500	10,500	0,972926	I <sub>M</sub> = 0,192811 + 0,919732 H <sub>PV</sub>
	4	0,10 ≤ γ ≤ 0,15	0,688274	1,35276	40	17,1175	12,145	0,945467	I <sub>M</sub> = 0,688274 + 1,352761 H <sub>PV</sub>
	5	0,15 ≤ γ ≤ 0,20	-4,15728	2,34173	17	20,0176	10,3235	0,972399	I <sub>M</sub> = -4,15728 + 2,341732 H <sub>PV</sub>
	6	0,20 ≤ γ ≤ 0,30	-6,91916	3,31829	32	32,5062	11,8812	0,962983	I <sub>M</sub> = -6,91916 + 3,318290 H <sub>PV</sub>
	7	0,30 ≤ γ ≤ 0,40	4,32568	3,33232	15	44,780	12,140	0,903581	I <sub>M</sub> = 4,325680 + 3,332323 H <sub>PV</sub>
	8	0,40 ≤ γ ≤ 0,50	-1,22686	5,00675	6	43,4167	8,91667	0,988575	I <sub>M</sub> = -1,22686 + 5,006755 H <sub>PV</sub>
10	1	0,00 ≤ γ ≤ 0,05	0,579769	0,21427	7	2,94286	11,0286	0,845368	I <sub>M</sub> = 0,579769 + 0,214272 H <sub>PV</sub>
	2	0,05 ≤ γ ≤ 0,10	0,310724	0,386064	48	4,37083	10,5167	0,775569	I <sub>M</sub> = 0,310724 + 0,386064 H <sub>PV</sub>
	3	0,10 ≤ γ ≤ 0,15	0,677481	0,572356	43	8,62791	13,8907	0,939812	I <sub>M</sub> = 0,677481 + 0,572356 H <sub>PV</sub>
	4	0,15 ≤ γ ≤ 0,20	1,3083	0,879277	28	10,7071	10,6893	0,932109	I <sub>M</sub> = 1,308300 + 0,879277 H <sub>PV</sub>
	5	0,20 ≤ γ ≤ 0,30	1,37351	1,13358	36	14,1861	11,3028	0,892934	I <sub>M</sub> = 1,373510 + 1,133588 H <sub>PV</sub>
	6	0,30 ≤ γ ≤ 0,40	-1,44506	2,02253	24	20,5583	10,8792	0,955459	I <sub>M</sub> = -1,44506 + 2,022539 H <sub>PV</sub>
	7	0,40 ≤ γ ≤ 0,50	-2,77055	2,62211	15	32,3133	13,38	0,910667	I <sub>M</sub> = -2,77055 + 2,622116 H <sub>PV</sub>
	8	0,50 ≤ γ ≤ 0,60	-0,618178	3,21457	11	35,4727	11,2273	0,992408	I <sub>M</sub> = -0,618178 + 3,214572 H <sub>PV</sub>
	9	0,60 ≤ γ ≤ 0,70	0,452442	3,54414	7	40,400	11,2714	0,969539	I <sub>M</sub> = 0,452442 + 3,544143 H <sub>PV</sub>

tableau-III. 1 : Résultats des modèles obtenus par classes pour les intervalles de temps de 5 et 10 minutes

Note : Le modèle est de la forme  $y = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x$ .

Intervalle de temps "D <sub>i</sub> " (minutes)	Classes		paramètres de la droite de régression		Nombre de Points " N "	Moyenne		coefficient de détermination " R <sup>2</sup> "	Relations
	N°	Intervalle correspondant	" $\hat{\alpha}$ "	" $\hat{\beta}$ "		sur " I <sub>M</sub> "	sur " H <sub>PV</sub> "		
15	1	0,00 ≤ γ ≤ 0,10	0,221727	0,286642	25	3,572	11,688	0,775996	I <sub>M</sub> = 0,221727 + 0,286642 H <sub>PV</sub>
	2	0,10 ≤ γ ≤ 0,15	-0,14398	0,462037	41	6,01463	13,3293	0,952779	I <sub>M</sub> = -0,14398 + 0,462037 H <sub>PV</sub>
	3	0,15 ≤ γ ≤ 0,20	0,731522	0,54804	37	6,86216	11,1865	0,78881	I <sub>M</sub> = 0,731522 + 0,548040 H <sub>PV</sub>
	4	0,20 ≤ γ ≤ 0,25	0,064784	0,816493	18	10,3889	12,6444	0,984481	I <sub>M</sub> = 0,064784 + 0,816493 H <sub>PV</sub>
	5	0,25 ≤ γ ≤ 0,30	0,345199	0,952853	25	9,768	9,888	0,908187	I <sub>M</sub> = 0,345199 + 0,952853 H <sub>PV</sub>
	6	0,30 ≤ γ ≤ 0,40	-2,57598	1,49328	23	13,8696	11,013	0,907268	I <sub>M</sub> = -2,57598 + 1,493280 H <sub>PV</sub>
	7	0,40 ≤ γ ≤ 0,50	-2,57384	1,89259	20	16,125	9,88	0,923661	I <sub>M</sub> = -2,57384 + 1,892590 H <sub>PV</sub>
	8	0,50 ≤ γ ≤ 0,60	-0,79894	2,09205	9	28,7222	14,1111	0,947659	I <sub>M</sub> = -0,79894 + 2,092050 H <sub>PV</sub>
	9	0,60 ≤ γ ≤ 0,70	-0,945864	2,47376	13	29,1769	12,1769	0,969539	I <sub>M</sub> = -0,94586 + 2,473760 H <sub>PV</sub>
	10	0,70 ≤ γ ≤ 0,80	2,08042	2,57623	5	26,400	9,440	0,878924	I <sub>M</sub> = 2,08042 + 2,576230 H <sub>PV</sub>
	11	0,80 ≤ γ ≤ 1,00	3,69131	2,93368	7	37,4286	11,50	0,972903	I <sub>M</sub> = 3,69131 + 2,933680 H <sub>PV</sub>
20	1	0,00 ≤ γ ≤ 0,10	0,509134	0,2295	10	2,770	11,140	0,828249	I <sub>M</sub> = 0,509134 + 0,229502 H <sub>PV</sub>
	2	0,10 ≤ γ ≤ 0,15	-0,350308	0,3754	36	4,83333	13,8083	0,962411	I <sub>M</sub> = -0,35030 + 0,375403 H <sub>PV</sub>
	3	0,15 ≤ γ ≤ 0,20	-0,0562376	0,480401	35	7,84857	12,2914	0,872581	I <sub>M</sub> = -0,05623 + 0,480401 H <sub>PV</sub>
	4	0,20 ≤ γ ≤ 0,25	-0,362844	0,670472	29	6,65862	10,4727	0,914294	I <sub>M</sub> = -0,36284 + 0,670472 H <sub>PV</sub>
	5	0,25 ≤ γ ≤ 0,30	0,398508	0,660849	15	8,30667	11,9667	0,954369	I <sub>M</sub> = 0,39850 + 0,660849 H <sub>PV</sub>
	6	0,30 ≤ γ ≤ 0,40	0,398554	0,899247	31	9,45484	10,071	0,907237	I <sub>M</sub> = 0,39855 + 0,899247 H <sub>PV</sub>
	7	0,40 ≤ γ ≤ 0,50	-2,19835	1,47601	20	13,285	10,490	0,97652	I <sub>M</sub> = -2,19835 + 1,476011 H <sub>PV</sub>
	8	0,50 ≤ γ ≤ 0,60	-0,974574	1,62548	14	15,8143	10,3286	0,985439	I <sub>M</sub> = -0,97457 + 1,625485 H <sub>PV</sub>
	9	0,60 ≤ γ ≤ 0,70	-0,930387	1,88898	13	27,8692	15,2462	0,936435	I <sub>M</sub> = -0,93038 + 1,888984 H <sub>PV</sub>
	10	0,70 ≤ γ ≤ 0,80	-1,13300	2,12946	6	18,600	9,26667	0,8926	I <sub>M</sub> = -1,13300 + 2,129465 H <sub>PV</sub>
	11	0,80 ≤ γ ≤ 1,00	0,0219481	2,48909	12	25,95	10,4167	0,978942	I <sub>M</sub> = 0,02194 + 2,489095 H <sub>PV</sub>

Tableau-III. 2 : Résultats des modèles obtenus par classes pour les intervalles de temps de 15 et 20 minutes.

Note : Le modèle est de la forme  $y = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x$ .



Intervalle de temps "D <sub>i</sub> " (minutes)	Classes		paramètres de la droites de régressions		Nombre de Points " N "	Moyenne		coefficient de détermination " R <sup>2</sup> "	Realations
	N <sup>o</sup>	Intervalle correspondant	" $\hat{\alpha}$ "	" $\hat{\beta}$ "		sur " I <sub>M</sub> "	sur " H <sub>PV</sub> "		
30	1	0,1 ≤ γ ≤ 0,2	-0,08206	0,293867	46	3,86087	13,4174	0,937246	I <sub>M</sub> = -0,08206 + 0,293867 H <sub>PV</sub>
	2	0,2 ≤ γ ≤ 0,25	0,329818	0,379087	35	4,78571	11,7543	0,869188	I <sub>M</sub> = 0,329818 + 0,379087 H <sub>PV</sub>
	3	0,25 ≤ γ ≤ 0,30	0,283212	0,464235	21	5,44286	11,1143	0,912166	I <sub>M</sub> = 0,283212 + 0,464235 H <sub>PV</sub>
	4	0,30 ≤ γ ≤ 0,35	-0,58992	0,638862	19	6,25263	10,7105	0,938675	I <sub>M</sub> = -0,58992 + 0,638862 H <sub>PV</sub>
	5	0,35 ≤ γ ≤ 0,4	0,619901	0,598252	13	7,43077	11,3846	0,925828	I <sub>M</sub> = 0,619901 + 0,598252 H <sub>PV</sub>
	6	0,4 ≤ γ ≤ 0,45	0,256237	0,793248	16	8,625	10,550	0,939251	I <sub>M</sub> = 0,256237 + 0,793248 H <sub>PV</sub>
	7	0,45 ≤ γ ≤ 0,5	2,002462	0,541523	12	7,350	9,875	0,482517	I <sub>M</sub> = 2,002462 + 0,541523 H <sub>PV</sub>
	8	0,5 ≤ γ ≤ 0,6	-0,66224	1,083885	17	9,94706	9,78824	0,978766	I <sub>M</sub> = -0,66224 + 1,083885 H <sub>PV</sub>
	9	0,6 ≤ γ ≤ 0,7	-0,64918	1,222952	17	14,5941	12,4647	0,96453	I <sub>M</sub> = -0,64918 + 1,222952 H <sub>PV</sub>
	10	0,7 ≤ γ ≤ 0,8	0,595885	1,339632	13	16,2077	11,6538	0,976769	I <sub>M</sub> = 0,595885 + 1,339632 H <sub>PV</sub>

Tableau-III. 3 : Résultats des modèles obtenus par classes pour les intervalles de temps de 30 minutes

Note : Le modèle est de la forme  $y = \hat{\alpha} + \hat{\beta} x$ .

Classes		Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F observé	F Tabulé
N°	Intervalle correspondant						
1	0.0 ≤ γ ≤ 0.04	régression	59,6677	1	59,6677	75,3120	4,23
		Residuelle	20,5991	26	0,79227		
		Totale	80,2668	27	/		
2	0.04 ≤ γ ≤ 0.07	régression	1179,4	1	1179,4	507,2120	4,035
		Residuelle	113,938	49	2,32526		
		Totale	1293,338	50	/		
3	0.07 ≤ γ ≤ 0.1	régression	1900,74	1	1900,74	934,3275	4,23
		Residuelle	52,8929	226	2,03434		
		Totale	1953,6329	27	/		
4	0.1 ≤ γ ≤ 0.15	régression	5161,74	1	5161,74	658,8280	4,10
		Residuelle	297,72	38	7,83473		
		Totale	5459,46	39	/		
5	0.15 ≤ γ ≤ 0.2	régression	2286,54	1	2286,54	528,4647	4,54
		Residuelle	64,9014	15	4,32676		
		Totale	2351,4414	16	/		
6	0.2 ≤ γ ≤ 0.3	régression	16892,8	1	16892,8	780,4445	4,17
		Residuelle	649,353	30	21,6451		
		Totale	17542,153	31	/		
7	0.3 ≤ γ ≤ 0.4	régression	5474,17	1	5474,17	121,8283	4,67
		Residuelle	584,135	13	44,9334		
		Totale	6058,305	14	/		
8	0.4 ≤ γ ≤ 0.5	régression	2624,28	1	2624,28	346,1129	7,71
		Residuelle	30,3286	4	7,58215		
		Totale	2654,6086	5	/		

Tableau-III. 4 : Table de l'ANOVA des différentes classe de  $\gamma = H_{MAX} / H_{PG}$  pour un intervalle de temps D = 5 minutes.

Classes		Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F observé	F Tabulé
N°	Intervalle correspondant						
1	$0.0 \leq \gamma \leq 0.05$	régression	8,77251	1	8,77251	27,3349	6,61
		Residuelle	1,60464	5	0,32092		
		Totale	10,37771	6	/		
2	$0.05 \leq \gamma \leq 0.1$	régression	144,891	1	144,891	158,9626	4,05
		Residuelle	41,928	46	0,91147		
		Totale	186,819	47	/		
3	$0.1 \leq \gamma \leq 0.15$	régression	1381,08	1	1381,08	640,2009	4,075
		Residuelle	88,4477	41	2,15726		
		Totale	1469,5277	42	/		
4	$0.15 \leq \gamma \leq 0.2$	régression	1320,82	1	1320,82	356,9687	4,23
		Residuelle	96,2025	26	3,7001		
		Totale	1417,0225	27	/		
5	$0.2 \leq \gamma \leq 0.3$	régression	1967,35	1	1967,35	283,5623	4,13
		Residuelle	235,891	34	6,93798		
		Totale	2203,241	35	/		
6	$0.3 \leq \gamma \leq 0.4$	régression	3526,68	1	3526,68	471,9330	4,26
		Residuelle	164,403	24	7,47284		
		Totale	3691,083	25	/		
7	$0.4 \leq \gamma \leq 0.5$	régression	4505,67	1	4505,67	132,5224	4,67
		Residuelle	441,99	13	33,9993		
		Totale	4947,66	14	/		
8	$0.5 \leq \gamma \leq 0.6$	régression	6881,92	1	6881,92	117,5224	5,15
		Residuelle	52,6458	9	5,84953		
		Totale	6934,5658	10	/		
9	$0.6 \leq \gamma \leq 0.7$	régression	3027,62	1	3027,62	159,1470	6,61
		Residuelle	95,1202	5	19,0240		
		Totale	3122,7402	6	/		

Tableau-III. 5 : Table de l'ANOVA des différentes classe de  $\gamma = H_{MAX} / H_{PG}$  pour un intervalle de temps  $D = 10$  minutes.

Classes		Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F observé	F Tabulé
N°	Intervalle correspondant						
1	0.0 ≤ y ≤ 0.1	régression	45,9005	1	45,9005	79,6767	4,28
		Residuelle	13,2499	23	0,576084		
		Totale	59,1504	24	/		
2	0.1 ≤ y ≤ 0.15	régression	905,303	1	905,303	782,8158	4,085
		Residuelle	44,8684	39	1,15647		
		Totale	950,1714	40	/		
3	0.15 ≤ y ≤ 0.2	régression	287,716	1	287,716	130,7271	4,115
		Residuelle	77,031	35	2,20089		
		Totale	364,747	36	/		
4	0.2 ≤ y ≤ 0.25	régression	991,075	1	991,0750	1015,003	4,49
		Residuelle	15,6228	16	0,976425		
		Totale	1006,6978	17	/		
5	0.25 ≤ y ≤ 0.3	régression	1129,89	1	1129,890	227,5091	4,28
		Residuelle	114,226	23	4,96635		
		Totale	1244,116	24	/		
6	0.3 ≤ y ≤ 0.4	régression	1290,67	1	1290,670	205,4601	4,32
		Residuelle	131,919	21	6,28185		
		Totale	1422,589	22	/		
7	0.4 ≤ y ≤ 0.5	régression	1655,6	1	1655,600	217,7888	4,41
		Residuelle	136,834	18	7,60186		
		Totale	1792,434	19	/		
8	0.5 ≤ y ≤ 0.6	régression	2481,44	1	2481,440	126,7372	5,59
		Residuelle	137,056	7	19,5794		
		Totale	2618,496	8	/		
9	0.6 ≤ y ≤ 0.7	régression	3578,57	1	3578,570	614,9770	4,84
		Residuelle	64,0093	11	5,81903		
		Totale	3642,0093	12	/		
10	0.7 ≤ y ≤ 0.8	régression	111,448	1	111,448	21,7779	10,1
		Residuelle	15,3524	3	5,11747		
		Totale	126,8004	4	/		
11	0.80 ≤ y ≤ 1.0	régression	3088,34	1	3088,34	179,5222	6,61
		Residuelle	86,0157	5	17,2031		
		Totale	3174,3557	6	/		

Tableau-III. 6 : Table de l'ANOVA des différentes classe de  $\gamma = H_{MAX} / H_{PG}$  pour un intervalle de temps D = 15 minutes.

Classes		Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F observé	F Tabulé
N°	Intervalle correspondant						
1	0.0 ≤ γ ≤ 0.1	régression	10,4036	1	10,4036	38,5790	5,32
		Residuelle	2,15736	8	0,26967		
		Totale	12,56096	9	/		
2	0.1 ≤ γ ≤ 0.15	régression	525,496	1	525,496	870,5136	4,13
		Residuelle	20,5245	34	0,603662		
		Totale	546,0205	35	/		
3	0.15 ≤ γ ≤ 0.2	régression	227,366	1	227,366	225,9874	4,135
		Residuelle	33,2013	33	1,0061		
		Totale	260,5673	34	/		
4	0.2 ≤ γ ≤ 0.25	régression	729,78	1	729,78	288,0282	4,21
		Residuelle	68,41	27	2,53371		
		Totale	798,19	28	/		
5	0.25 ≤ γ ≤ 0.3	régression	257,898	1	257,898	271,8937	4,67
		Residuelle	12,3308	13	0,948525		
		Totale	270,2288	14	/		
6	0.3 ≤ γ ≤ 0.4	régression	1088,68	1	1088,68	2628,3144	4,18
		Residuelle	111,315	29	3,83846		
		Totale	1199,995	30	/		
7	0.4 ≤ γ ≤ 0.5	régression	1108,86	1	1108,86	748,6075	4,41
		Residuelle	26,6621	18	1,48123		
		Totale	1135,522	19	/		
8	0.5 ≤ γ ≤ 0.6	régression	1565,41	1	1565,41	812,1326	4,75
		Residuelle	23,1304	12	1,92753		
		Totale	1588,5404	13	/		
9	0.6 ≤ γ ≤ 0.7	régression	2854,49	1	2854,49	162,05066	4,84
		Residuelle	193,762	11	17,6148		
		Totale	3048,252	12	/		
10	0.7 ≤ γ ≤ 0.8	régression	105,898	1	105,898	33,2442	7,71
		Residuelle	12,7419	4	3,18548		
		Totale	118,6399	5	/		
11	0.8 ≤ γ ≤ 1.0	régression	2477,59	1	2477,59	464,8683	4,90
		Residuelle	53,2966	10	5,32966		
		Totale	2530,8866	11	/		

Tableau-III. 7 : Table de l'ANOVA des différentes classe de  $\gamma = H_{MAX} / H_{PG}$  pour un intervalle de temps D = 20 minutes.

Classes		Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F observé	F Tabulé
N°	Intervalle correspondant						
1	0.1 ≤ γ ≤ 0.2	régression	348,927	1	348,927	657,1476	4,06
		Residuelle	23,3628	44	0,530972		
		Totale	372,2898	45	/		
2	0.2 ≤ γ ≤ 0.25	régression	145,47	1	145,47	219,2702	4,135
		Residuelle	21,8931	33	0,663428		
		Totale	167,3631	34	/		
3	0.25 ≤ γ ≤ 0.3	régression	136,762	1	136,762	197,3175	4,38
		Residuelle	13,169	19	0,693106		
		Totale	149,931	20	/		
4	0.3 ≤ γ ≤ 0.35	régression	537,792	1	537,792	260,2009	4,45
		Residuelle	35,135	17	2,06677		
		Totale	572,927	18	/		
5	0.35 ≤ γ ≤ 0.4	régression	140,455	1	140,455	137,3038	4,84
		Residuelle	11,2524	11	1,02295		
		Totale	151,7074	12	/		
6	0.4 ≤ γ ≤ 0.45	régression	688,856	1	688,856	216,4573	4,60
		Residuelle	44,5537	14	3,18241		
		Totale	733,4097	15	/		
7	0.45 ≤ γ ≤ 0.5	régression	36,8209	1	36,8209	9,3243	4,90
		Residuelle	39,4891	10	3,94891		
		Totale	76,3100	11	/		
8	0.5 ≤ γ ≤ 0.6	régression	442,17	1	442,17	691,4059	4,54
		Residuelle	9,59284	15	0,639523		
		Totale	451,76284	16	/		
9	0.6 ≤ γ ≤ 0.7	régression	1416,77	1	1416,77	407,8972	4,54
		Residuelle	52,1003	15	3,47335		
		Totale	1468,8703	16	/		
10	0.7 ≤ γ ≤ 0.8	régression	919,54	1	919,54	462,51	4,84
		Residuelle	21,8696	11	1,98815		
		Totale	941,4096	12	/		

Tableau-III. 8 : Table de l'ANOVA des différentes classe de  $\gamma = H_{MAX} / H_{PG}$  pour un intervalle de temps D = 30 minutes.

Intervalle de temps (minutes)	N°	" $\hat{\alpha}$ "	Intervalle de confiance de $\alpha$	" $\hat{\beta}$ "	Intervalle de confiance de $\beta$
5	1	0,484153	$-0,672782 \leq \alpha \leq 1,641064$	0,305223	$0,207491 \leq \beta \leq 0,402956$
	2	-0,526222	$-1,263661 \leq \alpha \leq 0,589653$	0,633406	$0,558042 \leq \beta \leq 0,708771$
	3	0,192811	$-0,9612071 \leq \alpha \leq 1,346829$	0,919732	$0,863121 \leq \beta \leq 1,003344$
	4	0,688274	$-1,4215274 \leq \alpha \leq 2,798075$	1,35276	$1,209868 \leq \beta \leq 1,495644$
	5	-4,15728	$-11,224573 \leq \alpha \leq 4,619797$	2,34173	$1,448687 \leq \beta \leq 2,795137$
	6	-6,91916	$-11,4092 \leq \alpha \leq -2,4290960$	3,31829	$2,991777 \leq \beta \leq 3,644710$
	7	4,32568	$-7,883507 \leq \alpha \leq 16,554866$	3,33232	$2,422916 \leq \beta \leq 4,241718$
	8	-1,22686	$-47,42698 \leq \alpha \leq 44,676777$	5,00675	$-0,03007 \leq \beta \leq 9,1910524$
10	1	0,579769	$-1,436745 \leq \alpha \leq 2,5962821$	0,21427	$0,049293 \leq \beta \leq 0,379510$
	2	0,310724	$-0,630349 \leq \alpha \leq 1,2217984$	0,386064	$0,303796 \leq \beta \leq 0,4683324$
	3	0,677481	$-0,364719 \leq \alpha \leq 1,7196813$	0,572356	$0,5112607 \leq \beta \leq 0,633451$
	4	1,3083	$-0,403779 \leq \alpha \leq 3,0203874$	0,879277	$0,7499569 \leq \beta \leq 1,008596$
	5	1,37351	$-1,022814 \leq \alpha \leq 3,7698392$	1,13358	$0,9499413 \leq \beta \leq 1,317218$
	6	-1,44506	$-4,704507 \leq \alpha \leq 1,8143935$	2,02253	$1,7601087 \leq \beta \leq 2,284942$
	7	-2,77055	$-13,009669 \leq \alpha \leq 7,468575$	2,62211	$1,936009 \leq \beta \leq 3,3082182$
	8	-0,618178	$-4,778850 \leq \alpha \leq 3,5424951$	3,21457	$2,909986 \leq \beta \leq 3,5191627$
	9	0,452442	$-13,94164 \leq \alpha \leq 14,84652$	3,54414	$2,411413 \leq \beta \leq 4,6768733$
15	1	0,221727	$-0,914825 \leq \alpha \leq 1,358278$	0,286642	$0,1964953 \leq \beta \leq 0,376789$
	2	-0,143983	$-0,891684 \leq \alpha \leq 0,603718$	0,462037	$0,417441 \leq \beta \leq 0,5066332$
	3	0,731522	$-0,872709 \leq \alpha \leq 2,335752$	0,54804	$0,417501 \leq \beta \leq 0,6725783$
	4	0,0647847	$1,100755 \leq \alpha \leq 1,230324$	0,816493	$0,7416426 \leq \beta \leq 0,891344$
	5	0,345199	$1,809099 \leq \alpha \leq 2,499498$	0,952853	$0,7755955 \leq \beta \leq 1,1303107$
	6	-2,57598	$-6,145409 \leq \alpha \leq 0,993441$	1,49328	$1,1983283 \leq \beta \leq 1,7882301$
	7	-2,57384	$-6,629582 \leq \alpha \leq 1,481910$	1,89259	$1,5234708 \leq \beta \leq 2,2617187$
	8	-0,798941	$-11,32855 \leq \alpha \leq 9,730608$	2,09205	$1,441678 \leq \beta \leq 2,4724233$
	9	-0,945864	$-5,252881 \leq \alpha \leq 3,381153$	2,47376	$2,1639435 \leq \beta \leq 2,7835768$
	10	2,08042	$-28,892775 \leq \alpha \leq 33,053613$	2,57623	$-0,64470014 \leq \beta \leq 5,797154$
	11	3,69131	$8,2678636 \leq \alpha \leq 1,565047$	2,93368	$2,05086402 \leq \beta \leq 3,8164863$

Tableau-III. 9 : Intervalle de confiance des paramètres de la droite d'ajustement  $\alpha$  et  $\beta$  pour des intervalles de temps de 5, 10 et 15 minutes.

Intervalle de temps (minutes)	N°	" $\hat{\alpha}$ "	Intervalle de confiance de $\alpha$	" $\hat{\beta}$ "	Intervalle de confiance de $\beta$
20	1	0,509134	$-0,83086 \leq \alpha \leq 1,8491273$	0,2295	$0,09330539 \leq \beta \leq 0,3125952$
	2	-0,350308	$-0,945697 \leq \alpha \leq 0,2450801$	0,3754	$0,34669052 \leq \beta \leq 0,4101684$
	3	-0,0562376	$-1,225381 \leq \alpha \leq 1,1129060$	0,480401	$0,39307011 \leq \beta \leq 0,56773097$
	4	-0,362844	$-1,771760 \leq \alpha \leq 1,0460730$	0,670472	$0,56180424 \leq \beta \leq 0,77794053$
	5	0,398508	$-1,2326675 \leq \alpha \leq 2,0296826$	0,660849	$0,54012711 \leq \beta \leq 0,78157079$
	6	0,398554	$-1,368078 \leq \alpha \leq 2,1651866$	0,899247	$0,752461721 \leq \beta \leq 1,0460312$
	7	-2,19835	$-6,4631815 \leq \alpha \leq 1,6291102$	1,47601	$1,07944415 \leq \beta \leq 1,7723504$
	8	-0,974574	$-3,1012438 \leq \alpha \leq 1,1520960$	1,62548	$1,4512530 \leq \beta \leq 1,799711704$
	9	-0,930387	$-8,832404 \leq \alpha \leq 6,97162914$	1,88898	$1,42810653 \leq \beta \leq 2,34984539$
	10	-1,133	$-17,236975 \leq \alpha \leq 14,970975$	2,12946	$0,42971611 \leq \beta \leq 3,82920451$
	11	0,0219481	$-4,3355169 \leq \alpha \leq 4,3794129$	2,48909	$2,12320576 \leq \beta \leq 2,85498027$
30	1	-0,0820644	$-0,5871273 \leq \alpha \leq 0,42299832$	0,293867	$0,26300788 \leq \beta \leq 0,32472694$
	2	0,329818	$-0,5745035 \leq \alpha \leq 1,2341398$	0,379087	$0,30912626 \leq \beta \leq 0,44904762$
	3	0,283212	$-0,889090 \leq \alpha \leq 1,4555148$	0,464235	$0,36969048 \leq \beta \leq 0,55878029$
	4	-0,5899	$-2,1470847 \leq \alpha \leq 0,9672852$	0,63886	$0,52408374 \leq \beta \leq 0,75363709$
	5	0,619901	$-1,3445829 \leq \alpha \leq 2,6243847$	0,598252	$0,43968292 \leq \beta \leq 0,75682097$
	6	0,256237	$-1,895381 \leq \alpha \leq 2,4785431$	0,793248	$0,63275239 \leq \beta \leq 0,9537430$
	7	2,00246	$-3,830441 \leq \alpha \leq 7,8429619$	0,541523	$-0,020533 \leq \beta \leq 1,10358062$
	8	-0,662245	$-1,981359 \leq \alpha \leq 0,65686898$	1,08388	$0,9624229 \leq \beta \leq 1,25334353$
	9	-0,64918	$-3,2414409 \leq \alpha \leq 1,9430821$	1,22292	$1,0449810 \leq \beta \leq 1,40133531$
	10	0,595885	$-1,9650616 \leq \alpha \leq 3,1568302$	1,33963	$1,146163168 \leq \beta \leq 1,5330910$

Tableau-III. 10 : Intervalle de confiance des paramètres de la droite d'ajustement  $\alpha$  et  $\beta$  pour des intervalles de temps de 20 et 30 minutes.



### III. 8. PERSPECTIVES :

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet sont assez encourageants, bien qu'il soit évident que beaucoup reste à faire. Il est donc clair que les voies qui n'ont pu être prospectées pourraient s'avérer intéressantes et prometteuses pour un approfondissement ultérieur de cette étude. Dans cette optique il est utile de faire part des réflexions qui nous ont été imposées relativement à la modélisation des pluies de courte durée :

1). Il serait par exemple intéressant de conduire une investigation scientifique sur l'influence que peuvent avoir d'autres paramètres, non prise en compte dans notre étude sur les pluies de courtes durées. En cas d'affirmative, ceux-ci peuvent être intégrés à la modélisation.

2). L'application du modèle que nous avons obtenu à une station donnée nécessite une classification préalable de ces données  $H_{pV}$  selon les critères conformes avec ceux utilisés lors de l'établissement du modèle, à savoir  $\frac{H_{\max}}{H} = f(\text{période d'observation})$ . Il serait utile de développer une étude dans cette voie.

3). Un autre type de classification qui pourrait s'avérer intéressant et celui basé sur la relation  $H_{pG} = f(\text{durée de la pluie})$ . La composante temps de pluie est ainsi réellement prise en compte. Les calculs ont été développés dans notre étude et le modèle élaboré bute contre les mêmes limitations que le précédent ( point (2) ) sauf que dans ce cas, ces difficultés sont surmontées si on dispose des valeurs des durées de pluies à côté des hauteurs pluviométriques.

***ORGANIGRAMMES  
GENERAUX***

# ORGANIGRAMME GENERAL

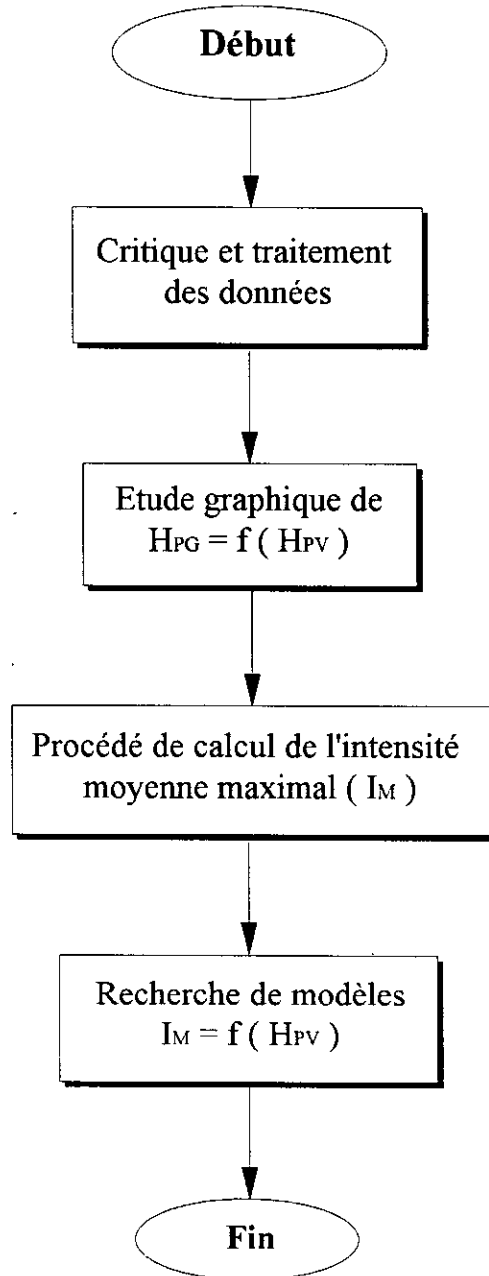
---

- 1 - Organigramme principal ( plan de l'étude ).
- 2 - Organigramme de l'analyse critique des données.
- 3 - Organigramme de l'étude graphique de  $H_{PG} = f ( H_{PV} )$ .
- 4 - Organigramme de calcul de  $I_M$  ( intensité moyenne maximale ).
- 5 - Organigramme de recherche de modèles  $I_M = f ( H_{PV} )$ .

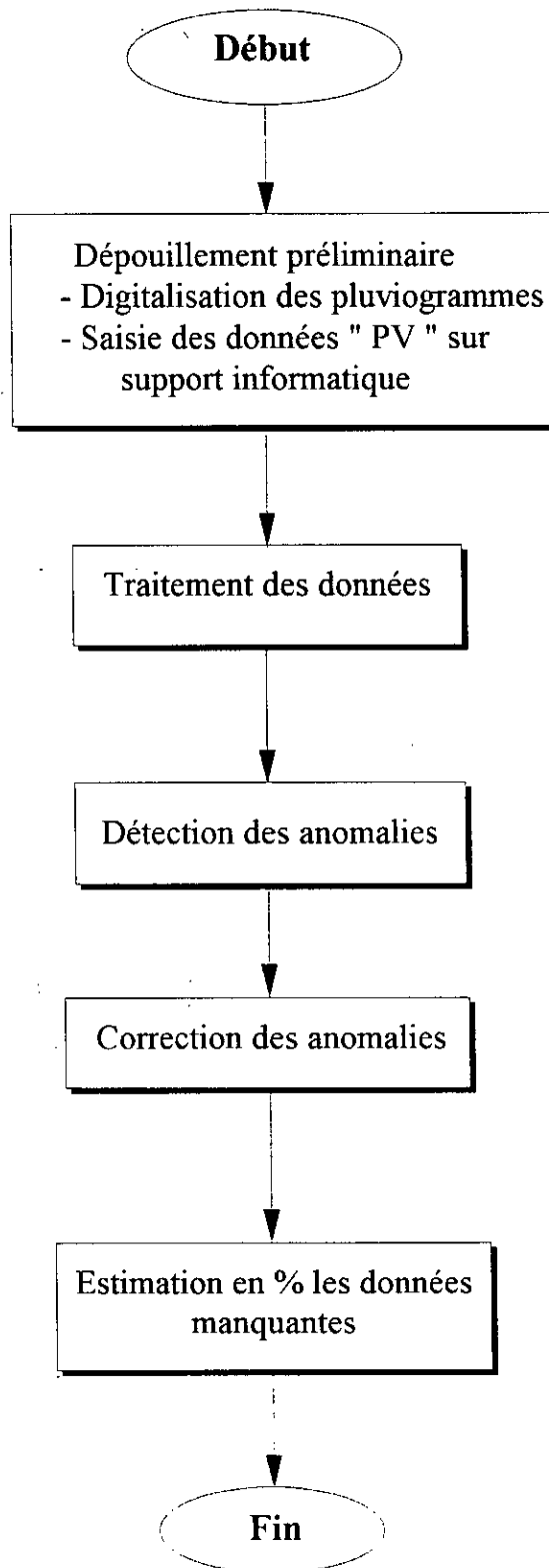
## DEFINITION DES VARIABLES :

- $I_{moy}$  : Intensité moyenne.
- $I_M$  : Intensité moyenne maximale.
- $H_{PV}$  : Hauteur journalière pluviométrique.
- $H_{PG}$  : Hauteur journalière pluviographique.
- $\Delta H$  : La quantité d'eau tombée sur un intervalle de temps  $\Delta t$ .
- $H_{PG}$  : Hauteur journalière pluviographique correspondante à  $DAT_{PG}$ .
- $\varepsilon$  : Erreur ( en % ).
- $M$  : Taille du fichier pluviométrique.
- $H_{PV} [ I ]$  : Hauteur journalière pluviométrique correspondante à  $DAT_{PV}[I]$ .
- $DAT_{PV}[ I ]$  : C'est la date lue à partir du fichier pluviométrique.
- $DAT_{PG}[ I ]$  : C'est la date lue à partir du fichier pluviographique.

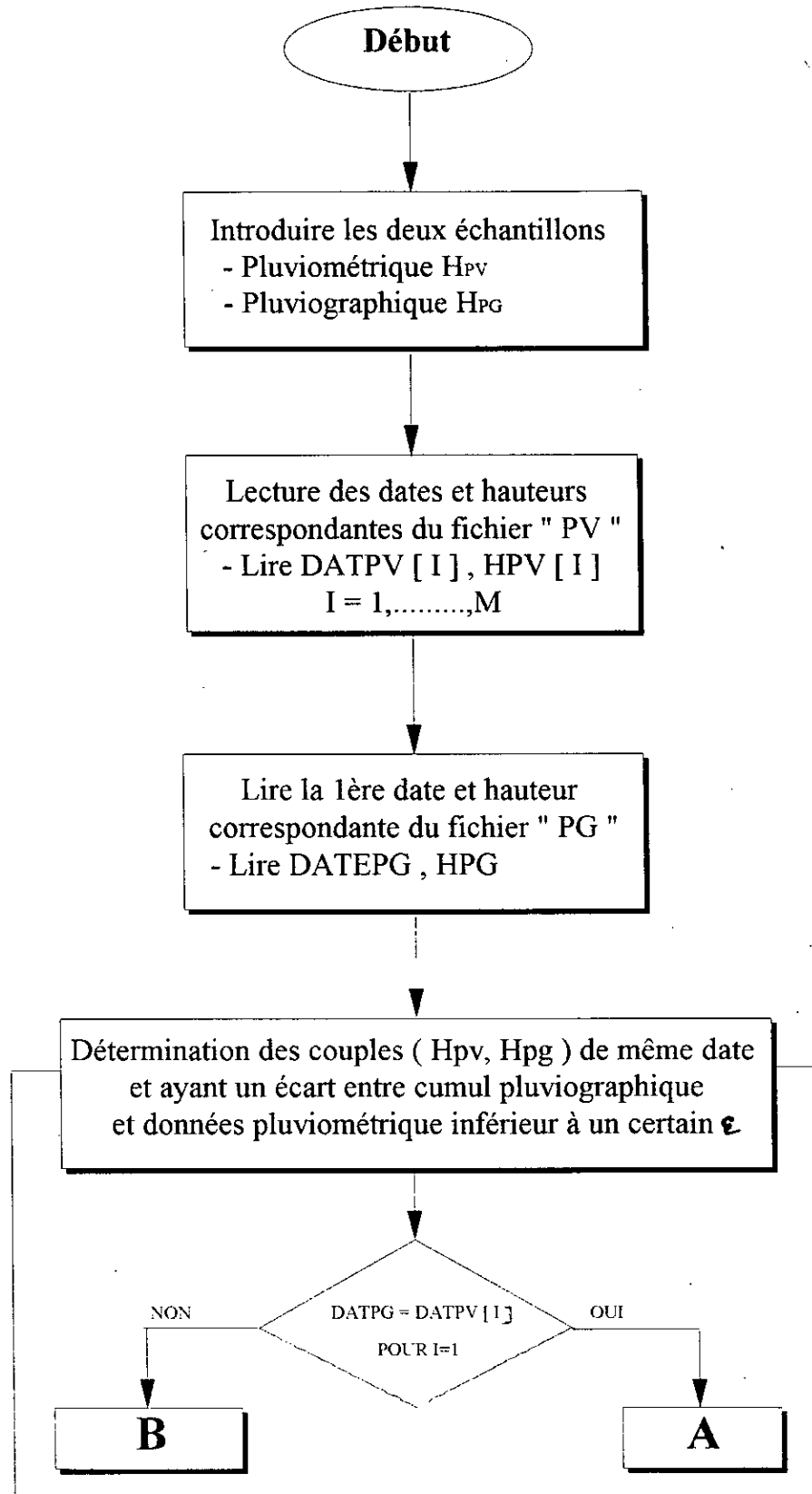
## Plan de l'étude

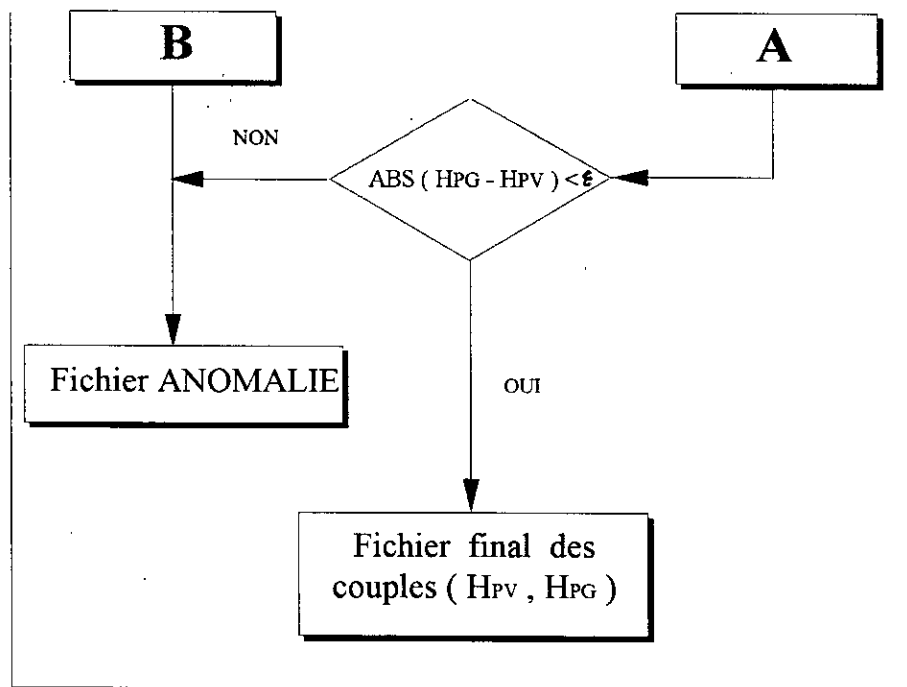


## Organigramme de l'analyse critique des données



# Organigramme de l'étude graphique de $HPG = f(HPV)$



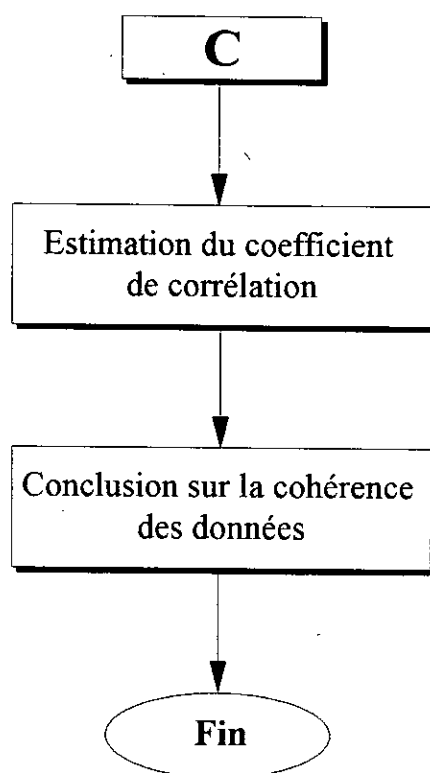


Représentation graphique  
de  $H_{PG} = f ( H_{PV} )$

Proposer un modèle de  
la forme  $Y = a * X$

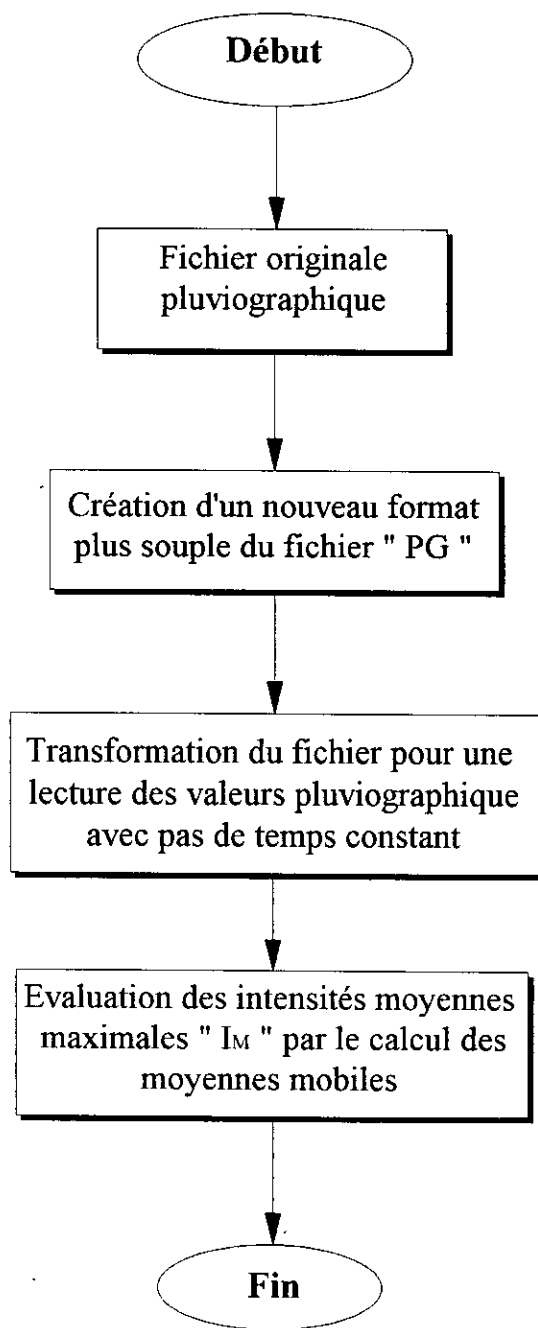
Estimation des paramètres  
de régression

C

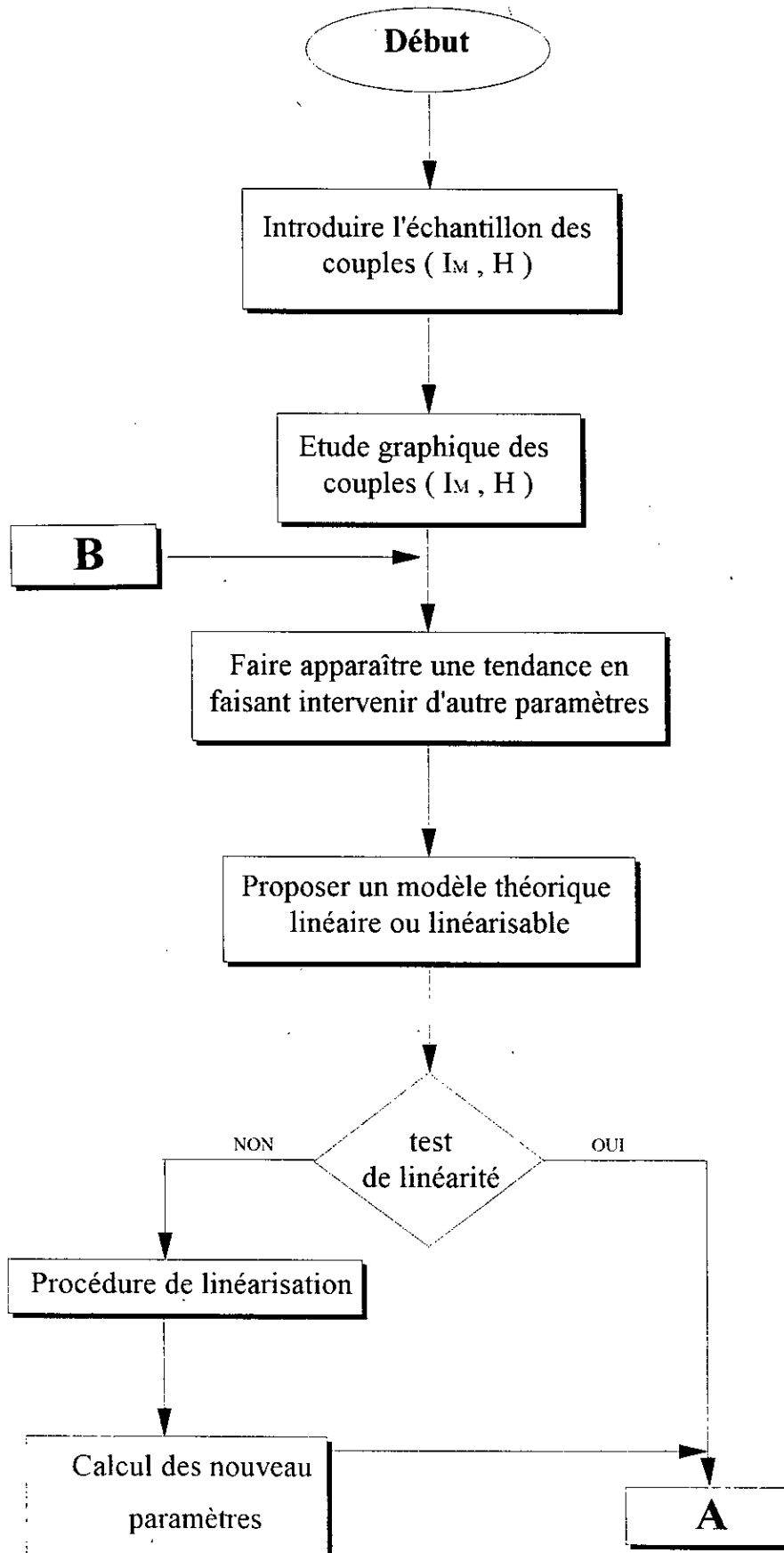


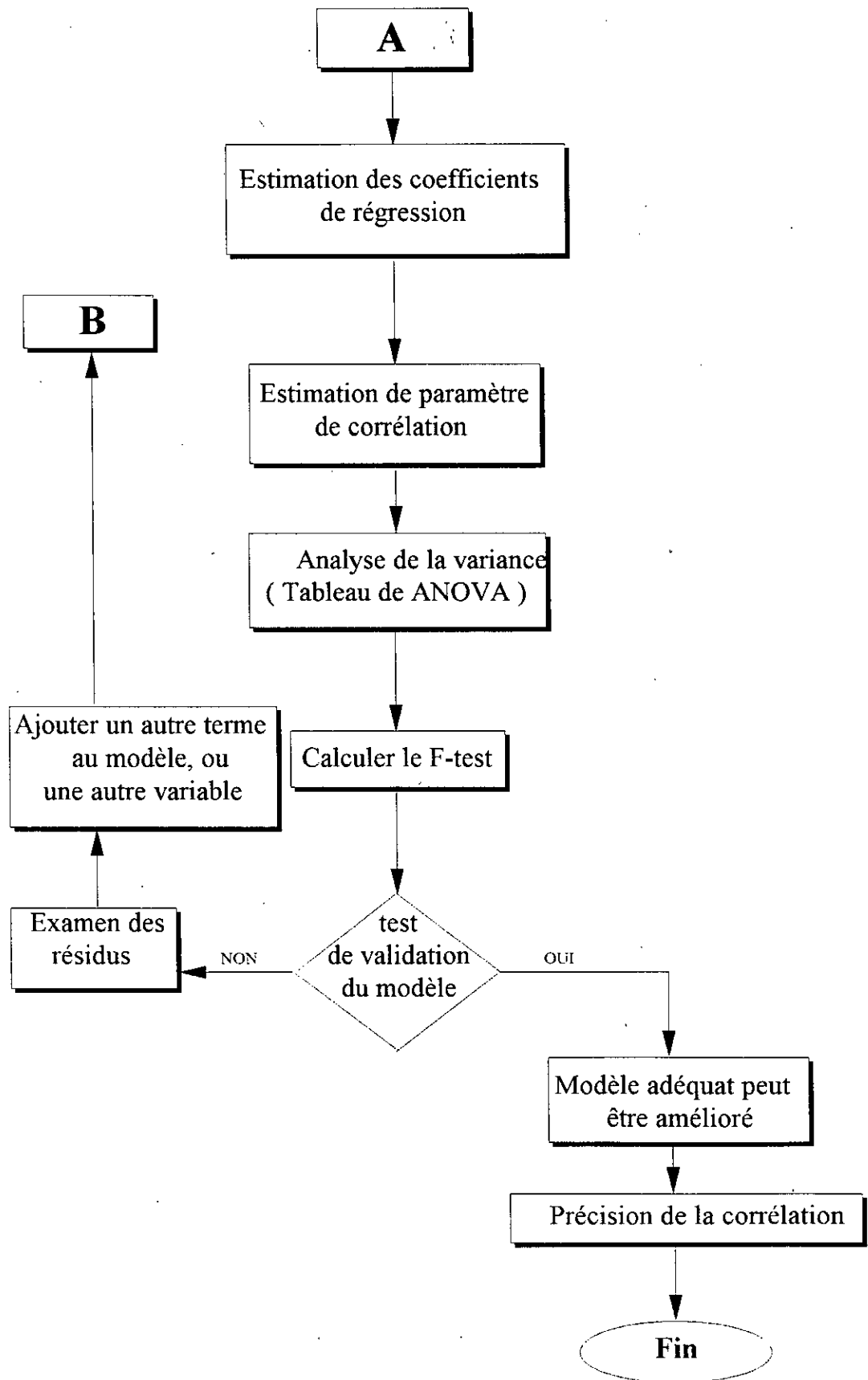


## Organigramme de calcul de $I_M$ ( intensité moyenne maximale )



# Organigramme de la recherche de modèles





***CONCLUSION  
GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE

---

L'objectif du présent travail qui a concerné une station pluviométrique mixte consistait à rechercher d'éventuelles lois empiriques pouvant lier les données pluviographiques et en particulier les intensités moyennes maximales ( $I_M$ ) aux hauteurs pluviométriques journalières ( $H_{PV}$ ). Une étude statistique de corrélation entre les variables choisies a été utilisée à cet effet.

Ce genre d'étude exige cependant que les données examinées constituent un ensemble cohérent et homogène. Une analyse critique et un traitement préalable des données disponibles se sont donc avérés nécessaires, afin d'en tester la fiabilité et d'en corriger les éventuelles erreurs. Au terme de cette critique, un nouveau format de fichier pluviographique, a été adopté afin de mieux restituer l'historique de toute pluie isolée.

Après avoir choisi les paramètres à analyser ( $I_M$  et  $H_{PV}$ ), nous avons procédé au calcul de l'intensité moyenne maximale relative à une pluie isolée par jour à l'aide d'une méthode basée sur le calcul d'une moyenne mobile.

Le caractère irrégulier et aléatoire de la pluviométrie en Algérie, a été mis en évidence par une série de représentation graphiques présentée au CHAPITRE III. Cette caractéristique constitue un véritable handicap quant à la possibilité d'établir des régressions fiables relativement aux pluies de courte durée. C'est pourquoi le recours à une modélisation par « classe » nous a semblé être une solution cohérente et acceptable à ce niveau d'étude. Chaque classe englobe des pluies de mêmes caractéristiques, et est donc modélisable avec un degré de signification élevé.

Le résultat obtenu est encourageant et pourrait constituer une bonne inspiration pour la régionalisation des courbes ( I D F ).

A l'issu de notre étude, il nous a semblé opportun de mentionner également les remarques suivantes :

- Près de la moitié du travail a concerné l'analyse critique et le traitement des données. Malgré cet effort il ne faut pas écarter la possibilité que des anomalies puissent encore subsister dans les séries de données.

- Les formats de fichiers tels que disponibles au niveau de l'A N R H ne facilitent pas leur exploitation pour les besoins de l'étude. Tous les fichiers utilisés ont nécessité une transformation adéquate du format.

- La carence des stations mixtes pour les besoins de modélisation et les nombreuses lacunes enregistrées dans les séries de données constituent autant de contraintes pour les études de cartographie pluviométrique. Une attention particulière doit par conséquent être accordée à la gestion rationnelle et l'entretien permanent des instruments de mesure afin d'en limiter les dysfonctionnements. Il faut rappeler qu'il n'existera jamais de procédé générateur de données meilleur que les mesures réelles, et que les méthodes de simulation de données les plus sophistiquées vaudront toujours moins qu'une bonne série chronologique.

Cette étude constitue ainsi un modeste jalon vers un objectif plus global qui est celui de l'établissement d'une cartographie des pluies de courte durée pour l'ensemble du territoire national.

# ***ANNEXES***

# ANNEXE I

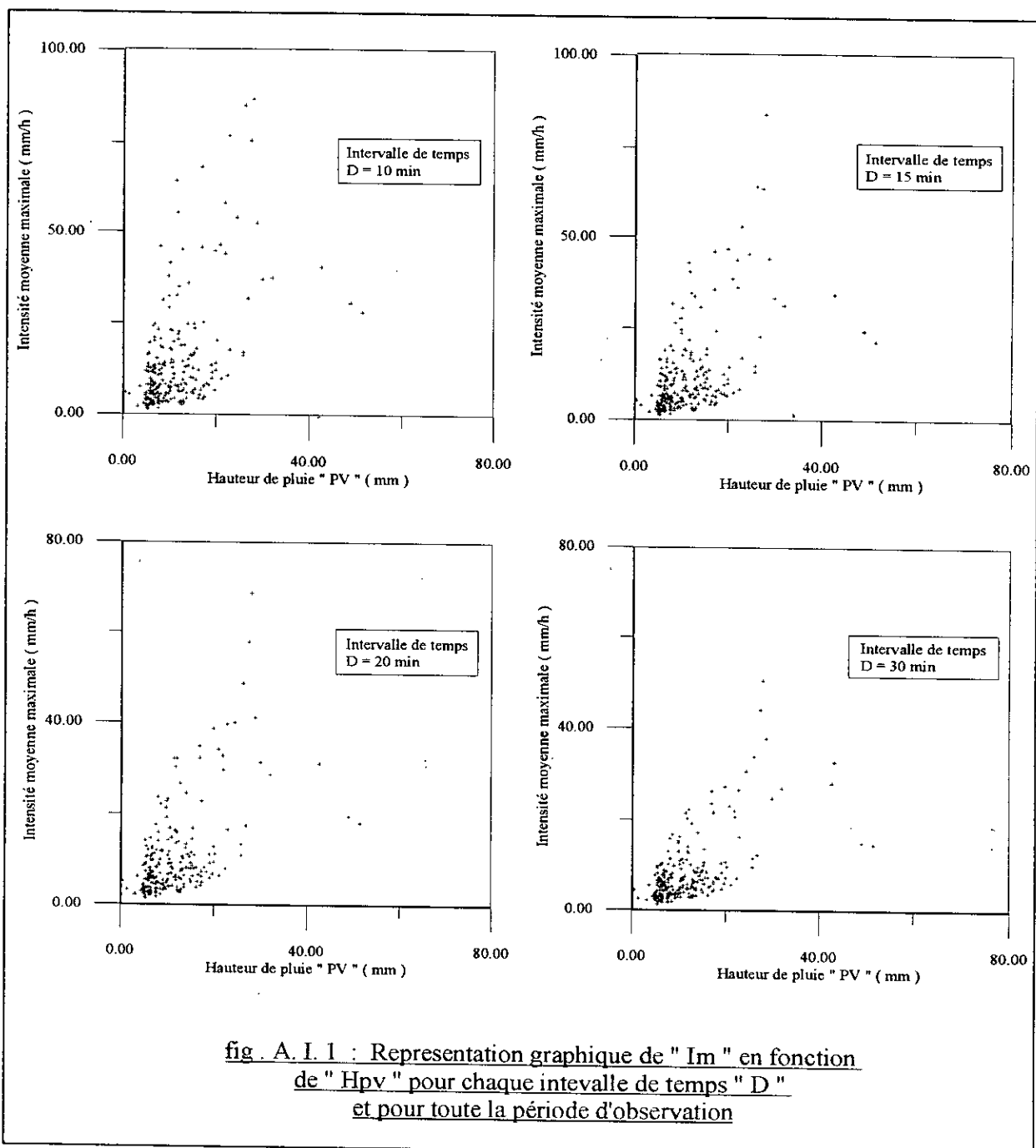


fig. A. I. 1 : Représentation graphique de " $I_m$ " en fonction de " $H_{pv}$ " pour chaque intervalle de temps " $D$ " et pour toute la période d'observation



# ANNEXE I

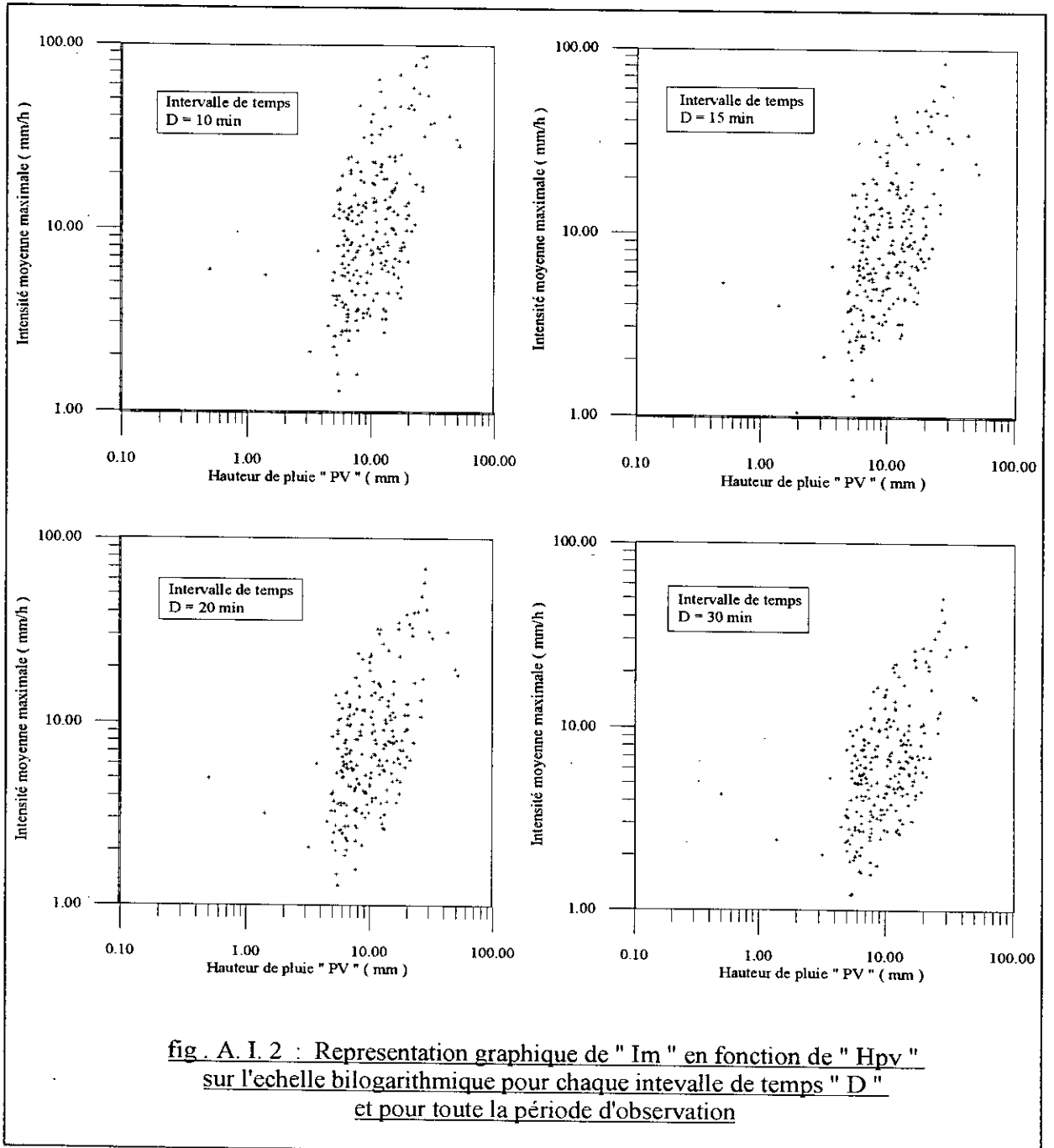
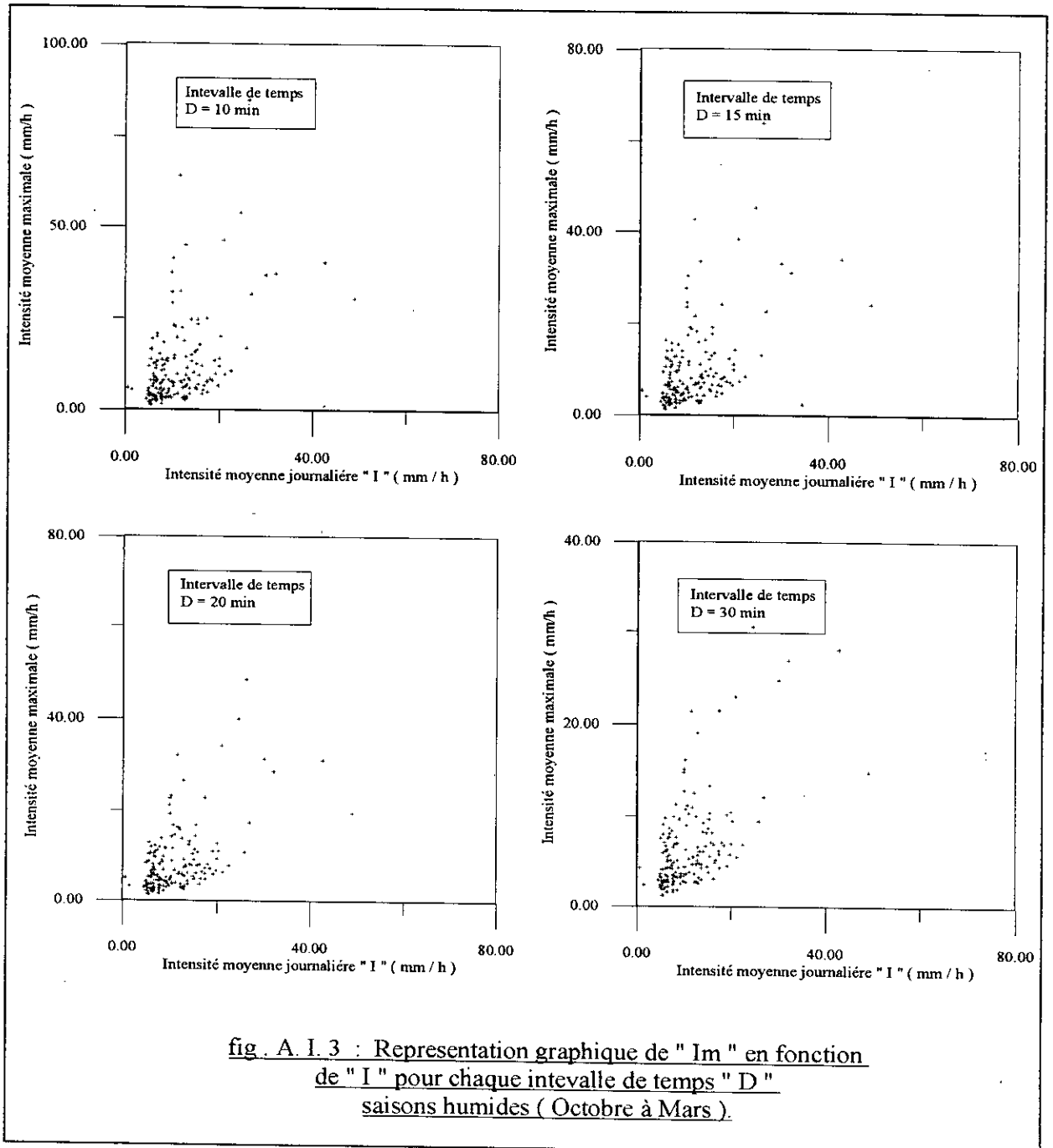


fig. A. I. 2 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  "  
sur l'échelle bilogarithmique pour chaque intervalle de temps "  $D$  "  
et pour toute la période d'observation

# ANNEXE I



# ANNEXE I

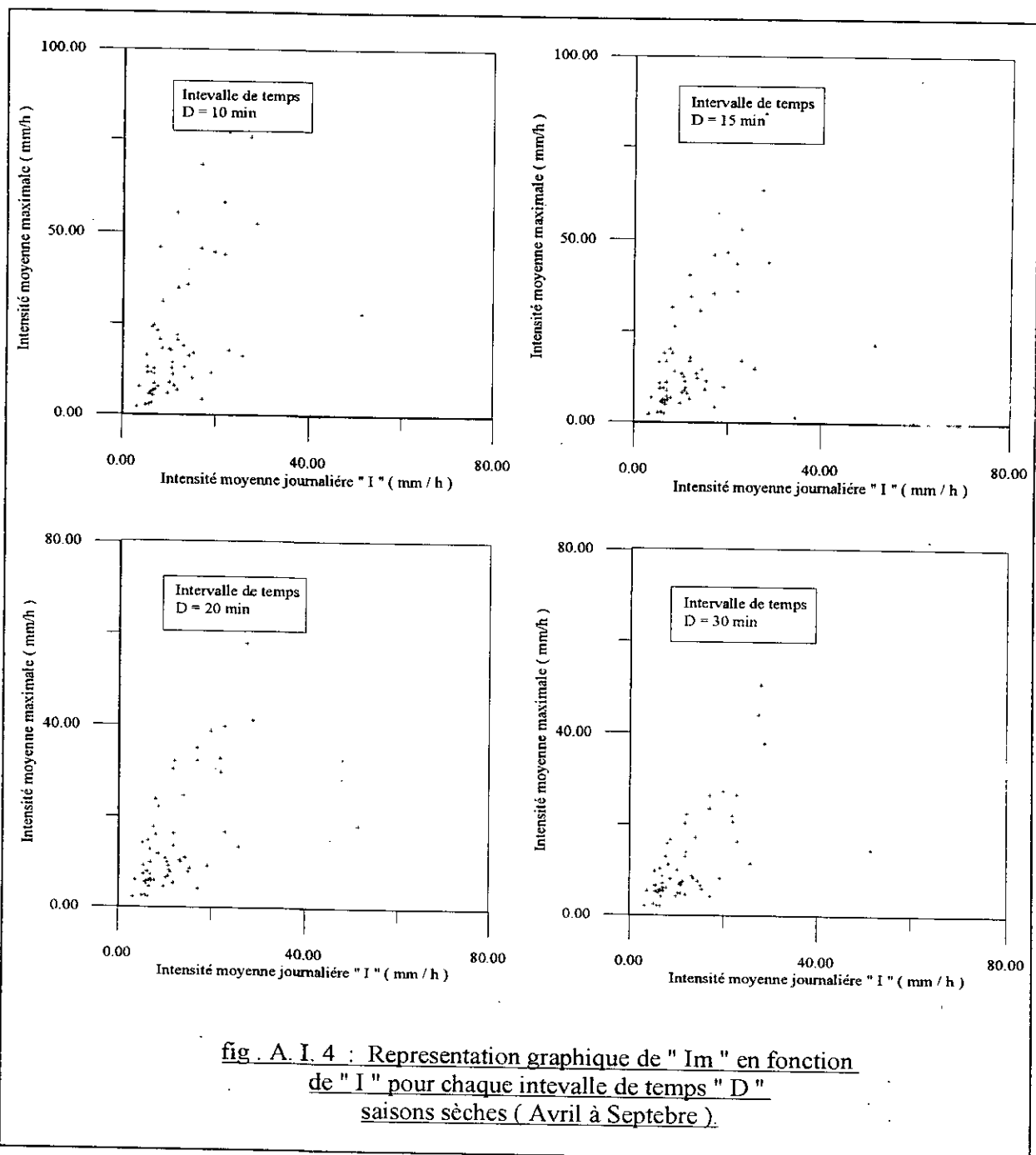


fig . A. I. 4 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $I$  " pour chaque intervalle de temps "  $D$  " saisons sèches ( Avril à Septembre ).

# ANNEXE I

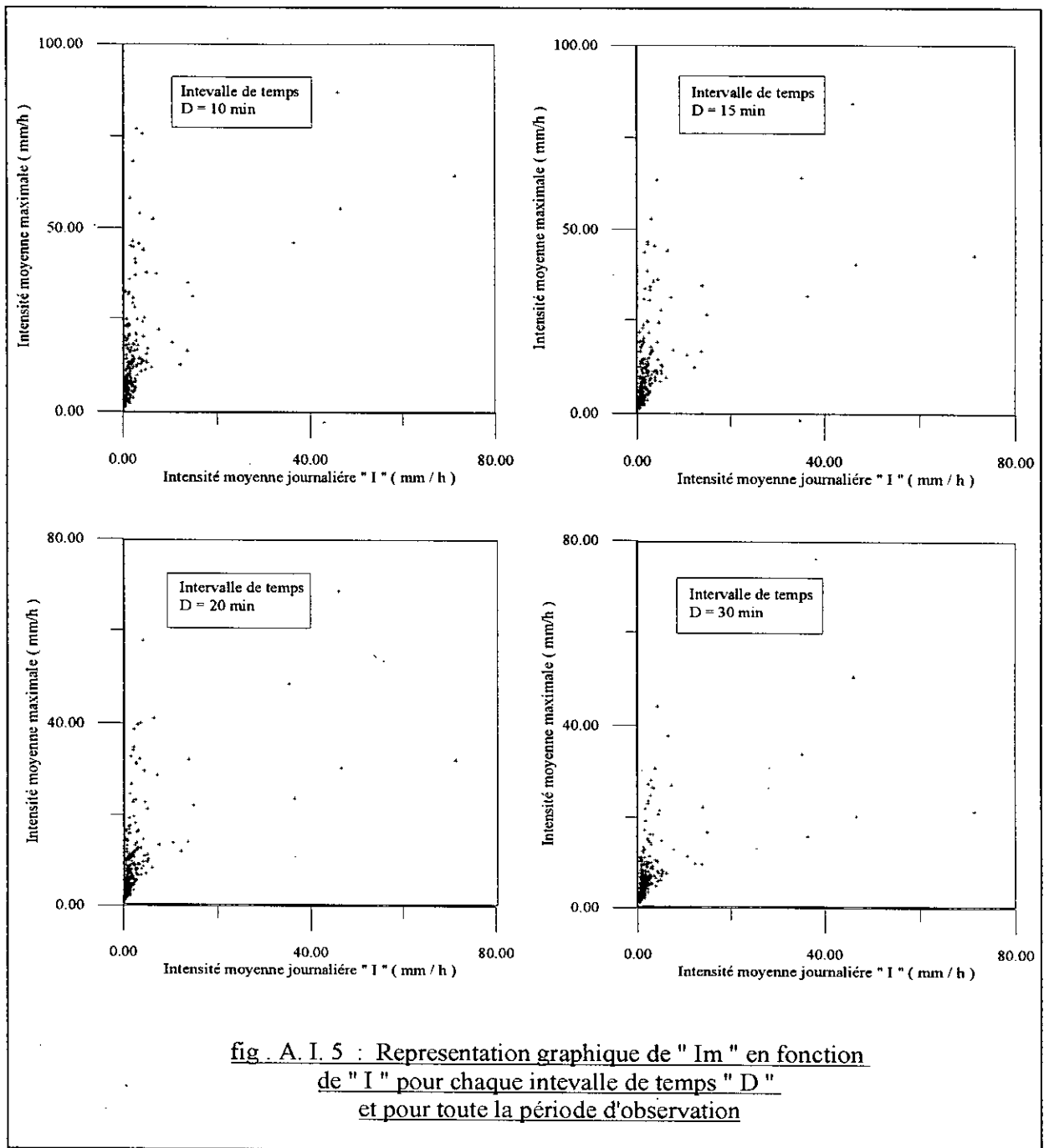


fig . A. I. 5 : Representation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $I$  " pour chaque intervalle de temps "  $D$  " et pour toute la période d'observation

# ANNEXE I

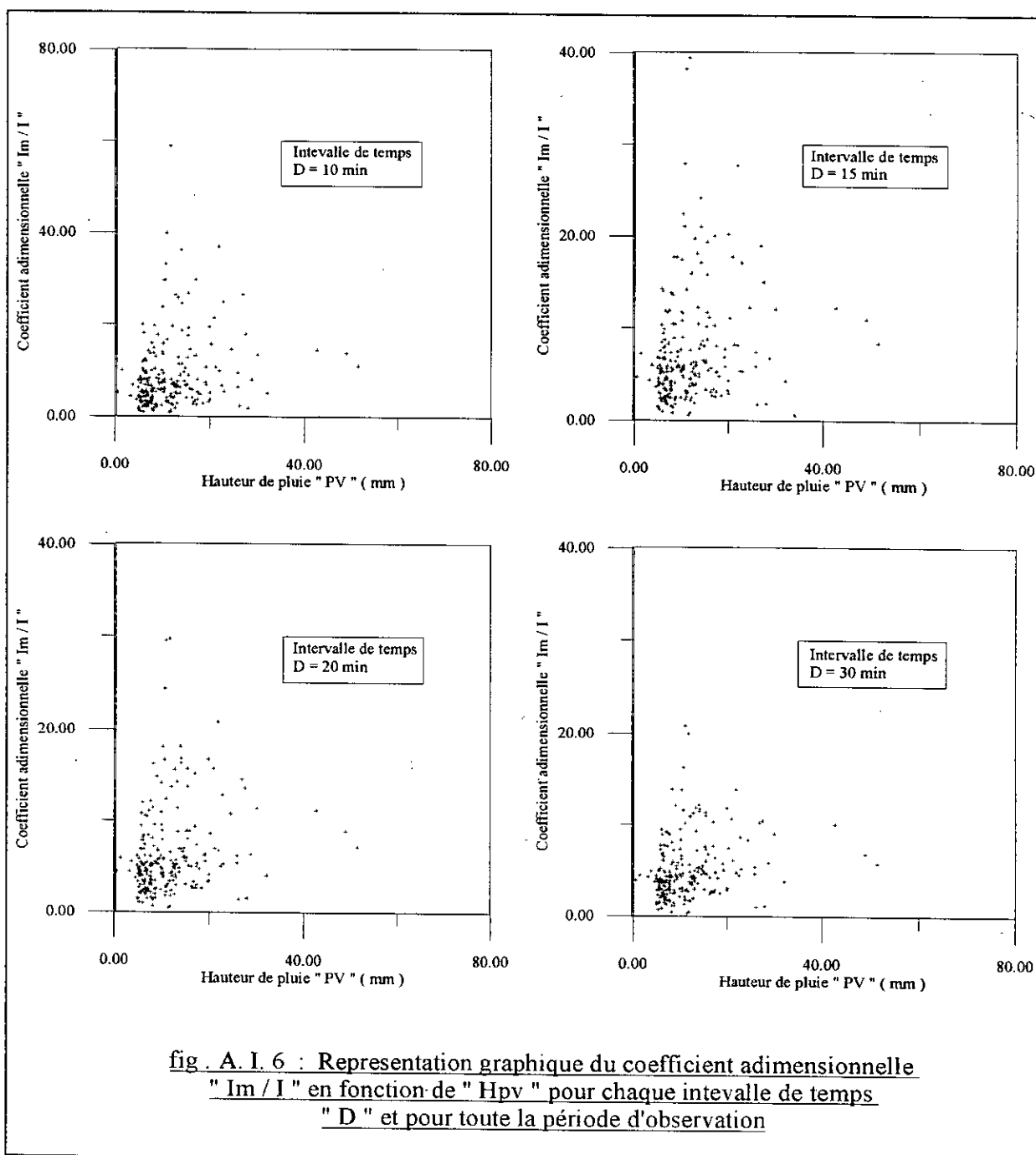


fig . A. I. 6 : Représentation graphique du coefficient adimensionnelle  
"  $I_m / I$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque intervalle de temps  
"  $D$  " et pour toute la période d'observation

# ANNEXE I

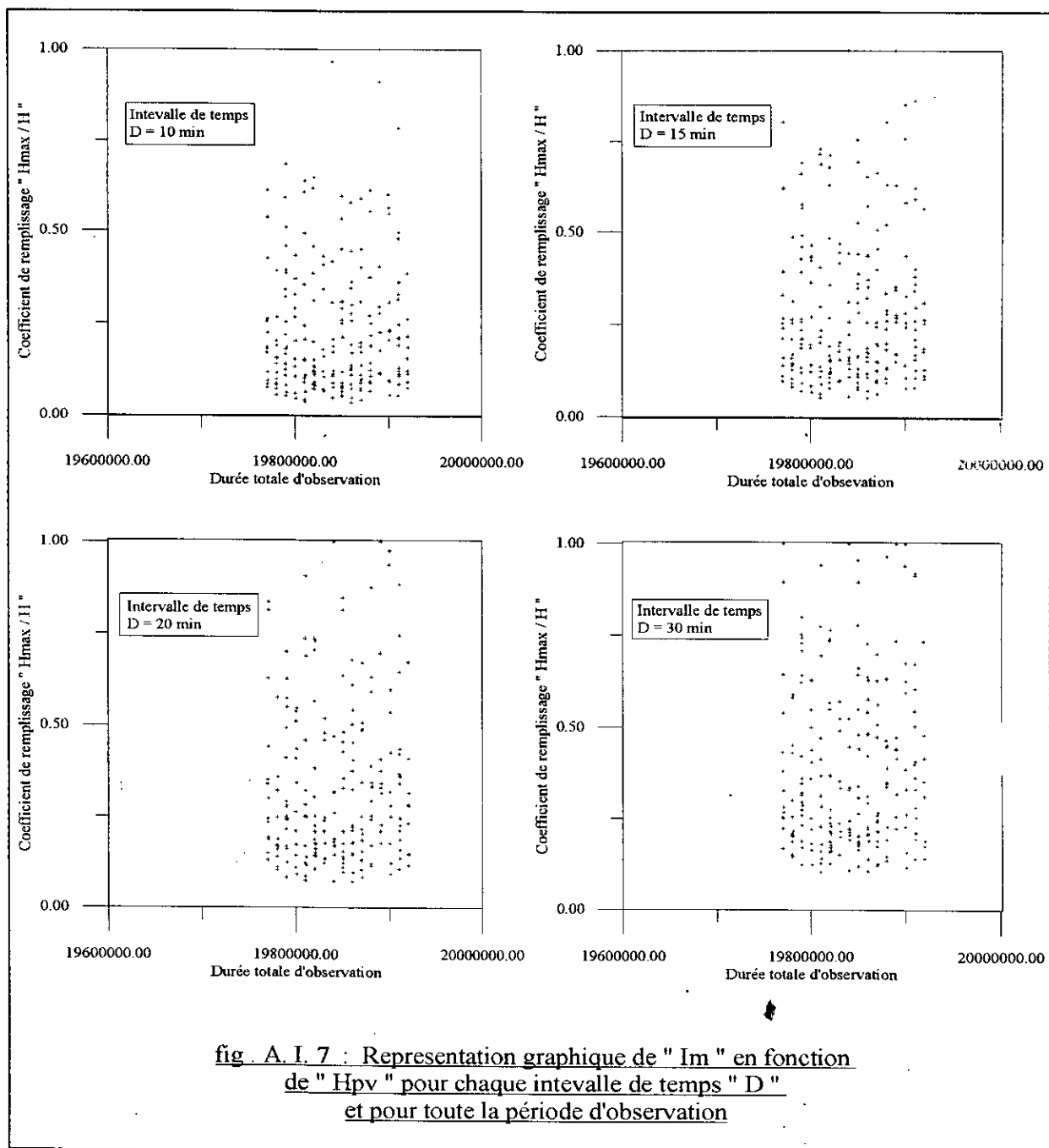
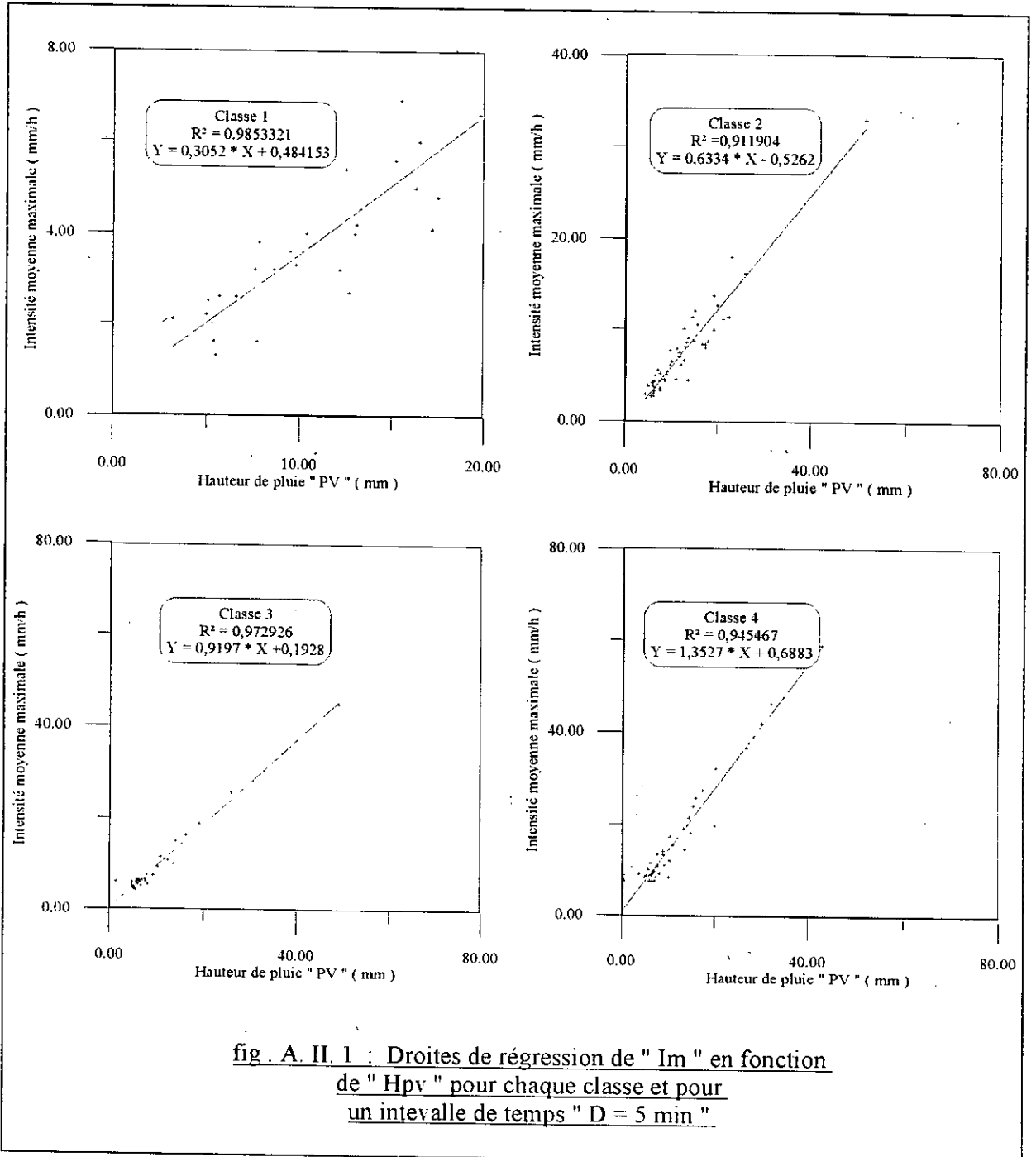


fig. A. I. 7 : Représentation graphique de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque intervalle de temps "  $D$  " et pour toute la période d'observation

## ANNEXE II



ANNEXE II

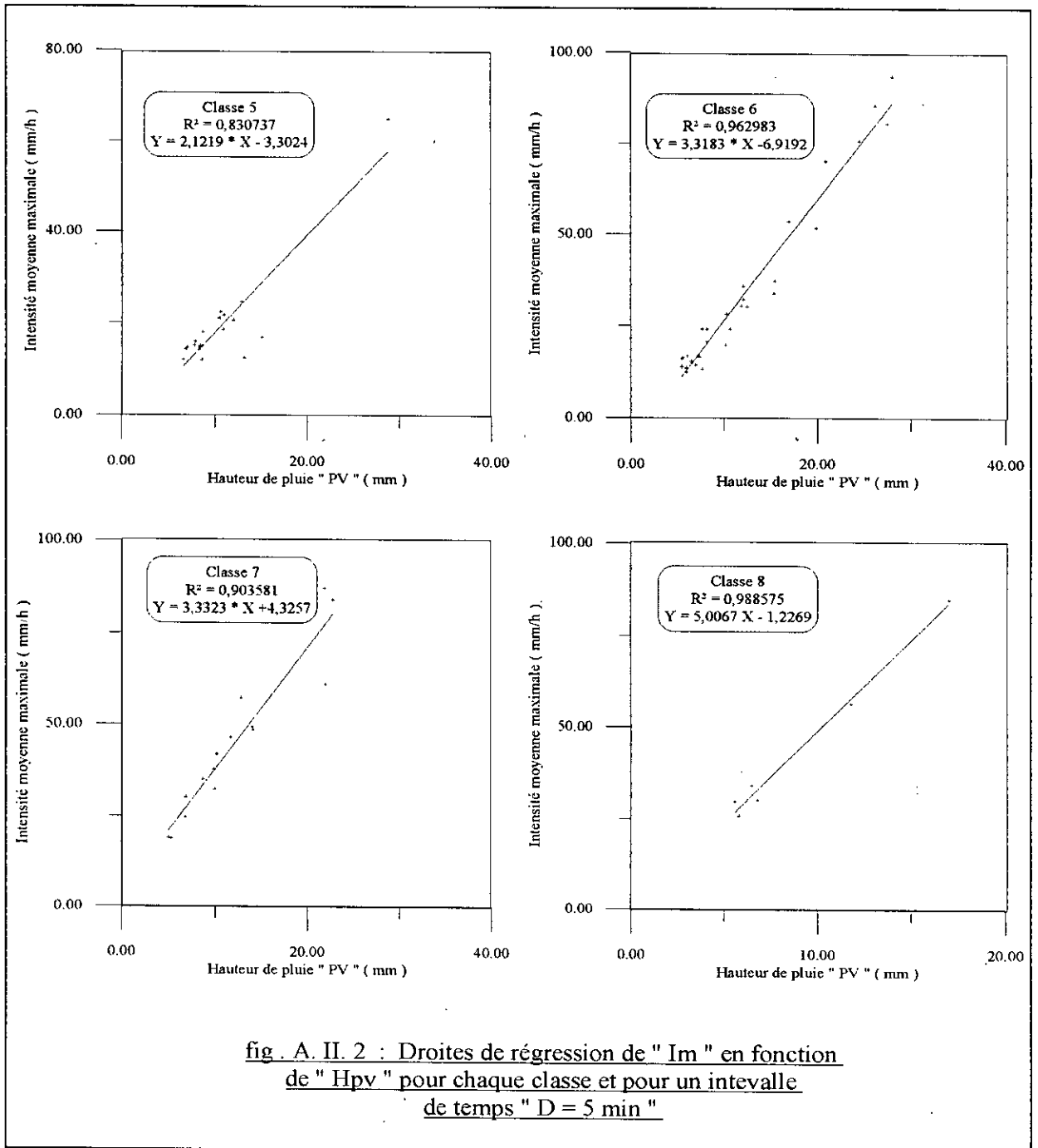
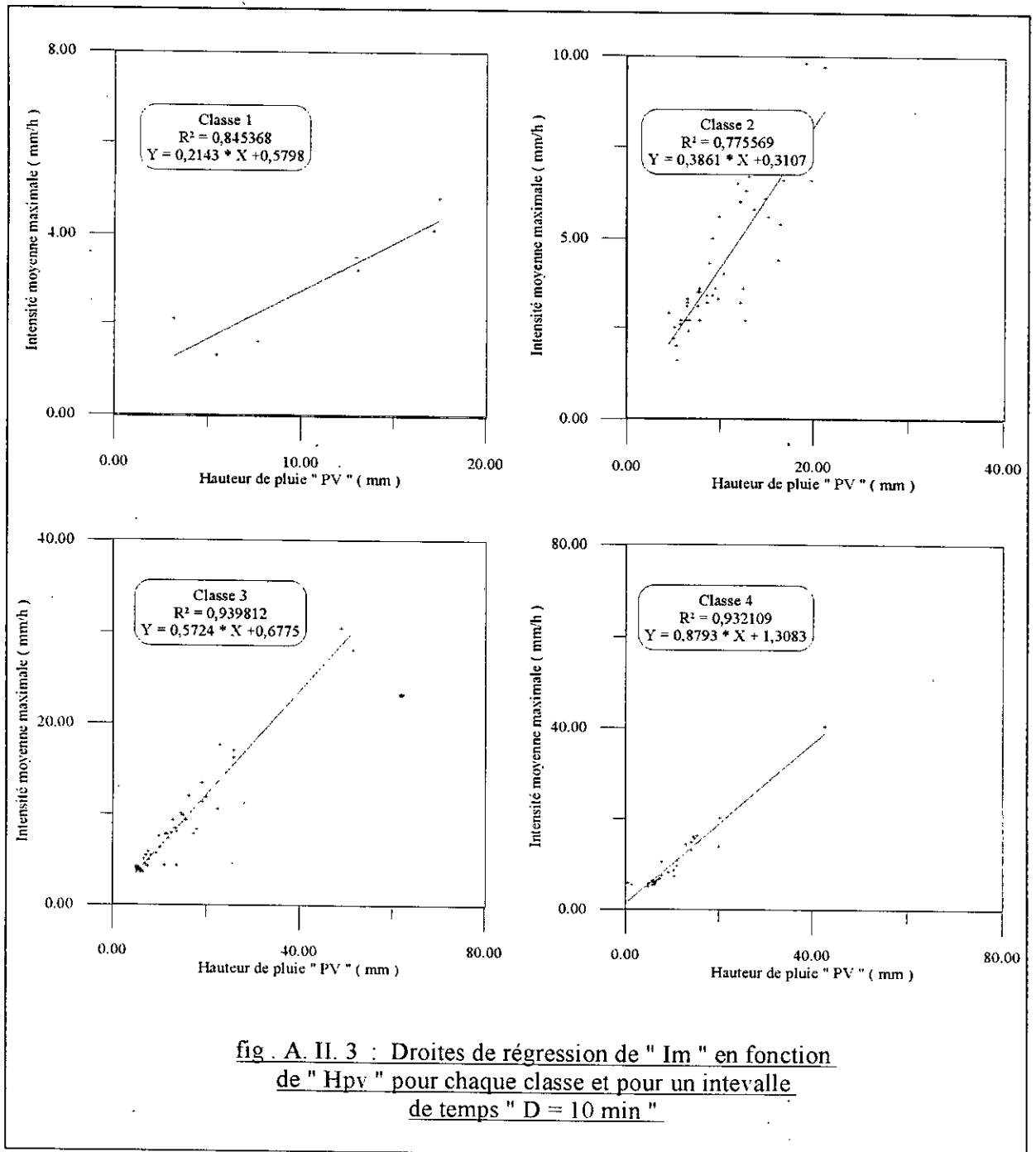


fig. A. II. 2 : Droites de régression de " Im " en fonction de " Hpv " pour chaque classe et pour un intervalle de temps " D = 5 min "



ANNEXE II



ANNEXE II

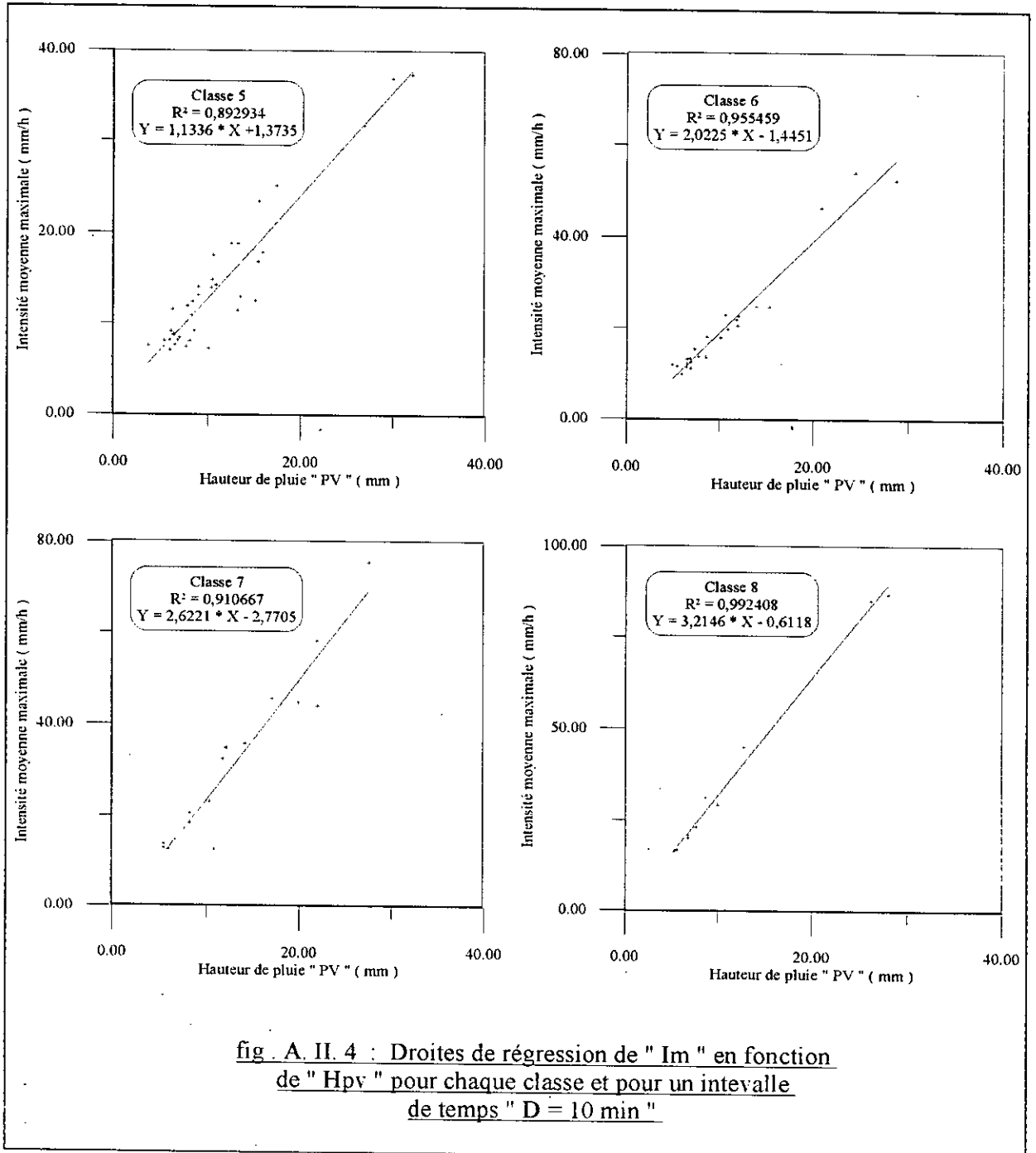


fig . A. II. 4 : Droites de régression de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque classe et pour un intervalle de temps "  $D = 10 \text{ min}$  "

ANNEXE II

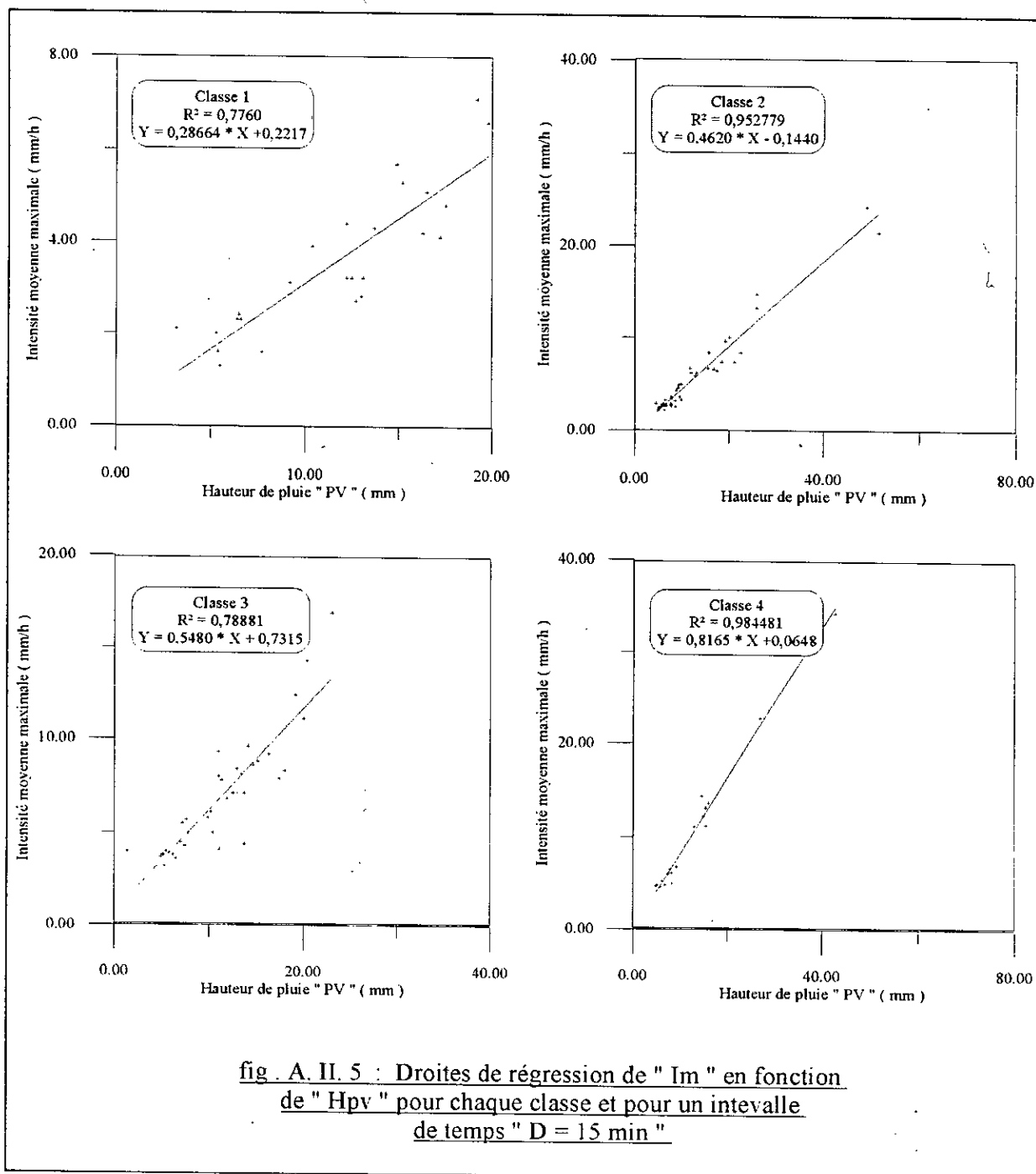
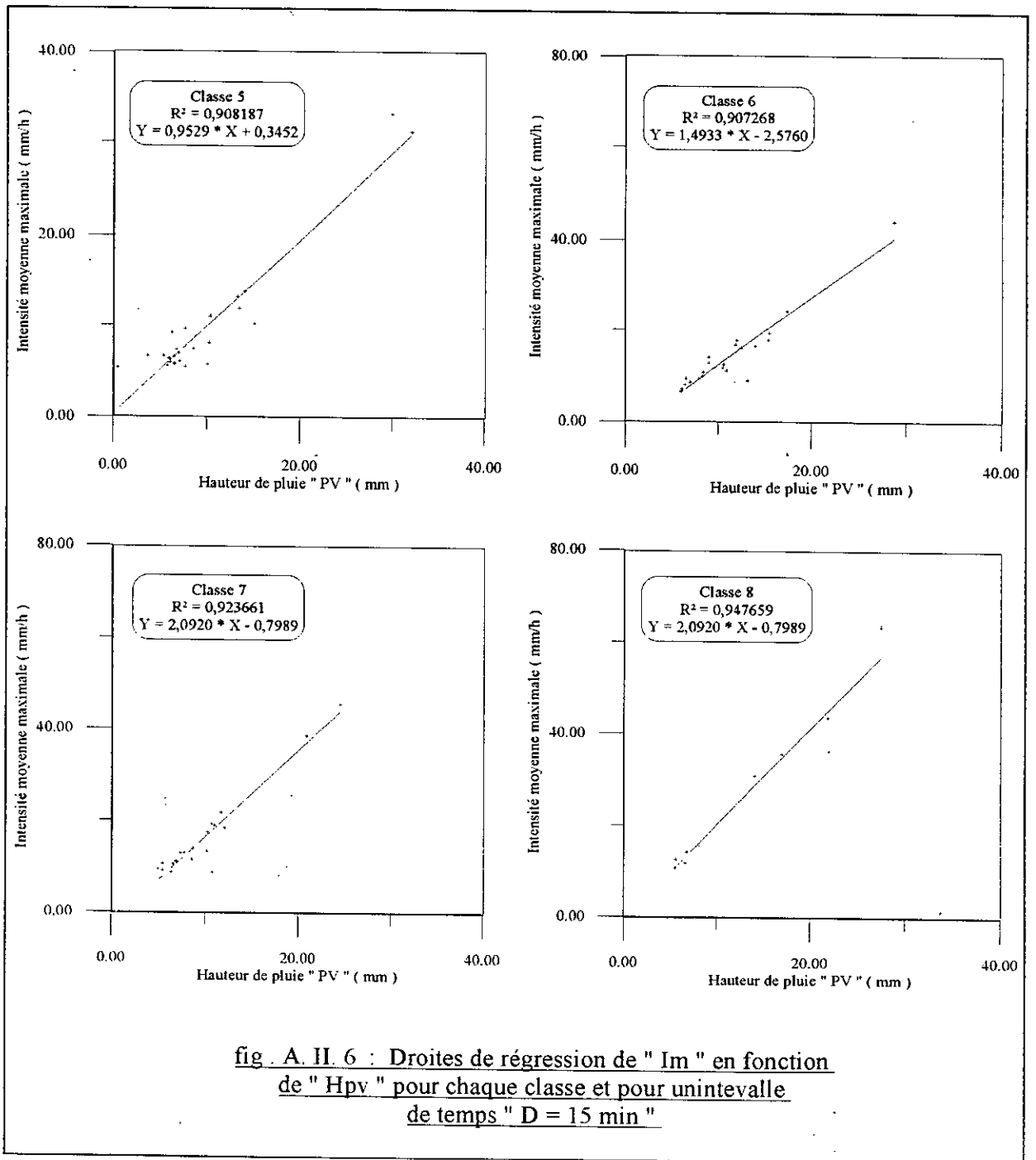


fig . A. II. 5 : Droites de régression de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque classe et pour un intervalle de temps "  $D = 15 \text{ min}$  "

ANNEXE II



ANNEXE II

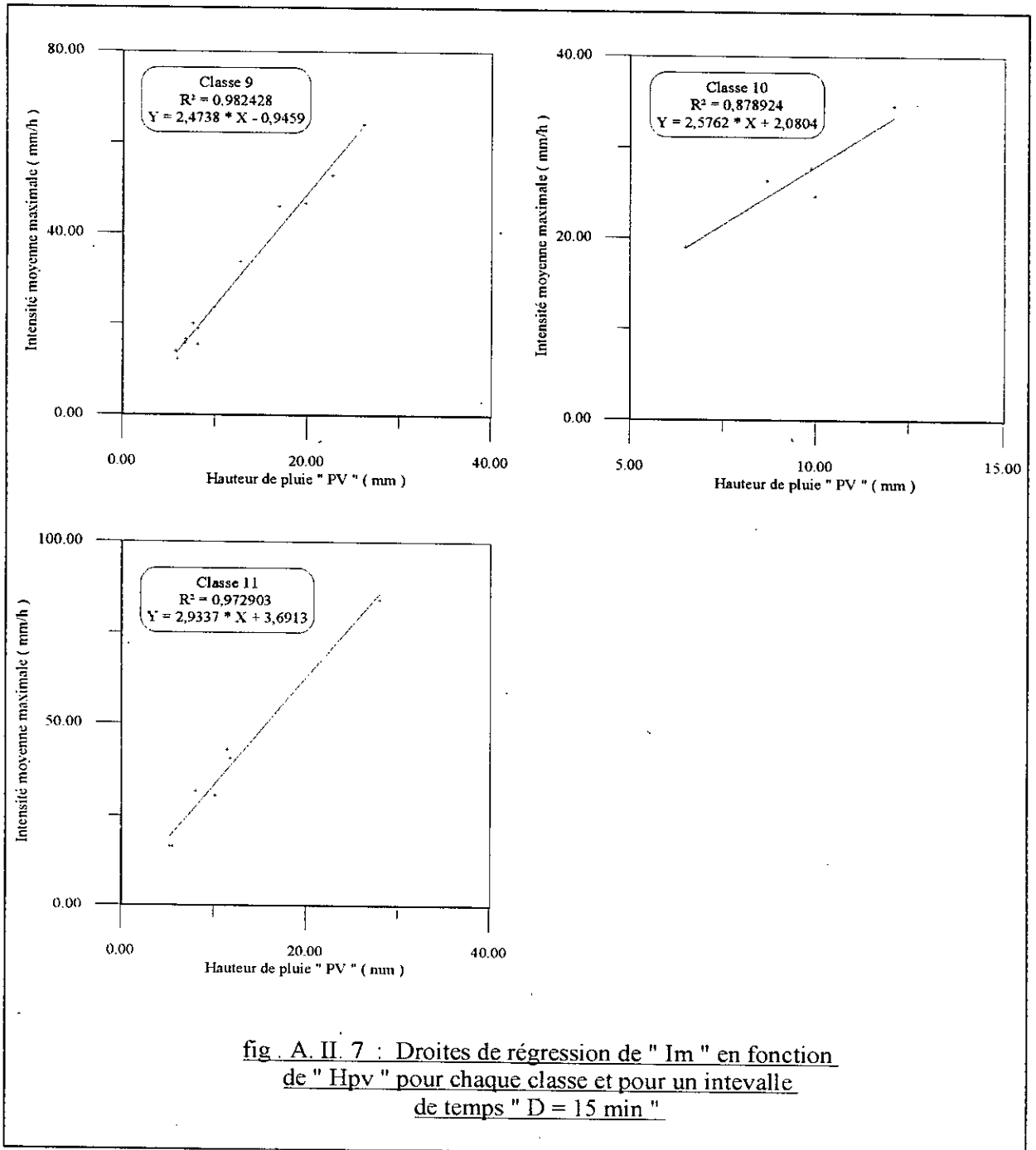
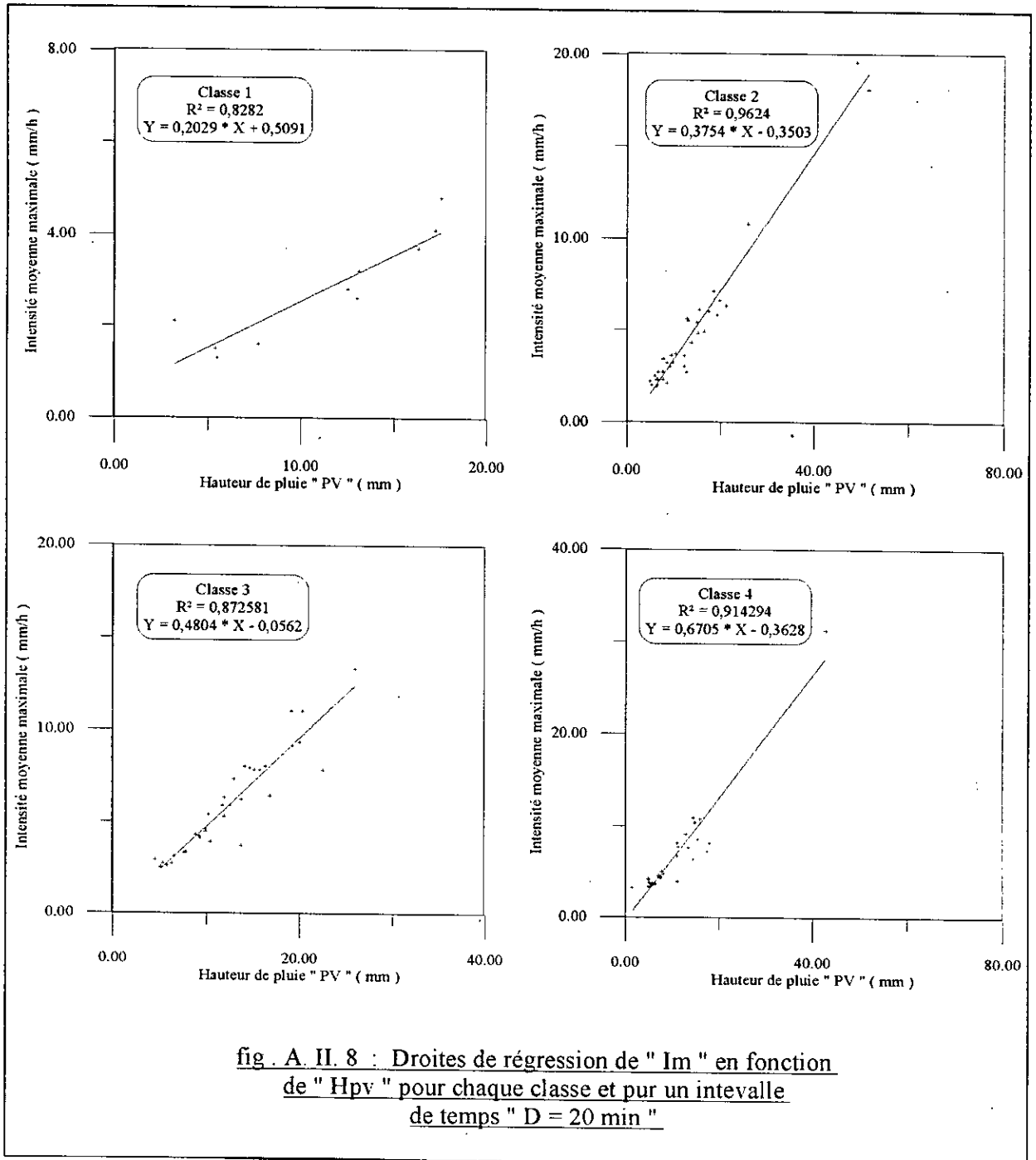
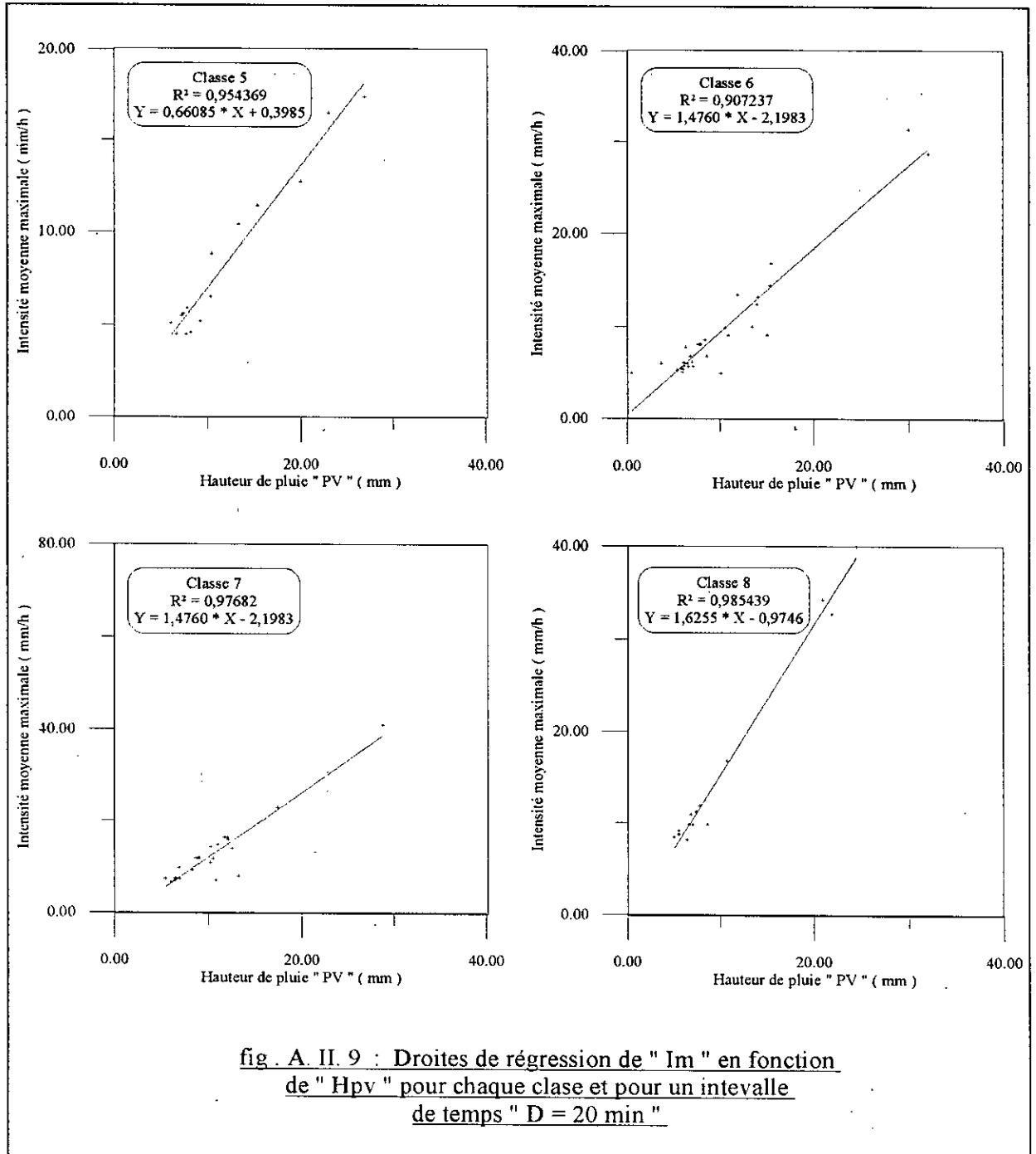


fig. A. II. 7 : Droites de régression de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque classe et pour un intervalle de temps "  $D = 15 \text{ min}$  "

ANNEXE II



## ANNEXE II



ANNEXE II

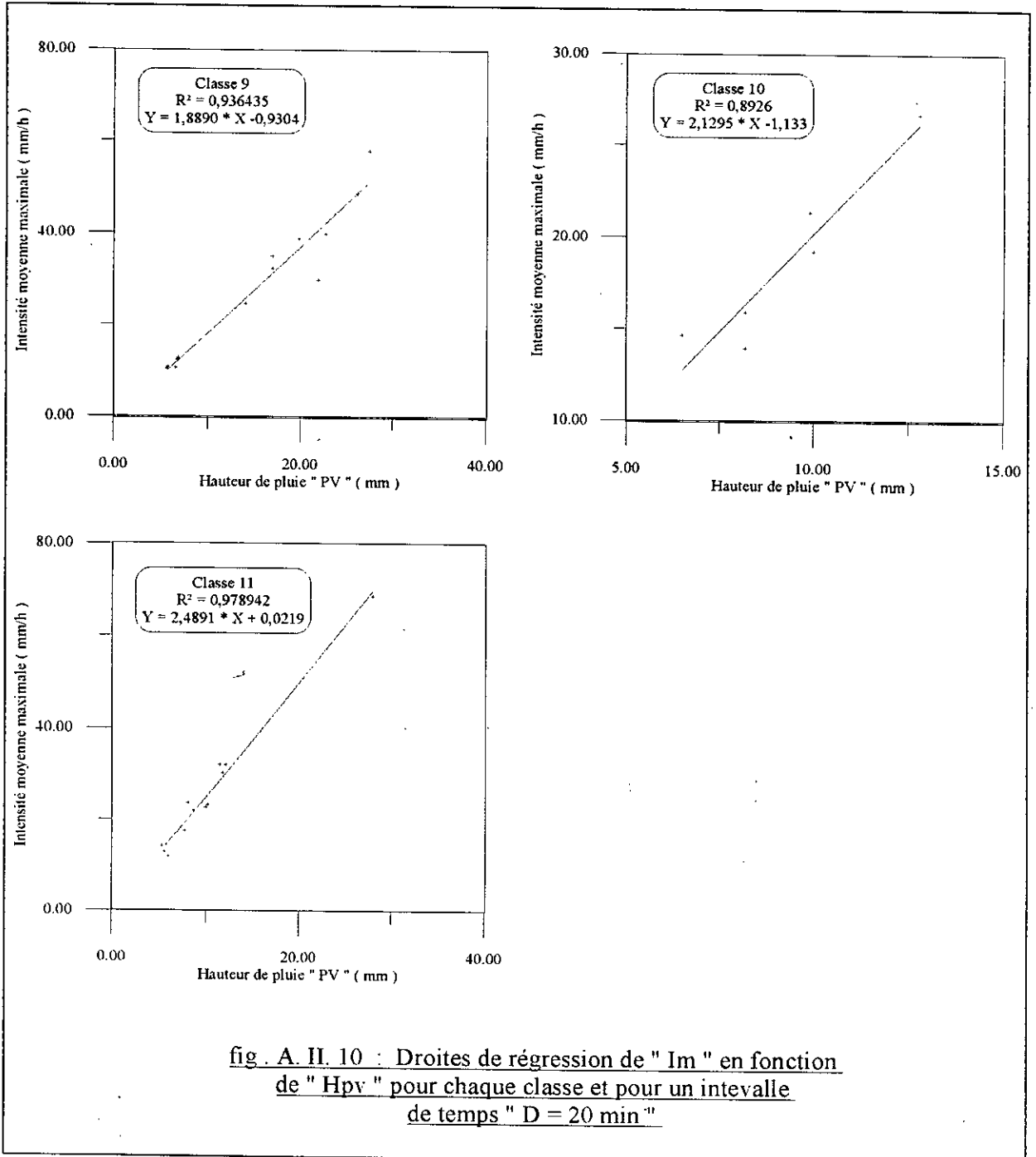
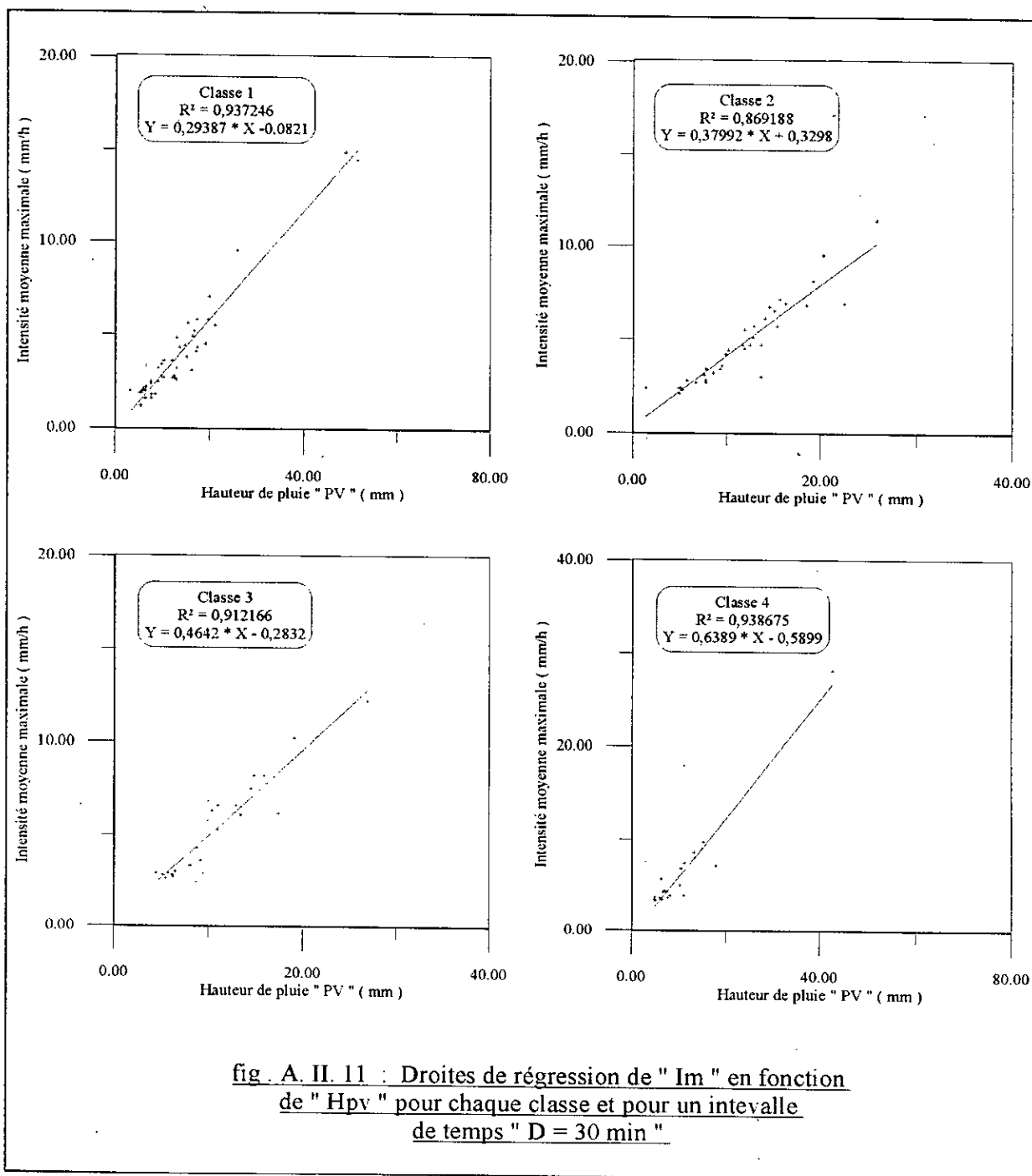


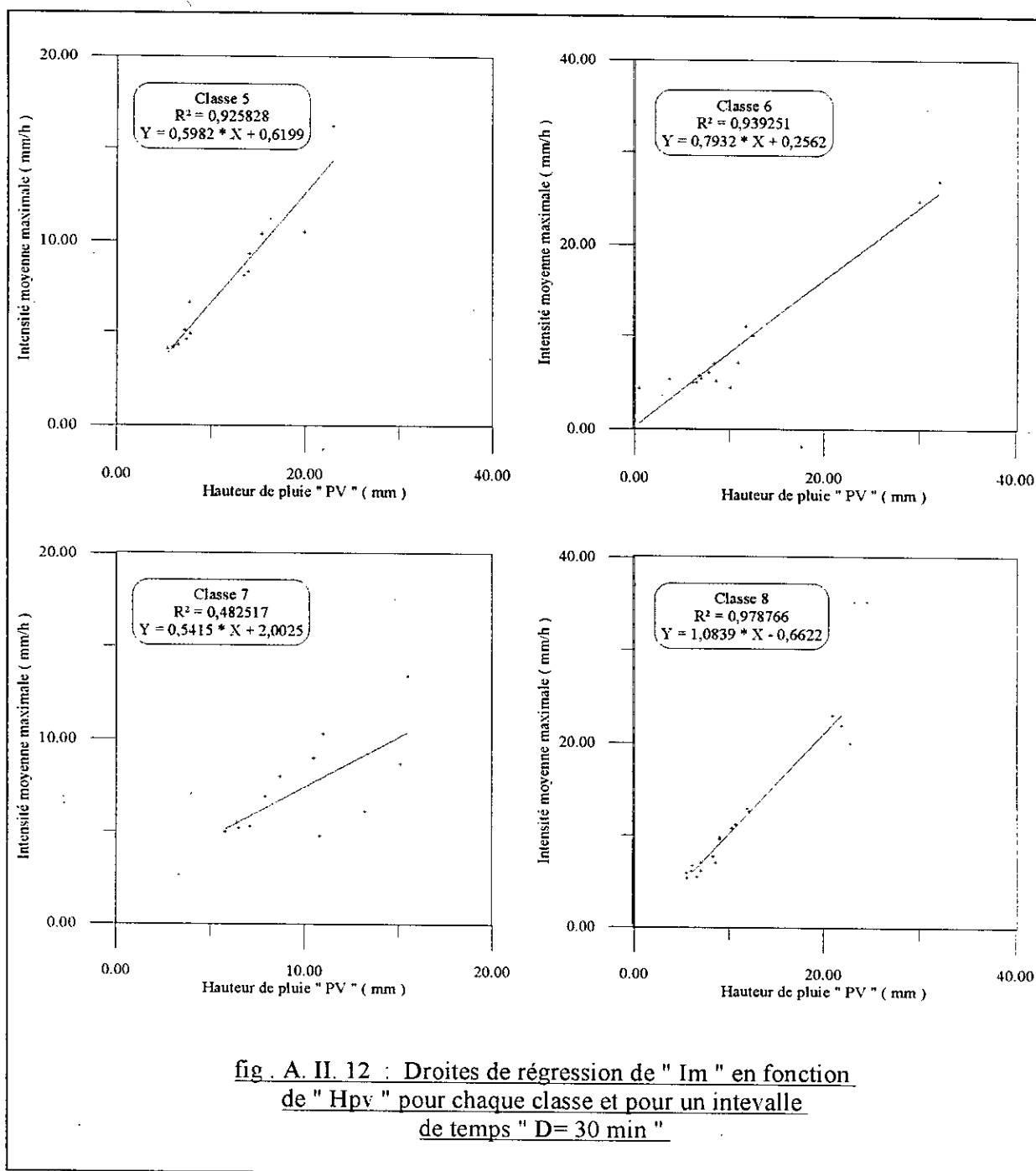
fig. A. II. 10 : Droites de régression de "  $I_m$  " en fonction de "  $H_{pv}$  " pour chaque classe et pour un intervalle de temps "  $D = 20 \text{ min}$  "



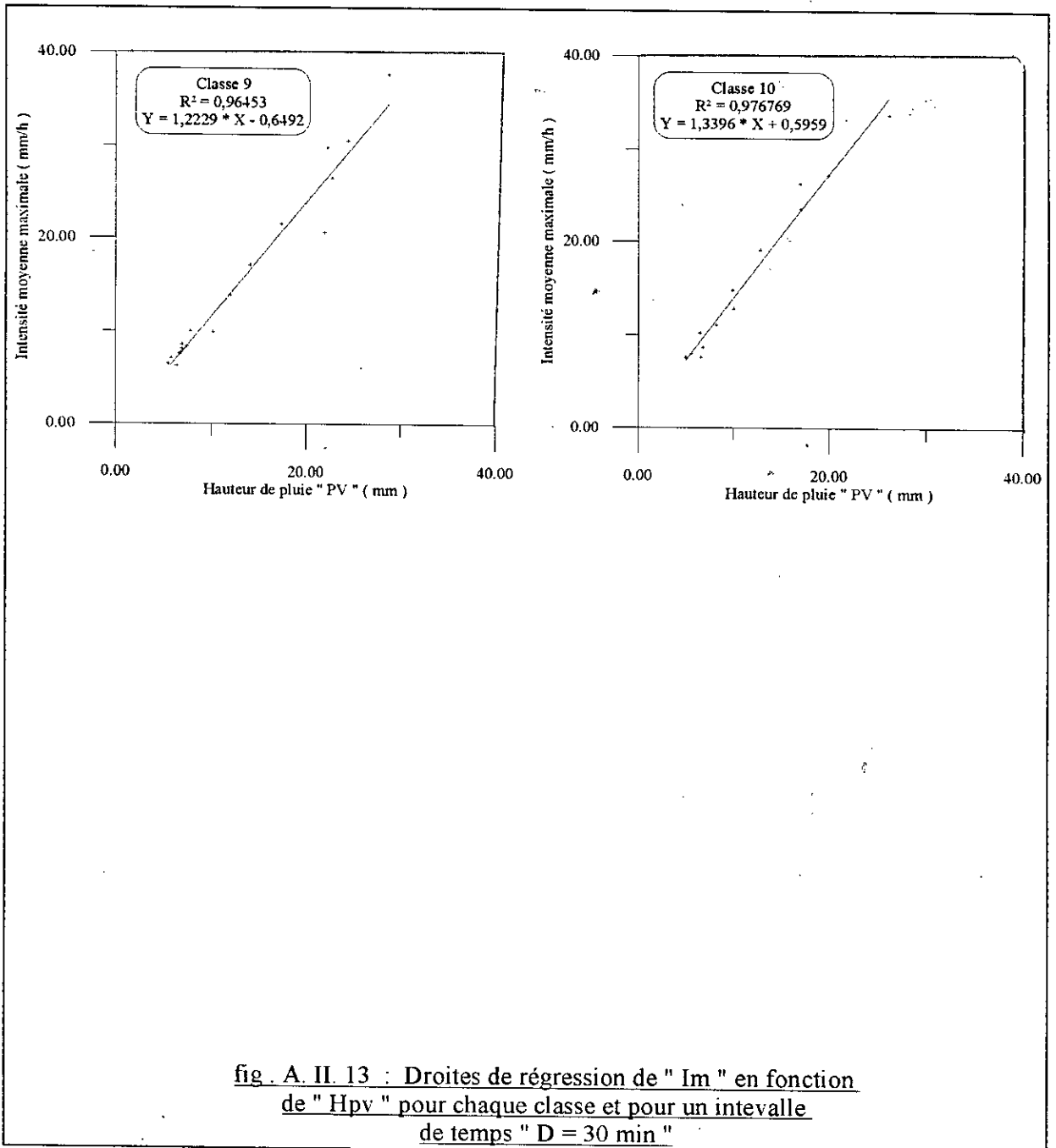
ANNEXE II



## ANNEXE II

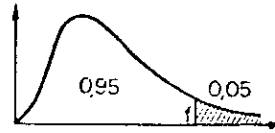


ANNEXE II



# ANNEXE III

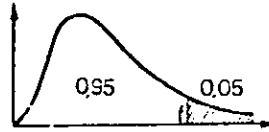
VALEURS  $f$  DE LA VARIABLE DE FISHER-SNEDECOR  $F(v_1; v_2)$   
AYANT LA PROBABILITÉ 0,05 D'ÊTRE DÉPASSÉES



$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	246	247	247
2	22,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,73	8,71	8,70	8,69	8,68	8,67
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91	5,89	5,87	5,86	5,84	5,83	5,82
5	6,01	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,66	4,64	4,62	4,60	4,59	4,58
6	5,09	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,98	3,96	3,94	3,92	3,91	3,91
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,55	3,53	3,51	3,49	3,48	3,47
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,26	3,24	3,22	3,20	3,19	3,17
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,05	3,03	3,01	2,99	2,97	2,96
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,89	2,86	2,85	2,83	2,81	2,80
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,76	2,74	2,72	2,70	2,69	2,67
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,66	2,64	2,62	2,60	2,58	2,57
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,58	2,55	2,53	2,51	2,50	2,48
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,57	2,53	2,51	2,48	2,46	2,44	2,43	2,41
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,45	2,42	2,40	2,38	2,37	2,35
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,46	2,42	2,40	2,37	2,35	2,33	2,32	2,30
17	4,45	3,59	3,20	2,97	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33	2,31	2,29	2,27	2,26
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,31	2,29	2,27	2,25	2,23	2,22
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,23	2,21	2,20	2,18
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,22	2,20	2,18	2,17	2,15
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,20	2,18	2,16	2,14	2,12
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,20	2,17	2,15	2,13	2,11	2,10
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,23	2,20	2,18	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,21	2,18	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,05
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,14	2,11	2,09	2,07	2,05	2,04
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,12	2,09	2,07	2,05	2,03	2,02
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,17	2,13	2,10	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06	2,04	2,02	2,00	1,99
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,08	2,05	2,03	2,01	1,99	1,97
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,13	2,09	2,06	2,04	2,01	1,99	1,97	1,96
32	4,15	3,29	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14	2,10	2,07	2,04	2,01	1,99	1,97	1,95	1,94
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,29	2,23	2,17	2,12	2,08	2,05	2,02	1,99	1,97	1,95	1,93	1,92
36	4,11	3,26	2,87	2,63	2,48	2,36	2,28	2,21	2,15	2,11	2,07	2,03	2,00	1,98	1,95	1,93	1,92	1,90
38	4,10	3,24	2,85	2,62	2,46	2,35	2,26	2,19	2,14	2,09	2,05	2,02	1,99	1,96	1,94	1,92	1,90	1,88
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,97	1,95	1,92	1,90	1,89	1,87
42	4,07	3,22	2,83	2,59	2,44	2,32	2,24	2,17	2,11	2,06	2,03	1,99	1,96	1,93	1,91	1,89	1,87	1,86
44	4,06	3,21	2,82	2,58	2,43	2,31	2,23	2,16	2,10	2,05	2,01	1,98	1,95	1,92	1,90	1,88	1,86	1,84
46	4,05	3,20	2,81	2,57	2,42	2,30	2,22	2,15	2,09	2,04	2,00	1,97	1,94	1,91	1,89	1,87	1,85	1,83
48	4,04	3,19	2,80	2,57	2,41	2,29	2,21	2,14	2,08	2,03	1,99	1,96	1,93	1,90	1,88	1,86	1,84	1,82
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03	1,99	1,95	1,92	1,89	1,87	1,85	1,83	1,81
55	4,02	3,16	2,77	2,54	2,38	2,27	2,18	2,11	2,06	2,01	1,97	1,93	1,90	1,88	1,85	1,83	1,81	1,79
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,89	1,86	1,84	1,82	1,80	1,78
65	3,99	3,14	2,75	2,51	2,36	2,24	2,15	2,08	2,03	1,98	1,94	1,90	1,87	1,85	1,82	1,80	1,78	1,76
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,14	2,07	2,02	1,97	1,93	1,89	1,86	1,84	1,81	1,79	1,77	1,75
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95	1,91	1,88	1,84	1,82	1,79	1,77	1,75	1,73
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,32	2,20	2,11	2,04	1,99	1,94	1,90	1,86	1,83	1,80	1,78	1,76	1,74	1,72
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93	1,89	1,85	1,82	1,79	1,77	1,75	1,73	1,71
125	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,08	2,01	1,95	1,91	1,87	1,83	1,80	1,77	1,75	1,72	1,70	1,69
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89	1,85	1,82	1,79	1,76	1,73	1,71	1,69	1,67
200	3,89	3,04	2,65	2,42	2,26	2,14	2,06	1,98	1,93	1,88	1,84	1,80	1,77	1,74	1,72	1,69	1,67	1,66
300	3,87	3,03	2,63	2,40	2,24	2,13	2,04	1,97	1,91	1,86	1,82	1,78	1,75	1,72	1,70	1,68	1,66	1,64
500	3,86	3,01	2,62	2,39	2,23	2,12	2,03	1,96	1,90	1,85	1,81	1,77	1,74	1,71	1,69	1,66	1,64	1,62
1000	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,11	2,02	1,95	1,89	1,84	1,80	1,76	1,73	1,70	1,68	1,65	1,63	1,61
$\infty$	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,72	1,69	1,67	1,64	1,62	1,60

# ANNEXE III

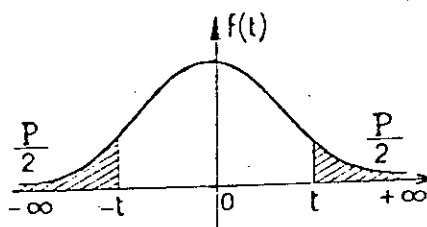
VALEURS  $f$  DE LA VARIABLE DE FISHER-SNEDECOR  $F(v_1; v_2)$   
AYANT LA PROBABILITE 0.05 D'ÊTRE DÉPASSÉES



$v_2 \backslash v_1$	19	20	22	24	26	28	30	35	40	45	50	60	80	100	200	500	$\infty$
1	248	248	249	249	249	250	250	251	251	251	252	252	252	253	254	254	254
2	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
3	8.67	8.66	8.65	8.64	8.63	8.62	8.62	8.60	8.59	8.59	8.58	8.57	8.56	8.55	8.54	8.53	8.53
4	5.81	5.80	5.79	5.77	5.76	5.75	5.75	5.73	5.72	5.71	5.70	5.69	5.67	5.66	5.65	5.64	5.63
5	4.57	4.56	4.54	4.53	4.52	4.50	4.50	4.48	4.46	4.45	4.44	4.43	4.41	4.41	4.39	4.37	4.37
6	3.88	3.87	3.86	3.84	3.83	3.82	3.81	3.79	3.77	3.76	3.75	3.74	3.72	3.71	3.69	3.68	3.67
7	3.46	3.44	3.43	3.41	3.40	3.39	3.38	3.36	3.34	3.33	3.32	3.30	3.29	3.27	3.25	3.24	3.23
8	3.16	3.15	3.13	3.12	3.10	3.09	3.08	3.06	3.04	3.03	3.02	3.01	2.99	2.97	2.95	2.94	2.93
9	2.95	2.94	2.92	2.90	2.89	2.87	2.86	2.84	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77	2.76	2.73	2.72	2.71
10	2.78	2.77	2.75	2.74	2.72	2.71	2.70	2.68	2.66	2.65	2.64	2.62	2.60	2.59	2.56	2.55	2.54
11	2.66	2.65	2.63	2.61	2.59	2.58	2.57	2.55	2.53	2.52	2.51	2.49	2.47	2.46	2.43	2.42	2.40
12	2.56	2.54	2.52	2.51	2.49	2.48	2.47	2.44	2.43	2.41	2.40	2.38	2.36	2.35	2.32	2.31	2.30
13	2.47	2.46	2.44	2.42	2.41	2.39	2.38	2.36	2.34	2.33	2.31	2.30	2.27	2.26	2.23	2.22	2.21
14	2.40	2.39	2.37	2.35	2.33	2.32	2.31	2.28	2.27	2.25	2.24	2.22	2.20	2.19	2.16	2.14	2.13
15	2.34	2.33	2.31	2.29	2.27	2.26	2.25	2.22	2.20	2.19	2.18	2.16	2.14	2.12	2.10	2.08	2.07
16	2.29	2.28	2.25	2.24	2.22	2.21	2.19	2.17	2.15	2.14	2.12	2.11	2.08	2.07	2.04	2.02	2.01
17	2.24	2.23	2.21	2.19	2.17	2.16	2.15	2.12	2.10	2.09	2.08	2.06	2.03	2.02	1.99	1.97	1.96
18	2.20	2.19	2.17	2.15	2.13	2.12	2.11	2.08	2.06	2.05	2.04	2.02	1.99	1.98	1.95	1.93	1.92
19	2.17	2.16	2.13	2.11	2.10	2.08	2.07	2.05	2.03	2.01	2.00	1.98	1.96	1.94	1.91	1.89	1.88
20	2.14	2.12	2.10	2.08	2.07	2.05	2.04	2.01	1.99	1.98	1.97	1.95	1.92	1.91	1.88	1.86	1.84
21	2.11	2.10	2.07	2.05	2.04	2.02	2.01	1.98	1.96	1.95	1.94	1.92	1.89	1.88	1.84	1.82	1.81
22	2.08	2.07	2.05	2.03	2.01	2.00	1.98	1.96	1.94	1.92	1.91	1.89	1.86	1.85	1.82	1.80	1.78
23	2.06	2.05	2.02	2.00	1.99	1.97	1.96	1.93	1.91	1.90	1.88	1.86	1.84	1.82	1.79	1.77	1.76
24	2.04	2.03	2.00	1.98	1.97	1.95	1.94	1.91	1.89	1.88	1.86	1.84	1.82	1.80	1.77	1.75	1.73
25	2.02	2.01	1.98	1.96	1.95	1.93	1.92	1.89	1.87	1.85	1.84	1.82	1.80	1.78	1.75	1.73	1.71
26	2.00	1.99	1.97	1.95	1.93	1.91	1.90	1.87	1.85	1.84	1.82	1.80	1.78	1.76	1.73	1.71	1.69
27	1.99	1.97	1.95	1.93	1.91	1.90	1.88	1.86	1.84	1.82	1.81	1.79	1.77	1.75	1.72	1.70	1.67
28	1.97	1.96	1.93	1.91	1.90	1.88	1.87	1.84	1.82	1.80	1.79	1.77	1.75	1.73	1.70	1.67	1.65
29	1.96	1.94	1.92	1.90	1.88	1.87	1.85	1.83	1.81	1.79	1.77	1.75	1.73	1.71	1.68	1.64	1.62
30	1.95	1.93	1.91	1.89	1.87	1.85	1.84	1.81	1.79	1.77	1.76	1.74	1.72	1.70	1.67	1.64	1.62
32	1.92	1.91	1.88	1.86	1.85	1.83	1.82	1.79	1.77	1.75	1.74	1.71	1.69	1.67	1.63	1.61	1.59
34	1.90	1.89	1.86	1.84	1.82	1.80	1.80	1.77	1.75	1.73	1.71	1.69	1.66	1.65	1.61	1.59	1.57
36	1.88	1.87	1.85	1.82	1.81	1.79	1.78	1.75	1.73	1.71	1.69	1.67	1.64	1.62	1.59	1.55	1.53
38	1.87	1.85	1.83	1.81	1.79	1.77	1.76	1.73	1.71	1.69	1.67	1.65	1.62	1.61	1.57	1.54	1.53
40	1.85	1.84	1.81	1.79	1.77	1.76	1.74	1.72	1.69	1.67	1.66	1.64	1.61	1.59	1.55	1.53	1.51
42	1.84	1.83	1.80	1.78	1.76	1.74	1.73	1.70	1.68	1.66	1.65	1.62	1.59	1.57	1.53	1.51	1.49
44	1.83	1.81	1.79	1.77	1.75	1.73	1.72	1.69	1.67	1.65	1.63	1.61	1.57	1.55	1.51	1.48	1.46
46	1.82	1.80	1.78	1.76	1.74	1.72	1.71	1.68	1.65	1.64	1.62	1.60	1.56	1.54	1.49	1.47	1.45
48	1.81	1.79	1.77	1.75	1.73	1.71	1.70	1.67	1.64	1.62	1.61	1.59	1.54	1.52	1.48	1.45	1.43
50	1.80	1.78	1.76	1.74	1.72	1.70	1.69	1.66	1.63	1.61	1.60	1.58	1.54	1.52	1.48	1.45	1.43
55	1.78	1.76	1.74	1.72	1.70	1.68	1.67	1.64	1.61	1.59	1.58	1.55	1.52	1.50	1.46	1.43	1.41
60	1.76	1.75	1.72	1.70	1.68	1.66	1.65	1.62	1.59	1.57	1.56	1.53	1.50	1.48	1.44	1.41	1.39
65	1.75	1.73	1.71	1.69	1.67	1.65	1.63	1.60	1.58	1.56	1.54	1.52	1.49	1.46	1.42	1.39	1.37
70	1.74	1.72	1.70	1.67	1.65	1.64	1.62	1.59	1.57	1.55	1.53	1.50	1.47	1.45	1.40	1.37	1.35
80	1.72	1.70	1.68	1.65	1.63	1.62	1.60	1.57	1.54	1.52	1.51	1.48	1.45	1.43	1.38	1.35	1.32
90	1.70	1.69	1.66	1.64	1.62	1.60	1.59	1.55	1.53	1.51	1.49	1.46	1.43	1.41	1.36	1.34	1.30
100	1.69	1.68	1.65	1.63	1.61	1.59	1.57	1.54	1.52	1.49	1.48	1.45	1.42	1.39	1.34	1.31	1.28
125	1.67	1.65	1.63	1.60	1.58	1.57	1.55	1.52	1.49	1.47	1.45	1.42	1.39	1.36	1.31	1.27	1.25
150	1.66	1.64	1.61	1.59	1.57	1.55	1.53	1.50	1.48	1.45	1.44	1.41	1.37	1.34	1.29	1.25	1.22
200	1.64	1.62	1.60	1.57	1.55	1.53	1.52	1.48	1.46	1.43	1.41	1.39	1.35	1.32	1.26	1.22	1.19
300	1.62	1.61	1.58	1.55	1.53	1.51	1.50	1.46	1.43	1.41	1.39	1.36	1.32	1.29	1.23	1.19	1.15
500	1.61	1.59	1.56	1.54	1.52	1.50	1.48	1.44	1.42	1.40	1.38	1.34	1.30	1.27	1.21	1.16	1.11
1000	1.60	1.58	1.55	1.53	1.51	1.49	1.47	1.43	1.41	1.38	1.36	1.33	1.29	1.26	1.19	1.13	1.08
$\infty$	1.59	1.57	1.54	1.52	1.50	1.48	1.46	1.42	1.39	1.37	1.35	1.32	1.27	1.24	1.17	1.11	1.00

## ANNEXE III

TABLE DE DISTRIBUTION DE  $T$  (LOI DE STUDENT)  
Valeurs de  $T$  ayant la probabilité  $P$  d'être dépassées en valeur absolue



$\nu$	$P$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,686	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598	
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,929	
4	0,134	0,271	0,414	0,568	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221	
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140	
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015	
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965	
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850	
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,516	2,831	3,819	
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767	
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725	
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690	
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659	
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646	
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551	
80	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460	
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373	
$\infty$	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,035	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291	

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## REFERENCES

---

### BIBLIOGRAPHIQUES

- [1].ABBOH. P. F : « Guidelines on the quality control of surface climatological data »  
W M O, 1986.
- [2].AÎVAZIAN. S, ENOKOV. I, MECHALKINE. L : « Elements de modélisation et  
traitement primaire des données », Edition Mir; Moscou, 1986.
- [3].ARLERY. R, GRISOLLET. H et GUILMET. B : « Climatologie méthodes et  
pratiques », 2ème Edition; GHAUTIER - Villards, Paris, 1973.
- [4].BENHADJ. Med O, BOUCHELIKIA. H : « Contribution à la modélisation  
statistique du transport solide en suspension », Rapport de PFE; ENP, Alger  
1994.
- [5].BEROUA. B, MERABET. N : « Elaboration d'un logiciel pour l'étude des pluies  
de courtes durées », Rapport de PFE; ENP, Alger, 1995.
- [6].BOURRIER. R : « Les réseaux d'assainissement, calculs, applications, et  
prespectives », 3ème Edition; Revue et augmentée, LAVOISIER TEC & doc  
Paris, 1991.
- [7].DEBORDES. M, RAOUS. P : « Un exemple de l'intérête des études de sensibilité  
des modèles hydrologiques », La houille blanche, N° 1, 1976, P. 37 - 43, Paris.
- [8].DRAPER. N, HARRY. S : « Applied regression analysis », U. S. library of  
congress catalog card, USA, 1976.
- [9].GROGONO. P : « La programmation en Pascal », InterEditions; Paris, 1992.
- [10].KAHLAL. N : « Optimisation d'un réseau de mesures pluviométriques », Rapport  
de PFE; ENP, Alger, 1992.
- [11].KERGALL. Y : «Méthodes de programmation en Pascal », Editions Eyrolles  
Paris, 1990.
- [12].LAHAYE. J-P, MAURICE. M et RAMOND. T : « Méthodes d'étude des pluies  
de courte durée », La houille blanche, N° 4 / 5, 1979, P237 - 250, Paris.
- [13].LIAMAS. J : « Hydrologie générale principes et applications », Gaïtan marin  
Editeur, Qubec, CANADA, 1985.
- [14].MAILLE. D : « Guide du Pascal », Berti Editions; Alger, 1991.
- [15].MORLEGHEM. J : « Aide mémoire de turbo pascal », Edition Marabout  
Belgique, 1987.
- [16].REMENIERAS. G : « L'hdrologie de l'ingénieur », 2ème Edition; Revue et  
augmentée, Edition Eyrolles, Paris, 1980.
- [17].Revue de statistique appliquée, aide mémoire, « La régression, La corrélation »  
P. 187 - 230, 1986.



- [18].SAPORTA. G : « Probabilités analyse des données et statistiques », Edition Technip, Paris, 1990.
- [19].WARD. R. C : « Principles of hydrology ». Second edition, Mc Graw Hill book company (U.K) Limited, England, 1975.