

**laboratoire**  
177 **ETHODES**

**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPT. GENIE CIVIL ET URBANISME**

**20 Av. Albert Einstein  
69621 Villeurbanne Cédex**

Tél. (7) 894 81 80  
(7) 894 82 09  
(7) 894 81 89

T H E S E

présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

pour obtenir

LE DIPLOME DE DOCTEUR-INGENIEUR

par

AMAR KHELIL

Ingénieur INSA

"ÉLABORATION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE ET  
EXPLOITATION DE DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES  
CONTRIBUTION À L'ANALYSE ET À LA MODÉLISATION  
SPATIO-TEMPORELLE DU PHÉNOMÈNE PLUVIEUX"

Soutenue le 18 novembre 1985 devant la Commission d'Examen

JURY : MM.

J.C. CUBAUD

Président

J.C. DEUTSCH

Ch. OBLED

H. BOTTA

D. HODEAU

B. CHOCAT

} Examineurs

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Directeur : R.HAMELIN

Chef de Départements :

C.GUILLAUD Professeur	1er Cycle
L.CRONENBERGER Professeur	Biochimie
N.MONGEREAU Professeur	Génie Civil et Urbanisme
H.KLEIMANN Professeur	Génie Electrique
A.LALLEMAND Professeur	Génie Energétique
M.THEOLIER Professeur	Génie Mécanique Construction
D.BERTHE Professeur	Génie Mécanique Développement
J.ROBIN Professeur	Génie Physique Matériaux
R.ARNAL Professeur	Informatique

Professeurs :

R.ARNAL	Informatique Appliquée
J.BAHUAUD	Mécanique des Solides
B.BALLAND	Physique de la Matière
D.BERTHE	Mécanique des Contacts
M.BOIVIN	Mécanique des Solides
H.BOTTA	Génie Civil et Urbanisme
G.BOULAYE	Informatique Appliquée
J. BOUSQUET	Thermo-Chimie Minérale
M.CHEVRETON	Etude des Matériaux
B.CLAUDEL	Cinétique et Génie Chimiques
L.CRONENBERGER	Chimie Biologique
J.C.CUBAUD	Génie Civil et Urbanisme (Bétons et Structures)
L.EYRAUD	Génie Electrique et Ferroélectricité
G.FANTOZZI	Gr. Etude Metall. Phys. et Phys. des Matériaux (GEMPPM)
J.FAVREL	Informatique Appliquée
Y.FETIVEAU	Génie Electrique et Ferroélectricité
P.FLEISCHMANN	GEMPPM
L.FRECON	Informatique Appliquée
M.GERY	Génie Civil et Urbanisme (Equipement de l'Habitat)
P.GOBIN	GEMPPM
M.GODET	Mécanique des Contacts
R.GOUTTE	Traitement du Signal et Ultrasons

C. GUILLAUD	Traitement du Signal et Ultrasons
C. GUITTARD	Electronique Appliquée
J. JOUBERT	Génie Mécanique
A. JUTARD	Automatique Industrielle
H. KLEIMANN	Génie Electrique et Ferroélectricité
M. LALANNE	Mécanique des Structures
A. LALLEMAND	Energétique et Automatique
P. LAREAL	Génie Civil et Urbanisme (Géotechnique)
A. LAUGIER	Physique de la Matière
Ch. LAUGIER	Physiologie et Pharmacodynamie
P. LAVIÔLETTE	Biologie
C. LESUEUR	Vibrations Acoustiques
Y. MARTINEZ	Informatique Appliquée
C. MARTY	Etude des Procédés de Fabrication
J. MAZILLE	Physico-chimie Industrielle
N. MONGÉREAU	Géotechnique
J. P. PASCAULT	Matériaux Macromoléculaires
G. MONNIER	Physicochimie Industrielle
P. NARDON	Biologie
A. NAVARRO	Chimie Physique appliquée Environnement
H. PACHECO	Chimie Biologique
J. PERA	Solides et Mat. Minéraux
G. PERACHON	Thermochimie Minérale
M. PERDRIX	Traitement du Signal et Ultrasons
J. PEREZ	GEMPPM
E. PERNOUX	GEMPPM
J. PINARD	Physique de la Matière et Physique Industrielle
D. PLAY	Mécanique des Contacts
P. PREVOT	Informatique Appliquée
R. REYNAUD	Energétique et Automatique
M. RICHARD	Energétique et Automatique
E. RIEUTORD	Méc. des Fluides et Therm.
R. RIVIERE	Trait. du Signal Ult.
J. ROBIN	Physicochimie Industrielle
M. ROLIN	Physicochimie Industrielle
J. F. SACADURA	Mécanique des Fluides et Thermiques
L. SICARD	Mécanique
F. STOEBER	Microbiologie
M. THEOLIER	Métallurgie et Traitements Thermiques

suite Professeurs :

---

-3-

J.TUSET

Solides et Mat.Minéraux

R.UNTERREINER

Traitements du Signal et Ultrasons

J.VERON

Chimie Physique Appliquée et Environnement

Maîtres de Recherche C.N.R.S :

---

P.CLAUDY

Thermochimie Minérale

A.GROUILLER

Chimie Biologique

M.MURAT

Chimie Physique Appliquée et Environnement

A.NOUAILHAT

Physique de la Matière

*A ma mère, à mon père.*

AVANT-PROPOS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à cette étude notamment les chercheurs et techniciens du Laboratoire Méthodes et du Service Assainissement de la CO.UR.LY..

Plus particulièrement, mes remerciements s'adressent à Monsieur CHOCAT, chercheur au Laboratoire Méthodes, qui est à l'origine de cette étude et avec lequel j'ai travaillé. Je n'oublie pas Monsieur CARRAZ, responsable de la pluviométrie à la CO.UR.LY., qui s'est montré toujours très coopératif et intéressé aux résultats de l'étude.

Je remercie enfin, les secrétaires Mlles RAFINESQUE, LAIB, qui ont apporté tout leur soin à la frappe du document définitif.

RESUME

Du point de vue hydrologique, l'agglomération lyonnaise peut être caractérisée comme un bassin versant d'une surface de 600 km<sup>2</sup> drainé par quelque deux mille kilomètres de canalisations.

Pour assurer la gestion et l'extension d'un tel réseau, des outils informatiques ont été conçus au Laboratoire Méthodes de l'I.N.S.A. de Lyon en collaboration avec le Service Assainissement de la CO.UR.LY. et la société d'informatique communale I.C.A.R.E., notamment le logiciel SERAIL, qui permet une simulation généralisée du fonctionnement du réseau lyonnais.

Or, un des points faibles du système consiste en une connaissance insuffisamment précise des phénomènes pluvieux d'origine convective lesquels sont le plus susceptibles de provoquer des dysfonctionnements du réseau. Il a ainsi été décidé d'implanter, dès 1983, un réseau de 30 pluviomètres enregistreurs sur le territoire communautaire, avec l'appui financier du Plan Urbain et de l'Agence Financière de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Le mémoire présente le travail effectué sur cette expérimentation suivant trois étapes principales :

- implantation du réseau et ses caractéristiques
- élaboration d'un système de dépouillement et d'archivage des données
- élaboration d'un système de traitement des données.

L'aspect le plus original du travail concerne le traitement des données. Un ensemble de logiciels permet d'exhiber et d'étudier toute séquence pluvieuse reconnue intéressante par l'hydrologue urbain. Deux objectifs ont été poursuivis :

- obtenir une meilleure perception (intuition) des phénomènes considérés (aspect représentation brute des mesures)
- construire des outils de modélisation des phénomènes.

Ce deuxième objectif a nécessité une réflexion pour déterminer notamment la pertinence des modèles proposés ou leur limite de validité, réflexion qui a débouché sur l'élaboration de logiciels supplémentaires de vérifications et comparaisons des modèles utilisés (numériques ou graphiques).

Un exemple complet des traitements, pour une pluie choisie, est donné, ainsi que le type de conclusions auxquelles ils permettent de parvenir.

The Lyon District Urban Area (CO.UR.LY.) may be explained from an hydrological point of view as a 600 km<sup>2</sup> area equipped with a sewerage system estimated by 2 000 km of pipes.

Due to the complexity of the sewerage network of the area, it must therefore be controlled by an accurate and reliable system of calculation to avoid any negative consequences of its function. The capacity of the present computerising system SERAIL, allows an overall simulation of the functioning of drainage / sewerage system.

This model requires an accurate information of the rainfall rate which was not previously available. Therefore a 30 raingages network (with cassette in situ recording) was set up within the Urban District Area in 1983.

This research however introduces the experiment of three steps :

- 1) to install the network
- 2) to build up a data checking and storage system
- 3) to analyse the data.

The characteristic nature of this work deals with the data analysis system. It allows to extract easily and analyse any rainfall event important to the hydrologist. Two aims were defined :

- 1) to get a better understanding of the phenomena (punctual representations)
- 2) to build up models.

In order to achieve the second aim, it was necessary to think about the fitting of the propounded models and their limits which led to the setting up of several other programmes for checking and comparison.

For example a complete analysis of a rainfall event is given with comments and conclusion.

SOMMAIRE

I <u>PROBLEMATIQUE</u>	p.	1
1. Position du problème	p.	5
2. Le phénomène pluie (mécanisme)	p.	8
3. La mesure pluviométrique	p.	11
4. Traitement de la mesure	p.	20
4.1. Introduction	p.	20
4.2. La pluie synthétique	p.	23
4.2.1. Courbes IDF	p.	23
4.2.2. Pluies de projet ponctuelles	p.	25
4.2.3. Passage du ponctuel au surfacique stationnaire	p.	38
4.2.4. Le déplacement de la pluie	p.	54
4.2.5. Conclusions sur la pluie synthétique	p.	62
4.3. La simulation d'une série d'événements	p.	63
4.3.1. Simulation d'une série historique de pluies	p.	63
4.3.2. Simulation de pluies générées statistiquement	p.	66
4.4. L'approche historique singulière	p.	67
5. Genèse de l'expérimentation COURLY	p.	68
II <u>L'EXPERIMENTATION</u>	p.	73
1. Description du réseau	p.	77
1.1. Caractéristiques sommaires et comparaisons	p.	77
1.2. Choix de la densité du réseau et du pas de temps	p.	78
1.3. Choix des sites	p.	85
2. Le matériel	p.	87
2.1. Le pluviomètre	p.	92
2.2. Enregistrement in situ ou télémetrie	p.	95
2.3. L'unité d'acquisition de mesure	p.	99
2.4. Précision de la mesure	p.	105
3. Conclusion	p.	111

III	<u>LE SYSTEME INFORMATIQUE DE STOCKAGE</u>	p. 113
1.	Introduction	p. 115
2.	Le stockage	p. 116
2.1.	Choix du support	p. 116
2.2.	Les étapes du transfert	p. 116
2.3.	Problèmes rencontrés au transfert	p. 119
2.4.	Le logiciel	p. 122
2.5.	Principes de l'organisation du stockage sur disque	p. 127
3.	Conclusion	p. 128
IV	<u>EXPLOITATION DES DONNEES : LES METHODES ET LES MODELES</u>	p. 131
1.	Introduction	p. 135
2.	Calcul de la lame d'eau	p. 137
2.1.	Introduction	p. 137
2.2.	Méthode apparentée à la méthode de Thiessen	p. 139
2.3.	Interpolation linéaire multiple	p. 142
2.3.1.	Pondération simple par les distances	p. 142
2.3.2.	Pondération croisée par les distances	p. 144
2.3.3.	Mise en oeuvre de l'interpolation multiple	p. 146
2.4.	Recherche d'une équation de lame d'eau	p. 148
2.4.1.	Principe	p. 148
2.4.2.	Difficultés théoriques	p. 150
3.	Calcul de la trajectoire	p. 153
3.1.	Quelques méthodes employées par les météorologistes	p. 153
3.1.1.	Perspective des météorologistes	p. 153
3.1.2.	Le suivi d'échos	p. 153
3.1.3.	Les méthodes globales	p. 155
3.2.	Exposé de la méthode retenue	p. 158
4.	Validation des modèles (méthodes générales)	p. 160
4.1.	Validation graphique	p. 160
4.2.	Validation numérique	p. 161

V	<u>LE SYSTEME INFORMATIQUE : UN EXEMPLE DE TRAITEMENT</u>	p. 165
1.	Introduction	p. 167
2.	Traitement niveau 1 : Recherche de l'évènement interessant	p. 181
2.1.	Problèmes posés	p. 181
2.2.	Traitement et commentaires	p. 183
2.2.1.	Choix du jour	p. 183
2.2.2.	Détermination de la séquence	p. 190
3.	Traitement niveau 2	p. 193
3.1.	Construction de hyétogrammes ponctuels	p. 193
3.2.	Représentations spatiales (ponctuelles)	p. 196
3.3.	Modélisation et stockage	p. 201
4.	Traitement niveau 3 : 1ere partie	p. 203
	(Exploitation de la disquette "information ponctuelle")	
4.1.	Construction de hyétogrammes ponctuels	p. 203
4.2.	Construction de hyétogrammes moyens	p. 206
4.3.	Etude de la sensibilité des paramètres $D_i$ (distance d'influence) et $\alpha$ (exposant) dans le modèle de pondération simple par les distances	p. 212
5.	Traitement niveau 3 : 2ieme partie	
	(Exploitation de la disquette "modélisation")	p. 223
5.1.	Construction du hyétogramme moyen	p. 223
5.2.	Représentation graphique de la lame d'eau	p. 230
5.2.1.	Représentation plane	p. 230
5.2.2.	Représentation en perspective	p. 234
5.3.	Etude des écarts approximation/mesure pour le modèle $H = H(X,Y)$ (Recherche d'une équation de lame d'eau	p. 241
5.4.	Etude de la variation des coefficients $\alpha_i$ en fonction du pas de temps pour le modèle $H = H(X,Y)$	p. 248
5.5.	Calcul de trajectoire	p. 256
	<u>CONCLUSION</u>	p. 265

<u>ANNEXE 1</u> : Coefficients relatifs à la formule de Montana pour les 3 zones géographiques qui découpent la France aux $\neq$ périodes de retour.	p. 273
<u>ANNEXE 2</u> : Comparaison des hyétogrammes obtenus Normand/Keiffer.	p. 275
<u>ANNEXE 3</u> : Liste de programmes.	p. 277
<u>ANNEXE 4</u> : Organisation des fichiers sur les disques-mois (sur lesquels sont transférées les données recueillies in situ).	p. 279
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	p. 283

*"On ne fait pas dire tout ce qu'on veut à la Nature et c'est parce que la science n'est pas un monologue, parce que l'objet interrogé ne manque pas de moyens pour démentir l'hypothèse la plus plausible, la plus séduisante bref parce que le jeu est risqué, qu'il est source d'émotions rares et intenses"*

*PRIGOGINE "La nouvelle alliance"*

CHAPITRE 1  
PROBLEMATIQUE

*"La science devient recherche par le projet qui s'assure lui-même dans la rigueur de l'investigation. Cependant projet et rigueur ne se déploient vers ce qu'ils sont que par la méthode. Celle-ci constitue le second caractère essentiel de la recherche pour qu'il accède à une objectivité, le secteur projeté doit être amené à faire face dans toute la multiplicité de ses niveaux et entrelacements"*

*HEIDEGGER "Holzwege" - "L'époque des conceptions du monde (Weltbild)"*

## 1. POSITION DU PROBLEME

C'est vers la fin du XIXème siècle que l'hydrologie moderne se constitua en champ épistémologique différencié lorsque des contraintes d'ordre économique, social, culturel nécessitèrent la connaissance "objective" ou "scientifique" du cycle des eaux [1], [2].

Les problèmes posés à l'époque étaient en particulier celui de la prévision des crues des cours d'eau et plus tard celui de l'évacuation des effluents urbains lorsque sous l'influence du courant hygiéniste le principe du tout-à-l'égoût fut retenu. Pour mémoire, on peut citer la date du 9 décembre 1845, date à laquelle la première prévision de crue, sur le bassin de la Saône, fut réalisée avec succès, quatre jours à l'avance [3].

En ce qui concerne l'hydrologie urbaine, ce n'est que vers le milieu du XXème siècle que l'effort de scientification se concrétisa lors de la publication de la circulaire Caquot (1949), relative aux calculs des réseaux d'assainissement.

Depuis leur naissance, tant en hydrologie générale qu'en hydrologie urbaine, des transformations ont eu lieu, notamment certains problèmes ont vu leur importance s'accroître (calcul de la pollution ...). D'autre part, avec l'acquisition de nouveaux outils de calcul (ordinateurs, théories mathématiques)

et la nécessité de cerner au mieux les phénomènes exhibés (contraintes économiques), la formulation des problèmes et des réponses s'est modifiée.

Pourtant, certaines caractéristiques essentielles persistent, notamment ce qu'on pourrait nommer le caractère techniciste de l'hydrologie en opposition au contenu purement gnoséologique qui constitue apparemment l'idéal de la science classique notamment la physique. Nous signalons par là que la finalité première de l'hydrologie n'est pas tant de serrer au plus près "la réalité des phénomènes considérés en tant que processus, mais de reconstituer un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques" posés à la collectivité par le transport des eaux (tant usées que pluviales, tant atmosphériques que souterraines ...) [4].

Dès le début (et même si la terminologie utilisée a pu varier au cours du temps), pluie - bassin versant - débit constitue le triptyque fondamental, lequel définit un système, ie. "un groupement d'objets liés par une certaine forme d'interaction régulière" que le modèle est chargé d'élucider.

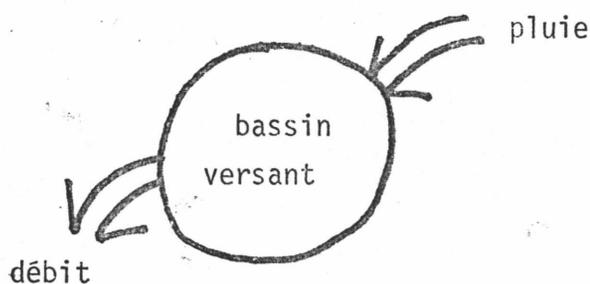


figure 1

pluie : variable entrée du modèle  
 bassin versant : transformateur  
 débit : variable sortie du modèle

Elucider signifie ici résoudre en écriture mathématique (équation) à savoir celle qui permet de surprendre le phénomène en son devenir, de le pré-savoir (selon le propre sens étymologique du mot mathématique).

La validité d'un modèle (ou sa véracité) dépend uniquement de cette capacité de prédiction qu'il autorise et ceci est d'autant plus évident en hydrologie,

que les questions s'y formulent explicitement, en terme de probabilité de non dépassement de la capacité du réseau (hydrographique ou d'assainissement) sur une période donnée - formulation dont nous verrons par la suite qu'elle n'est pas forcément la plus pertinente mais dont une longue habitude et le support des textes législatifs rendent difficile la remise en cause.

Plus précisément, en hydrologie urbaine, et pour ce qui concerne l'évacuation des débits d'eau pluviale, il faut que les canalisations du réseau primaire évacuent sans débordement un débit de période de retour prédéterminée (10 ans, 20 ans, 50 ans ... suivant les cas de figure).

Depuis le modèle de Caquot jusqu'aux modèles les plus sophistiqués nécessitant l'emploi de gros ordinateurs, tous les modèles en hydrologie (urbaine) s'articulent autour du bipôle phénomène - structure. L'aspect phénoménal correspondant au flux aqueux exhibé sous forme météorique, ruisselante, écou-lante. L'aspect structural correspondant à l'ensemble de ce qui permet de caractériser la transformation du flux. Bien entendu, nous nous plaçons ici du point de vue de la genèse des modèles, car dans leur écriture, cette différence s'estompe du fait de la pseudo-linéarité de la plupart des modèles lorsqu'il s'agit de les calibrer.

En tant que constituant, la variable d'entrée, la connaissance de la pluie et le traitement de l'information pluviométrique en correspondance la plus appropriée avec le ou les modèles de transformation, sont une des préoccupations majeures des hydrologues. Il est important de souligner ici la nécessaire homogénéité qu'il faut respecter entre la précision des mesures pluviométriques effectuées, la modélisation de la pluie qui s'ensuit et les modélisations des phénomènes en aval, si l'on veut optimiser les performances du modèle proposé.

A quoi sert de connaître parfaitement la pluie, si les modélisations en aval ne représentent que très imparfaitement les transformations, et inversement ?

## 2. LE PHENOMENE PLUIE [2] [5] [6]

La pluie est une "précipitation" sous forme liquide des eaux météoriques. Les mécanismes physiques qui concourent à sa formation sont extrêmement complexes et se traduisent par le grossissement des gouttelettes d'eau dont est formé un nuage.

Lorsqu'un nuage est stable, ces gouttelettes mesurent de 10 à 30  $\mu$  et sont espacées de 1 mm environ (0,5 à 1 gramme d'eau par  $m^3$ ). Ce sont des gouttelettes de condensation.

Sous certaines conditions (dépend de l'intensité de la condensation, de l'ascendance, etc ...), et suivant un processus décrit par la théorie de TOR - BERGERON - FINDENSEN le diamètre des gouttelettes s'accroît, processus accéléré à partir d'un certain seuil par le phénomène dit de coalescence (réunion de plusieurs gouttelettes en une seule) on obtient alors des gouttes d'eau mesurant 0,5 à 2 mm (une goutte par  $dm^3$ ). Le composé ainsi formé est instable dans l'atmosphère et précipite.

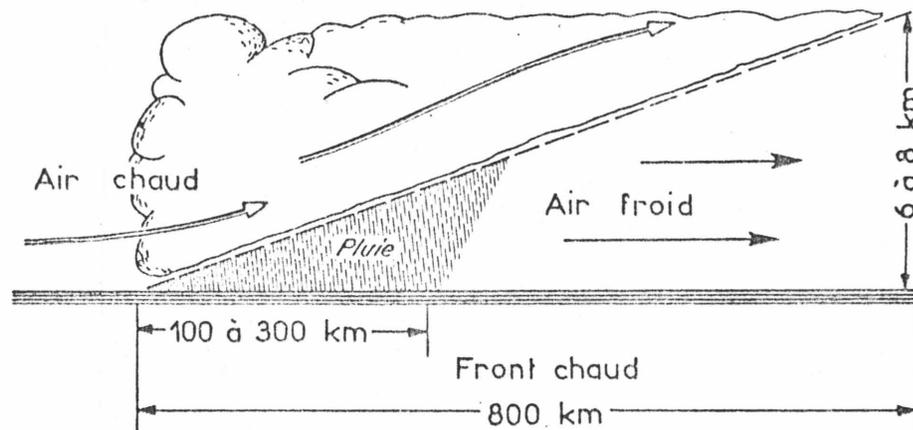
Les processus décrits se produisent lors de l'élévation d'une masse et de la détente. Sous nos latitudes, on distingue deux catégories de mouvements ascendants :

- la frontogénèse qui résulte de la rencontre de deux masses d'air de caractéristiques (humidité, pression, température) différentes. La masse d'air la moins dense passe alors au dessus de la masse la plus dense. Deux types de front sont observés (voir schéma) :
  - le front froid
  - le front chaud

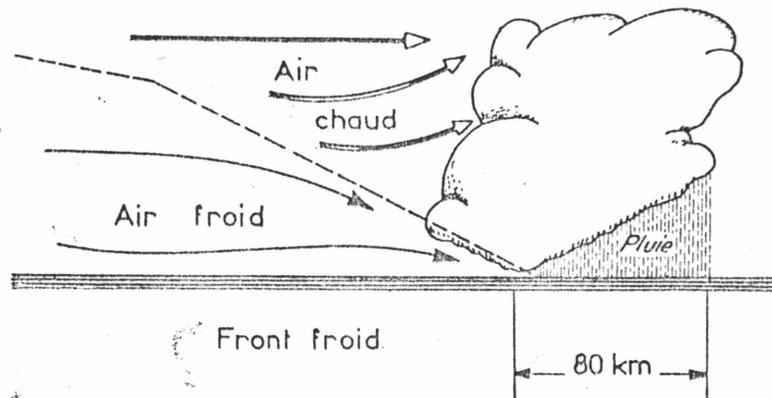
Le front chaud couvre une bande pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres de largeur et les pluies, bien que généralement longues, ne sont pas critiques en hydrologie urbaine, dû aux faibles intensités pluviométriques observées.

Le front froid, plus étroit (moins d'une centaine de kilomètres de largeur) possède les mêmes caractéristiques. Dans certains cas pourtant, les événements

de front froid peuvent entraîner des dysfonctionnements du réseau s'ils cumulent un caractère convectif.



coupe verticale d'un front "chaud"



coupe verticale d'un front "froid"

figure 2 (d'après REMENIERAS)

- la convection : Par temps ensoleillé, le comportement différent des sols à l'irradiation solaire (nature des sols, orientation ...) peut entraîner un gradient thermique très important dans la couche inférieure de l'atmosphère. On observe alors des tourbillons thermiques ascendants dont la vitesse d'élévation peut être très grande et qui président à la naissance de

ce que l'on nomme des cellules convectives.

Les précipitations résultantes sont en général brèves, localisées, et leur intensité atteint les valeurs les plus importantes. Pour ce qui concerne le dimensionnement des réseaux d'assainissement, elles constituent les événements critiques susceptibles de créer les dysfonctionnements

Or, malheureusement, la description de ce type de phénomènes à l'aide, notamment, des schémas relevant de la physique théorique (mécanique des fluides, transfert de chaleur ...) s'avère impossible, car, quand bien même sa description en termes d'équations pourrait s'envisager (à quel prix ?), la résolution du problème nécessiterait la connaissance très détaillée des conditions aux limites (caractéristiques topographiques, températures, pressions, humidités en tous points ...) impossibles à définir et un outil de calcul d'une puissance incomparablement plus grande que ce qu'aucun ordinateur actuel peut fournir pour obtenir la solution dans un délai raisonnable.

Les hydrologues doivent donc se résoudre à laisser dans l'ombre toute cette complexité et considérer uniquement un résultat, à savoir une certaine quantité d'eau tombée, dont l'évolution spatio-temporelle est décrite à l'aide d'un réseau d'appareils récepteurs.

Mais ceci, bien entendu, n'est pas sans conséquences et explique en grande partie les difficultés et les limites auxquelles se heurte la description de la pluie en hydrologie.

### 3. LA MESURE PLUVIOMETRIQUE [2] [7] [8] [9] [10] [11]

*"Ainsi, la rigueur des sciences mathématiques de la nature est l'exactitude. Tous les phénomènes doivent être déterminés d'avance comme grandeurs spatio-temporelles de mouvement, pour seulement pouvoir arriver à être représentés comme phénomènes naturels. Pareille détermination s'accomplit avec la mesure effectuée à l'aide du nombre et du calcul."*

*HEIDEGGER "Holzwege - L'époque des conceptions du monde"*

Divers appareils sont actuellement utilisés pour la mesure pluviométrique dont le degré de précision et de sophistication est variable. Nous décrivons ci-dessous quelques uns des appareils classiquement utilisés et leur principe de fonctionnement.

- L'appareil le plus simple est le pluviomètre (non enregistreur). C'est un simple récipient qui recueille l'eau précipitée, les relevés s'effectuant toutes les douze heures ou toutes les vingt quatre heures (relevé quotidien). En 1979, la météorologie nationale exploitait, sur le territoire métropolitain, 3 260 appareils donnant une information pluviométrique de ce type, à noter que les premiers appareils de ce type ont été installés en France, dès le XVIIème siècle. En additionnant les appareils exploités sur les autres réseaux, on obtient un total de 5 000 appareils sur le territoire métropolitain, soit environ 1 poste tous les 100 km<sup>2</sup>.

Comme pour les pluviomètres ou pluviographes, plus sophistiqués, la précision de la mesure dépend de deux facteurs principaux. D'une part, la largeur du cône de réception définit le volume d'eau intercepté pour une hauteur précipitée fixée. D'autre part, la hauteur de l'appareil définit une sensibilité différente de l'appareil aux éventuels tourbillons d'air en contact avec le sol qui sont une cause importante des erreurs de mesure.

Demi-coupe dans l'axe

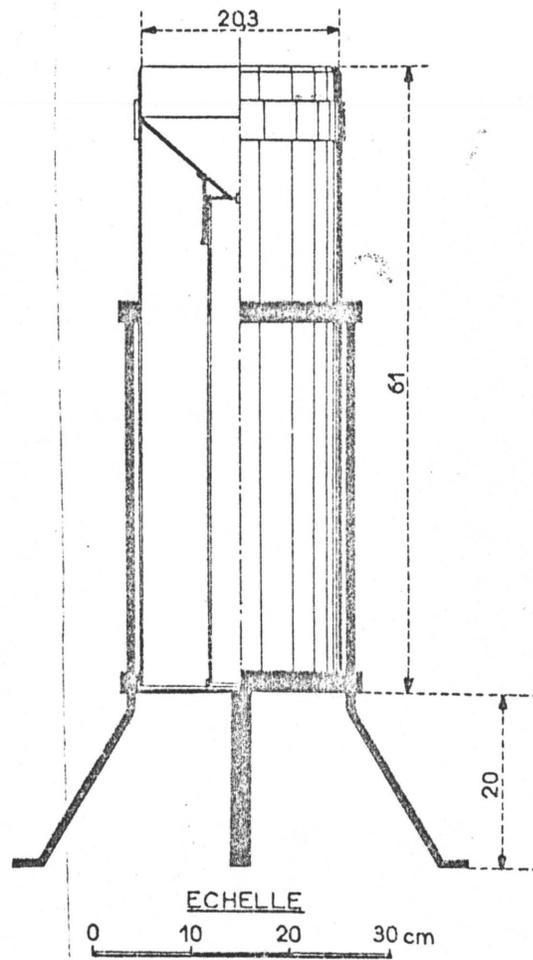


figure 3 : Pluviomètre du "Weather-Bureau"  
(Etats-Unis)

Demi-coupe dans l'axe

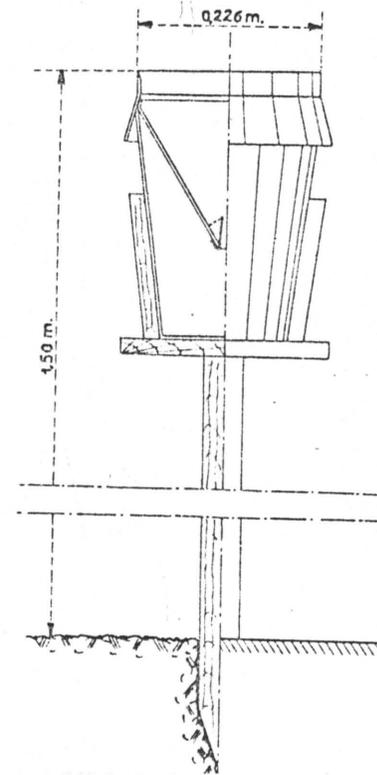


figure 4 : Pluviomètre "Association"

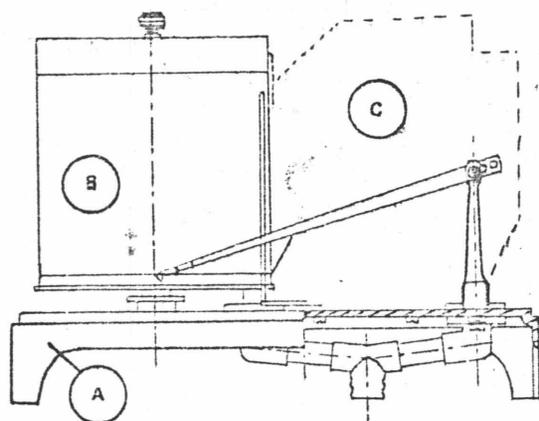
• Les pluviomètres enregistreurs et pluviographes.

Les pluviomètres simples sont notoirement insuffisants pour les besoins en hydrologie urbaine, où la répartition temporelle du phénomène doit être connue avec une précision minimale de l'ordre de la dizaine de minutes, si l'on veut décrire la transformation pluie - débit dans les bassins versants fortement imperméabilisés avec une précision acceptable.

Les pluviographes réalisent des enregistrements en continu. L'eau recueillie actionne suivant divers mécanismes un stylet, lequel trace sur un papier dérouleur le graphe des hauteurs cumulées, appelé pluviogramme. Il existe deux types principaux de pluviographes :

- le pluviographe à augets basculeurs
- le pluviographe à siphon Richard.

Un appareil de ce dernier type est d'ailleurs en service à Montsouris depuis 1927, qui permet de mesurer correctement des valeurs dépassant 200 mm/h sur 6 minutes.



- A : socle
- B : cylindre enregistreur
- C : mécanisme pluviométrique à augets

figure 5 : Pluviographe à augets basculeurs (d'après Remenieras).

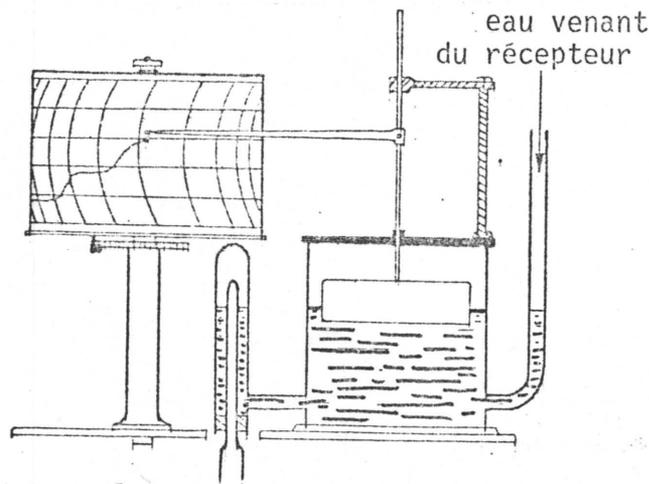


figure 6 : Pluviographe à siphon Richard (d'après Remenieras)

Ces dernières années ont vu surgir de nouveaux types d'appareils enregistreurs fondés sur les développements technologiques récents. Ces appareils relèvent automatiquement la hauteur tombée sur une durée fixée par l'utilisateur avec un recalage très précis suivant l'échelle chronologique. Les horloges à quartz actuelles autorisent une dérive inférieure à deux minutes par mois. Deux différences importantes sont à noter quant à la forme de l'information livrée par ces enregistreurs versus les pluviographes :

- on obtient directement une intensité moyenne de pluie en fonction du temps (hyétogramme) et non plus une courbe de hauteur cumulée.
- on obtient un traitement chronologique de l'événement à pas fixe.

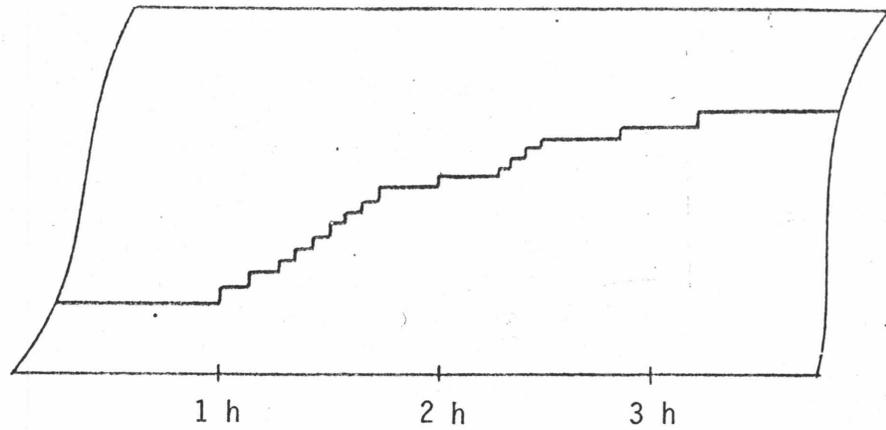


figure 7 : Pluviogramme enregistré par un appareil à augets basculeurs (1 basculement 1 échelon = 0,2 mm de pluie) (d'après Hemain)

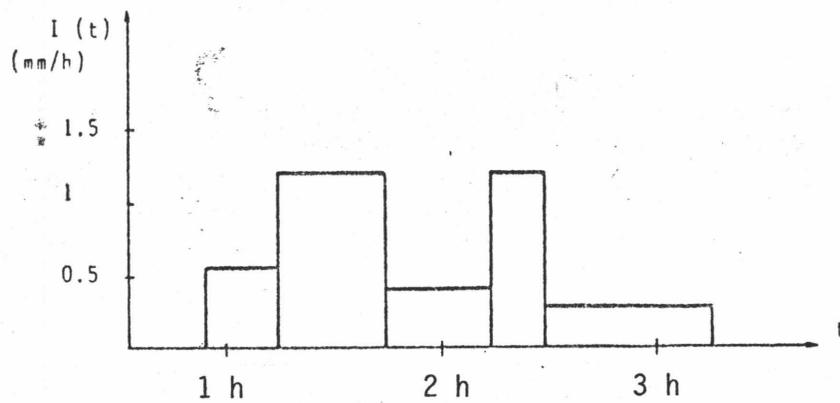


figure 8 : Hyétogramme correspondant après dépouillement à intensité constante (d'après Hemain)

Quant au stockage de l'information, il s'effectue soit in situ (mini-cassette ou sur mémoire statique), soit même dans le cas le plus avantageux, vers une centrale de mesure.

En effet, le stockage in situ présente, par rapport au stockage central, l'inconvénient de retarder le traitement (ramasser les cassettes d'intervalles fixés) et de le démultiplier (passage par divers supports d'information avant le support définitif, même si, dans tous les cas, une visite des appareils est nécessaire à intervalles réguliers pour en vérifier le bon fonctionnement). Nous reviendrons sur ces problèmes plus en détail au chapitre II.1.1., où sera décrit le dispositif expérimental choisi à la Communauté Urbaine de Lyon (CO.UR.LY.).

D'autres types d'appareils sont actuellement mis au point, fondés sur d'autres principes de mesure. On peut citer, en particulier :

- le pluviomètre à capteur de pression
- le pluviomètre à intensité.

- Le pluviomètre à capteur de pression mesure, pour un pas d'intégration fixé, non pas directement un volume d'eau précipitée, mais une différence de pression résultant du volume précipité. Cette différence de pression est convertie, par un processeur, en hauteur d'eau, laquelle est enregistrée sur support magnétique. Un pluviomètre de ce type a été conçu et testé au C.N.E.T. par Azoulay [65] dans les années 1980. Il permet, notamment, d'étudier le phénomène pluvieux, sur des périodes très courtes (de l'ordre de la dizaine de secondes) sans distorsion notable, contrairement aux appareils à augets.

- Le deuxième type d'appareil détermine l'intensité pluviométrique en mesurant les perturbations causées par les gouttelettes d'eau au passage d'une onde électromagnétique (principe du dysdromètre ...). Ce type d'appareil en est encore au stade expérimental.

Remarque :

Dans la suite de cette étude, nous utiliserons le vocable "pluviomètre", pour désigner, génériquement, l'ensemble des appareils fondés sur le principe de mesure d'une hauteur ponctuelle précipitée, sur un pas de temps quelconque à charge de préciser les caractéristiques propres de l'appareil mentionné, s'il y a ambiguïté.

Enfin, depuis quelques années, on tente d'utiliser le radar à des fins hydrologiques.

Le radar de longueur d'onde centimétrique permet d'obtenir "une image" des précipitations dans un rayon de 250 km, par mesure de la puissance de l'onde rétrodiffusée par les gouttelettes dans la direction d'émission. La distance des gouttelettes à l'émetteur est connue grâce à la mesure de la durée séparant l'émission de la réception.

Une étude théorique des processus engagés permet de conclure que la puissance rétrodiffusée  $\bar{P}_r$  est telle que : [10]

$$(1) \quad \bar{P}_r = C \frac{\sum_v D^6}{r^2}$$

C : constante dépendant du radar

r : distance au radar

D : diamètre des gouttes de pluie

Le facteur de réflectivité radar  $Z = \sum_v D_i^6$  ou plus exactement son logarithme, est calculé indirectement par  $\bar{P}_r$  et caractérise les précipitations :

$$(2) \quad Z_{dBz} = 10 (\log Z / \log Z_0)$$

$Z_0$  est la référence et est égal à  $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$

Ce sont les valeurs de réflectivité que nous obtenons sur les images.

La littérature abonde en relations reliant cette réflectivité à l'intensité

de pluie, toutes recalées statistiquement et prises généralement sous la forme :

$$(3) \quad z = aR^b$$

R : intensité pluvieuse

a,b : dépend du type de pluie en particulier

La mesure radar s'opère quasiment ponctuellement dans le temps et intègre dans l'espace des volumes dont les arêtes ont une dimension minimale de l'ordre de la centaine de mètres, selon un principe symétrique de la mesure par pluviomètre (ponctuelle dans l'espace, intégrant des durées).



figure 9 : Une image radar (d'après CICCIONE)

Cette complémentarité des mesures souleva de grands espoirs pour une meilleure perception et quantification du phénomène, notamment la calibration d'un radar par un réseau de pluviomètres permettrait d'obtenir une caractérisation spatiale de l'objet (lame d'eau, trajectoire, vitesse de déplacement ...) bien meilleure que tout ce qui peut être retiré à partir du seul réseau fixe, en utilisant les techniques mathématiques d'approximation et d'interpolation disponibles dont nous allons reparler dans les chapitres suivants (chapitre IV).

Mais les expériences menées jusqu'à présent font apparaître un certain nombre de difficultés, parmi lesquelles :

- manque d'adaptation du matériel aux données de l'hydrologie
- définition des bandes de réflectivité, pour obtenir une bonne image du phénomène
- position des radars relativement défavorable étant donné l'objectif visé, donc apparition de masques et autres phénomènes de propagation anormale
- difficulté de relier correctement la réflectivité radar à l'intensité pluviométrique.

Des recherches actives sont actuellement entreprises pour résoudre ces difficultés et mettre au point des méthodes et une technologie réellement adaptées au besoin de l'hydrologie urbaine.

Malgré ces réserves, le radar demeure un instrument irremplaçable pour comprendre, d'un point de vue qualitatif, l'évolution des processus et orienter éventuellement les hydrologues plus judicieusement dans leur recherche et les méthodes qu'ils utilisent.

#### 4. TRAITEMENT DE LA MESURE

*"Les phénomènes qui sont l'objet d'une discipline scientifique donnée apparaissent comme des accidents de formes définies dans un espace donné, que l'on pourrait appeler l'espace substrat de la morphologie étudiée."*

*"... Dans le cas de n'importe quelle morphologie empirique, la tendance "structurale" a pour but d'en simplifier la description en fournissant un nombre fini de règles combinatoires relatives à certaines morphologies élémentaires et qui permettent de reconstruire la morphologie en question. On peut faire tout cela par pur esprit formaliste, sans justifier ses règles ..."*

THOM "Paraboles et catastrophes"

##### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons essentiellement du traitement de l'information obtenue au moyen de pluviomètres (quels qu'ils soient), conformément à la perspective visée dans le cadre de ce travail.

En hydrologie générale, la mesure a été développée depuis plus d'un siècle et demeure en partie inexploitée, puisque sur 300 000 années - station de relevés pluviométriques effectués par la météorologie nationale, 160 000 ont pu être mises sur support informatique en fichier non critiqué [3] [7].

Paradoxalement, le besoin de mesures pluviométriques adaptées aux conditions de l'hydrologie urbaine (densité de réseaux, pas de temps d'intégration) ne se fit sentir que récemment, lorsqu'il devint évident que la formule de Caquot

verrait son utilisation limitée aux bassins versants homogènes de taille inférieure à 200 hectares.

Pour la simulation du fonctionnement des grands bassins versants, de nouveaux modèles ont été élaborés. Ils nécessitent, pour les mettre en oeuvre, une connaissance plus précise des données entrantes (pluie) et une diversification de la mesure (mesures débitmétriques, mesure de charges polluantes ...) pour les calibrer, déterminer leurs limites d'utilisation et rejeter les moins adaptés (mauvaises adéquations aux phénomènes observés, mauvais rapport temps calcul - précision obtenue ...).

Le modèle de Caquot particulièrement étudié par Desbordes [14],[15] ne nécessite pour sa mise en oeuvre que la connaissance de l'intensité moyenne maximale sur une durée caractéristique (notée  $t_c$ ) du bassin versant, dont on veut dimensionner le collecteur à l'exutoire pour une période de récurrence fixée (en général entre 5 et 20 ans).  $t_c$  (temps caractéristique) est un concept analogue au temps de concentration, concept développé dans la méthode rationnelle en usage aux U.S.A. (1851). Il correspond au temps de parcours de l'eau entre l'exutoire du bassin versant et le point qui en est le plus éloigné, hydrauliquement (voir aussi pour ce qui concerne  $t_c$ , la référence [5]).

On note cette valeur  $i(t_c, T)$  ( $T$  représente la période de récurrence). Nous verrons que l'on peut extraire  $i(t_c, T)$  directement, à partir de ce que l'on nomme les courbes intensité - durée - fréquence caractéristiques du lieu géographique.

Bien entendu, un tel modèle ne fournissant que l'intensité maximale prévisible à l'exutoire, demeure inopérant si l'on veut par exemple dimensionner un bassin de retenue ou faire du diagnostic de réseaux complexes, toute chose rendue théoriquement possible par les modèles plus sophistiqués élaborés depuis et traduits informatiquement.

Nécessité s'est donc imposée de déterminer  $i$ , l'intensité de pluie sous forme  $i(t)$  - caractérisation de hyéto-gramme ponctuel - et même plus, sous la forme  $i(t, \vec{x})$  prenant en compte l'évolution spatio-temporelle du phénomène

$t$  variable temps

$\vec{x}$  position dans l'espace

notamment lorsqu'il s'agit de bassins versants relativement grands ( $> 10 \text{ km}^2$ ) pour ce qui concerne l'hydrologie urbaine.

L'absence de modèle déterministe de calcul de la lame fondée sur une élucidation simple des phénomènes météorologiques a induit la multiplication de méthodes mélangeant pour la plupart des aspects pseudo-déterministes et statistiques, puisque aussi bien les statistiques permettent de mettre en ordre un objet dont on ne peut exhiber mécaniquement (soit a priori) le signifié. Cette vision de la pluie comme "phénomène aléatoire spatialement distribué" a encore été accentuée par les textes législatifs. En effet, ceux-ci exigent un dimensionnement du réseau en fonction d'une période de récurrence des dysfonctionnements fixée à l'avance.

Le modèle de Caquot correspond, nous l'avons vu, à telle formulation. Mais les hypothèses qu'il applique, en particulier :

- l'intensité de la pluie est constante et égale à  $i(t_c, T)$  pendant la durée  $t_c$  de l'événement ( $i(t_c, T)$  = intensité pluvieuse moyenne sur  $t_c$ ,  $T$  caractérise la période de retour de l'événement) ;

- égalité entre la période de retour de pluies rares et la période de retour des débits critiques,

certes adaptées aux conditions du problème (bassins versants homogènes - détermination du seul débit maximum) autorisent par leur simplicité même, cette formulation en terme probabiliste, ce qui n'est plus du tout évident, lorsque l'on augmente le nombre de paramètres dans les modèles de représentation pluviométrique plus récemment élaborés.

Parmi les modèles de pluie disponibles actuellement, nous opérons une classification suivant le type d'approche employée [16] :

- approche type "pluie de projet" (synthetic storm pattern)
- approche par simulation
- approche historique.

Au cours des paragraphes suivants, nous essayerons de dégager comment ces types d'approches furent élaborés à mesure que l'exigence d'adéquation au phénomène se fit plus aigüe et, par conséquent, à quel type de problème chaque approche répond plus spécifiquement.

#### 4.2. La pluie synthétique

4.2.1. Au commencement étaient ... les courbes intensité - durée - fréquence (courbes I.D.F.) [17] [18] [19] [20] [2]

Le principe de traitement est le suivant : on dispose d'une série de mesures pluviométriques sur un appareil, pendant une période dépassant généralement dix ans, et il s'agit d'étudier l'intensité maximale moyenne, sur une durée fixée, des pluies observées.

Le traitement s'effectue généralement pluie par pluie et, pour chacune d'elles, on repère l'intensité moyenne maximale sur les durées : 5 minutes, 10 minutes, 15 minutes ...

Pour chacune de ces durées, on opère un classement par ordre d'intensité décroissante, soit sur toute la série si elle est courte, soit, quelquefois, sur les seules valeurs moyennes maximales de chaque année.

A partir de cette information, on détermine pour chaque durée ( $t$ ) l'intensité moyenne maximale pour une période de récurrence fixée ( $T$ ).

Supposons que nous ayons 100 ans de mesure.  $i_M(t,10)$  - l'intensité décennale pour la durée  $t$  - sera l'intensité située au dixième rang du tableau en colonnet.

On "approxime" ensuite le nuage des points obtenus par des courbes représentant, pour la période de récurrence voulue, l'intensité maximale, en fonction de la durée  $t$  d'intégration.

Exemple : 2 courbes intensité - durée pour une fréquence décennale calculées à partir des mesures relevées à la station de Bron entre 1970 et 1980.

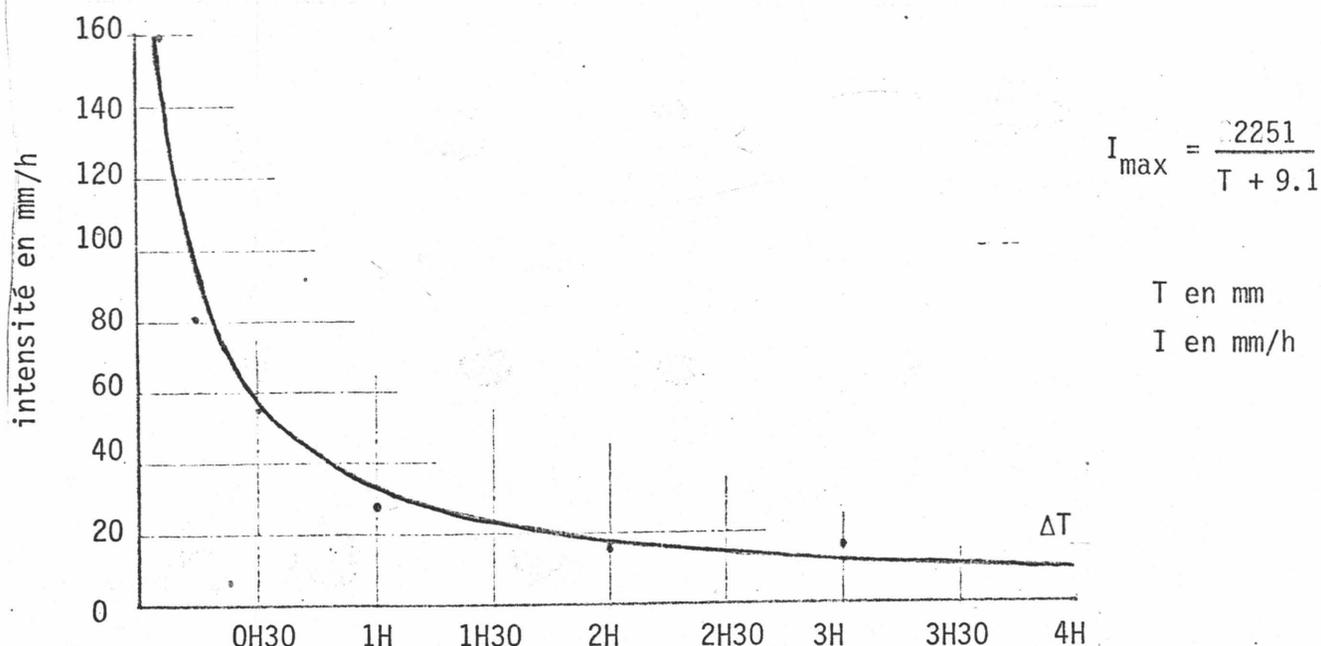


figure 10 : Courbe valable pour une durée inférieure à quatre heures.  
(d'après météorologie nationale).

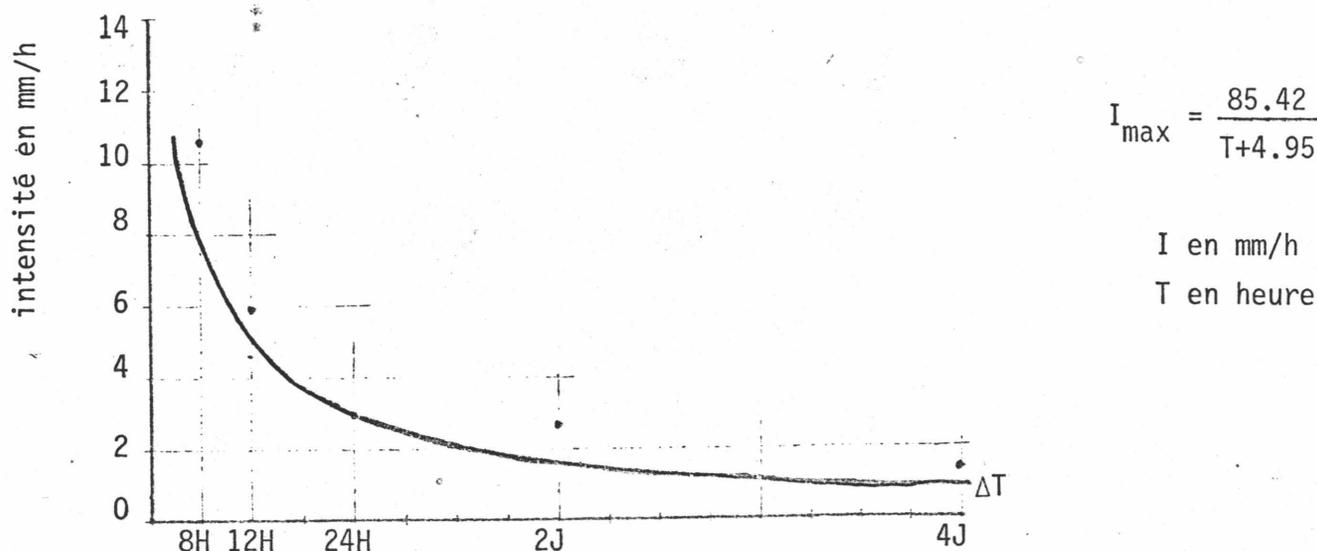


figure 11 : Courbe valable pour une durée supérieure à quatre heures.  
(d'après météorologie nationale).

Différentes formules sont données pour l'ajustement des courbes. Dans l'exemple de la courbe intensité - durée sur 10 ans, relevée à Bron, l'ajustement fut effectué suivant :

(4) la formule type Talbot-Grisollet 
$$i_M(t,T) = \frac{a(T)}{t + b(T)}$$

On peut citer aussi :

(5) la formule type Montana 
$$i_M(t,T) = a(T) t^{b(T)}$$

(6) la formule type Keifer-Chu 
$$i_M(t,T) = \frac{a(T)}{t^{b(T)} + c(T)}$$

on trouvera en annexe 1 les coefficients relatifs à la formule de Montana pour les trois zones géographiques qui découpent la France aux différentes périodes de retour [13].

#### 4.2.2. Pluies de projet ponctuelles, et exemples [21] [22]

Seul le modèle de Caquot, concentré en une formule globale, peut se satisfaire de la seule donnée des courbes I.D.F. ; les autres modèles nécessitant au minimum la connaissance d'un hyétogramme (intensité de pluie en fonction du temps).

Etant donné les contraintes propres à l'hydrologie urbaine (calcul du réseau en termes de risque), une première réponse fut l'élaboration de pluie de projet.

"Il s'agit d'une pluie fictive, définie par un hyétogramme synthétique et statistiquement équivalente aux pluies réelles.

On lui affecte une période de retour qui est celle d'un ou plusieurs de ses éléments constitutifs : hauteur totale précipitée, hauteur précipitée sur un intervalle inférieur à la durée totale (période intense) ...

Le plus souvent, on admet que la période de retour des caractéristiques du ruissellement obtenu (débit de pointe, volume ...) est égale à celle de la pluie de projet qui lui a donné naissance".

Une des premières tentatives de résoudre le problème sous cette forme revient à Keifer et Chu (1957).

La pluie de projet proposée par Keifer et Chu [23] [24] se construit à partir des courbes intensité - durée - fréquence.

Elle définit le hyétogramme à partir de 3 paramètres jugés déterminants :

- le volume d'eau précipitée pendant la durée de pluie intense
- la quantité précipitée avant la période intense
- la position de la période intense.

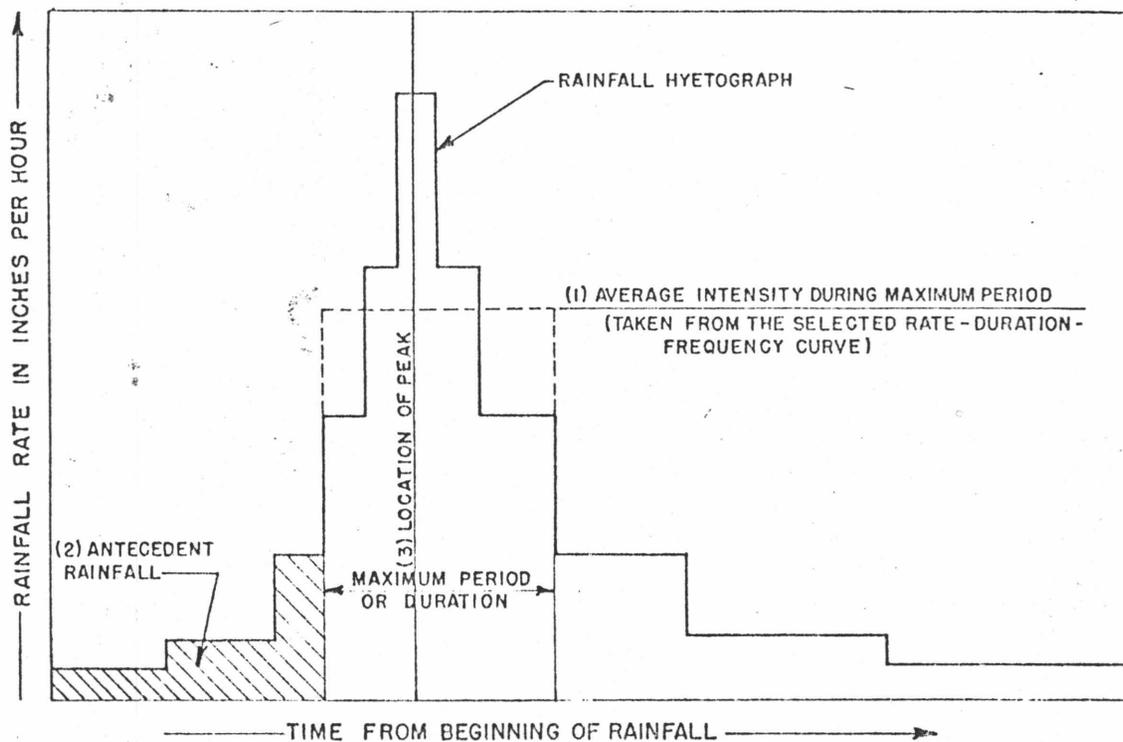


figure 12 : Schéma des trois principales caractéristiques du hyétogramme selon KEIFER-CHU.

Les étapes de la construction :

a) un hyétogramme type avancé : la particularité de ce hyétogramme est que, quel soit le temps  $t$  considéré, l'intensité moyenne pendant  $0, t$  est égale à l'intensité moyenne maximale déduite des courbes intensité - durée - fréquence, ce qui s'écrit :

$$(7) \quad \frac{\int_0^t i(t) dt}{t} = i_M(t, T) \quad T : \text{période de retour supposée de l'événement}$$

Or, à Chicago,  $i_M(t, T)$  est de la forme :

$$(8) \quad i_M(t, T) = \frac{a(T)}{t^{b(T)} + c} \quad \text{écrit plus simplement} \quad \frac{a}{t^b + c}$$

En résolvant en  $i$  l'équation :

$$(9) \quad \frac{\int_0^t i(t) dt}{t} = \frac{a}{t^b + c},$$

on obtient :

$$(10) \quad i(t) = \frac{a [(1 - b) t^b + c]}{(t^b + c)^2} \quad \text{où } a, b, c \text{ sont des constantes connues à partir des courbes I.D.F.}$$

b) la deuxième étape consiste à replacer le pic d'intensité de manière à obtenir une forme de hyétogramme plus conforme à la réalité statistique constatée.

Le coefficient  $r$  représente le rapport de la durée écoulée entre le début de la pluie et l'apparition du pic à la durée totale de la pluie, on obtient alors :

$$(11) \quad r = \frac{t_b}{t_d} \quad \begin{array}{l} t_b : \text{temps précédant l'apparition du pic (time before)} \\ t_d : \text{durée totale} \\ t_a : \text{temps succédant à l'apparition du pic (time after)} \end{array}$$

$$(12) \quad (1 - r) = \frac{t_a}{t_d}$$

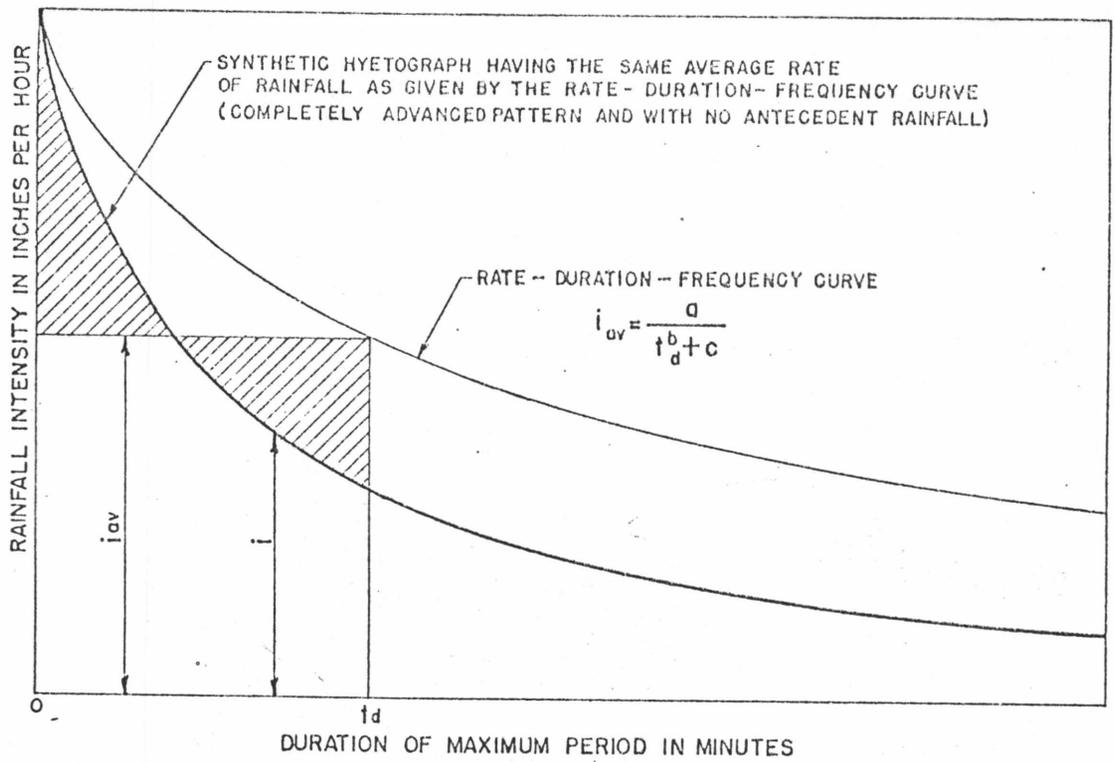


figure 13 : Diagramme de type avancé

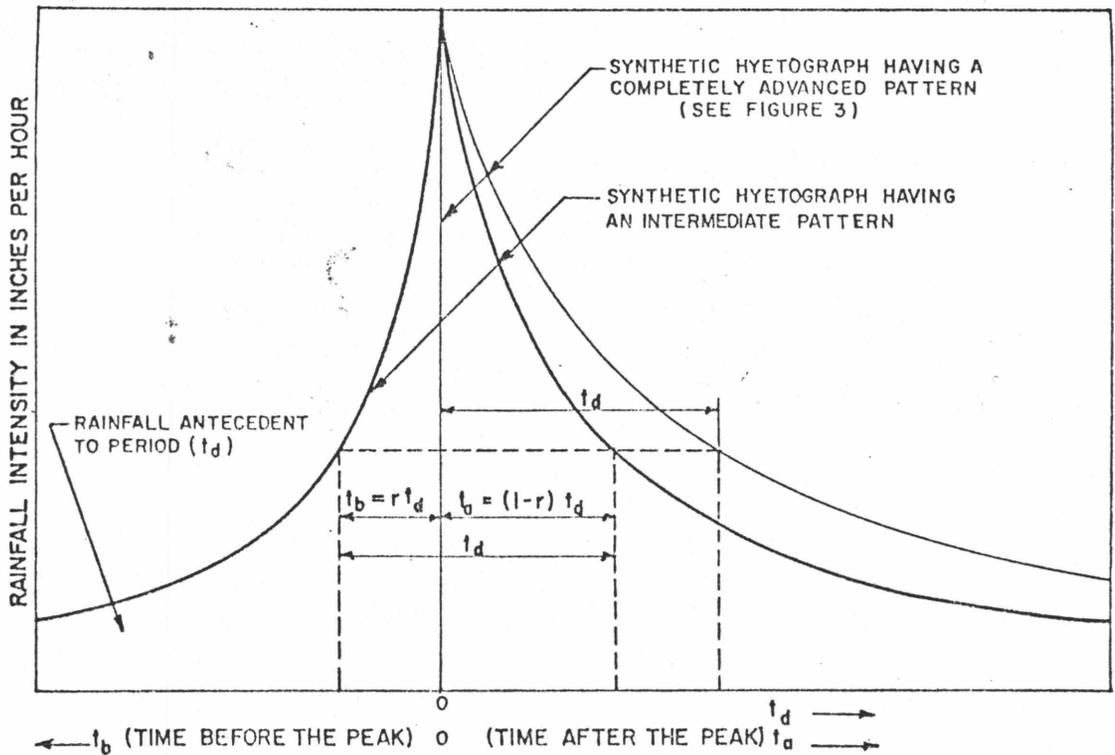


figure 14 : Diagramme rééquilibré

En résolvant l'équation (11) en  $t_d$  et en la rapportant à (10), on obtient l'équation de la courbe avant le pic.

En résolvant l'équation (12) en  $t_d$  et en la rapportant à (10), on obtient l'équation de la courbe après le pic.

Soit :

$$(13) \quad i = \frac{a (1 - b) \left(\frac{t}{r}\right)^b + c}{\left(\frac{t}{r}\right)^b + c} \quad \text{intensité avant le pic}$$

$$(14) \quad i = \frac{a (1 - b) \left(\frac{t}{1 - r}\right)^b + c}{\left(\frac{t}{1 - r}\right)^b + c} \quad \text{intensité après le pic}$$

$r$  est déterminé statistiquement et prend, à Chicago, la valeur 0,39 (pluie de type avancé).

Suivant une méthodologie analogue, on peut construire les divers hyétogrammes correspondant aux différentes formules retenues pour les courbes I.D.F.

[24] [25] ...

Par exemple,  $i(t)$ , pour une pluie complètement avancée, ( $r = 0$ ) s'écrit :

$$(15) \quad i(t) = \frac{ab}{(t + b)^2} \quad \text{en prenant la formule type Talbot (4)}$$

$$(16) \quad i(t) = (b + 1) a t^b \quad \text{en prenant la formule type Montana (5)}.$$

Cette approche méthodologique a l'avantage d'être relativement simple à mettre en oeuvre, tant pour ce qui concerne le calcul proprement dit, que pour les données qu'il nécessite et qui - en France du moins - sont accessibles.

Pour chaque type, chaque courbe correspond à un patron temporel auquel on affecte une probabilité.

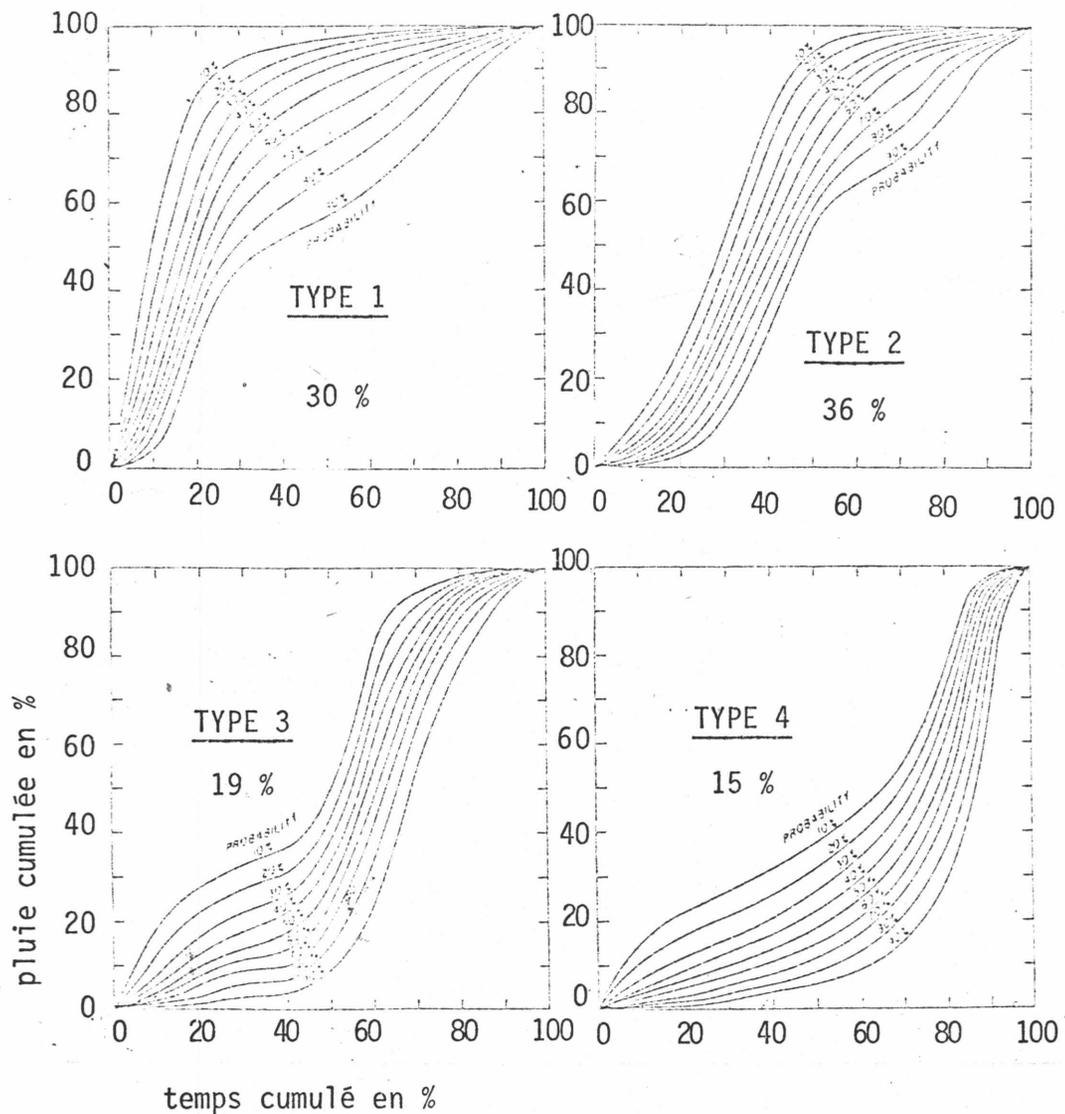


figure 15 : Diagramme pour les 4 catégories de pluie selon HUFF.

Cette méthode, appliquée en France par DESBORDES, ne semble pas avoir donné de résultats intéressants, du fait d'une trop grande dispersion des points de mesure interdisant un lissage significatif [14]. D'autres tentatives d'exhiber des patrons temporels privilégiés des orages sous forme de diagramme

Pourtant, elle comporte trois inconvénients majeurs :

- Elle repose sur l'hypothèse que toutes les pluies, quelle que soit leur durée, ont la même forme ;

- La valeur retenue pour  $r$  est une moyenne statistique pondérée qui, d'un point de vue strict, n'est pas plus probable que n'importe quelle autre valeur prise sur l'intervalle  $[0,1]$  ; il semblerait même que, dans certains cas,  $r$  suive une loi uniforme sur l'intervalle (DESBORDES, pour le cas des pluies à Montpellier 28) ;

- La période de retour que l'on doit attacher à un tel événement est supérieure à la période de retour de la courbe intensité - durée - fréquence, dont il est issu, puisqu'il est construit de telle sorte qu'à tout intervalle de temps considéré (inférieur à la durée totale de l'averse), le volume d'eau maximum tombé pendant cette durée corresponde à la période de retour choisie (hyétogramme décennal en 5 mn, 15 mn, 30 mn ...).

En 1967, HUFF, de l'Illinois State Water Survey (I.S.W.S.) présentait une méthode fondée sur la traduction statistique des formes de pluies ponctuelles orageuses par des diagrammes sans dimension [26].

Ces diagrammes sans dimension donnent l'évolution depuis le début de l'averse, de la proportion de hauteur totale précipitée, en fonction de la proportion de la durée totale écoulée.

$$(17) \quad \frac{H(t)}{HT} = f \left( \frac{t}{DP} \right)$$

$t$  : durée écoulée depuis le début de l'averse

$DP$  : durée totale de l'averse

$H(t)$  : hauteur cumulée précipitée au temps  $t$

$HT$  : hauteur totale précipitée

L'analyse s'est effectuée sur un grand nombre d'orages observés sur un réseau de mesures important dans la région de Chicago. L'échantillon retenu a été classé en 4 catégories, selon que la période intense se produit dans le 1er, 2ème, 3ème ou 4ème quart de la pluie.

adimensionnel, furent esquissées, par le même DESBORDES [14], notamment pour déterminer  $\frac{i}{i_{\max}}$  en fonction du temps. Ces tentatives sont demeurées sans lendemain.

NORMAND [27], reprenant à son compte les critiques formulées contre la méthodologie KEIFFER - CHU, entreprit une analyse des épisodes pluvieux sur 4 stations différentes (LE MANS, MONTPELLIER, PAU, STRASBOURG).

Le problème se formule en ces termes :

Connaissant la période de retour et la durée de l'épisode intense correspondant, quelle sera la période de retour de l'événement pour des durées centrées supérieures ou inférieures ?

L'analyse statistique lui permet d'obtenir l'abaque suivant :

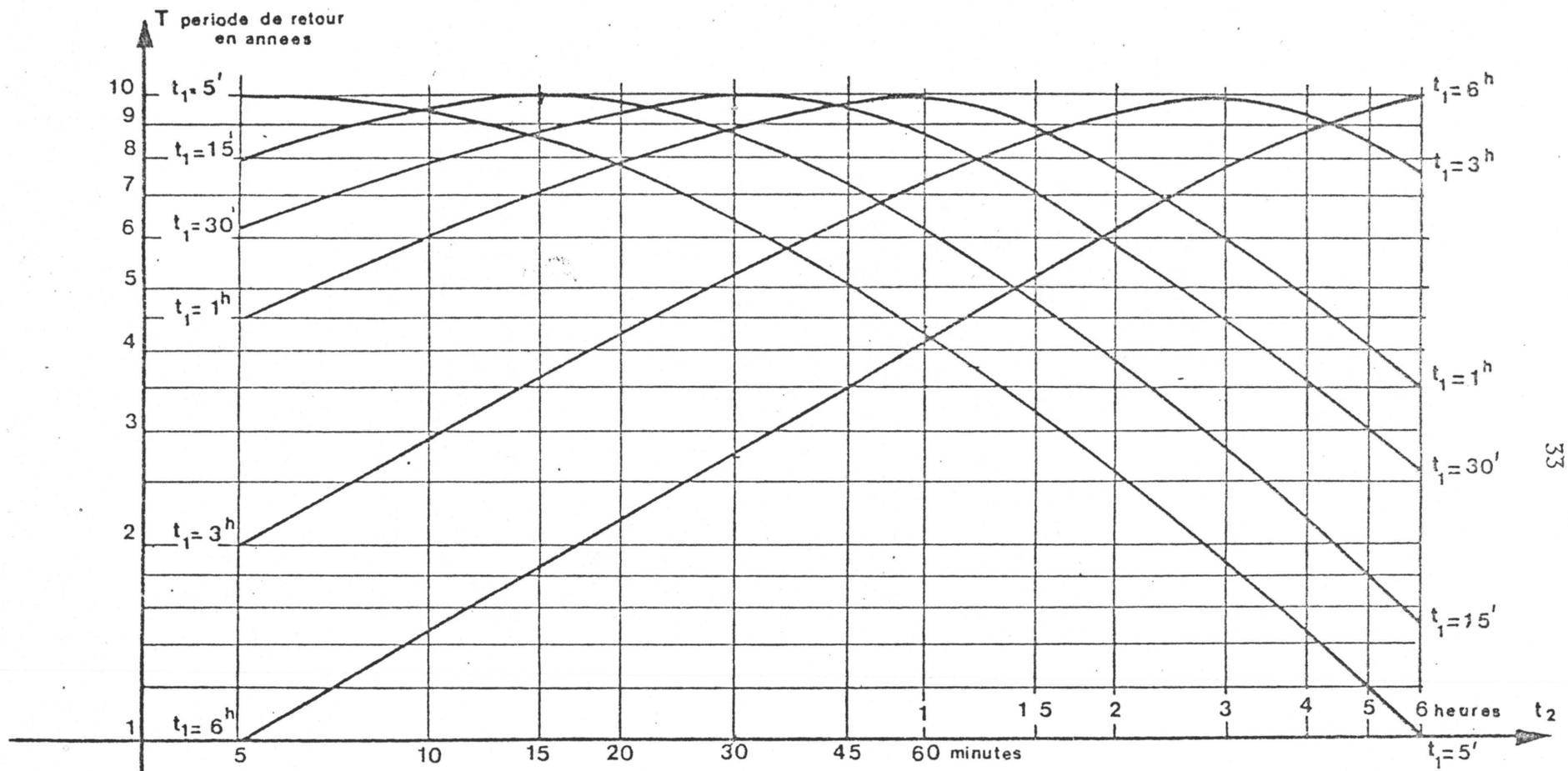


figure 16 : Période de retour des intensités  $I(t_2)$  associées à une intensité décennale  $I(t_1)$  dans un hyétogramme décennal centré sur  $I(t_1)$ . Valeurs moyennes françaises d'après NORMAND D.

Exemple d'utilisation de l'abaque :

Soit une pluie décennale dont les caractéristiques suivent :  
 période intense : 5 mn (  $T(5mn) = 10$  ans )  
 discrétisation au quart d'heure

Les périodes de retour des intensités moyennes maximales pour les différentes durées sont :

$T(15 \text{ mn}) = 8,5$  ans

$T(30 \text{ mn}) = 6,5$  ans

$T(45 \text{ mn}) = 5$  ans

$T(60 \text{ mn}) = 4,2$  ans

$T(75 \text{ mn}) = 3,7$  ans

$T(90 \text{ mn}) = 3,2$  ans

$T(105 \text{ mn}) = 3$  ans

$T(120 \text{ mn}) = 2,6$  ans

Il ne reste plus alors au projeteur qu'à utiliser les courbes I.D.F. pour les durées et périodes de récurrence ainsi fixées pour connaître les intensités moyennes maximales.

On donne en annexe une comparaison des hyétogrammes obtenus par cette méthode et celle de KEIFER.

La méthode NORMAND semble, a priori, plus "réaliste" que celle de KEIFER, pourtant, elle souffre d'un inconvénient majeur.

DESBORDES a mis en doute la pertinence d'une corrélation statistique "reliant contenu à contenant" (par exemple H2 hauteur précipitée sur  $\Delta t_2$  à H1 hauteur précipitée sur  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  et incluse dans H2).

Faisant cette constatation que la forme des averses est trop aléatoire et qu'en conséquence aucune distribution temporelle n'est a priori recommandable, DESBORDES définit une nouvelle approche, non plus axée sur la description de la pluie en tant que telle, mais plutôt en relation avec le modèle de simulation de ruissellement mis en place en aval [28] [15] [21].

En effet, les bassins versants et leurs réseaux de drainage se comportent comme des filtres opérant un lissage des "bruits de fond" associés à la structure finie de l'averse ; il apparaît donc comme plus efficace de repérer ce qui est sensible vis-à-vis du débit.

Autrement dit, étant donné le modèle de transformation pluie - débit mis en oeuvre - en l'occurrence le modèle du réservoir linéaire (DESBORDES), quelle est sa sensibilité aux différents paramètres caractéristiques de la pluie ? Les paramètres les plus sensibles sont jugés les plus significatifs - au sens du modèle - et ont fait l'objet d'une étude détaillée, sur la série d'observations à la station de Montpellier - Bel Air (I.N.R.A.) de 1921 à 1971.

Il s'agit des cinq paramètres suivants :

- Une durée totale de 4 heures (notée DP).
- La durée DM de la période intense qui varie de 15 mn à 1 heure selon la nature des bassins versants étudiés.
- La position de cette période intense au sein de l'averse est définie par le paramètre  $\theta$  pourcentage de la durée non intense (DP - DM) qui s'écoule entre le début de la pluie et le début de la période intense - à remarquer que l'analyse statistique ne fait pas ressortir une valeur préférentielle de  $\theta$ .
- Les hauteurs HT, précipitée sur la durée totale et HM, précipitée au cours de la période intense.
- La hauteur HM (précipitée sur DM) à la période de retour T choisie pour la pluie de projet, tandis que HT associée à HM (et sa période de retour) est déduite de l'expérience (analyse des hauteurs en quatre heures précipitées au cours des épisodes présentant une hauteur précipitée HM sur DM).

Plusieurs formes de pluies ont été testées ainsi que l'ajout de distorsions aléatoires (bruits), il en est résulté que la forme doublement triangulaire simple semble la plus appropriée.

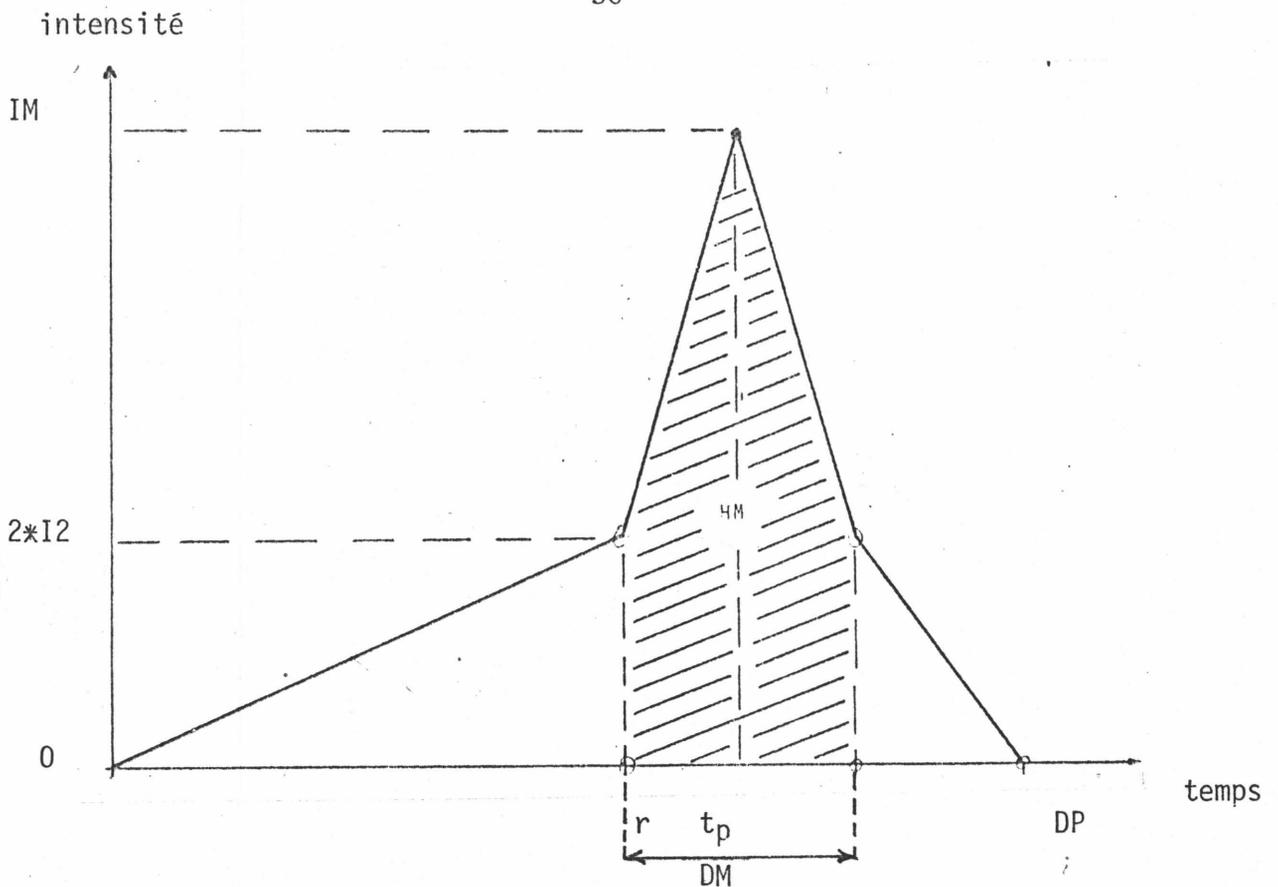


figure 17.: Pluie de projet utilisée dans RERAM.

Les valeurs des hauteurs sont déterminées à partir des courbes I.D.F..

La valeur de  $\theta$  est prise égale à  $3/4$ , ce qui va dans le sens d'une plus grande marge de sécurité, puisque les pluies retardées sont les plus défavorables au sens de débit - faible capacité de stockage du réseau lors de la pointe d'intensité.

Reprenant l'analyse de DESBORDES, CHOCAT - THIBault ont proposé des modifications à sa méthode [29] [6]. Deux modifications mineures :

- $\theta$  est pris égal à 0,5 (pluie symétrique)
- la période de retour de la hauteur totale est prise égale à celle de la hauteur précipitée durant la période intense (même critique que pour KEIFER - CHU).

Ces deux modifications sont effectuées dans un but de simplification.

Enfin, la principale nouveauté consiste à relier la durée totale de la pluie ainsi que la durée de la période de pluie intense à un paramètre intrinsèque au bassin, le lag-time  $K$ .

On rappelle que dans le modèle du réservoir linéaire 15 1 30 on écrit :

$$(18) \quad Q(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/K} + 1/K \int_{t_0}^t i(u) e^{-(t-u)/K} du$$

où  $Q(t)$  : débit de sortie au temps  $t$

$Q_0$  : débit de sortie au temps  $t_0$

$i(t)$  : débit entrant au temps  $t$

$K$  : lag-time homogène à un temps, représente le décalage entre le centre de gravité du débit entrant et celui du débit sortant.

La pluie proposée est de type double triangle symétrique définie par les paramètres  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $t_1$  et  $t_2$

Schéma :

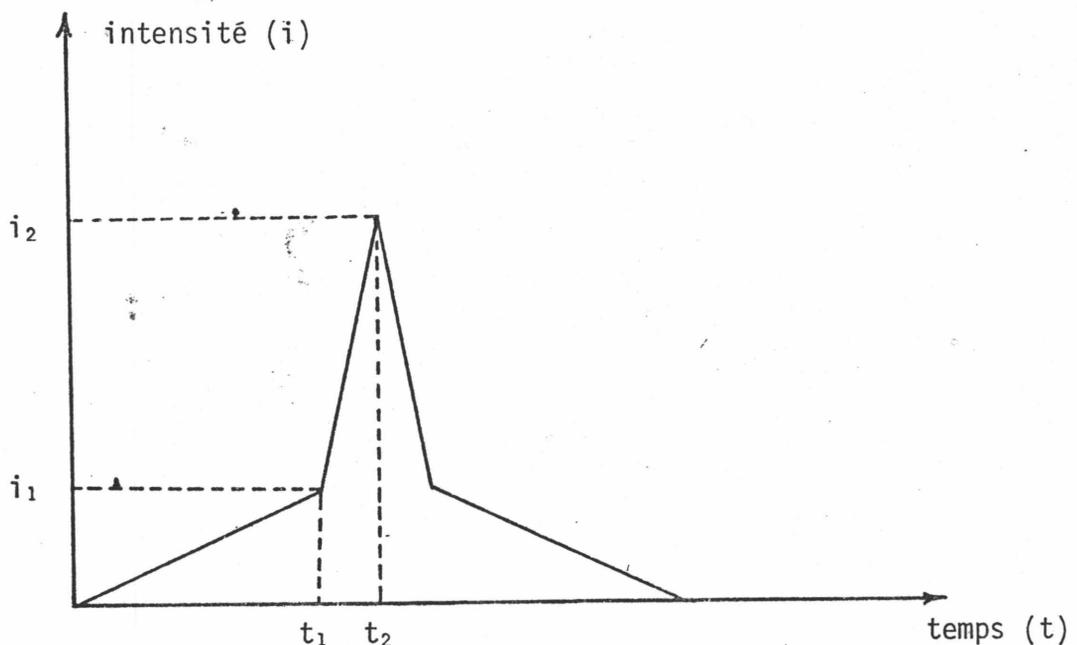


figure 18

Le mode de construction est le suivant :

- Calcul du lag-time K
- Calcul de  $t_1$  et  $t_2$

$$(19) \quad t_1 = 2,25 K$$

$$(20) \quad t_2 = 2,5 K$$

- Calcul des intensités  $i_1$  et  $i_2$

$$(21) \quad i_1 = (0,25 K)^b \frac{1 - (0,1)^{b+1}}{0,9 (0,1)^b} \cdot 120 \cdot a \cdot 2^b$$

$$(22) \quad i_2 = (0,25 K)^b \frac{(0,1)^b - 1}{0,9 (0,1)^b} \cdot 120 \cdot a \cdot 2^b$$

a et b coefficients fournis par l'instruction technique [31] correspondant à ceux de la formule de MONTANA [5] .

Tous les modèles proposés, aussi différentes soient les perspectives de leurs auteurs, ont en commun de proposer un schéma ponctuel à savoir la répartition temporelle de la pluie en un point donné. Or, le phénomène possède aussi une dimension spatiale qu'il faut caractériser. Classiquement, les hydrologues définissent différents coefficients d'abattement et un déplacement éventuel de l'averse qui, une fois déterminés, permettent de passer de la donnée ponctuelle à la donnée surfacique.

#### 4.2.3. Passage du ponctuel au surfacique stationnaire

##### 4.2.3.1. Introduction

Beaucoup de travaux ont été effectués à propos de "l'inégale répartition spatiale" tant en hydrologie générale qu'en hydrologie urbaine. Le développement de nombreux réseaux de mesure, ces dernières années, n'a fait qu'amplifier la tendance, sans qu'il soit vraiment possible à l'heure actuelle de trier définitivement les concepts opérationnels.

Dans la perspective pluie de projet, l'idéal semblerait de déterminer, pour un bassin versant donné, une lame d'eau équivalente, en fonction du temps (hyétogramme spatial équivalent) à laquelle on pût rattacher une période de récurrence déterminée au sens des débits observés.

Sous cette forme, la gageure est intenable. Les hydrologues ont donc décomposé le problème exhibant plusieurs paramètres, nommés souvent sous le même vocable, mais correspondant à une réalité différente.

Deux grands concepts, cependant, se dégagent :

- le concept de lame d'eau moyenne sur une durée et pour une période de récurrence donnée
- le concept d'épicentre de la pluie, point où l'intensité de précipitation est supposée atteindre son maximum et décroître ensuite régulièrement au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

Le plus souvent, intimement liés dans la construction des modèles, ils définissent pourtant, suivant les priorités que l'hydrologue choisit dans la conceptualisation, deux classes méthodologiques :

- La première détermine des caractéristiques de la relation ponctuelle surfacique sur l'ensemble des pluies, statistiquement
- La deuxième pré-suppose des caractéristiques de la relation ponctuelle surfacique valable pour chacune des pluies, relation ensuite optimisée statistiquement. Ce type de pluie définit l'épicentre comme concept premier, le problème consistant alors à quantifier la loi de décroissance des intensités.

Certains hydrologues ont utilisé, pour les distinguer, les qualificatifs de méthode statistique (1er type) par opposition à méthode déterministe (2ème type) [22]. Faute de mieux, nous utiliserons cette terminologie.

#### 4.2.3.2. Passage à la lame d'eau par des "méthodes statistiques"

NIEMCZYNOMICZ a travaillé sur un réseau pluviométrique de 12 appareils sur 25 km<sup>2</sup> à Lund (Suède) [32]. Parti de l'hypothèse qu'une des raisons majeures des déviations constatées entre les résultats des modèles et l'observation provenait du fait que les hyétogrammes d'entrée étaient fondamentalement construits à partir de séries ponctuelles, il entreprit la construction de courbes I.D.F. pour la lame d'eau moyenne sur le bassin versant.

La méthode proposée [33] consiste, sur les 12 appareils, à déterminer 12 groupes de n appareils correspondant à une surface d'influence équivalente ( $S_n$ ). Pour chacun des groupes de n appareils, on calcule la courbe I.D.F. pour les 12 groupes retenus qui constitue la courbe I.D.F. moyenne de la lame d'eau pour une surface  $S_n$  du bassin versant. On obtient finalement des courbes I.D.F. de la lame d'eau moyenne pour le bassin versant étudié, en fonction de la surface des sous-bassins découpés.

Ci-dessous, une comparaison de la courbe I.D.F. ponctuelle (moyenne) versus la courbe I.D.F. pour une surface de 25 km<sup>2</sup> (moyenne)

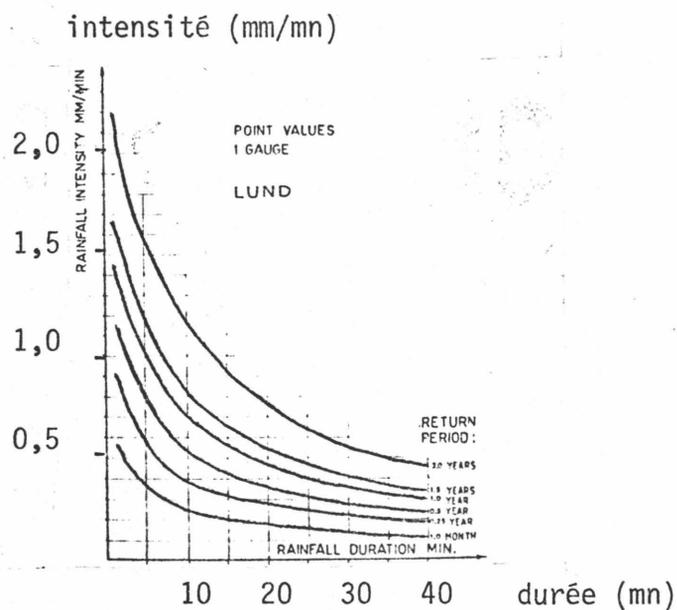


figure 19 : Courbes I.D.F. moyenne ponctuelle ("point value") d'après NIEMCZYNOMICZ à Lund.

intensité (mm/mn)

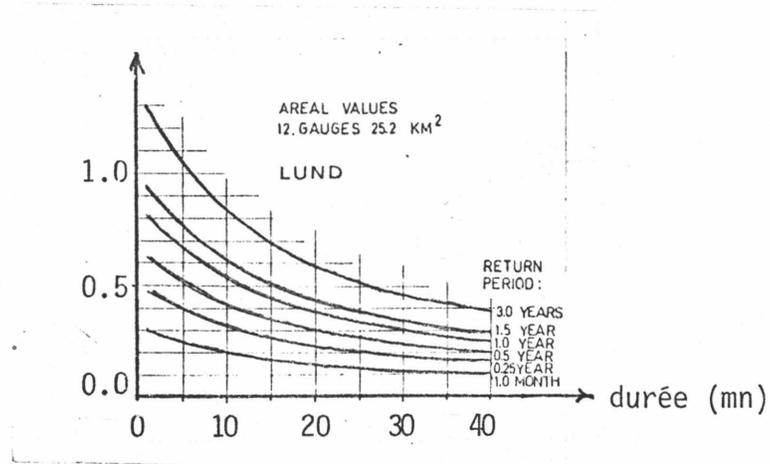


figure 20 : Courbes I.D.F. moyenne, pour une surface de 25 km<sup>2</sup> (totalité du bassin de Lund) d'après NIEMCZYOMICZ.

Deux remarques à formuler sur la méthode proposée :

- Elle suppose l'isotropie du phénomène ou du moins un gradient pluviométrique négligeable
- La lame moyenne est calculée en faisant une simple moyenne arithmétique des intensités ponctuelles.

D'autres méthodes proposées répondent à une formulation faisant intervenir explicitement un rapport ponctuel - surfacique, la définition du point de référence permettant d'opérer une classification.

ROCHE [34] proposa la formulation suivante :

"Etant donné que la pluie ponctuelle en un point arbitraire de la surface S a une probabilité donnée, quelle est la pluie moyenne de même probabilité sur cette surface ?"

RODRIGUEZ - ITURBE et MEJIA reprirent la même formulation et proposèrent une méthode plus rapide moyennant des hypothèses supplémentaires, notamment une fonction de corrélation des intensités  $F(v,t)$ , telle que

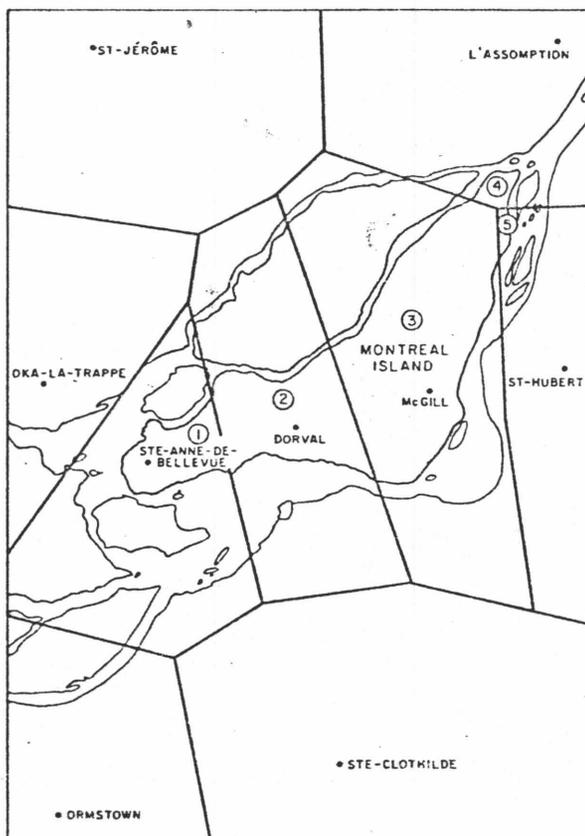
$$r(v,t) = r(v)r(t) \quad v : \text{distance entre deux points dans l'espace}$$

$$t : \text{le temps}$$

Ces méthodes furent surtout employées en hydrologie générale (pas de temps de mesure de l'ordre de 24 heures au minimum). La seule adaptation de cette formulation à l'hydrologie urbaine est à notre connaissance celle proposée par NGUYEN [36] [37].

L'énoncé modifié du problème est : "Etant donné que la pluie ponctuelle en un point fixe d'une surface fixe a une probabilité donnée, quelle est la pluie moyenne de même probabilité sur cette surface ?".

La méthode a été appliquée à la détermination de la fonction de probabilité de la lame d'eau moyenne horaire sur la région de Montréal.



①: polygone  $i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

figure 21 : Réseau de mesures sur la région de Montréal.

Le réseau comporte neuf appareils répartis sur 466 km<sup>2</sup>. Le point de référence est l'appareil de l'aéroport de Dorval (station de premier ordre). Les polygones de THIESSEN furent utilisés pour calculer la pluie moyenne (nous reviendrons sur le problème de l'interpolation des valeurs dans le chapitre IV.3.)

Les étapes du calcul :

- 1) Calcul des distributions ponctuelles des pluies horaires [38].  
Il fut supposé que la distribution était correctement approximée par une loi exponentielle du type :

$$(23) \quad F_1(x) = (1 - F_0) e^{-\lambda x}$$

$x$  : occurrence de la variable aléatoire  $X$  hauteur horaire précipitée  
 $F_0 = P \{X = \emptyset\}$  (hauteur précipitée horaire nulle)  
 $F_1(x) = F \{X > x\} \quad x > \emptyset$

- 2) Calcul de la distribution surfacique  $Z$

$$(24) \quad Z_n = \sum_{i=1}^n w_i X_i$$

$Z_n$  : variable aléatoire lame moyenne  
 $X_i$  : variable aléatoire correspondant au pluviomètre  $i$   
 $w_i$  : poids du pluviomètre  $i$  (THIESSEN)

On suppose que chaque variable  $X_i$  est indépendante et le problème se résume à trouver la distribution de la variable somme pondérée de  $n$  variables indépendantes à distribution exponentielle différente.

- 3) Pour des valeurs de probabilité donnée, on calcule enfin le rapport :

$$(25) \quad k = \frac{Z_n}{x_{ref}}$$

$Z_n$  : valeur de  $Z_n$  pour la probabilité considérée  
 $x_{ref}$  : valeur de  $X_{ref}$  pour la probabilité considérée,  $X_{ref}$  représentant la loi de distribution au pluviomètre de référence fixé.

A noter que le  $k$  peut être supérieur à 1 (existence d'un gradient pluviométrique pour la durée de précipitation et la période de retour considérées).

Dans le cas de Montréal, on obtient :

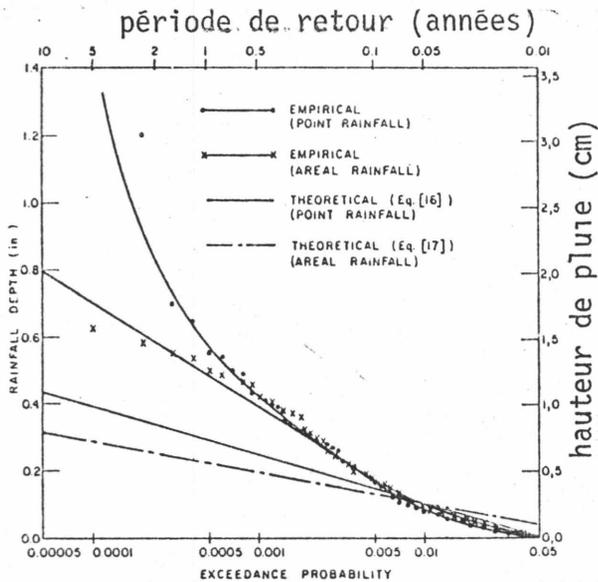


figure 22 : Lois de distributions théoriques et expérimentales des hauteurs horaires précipitées, ponctuelles et surfaciques.

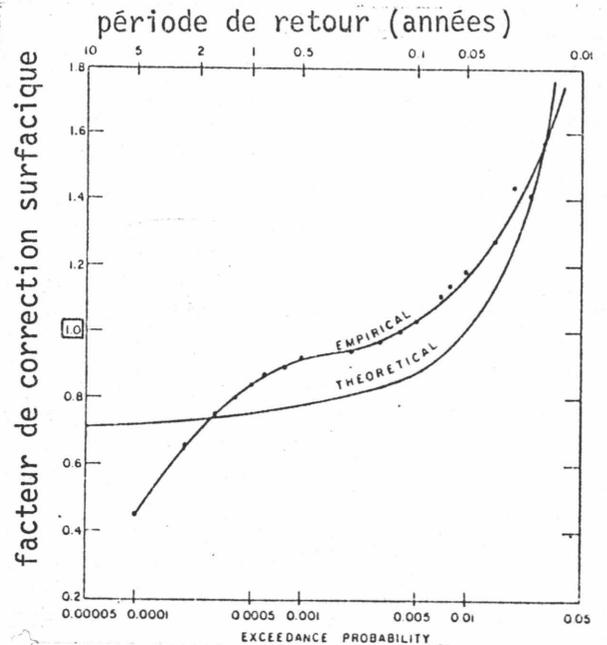


figure 23 : Lois de distribution théorique et expérimentale du rapport  $k$  (des hauteurs horaires surfaciques sur les hauteurs horaires ponctuelles).

A l'opposé, en France, la plupart des études font l'hypothèse de la dépendance entre les hauteurs précipitées au droit d'un appareil au cours des différents épisodes pluvieux.

Pratiquement, on opère pluie par pluie. Pour chaque période ainsi exhibée, on calcule une hauteur moyenne (spatiale), précipitée (lame), sur la durée totale de la pluie ou sur une période intense caractéristique, à partir de méthodes d'interpolations choisies arbitrairement (approche pseudo-déterministe). Le plus souvent, le résultat est édité sous forme d'un coefficient moyen statistique reliant la hauteur moyenne (spatiale) à une hauteur précipitée ponctuelle dont la définition dépend des auteurs.

Dans une étude du LROP (1982) [39] on définit ce coefficient dit d'abattement spatial par la relation :

$$(26) \quad \alpha_M = \frac{\overline{P}_S}{P_{\max}}$$

$\alpha_M$  : coefficient d'abattement spatial global calculé sur le paramètre P

$\overline{P}_S$  : valeur moyenne de P estimée sur la surface S

$P_{\max}$  : valeur maximale de P observable en un point de la surface S

P est le paramètre jugé caractéristique de la pluie dont on veut connaître l'abattement. Dans cette étude, P fut défini de deux manières :

1. P est la hauteur totale de pluie
2. P est l'intensité moyenne maximale sur 30 mn (temps de concentration du bassin).

A remarquer que (26) introduit implicitement la notion d'épicentre et que, par définition, on a  $0 < \alpha_M < 1$ .

D'autre part, comme en pratique on ne peut calculer P en tout point de la zone mais seulement aux noeuds du réseau, on obtient une valeur approchée :

$$(27) \quad \alpha_0 = \frac{\overline{P}(S)}{P_0}$$

$P_0$  étant la valeur maximale ponctuelle relevée de P en un des noeuds du réseau de mesure ( $P_0 \leq P_{\max}$  réelle).

L'expérimentation a été effectuée au site du Marché d'Intérêt National de Rungis, pourvu de 9 pluviographes sur 194 ha (1 pluviographe pour 21,5 ha). L'expérimentation a duré 4 ans et seules les périodes estivales ont été dépouillées (mai à octobre).

Parmi les résultats, on peut noter que :

- le coefficient calculé ne semble pas dépendre de la période de récurrence. Ce résultat est sujet à caution du fait de la faible durée d'expérimentation.

- le coefficient ne dépend pas de la définition de P (hauteur totale ou intensité moyenne maximale sur 30 mn).

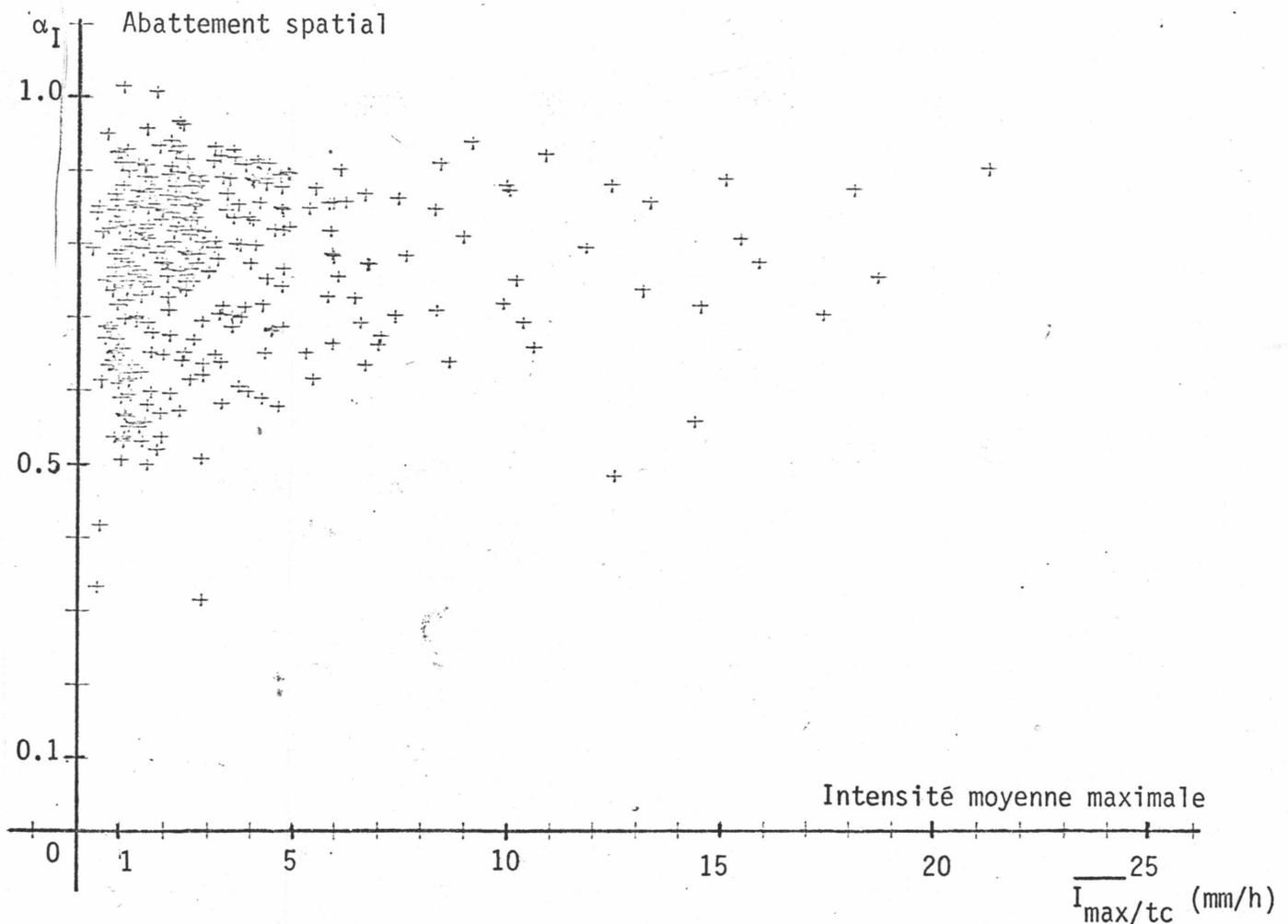


figure 24 : Relation abattement spatial - intensité moyenne maximale (échantillon complet  $n = 305$  observations) d'après le LROP [39].

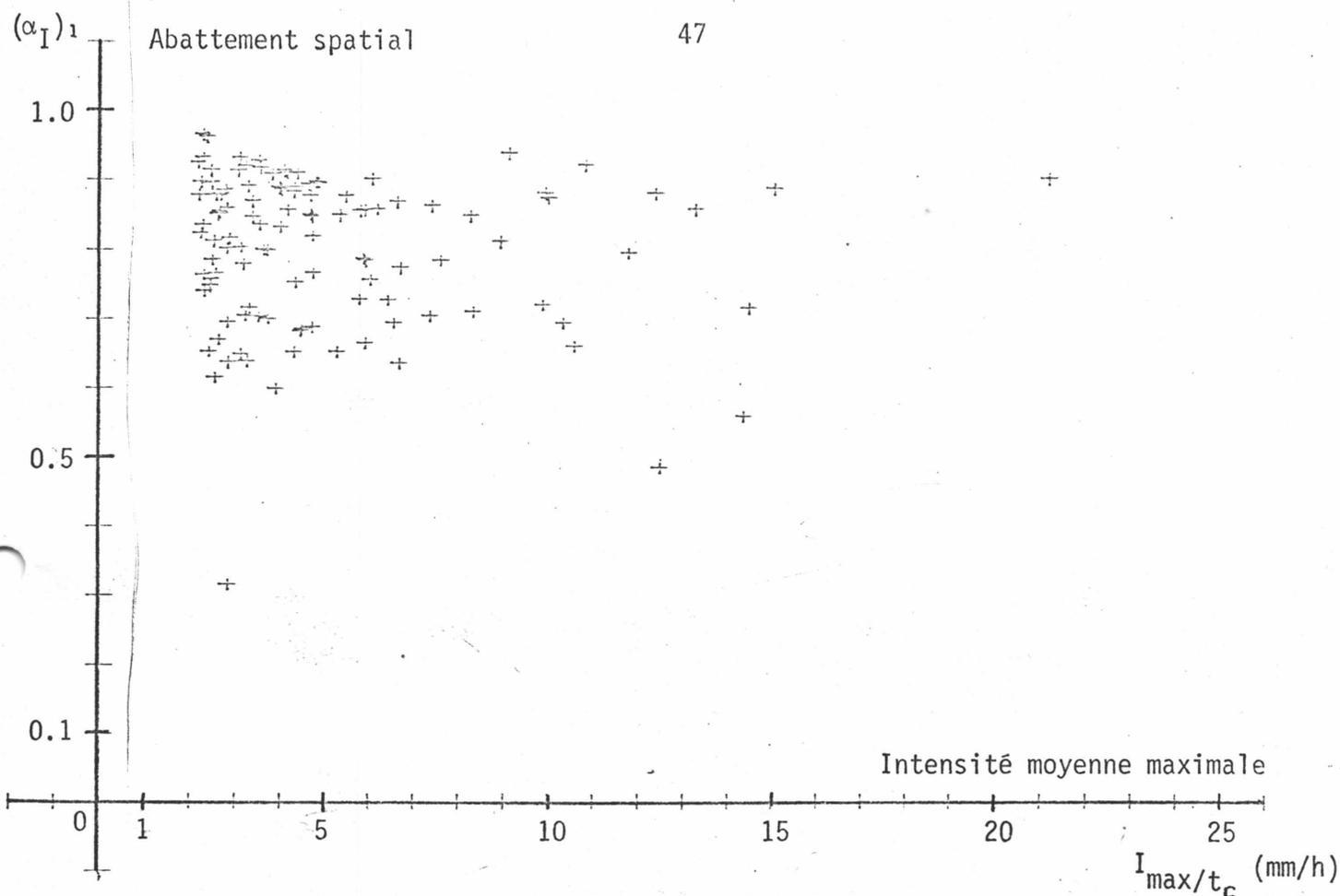


figure 25 : Relation abattement spatial - intensité moyenne maximale (intensité  $I \geq 2$  mm/h , durée  $D \geq t_c$  ,  $n = 113$  observations). On rappelle :  $t_c$  : temps de concentration du bassin ( $t_c = 30$  mn en l'occurrence).

Les auteurs ont comparé l'abattement ainsi calculé à l'abattement préconisé par la circulaire n° 77-284/INT 31 qui s'énonce sous la forme

$$(28) \quad \alpha = A^{-\epsilon} \quad (\text{formulation de CAQUOT})$$

dans laquelle :  $A$  : surface du bassin versant (ha)  
 $\epsilon = 0,050$

Malgré les imprécisions dues à la définition de la surface du bassin versant puisque :

- la surface du bassin hydrologique :  $S_{(h)} = 194$  ha ;
- la surface obtenue par sommation des polygones d'influence de THIESSEN :  $S_{(T)} = 333$  ha.

On obtient le tableau suivant (tableau 1)

Variable pluviométrique	abattement observé $\alpha$	Coefficient $\epsilon$ ajusté	
		$S_{(h)} = 194$ ha	$S_{(T)} = 333$ ha
$H_T \geq 1$ mm	0,797 (s = 0,105)	0,0431	0,0391
$\overline{I}_{\max/t_c} \geq 2$ mm/h	0,772 (s = 0,108)	0,0491	0,0446
$\overline{I}_{\max/t_c} \geq 2$ mm/h durée $D \geq t_c$	0,787 (s = 0,110)	0,0455	0,0412
$H_T \geq 1$ mm $\overline{I}_{\max/t_c} \geq 2$ mm/h $D \geq t_c$	0,792	0,0443	0,0401

tableau 1

$t_c$  : temps de concentration du bassin (30 mn)

$S_{(h)}$  : surface du bassin hydrologique (194 ha)

$S_{(T)}$  : surface obtenue par sommation des polygones de THIESSEN (333 ha)

A remarquer que l'influence de la densité du réseau a été testée en calculant les valeurs en fonction du nombre de pluviomètres défectueux. Cette influence a été jugée non significative jusqu'à 6 pluviographes en panne sur les 9 installés (2,5 % et 2,3 % d'écart entre les valeurs extrêmes calculées pour P : hauteur totale et P : hauteur maximale sur  $t_c$ ).

Une erreur à ne pas commettre lorsqu'on utilise un coefficient d'abattement déterminé, comme ci-dessous, consiste à utiliser pour le calcul du hyétogramme moyen, la série pluviométrique sur un appareil fixé. En effet, la lame d'eau moyenne est calculée à partir de l'épicentre sur le bassin versant ; or, un pluviomètre fixé "n'a aucune raison de se trouver au droit de l'épicentre" (ou l'inverse) (HEMAIN [21] ). La série pluviométrique correspondant à un appareil fixé ne permet pas d'obtenir directement la série pluviométrique correspondant à l'épicentre du bassin considéré.

Si l'on oublie de tenir compte de ce fait, on pourra être amené à sous-estimer drastiquement le hyétogramme moyen.

De récentes expérimentations entreprises par le CEMAGREF sur le bassin versant de l'Orgeval à l'Est de Paris (1980) [41] [42] ont montré que, avec le réseau pluviographique de l'Orgeval (21 pluviographes sur 100 km<sup>2</sup> et 7 ans de mesure entre 1972 et 1978) on observe aussi fréquemment une pluie de 55 mm en 2 h (resp 37 mm en 1 h) sur l'un au moins des 21 postes qu'une pluie de 26 mm en 2 h (resp 22 mm en 1 h) sur un poste fixé.

Cette constatation a conduit le CEMAGREF à proposer en complément à la notion de coefficient d'abattement la notion de coefficient d'épicentrage défini comme suit :

$$(35) \quad \alpha (\Delta t, T, S) = \frac{P_{\max} (\Delta t, T, S)}{P_{\text{loc}} (\Delta t, T, S)}$$

$P_{\max} (\Delta t, T, S)$  est la pluie ponctuelle, maximale au sens spatial, sur la durée  $\Delta t$ , pouvant se produire en n'importe quel point du bassin de surface  $S$ , la période de récurrence étant  $T$ .

$P_{\text{loc}} (\Delta t, T, S)$  la pluie ponctuelle, en un point fixe quelconque du bassin, le pluviomètre de référence par exemple.

Hypothèses :

- 1) on suppose que la pluviométrie est isotrope sur le bassin
- 2) et que le réseau est bien réparti pour mesurer  $P_{\max}$  avec une bonne précision.

### Exemple

$\alpha$  (1h, 10 ans, 10 km<sup>2</sup>) est le coefficient qu'il faut appliquer à la pluie décennale, de 1 heure, calculée à partir de la série du pluviomètre de référence, pour obtenir la pluie décennale de 1 heure à l'épicentre si le bassin fait 10 km<sup>2</sup>.

Des contraintes de matériel (vitesse de déroulement du cylindre des pluviographes, synchronisme peu précis ...) n'ont pas permis d'effectuer le calcul pour des durées sub-horaires.

Ci-dessous, la valeur du coefficient d'épicentrage en fonction de la surface du bassin, pour les périodes de récurrence décennale et quinquennale

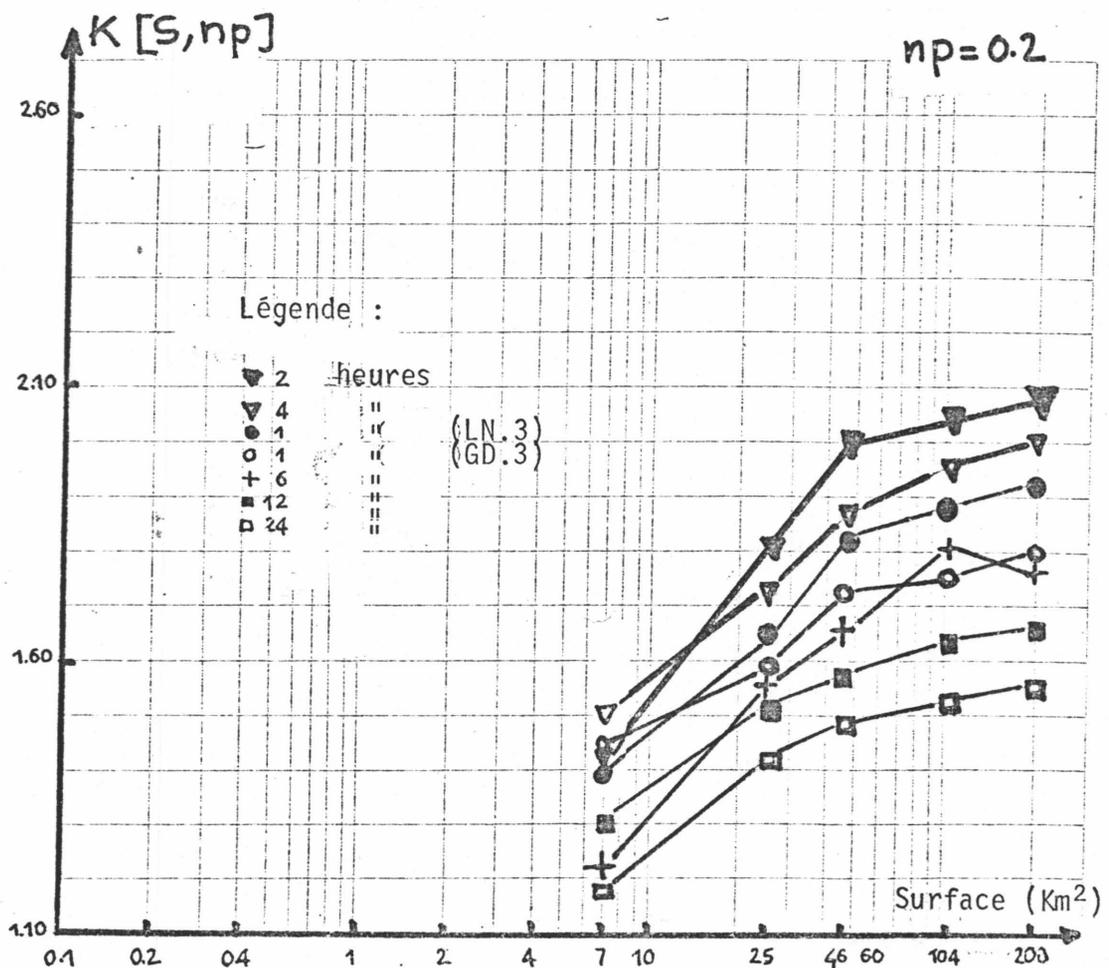


figure 26 : Coefficients d'épicentrage pour différentes durées, période de retour : 5 ans d'après le CEMAGREF.

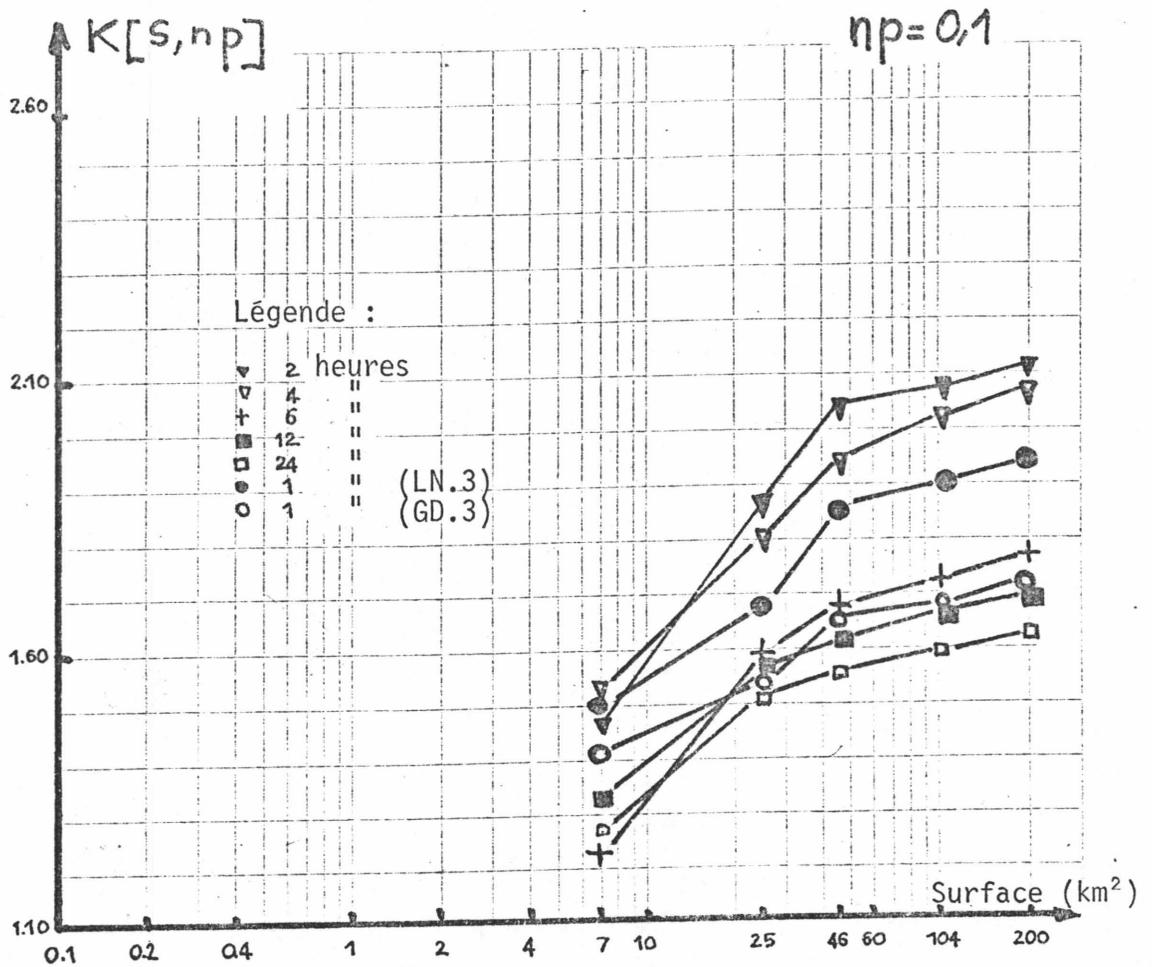


figure 27 : Coefficients d'épicentrage pour différentes durées, période de retour : 10 ans d'après le CEMAGREF.

A remarquer que le coefficient d'épicentrage augmente avec la surface et la période de récurrence et peut atteindre des valeurs supérieures à 2 - qui compensent l'influence du coefficient d'abattement sur des surfaces et des périodes de récurrence égales.

D'autres auteurs [40] [22] proposent la définition du coefficient d'abattement suivante :

$$(29) \quad \alpha_i = \frac{\bar{p}_S}{p_i}$$

$\alpha_i$  : coefficient d'abattement local

$P_i$  : est la valeur de la variable jugée caractéristique  $P$ , au pluviomètre  $i$ .

Abandonnant la référence explicite à un maximum précipité difficile à évaluer (densité du réseau), ils préfèrent s'en tenir à une définition locale de  $\alpha$ . Ceci pourrait d'ailleurs, si les  $\alpha_i$  trouvés sont significativement différents, mettre en évidence une hétérogénéité du phénomène spatial.

#### 4.2.3.3. Le passage à la lame d'eau par des "méthodes (pseudo)-déterministes"

Historiquement, ce sont les premières méthodes qui furent développées. Elles supposent que pour chaque pluie, il existe un épicycle à partir duquel on observe une loi de décroissance uniforme fonction soit de la distance à l'épicycle, soit de la surface autour de l'épicycle.

FRÜHLING, à partir d'observations faites à Breslau en Allemagne proposa la formule : [24] [17]

$$(30) \quad \frac{i}{i_0} = 1 - 0,009 \sqrt{D}$$

$i_0$  : intensité à l'épicycle

$i$  : intensité à la distance  $D$  de l'épicycle ( $D$  en mètres)

GRISOLLET [17] proposa une relation hyperbolique du type :

$$(31) \quad \frac{i}{i_0} = \frac{60 + 3D}{60 + 14D}$$

même notation avec  $D$  exprimé en kilomètres.

Plus récemment, DESBORDES et al [22] ont calé sur les données du bassin expérimental de Rungis des relations de la forme :

$$(32) \quad \frac{i}{i_0} (\Delta t, d) = m(\Delta t) d^{n(\Delta t)}$$

$i_0$  : intensité moyenne sur  $\Delta t$  à l'épicentre

$i$  : intensité moyenne sur  $\Delta t$  à la distance  $d$  de l'épicentre

$m$  et  $n$  : étant des coefficients qui dépendent de la durée  $\Delta t$  prise en compte.

On obtient par exemple :

$$(33) \quad \frac{i}{i_0} (30 \text{ mn}, d) = 1,34 d^{-0,083}$$

CAQUOT raisonnant non pas sur les distances mais sur la surface propose une formulation analogue du type :

$$(34) \quad \frac{i}{i_0} = A^{-\epsilon(A, \Delta T)}$$

$A$  : est la surface entourant l'épicentre

$\epsilon$  : est le coefficient d'abattement dans le cas général supposé fonction de  $A$  et  $\Delta T$

La plupart des hydrologues ont pris  $\epsilon(A, \Delta T) = \epsilon_0$ .

L'approche (pseudo-)déterministe, par le fait même des hypothèses très réductrices qu'elle admet sur les caractéristiques spatiales du phénomène, est sujette à caution et il faut insister ici sur les limites d'une telle démarche.

Par exemple, lorsque GRISOLLET établit sa relation, en étudiant en réalité les hauteurs totales précipitées, sur les 240 séquences analysées, il dut en rejeter 54 % (!), parce qu'"elles offraient des isohyètes privées de toute organisation apparente" (?). Les autres étaient loin de présenter l'isotropie (isohyètes circulaires) admises par le modèle.

Pourtant, beaucoup d'hydrologues s'accordent à penser qu' "une lame d'eau moyenne, constante sur le bassin, fonction du temps" n'est pas une hypothèse "réaliste" et donnent la préférence à cette démarche déterministe plutôt qu'à l'approche statistique directe.

On peut mettre en cause une telle attitude et se demander si, par exemple, une lame moyenne constante sur le bassin et variable temporellement est moins probable qu'une lame fondée sur un certain type de décroissance à partir d'un point fictif (l'épicentre).

Se trouve aussi reposé le problème de la correspondance des modèles de distribution spatiale, à des événements réels de période de récurrence fixée en terme de débit.

Beaucoup de paramètres interviennent - précision des mesures, type de hyéto-gramme ponctuel utilisé, modèle de transformation pluie - débit utilisé ... Il est, à notre avis, pour l'instant, assez hasardeux de trancher la question sinon ponctuellement par vérification expérimentale de l'adéquation meilleure pour tel ou tel type de lame d'eau, toute chose égale, par ailleurs.

#### 4.2.4. Le déplacement de la pluie

Le déplacement des averses peut influencer de manière sensible les valeurs du débit.

En hydrologie générale, ce problème fut soulevé par POINCARÉ (1873) 43 , qui affirma que "à hauteur de précipitations égales, une perturbation pluvieuse se déplaçant de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau engendre des maxima de crue plus importants qu'une perturbation se mouvant en sens inverse".

Du point de vue théorique, on peut montrer que si l'orage se déplace à contre-sens par rapport aux écoulements en conduites, les débits sont inférieurs aux débits provoqués par une pluie statique. Si l'orage évolue dans la direction de l'écoulement en conduite, les débits restent inférieurs à ceux observés

lors d'une averse statique à condition que la vitesse de déplacement de l'averse soit au moins le double de celle de l'écoulement en conduites [44].

Ce problème du déplacement est d'ailleurs d'autant plus aigu que les surfaces de bassins versants sont plus importantes (et que leurs formes sont plus allongées). Il ne peut absolument plus être occulté lorsque celles-ci sont considérablement plus importantes que la surface moyenne d'emprise d'un orage. Ainsi, le bassin versant drainé par le réseau d'assainissement de la Communauté Urbaine de Lyon (CO.UR.LY.) couvre-t-il quelques 600 km<sup>2</sup> à comparer à la dimension d'une cellule convective de l'ordre de quelques km<sup>2</sup>. Pour le développement du système informatique de simulation du fonctionnement du réseau lyonnais (système SERAIL) [6], CHOCAT et THIBAUT [16] ont élaboré plusieurs modèles prenant en compte le déplacement. Parmi ceux-ci, deux requièrent pour leur construction les mêmes informations que pour les autres pluies synthétiques que nous avons mentionnées plus haut.

#### Construction des pluies synthétiques avec déplacement proposée par CHOCAT [6]

A noter préalablement que l'orage est supposé posséder un épicycle et une loi de décroissance d'intensité simple - schéma pseudo-déterministe ou conceptuel. Le déplacement et la vitesse de l'orage correspondent à ceux de son épicycle.

Le principe de la méthode proposée est simple. Il consiste à tenter de reproduire en un ou plusieurs points d'une trajectoire, une pluie de projet synthétique ponctuelle (dont les caractéristiques sont définies comme précédemment, notamment pour ce qui concerne la durée totale et la durée intense).

On fixe a priori :

- le hyétogramme synthétique ponctuel
- la trajectoire : celle-ci est supposée rectiligne, la vitesse de déplacement et l'abattement spatial sont constants.

1) On veut une reproduction du hyétogramme en tous points de la trajectoire.

Les hypothèses prises en compte imposent :

- que l'intensité sous l'épicentre soit constante
- que le hyétogramme reproduit soit symétrique et qu'il ait la même forme que la loi de décroissance des intensités autour de l'épicentre (abattement spatial).

La solution choisie consiste à reproduire des hyétogrammes symétriques à décroissance exponentielle (méthode KEIFER - CHU de construction du hyétogramme en prenant des courbes I.D.F. obéissant à la loi de MONTANA (équation (5)  $i_M(D,T) = a(T) D^b(T)$  ).

Dans ces conditions, il faut choisir :

$$(36) \quad i(x) = i_{\max} (1 - \alpha(x)^{1/\beta})$$

$i_{\max}$  : intensité sous l'épicentre

$i(x)$  : intensité à la distance  $x$  de l'épicentre

Soit  $t_0$ , l'instant où l'épicentre se trouve en un point donné A de la trajectoire.

Aux instants  $t_0 - t$  et  $t_0 + t$ , l'épicentre sera à une distance  $x$  du point A tel que  $x = V \cdot t$ .

$V$  : vitesse constante du déplacement de l'épicentre

On obtient alors :

$$(37) \quad i(t_0 - t) = i(t_0 + t) = i_{\max} (1 - \alpha \cdot V^{1/\beta} \cdot t^{1/\beta})$$

à identifier au hyétogramme symétrique fixé, de période de retour connue.

Remarques

1/ la durée totale de l'épisode pluvieux D est telle que :

$$(38) \quad D = 2t_i \quad \text{avec} \quad 1 - \alpha \cdot V^{1/\beta} t_i^{1/\beta} = 0$$

d'où on tire :

$$(39) \quad D = \frac{2}{\alpha^\beta V}$$

2/ la hauteur totale précipitée en un point de la trajectoire est :

$$(40) \quad H = 2 \int_0^{t_i} i_{\max} \left[ 1 - \alpha \cdot V^{1/\beta} t^{1/\beta} \right] dt$$

$$(41) \quad H = \frac{D i_{\max}}{\beta + 1}$$

Les variables du modèle D,  $\beta$ , V,  $i_{\max}$ , permettant d'établir pour les points de la trajectoire, un hyétogramme de période de retour connue.

2) On utilise la même méthodologie si l'on veut une reproduction du hyétogramme en un point de la trajectoire A.

Seule une hypothèse est modifiée ; on suppose désormais que l'intensité à l'épicentre n'est pas constante  $i_{\max} = f(t)$ , fonction qui sera définie à partir du hyétogramme choisi en A.

Le problème se pose maintenant de déterminer la trajectoire et la vitesse du déplacement.

Différentes méthodes ont été proposées.

1/ - Une première méthode a été expérimentée en particulier sur le réseau dense de RUNGIS (9 pluviographes pour 192 ha) [39].

- Elle consiste à dégager une zone préférentielle du déplacement à partir de l'analyse des dates de début de période intense pour les différents pluviomètres. La vitesse est alors déterminée par le rapport de la distance, selon cette direction, séparant les postes pluviographiques (ou les barycentres dans le cas de plusieurs postes formant un bloc indissociable) sur la durée minimale de propagation du corps de l'averse.

- Une telle méthode fait largement place à l'intuition du projecteur, ce qui implique que :

- . son automatisation est difficile
- . les résultats sont grossiers et en tout état de cause ne peuvent être considérés que comme des "tendances".

D'autre part, la méthode s'est révélée absolument inadéquate dans deux cas sur les dix événements étudiés - pour ces cas, aucun résultat ne peut être affiché.

2/ Une autre méthode, plus sophistiquée, a été utilisée pour le dépistage des orages sur la Communauté Urbaine de Montréal (C.U.M.) [45] [37].

Elle a été développée comme étude préliminaire à un système de gestion de réseaux d'égoûts en temps réel avec anticipation du processus orageux.

Le réseau comprend dix-huit pluviographes dont deux de référence : celui de Ottawa et celui de l'aéroport de Dorval. Le pas de temps choisi pour cette étude est le pas de temps horaire (contraintes de matériel). Sur les 42 événements primitivement retenus, seuls 21 sont analysés (élimination des orages cycloniques, des événements à données manquantes ou anormales (?)... ).

La trajectoire des orages, supposée rectiligne, est obtenue à partir des résultats donnés par un programme de calcul et de traçage sur la zone considérée des isohyètes pour différentes durées.

Les orages se déplacent tous grossièrement, suivant un sens SO/NE (axe du Saint-Laurent). Pour les orages dont la trajectoire est approximativement l'axe Ottawa - Dorval (6 événements), on analyse la corrélation entre les hauteurs de pluie à Ottawa comparées à celles de Dorval pour différents décalages temporels (1 h - 2 h - 3 h ...).

Pour les orages dont la trajectoire est différente, on suppose un degré de proportionnalité entre les hauteurs de pluie, sur la ligne parallèle à la direction moyenne au centre de l'orage, passant par Dorval et cette même direction moyenne, aux différents pas de temps.

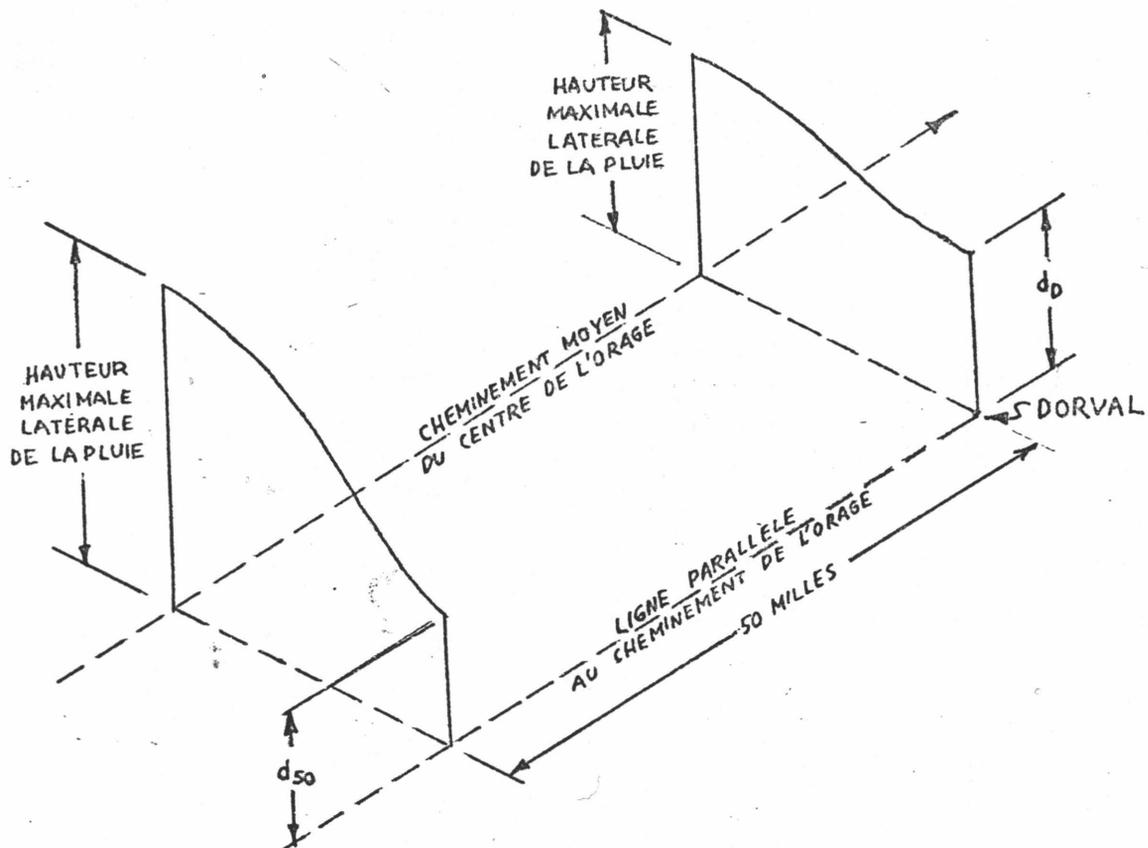


figure 28 : Loi de décroissance des hauteurs horaires tombées à partir de l'axe moyen de cheminement.

Sur le rayon de 50 miles (80,5 kilomètres) autour de l'aéroport de Dorval, c'est un décalage de une heure qui a donné le coefficient de corrélation le plus élevé entre  $d_{50}$  et  $d_D$ .

$d_{50}^t$  : hauteur précipitée horaire à 50 miles de Dorval suivant une direction parallèle à la trajectoire de l'orage, au pas de temps horaire  $t$ .

$d_D^t$  : hauteur précipitée horaire à Dorval, au pas de temps horaire  $t$ .

On obtient une formule  $d_D^{t+1} = 0,7246 D_{50}^t + 0.0214$  (42)

D'autres formules, faisant intervenir d'autres pas horaires, ont aussi été trouvées.

D'autres études ont été menées, que nous n'exposons pas, en particulier par NIEMCZYNSKICZ [33] à partir d'une méthodologie développée par HINDI [46] ...

D'une manière générale, on se rend compte que ces calculs de déplacement imposent au phénomène une simplification structurelle trop réductrice et ne correspondant absolument plus à la réalité phénoménale.

Très souvent, on observe non pas une, mais une multitude de cellules convectives ayant chacune leur dynamique propre. Il faut reconnaître que, dans ces cas, relativement courants, la complexité du réel n'est absolument pas traduite dans les modèles et c'est la définition même du déplacement qu'il faut remettre en question.

Si maintenant on s'attache non pas au phénomène en soi mais à l'importance que revêt sa prise en compte dans l'économie globale des paramètres nécessaires à la simulation, la situation reste assez confuse.

En effet, l'hétérogénéité des bassins versants urbains, en terme d'imperméabilisation, et la variabilité spatiale de la pluie sont des facteurs d'atténuation des effets du déplacement dans une proportion difficile à déterminer.

Pourtant, il a pu être montré, par simulation à l'aide du programme RERAM, mis au point par le L.H.M. de Montpellier (pluie de projet doublement triangulaire, abattement de la forme  $A^{-e}$ ), que les effets du déplacement sont

négligeables sur un bassin de  $10 \text{ km}^2$  imperméabilisé à 45 % [22]. Cette remarque conduit HEMAIN [22] à conclure que "la prise en compte du déplacement des averses dans les modèles de pluie ne s'impose pas, notamment s'il s'agit d'outils de projet".

Cette conclusion valable semble-t-il pour les petits et moyens bassins ( $< 10 \text{ km}^2$ ) est à prendre avec la plus grande circonspection s'il s'agit d'en étendre la validité aux grands bassins où les considérations théoriques précédemment citées ne peuvent plus être négligées.

Ainsi donc, il semble que nous soyons dans l'impasse. D'un côté la nécessité de mesurer "un déplacement" et de le caractériser statistiquement.

D'un autre, la difficulté de définir exactement "le déplacement" et de le calculer indépendamment des autres paramètres notamment la variabilité spatiale.

Heureusement, l'apparition sur la scène hydrologique de la mesure radar et de nouvelles méthodologies de calcul du déplacement liées au traitement de l'image permet de penser que les difficultés sont sur le point d'être levées [9] [50].

En effet, d'un point de vue qualitatif, le radar fournit une carte des réflectivités à différents instants et la déformation des images au cours du temps permet de "se faire une idée" des processus dynamiques mis en jeu pour chaque événement si, bien entendu, l'échelle d'observation radar concorde avec la taille des bassins versants étudiés.

Des essais sont d'autre part en cours [11], [9] pour obtenir des cartes d'intensités pluviométriques à partir des réflectivités radar par calage sur les mesures effectuées par les pluviomètres situés dans la zone d'influence du radar. Beaucoup de progrès restent à faire dans ce domaine. Quand aux nouvelles méthodologies proposées [10], [47], il nous semble intéressant de pouvoir les appliquer directement "aux images" de la pluie obtenues par interpolation d'un

réseau dense. La comparaison entre les résultats "image radar", "image réseau dense" et l'influence des inadéquations sur le calcul des débits permettra de jeter une lumière nouvelle sur le phénomène.

#### 4.2.5. Conclusions sur la pluie synthétique

Construire une pluie de projet sur un bassin versant donné, nécessite la détermination de différents paramètres :

- hyétogramme ponctuel
- variabilité spatiale
- le déplacement
- éventuellement, pour l'ajustement sur une pluie réellement observée, un réseau d'isohyètes en fonction du temps.

Si pour un hyétogramme ponctuel on peut admettre que les périodes de récurrence de l'événement définies à partir de la variable caractéristique (en général intensité moyenne maximale sur la période intense) sont relativement précises et fiables, l'intervention des deux derniers paramètres rend tout calcul de récurrence impossible et cela d'autant plus que ces paramètres prennent de l'importance lors de la simulation sur des bassins versants étendus.

Par exemple, quelle période de récurrence accorder pour une trajectoire de pluie définie, a priori par le projeteur ? Ainsi que le fait remarquer CHOCAT [6], seules des périodes de récurrence en certains points déterminés du bassin et pour certaines variables peuvent être obtenues.

D'autre part, si le bassin est suffisamment complexe et étendu, la non-linéarité de la transformation pluie - débit entraîne l'inégalité des périodes de récurrence correspondant aux pluies et aux débits qu'elles génèrent dans le réseau. La relation entre la période de récurrence pluie et de récurrence débit semble d'ailleurs extrêmement difficile à cerner.

Dans ces conditions, la pluie synthétique ne sera pratiquement utilisée que pour les petits bassins, l'étude et la gestion des grands réseaux faisant appel non pas à une seule simulation supposée caractériser telle ou telle période, mais à une série de simulations.

### 4.3. La simulation d'une série d'événements

#### 4.3.1. Simulation d'une série historique de pluies

La méthode la plus radicale consiste à simuler en continu le fonctionnement du bassin versant à partir des données collectées par un réseau de pluviomètres.

Cette méthode, inimaginable il y a quelques années, est désormais dans le domaine du possible, vu les progrès de la technologie informatique. Bien entendu, la masse d'informations à collecter est énorme, puisque les systèmes de simulation actuels supposent un pas de calcul de l'ordre de quelques minutes, et ce sur une période de plusieurs années pour obtenir des statistiques de débit fiables.

Ce type de simulation permet de tenir compte de manière très rigoureuse, de certains paramètres tels que le degré de saturation du sol à chaque instant, le degré de remplissage du réseau au début de l'événement ..., paramètres desquels les nord-américains font grand cas dans les modèles de simulation qu'ils ont développés (ILLUDAS ...). Il permet aussi de calculer l'évolution des teneurs en polluants divers dans les eaux usées et pluviales, lesquelles dépendent de manière importante des périodes sèches entre deux épisodes pluvieux consécutifs.

De telles simulations sont en cours d'étude aux U.S.A. et au Canada. Elles permettront, pour ce qui concerne les calculs de débit, une comparaison (au sens du modèle), des résultats donnés avec les résultats obtenus par introduction de pluies synthétiques.

Moins exigeant en temps calcul, mais toujours suivant la même perspective, on peut simuler le fonctionnement d'un réseau sur une période fixée, pour certaines pluies réelles enregistrées sur le bassin versant considéré, jugées caractéristiques.

Ainsi, une étude sur le bassin versant de Curotte-Papineau à Montréal en 1983, de surface  $8,6 \text{ km}^2$  à 49 % imperméabilisée, a été menée [48].

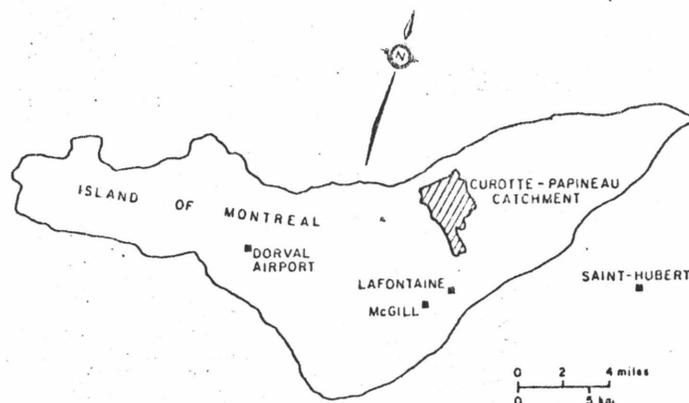


figure 29 : Le bassin de Curotte - Papineau dans l'île de Montréal ainsi que les postes de mesures avoisinants.

Cette étude consista à simuler le fonctionnement du réseau unitaire de Curotte-Papineau, sur une période de 10 ans, pour toutes les pluies telles que la période de récurrence de l'intensité moyenne maximale sur une durée comprise entre 5 minutes et 2 heures dépassât 0,25 ans. Les débits maxima à l'exutoire furent classés et des fréquences de dépassement obtenues dans quatre cas :

- pluie de KEIFER - CHU symétrique, sol saturé en début d'averse
- pluie de KEIFER - CHU symétrique, sol sec en début d'averse
- pluie de HUFF (2ème quartile), sol saturé en début d'averse
- pluie de HUFF (2ème quartile), sol sec en début d'averse.

Remarques sur les hypothèses de calcul :

- Les pluies synthétiques ont été bâties à partir des courbes I.D.F. tirées de la série pluviométrique de 10 ans, qui a servi pour la simulation historique.

- Aucun déplacement ni abattement spatial n'a été pris en compte.
- Le modèle de transformation pluie - débit est ILLUDAS.

Les résultats sont donnés sous la forme du graphe ci-dessous (p. 486 WRB).

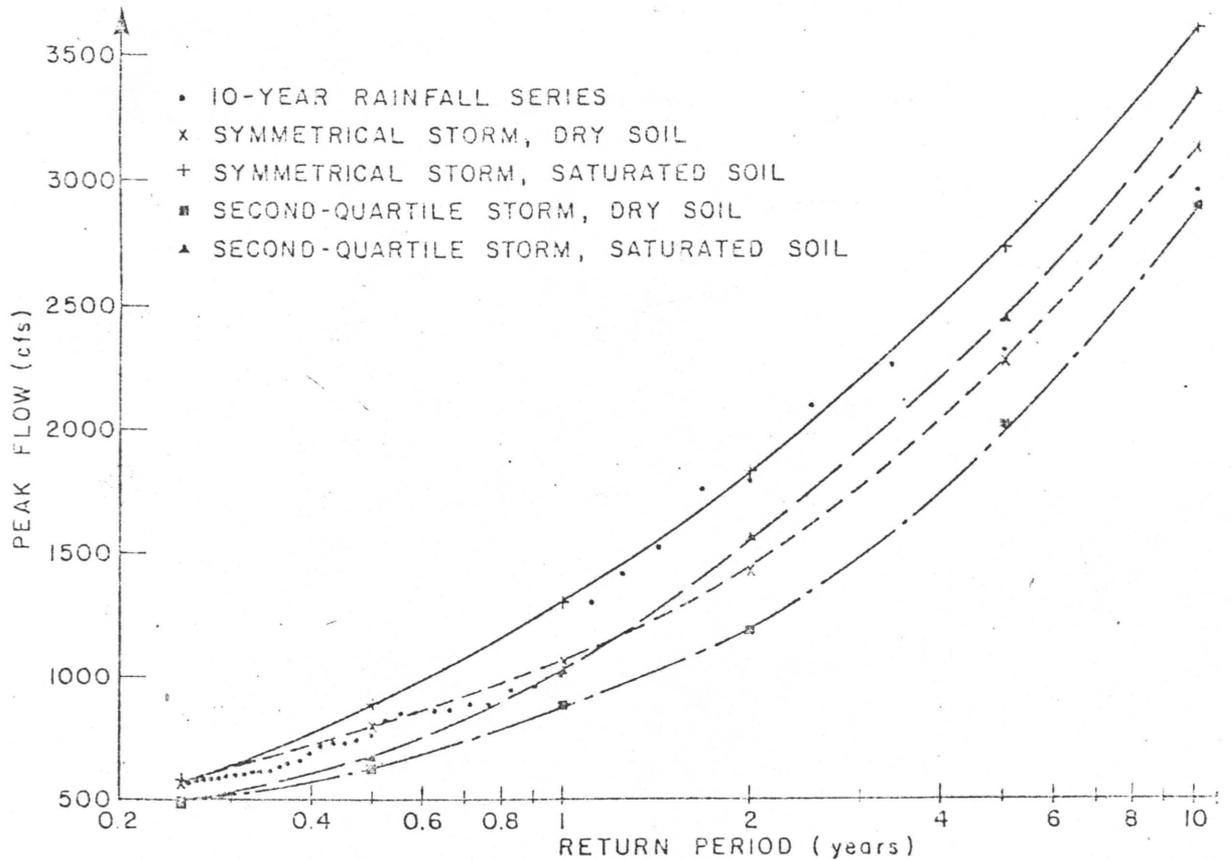


figure 30 : pointes de débit en fonction de la période de retour.

A propos des résultats

- On remarque d'abord la dispersion relativement faible des résultats obtenus par les différentes méthodes et aux différentes hypothèses dont il faudra s'assurer sur d'autres exemples (autres séries décennales et autres bassins versants).

- Malgré le caractère ponctuel de cette étude, les résultats obtenus dans l'étude de fonctionnement de ce bassin de Curotte-Papineau à Montréal (8,6 km<sup>2</sup>) nous confortent dans l'hypothèse que les pluies synthétiques, même

si elles ne prennent pas en compte de manière satisfaisante la variabilité spatiale et le déplacement, sont relativement fiables sur de petits bassins versants.

La méthodologie employée est, bien sûr, facilement transposable à tout bassin versant muni d'un réseau de pluviomètres, cependant, la méthode est extrêmement lourde. Aussi, un type de séries de simulation a-t-il été proposé, fondé sur une analyse statistique.

#### 4.3.2. La simulation de pluies générées statistiquement

La simulation de pluies statistiques a particulièrement été étudiée par le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier dans le cadre de l'élaboration du modèle RERAM [49] [28] [21].

La méthode consiste à retirer un certain nombre de paramètres de la pluie jugés critiques au sens du modèle de transformation pluie - débit en aval, et à étudier leur loi de probabilité (ajustement sur des lois exponentielles ou log-normales par exemple). On vérifie ensuite l'hypothèse d'indépendance stochastique entre ces paramètres (matrice de contingence entre les couples de paramètres testés à l'aide du test du  $\chi^2$ ). Dans l'affirmative, il suffit de composer simplement les divers paramètres pour obtenir une pluie statistique. Il ne reste plus alors à connaître que le nombre de pluies espéré pour la période de récurrence étudiée (ce paramètre obéit généralement à une loi de POISSON).

Pour ce qui concerne le modèle RERAM, nous avons déjà, en détail, dit quels sont les paramètres qui ont été retenus et comment (chapitre : pluies de projet ponctuelles 4.2.2., méthode de DESBORDES). On pourrait imaginer de rajouter un paramètre "déplacement" dans ce modèle, tiré d'une analyse statistique des observations. Pourtant, outre les problèmes évoqués au chapitre déplacement (4.2.4.), une autre difficulté provient de la déformation que le déplacement combiné à l'abattement fera subir au hyétogramme ponctuel en un point quelconque du bassin versant. Or, la forme double-triangle est une des caractéristiques de la pluie (!) [6].

Quoique moins dispendieuse en temps et moyens que la première, le principe de cette simulation nécessite encore un nombre important de calculs si l'on veut obtenir des résultats fiables pour des bassins étendus.

Aussi, un dernier type d'approche a-t-il été proposé, qui formule le problème de l'évaluation du fonctionnement du réseau d'assainissement d'une manière très différente, en s'affranchissant du concept de période de récurrence des dysfonctionnements.

#### 4.4. L'approche historique singulière [6] [16]

Cette dernière approche consiste à déterminer par simulation le fonctionnement du réseau, soumis aux événements les plus violents, observés sur ce réseau, dans un passé connu (5 ans, 10 ans, 20 ans ...) caractérisés spatialement et temporellement le plus finement qu'il est possible. Cette approche est certes beaucoup moins ambitieuse que les autres, puisqu'elle ne permet pas d'affecter une fréquence aux débits calculés, ni d'associer un risque aux dysfonctionnements éventuellement constatés. Pourtant, en terme de diagnostic, les résultats obtenus constituent autant d'arguments sur lesquels peuvent se fonder les décideurs et ils sont plus sûrs, au moins pour les grands bassins.

Par exemple, il sera possible de constater que si l'urbanisme avait été dans son état actuel, le réseau étudié aurait débordé une fois, vingt fois, etc ... dans les dix dernières années.

Dans l'état actuel de nos connaissances sur la pluviométrie et compte tenu des difficultés que nous avons signalées au cours des chapitres précédents, l'approche historique - singulière a été retenue, au moins dans un premier temps, pour exploiter les données obtenues à l'aide du réseau (dense ?) de pluviomètres enregistreurs installés sur la Communauté Urbaine de Lyon à partir du début de l'année 1983. Les modalités de l'expérimentation étant fixées, un système informatique d'archivage et d'exploitation des données recueillies fut mis au point, qui est plus particulièrement l'objet de notre travail. Mais avant de détailler ces derniers points, il nous semble à propos de revenir sur la genèse de cette expérience.

## 5. GENESE DE L'EXPERIMENTATION CO.UR.LY.

L'agglomération lyonnaise est la seconde agglomération française - 1 million cent mille habitants - Au fur et à mesure de la croissance urbaine, le réseau d'assainissement s'est étendu et densifié dans des proportions considérables et d'une manière que l'on peut qualifier d'anarchique - à savoir que les altérations successives de la configuration du réseau n'ont le plus souvent été opérées qu'en fonction de considérations ponctuelles et à court terme. Comment, d'ailleurs, aurait-il pu en être autrement, sans aucun outil permettant d'appréhender le réseau et son fonctionnement d'une manière globale, organique ?

Résultat : Sur un bassin versant d'une surface de 600 km<sup>2</sup>, un inextricable écheveau de 2 000 kilomètres de canalisations de toutes taille et géométrie dont la gestion s'avère extrêmement difficile. Or, étant donné l'importance des dépenses afférant à l'assainissement tant pour les extensions du réseau que pour la gestion de l'existant, sans parler des dégâts que peuvent occasionner les débordements, toute erreur de calcul peut être très coûteuse. Or, les développements récents de la technologie informatique ont rendu théoriquement possible une appréhension du fonctionnement de la totalité du réseau donc la possibilité d'une intervention la plus efficace et raisonnée, sur ce même réseau, pour en limiter les dysfonctionnements.

Un effort de recherche sur ce domaine a donc été entrepris à partir de 1974 à Lyon, en collaboration, entre le Service Assainissement de la CO.UR.LY., la société d'informatique communale ICARE et le Laboratoire Méthodes de l'I.N.S.A.. Il a permis de construire un ensemble d'outils informatiques autorisant la simulation généralisée du réseau lyonnais S.E.R.A.I.L. (Simulation des Ecoulements dans le Réseau d'Assainissement Inter urbain de Lyon) [6]. SERAIL est essentiellement un outil de diagnostic, il possède notamment en mémoire les caractéristiques structurales du réseau avec une très grande précision - plusieurs années d'effort ont été consacrées à ranger sur fichiers informatiques tous les paramètres nécessaires concernant la configuration du réseau.

Devant une telle précision, la connaissance du phénomène pluie variable d'entrée du système apparaissait notoirement déficiente. Le réseau existant mis en place par la Météorologie Nationale se compose de :

- 1 pluviographe à BRON permettant donc d'obtenir des intensités en fonction du temps
- 8 pluviomètres répartis sur le territoire de la CO.UR.LY. ne permettant que la connaissance des hauteurs journalières précipitées
- D'autres informations complémentaires peuvent être aussi publiées concernant notamment la direction et la vitesse des vents ...

La Communauté Urbaine de Lyon gèrait quant à elle, quelques appareils. Mais, pour remplir efficacement les objectifs qui lui sont assignés, le modèle SERAIL nécessite une caractérisation beaucoup plus fine de la pluie que celle que ces réseaux permettent d'obtenir. Il nécessite une bonne connaissance de la variabilité spatiale, associée à un pas d'intégration de la mesure de l'ordre de quelques minutes. Le décalage observé entre le degré de précision disponible et celui qui est nécessaire, rend inutiles la plupart des sophistications du modèle [51].

C'est pourquoi, en 1983, avec l'appui financier du Plan Urbain et de l'Agence Financière de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse et avec le concours de la Météorologie Nationale, il a été décidé d'implanter un réseau de pluviomètres enregistreurs sur le territoire communautaire. Ce réseau comporte actuellement 25 appareils sur les 30 prévus, les mesures sont effectuées à pas de temps constant, comptabilisées toutes les 6 minutes, automatiquement.

RESEAU CLIMATOLOGIQUE DEPARTEMENTALE

Figure 31

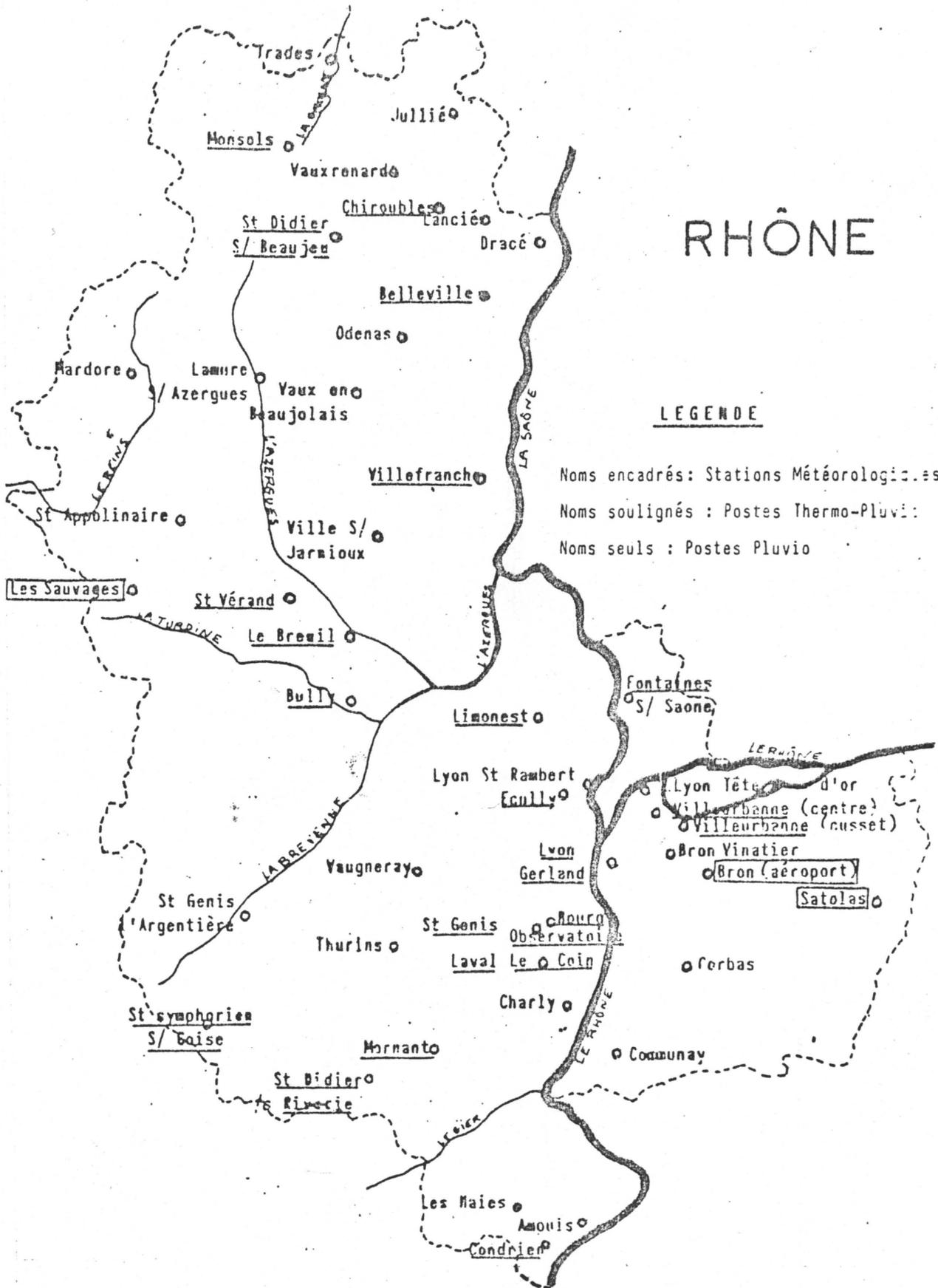
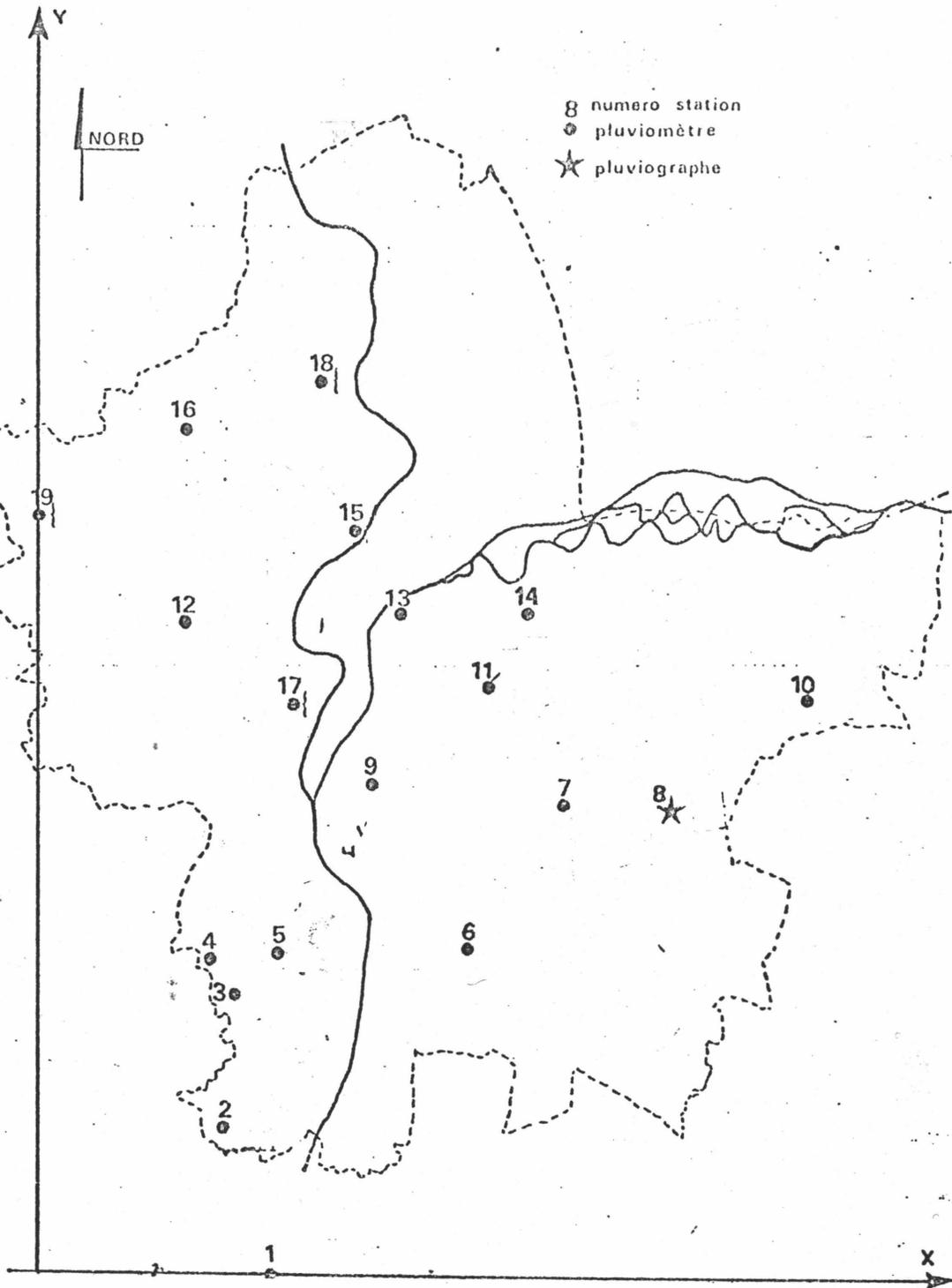


Figure 32



CARTE DE L'ANCIEN RESEAU DE MESURE

1 pluviographe  
18 pluviomètres

CHAPITRE 2  
L'EXPERIMENTATION

*"L'explication s'accomplit dans l'examen des faits - lequel est assumé dans les sciences de la nature - selon le champ de l'examen et le but de l'explication, par l'expérience (das Experiment). Ce n'est point cependant par l'expérience que les sciences de la nature deviennent essentiellement recherche, au contraire, l'expérience ne devient possible que là où la connaissance de la nature comme telle s'est transformée en recherche".*

HEIDEGGER "Holzwege"

## 1. DESCRIPTION DU RESEAU

### 1.1. Caractéristiques sommaires et comparaisons

Sur le territoire de la CO.UR.LY., il a été décidé d'équiper 30 sites. La densité du réseau est donc 1 appareil tous les 20 km<sup>2</sup> sur une surface totale de 600 km<sup>2</sup>. Le pas de temps d'intégration de la mesure est 6 minutes.

A titre de comparaison, nous citons les caractéristiques d'un certain nombre de réseaux mis en place tant en France qu'à l'étranger.

- La bassin de l'Orgeval, dans la région parisienne, géré par le CEMAGREF : 21 pluviographes sur 100 km<sup>2</sup>, enregistrement de la mesure sur support magnétique, toutes les 36 minutes en 1981 [55].

- Le bassin de Rungis : 9 pluviographes sur 1,94 km<sup>2</sup>, la vitesse de déroulement du papier d'enregistrement pluviographique (entre 30 et 60 mm/h suivant les cas) permettait, d'après les expérimentateurs, une précision temporelle inférieure à 2 minutes (?) en 1982 [39].

- Le bassin de Lund (Suède) : 12 appareils sur 25,2 km<sup>2</sup>, base de temps utilisée de l'ordre de 5 minutes en 1984 [32].

- Le réseau de Montréal (Canada) : 9 appareils sur 466 km<sup>2</sup>, base de temps utilisée : 1 heure en 1984 [36].

- L'E.D.F. gère des réseaux de pluviomètres avec enregistrement in situ, sur support magnétique, toutes les 6 minutes depuis 1981 [54], mais nous n'avons pas de renseignements sur la densité des réseaux.

- La Communauté Urbaine de Bordeaux (C.U.B.) et les D.D.E. de Seine-Saint-Denis et Seine-et-Marne gèrent elles-aussi des réseaux comparables au réseau CO.UR.LY..

## 1.2. Choix de la densité du réseau et du pas de temps

Est-il possible d'obtenir une description adéquate de la pluie comme phénomène évolutif spatialement distribué à l'aide de l'outil d'observation mis à notre disposition, à savoir le réseau de 30 postes dont la base de temps est 6 minutes ?

L'adéquation dont il s'agit fait intervenir un équilibre subtil entre trois exigences :

- caractériser l'objet tel qu'en lui-même - surprendre un en-soi mathématique de l'objet

- la reconnaissance des objectifs de l'étude - à quoi cela nous sert-il d'avoir une description de l'objet ?

- la reconnaissance des contraintes - temps, financement, outils informatiques, mathématiques, conceptuels ... -

Ces exigences mi-contradictoires, mi-complémentaires, constituent une économie à partir de laquelle le chercheur développe son intuition, son intelligence de l'objet.

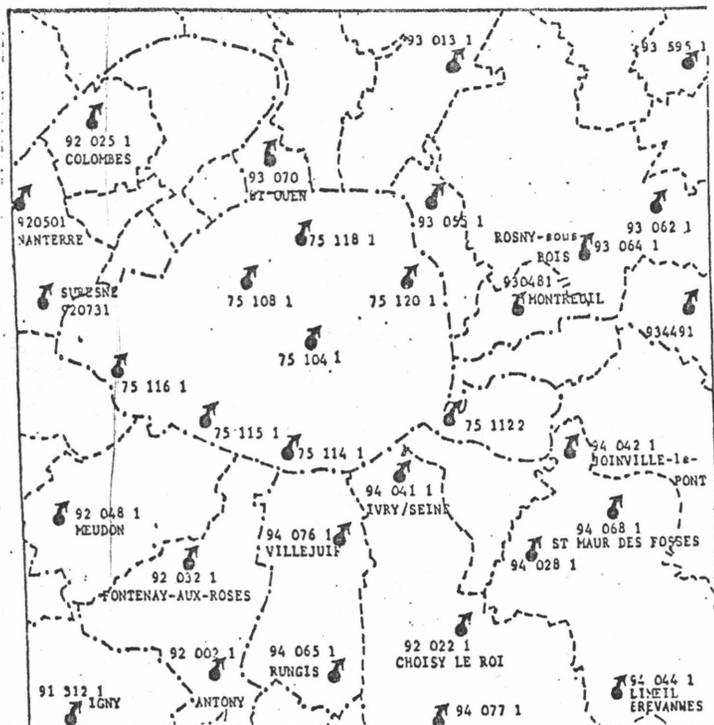
### 1) L'objet tel qu'en lui même

Des études furent menées par le L.H.M. en 1977, sur l'effet de la densité du réseau dans la quantification de la lame d'eau [63] [64].

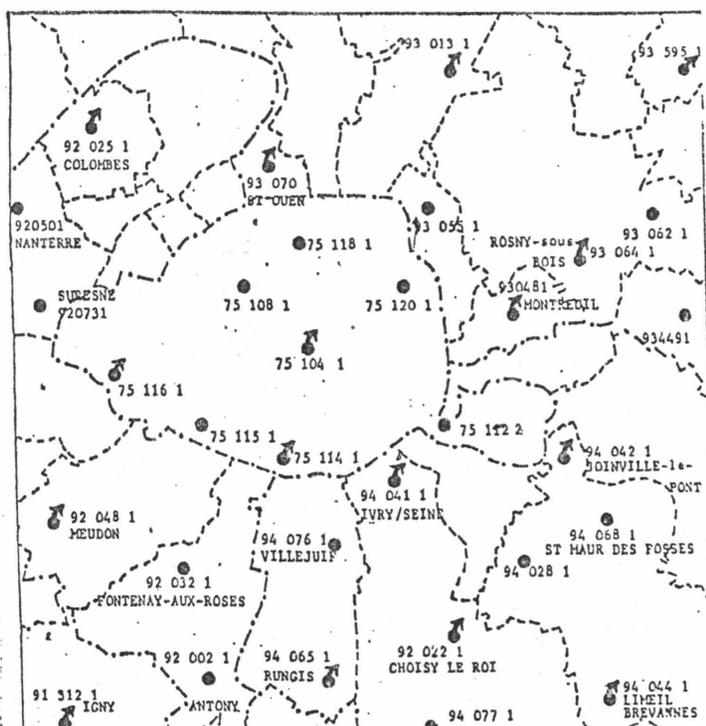
Sur une zone de 25 km, sensiblement centrée sur Paris, pendant une période de 14 ans (1960 - 1973), 32 stations ont été retenues ayant fonctionné de manière continue - soit une densité de 1 poste pour 20 km<sup>2</sup>.

A partir du réseau primaire, par suppression de certains postes, ont été définis :

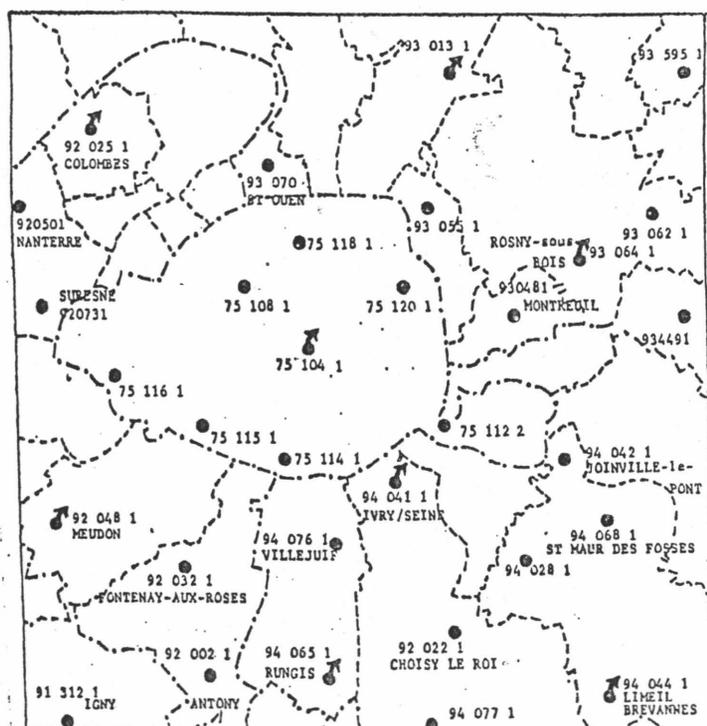
- un réseau de densité intermédiaire - 1 poste pour 40 km<sup>2</sup>
- un réseau de densité inférieure - 1 poste pour 80 km<sup>2</sup>.



Stations retenues pour la densité supérieure



Stations retenues pour la densité intermédiaire



Stations retenues pour la densité inférieure

Légende :

- 📍 poste pris en compte
- poste non pris en compte

L'étude se décompose en plusieurs phases :

1) Pour des valeurs seuil fixées de hauteur journalière précipitée (35 - 40 - 53 - 58 - 64 mm), le nombre d'événements repérés a été comptabilisé pour chacun des réseaux. Un événement est repéré, pour une hauteur seuil donnée, si le seuil a été dépassé, sur au moins un des postes du réseau.

2) Pour chaque événement, et chaque réseau, les isohyètes ont été calculées à partir de trois méthodes d'interpolation différentes : THIESSEN, interpolation linéaire avec lissage manuel, interpolation multiple (barycentre sur plus de 2 postes).

Malgré des différences parfois sensibles dans l'évaluation des surfaces suivant les différentes méthodes, les conclusions sur la densité du réseau restent identiques :

- Le nombre d'événements repérés est significativement différent pour les trois réseaux

- Les réseaux de faible densité surestiment les surfaces d'orages qu'ils repèrent.

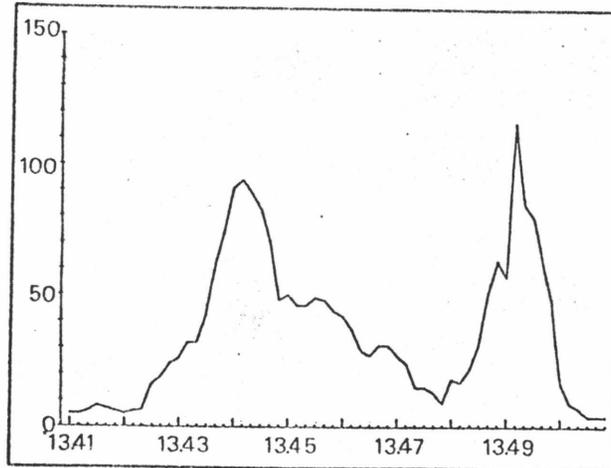
Les courbes obtenues semblent montrer que la densité 1 poste pour 20 km<sup>2</sup> est insuffisante pour bien caractériser le phénomène. Les auteurs proposent une densité de 1 poste pour 10 km<sup>2</sup> ou même 5 km<sup>2</sup> sur une surface de 100 km<sup>2</sup> pour arriver à "stabiliser les courbes". Soit 60 à 120 postes sur la CO.UR.LY. (!) et encore pour déterminer les hauteurs totales précipitées.

En ce qui concerne le pas de temps, il semble de même qu'un intervalle de 6 minutes n'est pas suffisamment petit pour que l'on puisse négliger un "effet d'échelle".

Ainsi, les essais expérimentaux d'un nouveau pluviographe à capteur de pression et faible temps d'intégration [65] ont montré que sur une période de

l'ordre de 10 secondes, des pointes supérieures à 100 mm/h apparaissent qui seraient complètement masquées si le pas d'intégration dépassait la minute.

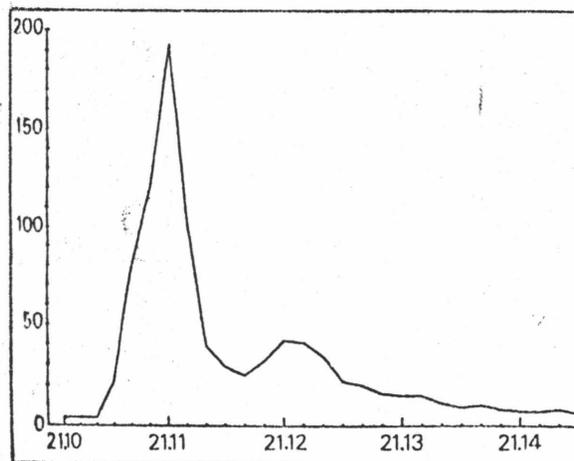
intensité en mm/h



date (h, mn)

Événement du 02.09.79  
CNET - Issy-les-Moulineaux

intensité en mm/h



date (h, mn)

Événement du 08.11.79  
CNET - Issy-les-Moulineaux

figure 36

Remarque : Le pas de temps de mesure est de 10 s dans les deux cas.

Que faire alors ? Reprogrammer la base de temps de nos pluviomètres à 1 minute ou même moins ?

Solution métrologiquement inacceptable. En effet, le principe de la mesure sur nos appareils consiste à évaluer une hauteur d'eau avec un incrément de 0.2 mm. Si la durée  $\Delta t$  retenue est trop petite, il est possible que la quantité d'eau tombée soit indécélable ( $< 0.2$  mm) quand bien même l'intensité serait non négligeable ( $I = \frac{\Delta h}{\Delta t}$  avec  $I$  fini grand quand  $\Delta h \rightarrow 0$   $\Delta t \rightarrow 0$ ). Inversément, on peut obtenir un basculement alors que la hauteur précipitée est minime (la goutte d'eau qui fait déborder l'auge !). Pour des durées infimes, le phénomène sera donc considérablement déformé, sans parler des erreurs de comptabilisation des volumes d'eau (éclaboussement ...) qui prennent une importance démultipliée. 5 minutes représentent, à notre avis, la limite inférieure des pas d'intégration autorisés par la mesure à augets basculeurs.

Ainsi, tant spatialement que temporellement, notre instrument de mesure se révèle trop grossier pour effectuer une mesure "objective", pour que sa médiation pût être oblitérée dans l'acte de perception de l'objet. Tant spatialement que temporellement, "les courbes ne sont pas stabilisées".

Pourquoi d'ailleurs ne pas révoquer en doute cette hypothèse que les courbes se stabiliseront tôt ou tard ? Tentative audacieuse certes, puisqu'elle jette à bas toutes les hypothèses communément admises de continuité spatio-temporelle du phénomène, au moins localement. C'est pourtant ce que LOVEJOY et MANDELROT ont tenté en proposant un modèle fractal de la pluie ([66], [67], [68]).

De quoi s'agit-il ?

Appelons  $\Delta R$  le changement de tout flux de pluie d'un orage. Soit  $Pr [\Delta R > \Delta r]$  la probabilité d'observer un changement  $\Delta R$  supérieur à  $\Delta r$  on a :

$$(43) \quad Pr [\Delta R > \Delta r] \sim (\Delta r)^{-\alpha} \quad \text{avec } \alpha \sim 5/3$$

Or, on montre mathématiquement que si  $\alpha < 2$ , les fluctuations sont si grandes que la fonction change de façon discontinue. Ce type de relation admet des propriétés mathématiques intéressantes.

1/ La variance de probabilité est infinie

2/ La valeur la plus large d'un échantillon aléatoire d'une telle distribution est presque certainement du même ordre de grandeur que la somme de tous les autres.

Ceci se traduit par un comportement erratique à toutes les échelles. D'autre part, en analysant le rapport entre les aires et les périmètres des régions de pluie et de nuages entre  $1 \text{ km}^2$  et  $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ , LOVEJOY montre que les projections des formes des aires de pluie n'ont pas d'échelle caractéristique, qu'elles ont donc des formes fractales. L'échelle caractéristique de l'objet est celle à partir de laquelle on peut supposer que la mesure de l'objet ne dépend plus de l'unité de mesure employée. Les objets fractaux n'admettant pas d'échelle caractéristique, n'ont pas de contenu intrinsèque.

En approfondissant ces deux aspects du phénomène, LOVEJOY propose de construire des pluies suivant un modèle aléatoire. Les résultats obtenus semblent "réalistes".

Notre perspective est différente, puisque pour nous, il ne s'agit pas tant de construire une pluie qui pourrait se produire, mais plutôt de reconstituer une pluie qui s'est effectivement produite.

Le travail proposé par LOVEJOY sur la fractalité hypothétique de la pluie présente pourtant, de notre point de vue, un intérêt évident, notamment en ce qu'il insiste sur l'irréductibilité de la notion d'échelle d'observation, pour évaluer les diverses grandeurs. La démarche réductionniste pure, s'ingéniant à reproduire l'objet jusqu'en ses irrégularités et ses dyshomogénéités les plus fines doit être abandonnée, elle n'est pas pertinente ; pertinence s'inscrivant non plus en terme d'adéquation absolue à l'objet mais relativement à une possibilité d'action de l'homme sur cet objet, et à ses limites.

## 2) L'objet en rapport au modèle SERAIL

Dans le cas qui nous intéresse, l'objet pluie est caractérisé en fonction du modèle de simulation ruissellement écoulement SERAIL.

Sa description fait intervenir des fonctionnelles du temps et de l'espace, en particulier la fonctionnelle  $I(x,t)$  - intensité pluviométrique - définie dans l'espace quadrimensionnel à partir d'un nuage de mesures obtenues par le réseau.

Les caractéristiques de l'outil de mesure résultent d'un compromis entre les contraintes financières, une description de l'objet à une échelle spatio-temporelle permettant de maximiser l'efficacité des modèles de simulation en aval et certaines recommandations extérieures ponctuelles (Office de la Météorologie Nationale).

Bien sûr, les cellules convectives les plus petites, celles qui produisent les intensités pluviométriques les plus fortes (  $5 \text{ km}^2$  selon [69] ), et les plus instables, risquent d'être ignorées par le réseau.

Bien sûr, les pointes d'intensité ponctuelles seront noyées, du fait du pas de temps d'intégration.

Mais il n'est pas certain que ces imprécisions altèrent de manière significative les résultats sur les débits obtenus par le modèle, lorsqu'il simule le fonctionnement du réseau sur la totalité du bassin versant, soit les  $600 \text{ km}^2$ .

DESBORDES notait déjà, lors de ses recherches pour l'élaboration de pluies adaptées au modèle RERAM, que l'introduction d'une composante aléatoire dans la construction de la pluie de projet ne modifie généralement pas de manière significative les résultats obtenus sur des débits de pointe [28]. Les bassins versants, les réseaux de drainage, opèrent un lissage des flux temporellement et spatialement. Ainsi, il est permis de penser que le non-repérage des cellules à fortes intensités sera au moins en partie compensé par la surestimation des surfaces à intensités moyennes, du moins pour nombre de cas d'étude.

### 1.3. Le choix des sites

Le choix des sites doit répondre à plusieurs exigences quelquefois difficilement compatibles [51], [59].

En premier lieu, le constructeur de l'appareil définit un certain nombre de contraintes sur le site pour diminuer les effets dus à la turbulence.

Il faut installer le pluviomètre au centre d'un terrain plat découvert dont la plus grande dimension dégagée sera située dans l'axe des vents dominants et à une distance de tout obstacle égale à quatre fois la hauteur de cet obstacle (pour limiter les effets de turbulence). Le sol environnant doit être recouvert d'herbes, de plantes, dont la hauteur n'excède pas 30 centimètres ou, à la rigueur, de gravier. La présence d'arbres ou de haies éloignés est également recommandée (pour atténuer le déplacement horizontal des gouttes).

Des considérations relatives à l'accessibilité du site exige que le terrain choisi soit communautaire, municipal ou public, sans que l'accès en soit trop libre, de façon à limiter les risques de vandalisme.

La pose des installations doit nécessiter le moins de travaux possibles - ancrage du pluviomètre, raccordement au secteur ...

En dernier lieu, les appareils doivent être assez uniformément répartis sur la CO.UR.LY., bien que les zones topographiquement accidentées semblent nécessiter, a priori, une densité plus forte.

#### Liste des sites et positions

Sur les 30 postes prévus, seuls 25 fonctionnent à la date d'Août 1985.

- 1) Liste et emplacement
- 2) Classification sommaire des sites

1)

VILLEURBANNE : 1  
JONAGE : 2  
SAINT-PRIEST : 3  
MIRIBEL : 4  
GERLAND : 5  
PIERRE-BÉNITE : 6  
NEUVILLE : 7  
COUZON : 8  
LA FEYSSINE : 9  
GENAS : 10  
CORBAS : 11  
MIONS : 12  
LOYASSE : 13

SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14  
SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15  
LIMONEST : 16  
POLEYMIEUX : 17  
LA-TOUR-DE-SALVAGNY : 18  
COLLONGES : 19  
SAINT-GENIS-LES-OLLIERES : 20  
SOLAIZE : 21  
PARC-DE-LA-TÊTE-D'OR : 22  
GENAY : 23  
LES BATTIÈRES : 24  
BRON : 25

Liste des pluviomètres installés

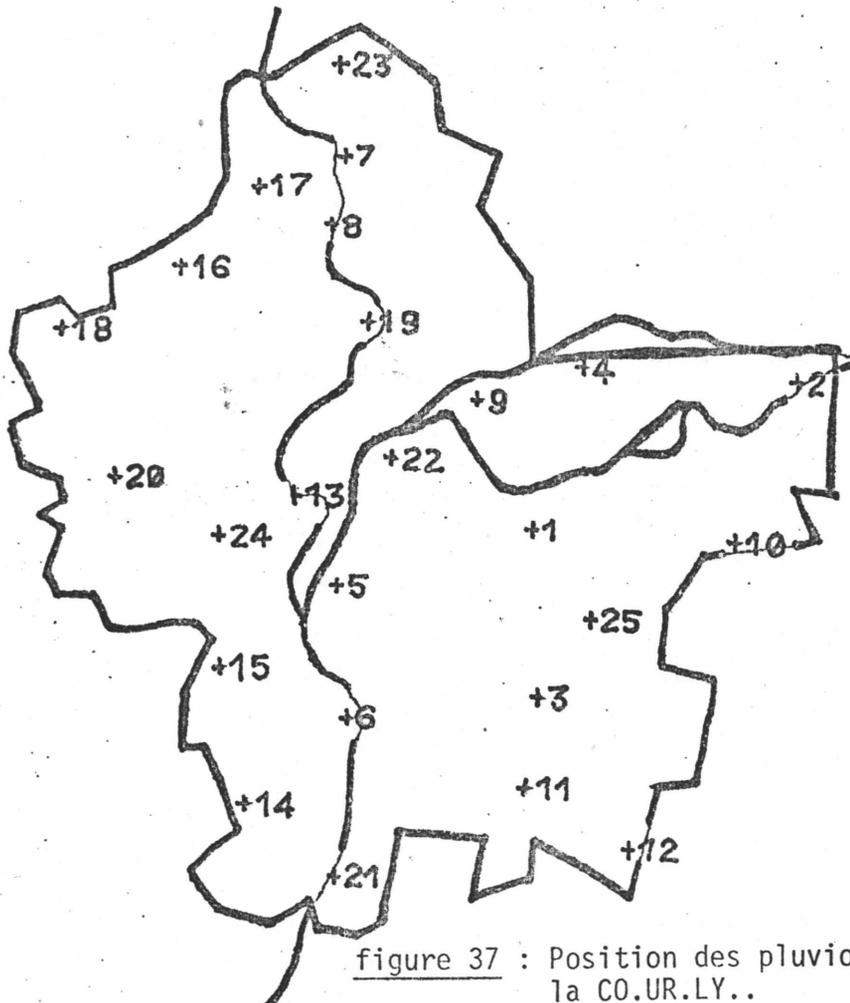


figure 37 : Position des pluviomètres sur le domaine de la CO.UR.LY..

2) Classification des sites

NUMERO ET NOM DU POSTE	PROPRIETAIRE DU SITE	UTILISATION DU SITE	ACCES DU SITE	EMPLACEMENT DE L'ENREGISTREUR
VILLEURBANNE : 1	COURLY (Subdivision de l'assainissement)	Bâtiments administratifs	2	Intérieur
JONAGE : 2	COURLY	Station d'épuration	3	Intérieur
ST PRIEST : 3	COURLY (Subdivision de l'assainissement)	Bâtiments administratifs	2	Extérieur
MIRIBEL : 4	Syndicat des communes	Parc de loisirs	1	Intérieur
GERLAND : 5	COURLY (Atelier de l'assainissement)	Bâtiments administratifs et entrepôts	2	Intérieur
PIERRE BENITE : 6	COURLY	Station d'épuration	3	Intérieur
NEUVILLE : 7	COURLY	Station d'épuration	2	Intérieur
COUZON : 8	COURLY	Station d'épuration		Intérieur
LA FEYSSINE : 9	COURLY	Ile de captage des eaux de la nappe phréatique	3	Intérieur
GENAS : 10	COURLY	Décharge	3	Intérieur
CORBAS : 11	COURLY	Bassin de rétention	3	Intérieur
MIONS : 12	COURLY	Zone de captage du service des eaux	2	Intérieur
LOYASSE : 13	Ville de Lyon	Cimetière	1	Intérieur
CHARLY : 14	Etat	Lycée agricole	2	Extérieur

Classification des sites (suite)

NUMERO ET NOM DU POSTE	PROPRIETAIRE DU SITE	UTILISATION DU SITE	ACCES DU SITE	EMPLACEMENT DE L'ENREGISTREUR
PRESSIN : 15	Institution privée	Lycée agricole	1	Extérieur
LIMONEST : 16	Institution privée	Lycée agricole	3	Extérieur
POLEYMIEUX : 17	COURLY (Service des eaux)	Station de pompage	2	Intérieur
LA TOUR DE SALVIGNY : 18	COURLY	Hangar pour matériel de sapeurs pompiers bénévoles	2	Intérieur
COLLONGES : 19	Commune de Collonges	Terrain de sport	1	Intérieur
SAINT-GENIS-LES-OLLIERES : 20	Commune de Saint-Genis	Terrain de sport	1	Intérieur
SOLAIZE : 21	Institut français du pétrole	Bureaux administratifs et laboratoires	3	Intérieur
TETE D'OR : 22	Ville de Lyon	Parc de loisirs	2	Intérieur
GENAY : 23	Commune de Genay	Terrain de sport	1	Extérieur
LES BATTIERES : 24	Ville de Lyon	Gymnase	1	Extérieur
BRON : 25	Météorologie	Station météorologique	3	Extérieur

LEGENDE

Accès au site	1 : FACILE	N'importe qui peut sans moyen particulier accéder au poste (ex. : franchir un petit grillage dans une aire non surveillée)
	2 : DIFFICILE	Accès fermé, surveillé la plupart du temps, ou site fermé dans un endroit retiré
	3 : TRES DIFFICILE	Accès fermé constamment surveillé.
Emplacement de l'enregistreur	EXTERIEUR	Le boîtier est posé sur un mur extérieur, à portée de tout individu ayant pénétré sur le site
	INTERIEUR	Le boîtier est posé, à l'intérieur d'un local fermé à clefs.

REMARQUES CONCERNANT LA MESURE SUR CERTAINS POSTES (au 14 octobre 1985)VILLEURBANNE : 1

Dégradations : En premier lieu, il a été constaté un vol systématique des contacteurs à mercure, volés sitôt remplacés. On a posé un cadenas sur le poste. Le poste a ensuite subi une attaque de pur vandalisme, le poste a été endommagé mais aussi l'enregistreur, qui était premièrement posé à l'extérieur du bâtiment. On a alors procédé à la réparation du poste et au transfert de l'enregistreur à l'intérieur des locaux.

Autres remarques : Les sites de Gerland et Saint-Priest ont une situation très comparable au site de Villeurbanne, ils n'ont pourtant pas posé ces problèmes aigus de dégradation malveillante des appareils.

JONAGE : 2

- Pas de réchauffage du cône de réception (d'où mesures incertaines par temps neigeux)
- Poste surélevé d'une cinquantaine de centimètres.

MIRIBEL : 4

- Pas de réchauffage du cône de réception
- Le site abrite une station météorologique (pluviomètre).

PIERRE-BENITE : 6

- Présence de pompes branchées au même réseau que le pluviomètre, l'installation électrique pose certains problèmes et a déjà été refaite une fois (⇒ enregistrements non entièrement récupérables).

COUZON : 8

- Présence de pompes branchées sur le même réseau (⇒ parasitage - corrections automatiques suffisantes).

CORBAS : 11

- Présence de pompes branchées sur le même réseau ( $\Rightarrow$  parasitage - corrections automatiques suffisantes).
- Poste situé au bord d'un dénivelé important

MIONS : 12

- Présence de pompes branchées sur le même réseau ( $\Rightarrow$  parasitage - corrections automatiques suffisantes)

LOYASSE : 13

Le poste a subi une dégradation accidentelle (heurté par un engin tracteur), des protections n'ont cependant pas pu être mises en place (barrières) cela dû à la nature particulière du site, laquelle a d'ailleurs entraîné des difficultés et des coûts d'installation importants (pose de cablages très longs pour contourner les tombes, réfection des chaussées).

CHARLY : 14

- Présence d'une station météorologique (pluviomètre)
- Présence d'arbres élevés aux environs du poste.

LIMONEST : 16

- Le poste n'est pas alimenté par le réseau et fonctionne sur pile. A chaque relevé, on procède au changement d'enregistreur pour éviter de recharger sur place les batteries.
- Présence d'un pluviomètre météorologique.

POLEYMIEUX : 17

L'horloge de l'enregistreur est défectueuse d'où une sérieuse dérive et des pas de temps irréguliers.

COLLONGES : 19

- Poste situé sur un fort dénivelé.

SAINT-GENIS-LES-OLLIERES : 20

- L'enregistreur est situé dans un local fermé à clefs qui sert de buvette après le match de football dominical. Depuis plusieurs mois, on constate un vol systématique de la cassette située dans l'enregistreur, sans effraction. Le problème reste posé.
- Présence de hautes herbes entourant le poste.

TETE D'OR : 22

- Présence d'une station météorologique (pluviomètre)
- Présence d'arbustes élevés à proximité immédiate du poste, ainsi que d'autres obstacles divers.

LES BATTIERES : 24

- Présence d'herbes hautes et de broussailles à proximité immédiate du poste.

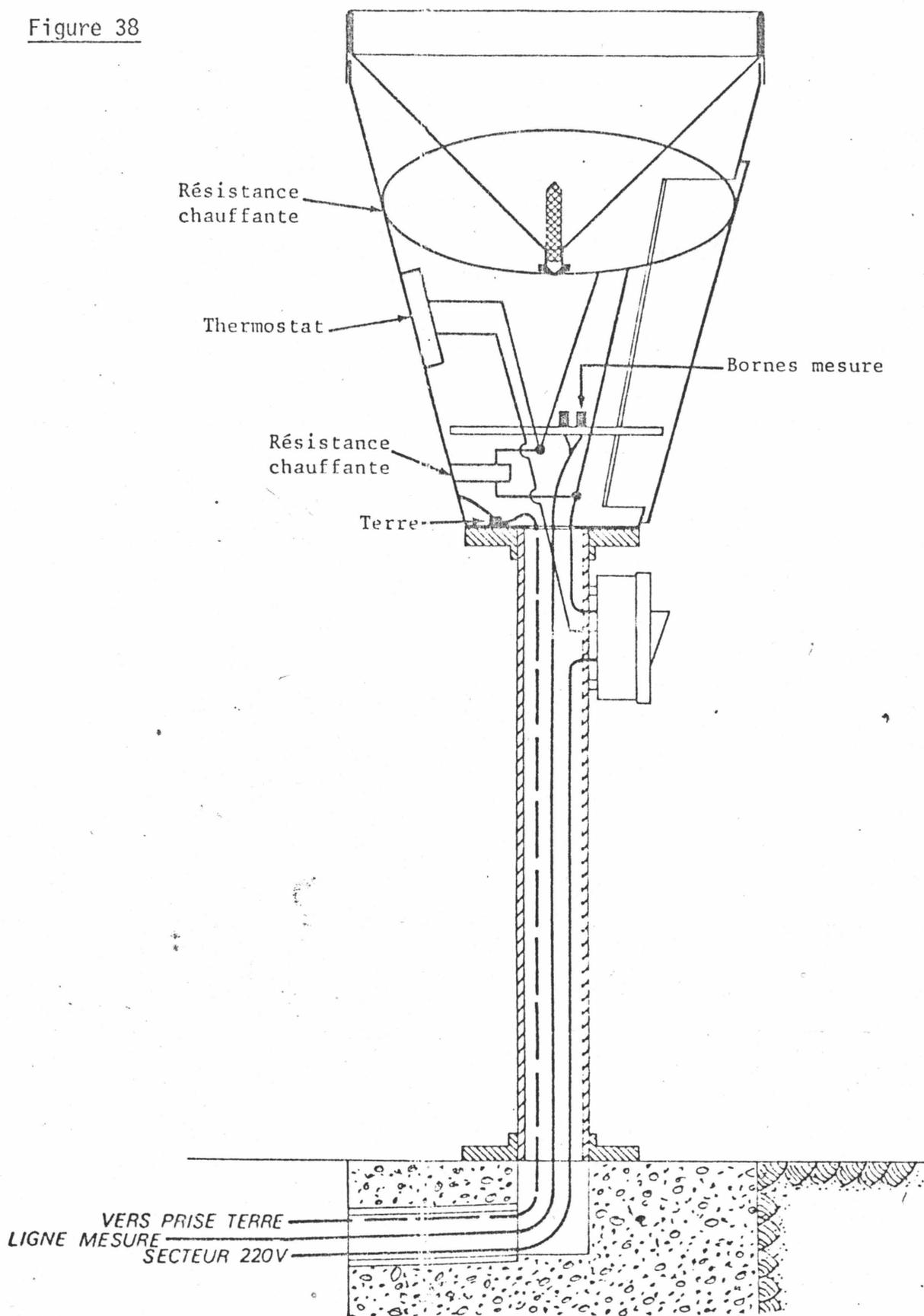
BRON : 25

- Présence d'un pluviomètre enregistreur sur cassette.

### 2.1. Le pluviomètre [8] [52]

L'appareil choisi est un pluviomètre transducteur à impulsions ROI 3030A Précis Mécanique, agréé par l'Office de la Météorologie Nationale. L'appareil permet la mesure et la totalisation à distance sur support magnétique des hauteurs de précipitations recueillies au sol.

Figure 38



SCHEMA DE CABLAGE DU PLUVIOMETRE

Principe de mesure :

L'eau provenant de précipitations à l'état liquide ou l'eau de fusion de neige ou de grêle, recueillie dans la bague réceptrice de surface  $1\ 000\text{ cm}^2$ , est canalisée par le cône de réception et un petit entonnoir s'écoule sur un déflecteur et se déverse dans l'un des deux augets du transducteur volumétrique.

Lorsque la contenance d'incrément de l'auget ( $20\text{ cm}^3$ ) est atteinte, celui-ci bascule brusquement, provoque la fermeture brève du circuit électrique, déverse son contenu d'eau à l'extérieur.

Le second auget se place alors en position de remplissage puis à son tour bascule, lorsque la masse d'eau requise est atteinte.

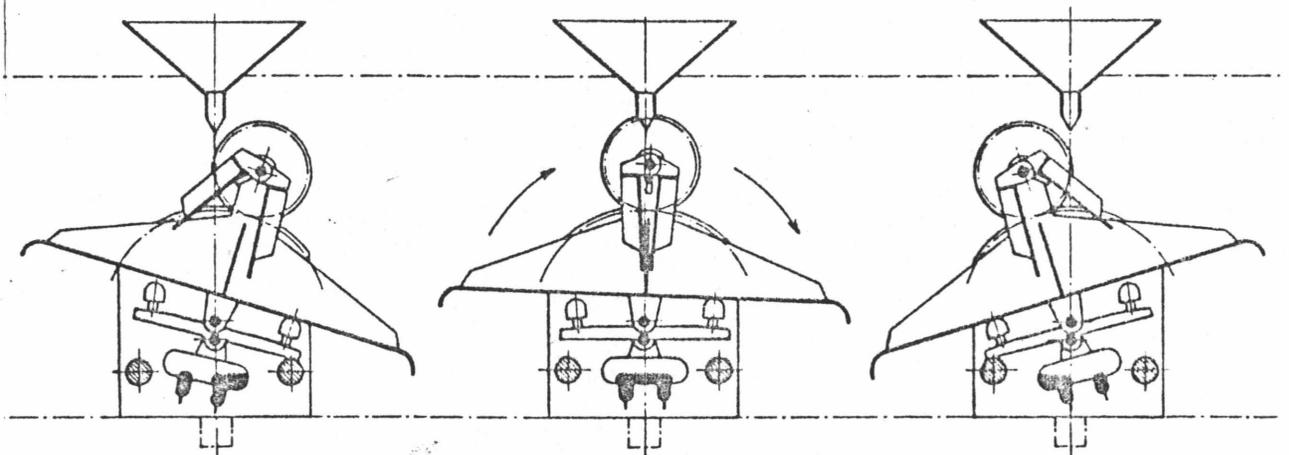


figure 39 : Schéma des augets

A chaque basculement - correspondant donc théoriquement à une hauteur précipitée de  $0.2\text{ mm}$  - la fermeture du circuit provoque une impulsion électrique dans l'enregistreur. Celui-ci les comptabilise sur une période de temps fixée à 6 minutes.

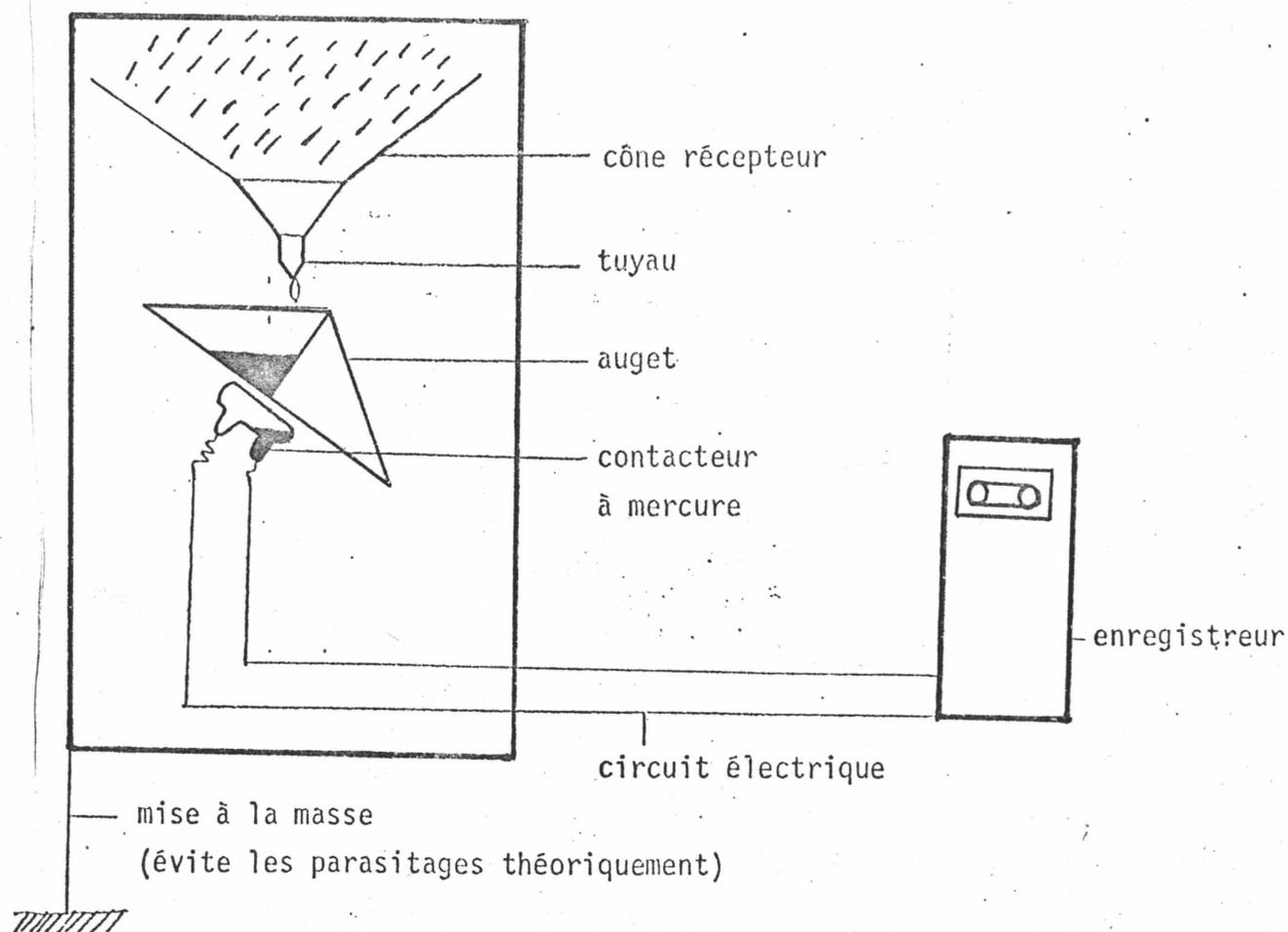


figure 40 : Schéma de principe de l'installation

Remarque :

Un dispositif de chauffage a de plus été monté sur le pluviomètre, à l'instigation de l'Office de la Météorologie Nationale, qui permettra aussi des mesures, dans le cas de précipitations solides ou de gel - mesures a priori, peu intéressantes dans la perspective hydrologie urbaine - du moins dans la région lyonnaise.

2.2. Enregistrement in situ ou télémétrie ?

En ce qui concerne le stockage de l'information, deux types de solutions ont pu être envisagés [7]

## 1°) Enregistrement in situ sur support magnétique

Principe.

Le nombre de basculements comptabilisés, toutes les six minutes, est enregistré sur une mini-cassette in situ. Chaque mini-cassette est relevée une fois par mois pour y être traitée puis est ensuite effacée pour être réutilisée.

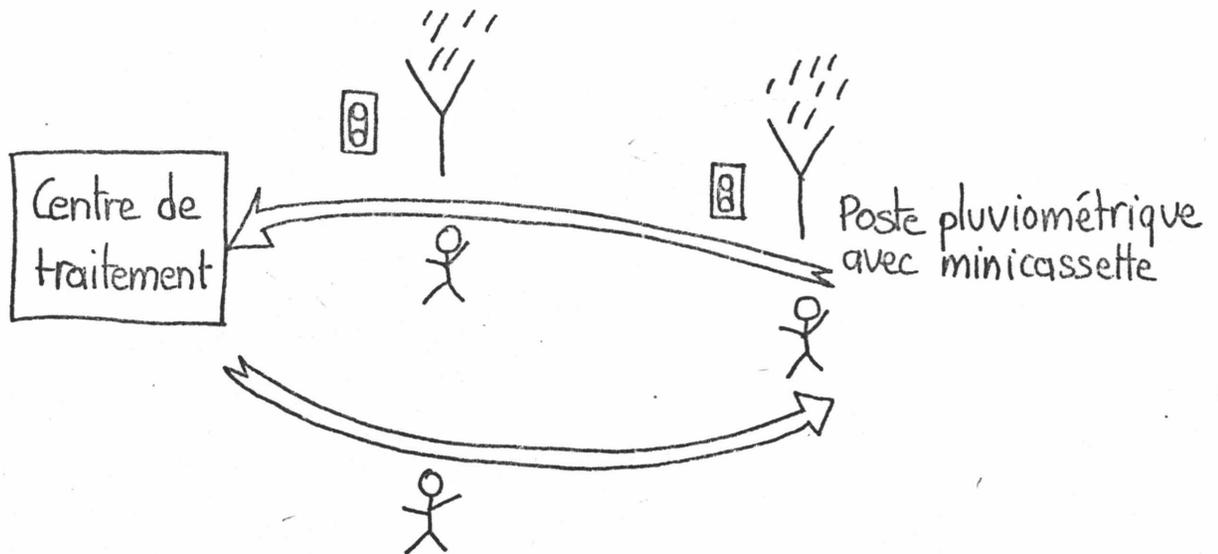


figure 41 : Un cycle d'enregistrement

- L'équipement mis en oeuvre est relativement simple, donc robuste et bon marché. Le coût total d'un poste de mesure avoisine les 25.000 francs.

- De telles installations ont été posées notamment par l'E.D.F. [54], le CEMAGREF [55] dès 1980. D'autres expérimentations de ce type se sont multipliées en France, les années suivantes [56]... Elles ont, semble-t-il, donné satisfaction aux gestionnaires quant à leur fiabilité - taux de perte inférieur à 1 % d'après M. GUILLOT de l'E.D.F. [54].

Pourtant, il faut noter un certain nombre d'inconvénients, inhérents à ce type de solutions :

- la multiplication des supports d'information - au moins deux cassettes par poste, pour rendre possible le roulement, notion de stockage intermédiaire.

- la multiplication des opérations et des intervenants sur la chaîne de stockage avant le "stockage définitif" - Ramassage des cassettes, décryptage, rectification éventuelle des enregistrements....

- subséquemment, la longueur du temps de traitement - d'après le CEMAGREF, il faut 20 minutes de traitement pour décoder une cassette représentant les données mensuelles sur un pluviomètre.

- enfin, "last but not least" le contrôle du bon fonctionnement du système ne peut être réalisé qu'a posteriori après prélèvement des cassettes, soit un différé minimal de plusieurs semaines durant lesquelles des événements hydrologiquement intéressants peuvent être perdus pour la mesure.

Tous ces inconvénients sont éliminés si nous utilisons la solution du deuxième type.

2°) Télétransmission en direct de toutes les mesures recueillies vers une centrale de traitement.

Parmi ses nombreux avantages, on peut énoncer :

- L'assurance d'une synchronisation parfaite entre les mesures (une seule horloge)
- Le repérage immédiat des anomalies de mesure
- La possibilité de rediffuser l'information très facilement, très rapidement à plusieurs usagers qui la traiteront selon leurs propres exigences.
- Enfin, c'est la seule configuration qui permette une gestion du réseau en temps réel.

Plusieurs solutions technologiques existent pour effectuer la télétransmission. Ci-dessous, nous présentons un exemple de configuration, réalisée en Belgique, en 1980, appliquée à la prévision des crues [57].

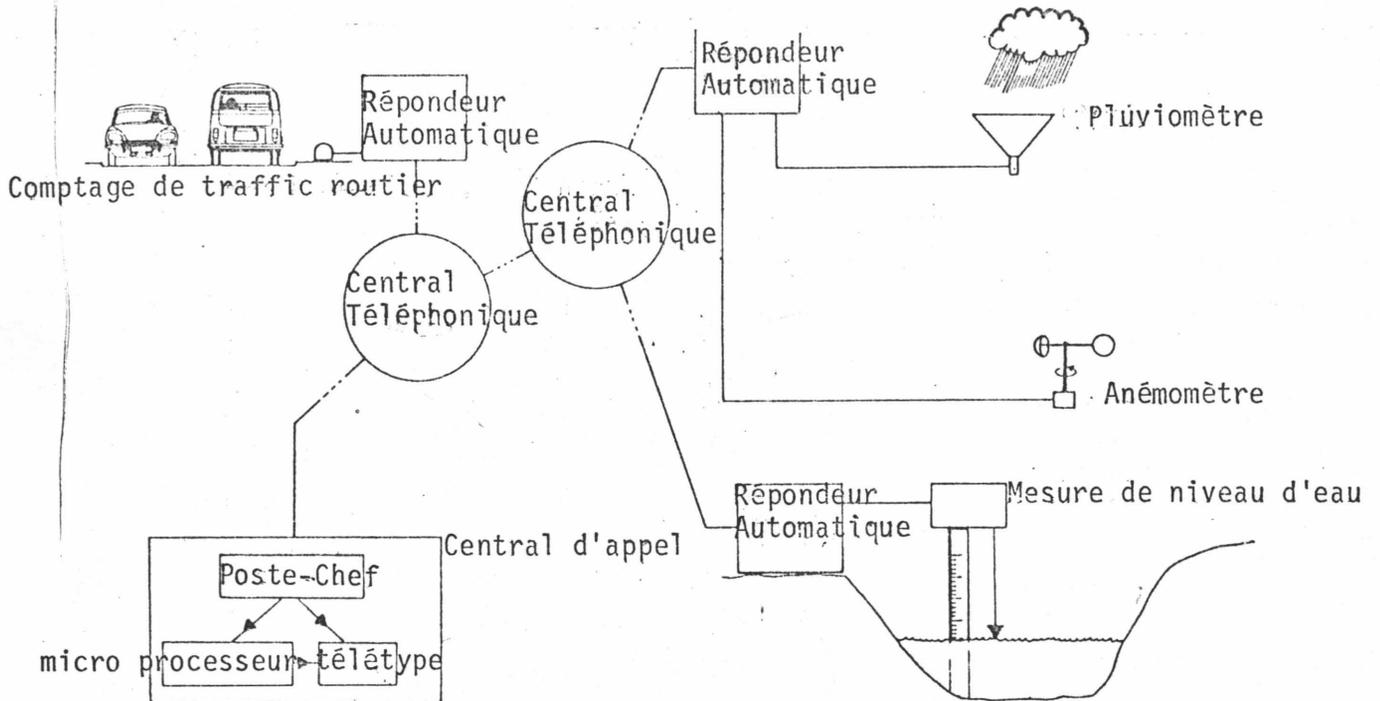


figure 42 : Réseau type

La télétransmission se fait par réseau téléphonique commuté, dans ce cas.

La télétransmission des mesures apparaît comme la "solution de l'avenir" et même de l'avenir proche. Dans la région parisienne notamment, plusieurs organismes ont mené des études préliminaires quant à la faisabilité de telles installations dans l'optique d'une gestion en temps réel du réseau d'assainissement [58].

Mais l'expérience de la télétransmission des mesures pluviométriques appliquées à l'hydrologie urbaine était, en France, pratiquement inexistante en 1982 donc il était à craindre un certain retard dans l'expérimentation menée, dû à l'insuffisante fiabilité du matériel disponible. D'autre part, et en rapport avec ce premier argument, le coût d'investissement de la télétransmission est plus élevé que celui du stockage in situ.

Dans ces conditions, nous avons opté pour la solution stockage in situ des mesures avec ramassage puis traitement mensuel des mini-cassettes.

### 2.3. L'unité autonome d'acquisition de mesure [53]

Cette unité comprend deux modules importants :

- l'enregistreur magnétique à cassette
- une horloge à quartz

L'unité est spécialement conçue pour fonctionner dans les conditions climatiques sévères de définition du matériel :

Température - 20° à + 60°

#### 1) Principe d'enregistrement et configuration par bloc

C'est un enregistrement bi-pistes indépendant de la vitesse de défilement de la bande, code ISO 4339.

Chaque enregistrement comprend :

- un blanc
- un mot de 16 impulsions réparties comme suit :

. 1 impulsion de synchronisation envoyée simultanément sur les deux pistes (dit bit synchro)

. 11 impulsions codées binaires, imprimées sur les deux pistes suivant la valeur 0 ou 1 et dans l'ordre décroissant des poids. Elles représentent la valeur binaire de la mesure, soit une valeur maximale enregistrée 2047.

. 4 impulsions codées binaires qui représentent la valeur du numéro d'ordre affecté à chaque pas de temps d'enregistrement selon des séries successives [15.14.13 ... 4.3.2.1.0] [15.14 ... 1.0] [15 ...]

Les enregistrements sont regroupés en bloc de 240 données enregistrées - soit 24 heures de mesures. Plusieurs configurations ont été essayées [59], avant d'en arriver à la configuration actuelle.

L'axe chronologique de référence est le même pour tous les pluviomètres ; l'origine de chaque bloc est 0h - 24 h.

Chaque bloc est repéré par un intitulé lequel contient la date de début du bloc, le code de la station, la date de début de l'enregistrement cassette.

Ce bloc intitulé renferme 16 enregistrements.

## 2) Relecture

La relecture des données s'effectue dans le sens antichronologique par l'intermédiaire d'un lecteur. Celui-ci est connecté à un micro-ordinateur TEKTRONIX 4054 suivant la liaison série asynchrone RS 232 (connecteur DB 25 femelle).

L'information est condensée - les enregistrements nuls successifs sont comptabilisés - traduite en ASCII (code standard d'écriture informatique) puis transmise au micro-ordinateur ...

Ci-après deux schémas explicitant :

- 1 : L'organisation schématique générale (Fig 43)
- 2 : Un exemple de bloc enregistrement. (Fig 43 bis)

L'horloge à quartz incorporée dans chaque installation n'autorise théoriquement qu'une très infime dérive temporelle inférieure à 2 minutes par mois, et ce quelles que soient les conditions atmosphériques (- 20°C à + 60°C).

Les cassettes elles-mêmes sont spécialement fournies par AUTEQ et sont sensées ne pas se déformer sous l'effet de la tension continue qui leur est appliquée. Dans les conditions de l'expérimentation, elles ont une autonomie théorique de 132 jours (34 000 enregistrements).



FORME DE RESTITUTION DES SIGNAUX

K—(17)

0278/11 0277/10 0276/09 0275/08 0274/07 0273/06 0272/05 0271/04 0270/03 0269/02  
 0268/01 0267/00 0266/15 0265/14 0264/13 0263/12 0262/11 0261/10 0260/09 0259/08  
 0258/07 0257/06 0256/05 0255/04 0254/03 0253/02 0252/01 0251/00 0250/15 0249/14  
 0248/13 0247/12 0246/11 0245/10 0244/09 0243/08 0242/07 0241/06 0240/05 0239/04  
 0238/03 0237/02 0236/01 0235/00 0234/15 0233/14 0232/13 0231/12 0230/11 0229/10  
 0228/09 0227/08 0226/07 0225/06 0224/05 0223/04 0222/03 0221/02 0220/01 0219/00

(16) (15) (14) (13) (12) (11)  
 0003/00 0016/00 0005/00 0017/00 0008/00 0000/00 0000/00 0000/00 0003/00 0020/00  
 0002/00 0008/00 0000/00 0010/00 0012/00 0076/00 (10) (9) (8) (7)  
 P (6) (18) (5) (4) (3) (2) (1)

K—(17)

0218/11 0217/10 0216/09 0215/08 0214/07 0213/06 0212/05 0211/04 0210/03 0209/02  
 0208/01 0207/00 0206/15 0205/14 0204/13 0203/12 0202/11 0201/10 0200/09 0199/08  
 0198/07 0197/06 0196/05 0195/04 0194/03 0193/02 0192/01 0191/00 0190/15 0189/14  
 0187/13 0186/12 0185/11 0184/10 0183/09 0182/08 0181/07 0180/06 0179/05 0178/04  
 0177/03 0176/02 0175/01 0174/00 0173/15 0172/14 0171/13 0170/12 0169/11 0168/10  
 0167/09 0166/08 0165/07 0164/06 0163/05 0162/04 0161/03 0160/02 0159/01 0158/00

(16) (15) (14) (13) (12) (11)  
 0003/00 0016/00 0005/00 0017/00 0008/00 0000/00 0000/00 0000/00 0003/00 0020/00  
 0002/00 0007/00 0000/00 0010/00 0012/00 0076/00 (10) (9) (8) (7)  
 P (6) (18) (5) (4) (3) (2) (1)

K 9999/99 (19)

Figure 43 Bis

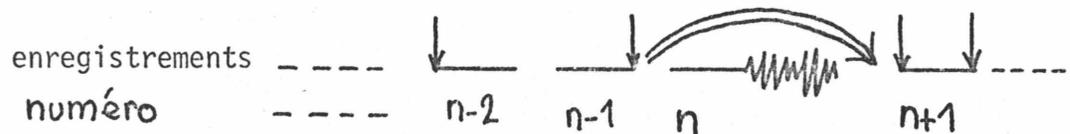
Définition de l'exemple :

- base de temps 1 minute
- un bloc par heure

- 1- 2- 3- Code station  
Horloge
- 4- minutes
- 5- heures
- 6- jour/semaine
- 7- jour/mois
- 8- mois
- 9- 10--11- Nuls  
Date, heure, minute départ
- 12- minutes
- 13- heures
- 14- jour/semaine
- 15- jour/mois
- 16- mois
- 17- Caractère significatif début de bloc
- 18- Caractère significatif fin de bloc
- 19- Caractères significatifs fin de cassette.

### 3) Avantage de la structure par blocs

Si un bloc défectueux se révèle irrécupérable, il peut être évacué sans préjudice du reste des enregistrements, par repositionnement du pointeur de relecture au bloc suivant.



↓ représente le pointeur. Il saute l'enregistrement n défectueux.

### 4) Contrôle du fonctionnement et entretien [52] [53]

A chaque relevé de cassette, l'opérateur devrait procéder à un certain nombre de vérifications concernant tant le pluviomètre que le dispositif du stockage.

Pour ce qui est du pluviomètre, il faut vérifier que des corps étrangers ne risquent pas de gêner l'écoulement de l'eau recueillie par le cône et nettoyer l'intérieur du cône, la bague, la crépine et l'entonnoir du carter du transducteur si cela est nécessaire. Périodiquement, on doit s'assurer de la propreté des éléments mécaniques du transducteur et les nettoyer (engrenages - augets) avec un pinceau et de l'alcool.

Un test de vérification du bon fonctionnement du pluviomètre, proposé par le constructeur consiste en les opérations suivantes :

- Mettre en place le bouchon calibré de contrôle dans l'embout d'écoulement après s'être assuré que le tube n'est pas obstrué ;

- Remplir d'eau propre une bouteille d'une contenance de 1 litre et la vider totalement et le plus rapidement possible à l'intérieur du cône de réception.

Après complet écoulement de l'eau contenue dans le cône, on devrait obtenir 50 basculements d'augets à  $\pm 2$  basculements près, compte tenu de la rétention d'eau dans son cheminement, des frottements mécaniques du système ...

Si le contrôle fait apparaître un biais significatif de mesure, il y a lieu de vérifier en particulier l'étanchéité des différents conduits de l'eau, le bon fonctionnement des engrenages, le réglage des butées d'auget.

Pour ce qui est de la station d'acquisition de mesure, il faut vérifier que :

- N.C. (nombre de canaux) est sur 1. Le nombre de canaux indique le nombre de mesures que le processeur est censé comptabiliser et distribuer (mesure pluviométrique, mesure de radiation solaire, de vent ...). Dans notre cas, le dispositif est mono-canal, puisque seule nous intéresse la mesure pluviométrique.

- Vérifier que la base de temps est 6 minutes.

- Vérifier que l'horloge ne dérive pas et faire une correction d'heure après récupération de la cassette si la dérive dépasse 2 minutes.

- Vérifier que la tension d'alimentation de l'enregistreur est 6V.

Toute remarque ou anomalie quelle qu'elle soit devrait en outre être consignée à l'intention de celui (ou ceux) qui effectue(nt) le transfert des enregistrements mini-cassette sur disquette.

#### 2.4. Précision de la mesure

Le constructeur prévient que l'appareil est étalonné pour une intensité moyenne de précipitations ; la précision de mesure est alors de  $\pm 4$  %. Aux fortes intensités, l'erreur augmente et peut atteindre 10 % à 240 mm/h.

Les erreurs de mesure sont multiples. En particulier :

a) Au niveau du capteur pluviométrique :

- effet du vent qui provoque l'éjection des goutelettes et des flocons au-delà du capteur
- évaporation - mouillage
- mise en charge de l'eau de pluie dans l'entonnoir. Dans ce cas, l'eau peut ne pas être perdue et être totalement enregistrée, mais l'intensité mesurée est celle d'un débit de vidange. Ceci peut être dû à une obturation accidentelle sur le trajet de l'eau - feuille, caillou, insecte ... - ou au diamètre insuffisant de l'ajustage de vidange de l'entonnoir et des tuyaux s'y abouchant.
- perte d'eau entre l'entonnoir et les augets due à une mauvaise étanchéité des conduits ou aux éclaboussements si le débit de remplissage de l'auget est trop fort.
- l'erreur de remplissage : la durée non nulle du basculement introduit une erreur de surremplissage, à savoir que l'eau continuant de s'écouler pendant le basculement, l'auget évacue une quantité d'eau supérieure à sa capacité nominale - ce supplément est d'autant plus élevé que l'intensité de la pluie est forte.

b) Au niveau du transducteur :

- mauvais basculement de l'auget dû à un réglage défectueux.
- dans le cas d'une faible précipitation, les intensités reproduites ne correspondent pas exactement aux intensités reçues, du fait que l'appareil n'est sensible qu'à des hauteurs d'eau supérieures à 0,2 mm sur 6 minutes. Il y a apparition de discontinuités pluvieuses artificielles, dès que l'intensité est inférieure à 2 mm/h.
- l'erreur de comptage du nombre de basculements peut être considérée comme nulle.

c) Correction partielle des erreurs - Une méthodologie proposée :

Certaines erreurs dues à un mauvais fonctionnement quelconque sont rectificables. Les autres sont inhérentes au principe de fonctionnement de l'appareil. On peut les classer en deux catégories :

- Les erreurs systématiques : on peut déterminer de manière exacte le mécanisme de l'erreur et l'évaluer a priori (ex. : le surremplissage si on connaît l'intensité de pluie et la vitesse de basculement de l'auget).
- Les erreurs aléatoires : on n'en connaît pas exactement le mécanisme ou les paramètres à considérer sont trop nombreux et difficiles à calculer. On ne peut les évaluer qu'a posteriori (évaporation - vent ...).

Sur la base de cette classification, le C.T.G.R.E.F. a proposé une méthode de correction de la mesure donnée par le pluviomètre [60] [61] [62].

Correction des erreurs "systématiques" - ou erreurs de surremplissage, parce que c'est la principale erreur de ce type.

Etant donné l'impossibilité pratique de déterminer sur chaque pluviomètre tous les paramètres qui permettraient son calcul effectif, la méthode proposée est une méthode "statistique" qui cerne en fait l'erreur de mesure en condition de laboratoire.

Pour chaque pluviomètre testé et différents réglages, on pointe sur un graphe la valeur mesurée par le pluviomètre ( $I_p$ ) en abscisse et la valeur "vraie" ( $I_v$ ) en ordonnée. On obtient un nuage de points que l'on approxime par une courbe dite de tarage.

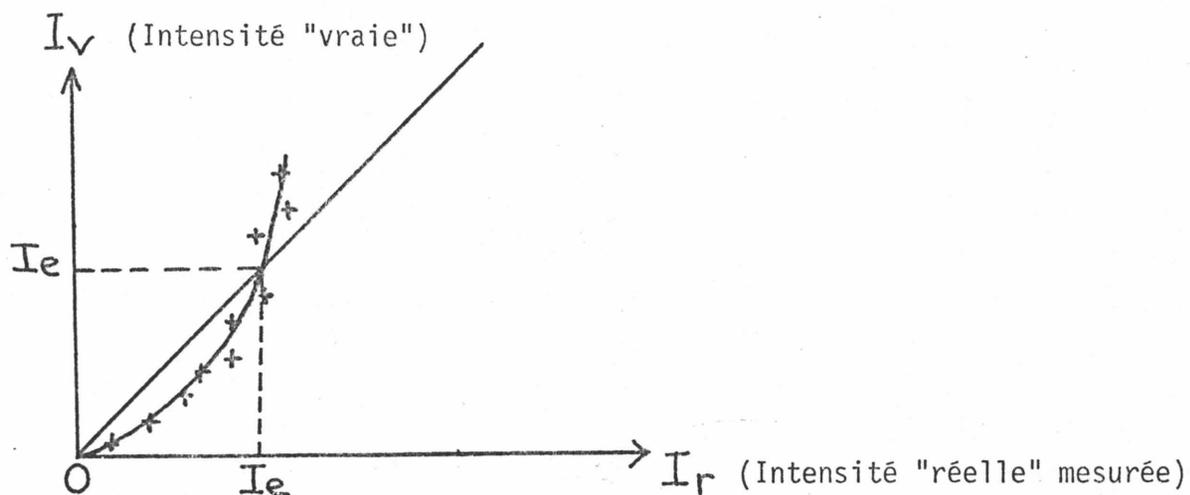


figure 46 : Courbe de tarage d'un poste pluviométrique

Ci-dessus un schéma montrant l'allure de ces courbes. On remarque qu'elles ont une allure parabolique. Pour les faibles intensités, le pluviomètre surestime la valeur d'intensité et aux fortes intensités (les plus intéressantes), il la sous-estime.

Or, il a été montré que ces courbes, pour les différents pluviomètres, sont bien caractérisées par la seule connaissance de la valeur  $I_e$ , appelée intensité d'étalonnage - cette valeur est celle pour laquelle il y a coïncidence entre la valeur mesurée et la valeur vraie.

Le C.T.G.R.E.F. a donc publié les différentes courbes d'étalonnage correspondant à une intensité d'étalonnage fixée, qui permettent d'obtenir directement la valeur "vraie" à partir de celle mesurée dans les conditions de laboratoire.

Exemple de résultats obtenus avec le pluviographe PM.MN.RS.302 (précis mécanique à augets basculeurs).

Légende :  $I_e$  : intensité d'étalonnage en mm/h  
 $I_v$  : intensité reçue par l'appareil en mm/h  
 $I_r$  : intensité enregistrée par l'appareil en mm/h

$I_e$ $I_v$	5	10	20	30	40	50	60	80	100
5	5,00	5,14	5,30	5,39	5,46	5,51	5,55	5,59	5,61
10	9,60	10,0	10,4	10,5	10,7	10,7	10,8	10,9	10,9
15	14,4	14,8	15,2	15,4	15,6	15,7	15,8	16,0	16,1
20	19,0	19,5	20,0	20,3	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3
25	23,6	24,1	24,8	25,2	25,5	25,7	25,9	26,2	26,5
30	27,9	28,7	29,4	30,0	30,3	30,5	30,8	31,2	31,6
35	32,5	33,3	34,1	34,8	35,2	35,5	35,8	36,2	36,6
40	37,0	38,0	38,9	39,5	40,0	40,4	40,7	41,2	41,7
45	41,6	42,6	43,6	44,2	44,8	45,2	45,6	46,2	46,8
50	46,0	47,2	48,2	48,9	49,5	50,0	50,4	51,2	51,8
60	54,7	56,3	57,6	58,3	59,0	59,6	60,0	60,9	61,6
70	63,3	65,1	66,7	67,7	68,3	69,0	69,3	70,6	71,3
80	71,6	74,0	75,8	76,8	77,6	78,5	79,1	80,0	81,0
90	79,9	82,7	84,9	86,0	86,9	87,6	88,5	89,6	90,5
100	88,4	91,5	93,6	95,0	96,0	96,9	97,7	99,0	100
120	104	108	111	113	114	115	116	118	119
140	120	124	128	130	132	133	134	136	137
160	137	141	145	147	149	151	152	154	156
180	153	157	161	164	166	168	169	171	173
200	169	174	178	181	184	185	187	189	191
220	185	190	194	197	199	201	202	205	208
240	200	206	210	213	215	217	218	221	224
260	214	221	225	228	230	232	234	237	240
280	228	235	239	243	245	247	249	253	255
300	243	249	254	257	260	262	264	268	271
320	256	263	268	271	274	276	278	282	286
340	270	277	282	286	288	291	293	297	301
360	283	290	296	299	302	305	307	311	345

Tableau 3 : Réseau de courbes d'étalonnages  $I_v(I_r)$  valable pour le pluviographe PM.MN.R5.302 (de construction postérieure à 1960) ; d'après le C.T.G.R.E.F..

Il ne reste plus alors, pour chaque appareil, qu'à déterminer l'intensité d'étalonnage et vérifier sa stabilité dans le temps.

Le schéma ci-après montre la variation de  $I_e$  constatée pour 4 appareils sur plusieurs années. Certains sauts sont dus à une modification du réglage ; pourtant, on constate aussi une tendance à la dérive en fonction du temps (2 vérifications par an sont conseillées si le réglage n'est pas modifié et une vérification après chaque réglage).

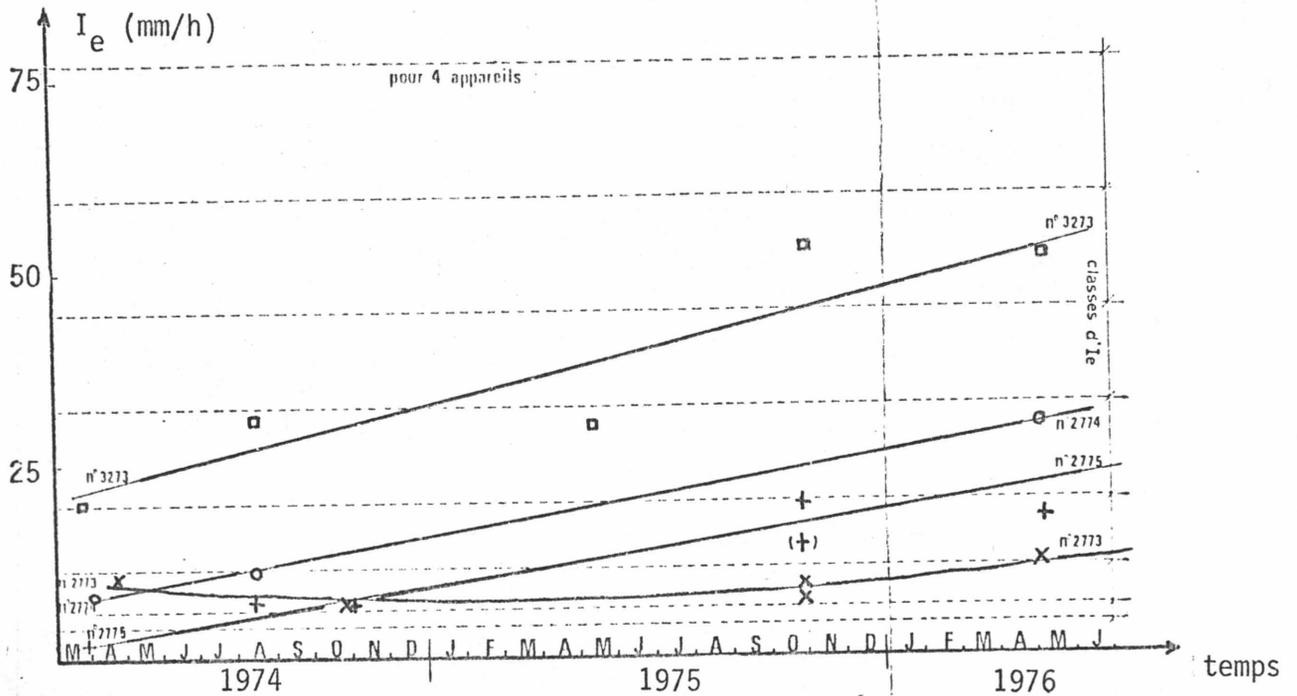


figure 47 : Evolution dans le temps de  $I_e$  pour 4 appareils.  
(d'après le C.T.G.R.E.F.).

#### Correction des erreurs aléatoires :

Dans les conditions réelles de mesure sur site, cette correction ne suffit pas. Un décalage encore significatif est constaté si on compare les hauteurs d'eau calculées à partir des données corrigées et celles obtenues par une mesure au seau étanche à l'évaporation qui récupère l'eau vidée par les augets. Le C.T.G.R.E.F. propose une correction globale complémentaire qui répartit uniformément sur la période concernée le déficit constaté. La correction est d'autant meilleure que la période séparant deux mesures au seau est plus courte.

Le type de corrections de la mesure brute n'est pas encore inséré dans le système opérationnel de traitement. En effet, le temps d'étude limité dont nous disposons nous a imposé un certain ordre de priorité dans les traitements. Or, la mesure brute supposée entachée d'une erreur relative de 4 % à 10 % a été jugée suffisamment fiable dans un premier temps - celui de la mise sur pied de l'architecture générale du système.

### 3. CONCLUSION

L'implantation du réseau de mesure comporte, comme nous l'avons vu, différentes étapes :

- densité du réseau et choix des sites
- choix du pas de temps
- type d'appareil et précision de la mesure
- type de stockage.

Ces différentes étapes ne sont pas indépendantes les unes des autres mais, au contraire, liées suivant des relations multiples dont il est difficile de rendre compte selon un enchaînement linéaire de prémisses et conclusions.

Nous avons, en particulier, essayé d'illustrer cette interdépendance de facteurs quelquefois contradictoires dans la discussion sur la densité du réseau et le choix du pas de temps, et combien le risque "d'un dérapage de la recherche" était grand.

Un compromis devait être trouvé et des décisions ont été prises sans que l'on possède toujours tous les éléments de jugement. Seul un contrôle a posteriori à partir d'une exploitation des mesures, nous permettra de pousser plus loin la réflexion et proposer d'éventuelles modifications de la configuration du réseau.

CHAPITRE 3  
LE SYSTEME INFORMATIQUE DE STOCKAGE

## 1. INTRODUCTION

Le traitement de la mesure comporte deux étapes

- le stockage de la mesure
- exploitation des mesures stockées, en fonction des logiciels de simulation pluie-débit utilisés.

La masse d'information, le nombre de manipulation à effectuer, nécessitent l'emploi d'un ordinateur tant pour le stockage que l'exploitation. Pour des raisons de souplesse de mise au point et d'utilisation du système, nous avons choisi le micro-ordinateur.

Plus précisément, nous avons opté pour une modèle Tektronix 4054 pour deux autres raisons :

1) Ce type d'appareil est disponible à la fois, au Laboratoire Méthodes de l'INSA (dans lequel est conçu le système) et au Service Assainissement de la COURLY (pour lequel le système est conçu).

2) Possibilités qu'offre l'appareil, en ce qui concerne la représentation graphique des résultats.

## 2. LE STOCKAGE [59] [70]

### 2.1. QUEL SUPPORT CHOISIR ?

Deux supports magnétiques de stockages sont possibles :

- cassette
- disquette souple

La disquette souple a été choisie pour servir de support définitif à l'information pluviométrique contenue dans les mini-cassettes,

Ce choix s'explique pour plusieurs raisons :

- la capacité de stockage sur disquette (600 K Octets) est double de celle sur cassette. Or la quantité d'information à engranger est telle (toutes les données non nulles, mensuelles, sur 30 postes) que la capacité cassette n'y suffirait pas pour les mois les plus pluvieux,

- La disquette permet une souplesse de manipulation des données (accès aléatoire) que n'offre pas la cassette (accès séquentiel).

En particulier, il est possible d'organiser les fichiers selon des bibliothèques en niveaux hiérarchisés (par exemple regrouper tous les fichiers concernant un poste, dans une bibliothèque spéciale ...)

Il est possible d'étendre des fichiers, sans risquer de détruire les données déjà stockées.

- Enfin, la vitesse d'accès à l'information disquette est beaucoup plus grande que la vitesse d'accès à l'information cassette.

### 2.2. LES ETAPES DU TRANSFERT

Un transfert direct mini-cassette-disquette ne permet pas de vérifier et corriger l'information brute avant qu'elle ne soit définitivement stockée, Aussi avons-nous opté pour un transfert en deux étapes plus lourd mais qui nous conserve un contrôle de l'information transférée.

LES DEUX ETAPES DU TRANSFERT :

Etapes 1 : transfert minicassettes  cassette Tektronix

Etapes 2 : transfert cassette tektronix  disquette souple Tektronix

Etape 1 :

Après que le transfert brut a été effectué sur cassette Tektronix, il est procédé à une vérification de la qualité de l'information qui déterminera la récupérabilité de l'enregistrement.

La vérification se décompose en deux opérations :

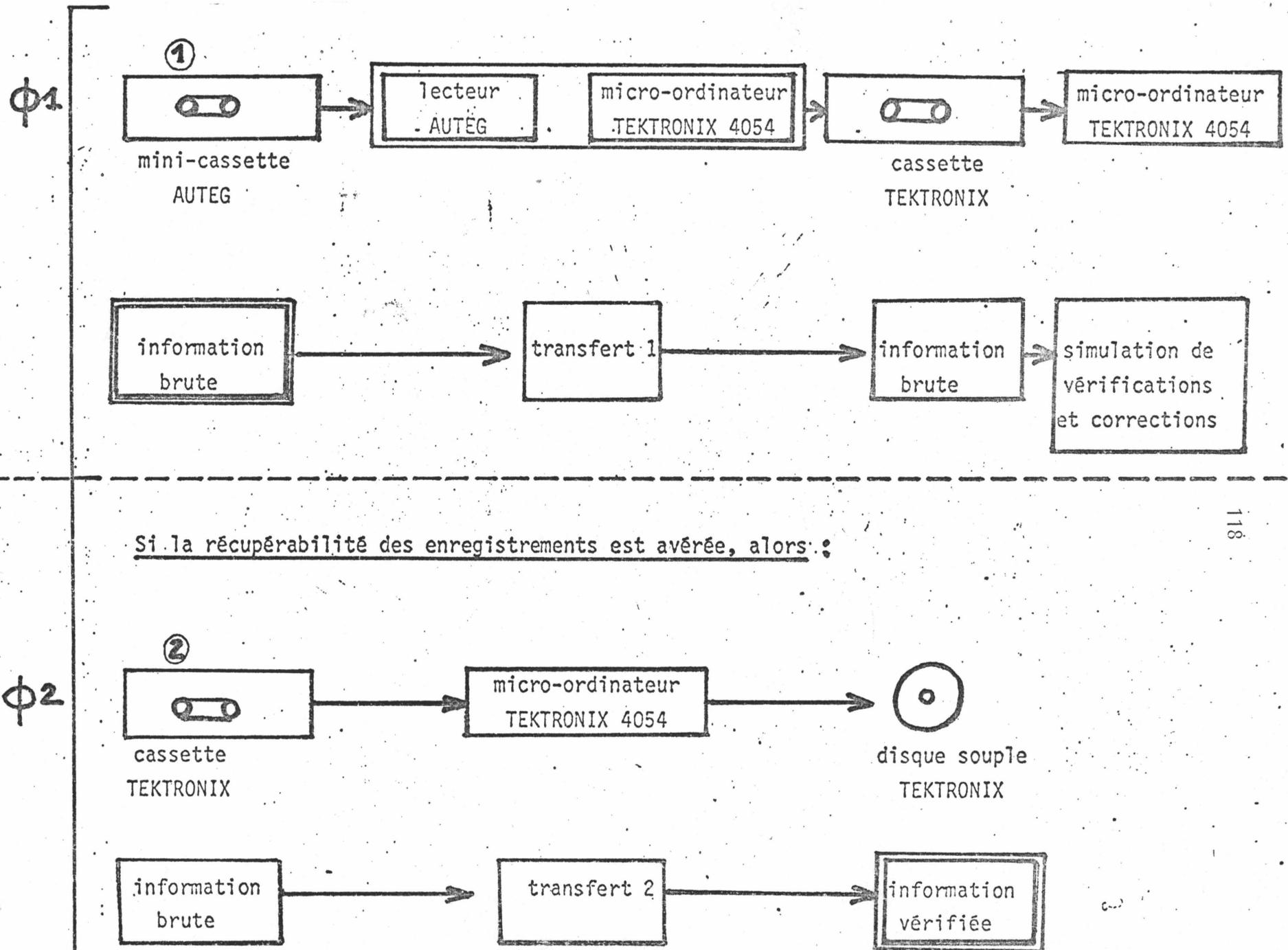
- comptage des enregistrements (nombre de blocs attendu, nombre d'enregistrements par bloc)
- s'il y a inadéquation entre le nombre prévu et le nombre réellement lu d'enregistrements, recherche des causes (apparition de parasites, découpage indu de bloc, bloc-horloge intempestif,...) et tentative de correction.

Lorsqu'il y a problème, le logiciel recherche systématiquement certaines déficiences typiques et effectue automatiquement la correction s'il en met en évidence. Sinon, il fait appel à l'opérateur qui intervient sur le déroulement des opérations pour décider de la correction à choisir. En réalité, ces corrections ne modifient pas effectivement le contenu ou la configuration de l'information réellement enregistrée sur cassette. Il s'agit en fait de pseudo-corrrections qui permettent uniquement de décider si cette information est récupérable. La vraie correction n'est effectuée que dans la deuxième étape au moment du stockage sur disquette. Si l'enregistrement est irrécupérable (on ne peut pas distinguer entre les parasites et les données pluviométriques, la configuration par blocs est complètement déformée...) le transfert sur disquette est abandonné, le pluviomètre est considéré comme n'ayant pas fonctionné au mois traité.

Etape 2 :

Le transfert sur disquette est effectué. Si certaines anomalies de l'enregistrement cassette sont détectées, les corrections testées lors de la première étape sont mises en oeuvre, avant le stockage sur la disquette.

figure 48 : SCHEMA DES ETAPES DU TRANSFERT



### 2.3. LES PROBLEMES RENCONTRES AU TRANSFERT

Les problèmes de transfert, auxquels nous dûmes faire face, furent beaucoup plus nombreux et ardues que ce que nous avions imaginé en commençant l'expérience. Il nous a fallu plus d'un an d'expérimentation et des modifications importantes apportées successivement à la configuration du lecteur, des enregistrements, pour commencer à obtenir des résultats exploitables,

Ces problèmes concernent :

- { a) des défauts d'enregistrements sur mini-cassette
- { b) un défaut de mise au point du lecteur Auteg.

a) Défaut de l'enregistrement sur mini-cassette

. Problèmes ne faisant pas intervenir une défaillance du système de mesure, à proprement parler.

L'exemple de Gerland : 5

Sur le poste Gerland : 5, les enregistrements étaient formellement corrects mais pendant plusieurs mois ils indiquèrent une hauteur nulle de précipitation en contradiction avec les données recueillies sur les autres postes. On s'aperçut finalement, qu'un employé des services communaux avait débranché (par curiosité ?) l'enregistreur et mal rebranché. Résultat plusieurs mois de mesure perdus,

Cet exemple peut sembler très particulier et non significatif.

Très certainement, si nous raisonnons en terme statistique cela est vrai, mais nous avons tenu à le présenter pour faire ressortir la grande diversité possible des causes de non fonctionnement.

Beaucoup plus préoccupantes, parce que concernant un nombre non négligeable de postes, sont les déprédations d'appareils dues au vol ou au vandalisme. On recense notamment :

- Vol des minicassettes (systématique sur certains postes)
- Vol des contacteurs à mercure (occasionnel)
- jet de pierre dans les cônes récepteurs (occasionnel).

Malgré les précautions prises,

- non-accessibilité, du terrain d'implantation des postes, au public
- pose de cadenas sur les postes, enregistreurs placés dans des locaux fermés à clef,

Ces problèmes ne sont pas encore résolus et pour certains sites il est même question de transférer purement et simplement l'implantation,

#### . Brouillages de l'information

Il y a deux types de brouillages :

a)  
- les parasites depuis le parasitage peu dense (un 1024 ou 512 qui s'insère de temps à autre entre les données) jusqu'au parasitage systématique (la cassette semble avoir enregistré un bruit)

- les anomalies de blocs

blocs de 240 enregistrements découpés en plusieurs sous-blocs

blocs-horloge intempestifs ou eux-mêmes découpés

Ce type de défauts peut concerner tout l'enregistrements ou une partie seulement. Ils sont liés principalement au fonctionnement du circuit électrique de l'installation trop sensible aux perturbations du réseau ou atmosphériques (chute de tension due au démarrage de pompe dans "une station de relevage", effet de la foudre,...)

Des mesures ont été prises pour isoler le circuit (câble antiparasite, mise à la masse) mais celles-ci ne semblent résoudre que partiellement le problème.

#### b) Un défaut de mise au point du lecteur

Deux problèmes avaient été soulevés

- l'obtention de dates erronées (ex : 60 mars à 54 heures 12 minutes)
- mauvais rembobinage des enregistrements avant relecture d'où impossibilité d'effectuer le transfert.

Auteg a opéré les transformations voulues sur son lecteur et il semble qu'actuellement ce type de problèmes soit résolu.

Ex : Perte d'enregistrements suivant les postes. Pour les 6 premiers mois de l'année 1985, on obtient le tableau suivant :

N° du poste	Période d'enregistrement considérée	Nombre total de jours d'enregistrement	Total de jours à problèmes	pourcentage sans problèmes
1	24/01/85 au 3/07/85	160	15	91 %
2	22/01/85 au 3/09/85	224	1	99 %
3	24/01/85 au 2/09/85	221	5	98 %
4	24/01/85 au 3/09/85	222	∅	100 %
5	25/01/85 au 7/05/85	102	∅	100 %
6	23/01/85 au 2/09/85	222	95	58 %
7	23/01/85 au 3/09/85	224	1	99 %
8	23/01/85 au 4/09/85	224	6	97 %
9	24/01/85 au 3/09/85	222	64	72 %
10	24/01/85 au 3/09/85	222	∅	100 %
11	24/01/85 au 2/09/85	221	37	84 %
12	24/01/85 au 2/09/85	221	∅	100 %
13	24/01/85 au 2/09/85	221	27	88 %
14	23/01/85 au 2/09/85	222	15	94 %
15	23/01/85 au 2/09/85	222	93	58 %
16	23/01/85 au 4/09/85	224	83	63 %
17	23/01/85 au 4/09/85	224	57	75 %
18	25/01/85 au 3/09/85	221	∅	100 %
19	23/01/85 au 4/09/85	224	∅	100 %
20	25/01/85 au 2/09/85	97	11	89 %
21	24/01/85 au 2/09/85	221	26	88 %
22	25/01/85 au 4/09/85	222	16	93 %
23	23/01/85 au 4/09/85	223	49	78 %
24	23/01/85 au 2/09/85	222	1	99 %
25	24/01/85 au 2/09/85	221	9	96 %

Le pourcentage moyen d'enregistrements récupérables à partir de ce qui est enregistré sur mini-cassette : 89 %

## 2.4 LES POSSIBILITES DU LOGICIEL (AFFICHAGE, CORRECTIONS)

Compte tenu de ces difficultés, les logiciels de transfert ont été progressivement modifiés et améliorés pour permettre un contrôle facile de l'information transférée (affichage clair), des corrections rapides (mises en place de corrections automatiques) et tenant compte des principaux cas de figure rencontrés. (5 corrections manuelles proposées).

### 2.4.1 L'AFFICHAGE :

Sont affichées, toutes les valeurs pluviométriques qui dépassent un seuil préalablement fixé par l'opérateur (généralement 20 mm/h)

Ci-après :

Exemple d'affichage à l'étape 1 (figure 49)

Exemple d'affichage à l'étape 2 (figure 50)

```

PLUVIOMETRE :VILLURBANNE:1
*****
* HAUTEURS * CLASSEMENT * NUMERO DU * CLASSEMENT *
* (MM/H) * CHRONOLOGIQUE * BLOC * DES VALEURS <>0 *
*****
* 2.00 * 144 * 2 * 1 *
* 2.00 * 405 * 3 * 2 *
* 2.00 * 1638 * 8 * 3 *
* 2.00 * 1803 * 9 * 4 *
* 4.00 * 1807 * 9 * 5 *
* 4.00 * 1808 * 9 * 6 *
* 4.00 * 1809 * 9 * 7 *
* 2.00 * 1813 * 9 * 8 *
* 2.00 * 1831 * 9 * 9 *
* 2.00 * 1996 * 9 * 10 *
* 2.00 * 2342 * 11 * 11 *
* 2.00 * 2456 * 11 * 12 *
* 2.00 * 2472 * 11 * 13 *
* 2.00 * 2475 * 11 * 14 *
* 2.00 * 2477 * 11 * 15 *
* 2.00 * 2488 * 11 * 16 *
* 2.00 * 2482 * 11 * 17 *
* 2.00 * 2484 * 11 * 18 *
* 2.00 * 2485 * 11 * 19 *
* 2.00 * 2487 * 11 * 20 *
* 2.00 * 2498 * 11 * 21 *
* 2.00 * 2492 * 11 * 22 *
* 2.00 * 2495 * 11 * 23 *
* 2.00 * 2497 * 11 * 24 *
* 2.00 * 2498 * 11 * 25 *
* 2.00 * 2499 * 11 * 26 *

```

POUR CONTINUER ,TAPER RETURN

Figure 49 : Exemple d'affichage sur écran des données pluviométriques non nulles dans un transfert minicassette - cassette Tektronix (étape 1)

Le "classement chronologique" : correspond dans ce cas au classement de la valeur affichée par rapport à la première valeur relue.

Le "numéro du bloc" : il s'agit du numéro du bloc de 240 enregistrements dans lequel se trouve la valeur affichée à partir du premier bloc relui.

Le "classement des valeurs < > 0" : correspond à un numéro de la valeur affichée parmi les valeurs non nulles relues.

## MOIS:NOV84 POUR LE PLOUID VILLEURBAHNE:1

```

*****
* INTENSITE * ABSCISSE * CLASSEMENT * NBRE DE VALEURS *
* (MM/H) * (TEMPORELLE) * (RELATIF) *
*****
* 2.00 * 2901 * 203 * 1 *
* 2.00 * 2640 * 182 * 2 *
* 2.00 * 1415 * 157 * 3 *
* 2.00 * 1242 * 224 * 4 *
* 4.00 * 1238 * 220 * 5 *
* 4.00 * 1237 * 219 * 6 *
* 4.00 * 1236 * 218 * 7 *
* 2.00 * 1232 * 214 * 8 *
* 2.00 * 1214 * 196 * 9 *
* 2.00 * 1049 * 31 * 10 *
* 2.00 * 703 * 165 * 11 *
* 2.00 * 589 * 51 * 12 *
* 2.00 * 573 * 35 * 13 *
* 2.00 * 570 * 32 * 14 *
* 2.00 * 568 * 30 * 15 *
* 2.00 * 565 * 27 * 16 *
* 2.00 * 563 * 25 * 17 *
* 2.00 * 561 * 23 * 18 *
* 2.00 * 560 * 22 * 19 *
* 2.00 * 558 * 20 * 20 *
* 2.00 * 555 * 17 * 21 *
* 2.00 * 553 * 15 * 22 *
* 2.00 * 550 * 12 * 23 *
*****

```

POUR CONTINUER TAPER RETURN

Figure 50 : Affichage sur écran des données pluviométriques non nulles dans un transfert cassette Tektronix - disquettes Tektronix 2ème étape).

Pour ce qui concerne l'affichage des données :

a) L'affichage dépend de 2 paramètres définis auparavant par l'utilisateur :

1° valeur seuil

2° affichage exhaustif ou non

b) Il se présente sous forme d'un tableau à 4 colonnes :

- 1) La valeur de l'intensité pluviométrique en mm/heure.
- 2) Abscisse (temporelle) : représente le nombre d'intervalles de 6 minutes qui sépare l'instant où se produit cette pré-

cipitation non nulle et le début du mois considéré,

- 3) Classement(relatif) : représente le nombre d'intervalles de 6 minutes écoulés depuis le début du bloc d'enregistrement dans lequel se trouve la valeur. Si on est en version 2, les blocs courants commençant au début du jour correspondant, ce classement (relatif) correspond au nombre d'intervalles de 6 minutes écoulées depuis le début du jour à 0 h 0 mn.
- 4) Nombre de valeurs : donne le classement de la valeur affichée parmi les valeurs non nulles de précipitation relues.

#### 2.4.2. Les corrections possibles :

Plusieurs corrections automatiques sont susceptibles de mise en oeuvre :

1) Si le nombre d'enregistrements du bloc est inférieur au nombre attendu il y a recollage automatique avec le bloc suivant. Ceci pose parfois des problèmes notamment dans le cas d'erreur sur les dates de début et fin d'enregistrements, due à une mauvaise manipulation lors du changement de cassette (décalage de 6 minutes). Le logiciel prévoit pour le bloc considéré (1 des blocs extrêmes) un enregistrement de plus qu'il y en a d'où recollage intempestif avec le bloc suivant. S'il s'agit du dernier bloc à relire, cela ne pose pas de problème, dans le cas où il s'agit du premier bloc à relire la solution la plus simple consiste à recommencer toute l'opération en corrigeant les dates début/fin d'enregistrement.

2) S'il y a un bloc de 16 enregistrements de date situé en milieu de bloc et non en fin de bloc de relecture, celui-ci est éliminé.

3) S'il le nombre d'enregistrements le dépasse le nombre prévu, toutes les valeurs pluviométriques supérieures ou égales à 128 (basculements en 6 mm) ce qui correspond à une intensité de 256 mm/h sont considérées comme parasite et sont éliminées.

#### Remarque :

Cet aperçu sur les corrections automatiques permet de conclure que : s'il y a des problèmes d'enregistrements, ce sera toujours parce qu'il y a trop de valeurs par rapport à ce qu'on attend.

Si les corrections automatiques ayant été essayées un problème d'enregistrement subsiste, le logiciel passe la main au manipulateur.

Il affiche le bloc défectueux en question et propose 5 corrections manuelles possibles.

1 : passer au bloc suivant en considérant que toutes les valeurs du bloc sont nulles.

2 : éliminer certains enregistrements considérés comme parasites

et ne se référant donc pas à une quantité de pluie tombée.  
ATTENTION ! dans ce cas relever l'ordre chronologique des valeurs à éliminer.

- 3 : ne considérer que les  $\infty$  premières valeurs, les autres étant purement à supprimer.
- 4 : considérer que par suite d'un parasitage (LF superflu) un bloc a été indûment découpé.
- 5 : considérer que le bloc entier est parasite et l'éliminer.

[QUELLES OPTIONS CHOISISSEZ-VOUS] (1,2,3,4,5) :

On tape l'option choisi,

On tape RETURN.

Le logiciel continue le traitement suivant l'option choisie par le manipulateur...

## 2.5 PRINCIPES DE L'ORGANISATION DU STOCKAGE SUR DISQUE

Chaque disque contient les valeurs mesurées non nulles sur tous les postes installés, pendant une période de un mois.

En ce qui concerne la gestion proprement dite des mesures, le premier principe adopté consiste à opérer pluviomètre par pluviomètre conformément à l'organisation initiale des données durant la collecte (une minicasette par poste). Pour chaque disque, il y a une bibliothèque de fichiers par poste de fonctionnement.

Si on considère les 30 pluviomètres, potentiellement, 216 000 valeurs sont recueillies mensuellement. La mémoire disque ne peut pas stocker une telle quantité de valeurs.

Or, parmi ces 216 000 valeurs, la plupart sont des enregistrements de hauteur nulle. La solution qui s'impose consiste à ne stocker que les valeurs pluviométriques non nulles (on aurait pu même, déterminer un seuil positif en dessous duquel on rejette la mesure mais nous n'avons voulu opérer aucune sélection a priori).

Dans ces conditions, deux paramètres de stockage sont nécessaires :

- la valeur de hauteur d'eau mesurée, pour le poste considéré, pendant un certain intervalle de 6 minutes

- la localisation de cet intervalle sur l'axe des temps (l'origine chronologique étant le premier jour du mois à 00 h 00 mm)

La méthode qui nous semble la plus efficace (la moins coûteuse en place mémoire tout en permettant d'extraire l'information demandée rapidement et cela sans nécessiter d'hypothèses supplémentaires) est d'opérer l'archivage en se fondant sur le concept de pluie entendue comme une séquence ininterrompue de valeurs d'intensité non nulles pour un poste considéré.

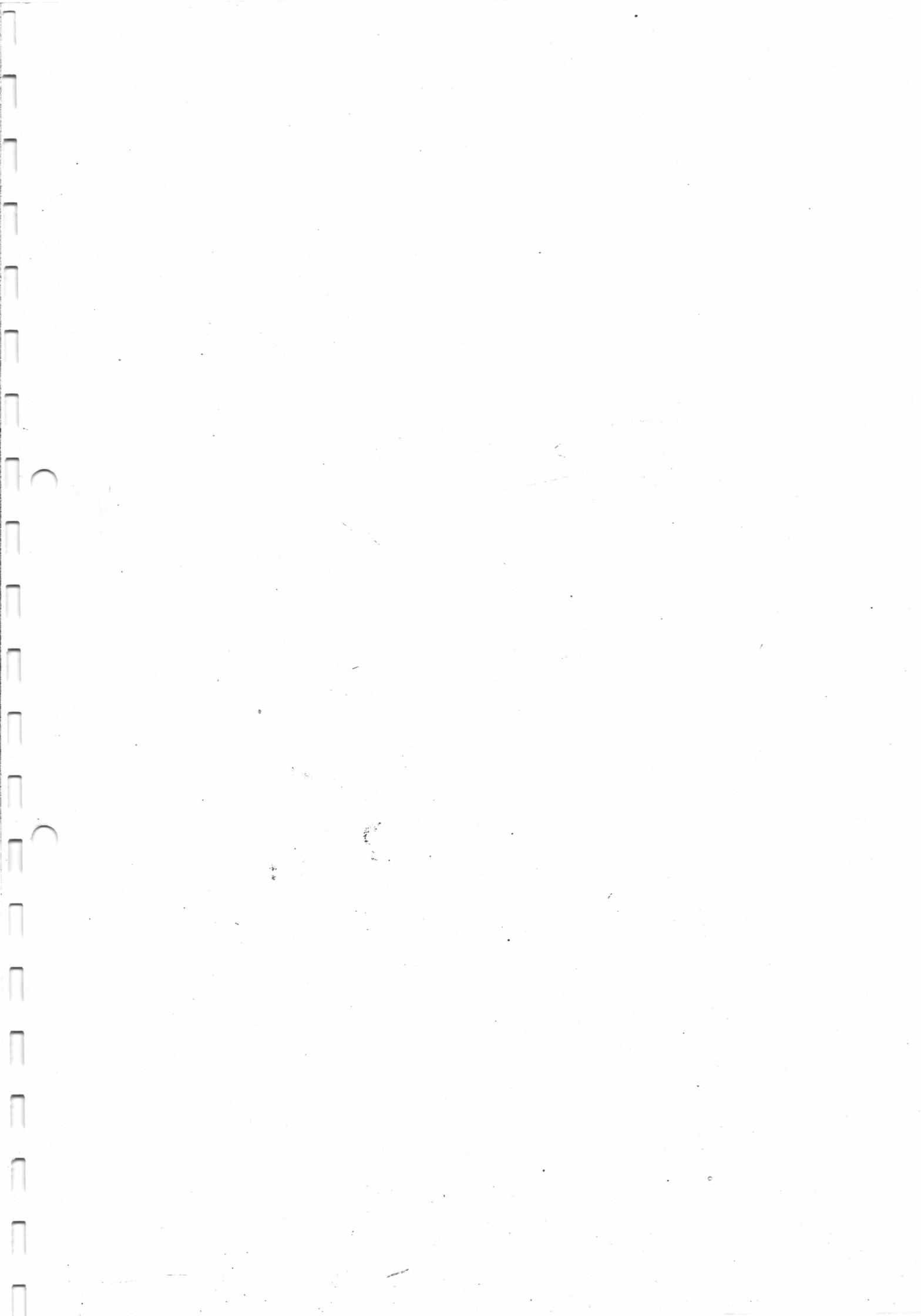
(En annexe on trouve une description plus détaillée du stockage en particulier, des différents fichiers utilisés et leur agencement).

### 3. CONCLUSION

Le système d'archivage et de stockage, est relativement lourd à manipuler du aux traitements de vérifications et corrections qu'il a été nécessaire d'implanter.

D'autre part, un disque par mois, même si cela peut sembler minime à priori, constitue sur une dizaine d'année, (durée prévue de l'expérimentation) quelque 120 disques de stockage.

Il semble envisageable à moyen terme, soit de transférer l'information en stockage bande sur mini-ordinateur soit mieux encore d'attendre quelques années, que les progrès en micro-informatique permettent d'accélérer les traitements et de condenser le stockage (extension de la capacité de stockage sur disque).



## CHAPITRE 4

### L'EXPLOITATION DES DONNEES : LES METHODES ET LES MODELES

*" Dans tous les cas, on peut dire que la méthode expérimentale a pour objet de disposer logiquement tous les faits observés directement ou provoqués par l'expérimentation en vue de les faire servir de vérification à une idée préconçue".*

*Cl. Bernard Leçon d'ouverture du Collège de France*

## 1. INTRODUCTION :

L'exploitation des données concerne exclusivement certaines séquences correspondant à l'occurrence d'un événement intéressant (orage principalement).

La discussion, sur les traitements proposés et leur présentation, peut-être menée suivant deux perspectives complémentaires qui feront chacune l'objet d'un chapitre particulier.

- . Une description théorique, visant à expliciter les concepts fondamentaux retenus,

- . Une description de l'organisation, des logiciels informatiques suivant différents niveaux de traitement.

Description théorique : elle concerne la logique induite suivant laquelle le système est conçu. Les principaux points traités sont :

- les objectifs poursuivis
- les méthodes utilisées
- les limites de ces méthodes
- l'extension possible de l'éventail des traitements

La difficulté de la présentation est accrue par l'ambivalence fondamentale du système. Il doit en effet répondre aux deux exigences suivantes :

- . être un outil, le plus directement opérationnel, utilisable par les techniciens des services d'assainissement le plus rapidement possible.

- . être un outil de recherche, capable de fournir les éléments d'une réflexion méthodologique.

Deux problèmes ont été traités :

- la détermination de la lame d'eau

↳ la détermination de la trajectoire

Par souci de clarté, nous avons choisi de structurer la présentation de ces problèmes suivant trois étapes :

- La présentation des méthodes
- Validation graphique
- Validation numérique (externe)

Description pratique du système : elle concerne la hiérarchie des traitements selon l'organisation des logiciels. Nous présenterons, à la suite, un exemple de traitement pour la séquence du "4 octobre 1984". Cet exemple n'a pas valeur exemplaire, pour la pluviométrie sur la zone de la COURLY, il sert simplement à illustrer les possibilités offertes par le système et à montrer comment à partir de ces premiers résultats insuffisants et parcellaires, on peut cependant dégager certains axes de recherche.

## 2. LE CALCUL DE LA LAME D'EAU

### 2.1 INTRODUCTION

Pour la séquence pluvieuse choisie, on possède une matrice  $M_1(T,P)$  où

T : nombre de ligne, représente le nombre de pas de temps considéré

P : nombre de colonnes, représente le nombre de pluviomètres où sont mesurés les intensités.

Ainsi

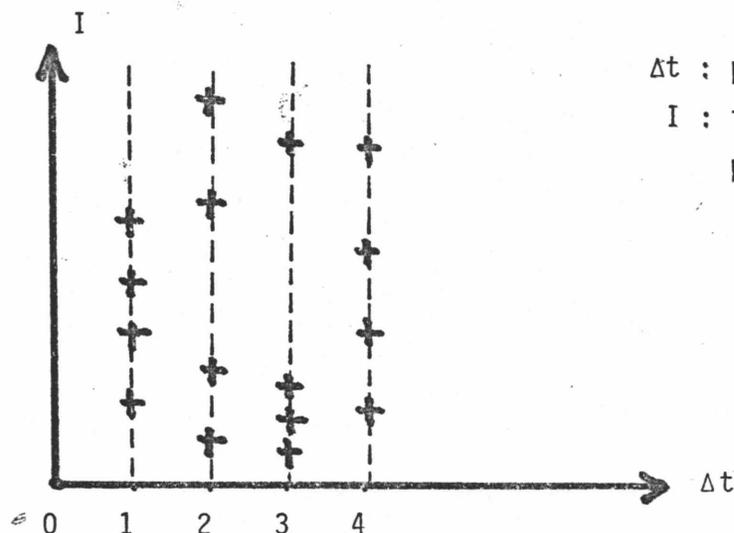
- la  $i$ ème colonne permet de déterminer un hyétogramme au droit du pluviomètre  $P_i$

- la  $j$ ème ligne permet d'obtenir au pas de temps  $T_j$  les intensités tombées au droit de tous les pluviomètres

Ces données stockées définissent un nuage de points expérimentaux repérés en abscisse par leurs coordonnées spatio-temporelles  $(x,y,z,t)$

-  $x$  longitude,  $y$  latitude,  $z$  altitude,  $t$  numéros du pas de temps - et en ordonnée par un scalaire l'intensité précipitée.

Ex :



$\Delta t$  : pas de temps

I : intensité moyenne sur le pas considéré

Figure 51 : Projection du nuage de points obtenu à partir de 4 postes sur l'axe des temps,

Le problème de la lame d'eau consiste, pour cette séquence pluvieuse donnée, à chaque pas de temps, à effectuer la transposition entre les données ponctuelles et une données surfacique, autrement dit, si on considère que la pluie est un flux, déterminer les caractéristiques surfaciques de ce flux connaissant sa valeur en certains points.

Exemple de mesure ponctuelle de flux :

Pluie du 4 octobre 1984

Caractéristiques : 54 pas de temps de 6 minutes  
8 points de mesure

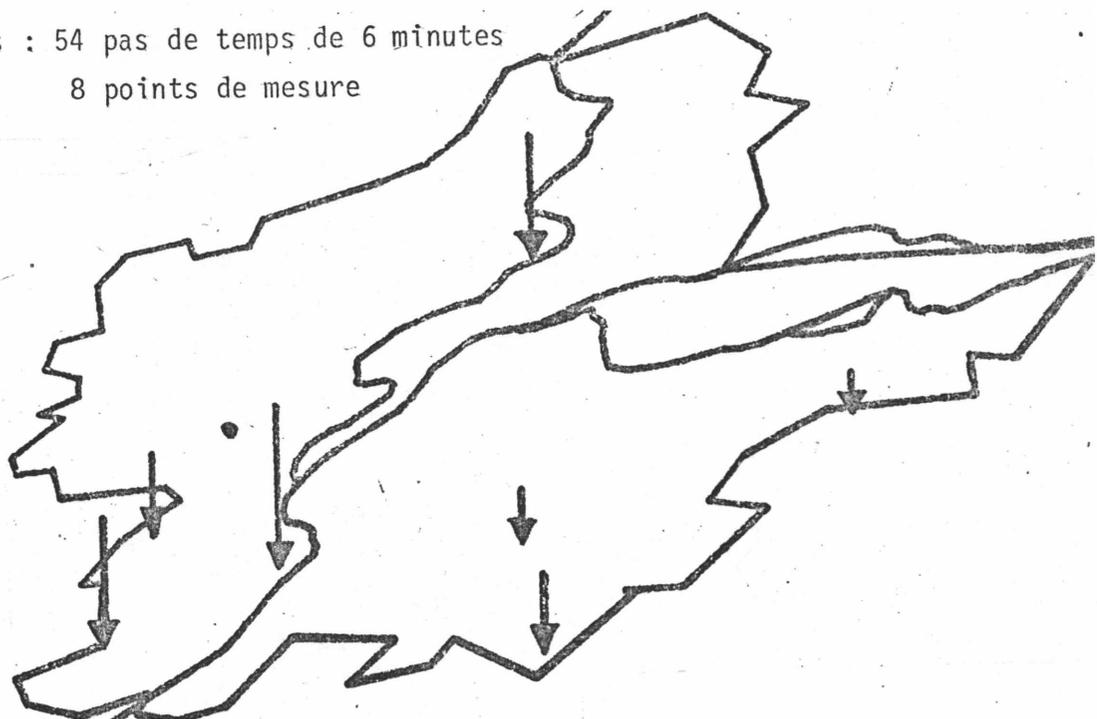


Figure 52 : Représentation du flux du 36 ième pas

Remarque :

Ce type de formulation implique une asymétrie entre les variables d'espace et la variable temps. Le véritable espace de travail n'est pas l'espace quadri-dimensionnel. C'est l'espace tridimensionnel euclidien repéré à différents instants.

Nombre de méthodes ont été élaborées tant en hydrologie générale qu'en hydrologie urbaine, pour calculer la lame d'eau, et sans vouloir en établir un répertoire exhaustif on peut proposer une classification [72].

Une première classe est constituée par les méthodes purement spatiales "au sens où elles sont capables de traiter un phénomène connu par une réalisation unique".

Cette classe se subdivise elle-même en :

- technique de nature déterministe pure (polygones de Thiessen interpolations linéaires simples ou multiples, fonctions-spline [74] , [75] , [76] ...)
- techniques fondées sur un modèle statistique (krigeage [77] , [78] , [79] méthode M.H.T. [81] ...)

Une deuxième classe concerne les modèles dits climatologiques parce qu'ils exigent la connaissance d'une série de réalisations d'une même phénomène.

Parmi ces méthodes on cite

- l'interpolation optimale de Gandin [80]
- l'analyse harmonique de processus (A.H.P.)

Dans un premier temps, nous avons choisi de traiter des méthodes pseudo-déterminisme purement spatiales de calcul de la lame.

- Trois types de modèle sont plus particulièrement étudiés. Ils se fondent tous sur l'hypothèse d'une stabilité spatiale au moins locale du phénomène pour le pas de temps considéré autrement dit :

- la non prise en compte de l'irrégularité éventuelle de l'objet, pour l'échelle d'étude fixée, n'entraîne pas une altération significative des résultats sur les débits dans le réseau (?)

Nous exposerons en détail, le principe de ces trois modélisations de lame. Nous reviendrons, ensuite, sur les différents moyens dont nous disposons pour vérifier, de manière indirecte, la validité des résultats proposés. Il s'agira notamment de dégrader artificiellement l'information primaire

- contexte de mesure - en supprimant des postes ou en cumulant des pas de temps, et de préciser la stabilité des modèles face à ces fluctuations.

## 2.2 METHODE APPARENTEE A LA METHODE DE THIESSEN.

Un type de méthode proposée repose sur le même principe que la méthode des polygones de Thiessen. Il s'agit pour chaque pluviomètre du bassin, de lui affecter une zone d'influence à l'intérieur de laquelle le hétérogramme en

chaque point est identique au hyétogramme mesuré au droit du pluviomètre. Ce type d'approximation est relativement grossier et d'ailleurs est principalement utilisée pour déterminer le hyétogramme moyen sur un bassin et pour caractériser une distribution spatiale. Toutefois si le réseau est suffisamment dense et l'hypothèse de continuité, respectée, la lame obtenue doit rendre compte fidèlement de la "réalité".

Thiessen proposa pour déterminer les zones d'influences une technique dite de polygonaion.

Chaque poste forme le sommet d'un triangle avec les postes qui lui sont directement adjacents. On trace les médiatrices de chaque côté des triangles. Elles forment des surfaces  $S_k$  affectées à chaque station  $P_k$ .

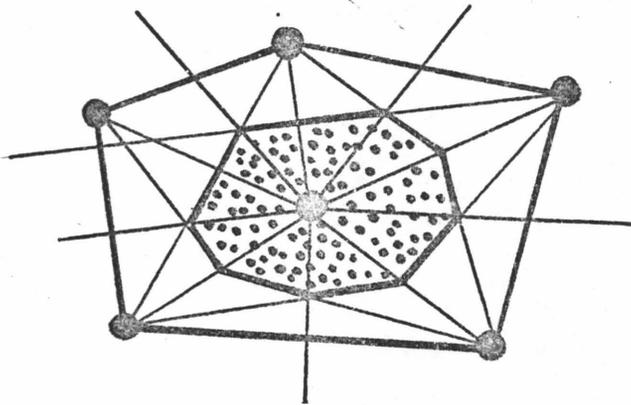


Figure 53 : Construction de la surface d'influence d'un poste donné.

Thiessen en déduisait le hyétogramme moyen en écrivant :

$$(44) \quad i_{m,t} = \sum_{k=1}^n \left( \frac{S_k}{S_t} \right) \cdot i_{k,t}$$

$i_{m,t}$  : intensité moyenne à l'instant  $t$ , sur le bassin

$S_k$  : surface d'influence du poste  $k$  (comprise dans le bassin)

$S_t$  : surface totale du bassin versant

$i_{k,t}$  : intensité ponctuelle au poste  $k$ ; à l'instant  $t$

$n$  : nombre de postes sur le bassin

Cette méthode de polygonation est relativement lourde à mettre en oeuvre, selon une procédure automatique (programmée par ordinateur).

D'une part, une polygonation - construction des triangles à partir des sommets du réseau - nécessite la mise en oeuvre d'algorithmes relativement complexes.

D'autre part, et lié à ce premier problème, pour un réseau fixé, il existe une multitude de polygonations possibles qui respectent les règles de construction - la première règle étant que les triangles obtenus forment une partition du bassin -

Une autre méthode, plus simple, du point de vue informatique est proposée. Elle se décompose en 3 étapes :

- a) déterminer un ensemble de points représentatif du bassin noté E
- b) chaque point est affecté au pluviomètre le plus proche au sens d'une certaine distance,
- c) la surface d'influence  $S_k$  du pluviomètre le vaut :

$$(45) \quad S_k = S_t \cdot \frac{N_k}{N_t}$$

$S_t$  : surface totale du bassin versant

$N_k$  : nombre de points affectés au poste  $k$

$N_t$  : nombre total de points

Ces trois étapes ne sont à considérer que si l'on cherche à déterminer le hyétogramme moyen. Dans le cas où, pour un point donné, on cherche uniquement la valeur du hyétogramme en ce point, il suffit de choisir le hyétogramme du poste le plus proche.

Remarques :

Cette méthode quoique très simpliste, autorise une grande souplesse d'utilisation en ce que la définition de la distance permet de tenir compte des conditions particulières rencontrées - particularités topographiques notamment.

E peut être déterminé, à priori, par le manipulateur, ou le programmeur. On peut aussi procéder par tirage aléatoire de  $N$  points du bassin ; c'est la

méthode de Monte-Carlo.

La représentativité du nuage de points dépend de sa densité et de sa répartition uniforme sur le bassin.

### 2.3 INTERPOLATION LINEAIRE MULTIPLE

#### 2.3.1. PONDERATION SIMPLE PAR LES DISTANCES

Un autre type de méthodes consiste à calculer une intensité sur les sommets d'un quadrillage tel que, en chacun des sommets du quadrillage, l'intensité est calculée par interpolation linéaire multiple sur les postes de mesure retenus.

$$(46) \quad i_s = \sum_{k=1}^{n_s} \alpha_k \cdot i_k$$

$i_s$  : intensité calculée au noeud  $s$  du quadrillage

$i_k$  : intensité mesurée sur le poste  $k$  retenu

$n_s$  : nombre de postes retenus pour l'interpolation au noeud  $s$

$\alpha_k$  : coefficient de pondération du poste  $k$  retenu

Le principe de la méthode, que nous avons mise au point, repose sur deux notions :

a) la pondération par l'inverse de la distance munie d'un exposant  $\alpha$  fixé a priori.

b) la prise en compte d'une distance d'influence  $D_i$  au-delà de laquelle un poste n'intervient pas dans le calcul de l'intensité au noeud  $s$ .

La formule utilisée s'écrit

$$(47) \quad i_s = \sum_{ds,k \leq D_i} i_k \frac{(1/ds,k)^\alpha}{\sum_{ds,j \leq D_i} (1/ds,j)^\alpha}$$

$d_{s,k}$  : distance entre le noeud  $s$  et le poste  $k$

$i_k$  : intensité mesurée sur le poste pluviométrique  $k$

Remarques :

- 1) Suivant la valeur de  $D_i$  choisie, il peut arriver que, sur certains sommets, l'interpolation fasse intervenir  $n_s$  postes avec  $n_s > 1$ ,  $n_s = 1$ ,  $n_s = \emptyset$
- 2) Dans le cas où  $n_s = \emptyset$  on considère que l'intensité est constante, nulle,

Exemple de traitement en pondération simple :

Liste des postes retenus pour le calcul des valeurs approximées au noeuds du quadrillage :

ST PRIEST : 3  
 PIERRE BÉNITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12

ST GÉNIS LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24

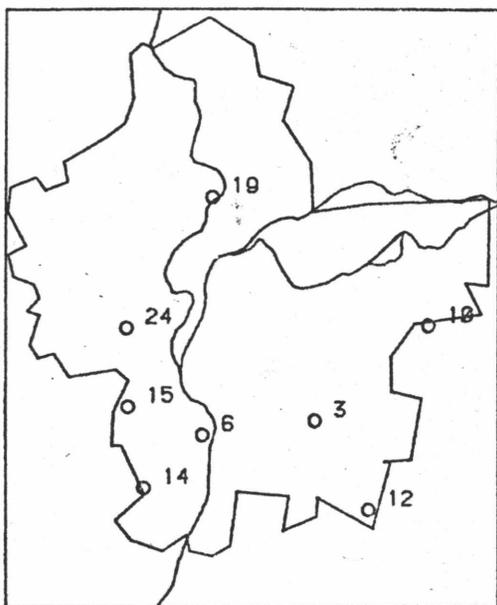


Figure 54 : Emplacement des postes retenus

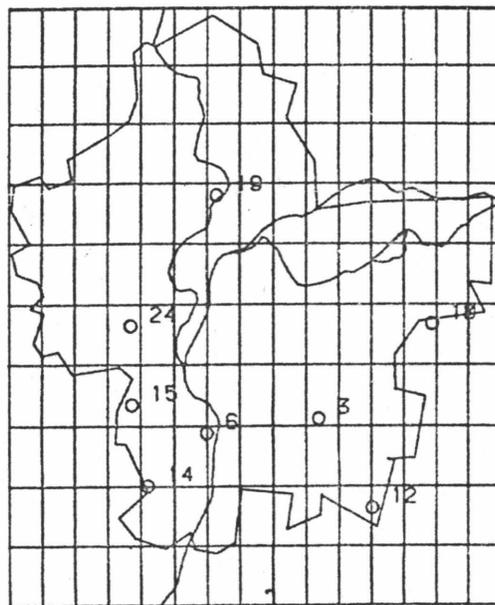


Figure 55 : Dessin du quadrillage retenu

On retient encore :

- Puissance de pondération ; 2 ( $\alpha$ )
- Distance d'influence ; 15 km ( $D_i$ )

On en déduit ci-après, une représentation de l'ensemble des noeuds du quadrillage sur lesquels, un calcul d'interpolation multiple est possible.

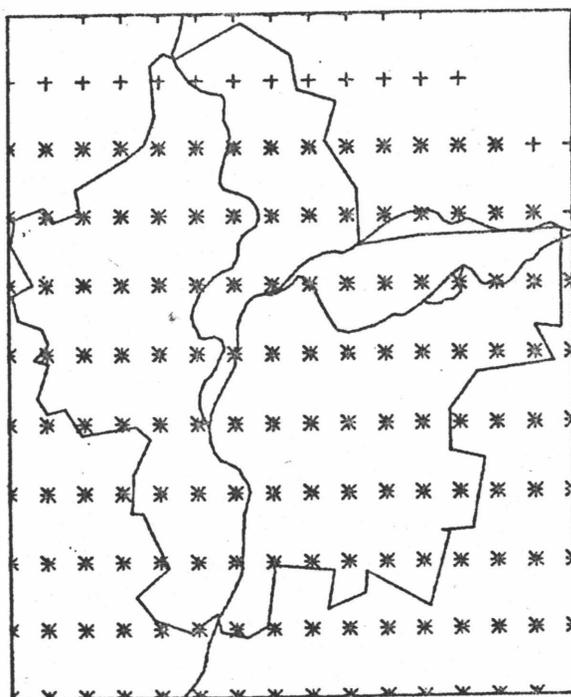


Figure 56 : - sommet a un seul poste d'interpolation (+)  
 - sommet a plusieurs postes d'interpolations (\*)

### 2,3,2 PONDERATION CROISEE PAR LES DISTANCES

Nous avons d'autre part, mis au point une méthode dérivée de la "pondération simple par les distances" méthode que par opposition nous appelons "pondération croisée par les distances". Dans cette méthode, interviennent aussi dans l'interpolation, pour le calcul de l'intensité au noeud  $s$ , les noeuds adjacents situés à l'intérieur du périmètre d'action.

La formule s'écrit identiquement :

$$(48) i_s = \sum_{d_{s,k} \leq D_i} \left[ \frac{i_k \cdot [1/d_{s,k}]^\alpha}{\sum_{d_{s,j} \leq D_i} (1/d_{s,j})^\alpha} \right]$$

Mais dans ce cas :

$i_k$  représente-soit une intensité mesurée sur un poste pluviométrique  
-soit une intensité calculée sur un sommet adjacent à  $s$

Remarques :

- 1) Cette deuxième méthode, est beaucoup plus difficile à mettre en oeuvre que la première, puisqu'elle nécessite la résolution d'un système linéaire d'équations dont les inconnues sont les intensités aux sommets (système linéaire dont la formulation dépend du nombre de postes retenus pour la modélisation - possibilité d'étudier la sensibilité du modèle suivant la quantité d'information donnée au départ-). Or, dans les cas courants, le nombre d'inconnues avoisine la centaine ce qui oblige pour une résolution directe à inverser une matrice  $100 \times 100$  : tâche bien au-delà des capacités du micro-ordinateur Tektronix 4054.

Nous résolvons donc le système par itérations mais la résolution est très lente et nous conseillons d'utiliser cette méthode, dans la configuration actuelle du système, uniquement pour le calcul de la lame d'eau, cumulée, totale, de l'averse (1 seul système à résoudre)

- 2) Il découle, de la définition de la pondération croisée, qu'elle atténue les variations brusques de l'intensité dans l'espace. Les réflexions que nous avons menées dans les chapitres précédents sur la nature du phénomène conduisent à s'interroger sur l'opportunité d'un tel raffinement d'autant plus qu'il est coûteux en temps calcul.

Pourtant, nous avons tenu à l'intégrer dans le système de traitement, pour évaluer quel est l'ordre de grandeur de la différence introduite, dans les résultats pour différentes pluies, étudiées.

2.3.3 MISE EN OEUVRE DE L'INTERPOLATION MULTIPLE :

Deux problèmes se posent à propos de ces deux méthodes d'interpolation :

- Détermination correcte du quadrillage,
- Détermination des coefficients  $\alpha$  (exposant de la distance) et  $D_i$  (distance d'influence).

a) Détermination correcte du quadrillage, (au sens du modèle.)

Pour calculer l'intensité, en un point quelconque du bassin, on suppose que la facette dans laquelle il se trouve est une surface réglée.

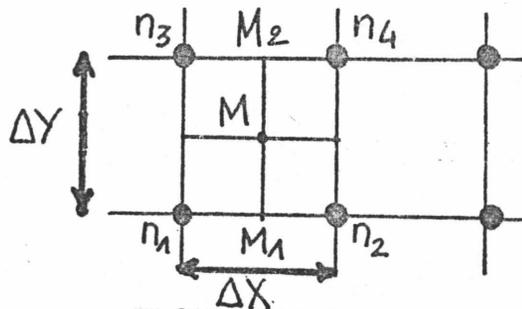


Figure 57

Soit  $M$  le point considéré situé entre les noeuds  $n_1, n_2, n_3, n_4$

$$M: \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix} \quad n_i: \begin{pmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \end{pmatrix} \quad M_i: \begin{pmatrix} x_{Mi} \\ y_{Mi} \end{pmatrix}$$

Pour calculer  $I_M$ , on considère les deux points  $M_1$  et  $M_2$ .

$$I_M = \frac{(y_M - y_{M_1}) I_{M_2} + (y_{M_2} - y_M) I_{M_1}}{\Delta y} \quad (49)$$

$$I_M = \frac{(x_{n_3} - x_M) I_{n_4} + (x_M - x_{n_4}) I_{n_3}}{\Delta x} \quad (50)$$

Avec

$$I_{M_2} = \frac{(x_{n_3} - x_M) I_{N_4} + (x_M - x_{n_4}) I_{n_3}}{\Delta x} \quad (51)$$

$$I_{M_2} = \frac{(x_{n_3} - x_M) I_{n_1} + (x_M - x_{n_4}) I_{n_2}}{\Delta x} \quad (52)$$

Lorsque les mailles  $\Delta x$  et  $\Delta y$  tendent vers  $\emptyset$ , la valeur de  $I_M$  tend vers une valeur qui est la valeur vraie-au-sens-du-modèle.

Le quadrillage sera jugé suffisamment serré (ie  $\Delta x$  et  $\Delta y$  ne sont pas trop grands) lorsque quel que soit le point M considéré la valeur de  $I_M$  ne varie plus significativement quand on diminue le maillage.

Pratiquement on peut, pour plusieurs maillages, faire dessiner la surface obtenue et juger à partir de quelle densité de noeuds la surface reste stable. Un maillage 10 X 10 (sur le territoire de la COURLY), semble convenir.

#### b) Détermination des coefficients $\alpha$ et $D_i$ .

La méthode proposée consiste, à prendre chacun des postes de mesure, individuellement et à calculer par la méthode de la pondération simple par les distances, à partir des mesures obtenues sur les autres postes, un hyétogramme approximé.

Pour chaque couple  $(\alpha, D_i)$ , de valeurs de  $\alpha$  et  $D_i$  retenues, on compare le hyétogramme approximé au hyétogramme mesuré.

Pour un exposant  $\alpha$  fixe, la distance d'influence à prendre en compte est celle pour laquelle, sur l'ensemble des postes, l'écart calcul/mesure est le plus faible.

Nous avons deux critères pour mesurer l'écart calcul/mesure, en chaque poste K.

a) la valeur moyenne de l'écart absolu entre l'intensité moyenne mesurée et l'intensité moyenne calculée, à chaque pas de temps notée  $(E_{m,k})$ .

b) le rapport moyen de l'intensité moyenne mesurée sur l'intensité moyenne calculée, à chaque pas de temps noté  $(R_{m,k})$ ,

La connaissance des valeurs  $E_{m,k}$  et  $R_{m,k}$ , en chaque poste  $k$ , est le moyen le plus direct dont nous disposons pour évaluer le modèle en regard du phénomène tel qu'il est effectivement perçu par le réseau.

Nous pouvons en retirer une évaluation grossière de la précision du modèle (écart moyen probable entre l'intensité vraie et celle mesurée)

Nous pouvons aussi, examiner, s'il y a, d'un pluviomètre à l'autre, des différences significatives pour la détermination de la distance d'influence optimale. Dans le cas positif, il faudrait abandonner le concept de distance d'influence constante sur tout le bassin, pour la séquence étudiée, du moins.

## 2.4 RECHERCHE D'UNE EQUATION DE LAME D'EAU.

### 2.4.1 PRINCIPE

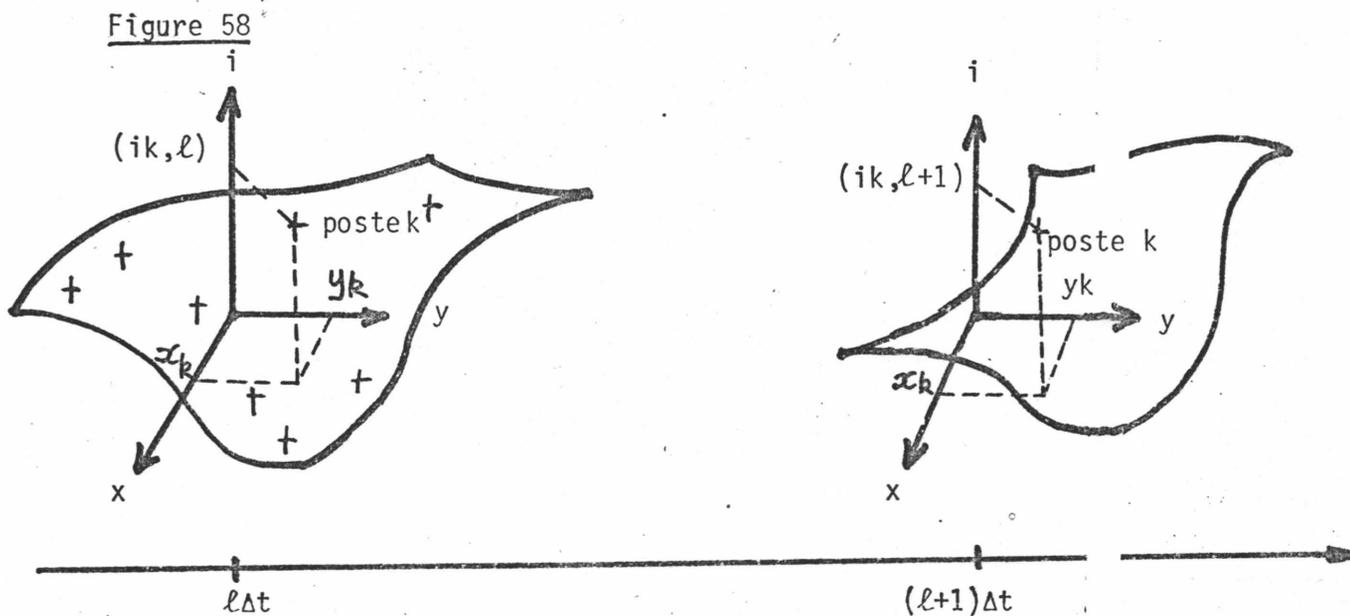
La technique utilisée est celle de l'approximation aux moindres carrés. Celle-ci consiste, pour un nuage de données fixé, à définir un sous-espace de fonctions analytiques dans lequel on minimisera la somme des carrés des écarts.

Dans le cas de figure que nous avons réalisé, les données, à chaque pas de temps sont réperées par trois coordonnées  $(x_k; y_k; i_{k,l})$

$x_k$ : longitude lambert du poste  $k$

$y_k$ : latitude lambert du poste  $k$

$i_{k,l}$ : intensité moyenne sur le poste  $k$  au  $l$ ème pas de temps  $\Delta t$



A chaque pas de temps on écrit :

$$I_j(x,y) = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \phi_{ij}(x,y) \quad (53)$$

$I_j(x,y)$  : fonction représentant la lame d'eau au pas de temps  $j\Delta t$

$(x,y)$  : coordonnées du point en lequel on veut effectuer l'approximation

$\phi_{ij}$  :  $i$  eme fonction de base choisie pour l'approximation à  $j\Delta t$

$n$  : nombre total de fonctions de base retenues

$\alpha_{ij}$  : coefficient de la  $i$  eme fonction de base, au pas de temps  $j\Delta t$

$\phi_{ij}(x,y)$  est de la forme :

$$\phi_{ij}(x,y) = x^{a_i} y^{b_i} \quad (a_i, b_i) \in (R^+) \times (R^+) \quad (54)$$

La base de fonctions choisie pour l'approximation des lames est la même pour tous les pas de temps (ie  $\phi_{ij}(x,y) = \phi_i(x,y)$ ). Seul le coefficient,  $\alpha_{ij}$ , dépend de la variable temps;

$$I_j(x,y) = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \phi_i(x,y). \quad (55)$$

Le principe de l'approximation aux moindres carrés consiste, à chaque pas de temps à déterminer les  $\alpha_{ij}$  de telle sorte que la somme des carrés des écarts aux postes soit minimale :

A chaque pas  $j\Delta t$ , on a :

$$E = \sum_{k=1}^p (I_j(x_k, y_k) - i_{k,j})^2 \text{ est minimale} \quad (56)$$

$(x_k, y_k)$  : coordonnées du poste  $k$ ,

$p$  : nombre de postes retenus pour l'approximation,

$I_j(x_k, y_k)$  : valeur approximée de l'intensité au poste  $k$

$i_{k,j}$  : valeur mesurée de l'intensité au poste  $k$ ,

Remarques :

Il découle de cette définition que :

a) si le nombre de fonctions de base est identique au nombre de postes considérés, la méthode équivaut à une interpolation simple - puisque évidemment dans ce cas  $E$  est nul or par définition  $E \geq 0$  -

b) le nombre de fonctions de base est inférieur ou égal au nombre de postes retenus sinon, le problème est indéterminé - une infinité de solutions sont possibles-

#### 2.4.2 DIFFICULTES THEORIQUES A PROPOS DE LA METHODE $H = H(x,y)$

La difficulté de cette méthode réside dans la détermination,

a) des couples  $(a_i, b_i)$  définissant les fonctions  $\phi_i(x,y)$

b) le nombre de fonctions  $\phi_i$  choisies, appelé  $n$

Le critère étant que la morphologie arbitrairement attribuée à l'objet et entièrement déterminée par le choix des valeurs  $a_i, b_i, n$  corresponde le plus exactement, à celle du phénomène, et ce, au sens des modèles de calcul de débit en aval (!)

Le critère, le plus simple, consiste à raisonner sur l'écart  $E$  et dire que plus cet écart est minime, meilleure est la solution,

Ce type de raisonnement est l'analogue de celui utilisé, dans les méthodes d'interpolation multiple pour déterminer la distance d'influence  $D_i$  et le coefficient de puissance  $\alpha$ , Il compare directement les données transformée du modèle aux données mesurées correspondantes, dans les mêmes conditions,

Or, dans le cas de l'approximation par des fonctions de base, les limites du critère sont faciles à percevoir,

En effet, pour minimiser  $E$  il suffit d'augmenter le nombre de fonctions de base, pour le cas limite de l'interpolation on obtient théoriquement  $E = \phi$  **quelles** que soient les fonctions de bases indépendantes choisies au départ ! (Numériquement des difficultés afférant à la précision des calculs et le conditionnement de matrice empêchent d'obtenir exactement l'écart nul)

Or, si le nombre de postes,  $n$ , est suffisamment grand, le choix mauvais de

de certaines fonctions de base risque d'introduire des irrégularités dans la distribution spatiale, à certaines échelles, qui ne correspondent pas à une "réalité du phénomène" et révéler une inadéquation objet-modèle quand bien même le critère E-minimal est de mieux en mieux respecté,

Schéma d'un cas de figure en dimension 1 :

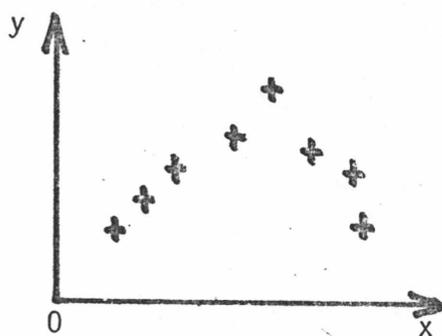


Figure 59

le nuage de points

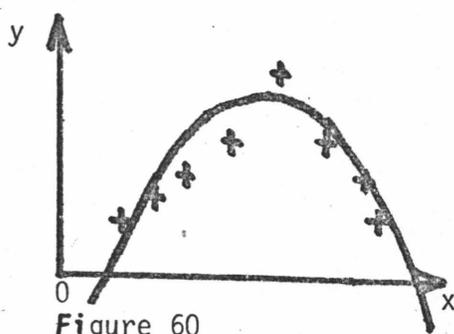


Figure 60

approximation parabolique :  $\phi_1 (E_1)$

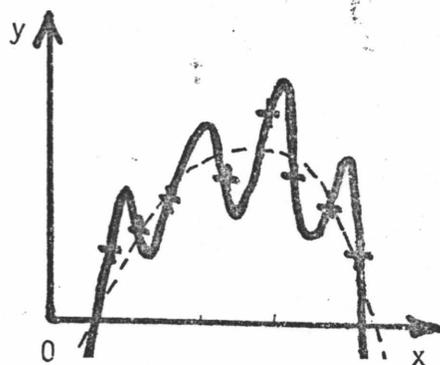


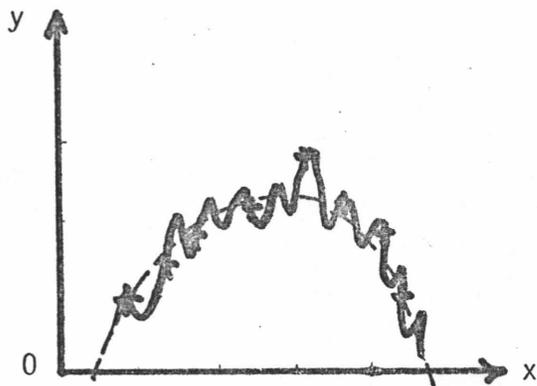
Figure 61

interpolation :  $\phi_2 (E_2)$

Laquelle des deux fonctions  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  correspond le mieux à la "réalité" du nuage de points ?

Si l'on en juge par le seul critère E-minimal on préférera  $\phi_2$ . Pourtant le type d'irrégularité introduite dans la morphologie  $\phi_2$  correspond-elle au type d'irrégularité que l'on observe ?

Si nous supposons que morphologiquement le nuage réel se décrit comme ci-dessous,



Alors  $\phi_1$  doit être préférée même si  $E_1 \geq E_2$ .

Figure 62

Cette introduction possible d'irrégularités inadéquates (à l'échelle où l'on les observe) nous l'appelons instabilité du modèle. Elle dépend, d'une manière complexe, du nombre et du choix des fonctions.

Cette instabilité n'est pas mesurable à partir du seul critère E minimal. Nous aborderons, dans les chapitres consacrés à la validation numérique ou graphique des modèles, certains principes généraux de vérifications, applicables à tous les modèles.

### 3. LE CALCUL DE LA TRAJECTOIRE [47] [82] [10]

#### 3.1 Quelques méthodes employées par les météorologistes

##### 3.1.1 Perspective des météorologistes

Un des difficultés du problème consiste en ce que les notions de trajectoire et de vitesse de déplacement sont établies ~~sur~~ des bases douteuses - du moins pour ce qui concerne les cas que nous avons examinés. Elles reposent en effet, sur certaines hypothèses concernant le phénomène - existence de l'épicentre, distribution spatiale simple... - lesquelles s'avèrent trop réductrices, et impraticables dans la perspectives d'une caractérisation fine des pluies historiques.

Parallèlement à ce type d'approches, typiquement hydrologique, les météorologistes, ont développé, depuis une décennie, d'autres techniques, qui reposent sur le traitement des images radar. L'objectif poursuivi est la prévision, à court terme, des zones de précipitation - délais inférieurs à 3 heures - autrement appelée le "nowcasting".

Or, pour prévoir, il faut déterminer une (ou des) trajectoire(s) qui permettent de caractériser la position successive des echos (zones de forte réflectivité) lesquelles correspondent aux zones **plu**vieuses.

##### 3.1.2. Une première approche consiste en le suivi d'échos

On isole, par seuillage, les échos à forte intensité sur chaque image et on essaie de chercher leur trace dans l'image suivante, déterminant ainsi une trajectoire pour chaque écho.

La difficulté consiste à identifier les échos qui se correspondent d'une image à l'autre - c'est un problème de reconnaissance de forme - Il n'est pas dans notre intention de dresser une liste exhaustive de toutes les techniques que les météorologistes ont mises au point pour suivre les échos, elles sont très nombreuses Il nous suffit d'en faire ressortir le mélange d'empiri-



fération des méthodes et leur nature empirico-rationnelle.

Une autre technique, anglaise, pour le calcul des déplacements consiste à calculer tous les déplacements possibles entre les centres de gravité  $(X_1, Y_1)$  des échos de l'°image T1 et les centres  $(X_2, Y_2)$  des échos de l'°image T2, on calcule le déplacement le plus fréquent,  $(X_m, Y_m)$  du tableau à une unité près. Ensuite, à chaque échos de T1, on fait correspondre un écho de T2 par numérisation d'°une fonction économique F.

L'expression la plus simple données est :

$$(57) \quad F(X_1, X_2, Y_2) = (X_2 - X_1 - X_m)^{1/2} + (Y_2 - Y_1 - Y_m)^{1/2}$$

Cette expression simple peut conduire, si on n'y prend pas garde, à certaines aberrations en cas de déplacements rotatifs des échos, de morcellements d'°agglomérations, de créations de nouveaux échos... phénomènes relativement courants dans les précipitations d'°origine convectives.

D'autres fonctions économiques ont donc été proposées qui font intervenir des caractéristiques supplémentaires (aire, intensité...) mais ce raffinement de la méthode, s'ils améliorent la qualité des résultats obtenus, induisent par contre des temps de calcul très longs. d'autant plus que la minimisation, nécessite, dans les cas complexes, un processus itératif de résolution.

### 3.1.3 Les méthodes globales

3.1.3.1. Une deuxième approche considère les images obtenues (ou portion d'°image) de manière globale, on l'a nomme technique de la corrélation croisée (cross-correlation).

Soit deux images A1 et A2 obtenues, respectivement aux instants T1 et T2, le coefficient de corrélation croisée, pour un déplacement  $\vec{D}$  de l'°image, est défini comme suit :

$$(58) \quad R(\vec{D}) = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M (I - \bar{I}) \cdot (I' - \bar{I}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M (I - \bar{I})^2 \cdot \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M (I' - \bar{I}')^2}}$$

- I est le champ de valeurs contenu dans A1 translaté par  $\vec{D}$  (T [A1] )
- I' est le champ de valeurs de A2
- L, M correspondent aux dimensions de l'aire sur laquelle on calcule R
- $\bar{I}, \bar{I}'$  sont les moyennes des champs obtenues sur l'aire LxM
- A chaque déplacement  $\vec{D}$ , est associé, un coefficient de corrélation. L'ensemble de ces coefficients, détermine la matrice de cross-correlation.

D'après l'hypothèse du "statu quo" (invariance des zones pluvieuses), on suppose que le champ contenu dans l'image A2, est le translaté par un déplacement  $\vec{D}_0$  du champ contenu dans l'image A1. Ce déplacement  $\vec{D}_0$  correspond au maximum de la matrice de cross-correlation et détermine un déplacement global de la zone étudiée.

On peut appliquer le même principe non pas sur l'image entière obtenue au radar mais sur plusieurs sous-images mettant peut-être en évidence plusieurs groupes homogènes d'échos, ayant une dynamique différente.

3.1.3.2. Une autre technique, analogue, consiste à superposer l'image A2 et l'image A1 translatée de  $\vec{D}$  et calculer en chaque surface élémentaire la valeur absolue de la différence entre les deux champs et cumuler cette différence sur l'image. C'est donc une technique de minimisation (on aura, auparavant, pris la précaution d'éliminer les échos dits fixes qui sans cela fausseront inévitablement les résultats)

A1: image à l'instant T1 représente le champ I (i, j, T1)

A2:image à l'instant T2 (>T1) représente le champ I (i, j, T2)

$\vec{D}(\vec{a})$ :vecteur de déplacement considéré

$\epsilon_{ij}$ :différence élémentaire

$E_t$ :différence cumulée sur l'image :

$$(59) \quad \epsilon_{ij} = |I(i-a, j-b, T1) - I^0(i, j, T2)|$$

$$(60) \quad E_T = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \epsilon_{ij}$$

Le déplacement retenu est aussi un déplacement global d'image et correspondant au déplacement  $\vec{D}_0$  qui minimise  $E_t$ .

D'autres définitions de l'écart entre les champs de valeur définis par l'image A1 translattée et l'image A2 peuvent être imaginées (norme euclidienne...).

Les méthodes de cross-correlation et de minimisation de l'écart ont été testées et il semble qu'elles soient équivalentes tant au plan du résultat qu'au plan du temps calcul.

3.1.3.3. Pour diminuer ce temps-calcul une dernière méthode a été proposée que l'on appelle la corrélation booléenne. Les valeurs sur le champ considéré, ne peuvent prendre que la valeur 0 ou 1-1 dans les zones pluvieuses délimitées par les forts échos, 0 ailleurs.

On applique alors la cross-correlation sur ce champ transformé.

$$(61) \quad R(\vec{D}) = \frac{S(T[A1] \cap A2)}{S(T[A1]) \cdot S(A2)}$$

- $S(T[A1] \cap A2)$  surface d'intersection entre A2 et le translatté de A1 par  $\vec{D}$
- $S(T[A1]) \cdot S(A2)$  produit de l'aire de A1 translattée par l'aire de A2

(remarque : le dénominateur est introduit par souci de normalisation, car le domaine varie).

La valeur du déplacement, retenue entre T1 et T2, est  $\vec{D}_0$  qui maximise la valeur de  $R(\vec{D})$ .

Les résultats obtenus par la cross-correlation booléenne sont comparables à ceux obtenus par la cross-correlation classique pour les situations étudiées, mais le temps de calcul est beaucoup plus faible pour la première méthode (booléenne).

### 3.2 Exposé de la méthode retenue

Ces différents traitements l'image radar pourquoi ne pas tenter de les appliquer à l'image de la lame d'eau modélisée ? La lame d'eau modélisée déterminée à partir d'une interpolation sur les mesures aux postes pluviométriques est beaucoup plus régulière que l'image-radar, la comparaison est risquée mais elle constitue, à notre avis, un moyen supplémentaire d'évaluer une modélisation.

Nous avons opté pour une technique relativement simpliste. A chaque instant T, "la position de la lame d'eau" est déterminée par le barycentre des intensités sur l'image entière. Seules les intensités supérieures à un seuil préalablement fixée par l'utilisateur sont prises en compte. La trajectoire est constituée par une courbe en ligne brisée passant par les positions successives du barycentre de la lame.

$$P(T) = \begin{cases} p_x(T) \\ p_y(T) \end{cases}$$

$$(62) \quad p_x(T) = \frac{\iint_S x \cdot I(x,y,T) \, dS}{\iint_S I(x,y,T) \, dS} \quad (63) \quad p_y(T) = \frac{\iint_S y \cdot I(x,y,T) \, dS}{\iint_S I(x,y,T) \, dS}$$

$I(x, y, T)$  : champ des intensités à l'instant  $T$  avec  $I(x, y, T) = 0$  si

$I(x, y, T) \leq I_0$  (fixé par l'utilisateur).

$P$  : position de la lame

$S$  : surface d'intégration (représente le rectangle circonscrivant le territoire de la COURLY.)

#### 4. VALIDATION DES MODELES ( Méthodes Générales)

##### 4.1. Validation graphique des modèles

Pour évaluer un modèle, une première possibilité consiste à effectuer des comparaisons à partir de représentations graphiques. Trois referents sont possibles :

- une autre modélisation
- l'information ponctuelle brute donnée par le réseau
- l'information donnée par un autre type de mesure (ex : le radar)

La comparaison peut-être :

-- synchronique : elle porte sur les mêmes périodes, pour deux modélisations différentes

-- diachronique : elle porte sur la caractérisation du déroulement du processus au fil du temps suivant différents pas d'intégration  $\Delta T$ , globalement ou localement.

L'avantage énorme qu'offre la visualisation d'un processus consiste en ce que l'image synthétise une quantité d'information énorme s'il faut la traduire numériquement. Or manipuler des tableaux de valeurs comparées, dépasse rapidement les capacités de l'analyste et on en revient à dégrader l'information (calcul de moyenne, de variance...) au risque de manquer des caractéristiques essentielles.

Un effort important, a donc, dès le début, été consenti, pour fournir au chercheur ou au technicien, un éventail aussi large que possible de représentations graphiques.

En ce qui concerne les intensités pluviométriques, différents types de représentations planes ou en perspective ont été proposés tant pour visualiser l'information ponctuelle brute (les mesures effectuées au droit des pluviomètres) que l'information modélisée (lame d'eau continue sur une surface).

D'autre part, les logiciels de calcul de la trajectoire, incluent une représentation graphique de celle-ci.

#### 4.2. Validation numérique des modèles

Un première méthode consiste à dégrader artificiellement l'information primaire du modèle et étudier son comportement.

a) On peut, par exemple, supprimer certains postes de mesures et vérifier la capacité du modèle à reproduire l'information oblitérée. A noter, que cette technique suppose que le poste en question recueille une mesure significative localement.

L'hypothèse est probable, si l'on juge sur le hétérogramme entier mais il faut se méfier si l'on travaille sur un pas de temps unique étant donné "la nature" du phénomène.

Une vérification complémentaire consiste à comparer la nouvelle solution, non pas à des données mesurées mais à la solution précédente et évaluer la signification des écarts du point de vue du modèle, c'est ce que nous appelons vérification de cohérence interne (au modèle) ou autocohérence.

b) On peut étudier le comportement du modèle et sa validité en fonction de la base de temps, choisie pour décrire l'évolution temporelle du phénomène. Nous avons précédemment, beaucoup insisté sur les possibles différences qualitatives dans la description de l'objet suivant la valeur du pas de temps d'intégration. Il n'est donc pas exclu que certaines modélisations inadéquates à certaines échelles temporelles se révèlent efficaces pour d'autres valeurs du pas de temps  $\Delta T$ .

Le système informatique de traitement que nous avons réalisé autorise une investigation de ce type. Il repose sur la distinction en trois notions :

- a) le pas de temps de mesure de la pluie : 6 minutes
- b) le pas de temps de scrutation est un multiple de 6 minutes.

On obtient les valeurs sur ce pas de scrutation en moyennant les valeurs des pas de mesure.

c) le pas de temps d'interpolation est un diviseur du pas de scrutation on obtient les valeurs sur le pas d'interpolation en interpolant linéairement sur les valeurs successives du pas de scrutation.

Remarque :

A partir de la mesure, calculer les valeurs pour un pas de scrutation strictement supérieur à 6 minutes, puis revenir par interpolation à la valeur 6 minutes, est équivalent à imposer un certain lissage du phénomène.

Un deuxième type de vérification consiste à évaluer les modélisations, sur des paramètres fournis par le modèle directement ou induits. Ainsi, par exemple :

- Nous proposons de construire le hyétogramme moyen, de calculer une variance spatiale du phénomène et de la caractériser en fonction des valeurs de l'intensité. Il sera alors intéressant de comparer les résultats obtenus pour les différentes modélisations avec les valeurs que l'on obtient à partir des seules mesures ponctuelles et ce pour différents pas de temps d'intégration.

- Pour les modèles de construction de lame d'eau, par recherche d'une équation analytique, nous proposons un traitement permettant d'évaluer l'évolution des coefficients de chacune des fonctions de base en fonction des pas de temps. L'idée sous-jacente à ce type de traitement consiste à examiner, s'il était possible, de transcrire sous forme analytique explicite l'évolution spatiotemporelle du phénomène ( $I = I(\vec{x}, T)$ ).



CHAPITRE 5

LE SYSTEME INFORMATIQUE : UN EXEMPLE DE TRAITEMENT

## 1. INTRODUCTION

Au précédent chapitre, nous avons exposé les principes des modèles retenus pour exploiter les données ainsi que certains traitements de vérification du bien fondé de ces modèles.

La traduction informatique des traitements doit s'effectuer selon une architecture des programmes qui s'adapte le mieux possible aux caractéristiques de l'outil (micro-ordinateur TEKTRONIX 4054) pour permettre la plus grande facilité et rapidité d'utilisation.

On peut définir une hiérarchie de traitements, simplement, suivant leur nature et le type de données - entrée qu'ils requièrent.

HIERARCHIE DES TRAITEMENTS (chaque flèche définit une succession obligatoire des traitements)

- 1/ Données - entrée : Information stockée sur la disquette - mois  
Traitement : Choix et stockage d'une séquence intéressante



- 2/ Nouvelles données entrée : Tableau de valeurs  
 (chaque colonne représentant les valeurs sur un poste en fonctionnement)  
 (chaque ligne représentant les valeurs pour un pas de temps de 6 mn )  
Traitement :  
 Transformation du tableau brut (suppression de postes, intégration, interpolation)



- Représentations graphiques de l'information ponctuelle
- Modélisations pour le calcul de la lame d'eau



- 3/ Nouvelles données entrée :  
 Tableau des valeurs au poste transformée ou paramètres résultats des modélisations.  
Traitement :  
 Reconstitution des représentations ponctuelles  
 Construction des représentations modélisées  
 Etude de validation des modèles de calcul de lame  
 Calcul de trajectoire

Cette hiérarchie "naturelle" a été reproduite fidèlement dans l'organisation du système informatique.

Les 3 niveaux de traitement requérant des types de données - entrée différents ont été bien séparés : ils nécessitent chacun des supports disquette différenciés.

niveau 1 : support disquette - mois
-------------------------------------

niveau 2 : support disquette - événements intéressants - (tableaux bruts)
---

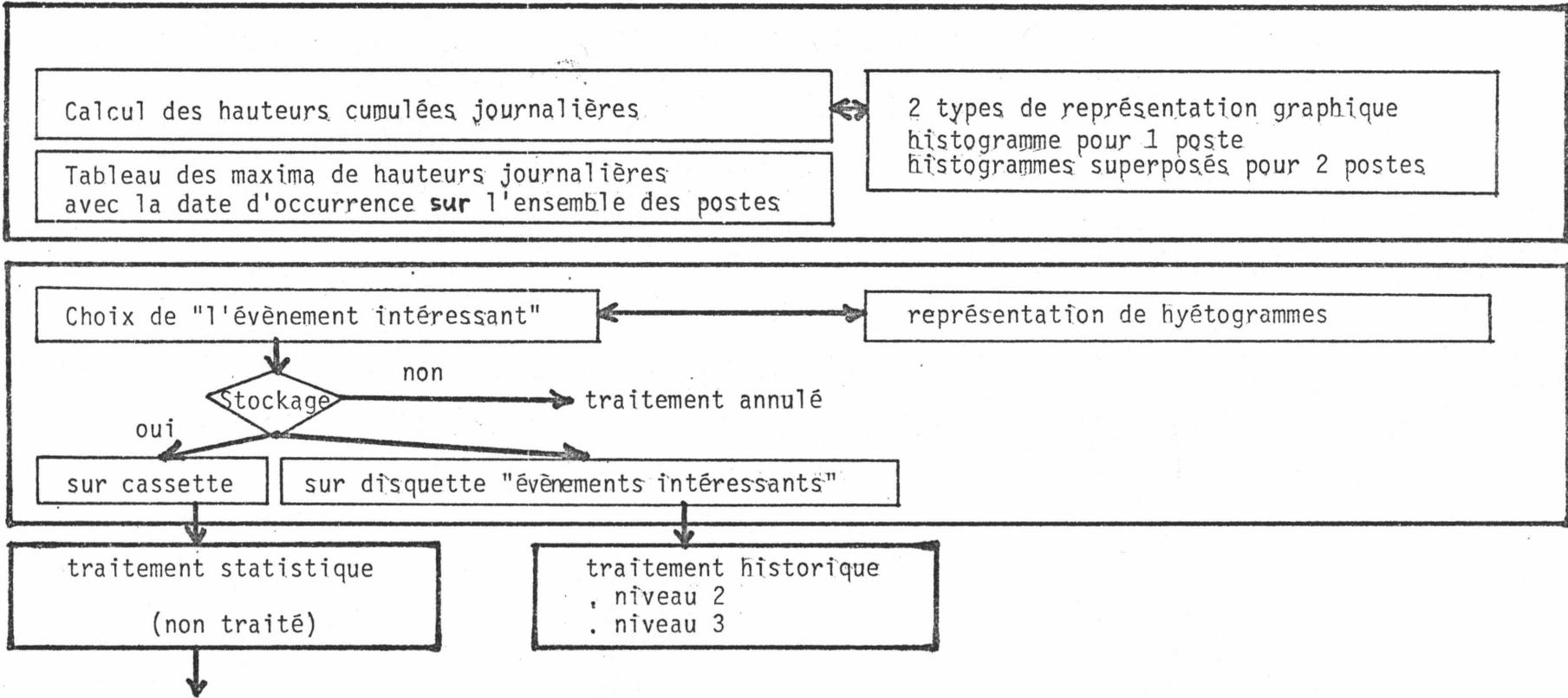
niveau 3 :	support disquette - information ponctuelle - (tableaux transformés)
	support disquette - modélisation - (valeurs aux noeuds d'un quadrillage ou coefficients des fonctions de base).

Dans la présentation des traitements qui va suivre, nous avons respecté cette trame suivant les niveaux. Pour chaque niveau, nous représenterons un organigramme précis des traitements réalisés, avant de préciser leur principe, puis d'en tirer, si possible, des conclusions sur l'exemple traité.

Bien qu'il soit difficile d'assurer ses conclusions sur un exemple unique (l'événement du 4 octobre 1984), les résultats obtenus font l'objet de commentaires à partir desquels certaines voies de recherche peuvent être dégagées. Le système proposé ne représente en effet, selon nous, qu'un premier essai vers une étude approfondie des caractéristiques de pluies orageuses selon la perspective de l'hydrologie urbaine.

On trouvera, en annexe 3, la liste complète de tous les programmes réalisés tant pour le stockage et l'archivage que pour l'exploitation des données.

figure 65 : NIVEAU 1 SUPPORT : disque-mois



## 2. TRAITEMENT NIVEAU 1 : RECHERCHE DE L'ÉVÉNEMENT INTÉRESSANT (voir schéma organisation niveau 1)

### 2.1. Problèmes posés

La recherche d'un événement intéressant pose deux types de problèmes :

- détecter l'événement
- en déterminer les limites temporelles (date de début et fin)

Pour détecter l'événement, nous disposons de deux moyens :

- Une chronique des dysfonctionnements observés du réseau est certainement un moyen incomparable mais tous les dysfonctionnements ne sont pas forcément relevés soit parce qu'ils n'entraînent pas de désordre en surface, soit parce que ces désordres sont très circonscrits et les éventuels témoins ne sentent pas le besoin de les rapporter.

- Un tableau des hauteurs cumulées journalières sur les postes du réseau constitue un moyen classique de repérage des épisodes orageux [63]. En effet, les jours où la hauteur d'eau précipitée dépasse plusieurs centimètres, auront presque certainement connu un épisode orageux, surtout s'il s'agit de la période estivale.

Ayant ainsi déterminé le jour sur lequel est centré l'événement intéressant, il s'agit d'en préciser la durée.

Or, s'élève une difficulté en ce que généralement la pluie consiste en plusieurs séquences précipitantes mesurées séparées par des intervalles plus ou moins longs. Faut-il exhiber une seule séquence - la plus longue ? la période intense ? - ou regrouper plusieurs séquences - mais alors quel critère prendre en compte ?

DESBORDES [28], dans son étude pour l'élaboration d'une pluie de projet, prend comme hypothèse : "Deux épisodes sont considérés comme distincts lorsqu'ils sont séparés par une durée minimale de 6 heures au cours de laquelle l'intensité instantanée reste inférieure à 1 mm/heure". 6 heures correspondent au plus grand temps de concentration rencontré en hydrologie urbaine (le réseau étant vide lorsque survient un nouvel épisode).

D'autres définitions plus compliquées ont été proposées [71] mais elles ont, à notre avis, le même désavantage, à savoir leur rigidité. En fait, les cas de figure possibles sont si nombreux qu'une procédure algorithmique de séparation des épisodes nous semble inadaptée. Nous avons, quant à nous, opté pour une procédure "manuelle". Voici les principales étapes du traitement :

L'opérateur sait que l'événement intéressant est centré sur tel jour. Pour ce jour, un logiciel fournit les dates de début et fin de toutes les séquences pluvieuses ainsi que l'intensité maximale et le nombre de pluviomètres concernés par cette séquence, sous forme d'un tableau.

Remarques :

- Une séquence pluvieuse est une période pendant laquelle il a plu de manière ininterrompue sur l'ensemble de la CO.UR.LY..
- Il pleut sur l'ensemble de la CO.UR.LY. lorsqu'il pleut sur au moins un des postes du réseau.

Si l'opérateur le désire, il peut préciser son savoir sur les caractéristiques temporelles de l'événement en demandant les hyétogrammes mesurés au droit de chaque poste pour telle période qu'il désire (par exemple : 0 h - 24 h ...).

S'étant fixé sur la nature de l'événement, il décide (ou non) de le stocker sur support distinct disquette "événements intéressants" en choisissant lui-même les dates de début et fin d'épisode.

Remarque :

Le cas où l'épisode chevauche sur deux jours ou même trois est traité. La période de scrutation circonscrite par l'ordinateur est, en fait, 3 jours centrés sur le jour fixé par l'opérateur.

L'événement est retiré et délimité, le traitement primaire est terminé.

A noter avant de s'intéresser plus avant aux manipulations effectuées sur les séquences distinguées qu'un stockage parallèle, sur cassette des événements, est possible dans l'optique d'un traitement statistique.

2.2. Traitement et commentaires2.2.1. Choix du jour

Pour le mois d'octobre 1984 (noté OCT84), on obtient :

1) Tableau des hauteurs cumulées journalières pour le mois d'octobre 1984.

```

*****
*          PLUVIOMETRE          * HTOT * HMAX(I) * JOUR MAX *
*          * (CM) * (CM) * (QUANTIEME) *
*****
* VILLEURBANNE:1 * 10.19 * 2.79 * 4 *
* JONAGE:2 * 14.63 * 7.31 * 26 *
* S PRIEST:3 * 10.63 * 3.07 * 4 *
* MIRIBEL:4 * 9.87 * 2.49 * 4 *
* PIERRE BENITE:6 * 7.29 * 3.45 * 4 *
* NEUVILLE :7 * 1.89 * 0.93 * 26 *
* COUZON :8 * 2.57 * 1.31 * 26 *
* GENAS :10 * 4.99 * 2.01 * 19 *
* CORBAS :11 * 12.15 * 3.71 * 4 *
* MIONS :12 * 12.71 * 4.17 * 4 *
* ST GENIS LAVAL CHARLY :14 * 9.97 * 3.01 * 4 *
* ST GENIS LAVAL PRESSIN :15 * 6.41 * 2.95 * 4 *
* COLLONGES :19 * 8.91 * 2.63 * 4 *
* SOLAIZE :21 * 10.79 * 3.85 * 4 *
* GENAY :23 * 2.71 * 1.21 * 26 *
* CROIX LUIZET :24 * 6.13 * 2.65 * 4 *
* BRON :25 * 4.09 * 1.69 * 26 *
*****

```

HTOT : hauteur totale précipitée pour le mois considéré.

HMAX(I) : hauteur maximale, précipitée sur un jour.

JOURMAX : numéro du jour où la hauteur précipitée est maximale,

2) Pour chaque poste, on peut obtenir le tableau et l'histogramme des pluies cumulées journalières.

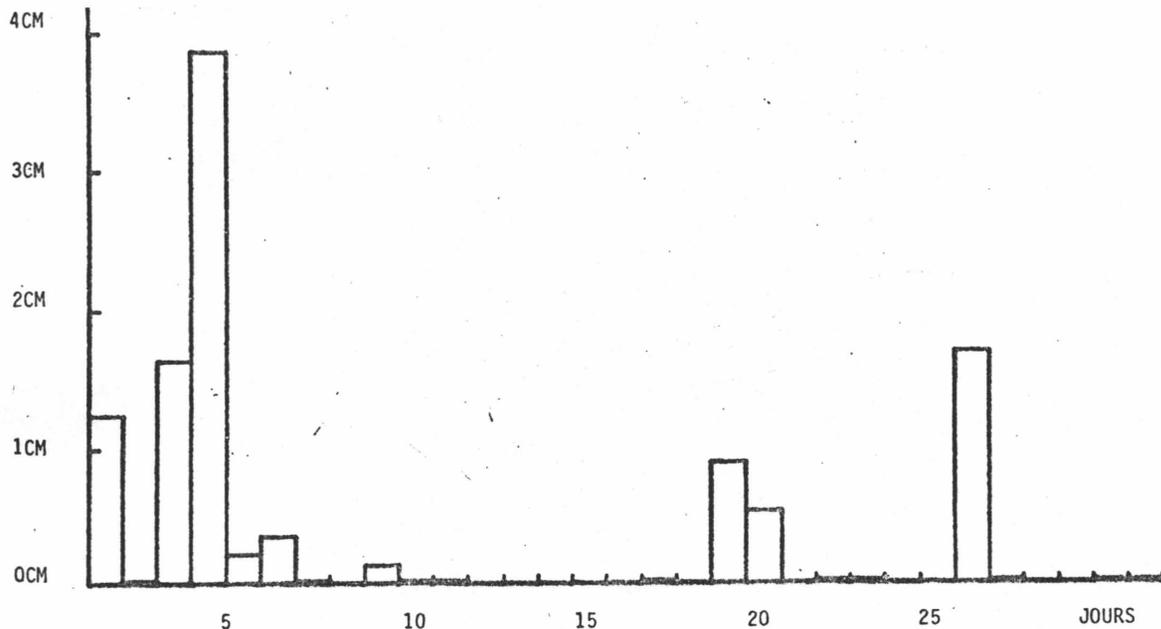


figure 67 : Exemple d'histogramme pour le poste SOLAIZE : 21

En examinant les premiers résultats, certaines vérifications sont recommandées si on remarque des anomalies, c'est-à-dire des différences importantes entre les mesures recueillies par les différents postes - il est, par exemple, peu vraisemblable qu'il pleuve énormément sur un pluviomètre au cours d'une journée alors que sur les autres postes, il n'est rien tombé ou presque. Ce n'est pas que le fait soit impossible (orages d'été), mais il mérite vérification.

Ainsi, deux remarques peuvent être tirées à l'examen de la figure 66

1) La majorité des postes indique le 4 octobre, jour où la hauteur précipitée fut maximale, les autres indiquent le 26, sauf 1 (GENAS : 10), qui indique le 19.

Or, il se trouve que le 4, le 26 et le 19 sont en règle générale les trois jours les plus pluvieux.

D'autre part, si on examine plus attentivement un des postes indiquant le jour 26 par exemple COUZON : 8, on obtient l'histogramme suivant :

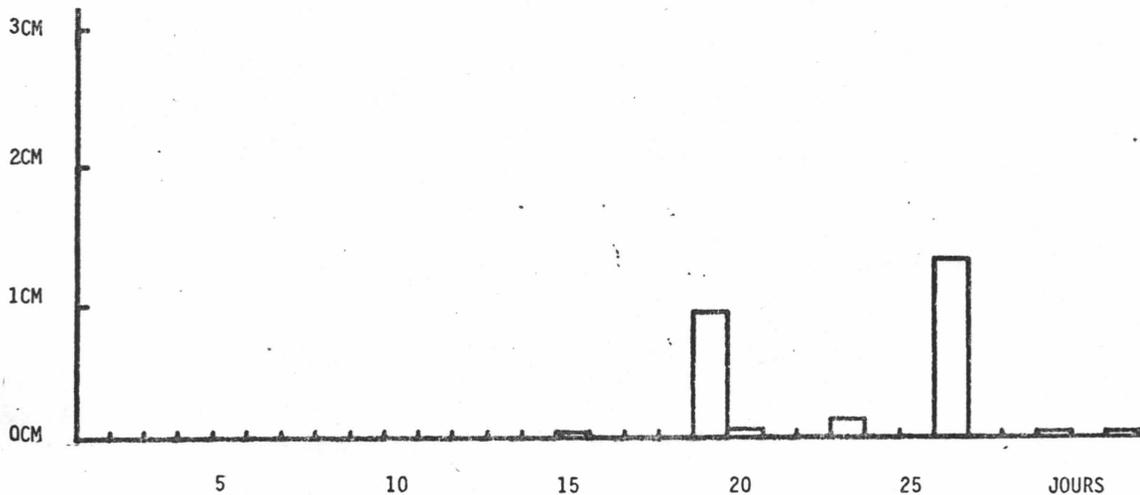


figure 68 : Histogramme des hauteurs cumulées journalières pour le poste COUZON : 8.

On remarque que apparemment tout le début du mois enregistre une hauteur nulle de précipitation, non pas du fait de quelques particularités de la pluviométrie lyonnaise, mais plus prosaïquement du fait que le poste n'était pas en service durant cette période.

Les mêmes vérifications s'imposent pour les autres pluviomètres "anormaux" et les mêmes conclusions.

De même, si on examine PIERRE-BENITE : 6, aucune pluie n'est plus mesurée après le jour 9.

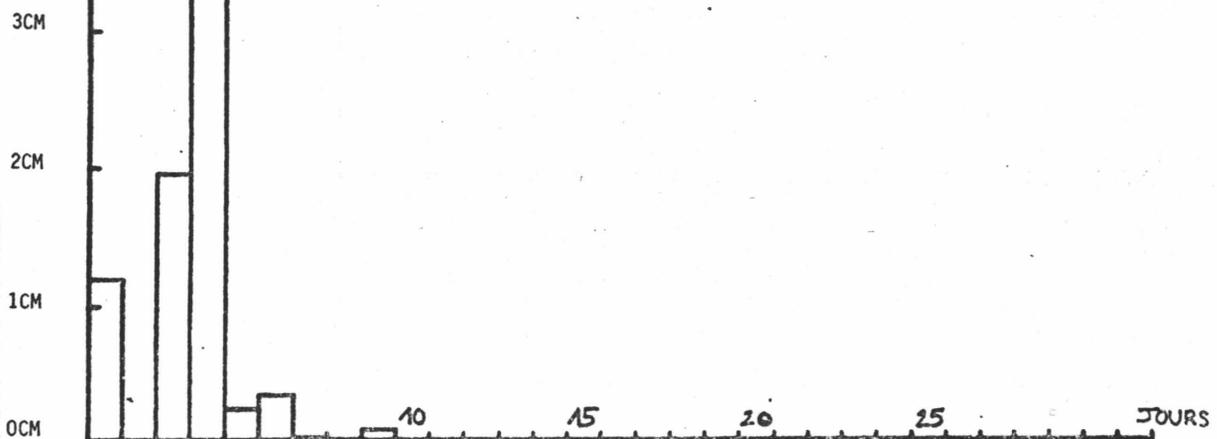


figure 69 : Histogramme des hauteurs cumulées journalières pour le poste PIERRE BENITE : 6.

Une vérification analogue à celle effectuée sur COUZON : 8, montre qu'en effet, l'appareil a cessé de fonctionner correctement vers le milieu du mois et que, par conséquent, les enregistrements n'ont pu être sauvés.

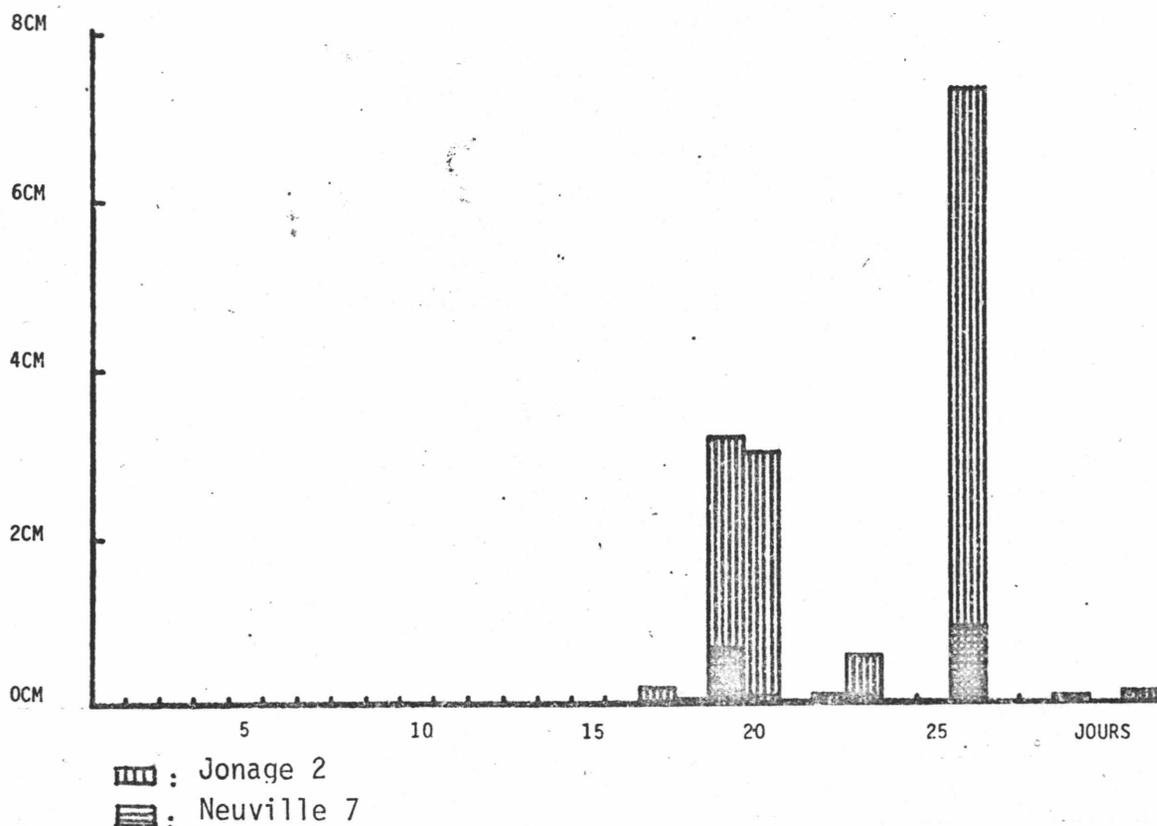
Remarque :

Nous n'avons pas jugé indispensable, dans un premier temps, de coder l'information manquante parce que, dans la perspective des traitements ultérieurs, les observations notées lors du transfert des enregistrements sur disquette quant au bon fonctionnement de chaque poste, semblent suffisantes.

2) Une deuxième remarque concerne le poste JONAGE : 2

Pour ce poste, la hauteur maximale enregistrée le 26 octobre donne 7,31 cm, alors que les autres pluviomètres pour lesquels le 26 octobre est le jour de précipitation maximale enregistrent en moyenne 1,30 cm.

Figure 70 : histogrammes comparés des postes JONAGE : 2 et NEUVILLE : 7.





ALT. M	152	250	240	200	199	290	235	210	237	244	198	181	227
IND. INSÉE	0071	0231	0261	0291	0292	0321	0461	0521	2991	2721	2731	0771	0811
STATION ou POSTE	Ampuis	Blacé (PV Fond de Blacé)	Le Breuil	Bron (Lyon-Bron, MN)	Bron (Le Vinatier)	Bully	Charly	Chazay-d'Azergues	Colombier-Saugnieu (Satolas, MN)	Communay	Corbas (aérodrome)	Dracé	Ecully
DATE													
1	14.0	11.0	7.4	20.8	15.9	5.6	12.0		19.3	17.0	17.1	16.7	7.0
2	(13.0	7.6	5.5	5.6	13.2	7.2	11.0		6.6	7.0	13.4	7.5	8.2
3	10.0)	2.5	3.5	10.1	4.7	1.5	7.0		21.7	8.9	4.0	10.0	6.2
4	35.0	33.2	26.5	33.5	30.6	32.4	36.0		42.4	42.0	37.0	26.8	2
5	(3.0	4.3	3.9	2.5	2.5	3.3	3.0		3.1	2.7	7.8	6.7	4.8
6	4.8)		0.7	4.8	3.9	0.7	4.0		4.7	4.3	2.2		6.3
7			0.0										
8	1.0	0.4		0.9	1.2		1.5		0.7	0.9	1.2		0.9
9				0.5	0.6		0.5		0.5	0.4	0.2		0.3
10													
11													
12													
13													
14													
15									0.2				
16				0.0					0.0		0.1		
17													
18													
19	20.0	15.2	11.7	16.4	17.3	9.8	15.0		24.4	17.8	19.4	17.0	13.0
20	0.5			0.1	0.3		0.5		0.3				
21						0.0							0.7
22													
23			0.6	0.7	1.6	0.5			0.9		0.3		0.9
24													
25	20.0	19.0	9.1	14.4	14.0	7.0	16.0		15.2	17.0	17.4	14.5	10.5
26			4.1	3.1	6.7	8.9	1.0		4.1	0.0	0.4	3.7	1.4
27													
28													
29													
30													
31													
Total DÉC. 1	80.8	59.0	47.5	78.7	72.6	50.7	75.0		99.0	83.2	82.9	67.7	63.9
Total DÉC. 2	20.5	15.2	11.7	16.5	17.6	9.8	15.5		24.9	17.8	19.5	17.0	13.0
Total DÉC. 3	20.0	19.0	13.8	18.2	22.3	16.4	17.0		20.2	17.0	18.1	18.2	13.5
TOTAL MOIS	121.3	93.2	73.0	113.4	112.5	76.9	107.5		144.1	118.0	120.5	102.9	90.4

Fig. 71

On remarque qu'en moyenne il pleut presque 8 fois plus à JONAGE : 2 qu'à NEUVILLE : 7 - JONAGE : 2 et NEUVILLE : 7 ont la même période de fonctionnement et le total précipité sur JONAGE : 2 est 14,63 cm, alors qu'à NEUVILLE :7, il est de 1,89 cm.

Là encore, ce phénomène est possible, mais en vérifiant l'appareillage, on a constaté, par la suite, un défaut de fonctionnement de l'enregistreur sur le poste de JONAGE : 2. Il a été remplacé.

Un autre moyen de vérifier s'il n'y a pas d'aberration flagrante dans les mesures, consiste à comparer ces hauteurs cumulées journalières non plus entre elles, mais aux valeurs recueillies par les pluviomètres installés par la Météorologie Nationale qui publie chaque année les cumuls journaliers sur tous les postes qu'elle gère dans le département.

Figure 71 : tableau de hauteurs cumulées journalières sur des pluviomètres gérés par la Météorologie Nationale.

Exemple de résultats obtenus pour le mois d'octobre 1984.

Remarque :

Certains postes météo-réseau CO.UR.LY. sont situés à quelques mètres l'un de l'autre (BRON, TETE D'OR notamment). Pour ces postes, les données journalières devraient coïncider.

### 2.2.2. Détermination de la séquence

Le 4 octobre 1984 est un jour où la hauteur précipitée totale est en moyenne supérieure à 3 cm, après vérification du bien-fondé des mesures. Il y a grande chance pour qu'il renferme un événement intéressant où les intensités moyennes sur 6 minutes atteignent des valeurs élevées.

A l'aide du programme "recherche de l'événement intéressant", on détermine pour le jour 4 le tableau des pluies "globales" (figure 72).

```

*****
* No *   DEBUT *   FIN *   IMAX *   N *
*****
* 1 *   JJ:4 00H 06MN *   JJ:4 00H 12MN *   2.00 *   1 *
* 2 *   JJ:4 00H 36MN *   JJ:4 00H 42MN *   2.00 *   1 *
* 3 *   JJ:4 02H 54MN *   JJ:4 03H 06MN *   1.34 *   1 *
* 4 *   JJ:4 05H 30MN *   JJ:4 05H 36MN *   2.00 *   1 *
* 5 *   JJ:4 06H 30MN *   JJ:4 06H 36MN *   2.00 *   1 *
* 6 *   JJ:4 06H 54MN *   JJ:4 07H 00MN *   2.00 *   2 *
* 7 *   JJ:4 07H 12MN *   JJ:4 07H 18MN *   2.00 *   1 *
* 8 *   JJ:4 09H 30MN *   JJ:4 09H 48MN *   2.00 *   4 *
* 9 *   JJ:4 09H 54MN *   JJ:4 10H 00MN *   2.00 *   1 *
* 10 *   JJ:4 10H 06MN *   JJ:4 10H 12MN *   2.00 *   1 *
* 11 *   JJ:4 10H 24MN *   JJ:4 10H 30MN *   2.00 *   1 *
* 12 *   JJ:4 10H 36MN *   JJ:4 10H 42MN *   2.00 *   2 *
* 13 *   JJ:4 10H 54MN *   JJ:4 11H 00MN *   2.00 *   1 *
* 14 *   JJ:4 12H 30MN *   JJ:4 12H 36MN *   2.00 *   1 *
* 15 *   JJ:4 12H 54MN *   JJ:4 13H 12MN *   2.00 *   2 *
* 16 *   JJ:4 13H 36MN *   JJ:4 13H 42MN *   4.00 *   1 *
* 17 *   JJ:4 13H 54MN *   JJ:4 14H 00MN *   2.00 *   1 *
* 18 *   JJ:4 14H 36MN *   JJ:4 14H 42MN *   2.00 *   2 *
* 19 *   JJ:4 14H 54MN *   JJ:4 19H 06MN *   44.00 *   8 *
* 20 *   JJ:4 19H 12MN *   JJ:4 20H 18MN *   6.00 *   8 *
* 21 *   JJ:4 20H 42MN *   JJ:4 20H 48MN *   2.00 *   1 *
* 22 *   JJ:4 21H 00MN *   JJ:4 21H 06MN *   2.00 *   1 *
* 23 *   JJ:4 21H 54MN *   JJ:4 22H 00MN *   2.00 *   1 *
* 24 *   JJ:4 23H 12MN *   JJ:4 23H 18MN *   2.00 *   1 *
* 25 *   JJ:4 23H 42MN *   JJ:4 23H 48MN *   0.00 *   1 *
*****

```

No : numéro de la pluie "globale"

Début : date de début de la séquence considérée (jour, heure, minute)

Fin : date de fin de la séquence considérée (jour, heure, minute)

Imax : l'intensité maximale mesurée pour la séquence

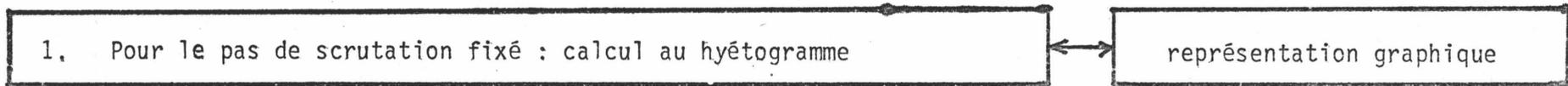
N : nombre de postes qui ont reçu une précipitation non nulle.

Remarque :

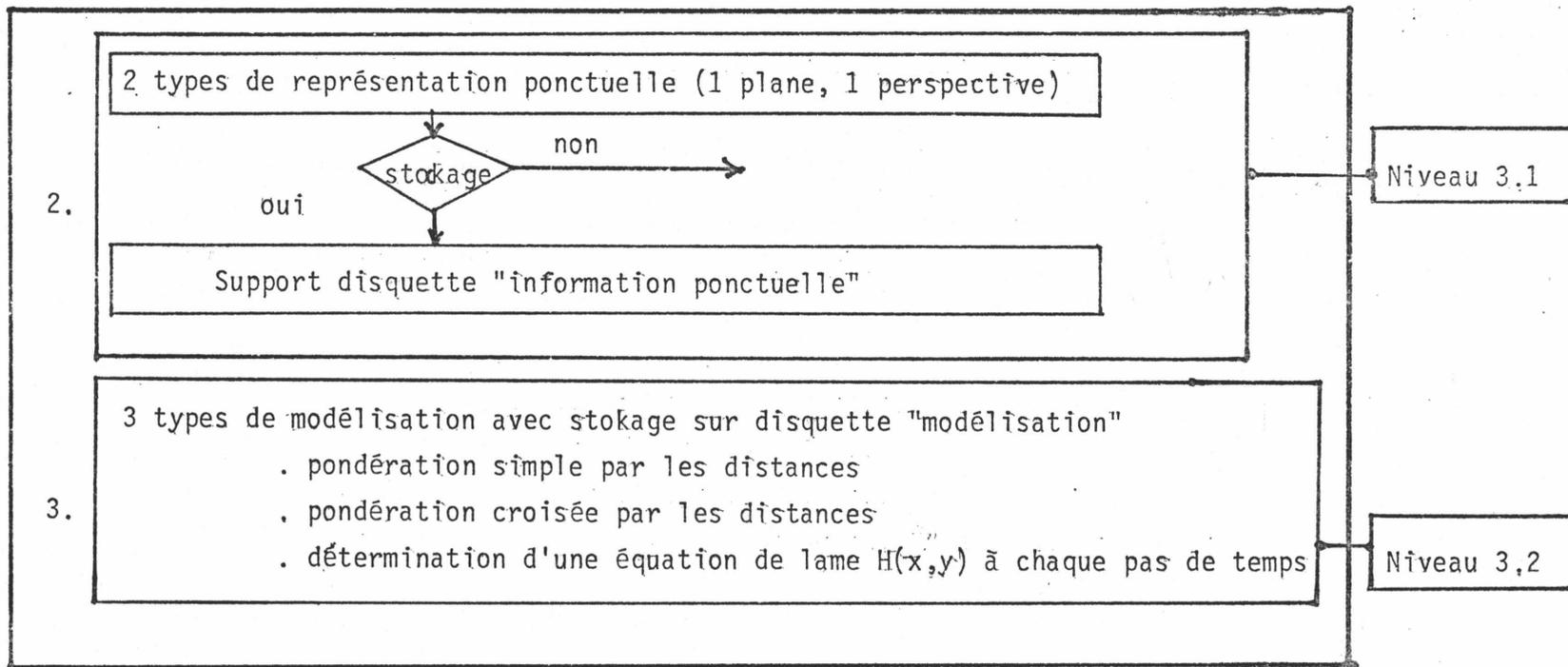
Si on veut avoir une idée encore plus précise, des caractéristiques, des séquences exhibées, il est possible dans le même programme de retirer les hyéto-grammes pour n'importe quel poste et une période quelconque centrée sur ce jour.

Dans le présent cas, nous avons retenu une séquence intéressante le 4 octobre de 15 h 00 mn à 20 h 18 mn. Cette séquence a été stockée sur le disque "événement intéressant" pour subir un traitement "type pluie historique".

Figure 73 : NIVEAU 2. SUPPORT :disquette-"évènements intéressants"



On fixe : le pas de scrutation  
le pas d'interpolation  
le nombre de postes retenus



### 3. TRAITEMENTS NIVEAU 2 : (voir schéma organisation niveau 2)

Dans cette partie, les traitements s'effectuent à partir du disque "événements intéressants".

Si on choisit l'évènement du 4 octobre, on obtient :

*L'épisode du 4 octobre 1984 P1*

*Date de début : JJ : 4 14H 54MN*

*Date de fin : JJ : 4 20H 18MN*

*Durée de l'évènement : 5H 24MN*

*Le nombre de pluviomètres concernés est : 8*

#### 3.1. Construction des hyétogrammes ponctuels

- On peut obtenir les hyétogrammes bruts ainsi que les tableaux d'intensité mesurées au pas de temps 6 minutes, pour tous les pluviomètres.

Exemple :

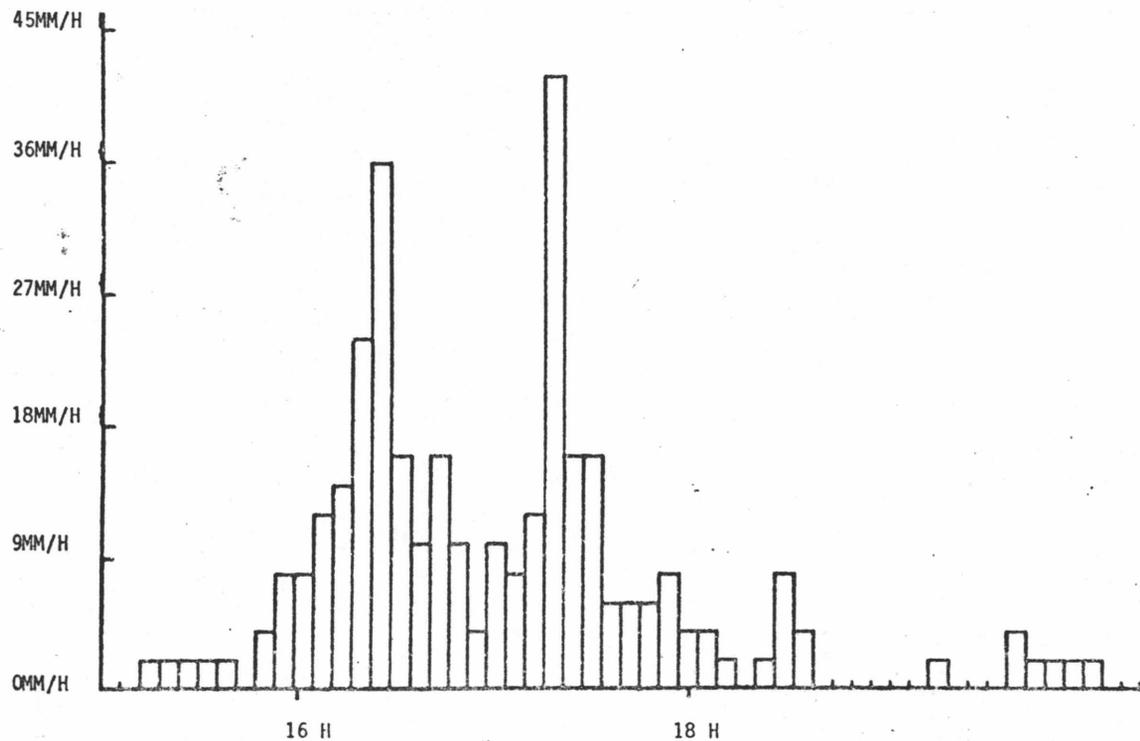


figure 74 : Hyétogramme de PIERRE-BENITE : 6

```

*****
INTENSITES *          REPERE **  INTENSITES *          REPERE *
(MM/H) *          TEMPOREL **  (MM/H) *          TEMPOREL *
*****
0.00 * JJ:4 15H 00MN **  10.00 * JJ:4 16H 36MN *
0.00 * JJ:4 15H 06MN **  16.00 * JJ:4 16H 42MN *
2.00 * JJ:4 15H 12MN **  10.00 * JJ:4 16H 48MN *
2.00 * JJ:4 15H 18MN **  4.00 * JJ:4 16H 54MN *
2.00 * JJ:4 15H 24MN **  10.00 * JJ:4 17H 00MN *
2.00 * JJ:4 15H 30MN **  8.00 * JJ:4 17H 06MN *
2.00 * JJ:4 15H 36MN **  12.00 * JJ:4 17H 12MN *
0.00 * JJ:4 15H 42MN **  42.00 * JJ:4 17H 18MN *
4.00 * JJ:4 15H 48MN **  16.00 * JJ:4 17H 24MN *
8.00 * JJ:4 15H 54MN **  16.00 * JJ:4 17H 30MN *
8.00 * JJ:4 16H 00MN **  6.00 * JJ:4 17H 36MN *
12.00 * JJ:4 16H 06MN **  6.00 * JJ:4 17H 42MN *
14.00 * JJ:4 16H 12MN **  6.00 * JJ:4 17H 48MN *
24.00 * JJ:4 16H 18MN **  8.00 * JJ:4 17H 54MN *
36.00 * JJ:4 16H 24MN **  4.00 * JJ:4 18H 00MN *
16.00 * JJ:4 16H 30MN **  4.00 * JJ:4 18H 06MN *
*****

```

```

*****
INTENSITES *          REPERE **  INTENSITES *          REPERE *
(MM/H) *          TEMPOREL **  (MM/H) *          TEMPOREL *
*****
2.00 * JJ:4 18H 12MN **  2.00 * JJ:4 19H 48MN *
0.00 * JJ:4 18H 18MN **  2.00 * JJ:4 19H 54MN *
2.00 * JJ:4 18H 24MN **  2.00 * JJ:4 20H 00MN *
8.00 * JJ:4 18H 30MN **  2.00 * JJ:4 20H 06MN *
4.00 * JJ:4 18H 36MN **  0.00 * JJ:4 20H 12MN *
0.00 * JJ:4 18H 42MN **  0.00 * JJ:4 20H 18MN *
0.00 * JJ:4 18H 48MN **  *****
0.00 * JJ:4 18H 54MN *
0.00 * JJ:4 19H 00MN *
0.00 * JJ:4 19H 06MN *
0.00 * JJ:4 19H 12MN *
2.00 * JJ:4 19H 18MN *
0.00 * JJ:4 19H 24MN *
0.00 * JJ:4 19H 30MN *
0.00 * JJ:4 19H 36MN *
4.00 * JJ:4 19H 42MN *
*****

```

figure 75 : Tableau des intensités à chaque pas de temps à PIERRE-BENITE : 6

Remarque :

Chaque pas de temps est repéré par sa date de fin.

• On peut aussi prendre un pas de scrutation multiple de 6 minutes sur lequel on recalcule les intensités moyennes (cf. : Chapitre IV, § 3.5.). Ceci nous permet de saisir l'altération morphologique qui s'opère lorsque le pas d'intégration s'allonge, pour n'importe quel pluviomètre.

On reconstruit pour chaque pas d'intégration, le hyétogramme et le tableau des intensités.

Ci-dessous, on montre l'évolution du hyétogramme de PIERRE-BENITE : 6, lorsque les pas de scrutation valent 6 mn, 12 mn, 18 mn, 60 mn ( $\Delta T_s$ ).

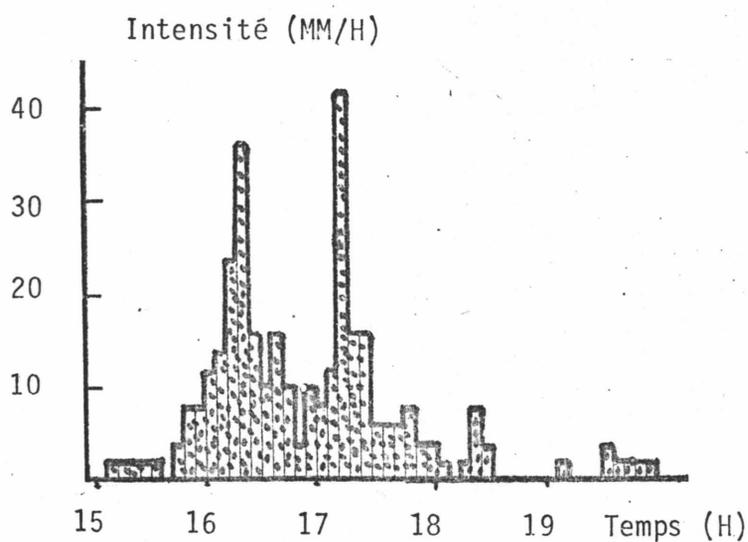


figure 76  $\Delta T_s = 6MN$

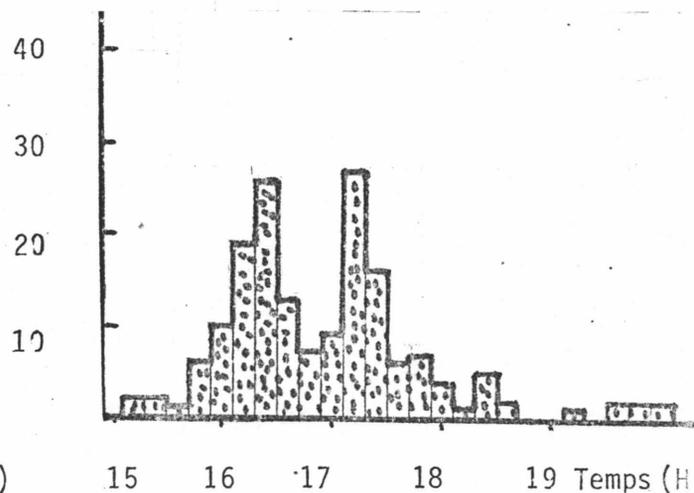


figure 77  $\Delta T_s = 12MN$

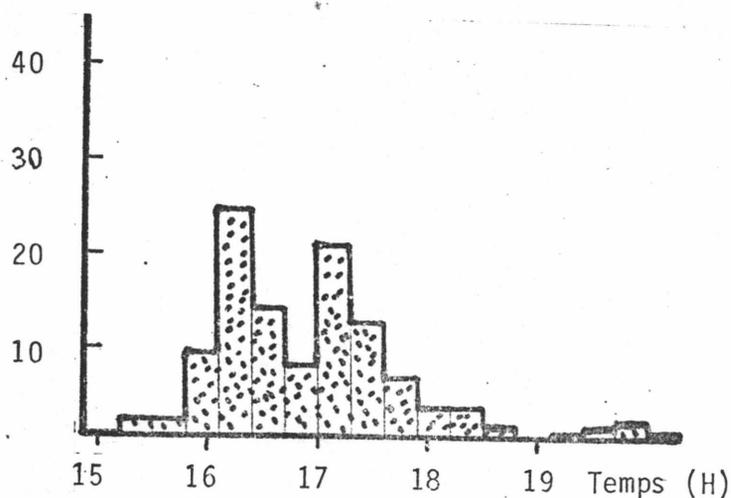


figure 78  $\Delta T_s = 18 MN$

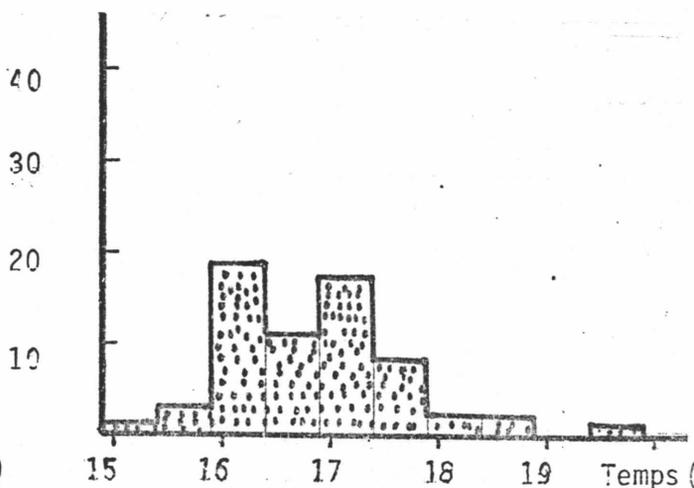


figure 79  $\Delta T_s = 30 MN$

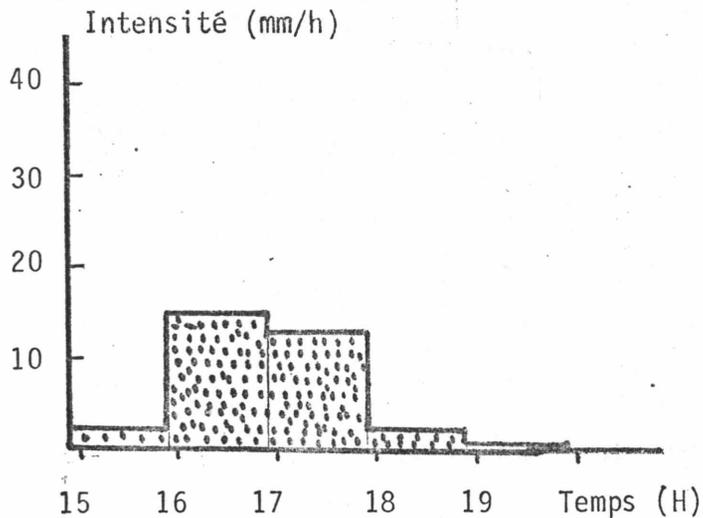


figure 80  $\Delta T_s = 60MN$ .

### 3.2. Représentations (ponctuelles) spatiales

Le système lui-même permet deux types de représentation :

- a) une représentation plane (cercles concentriques)

Sur une carte de la CO.UR.LY., à l'emplacement des postes, on découpe une aire à l'aide de cercles concentriques, la surface étant proportionnelle à l'intensité précipitée sur le poste correspondant.

- b) une représentation en perspective autrement appelée représentation corde.

Le rectangle circonscrivant le territoire de la CO.UR.LY. est dessiné en perspective suivant un angle choisi par l'utilisateur. Les intensités au droit des pluviomètres sont représentées par des traits dont la longueur leur est proportionnelle.

Comme dans le cas de la modélisation que nous allons aborder par la suite, un effort a été fait pour permettre un large éventail de manipulations sur les pas de temps,

On peut travailler :

- sur le pas de mesure
- sur un pas de scrutation multiple du pas de mesure (cf. : IV.3.5.)
- sur un pas d'interpolation du pas de scrutation (cf. : IV.3.5.).

Remarque :

Si le pas d'intégration choisi dans la représentation ponctuelle (ie, qui est en fait le pas d'interpolation) vaut la durée totale de la séquence, ce n'est pas une intensité moyenne qui est calculée mais la hauteur totale précipitée.

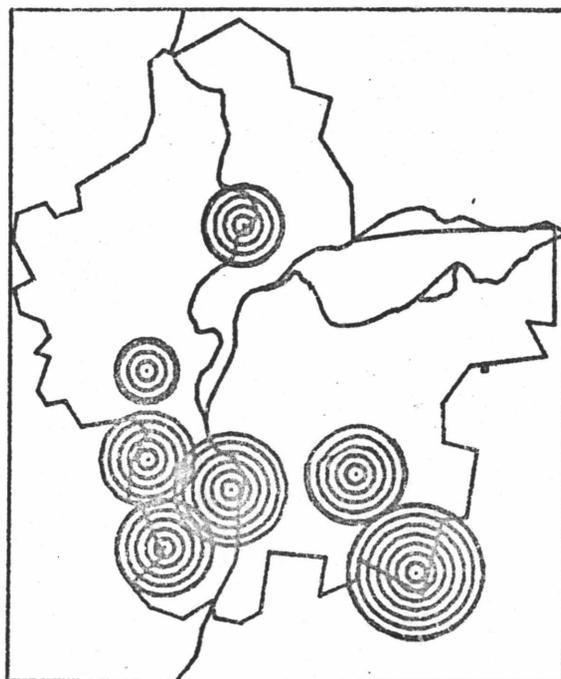
Exemple :

Représentation des hauteurs cumulées pour la pluie du "4 octobre 1984".

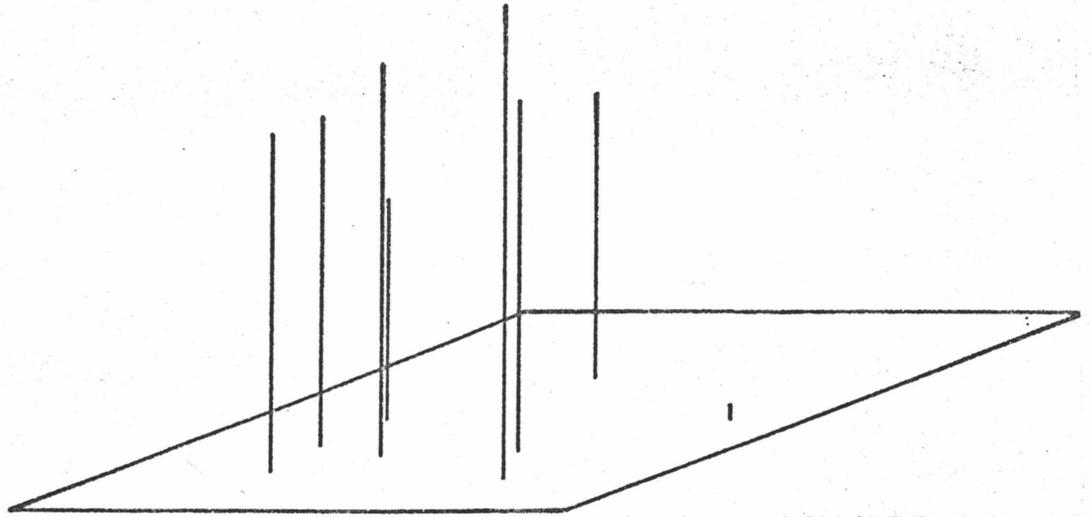
a) Tableau des hauteurs cumulées au droit des postes (figure 81)

St Priest : 3	3,04 cm	St Genis Laval Charly : 14	2,94 cm
Pierre Bénite : 6	3,40 cm	St Genis Laval Pression : 15	2,86 cm
Genas : 10	0,12 cm	Collonges : 19	2,44 cm
Mions : 12	4,12 cm	Croix Luizet : 24	1,92 cm

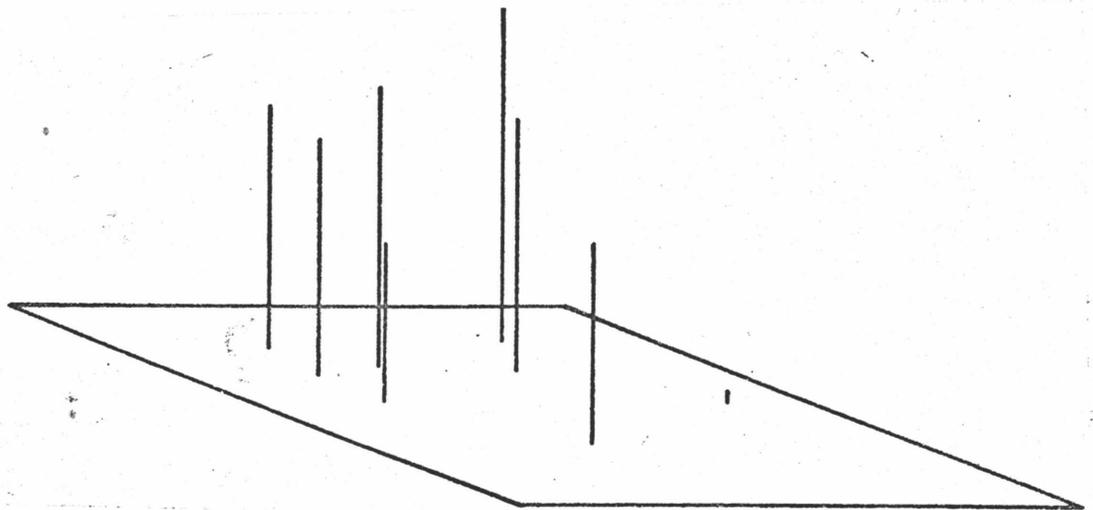
b) Représentation plane des hauteurs cumulées.  
(figure 82)



## c) Représentations perspectives (figure 83)



Projection en perspective suivant un angle de 40 degrés



Projection en perspective suivant un angle de -40 degrés

Remarque :

L'angle de projection peut être choisi entre  $-180$  degrés et  $+180$  degrés ( $90^\circ$  et  $-90^\circ$  exceptés).

D'autres modes de représentation ont été parallèlement (ou antérieurement) développés [84] :

- la représentation plane par cercles simples
- la représentation plane par les colonnettes
- une représentation perspective à 45° corde avec visualisation du territoire de la CO.UR.LY..

Exemple : hauteurs cumulées précipitées le "4 octobre 1984"

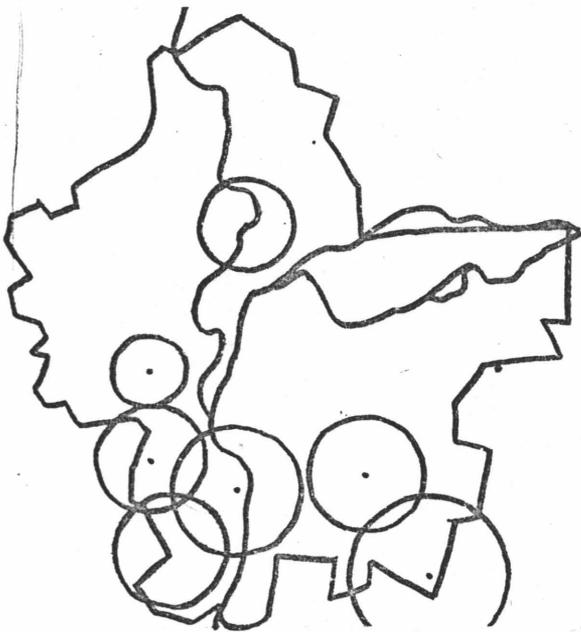


figure 85 : représentation plane par cercles simples

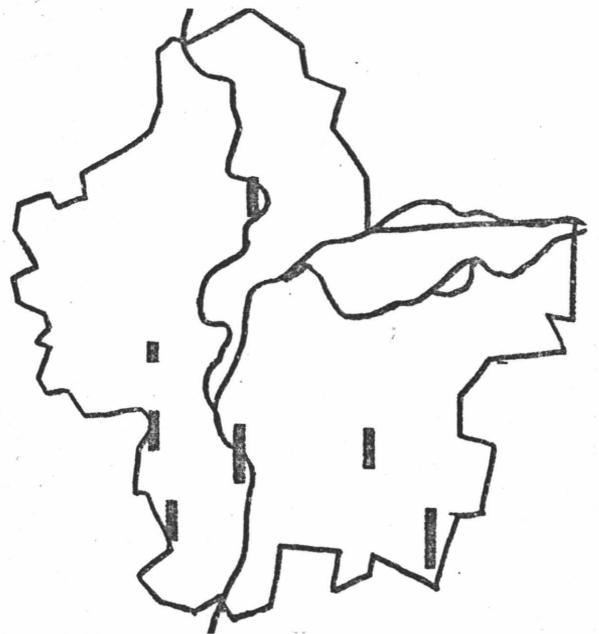


figure 86 : représentation plane par les colonnettes

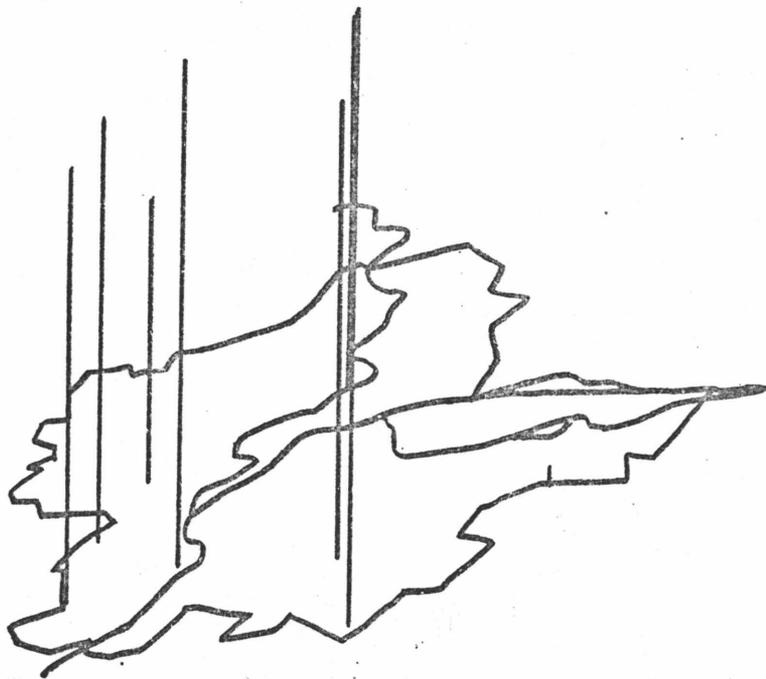


figure 87 : Représentation perspective à 45 degrés

Remarques :

- Les cercles sont centrés sur le poste qu'ils représentent et leur aire est proportionnelle à l'intensité précipitée.

- Les colonnettes et les cordes ont leur base à l'emplacement du poste et leur hauteur est proportionnelle à l'intensité précipitée.

A partir de ces trois représentation (cordes simples, colonnettes, perspective avec visualisation de la CO.UR.LY.), trois films ont été faits qui suivent l'évolution du processus sur les 8 postes pas de temps par pas de temps (6 minutes).

C'est en comparant les résultats obtenus que la représentation plane par cercles simples a été préférée puis transformée (cercles concentriques).

### 3.3. Modélisations

Pour les pas de scrutation et d'interpolation choisis, pour la partie des postes en fonctionnement qui a été retenue, trois modélisations sont possibles :

- modélisation par pondération simple sur les distances  
(cf. : Chapitre IV, § 2.3.1)
- modélisation par pondération croisée sur les distances  
(cf. : chapitre IV, § 2.3.2)
- modélisation par recherche d'une équation de lame  $H(X,Y)$   
(cf. : chapitre V, § 2.4 )

Figure 88 : NIVEAU 3

3,1 Support disquette - "Information ponctuelle"

- . Reconstruction des hétérogrammes
- . Reconstruction des représentations
- . Calcul du hétérogramme moyen et étude de la relation variance spatiale/intensité moyenne
- . Etude de la distance d'influence  $D_i$  et l'exposant  $\alpha$ , dans l'approximation des hétérogrammes,

#### 4. TRAITEMENT NIVEAU 3 : 1ERE PARTIE . EXPLOITATION DE LA DISQUETTE "INFORMATION PONCTUELLE"

(voir ci-contre schéma organisation)

##### 4.1. Construction des hyétogrammes (validation graphique)

Le premier traitement proposé consiste à reconstruire les hyétogrammes au droit des postes ainsi que les tableaux correspondants. Dans ce cas, possibilité supplémentaire par rapport aux constructions de hyétogrammes antérieures, on peut obtenir les hyétogrammes "interpolés" qui ont été stockés lors du traitement "représentations ponctuelles".

Exemple : PRESSIN : 15, le 4 octobre 1984

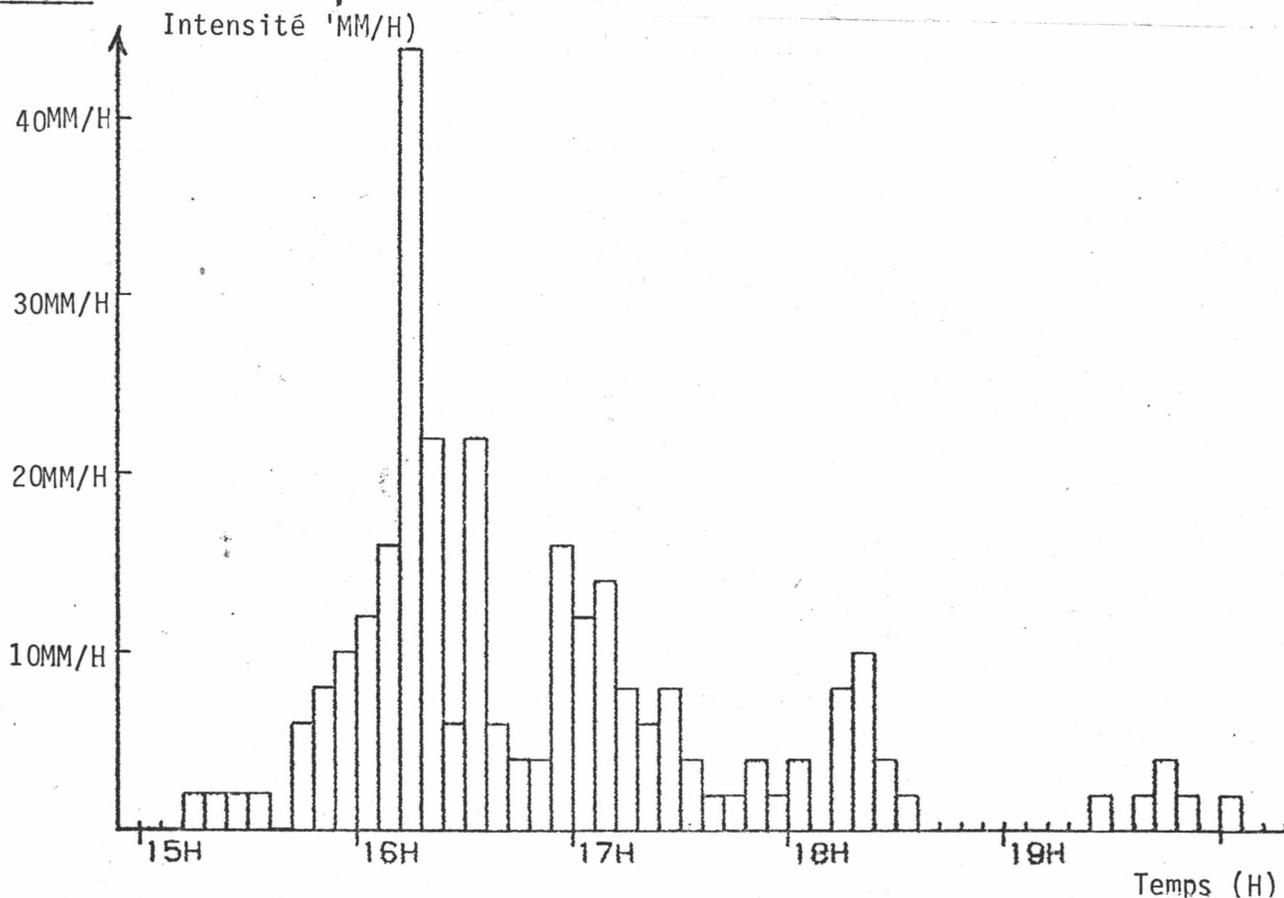


figure 89 : Hyétogramme mesuré

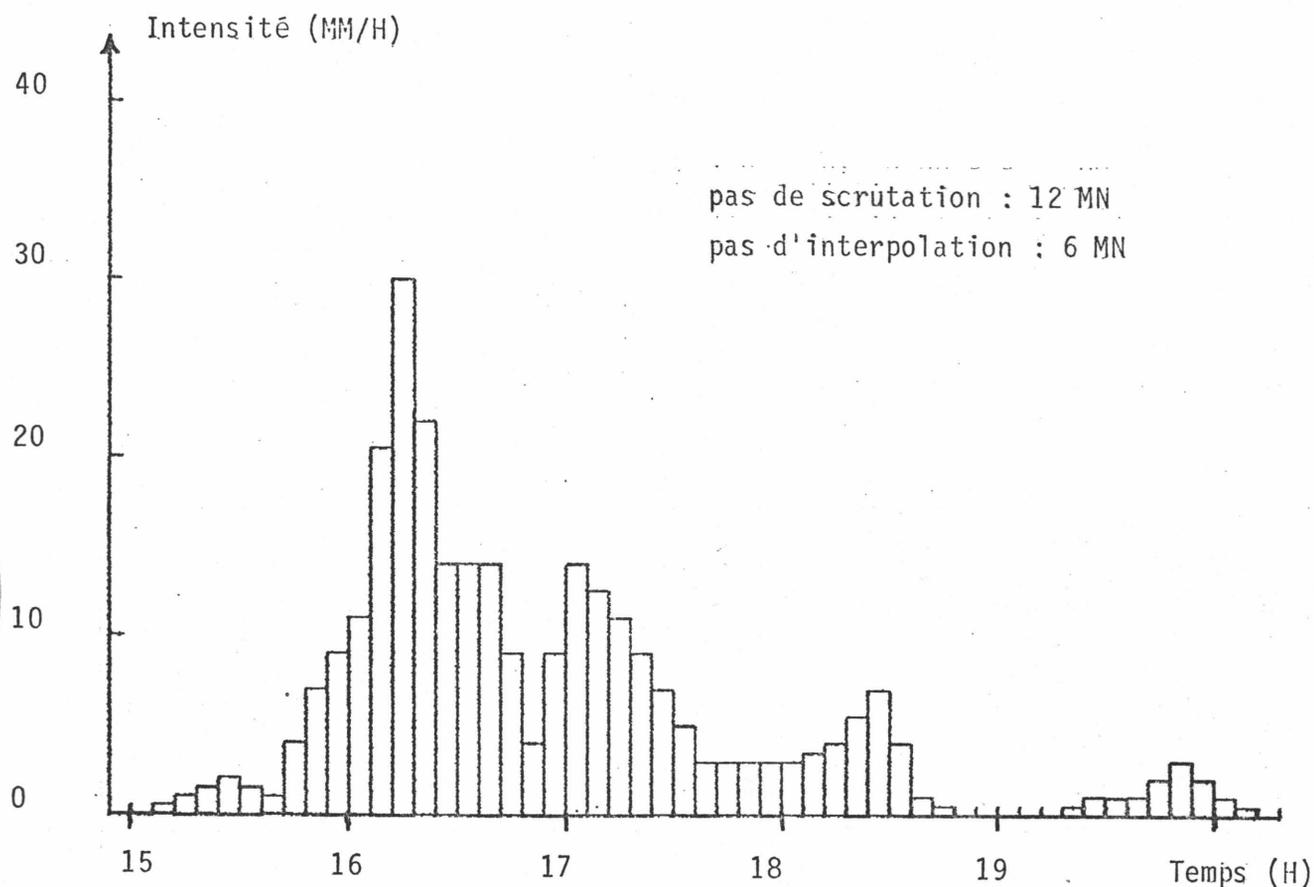


figure 90 : Hyetogramme interpolé sur 6 minutes à partir de mesures moyennées sur 12 minutes

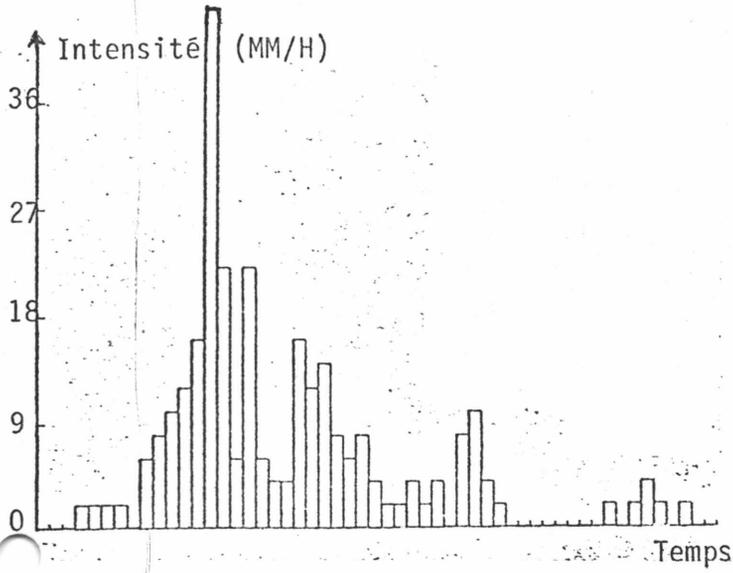
Reconstruire par interpolation, un hyetogramme sur 6 minutes à partir d'un hyetogramme brut moyenné sur un multiple de 6 minutes, équivaut à opérer un lissage du flux pluviométrique d'autant plus important que le pas de temps de moyennation de l'information brute (noté pas de scrutation) est plus important.

Une telle opération équivaut, du point de vue des modèles de simulation en aval, (transformation pluie - débit), à augmenter la capacité de stockage du bassin, a priori - on écrête les pointes sans modifier sensiblement les volumes transités.

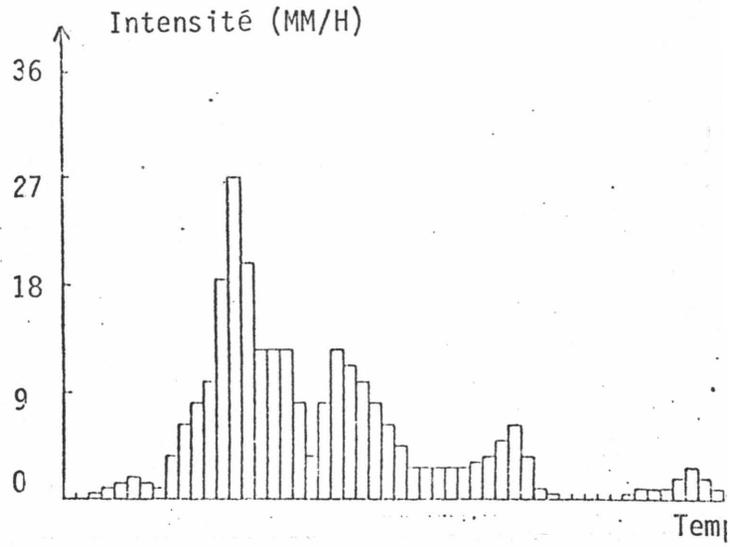
Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus par le modèle, suivant que les hyetogrammes ponctuels à partir desquels on calcule les lames d'eau sont les hyetogrammes mesurés ou des hyetogrammes plus ou moins lissés.

Ci-après, on donne les hyetogrammes interpolés sur 6 minutes à partir des moyennes effectuées sur différents pas de scrutation pour le poste PRESSIN : 15.

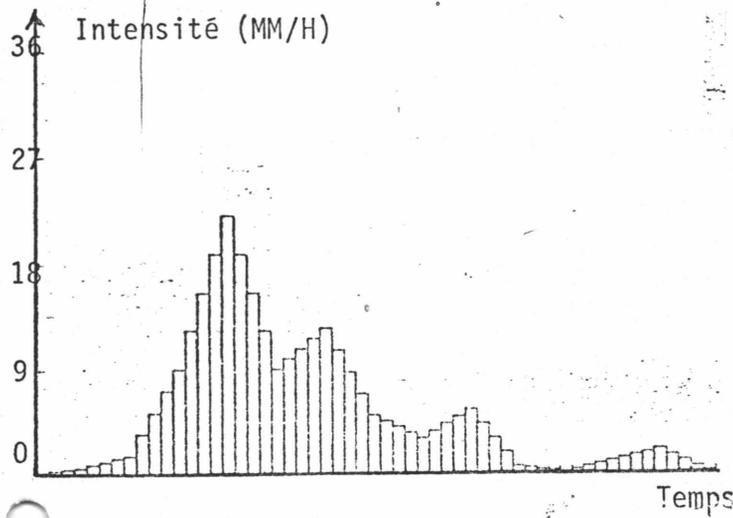
Graphes interpolés sur 6 MN ( $\Delta T_i = 6$  MN) selon différents pas de scrutation ( $\Delta T_s$ ) pour le poste PRESSIN : 15,



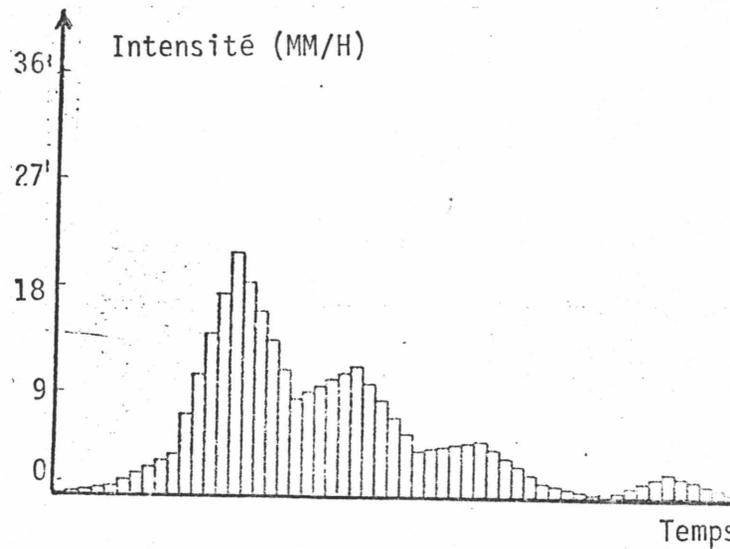
$\Delta T_s = 6$ MM



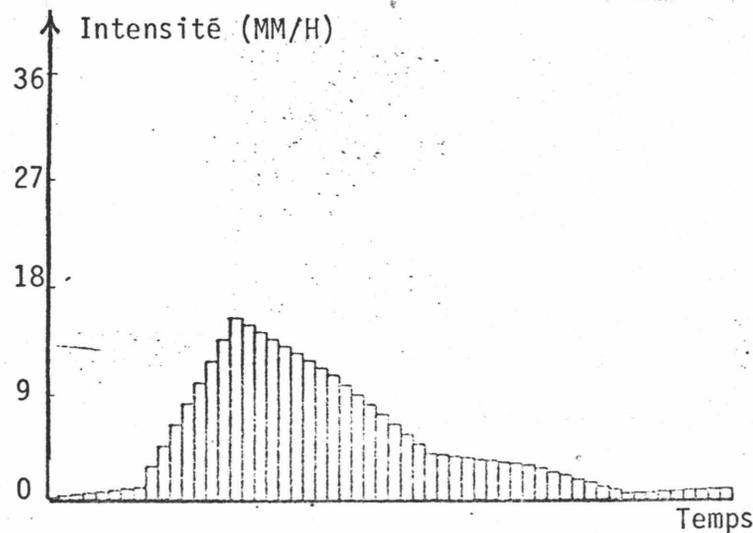
$\Delta T_s = 12$ MM



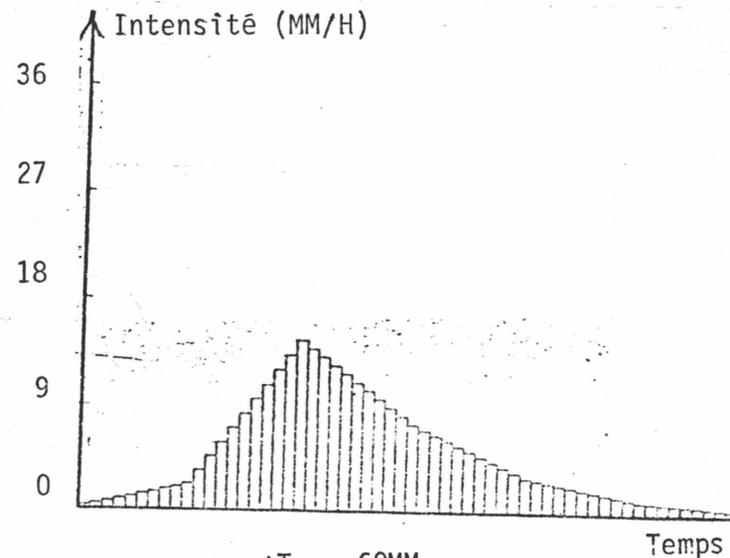
$\Delta T_s = 24$ MM



$\Delta T_s = 30$ MM



$\Delta T_s = 48$ MM



$\Delta T_s = 60$ MM

#### 4.2. Construction du hyétogramme moyen (validation numérique)

A partir de l'ensemble des postes retenus et aux conditions choisies concernant le pas de temps, on construit le hyétogramme moyen. Celui-ci est défini à chaque pas de temps par la moyenne des intensités sur les postes retenus.

On calcule aussi le moment, qui se définit comme la moyenne de la valeur absolue, de l'écart à l'intensité moyenne, par pas de temps et sur les postes retenus (moment d'ordre 1).

$$(64) \quad I_m(j) = 1/n \sum_{k=1}^n I_k(j)$$

$$(65) \quad E_m(j) = 1/n \sum_{k=1}^n |I_k(j) - I_m(j)|$$

$I_m(j)$  : intensité moyenne au pas de temps  $j\Delta t$

$I_k(j)$  : intensité au poste  $k$ , au pas de temps  $j\Delta t$

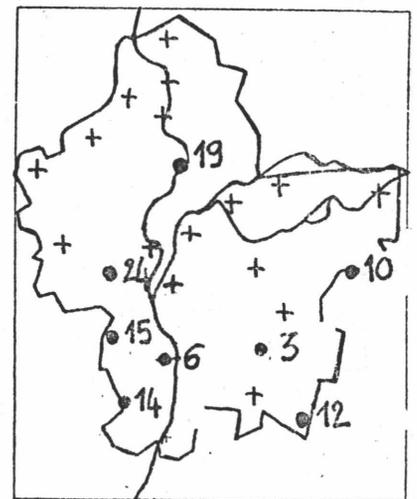
$n$  : nombre de postes retenus

$E_m(j)$  : écart-type du pas de temps  $j\Delta t$

Exemple :

Pluie du 4 octobre 1984

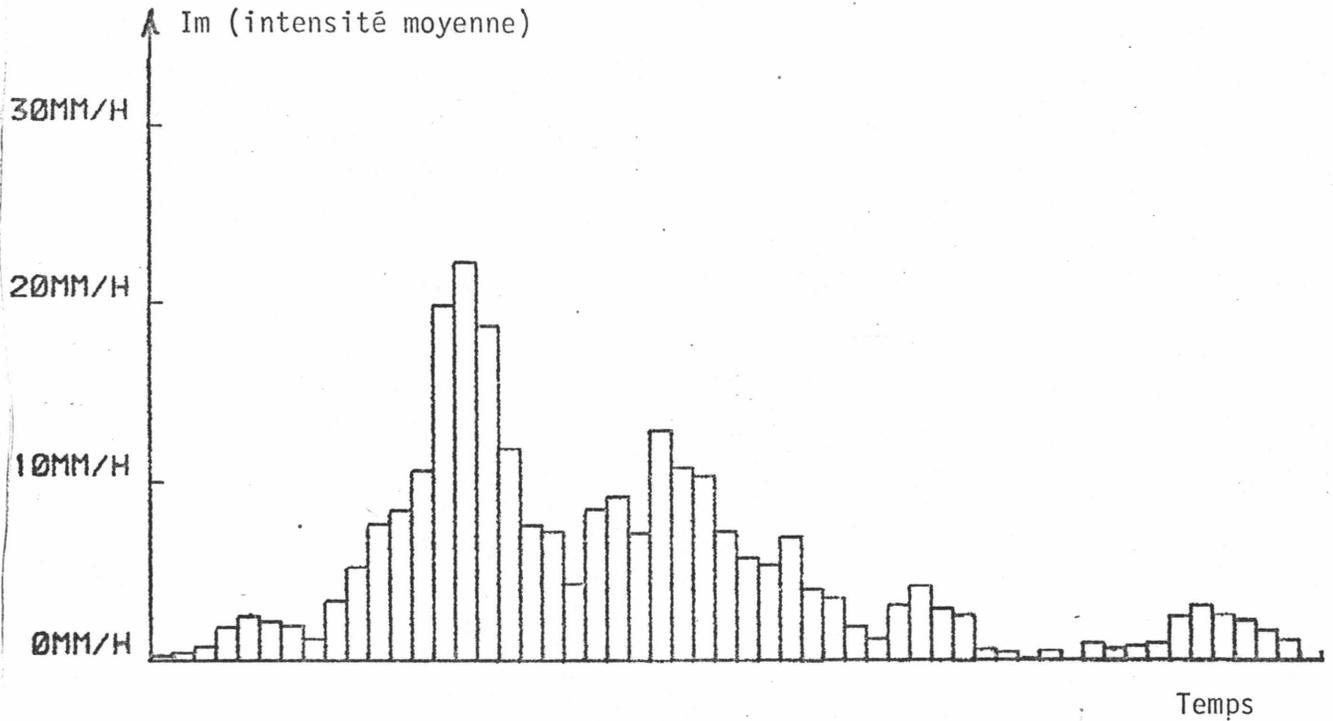
ST PRIEST : 3  
 PIERRE BENITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12  
 ST GENIS LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSION : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24



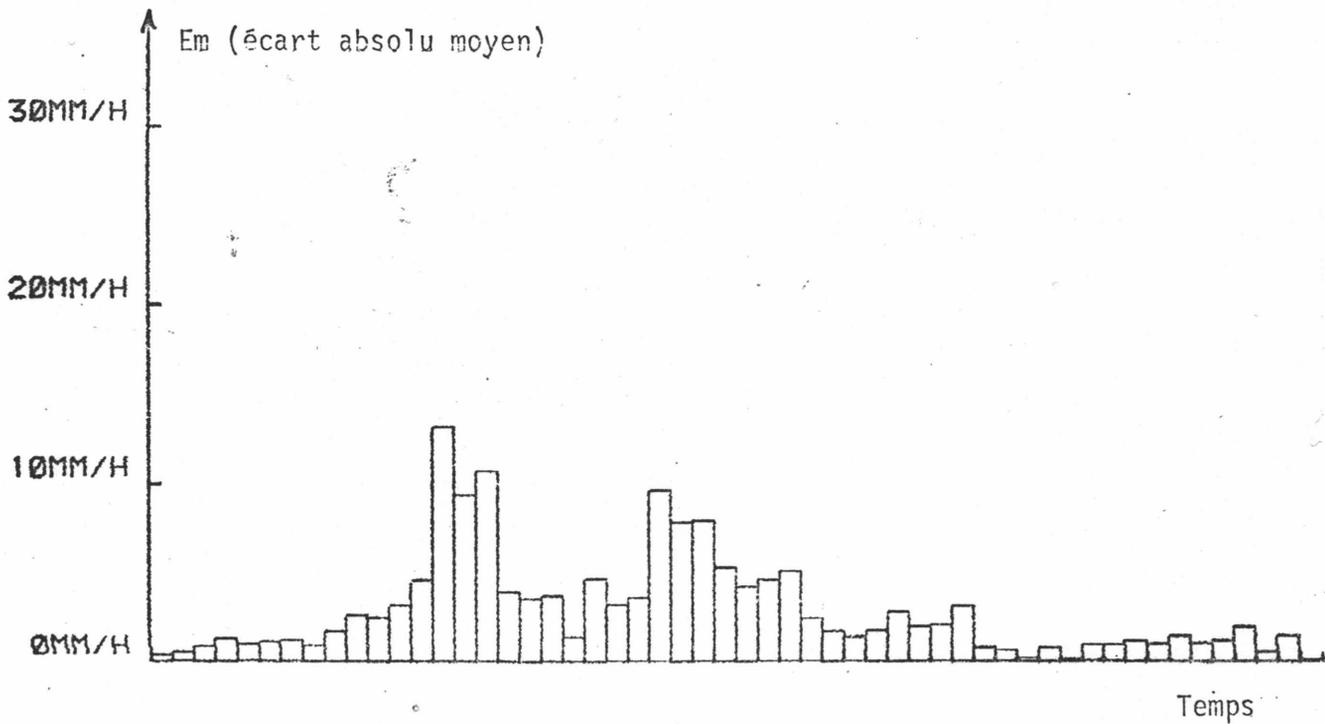
Liste des 8 postes retenus pour le traitement.

figure 97 : Carte des postes retenus

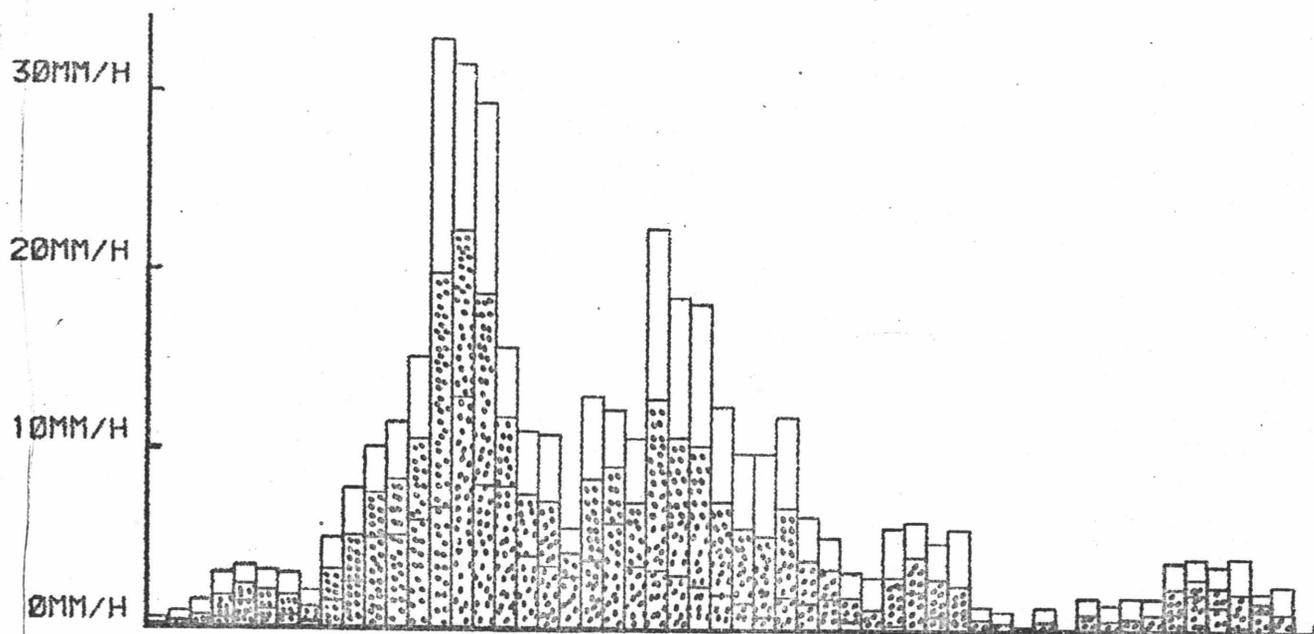
On obtient le hyétogramme moyen sur les 8 postes retenus suivant (figure 98) :



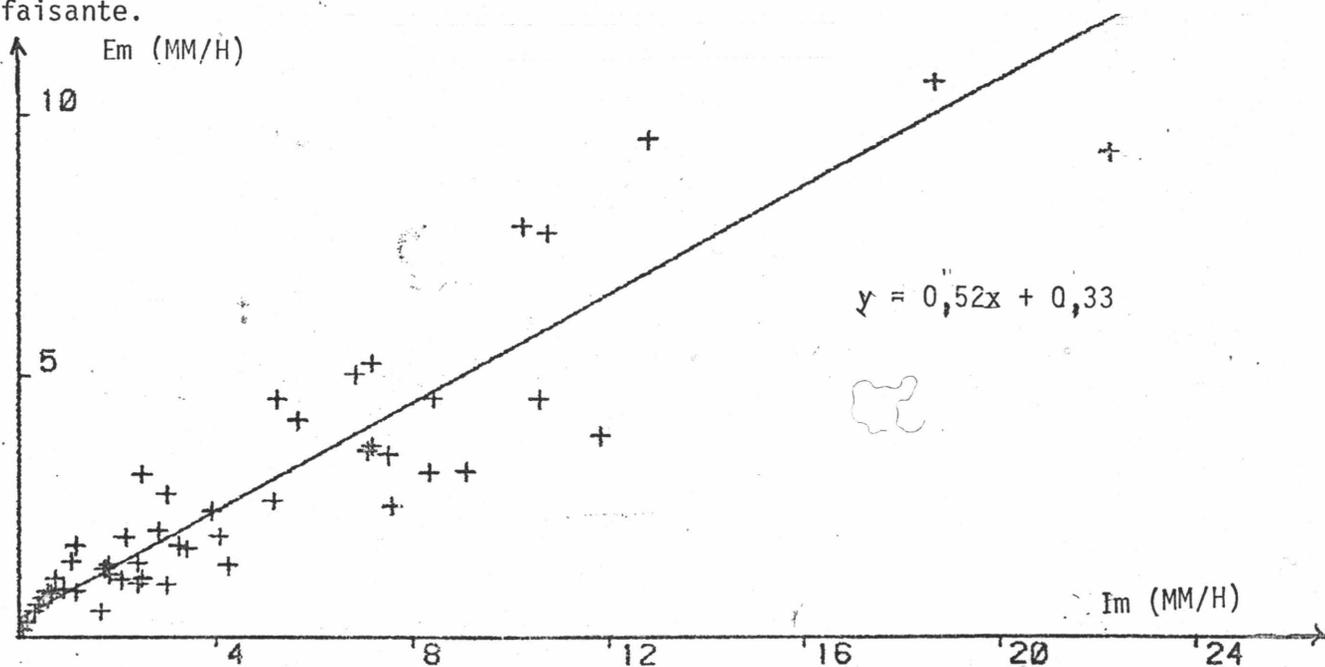
On obtient le graphe des écarts absolus moyens  $E_m$  suivant (figure 99) :



On obtient le graphe superposé  $I_m(j) \pm E_m(j)$  suivant (figure 100) :



Si on cherche à définir une relation fonctionnelle entre l'écart type et l'intensité moyenne, à chaque pas de temps, une relation linéaire est très satisfaisante.



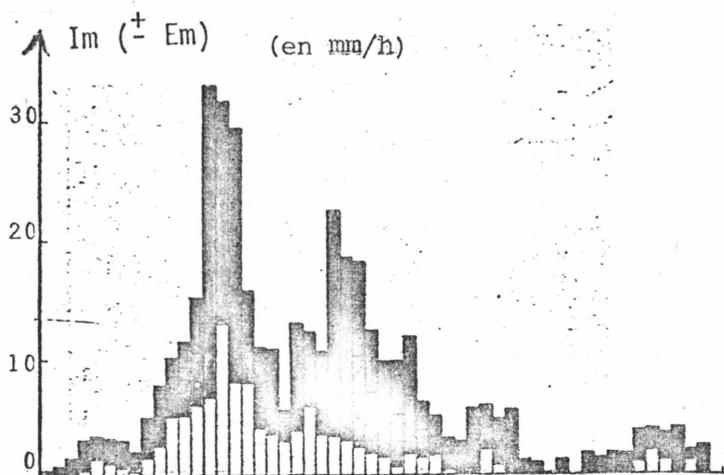
- Dispersion spatiale des valeurs d'intensité en fonction de l'intensité moyenne
- L'erreur moyenne d'approximation est : 0.75 mm/h
- Pas de temps : 6 minutes.

figure 101

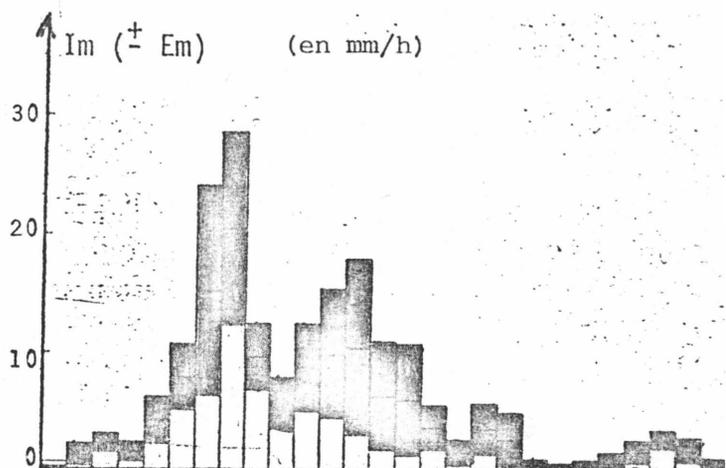
Ces caractéristiques - hyétogrammes moyen, relation entre intensité moyenne et moment - sont autant d'indicateurs qui permettent une comparaison indirecte entre les modélisations si on prend comme hypothèse que l'information fournie par le réseau est fiable - réseau suffisamment dense pour que la moyenne des hyétogrammes corresponde assez exactement au hyétogramme moyen "vrai" sur le bassin, de même pour le moment d'ordre 1 qui caractérise la variabilité spatiale du phénomène à chaque pas de temps.

Ci-après, on donne les hyétogrammes moyens et le graphe  $E_m$  en fonction de  $I_m$ , pour différents pas de temps de scrutation.

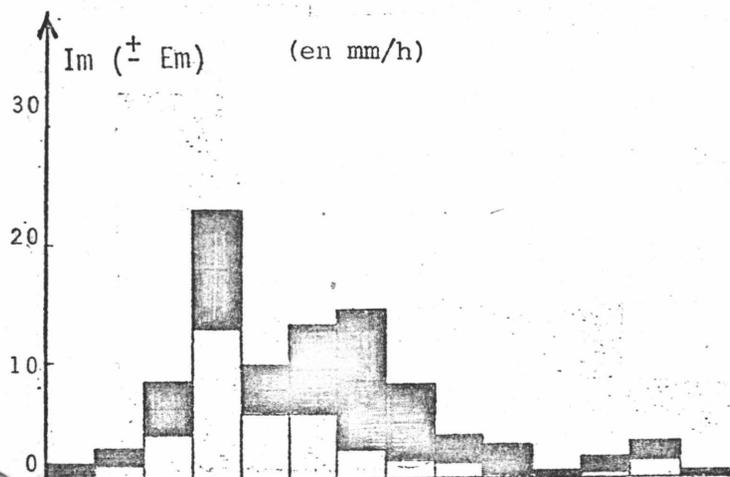
Graphes des hyétogrammes supérieur et inférieur sur les 8 postes pour différents pas de scrutation ( $\Delta T_s$ )



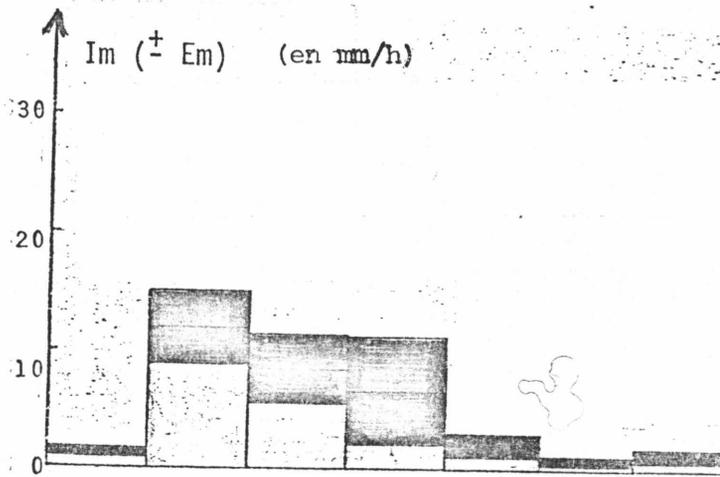
$\Delta T_s = 6 \text{ mn}$  (fig. 102)



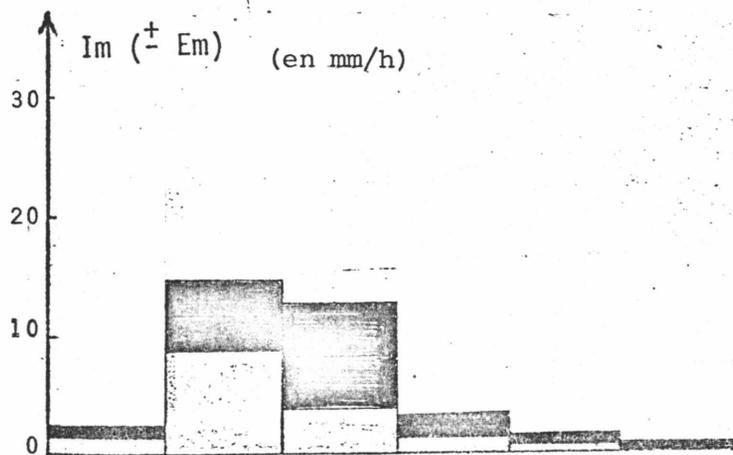
$\Delta T_s = 12 \text{ mn}$  (fig. 103)



$\Delta T_s = 24 \text{ mn}$  (fig. 104)



$\Delta T_s = 48 \text{ mn}$  (fig. 105)

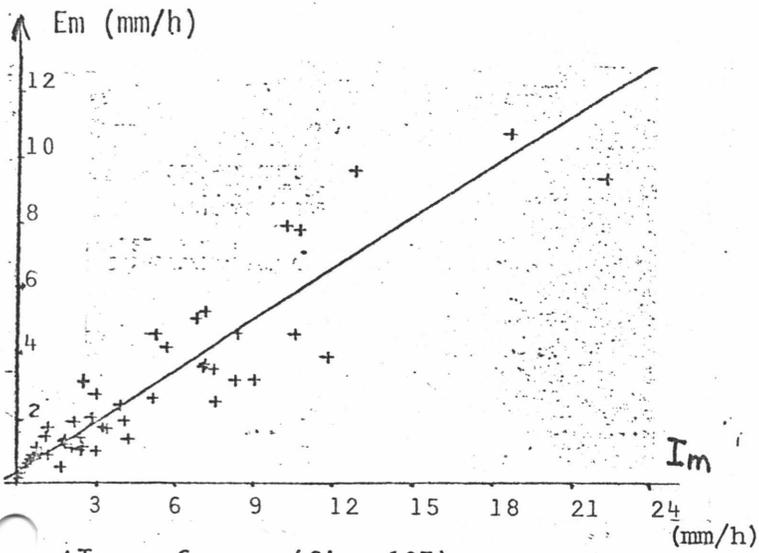


$\Delta T_s = 60 \text{ mn}$  (fig. 106)

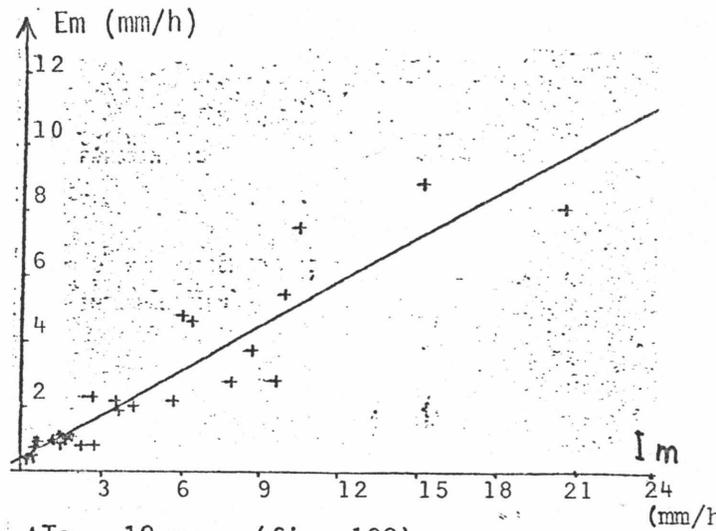
hyétogramme supérieur : hyétogramme moyen + écart moyen (Em) (en noir)

hyétogramme inférieur : hyétogramme moyen - écart moyen (Em) (en blanc)

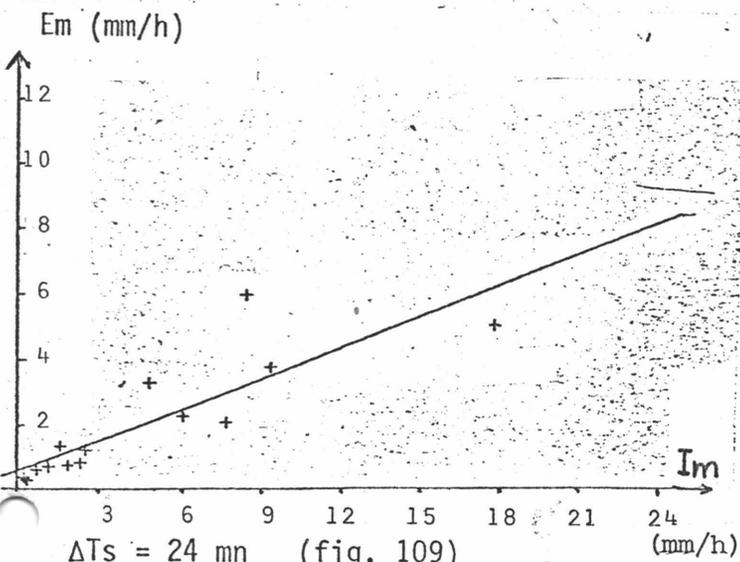
Graphes de  $E_m$  en fonction de  $I_m$ , correspondants, pour les mêmes pas de scrutation  $\Delta T_s$



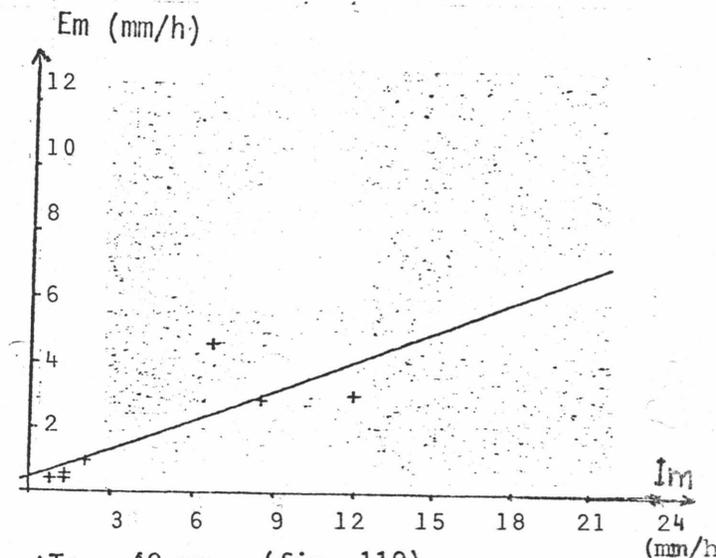
$\Delta T_s = 6 \text{ mn}$  (fig. 107)



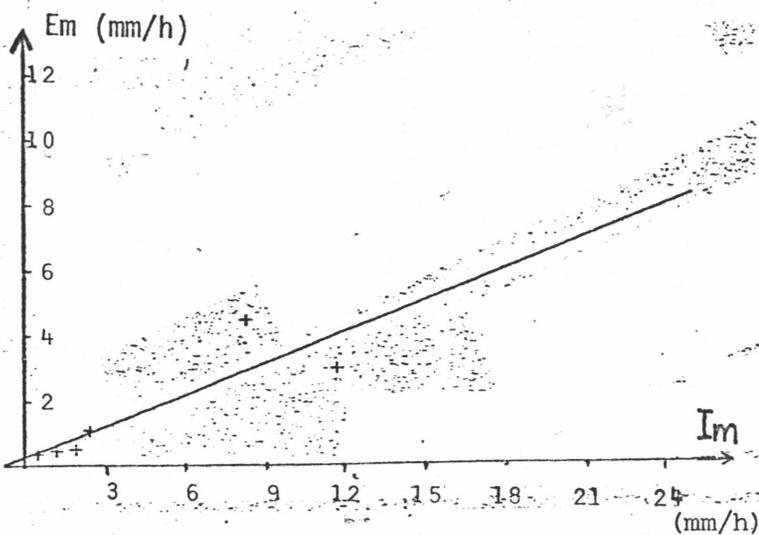
$\Delta T_s = 12 \text{ mn}$  (fig. 108)



$\Delta T_s = 24 \text{ mn}$  (fig. 109)



$\Delta T_s = 48 \text{ mn}$  (fig. 110)



$\Delta T_s = 60 \text{ mn}$  (fig. 111)

#### 4.3. Etude de la sensibilité des paramètres $D_i$ (distance d'influence) et (exposant) dans le modèle de pondération simple par les distances

Le principe de cette modélisation et le problème posé par la détermination du couple  $(D_i, \alpha)$  ont déjà été expliqués (cf. : chpt IV § 2.3)

Le traitement proposé consiste, pour une valeur fixée  $\alpha$  de l'exposant, à comparer les résultats fournis par le modèle suivant la valeur choisie pour la distance d'influence  $D_i$ . La comparaison repose sur trois types de résultats :

- comparaison directe des hyétogrammes calculés
- comparaison du graphe des écarts moyens absolus mesure / calcul
- comparaison du graphe des rapports moyens mesure / calcul.

##### Remarque :

On peut éventuellement obtenir, si on le désire, une superposition des hyétogrammes calculé / mesuré.

On peut, bien entendu, obtenir pour ces différents paramètres à chaque pas de temps, le tableau des valeurs. Par souci de clarté et de concision, nous avons choisi de ne pas les donner ici ; ces tableaux, en effet, n'ajoutent aucune information essentielle concernant notre propos.

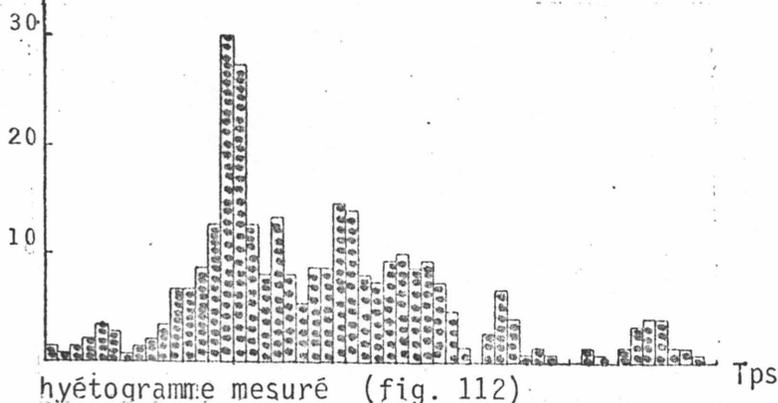
Ci-après, nous présentons les résultats obtenus pour l'événement du 4 octobre 1984, pour le poste de SAINT-PRIEST : 3.

##### Remarques :

- La puissance de pondération  $\alpha$  est prise égale à 2.
- Les distances d'influence  $D_i$  choisies correspondent à l'ensemble des distances possibles entre SAINT-PRIEST : 3 et un autre poste quelconque fonctionnant, du réseau.

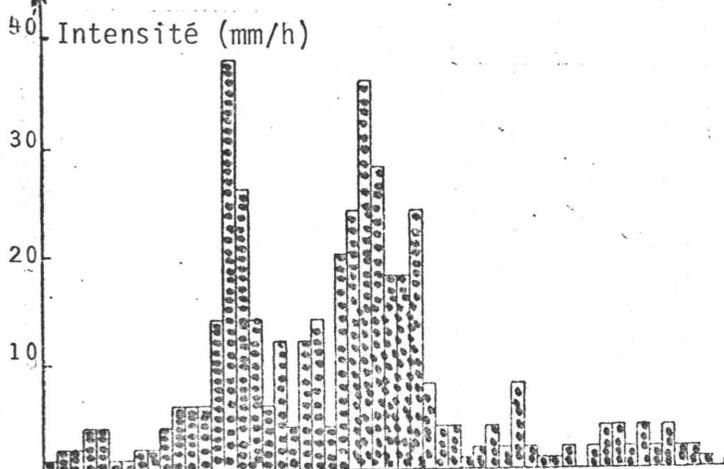
Ainsi, 6.05 km, la plus petite distance d'influence, est la distance au poste le plus proche, pour cette valeur de  $D_i$ , on obtient le hyétogramme mesuré en ce poste.

↑ Intensité (mm/h)



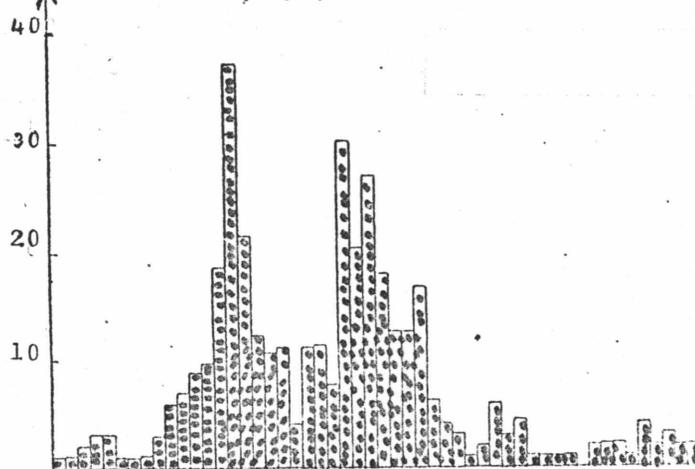
Evolution du hyetogramme calculé à St PRIEST en fonction des distances d'influence ( $D_i$ ), au 4 octobre 1984

↑ Intensité (mm/h)



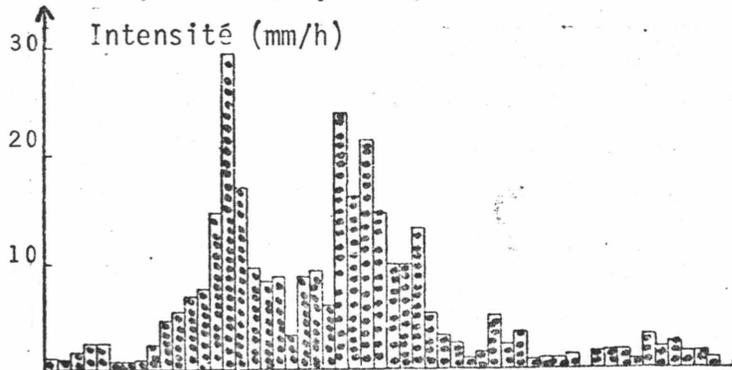
$D_i = 6,05$  km (fig. 113)

↑ Intensité (mm/h)



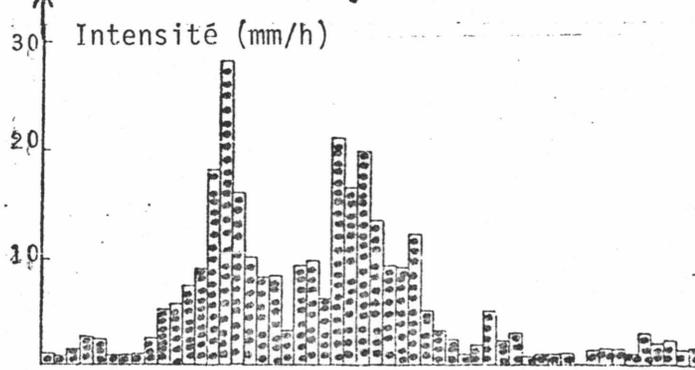
$D_i = 6,61$  km (fig. 114)

↑ Intensité (mm/h)



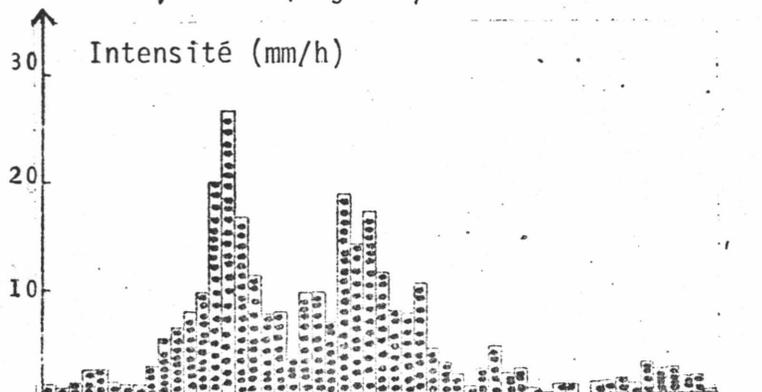
$D_i = 8,69$  km (fig. 115)

↑ Intensité (mm/h)



$D_i = 10,72$  km (fig. 116)

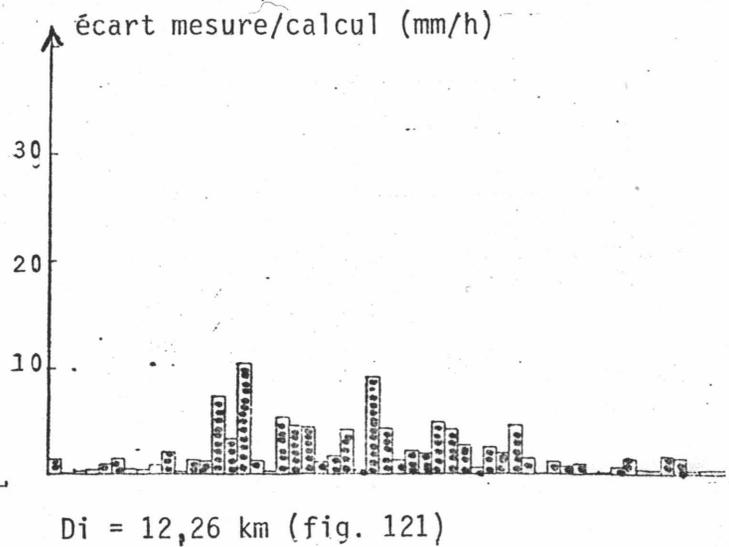
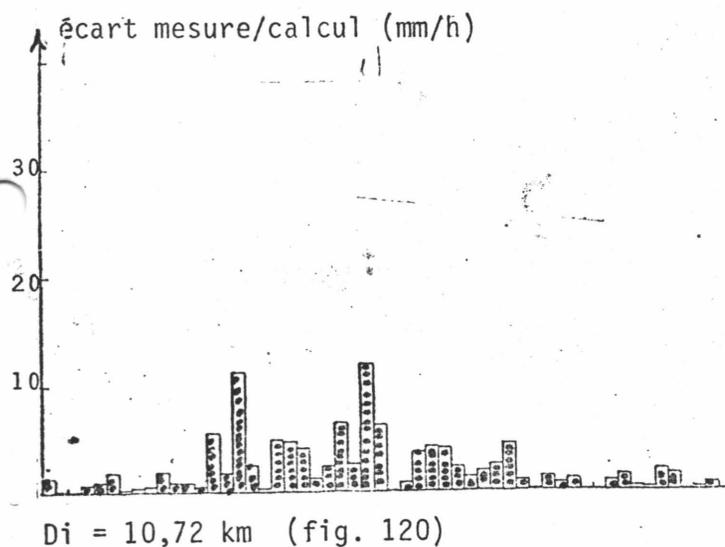
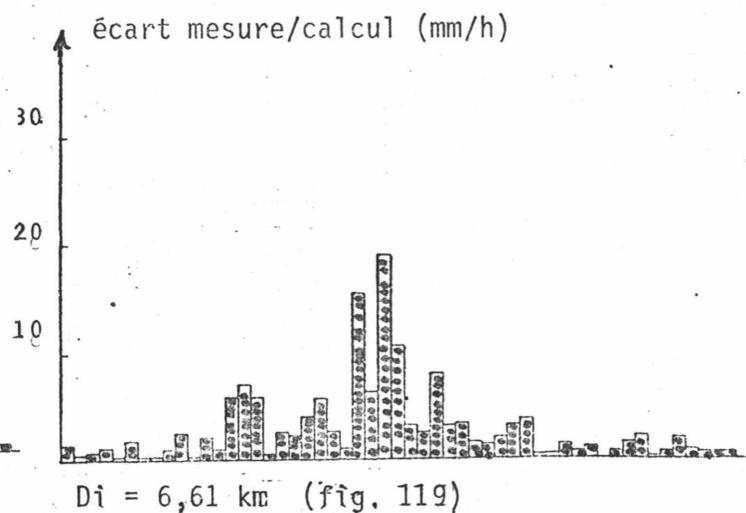
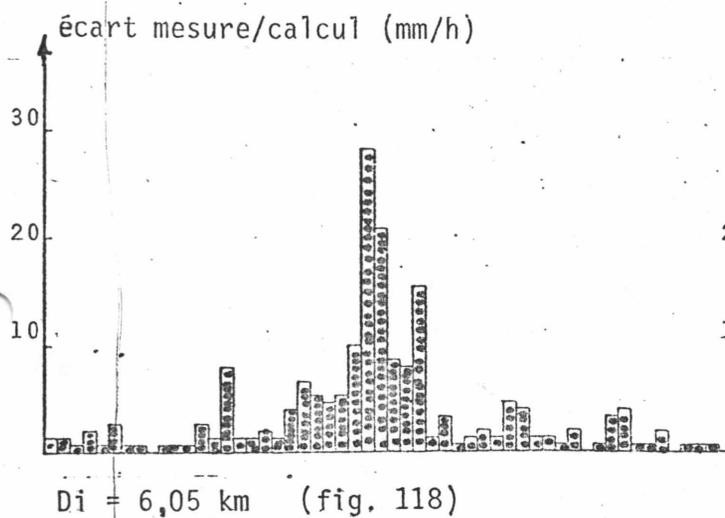
↑ Intensité (mm/h)



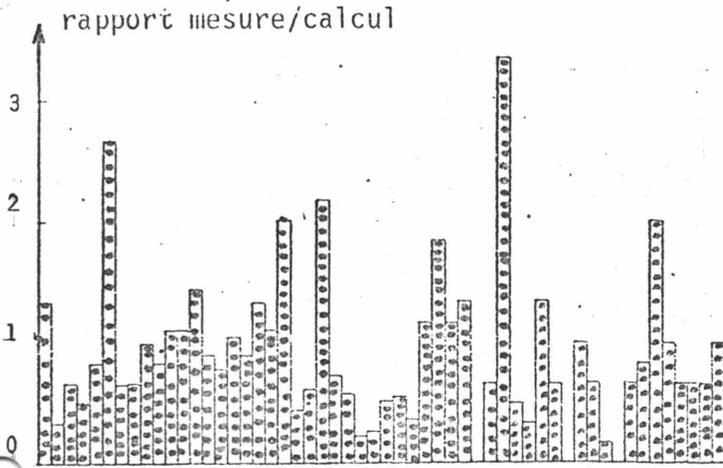
$D_i = 12,26$  km (fig. 117)

Tps

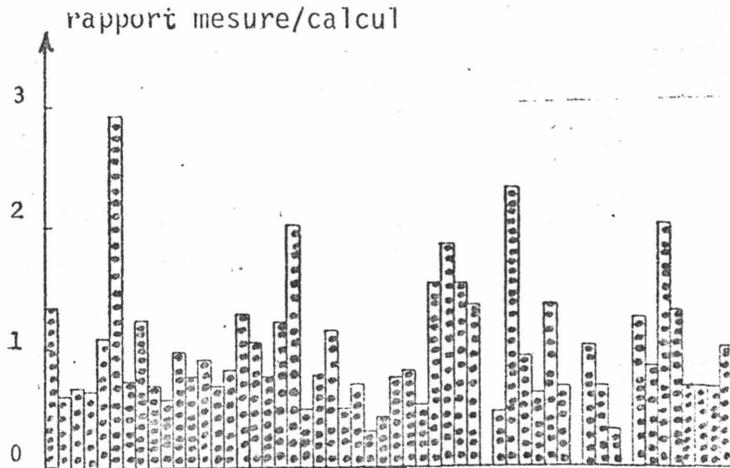
Evolution du graphe des écarts mesure/calcul pour certaines distances d'influences ( $D_i$ ), pour le poste de St PRIEST : 3



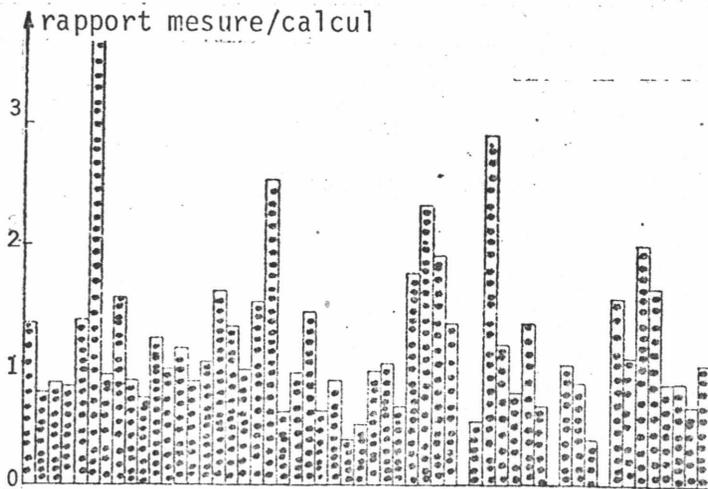
Evolution du graphe des rapports intensité mesurée/intensité calculée en fonction de certaines distances d'influences ( $D_i$ ) à St PRIEST



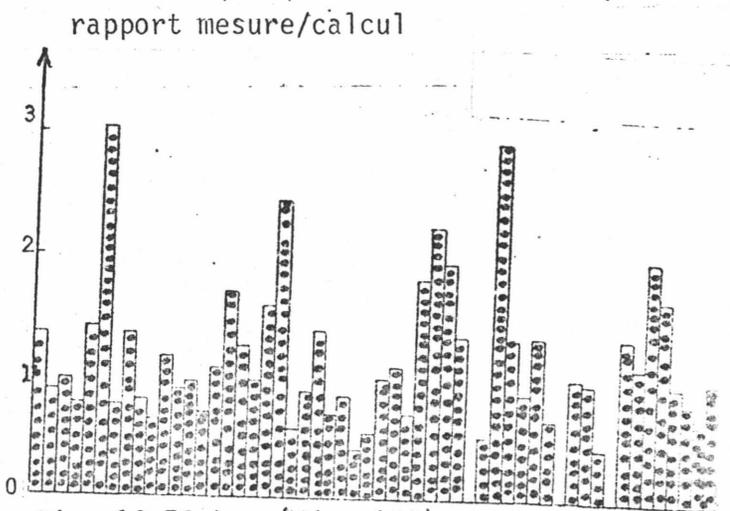
$D_i = 6,05$  km (fig. 122)



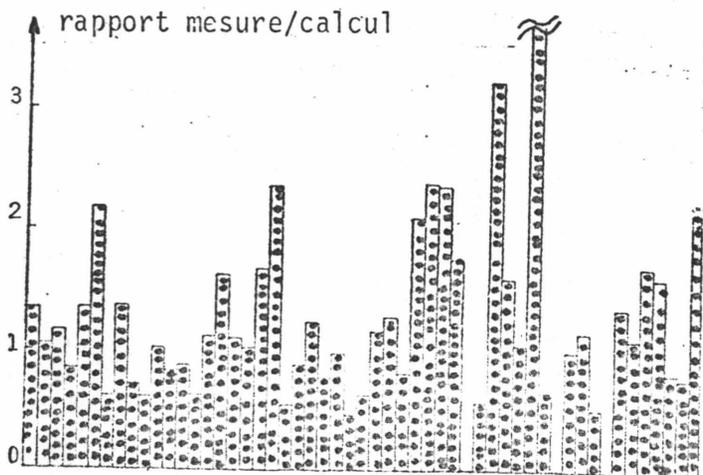
$D_i = 6,61$  km (fig. 123)



$D_i = 8,69$  km (fig. 124)



$D_i = 10,72$  km (fig. 125)



$D_i = 12,26$  km (fig. 126)

On condense ensuite l'information en calculant, pour un poste fixé, à chaque distance d'influence :

- a) l'écart absolu moyen mesure / calcul ( $E_m$ )
- b) le moment d'ordre 1 de cet écart ( $VE_m$ )
- c) le rapport moyen mesure / calcul ( $R_m$ )
- d) le moment d'ordre 1 de ce rapport ( $VR_m$ )

$$(66) \quad E_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |I_{mes}(k) - I_{cal}(k)|$$

$$(67) \quad VE_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| |I_{mes}(k) - I_{cal}(k)| - E_m \right|$$

$$(68) \quad R_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{I_{mes}(k)}{I_{cal}(k)}$$

$$(69) \quad VR_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{I_{mes}(k)}{I_{cal}(k)} - R_m \right|$$

$I_{mes}(k)$  : intensité mesurée au  $k^{\text{ème}}$  pas de temps

$I_{cal}(k)$  : intensité calculée au  $k^{\text{ème}}$  pas de temps

$n$  : nombre de pas de temps

On obtient, dans le cas de SAINT-PRIEST : 3, pour l'événement du 4 octobre 84, les deux graphes suivants :

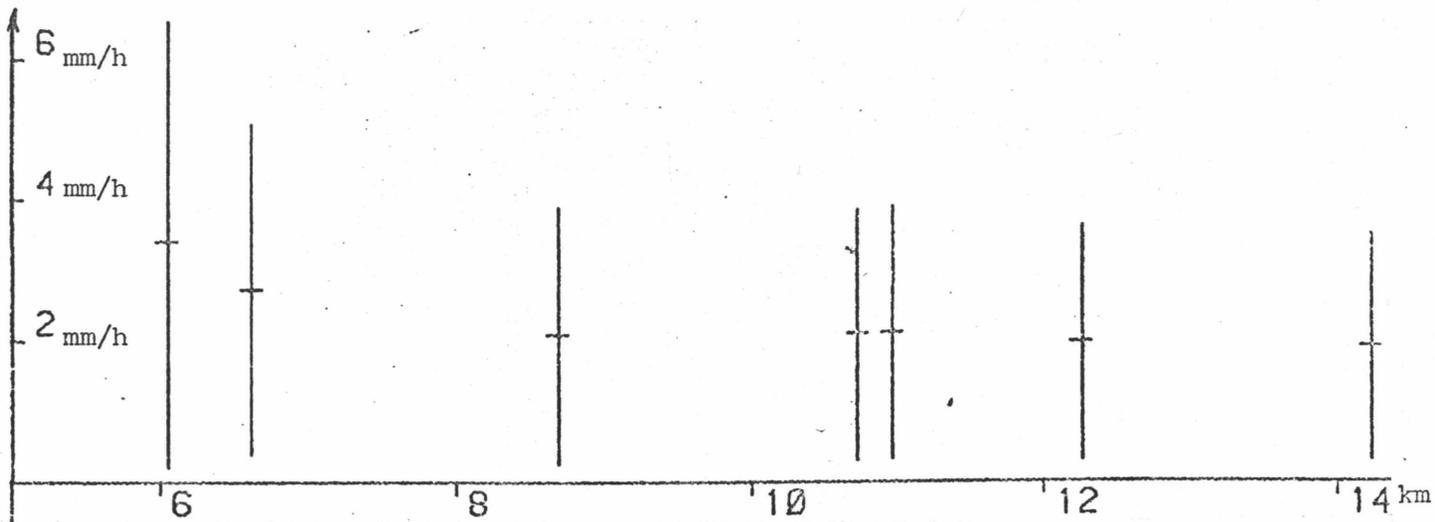


figure 127 : Graphe de l'écart absolu moyen mesure/calcul en fonction de Di

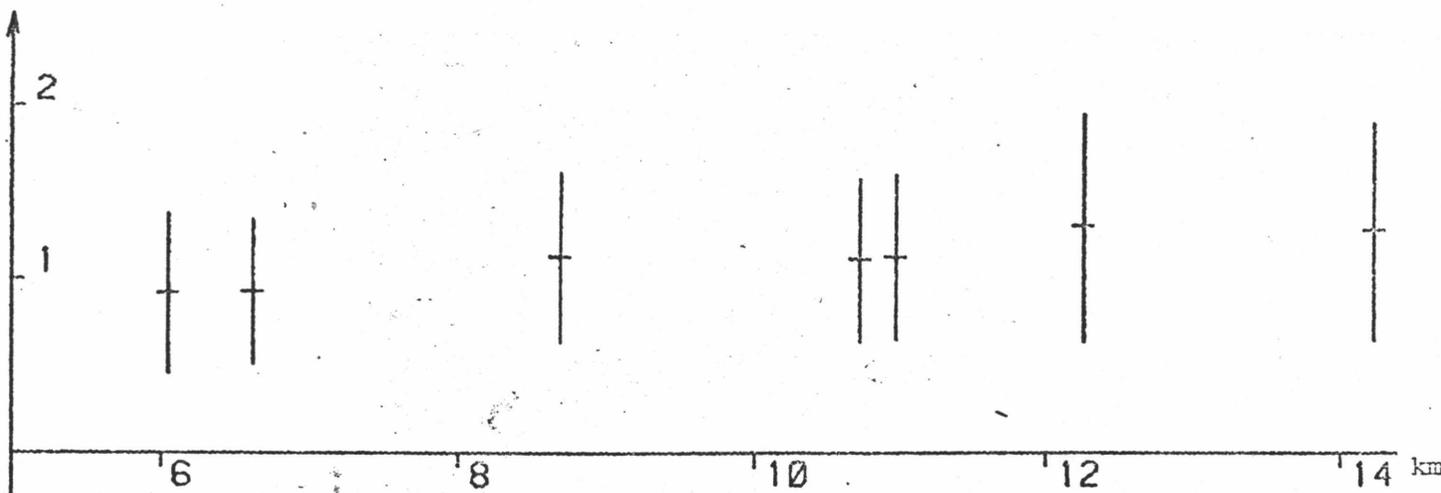


figure 128 : Graphe du rapport moyen mesure/calcul en fonction de Di

Remarques :

Les points correspondent aux valeurs de  $E_m$  (ou  $R_m$ )

Les traits centrés sur les valeurs de  $E_m$  (ou  $R_m$ ) ont une longueur égale à  $2 \cdot VE_m$  (ou  $2 \cdot VR_m$ ).

L'écart absolu moyen est sensé quantifier l'adéquation de l'approximation à la mesure, il détermine une "distance" entre le hyétogramme mesuré et celui calculé.

Ainsi, plus l'écart est petit, plus l'approximation sera bonne ; à la limite, un écart nul signifie que le hyétogramme calculé correspond exactement au hyétogramme mesuré - le modèle adhère parfaitement à la réalité.

Le calcul du moment  $VE_m$  nous permet d'évaluer la représentativité de la valeur  $E_m$  donnée. Si le moment est important, cela signifie que d'un pas de temps à l'autre, les résultats sont très dispersés, la valeur  $E_m$  n'a pas grande signification.

Le rapport  $R_m$  constitue un deuxième moyen d'évaluer la proximité mesure/calcul. Si ce rapport  $R_m$  vaut 1 avec  $VR_m = 0$ , on a une adéquation parfaite.

Mais ce paramètre a surtout été calculé pour mettre en évidence certains phénomènes qui pourraient être masqués à la seule connaissance de l'écart absolu.

Par exemple, ne serait-il pas intéressant de trouver que pour une certaine distance d'influence, le moment de  $R_m$  est négligeable, alors que  $E_m$  et  $VE_m$  n'ont rien de remarquable ? Nous mettrions en évidence une proportionnalité forte entre le hyétogramme mesuré et le hyétogramme calculé.

Remarque :

On peut obtenir une approximation aux moindres carrés des nuages obtenus, suivant une base de fonctions choisies par l'utilisateur.

Pour le calcul des coefficients des fonctions de base, chaque point est pondéré proportionnellement à l'inverse du moment de la variable en ce point. Cela signifie que si en un point la variable est très dispersée, sa valeur ne comptera pas de manière déterminante pour le calcul de la meilleure fonction approximante. A la limite, si sa dispersion était infinie, elle ne compterait pas du tout.

Graphes de  $E_m$  (écart absolu moyen mesure/calculé) en fonction de la distance d'influence  $D_i$  pour les différents postes, à l'évènement du 4 octobre 1984,  
219

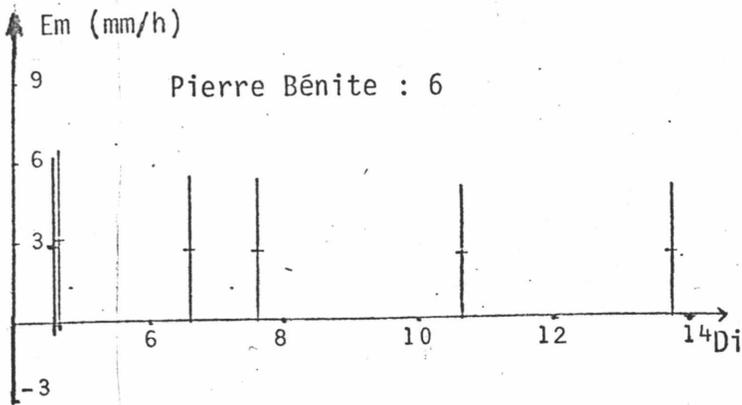


Figure 129

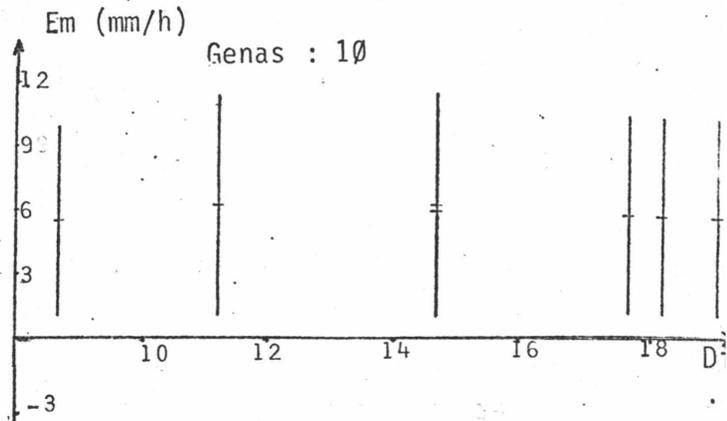


Figure 130

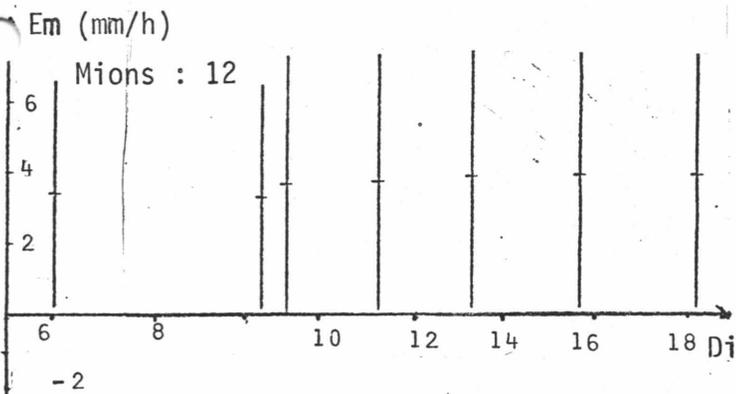


Figure 131

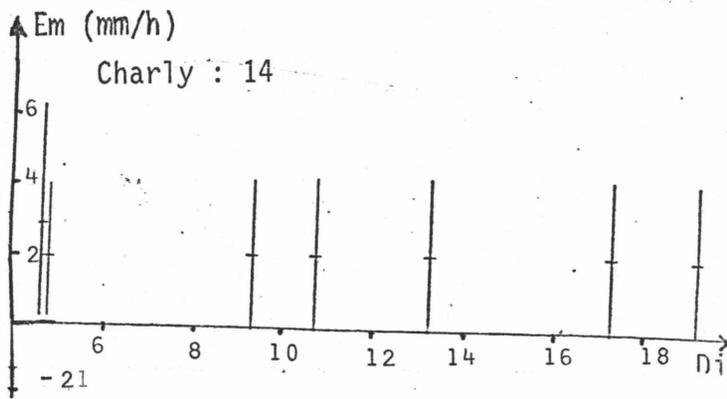


Figure 132

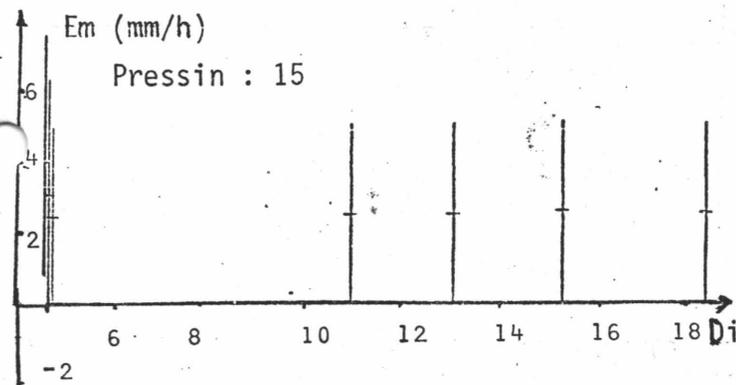


Figure 133

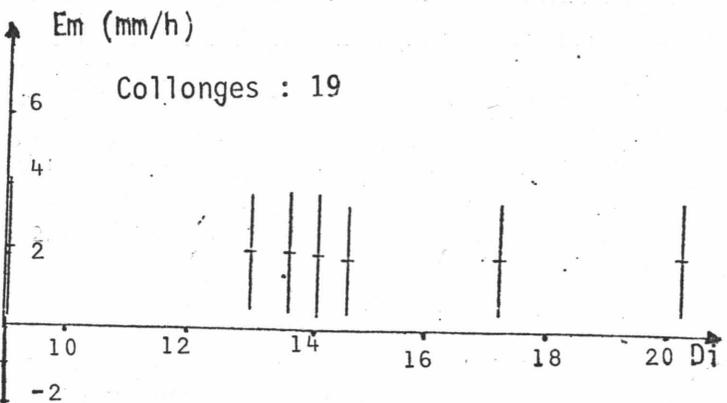


Figure 134

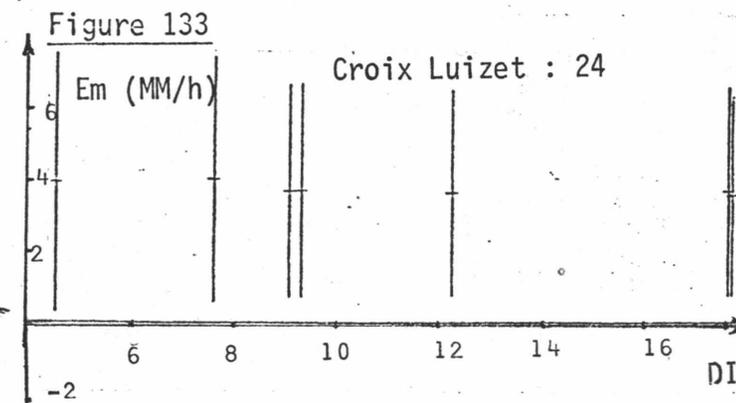


Figure 135

Graphes de Rm (rapport moyen mesure/calcul) en fonction de la distance d'influence (Di) pour les différents postes, à l'événement du 4 octobre 1984.

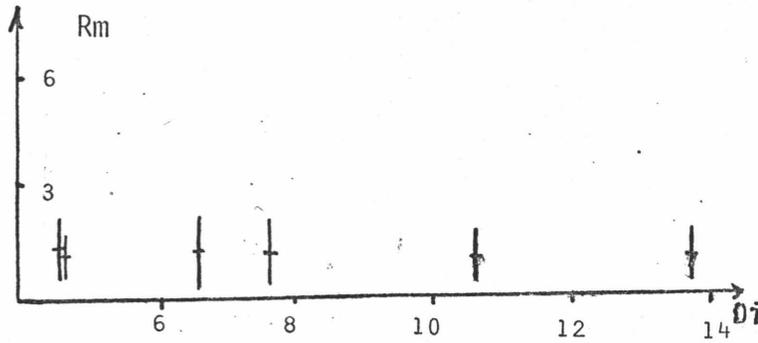


Figure 136 : Pierre Bénite : 6

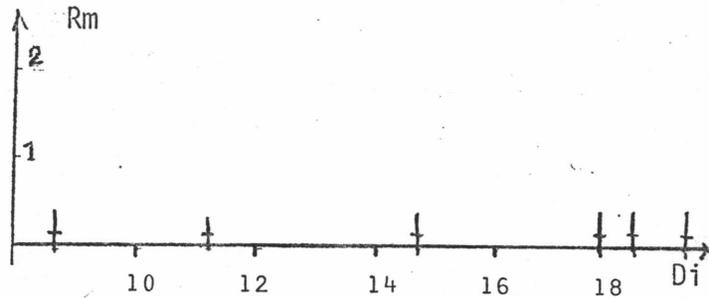


Figure 137 : Genas : 10

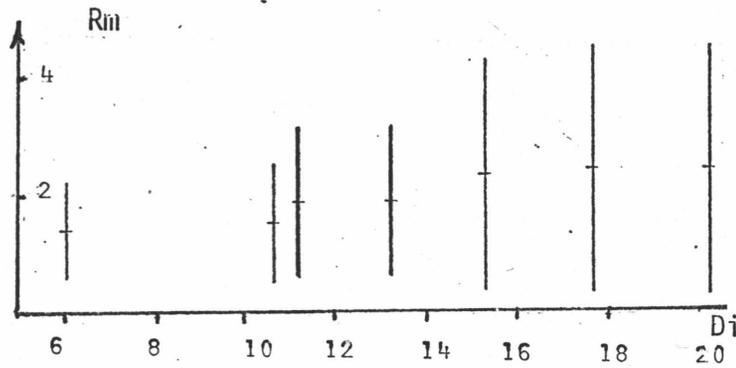


Figure 138 : Mions : 12

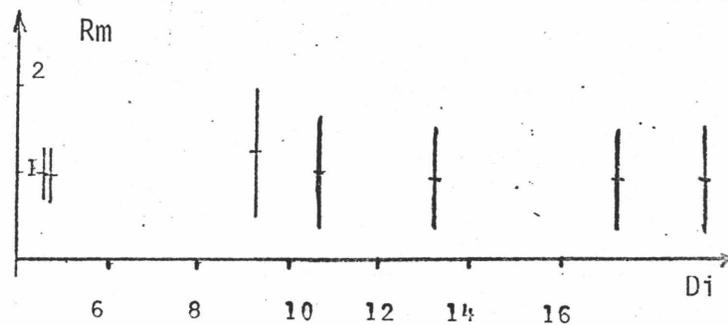


Figure 139 : Charly : 14

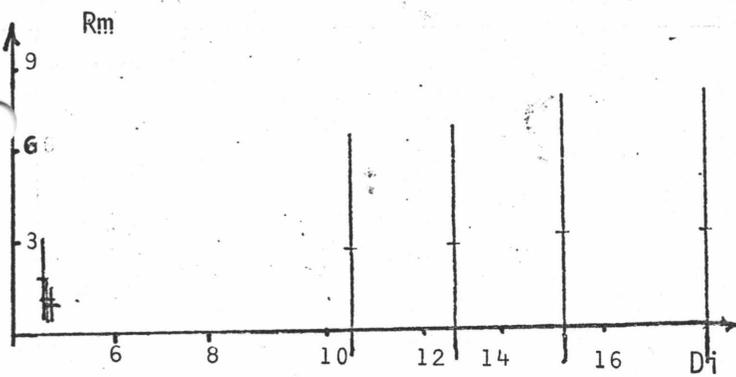


Figure 140 : Pressin : 15

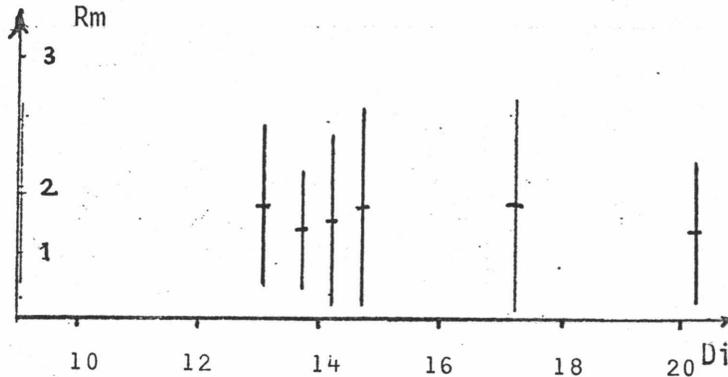


Figure 141 : Collonges : 19

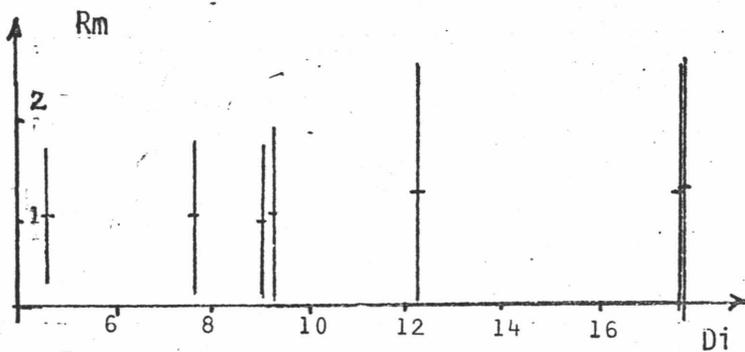


Figure 142 : Croix Luizet : 24

Dans le cas où l'on observe une variation significative de  $E_m$ , en fonction de la distance - susceptible d'être approximée par une fonction polynomiale, dans l'intervalle des distances d'influence admissibles - on détermine la distance d'influence optimale, comme le minimum de la fonction sur l'intervalle admissible.

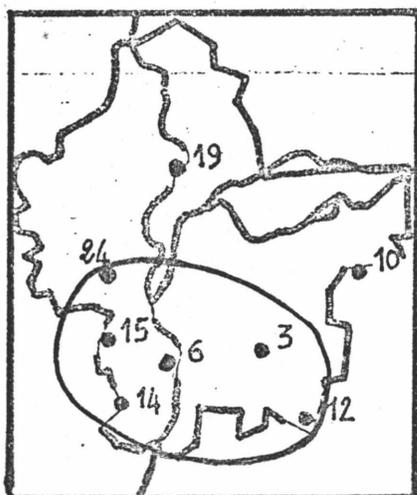
Lorsque tous les postes ont été étudiés, l'ordinateur affiche un tableau donnant, pour chaque poste, la distance optimale calculée.

Nous avons obtenu, pour l'événement du 4 octobre, les graphes de  $E_m$  et  $R_m$  en fonction de  $D_i$  sur les différents postes. (voir schémas ci-après).

Au vu des résultats, il semble que la distance d'influence  $D_i$  ne soit pas un paramètre sensible du modèle, du moins lorsque  $\alpha = 2$  et pour cet événement précis.

Nous n'avons pas cru bon, dans ces conditions, devoir effectuer une approximation des nuages  $E_m$  et  $R_m$  obtenus, puisque les valeurs ne varient pas significativement en fonction de la distance et que la notion de distance  $D_i$  optimale n'a pas grand sens. Pourtant, il est à remarquer qu'une généralisation de ces résultats n'est pas maintenant possible, vu leur caractère ponctuel et la configuration particulière du réseau de mesures à cet événement - 8 pluviomètres dont 6 groupés sur une faible superficie qui donnent l'impression d'une pluie très homogène tant spatialement que temporellement.

Ci-dessous, carte de l'emplacement des postes (figure 143).



D'autres expériences sur un réseau plus dense et plus étendu permettront de préciser ce point.

SCHEMA - NIVEAU 3 (Figure 144)

3.2 SUPPORT DISQUETTE "modélisation"

• représentation en perspective de la lame d'eau

• Construction du hyétogramme moyen et étude de la relation variance spatiale/  
intensité moyenne

Représentations  
hyétogrammes, fonctions...

• Etude de la variation des coefficients des fonctions de base pour la  
modélisation  $H = H(x,y)$

Représentations  
fonctions

• Calcul de la trajectoire

Représentation plane

• Représentation plane, de zones de lame, seuillées, par pas de temps

## 5. TRAITEMENT NIVEAU 3 : 2EME PARTIE, EXPLOITATION DE LA DISQUETTE "MODELISATION" (ci-contre schéma organisationnel)

### 5.1. Construction du hyétogramme moyen

Les traitements effectués et les variables utilisées ont déjà été décrits dans la section exploitation "information ponctuelle". L'unique différence réside dans le choix des hyétogrammes de départ (sur lesquels on effectue le calcul des moyennes). Pour le traitement "ponctuel", il s'agissait des postes de mesure - ou un sous-ensemble -.

Pour le "traitement modélisation", on opère sur les hyétogrammes approximés au sommet d'un maillage de la zone. Dans le cas de l'interpolation linéaire, le maillage est celui de la modélisation.

Dans le cas de l'approximation par équation de lame ( $H = H(X,Y)$ ), le manipulateur définit lui-même le maillage dont les sommets fourniront les hyétogrammes de départ pour le traitement.

#### Remarque :

Le maillage doit être suffisamment serré pour que l'erreur faite en considérant que le maillage retenu soit équivalent à la lame, soit négligeable.

#### Exemple 1 :

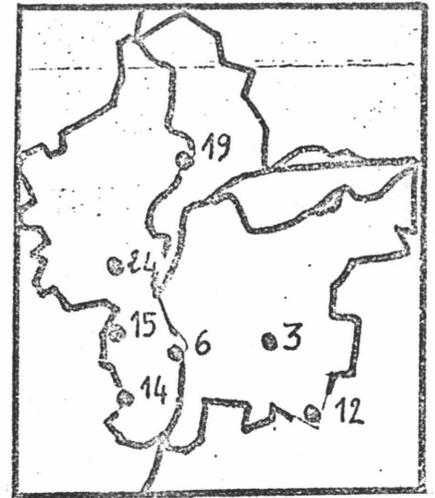
Hyétogramme moyen déterminé à partir d'une modélisation  $H = H(X,Y)$  (recherche à chaque pas de temps d'une équation de lame) pour l'événement du 4 octobre 84.

Caractéristiques de la modélisation (fichier 19).

a) liste des 7 postes retenus  
sur les 8

ST PRIEST : 3  
PIERRE BENITE : 6  
MIONS : 12  
ST GENIS LAVAL CHARLY : 14  
ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
COLLONGES : 19  
CROIX LUIZET : 24

figure 145 : Emplacement des  
postes



b) le pas de temps utilisé est de 24 minutes. La modélisation a été effectuée à partir d'une interpolation des données brutes moyennées sur des pas de temps de 48 minutes.

Ce qu'on traduit par :

- pas de scrutation : 48 minutes
- pas d'interpolation : 24 minutes

c) quatre fonctions de base ont été choisies pour cette modélisation :

$$(x,y) = \text{constante}$$

$$(x,y) = xy$$

$$(x,y) = x$$

$$(x,y) = y^2$$

d) quadrillage de calcul : 10 x 10

On obtient le hyétogramme suivant (quadrillage 10 x 10) (figure 146).

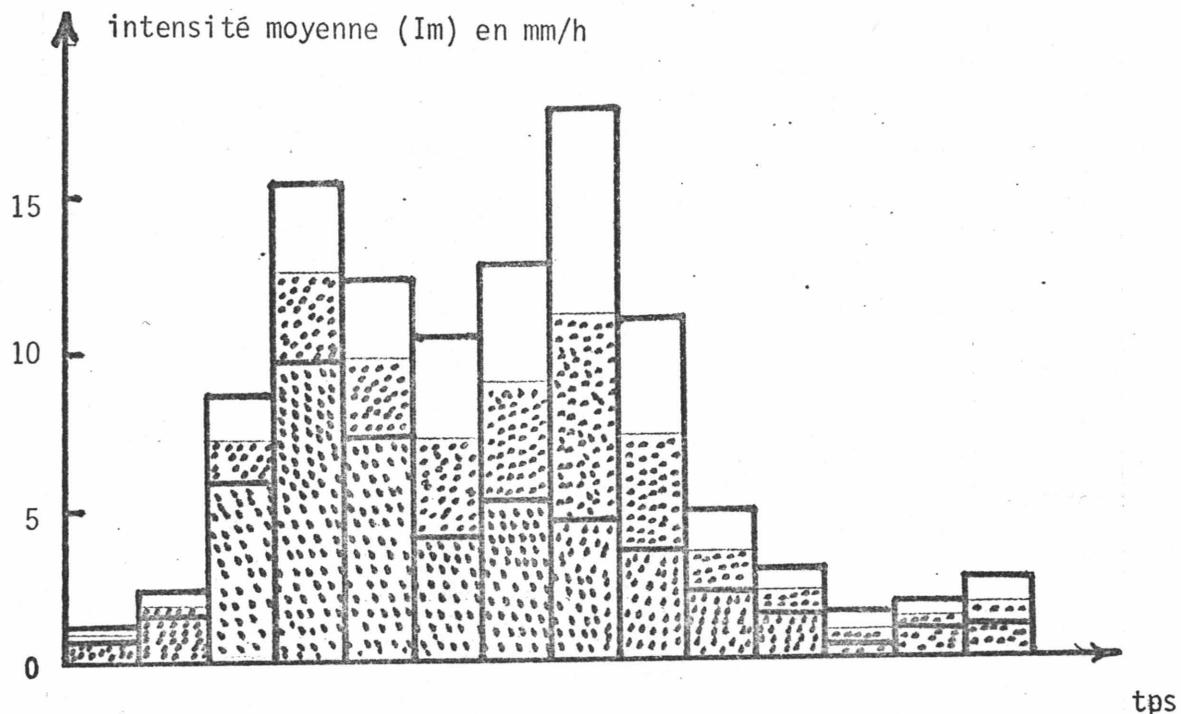


Figure 146 : hyétogramme moyen d'après modélisation

Les deux limites, représentées de part et d'autre de l'intensité moyenne correspondent aux valeurs moyennes de l'intensité auxquelles on ajoute ou soustrait la valeur du moment d'ordre 1 de l'intensité moyenne au pas de temps considéré (indique la dispersion spatiale des intensités par rapport à l'intensité moyenne).

On peut aussi obtenir une représentation du moment d'ordre 1 ( $E_m$ ) de l'intensité moyenne en fonction de sa valeur ( $I_m$ ) et effectuer un calcul d'approximation du nuage suivant une fonction polynomiale. (cf. : chpt IV § 4.2)

Dans le présent cas, on remarque qu'une approximation linéaire est satisfaisante.

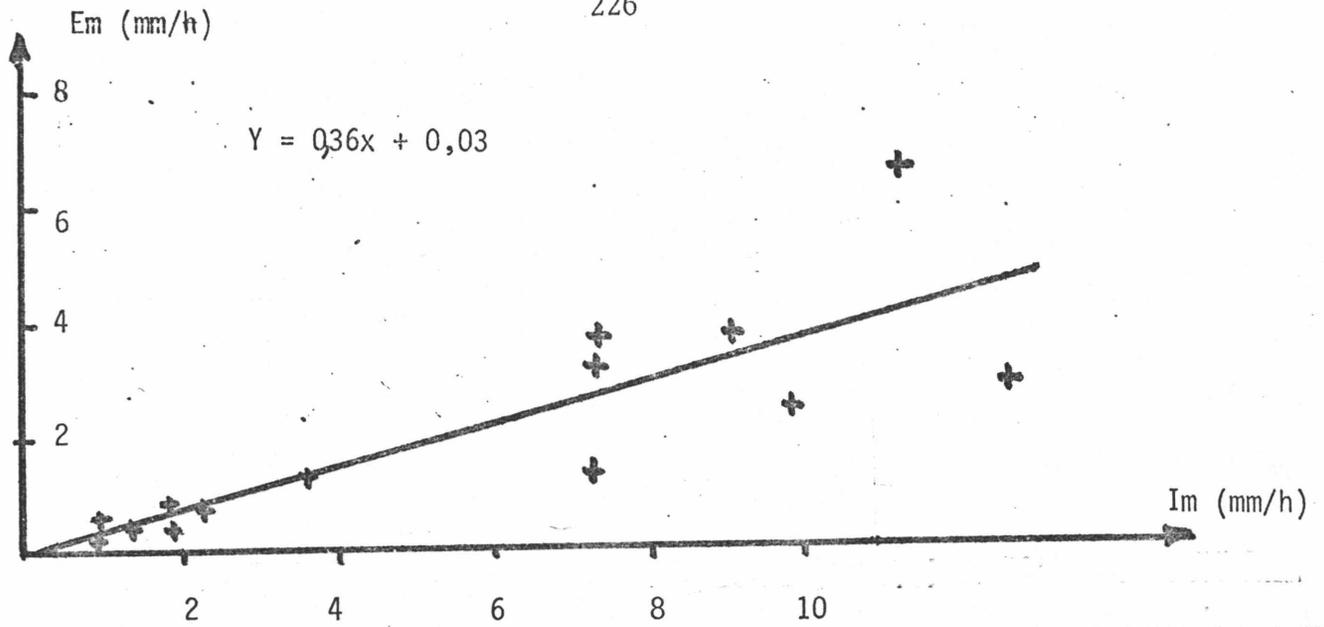


figure 147 :  $E_m$  en fonction de  $I_m$  (quadrillage 10 x 10)  
 L'erreur moyenne d'approximation est : 0.68 mm/h

Remarques :

1) Les résultats obtenus sont fonction du quadrillage choisi (puisque'il s'agit, en réalité, de calculs, sur les sommets du quadrillage). Il faut donc s'assurer qu'un quadrillage 10 x 10 est suffisamment fin, pour ne pas introduire de distorsions - parasite des résultats. On montre ci-dessous les résultats obtenus en prenant un quadrillage 15 x 15.

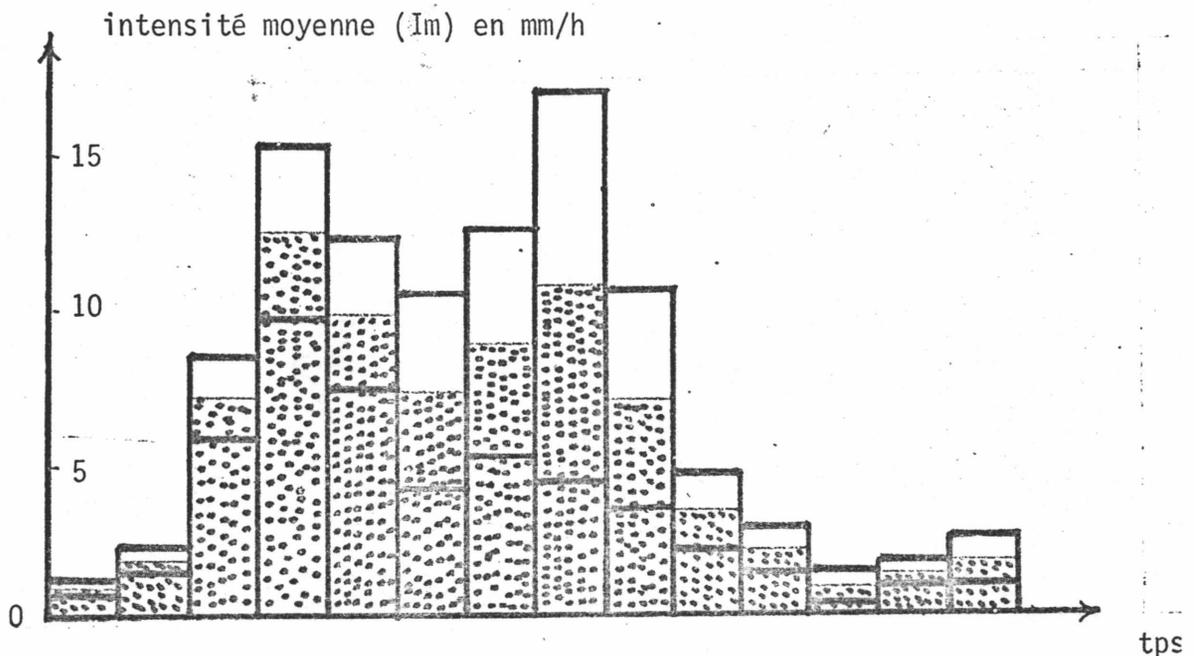


figure 148 : Hyétogramme moyen (quadrillage 15 x 15)

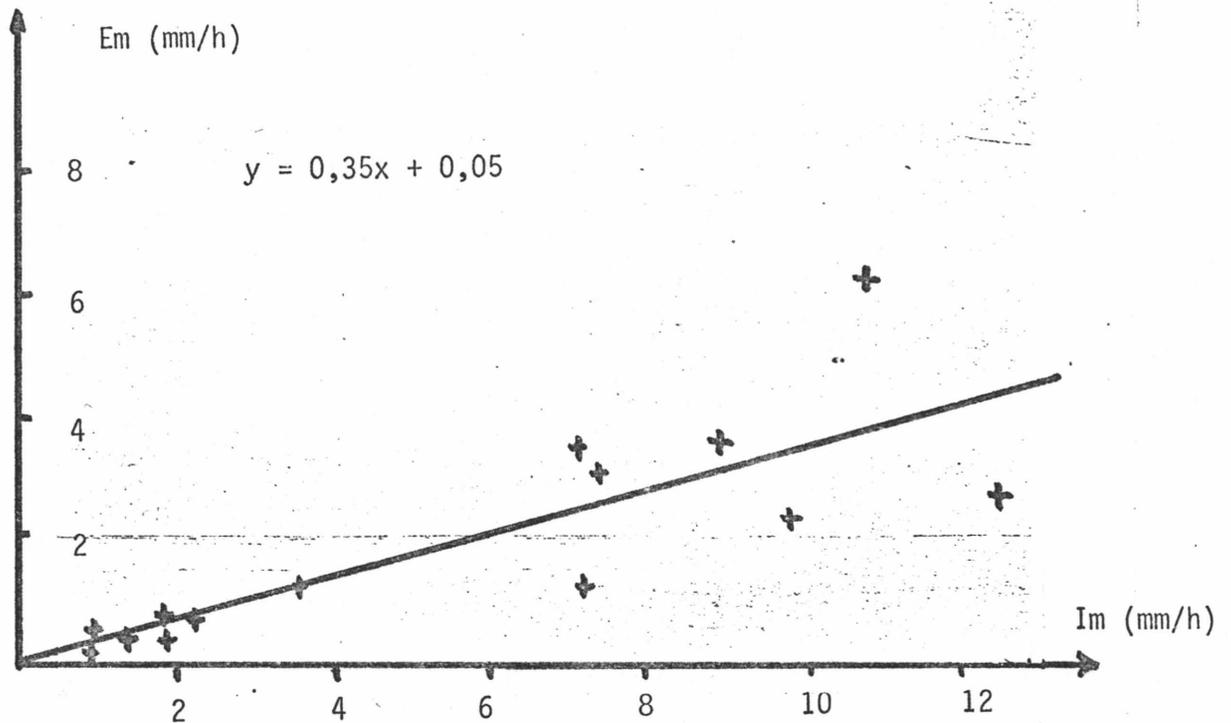


figure 149 :  $E_m$  en fonction de  $I_m$  (quadrillage 15 x 15)  
L'erreur moyenne d'approximation est 0.67 mm/h

Les résultats obtenus sont pratiquement identiques. On en déduit qu'un quadrillage 10 x 10 est suffisant dans ce cas.

2) Les résultats obtenus pour ces paramètres peuvent être comparés à ceux obtenus sans modélisation, à partir des données brutes, transformées selon les pas de temps correspondants.

On obtient, ainsi, un moyen de vérification indirecte de la validité d'une modélisation, à supposer que les valeurs obtenues directement à partir des mesures réseau soient jugées fiables, pour ces paramètres.

Dans le cas considéré, à partir des données brutes, on obtient :

a) si l'on ne prend en compte que les 7 postes retenus par la modélisation :

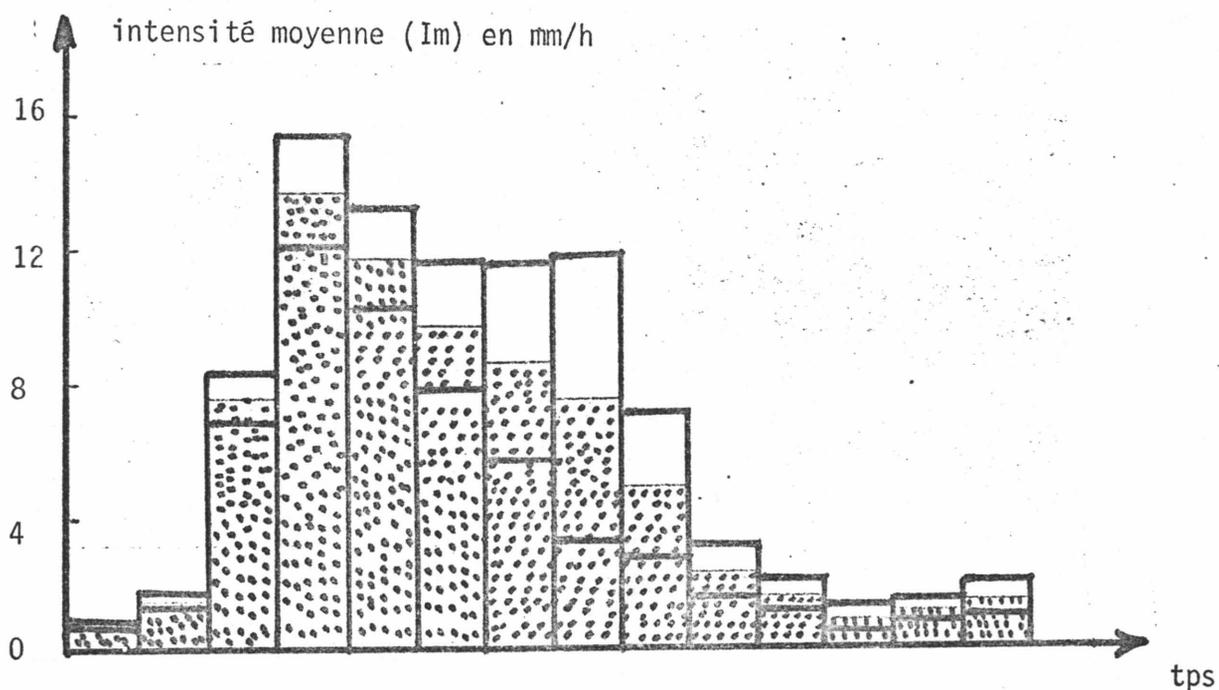


figure 150 : Hyetogramme moyen

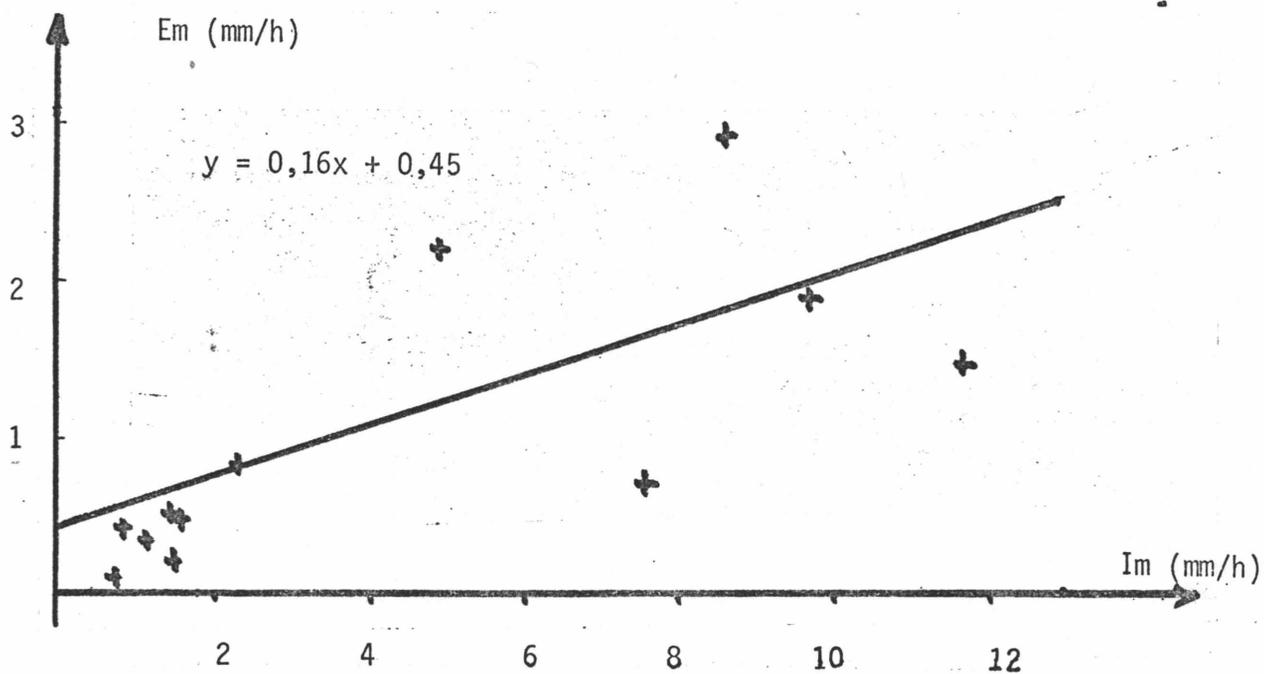


figure 151 :  $E_m$  en fonction de  $I_m$   
L'erreur moyenne d'approximation est 0.67 mm/h

b) si on prend en compte la totalité des 8 postes, on obtient :  
intensité moyenne ( $I_m$ ) en mm/h

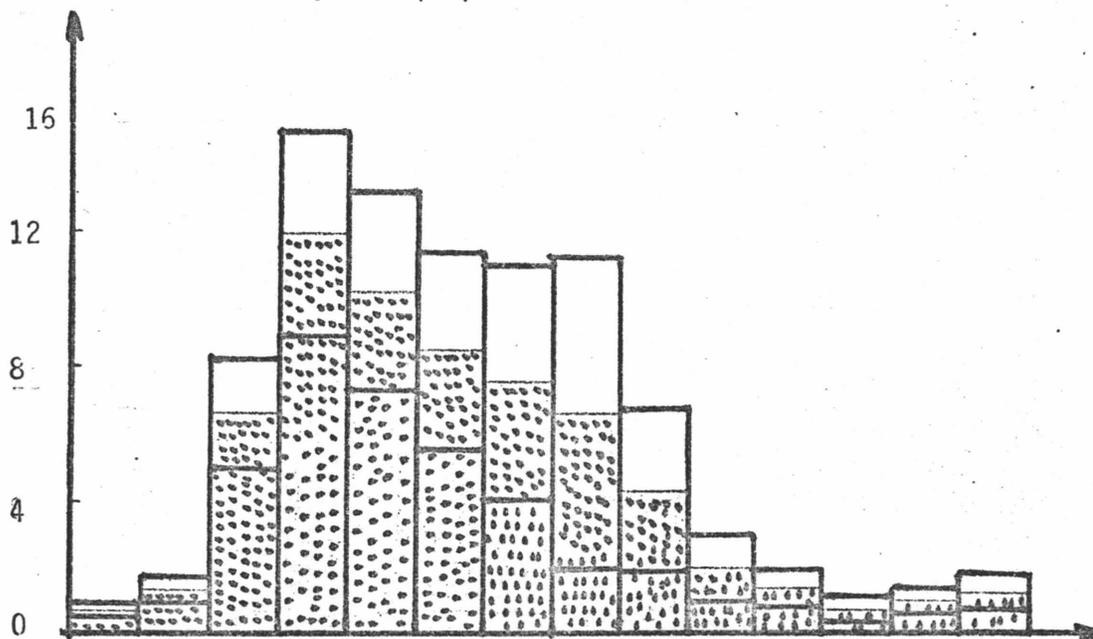


figure 152 : Hyetogramme moyen

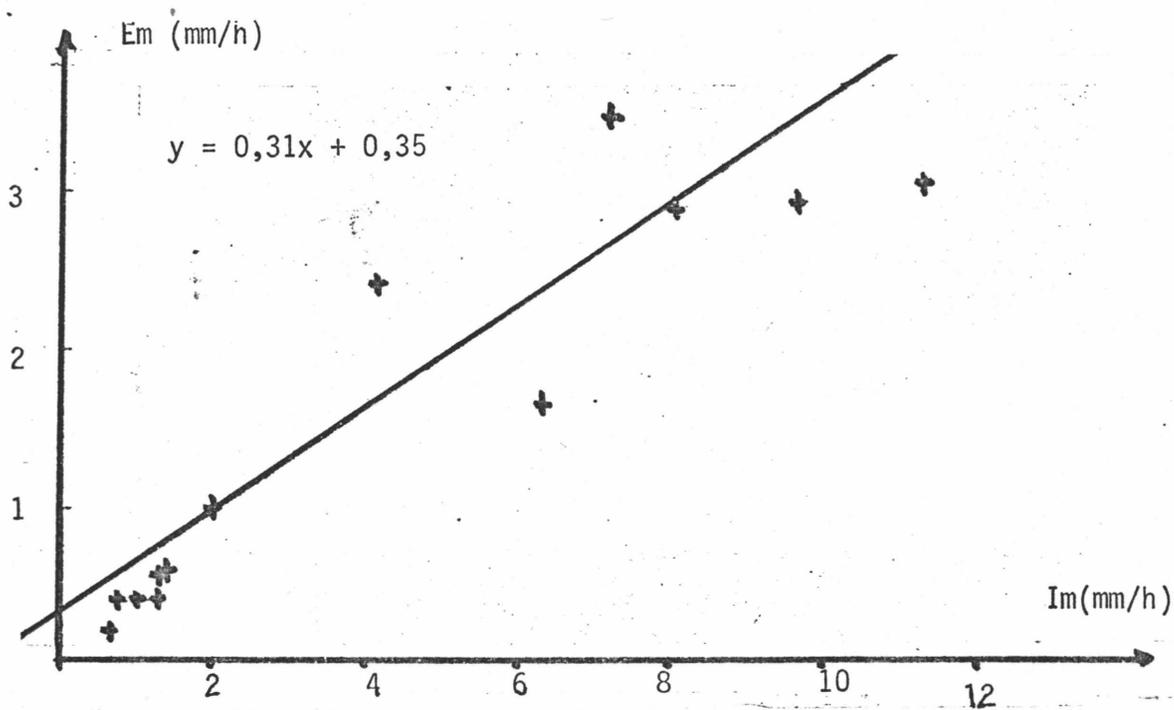


figure 153 :  $E_m$  en fonction de  $I_m$

L'erreur moyenne d'approximation est : 0.54 mm/h

## 5.2. Représentations graphiques de lame d'eau

Deux types de représentations graphiques sont disponibles :

- . 1 représentation plane
- . 1 représentation perspective

### 5.2.1. Représentation plane

Pour chaque pas de temps, l'ordinateur affiche une représentation de la lame seuillée selon un seuil défini préalablement par l'utilisateur, avec pointage du barycentre.

Lorsque tous les pas de temps ont été représentés successivement (1 image / pas de temps), l'ordinateur affiche la position successive du barycentre de la lame seuillée dans un tableau.

Exemples de représentation de la lame d'eau cumulée totale pour l'événement du 4 octobre 1984, suivant différentes valeurs du seuil et pour les deux types de modélisations.

Exemple 1 : Modélisation par pondération simple sur les distances (fichier 0).

ST PRIEST : 3  
 PIERRE BENITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12  
 ST GENIS LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24  
 . coefficient de pondération : 2  
 . distance d'influence : 30 km

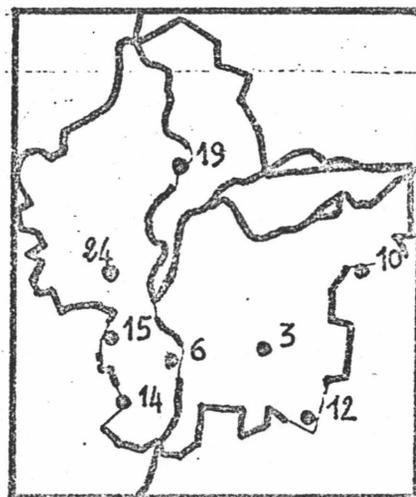


figure 154 : Liste et carte des postes retenus pour la modélisation

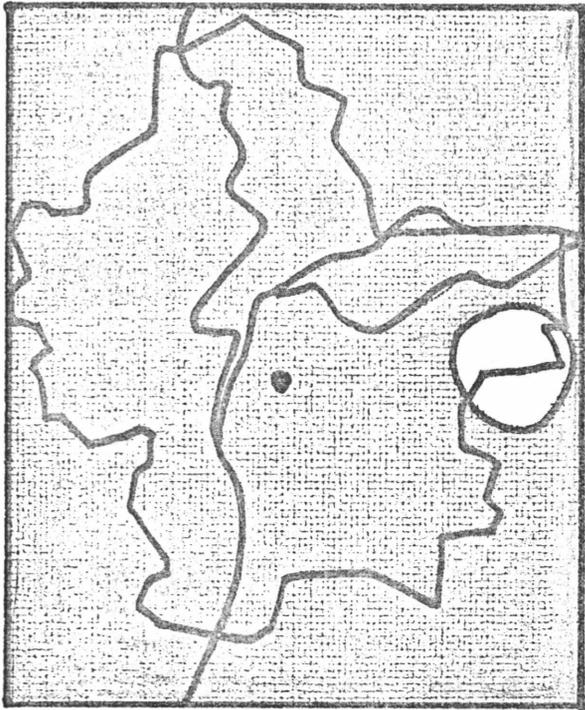


Figure 155 : lame cumulée totale  
seuillée à 1 cm

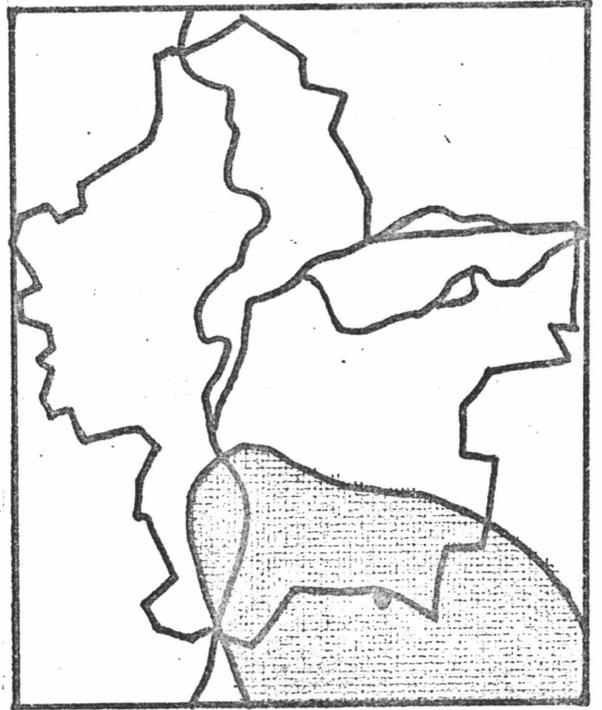


Figure 157 : lame cumulée totale  
seuillée à 3 cm



Figure 156 : lame cumulée totale  
seuillée à 2 cm

Exemple 2 : Modélisation du type  $H = H(X,Y)$ 

SAINT PRIEST : 3  
 PIERRE BÉNITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12  
 SAINT GENIS LAVAL CHARLY : 14  
 SAINT GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24

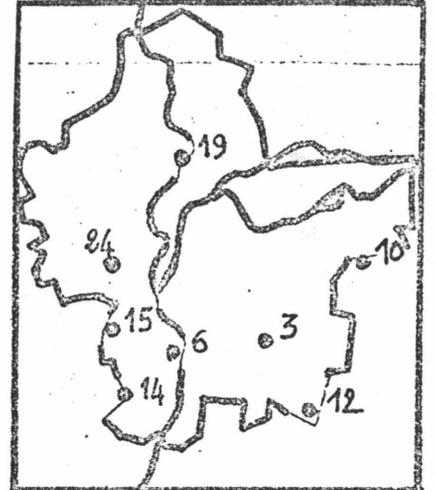


figure 158 : Liste et carte des 8 postes retenus pour la modélisation :

. Liste des 8 fonctions de base choisies :

$$\phi_1(x,y) = 1$$

$$\phi_2(x,y) = x$$

$$\phi_3(x,y) = y$$

$$\phi_4(x,y) = xy$$

$$\phi_5(x,y) = x^2$$

$$\phi_6(x,y) = y^2$$

$$\phi_7(x,y) = (xy)^2$$

$$\phi_8(x,y) = \sqrt{xy}$$

. Ci-après, on représente les hauteurs cumulées dépassant un certain seuil, d'après le modèle.



Figure 159 : lame cumulée totale  
seuillée à 2 cm

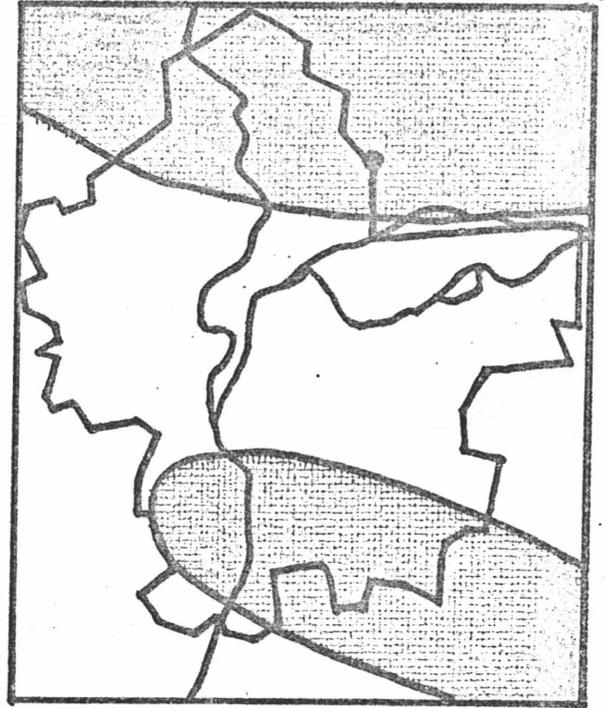


Figure 160 : lame totale cumulée  
seuillée à 3 cm

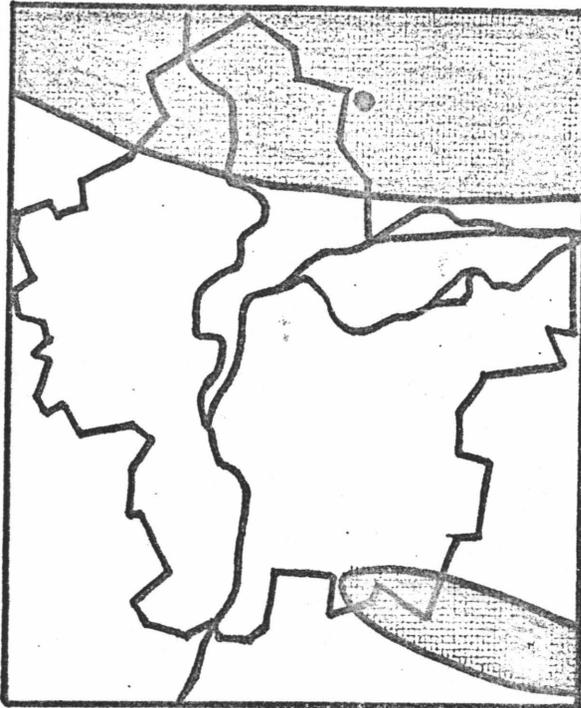


Figure 161 : lame total cumulée  
seuillée à 4 cm

On remarque que les deux modélisations donnent une lame cumulée très différente - les isohyètes ont une organisation complètement dissemblable.

A notre avis, il faut en imputer la faute au petit nombre de postes qui ont été utilisés pour mettre en oeuvre ces techniques. Pour ce réseau de 8 postes, il se trouve que le calcul des intensités n'est plus tant une interpolation qu'une extrapolation.

Dans le cas de l'interpolation linéaire multiple, la distance d'influence permet de restreindre dans une certaine mesure les extrapolations injustifiées.

Dans le cas de l'équation de lame  $H = H(X,Y)$  du moins telle qu'on l'utilise actuellement, les valeurs, loin des postes, divergent considérablement.

Pour l'équation donnée dans l'exemple, les valeurs de hauteurs cumulées au Nord-Est de la CO.UR.Y. dépassent 6 cm. Ce qui apparaît peu vraisemblable compte tenu des renseignements que l'on a par ailleurs.

### 5.2.2. Représentation en perspective

Sur le rectangle circonscrivant le territoire de la CO.UR.LY., et pour l'angle de projection déterminé par le manipulateur, l'ordinateur affiche une perspective cavalière de la lame d'eau, à chaque pas de temps.

On donne 3 exemples de représentation de lame d'eau cumulée totale pour l'événement du 4 octobre 1984, suivant les 3 types de modélisations disponibles :

- modélisation par pondération simple sur les distances
- modélisation par pondération croisée sur les distances
- modélisation par recherche d'une équation de lame  $H(X,Y)$ .

1) Dans les trois cas, on prend pour la modélisation la totalité des postes en fonctionnement, soit 8 :

ST PRIEST : 3  
 PIERRE BENITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12  
 ST GENIS LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24

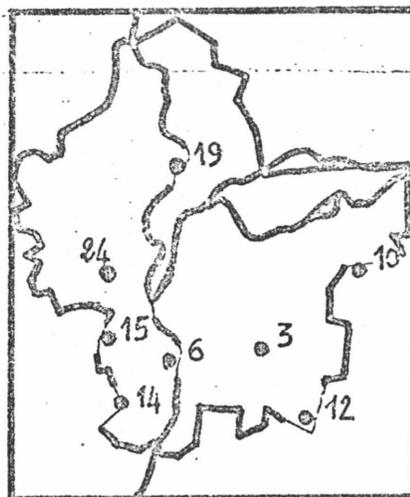


figure 162

En ce qui concerne les deux modélisations par interpolation linéaire multiple (Ex. 1 et Ex. 2), on choisit :

- l'exposant de pondération  $\alpha = 2$
- la distance d'influence  $D_i = 10$  km

Pour ce qui concerne la modélisation  $H = H(X,Y)$ , on garde les mêmes spécifications que dans l'exemple 2 choisi pour illustrer la représentation plane, soient 8 fonctions de base :

$$\phi_1(x,y) = 1$$

$$\phi_2(x,y) = x$$

$$\phi_3(x,y) = y$$

$$\phi_4(x,y) = xy$$

$$\phi_5(x,y) = x^2$$

$$\phi_6(x,y) = y^2$$

$$\phi_7(x,y) = (xy)^2$$

$$\phi_8(x,y) = \sqrt{xy}$$

Exemple - 1 : Modélisation par pondération simple sur les distances (quadrillage de calcul et représentation : 10 X 10)

On obtient :

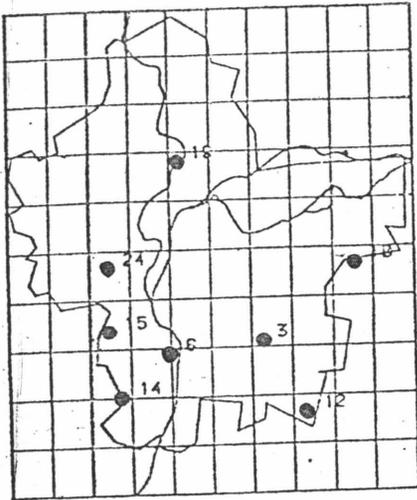


Figure 163 : Représentation du quadrillage

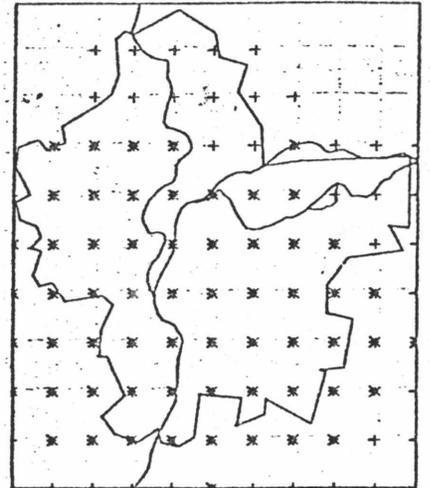


Figure 164 : sommets du quadrillage influencés par plusieurs postes. (\*)  
sommets du quadrillage influencés par un poste unique. (+)

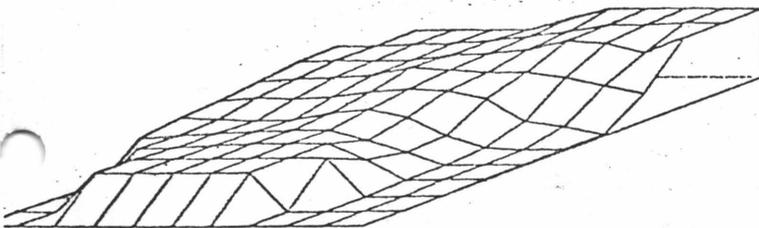


Figure 165 : angle  $-150^\circ$

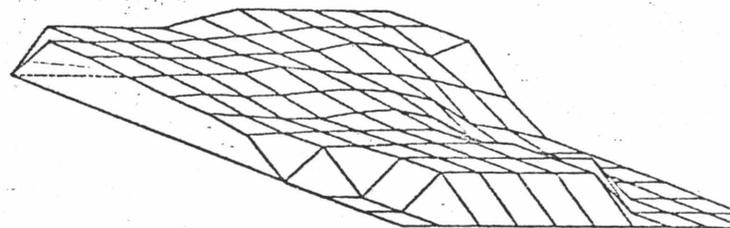


Figure 166 : angle  $-30^\circ$

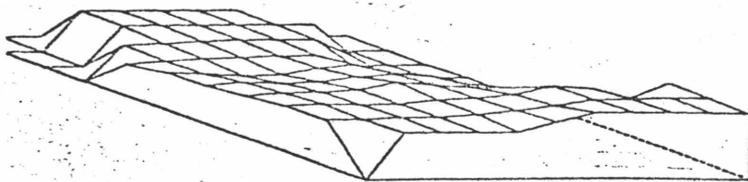


Figure 167 : angle  $150^\circ$

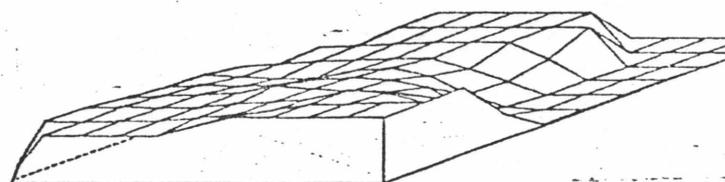


Figure 168 : angle  $30^\circ$

Exemple 2 : modélisation par pondération croisée sur les distances,  
(quadrillage de calcul et représentation : 15 X 15)

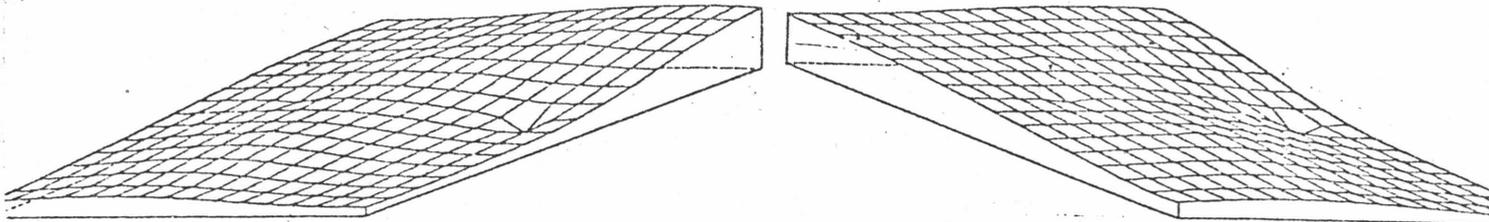


Figure 169 : angle  $-150^\circ$

Figure 170 : angle  $-30^\circ$

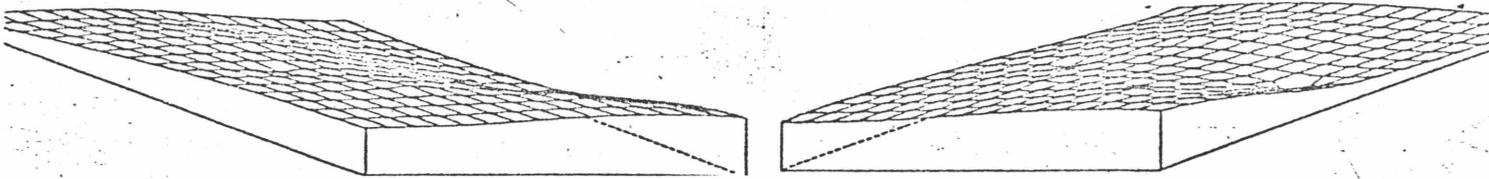


Figure 171 : angle  $150^\circ$

Figure 172 : angle  $30^\circ$

Exemple 3 : - modélisation par recherche d'une équation de lame  $H(x,y)$   
- quadrillage de représentation : 15 x 15

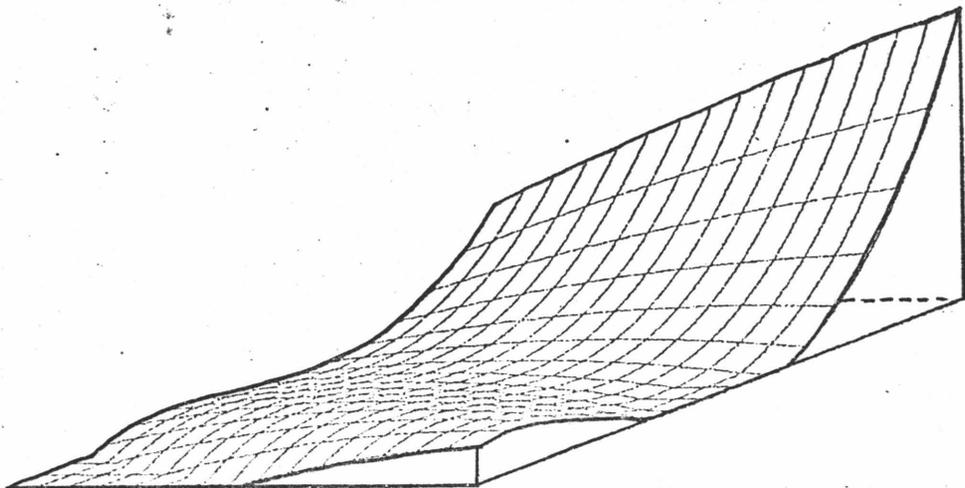


Figure 173 : angle  $30^\circ$

Remarques à propos des représentations en perspective :

a) l'angle de projection peut être choisi indifféremment entre - 180 degrés et + 180 degrés, excepté les valeurs  $\pm 90$  degrés.

b) à propos de l'échelle des représentations données :

- . les exemples 1 et 2 sont représentés à la même échelle
- . l'exemple 3 est à une échelle 2 fois plus petite.

c) on peut tirer des films à partir de ces différentes représentations suivant le pas d'interpolation que l'on désire.

Une comparaison avec les films obtenus pour les mêmes pas de temps en représentation ponctuelle permettrait un contrôle indirect de l'aptitude des modèles à décrire l'évolution du phénomène.

Ci-après, on montre l'influence de la distance d'influence sur le calcul de la lame d'eau cumulée totale, selon le modèle de la pondération simples - les autres spécifications demeurant inchangées identiques à celles données dans l'exemple précédent, soient :

#### LISTE DES 8 PLUVIOMÈTRES RETENUS SUR UN TOTAL DE 8

ST PRIEST : 3  
 PIERRE BENITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12  
 ST GENIS LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24

NBRE DE LIGNES DU QUADRILLAGE : 10  
 NBRE DE COLONNES DU QUADRILLAGE : 10  
 PUISSANCE DE PONDÉRATION : 2

Caractérisation des sommets du quadrillage suivant la distance d'influence choisie :

- + sommets influencés par un seul poste
- \* sommets influencés par plusieurs postes

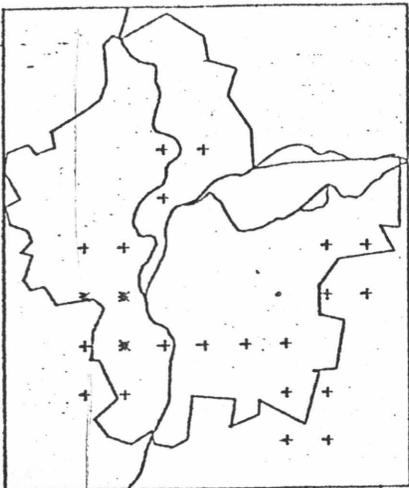


Figure 174 :  $D_i = 3$  km

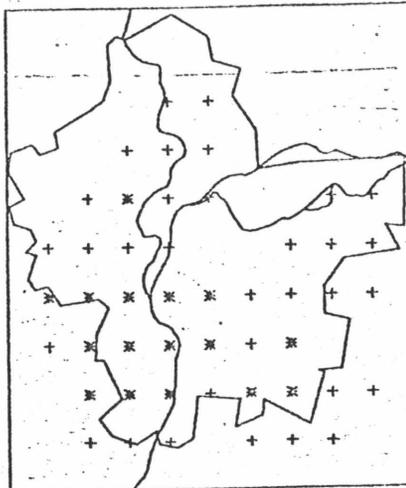


Figure 175 :  $D_i = 5$  km

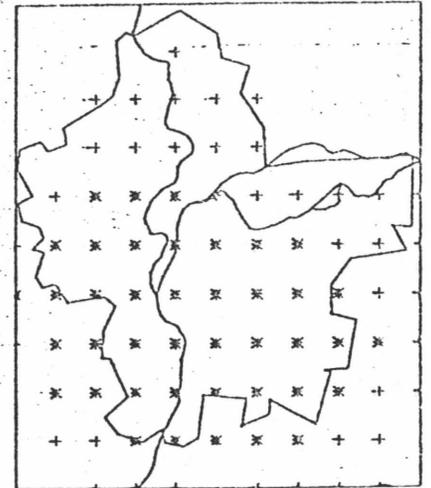


Figure 176 :  $D_i = 8$  km

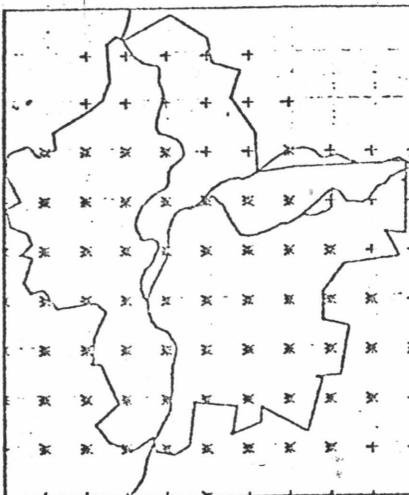


Figure 177 :  $D_i = 10$  km

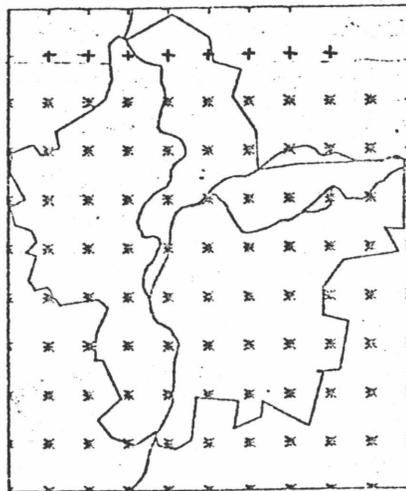


Figure 178 :  $D_i = 15$  km

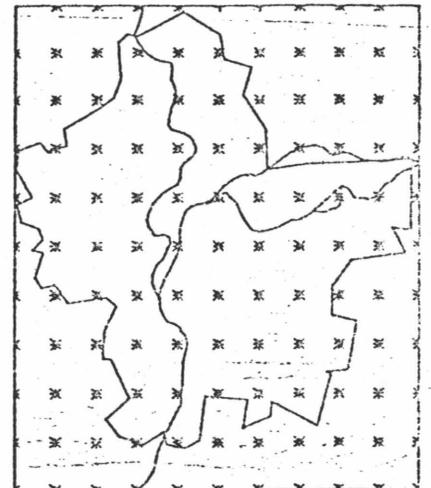


Figure 179 :  $D_i = 20$  km

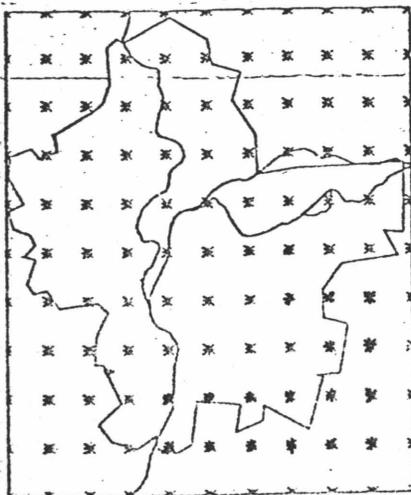


Figure 180 :  $D_i = 30$  km

Représentations de la lame d'eau cumulée totale en perspective à 30 degrés pour les diverses distances d'influence ( $D_i$ ) choisies (pondérations simple).

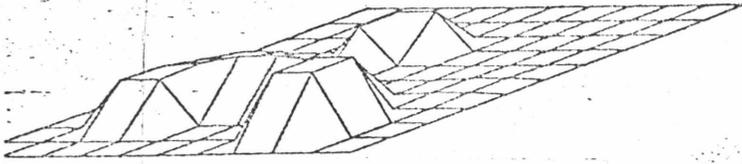


Figure 181 :  $D_i = 3$  km

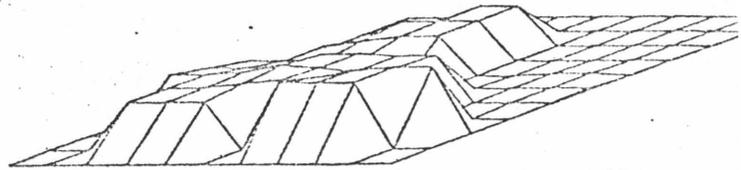


Figure 182 :  $D_i = 5$  km

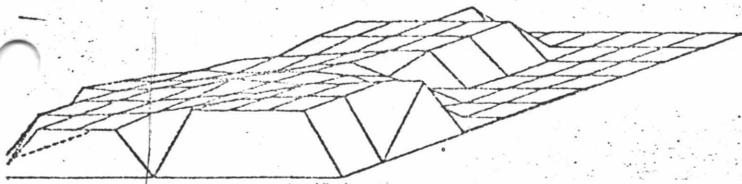


Figure 183 :  $D_i = 8$  km

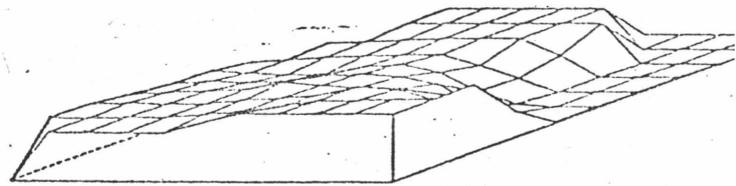


Figure 184 :  $D_i = 10$  km

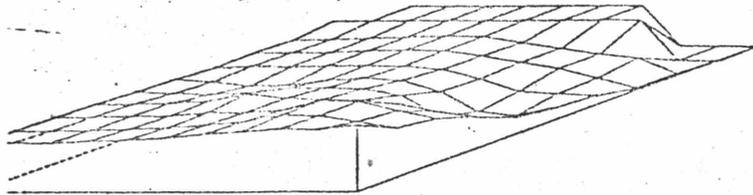


Figure 185 :  $D_i = 15$  km

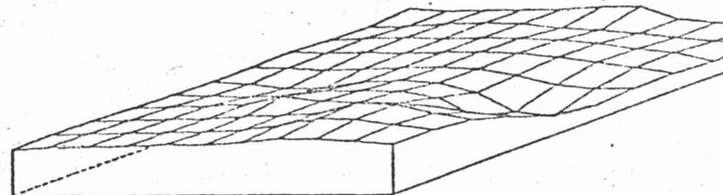


Figure 186 :  $D_i = 20$  km

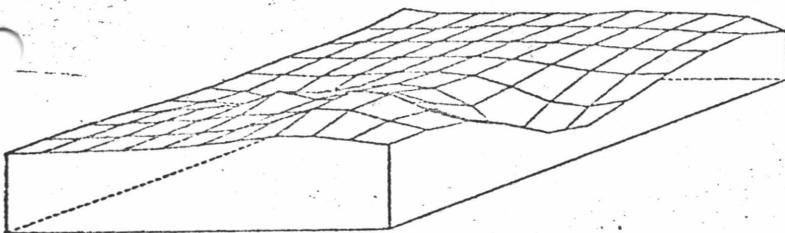


Figure 186 :  $D_i = 30$  km

### 5.3. Etude des écarts approximation / mesure pour le modèle $H = H(X,Y)$

(Recherche d'une équation de la lame d'eau)

Cette étude est l'analogie de l'étude de l'influence de  $D_i$  et  $\alpha$  sur le comportement du modèle de calcul de lame par interpolation linéaire multiple.

Comme nous l'avons souligné précédemment (cf. : Chapitre IV, § 4.) , il n'est pas bon d'utiliser un modèle sans se donner les moyens de vérifier l'importance des divers paramètres qu'il exprime et leur sensibilité à toute altération de l'information primaire.

Lors du traitement pour la recherche d'une équation de lame, l'utilisateur choisit :

- le pas de temps (avec ou sans interpolation)
- le groupe de pluviomètres qui serviront pour l'approximation
- le nombre de fonctions de base
- les exposants des monomes doubles utilisés (caractéristiques des fonctions de base).

Le programme de vérification mis au point consiste à calculer :

- le hyétogramme moyen approximé sur tous les postes en fonctionnement (I1) (moyenne des valeurs approximées sur tous les postes en fonctionnement)
- le hyétogramme moyen approximé sur les seuls postes retenus pour l'approximation (I2) (moyenne des valeurs approximées sur les seuls postes retenus pour la modélisation)
- le graphe de la moyenne des écarts mesure / calcul obtenus sur tous les postes en fonctionnement (E1)
- le graphe de la moyenne des écarts mesure / calcul obtenus sur les seuls postes retenus (E2)

- le graphe du rapport E1 / E2
- le nuage E1 en fonction de I1
- le nuage E1 / E2 en fonction de I1..

Les tableaux correspondant aux valeurs représentées sont évidemment disponibles et pour les deux dernières représentations, il est possible d'obtenir différentes approximations aux moindres carrés des nuages - suivant une base de fonctions déterminées par l'utilisateur.

On obtient aussi la représentation superposée des hyétogrammes I1 et I2 et la superposition des écarts moyens E1 et E2.

Exemple :

Modélisation par recherche d'une équation de lame  $H = H(X,Y)$

- 1) Liste des 7 postes retenus pour la modélisation :

ST PRIEST : 3  
 PIERRE BENITE : 6  
 MIONS : 12  
 ST GENIE LAVAL CHARLY : 14  
 ST GENIS LAVAL PRESSIN : 15  
 COLLONGES : 19  
 CROIX LUIZET : 24

Emplacement des postes

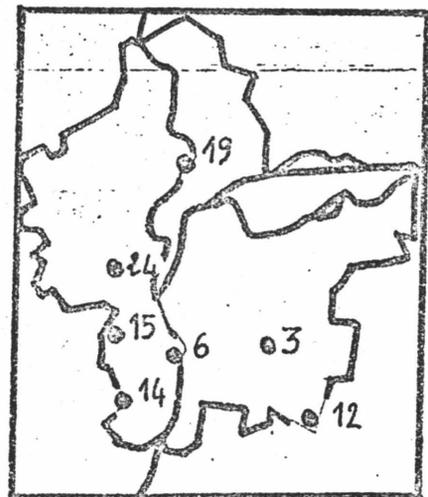


figure 188

- 2) Liste des 4 fonctions de base :

$$\begin{aligned} \phi_1(x,y) &= 1 & \phi_3(x,y) &= x \\ \phi_2(x,y) &= xy & \phi_4(x,y) &= y^2 \end{aligned}$$

- 3) Pas de scrutation : 48 mn  
 Pas d'interpolation : 24 mn

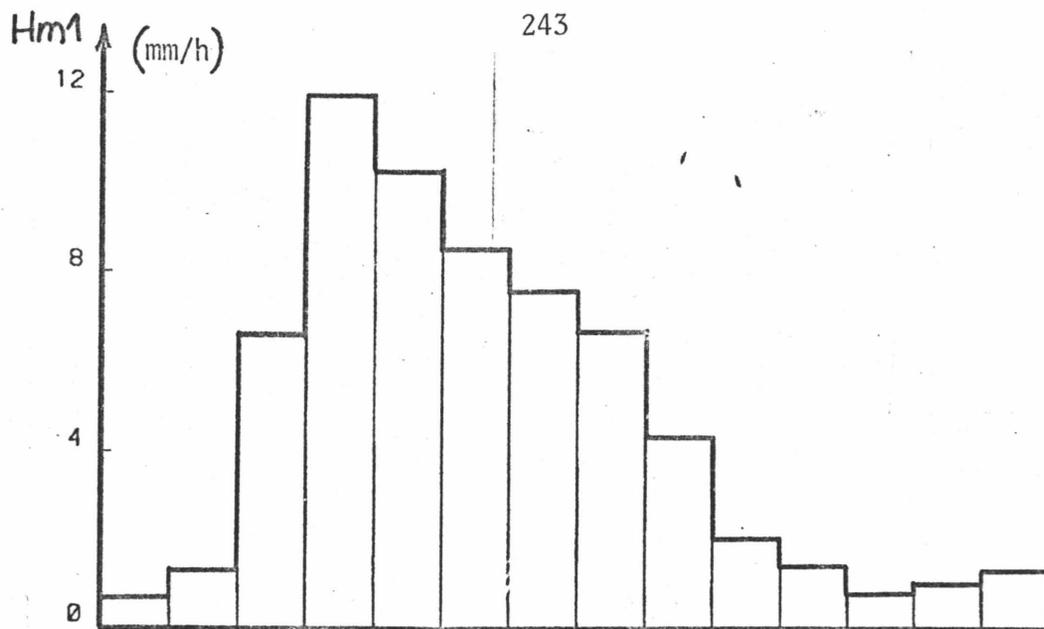


figure 189 : Hyetogramme moyen approximé sur tous les postes en fonctionnement (on le note Hm1)

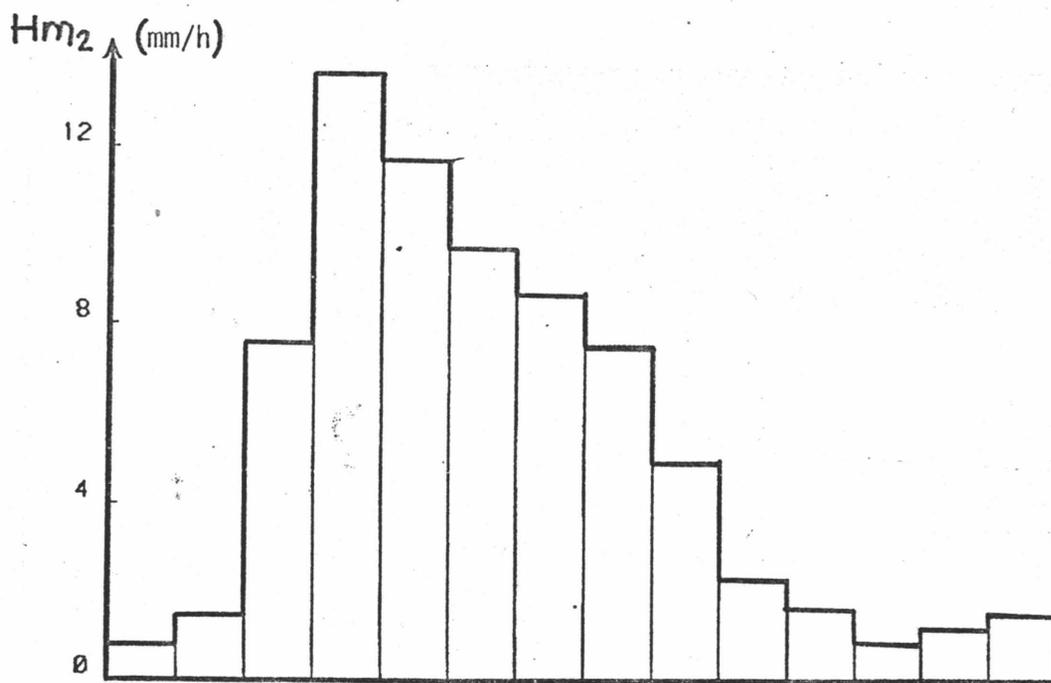
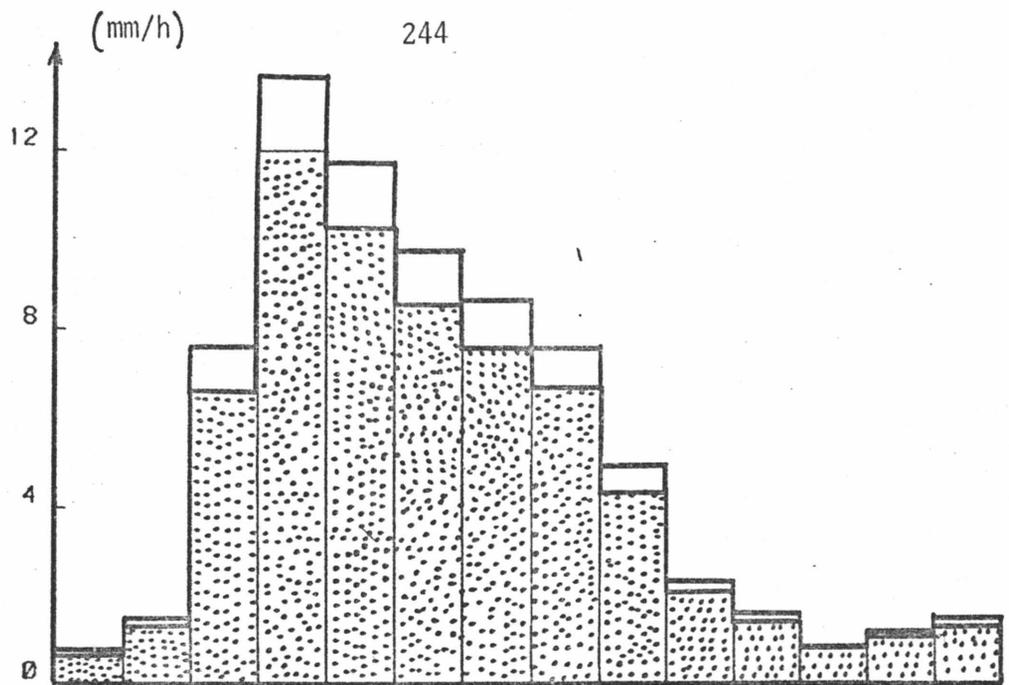
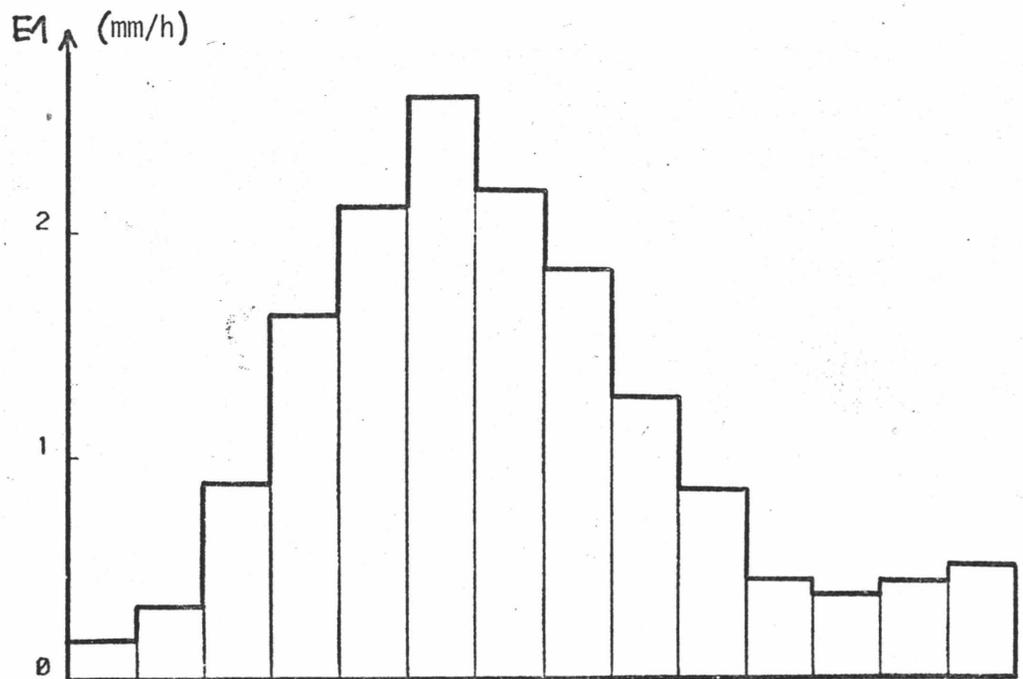


Figure 190 : Hyetogramme moyen approximé sur les seuls postes retenus pour la modélisation (on note Hm2)



E

figure 191 : Superposition des hyétogrammes Hm1 et Hm2  
 (Hm1 en foncé)  
 (cf. pour comparaison : Chpt V, § 5.1., fig. 150 et 152)



E

figure 192 : Graphe des écarts moyens approximation/mesure à chaque pas de temps, calculés sur tous les postes en fonctionnement (note E1)

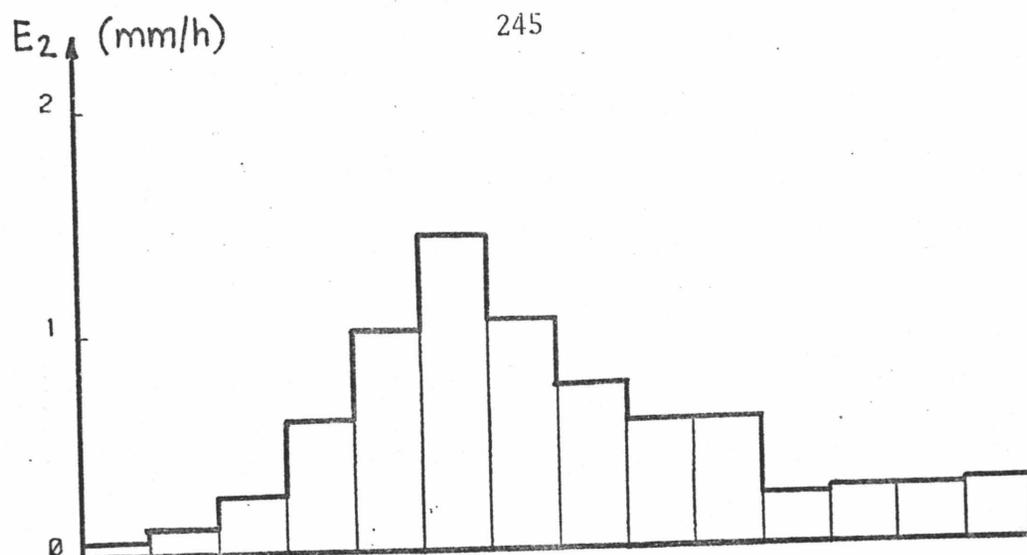


figure 193 : Graphe des écarts moyens approximation / mesure à chaque pas de temps, calculés sur les seuls postes retenus pour la modélisation (noté E2)

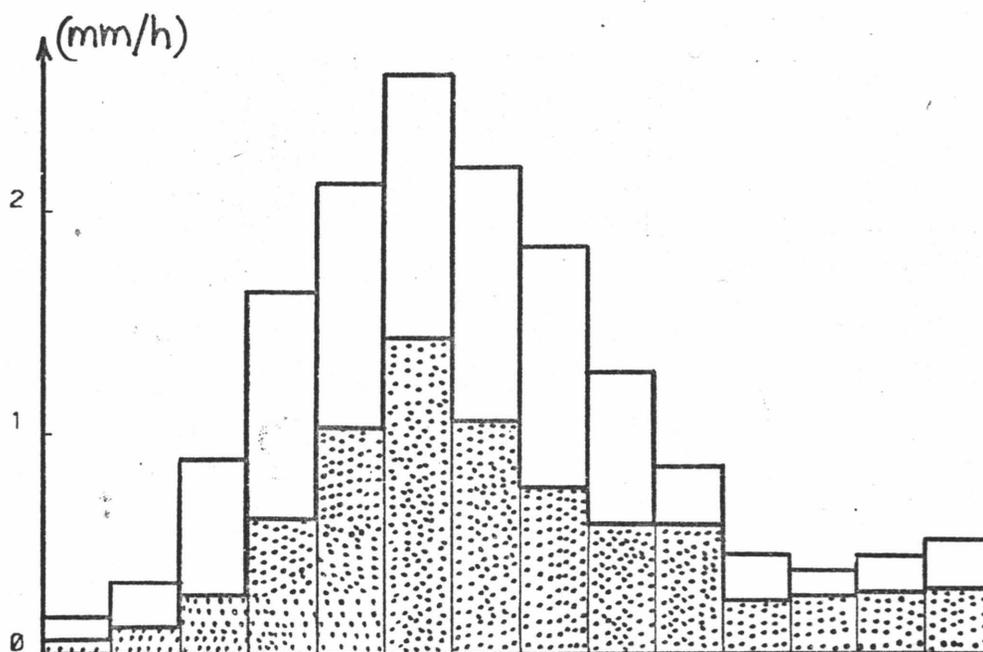


figure 194 : Superposition des graphes E1 et E2 (E2 en foncé)

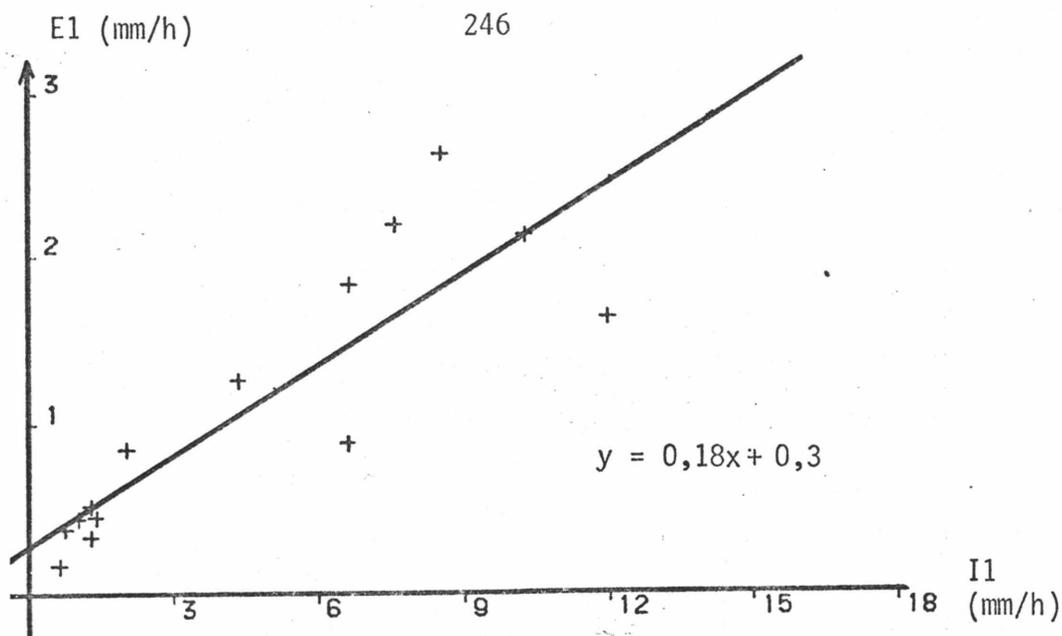


figure 195 : Graphe de E1 en fonction de I1 (tous les postes comptent)  
 Erreur moyenne d'approximation : 0,3 mm/h

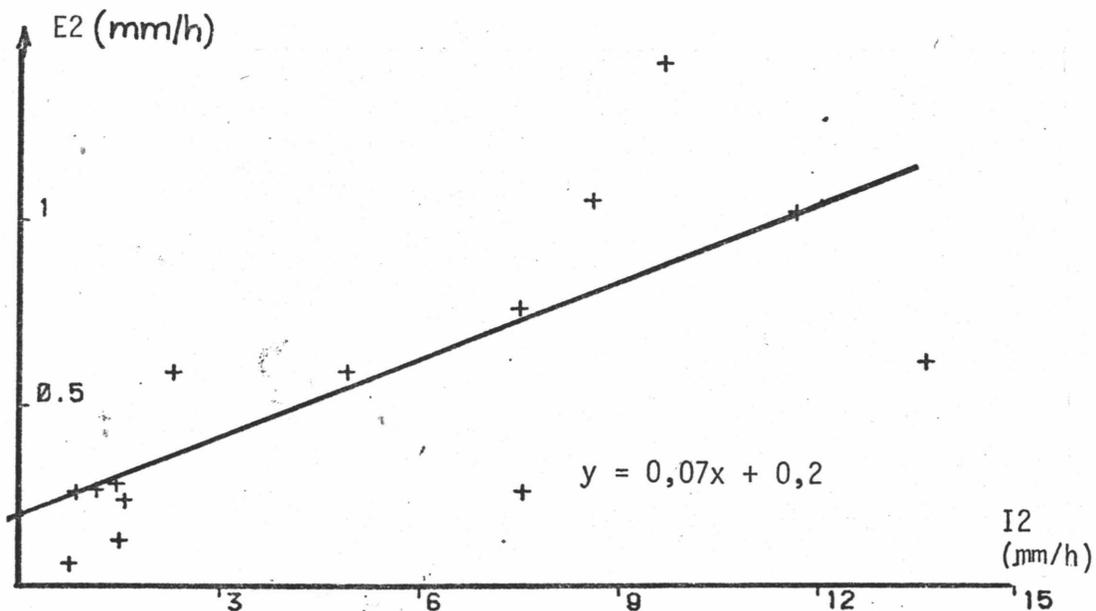


figure 196 : Graphe de E2 en fonction de I2 (seuls comptent les postes retenus pour la modélisation)  
 Erreur moyenne d'approximation : 0,2 mm/h  
 (cf. pour comparaison : Chpt V, 5.1., fig. 151 et 152)

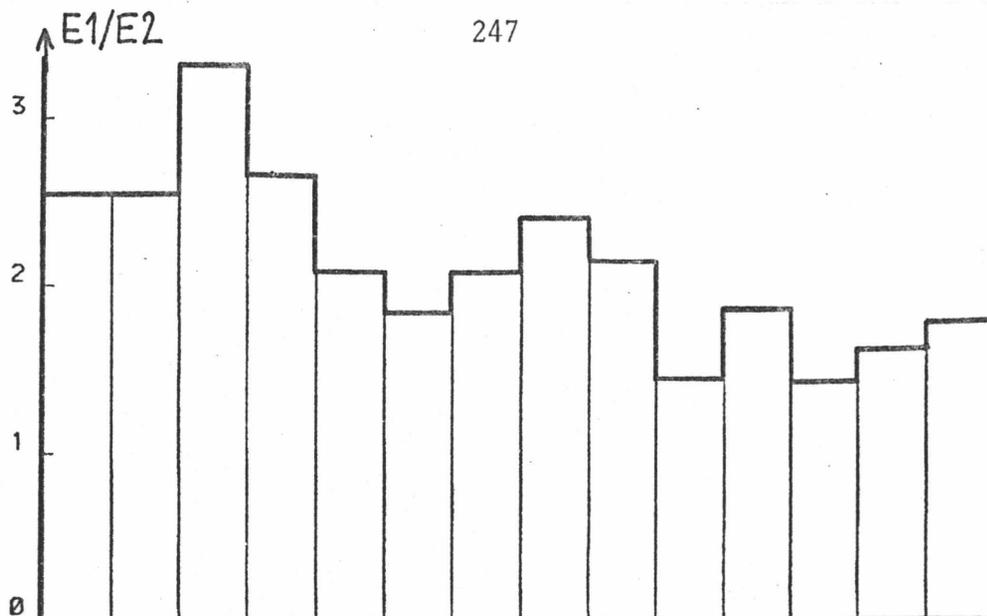


figure 197 : Graphe du rapport E1 / E2 à chaque pas de temps

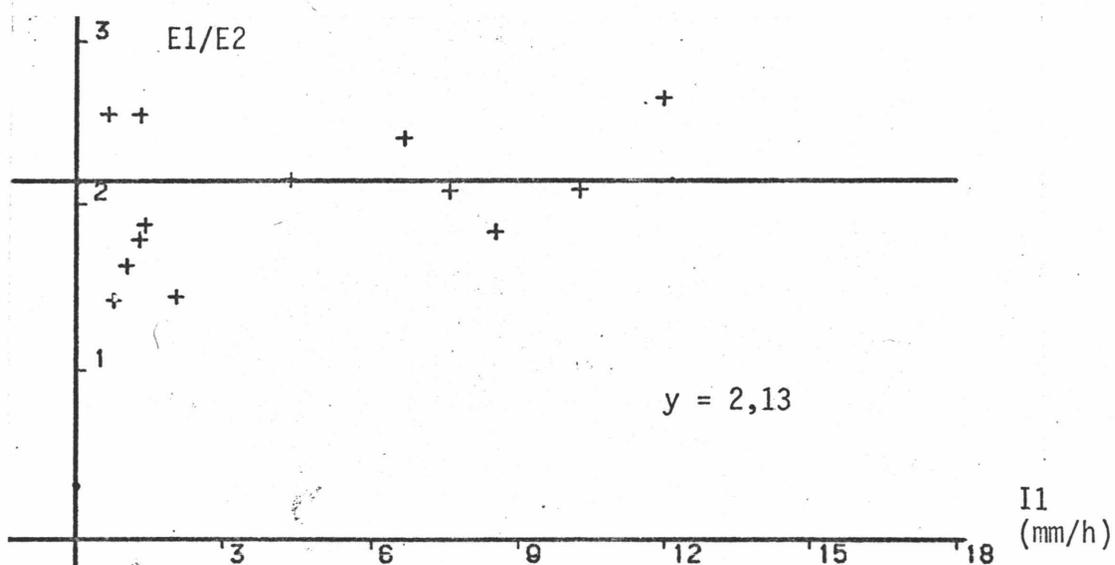


figure 198 : Graphe de E1 / E2 en fonction de I1

L'erreur moyenne d'approximation est : 0,4 mm/h

La dispersion des valeurs relativement grande confirme l'impression première d'une relative indépendance entre le rapport E1 / E2 et l'intensité moyenne approximée.

L'intérêt de ce type de traitement :

Les résultats obtenus permettent de juger d'une part l'aptitude du modèle à reproduire l'information qui lui a servi de base mais aussi son aptitude à reproduire l'information manquante (postes occultés).

Or, ces caractéristiques dépendent, a priori, du nombre de fonctions de base, de leur nature, de la proportion d'informations manquantes et du pas de temps. Les comparaisons entre les résultats obtenus pour des variations de ces différents paramètres, nous permettront de mieux comprendre les rapports objet - mesure - modèle et d'aborder avec quelques espoirs de réussite les questions concernant par exemple la densité requise du réseau de mesures pour une bonne représentation de l'objet au sens des critères retenus (laquelle dépend certainement du pas de temps).

5.4. Etude des coefficients de  $H = H(X,Y)$  en fonction du pas de temps

Le principe de cette modélisation consiste, nous l'avons vu (cf. : Chpt IV, § 2.4.), à formuler l'intensité cherchée au point de coordonnées  $(x,y)$  sous forme :

$$(70) \quad I_j(x,y) = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \phi_i(x,y)$$

L'idée qui sous-tend le traitement proposé consiste à examiner s'il est possible d'exprimer le coefficient  $\alpha_{ij}$  de la  $i^{\text{ème}}$  fonction de base  $\phi_i$ , au pas  $j\Delta t$  comme une fonction du temps.

$$(71) \quad \alpha_{ij} = \psi_i(j\Delta t)$$

d'où :

$$(72) \quad I(x,y,t) = \sum_{i=1}^n \psi_i(t) \cdot \phi_i(x,y)$$

$n$  : nombre de fonctions de base

$$(73) \quad I(x,y,t) = \langle \psi(t) \cdot \phi(x,y) \rangle \quad \text{avec}$$

$\psi(t)$  : fonction de  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n \mid (\psi_i(t))$

$\phi(t)$  : fonction de  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n \mid (\phi_i(x,y))$

$\langle . \rangle$  exprime le produit scalaire dans  $\mathbb{R}^n$ .

Cette dernière formulation est très séduisante en ce qu'elle exprime  $I(x,y,t)$  de manière très condensée, et suggère une indépendance entre les variables temps et espace (indépendance souvent prise comme hypothèse dans les modèles de distributions surfaciques [35] ...).

Le traitement consiste, dans un premier temps, à représenter, pour chacun des coefficients  $\alpha_i$ , ses variations en fonction du pas de temps.

Dans une deuxième étape, on cherche à approximer ces valeurs par une fonction continue dont le nombre et la nature des fonctions de base sont déterminés par l'utilisateur.

Ci-après, nous présentons deux exemples de graphe des  $\alpha_i$  suivant les pas de temps, suivant les spécifications de la modélisation.

Exemple 1 (fichier 18).

1) Liste des 7 postes retenus pour obtenir l'équation de lame :

SAINT-PRIEST : 3

PIERRE-BÉNITE : 6

GENAS : 10

MIONS : 12

SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14

SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15

COLLONGES : 19

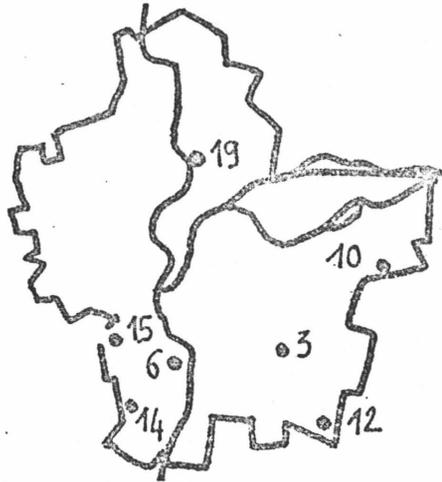


figure 199 : Carte des emplacements

2) Pas de temps de calcul retenu : 6 minutes

3) Liste des fonctions de base retenues pour définir l'approximante :

$$\phi_1(x,y) = \text{cste}$$

$$\phi_4(x,y) = x^2$$

$$\phi_2(x,y) = x$$

$$\phi_5(x,y) = xy$$

$$\phi_3(x,y) = y$$

Graphes des valeurs obtenues pour les 3 premiers coefficients de fonctions de base :

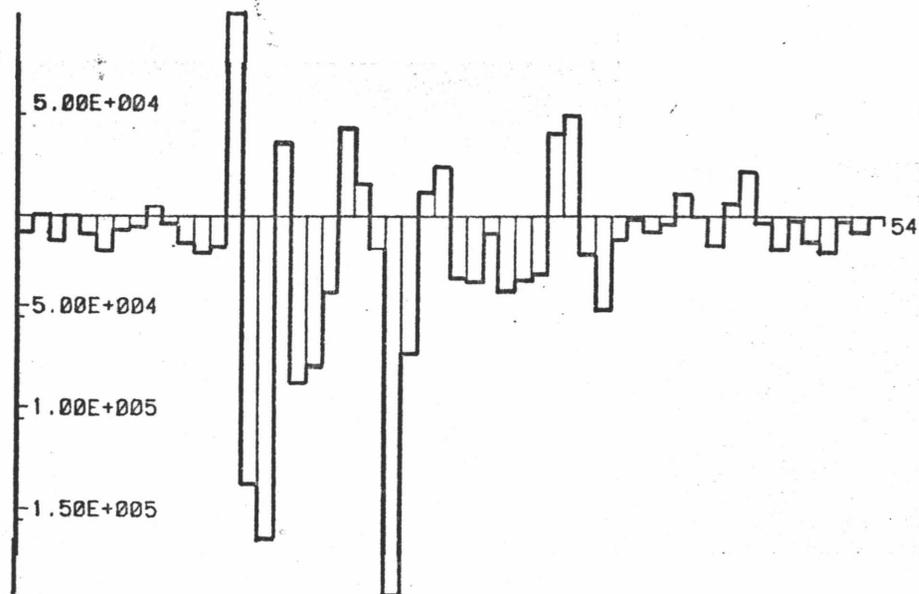


figure 200 : Graphe du coefficient  $\alpha_1$  de  $\phi_1(x,y)$

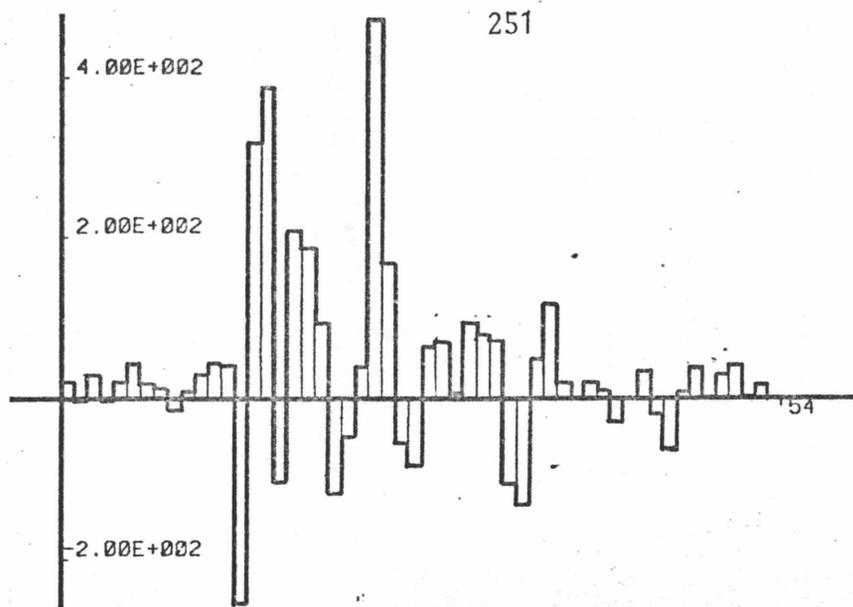


figure 201 : Graphe du coefficient  $\alpha_2$  de  $\phi_2(x,y)$

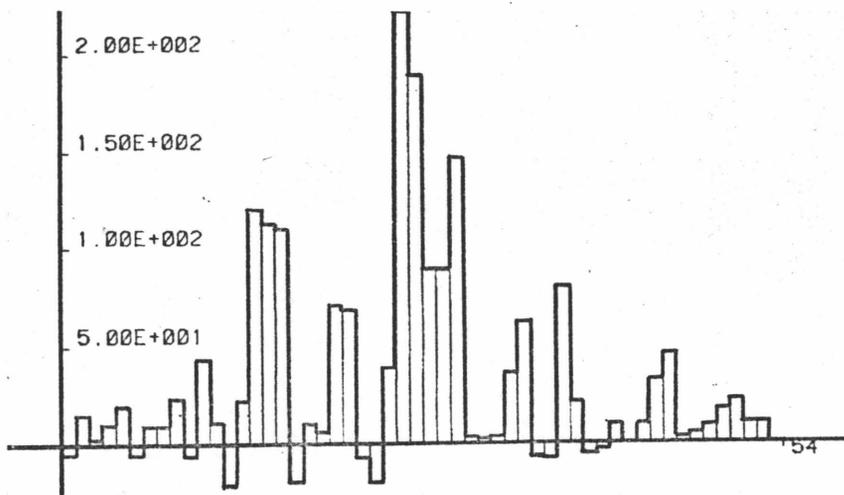


figure 202 : Graphe du coefficient  $\alpha_3$  de  $\phi_3(x,y)$

Exemple 2 (fichier 19)

1) Liste des 7 postes retenus pour le calcul de l'équation de lame.

SAINT-PIERST : 3  
PIERRE-BÉNITE : 6  
MIONS : 12  
SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14  
SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15  
COLLONGES : 19  
CROIX-LUIZET : 24

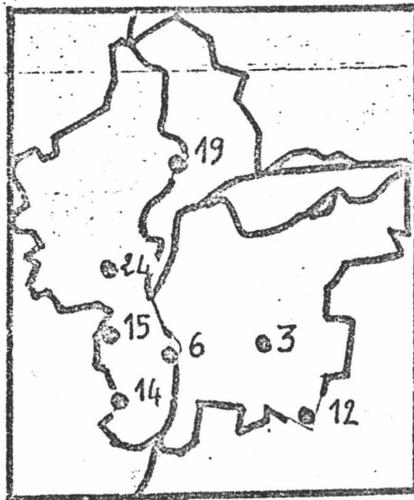


figure 203 : Carte des emplacements

2) Pas de temps de calcul : 24 minutes

Les données brutes ont été moyennées sur un pas de 48 minutes avant de recalculer par interpolation les valeurs sur 24 minutes, comme données - entrées pour la modélisation (ie pas de scrutation : 48 minutes ; pas d'interpolation : 24 minutes).

3) Liste des 4 fonctions de base retenues pour définir l'approximante :

$$\phi_1(x,y) = \text{cste}$$

$$\phi_3(x,y) = x$$

$$\phi_2(x,y) = xy$$

$$\phi_4(x,y) = y^2$$

Graphes des coefficients  $\alpha_i$  de  $\phi_i(x,y)$  pour tous les pas de temps de calcul ( $i = 1,4$ ).

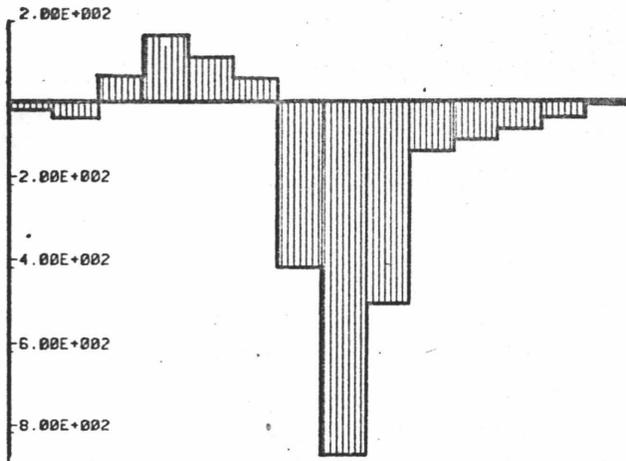


figure 204 : Graphe de  $\alpha_1$

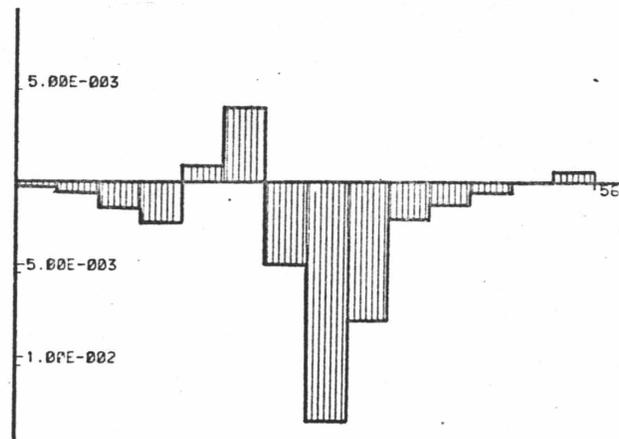


figure 205 : Graphe de  $\alpha_2$

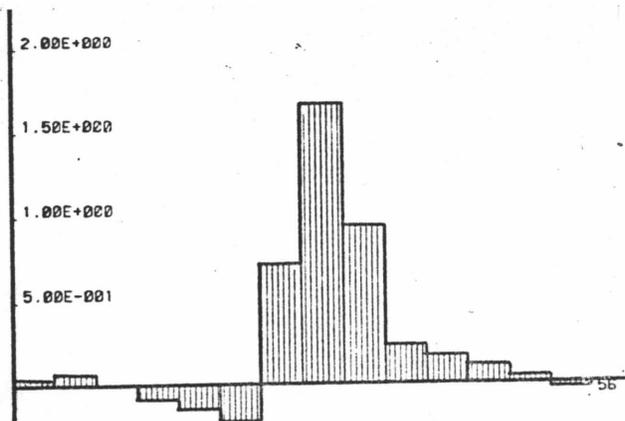


figure 206 : Graphe de  $\alpha_3$

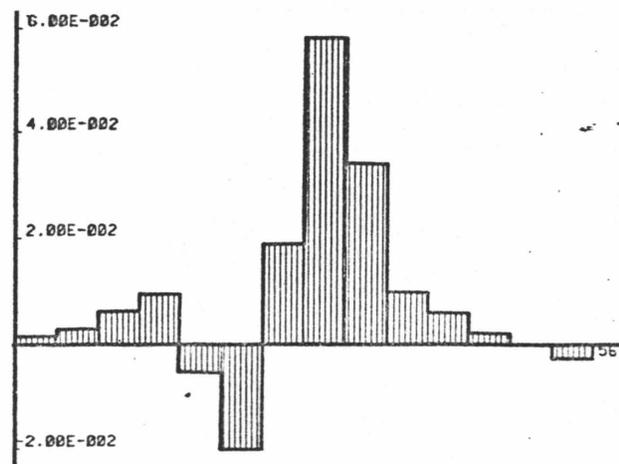


figure 207 : Graphe de  $\alpha_4$

On remarque que les résultats obtenus concernant l'évolution des coefficients  $\alpha_i$ , en fonction du temps, conduisent, selon l'exemple, à des conclusions différentes.

Dans l'exemple 1, où le pas de temps est 6 minutes, les graphes obtenus peuvent être considérés comme des graphes de bruit, du moins, il semble ridicule de vouloir approximer ces fonctions en escalier pour une fonction.

Dans l'exemple 2, où le pas de calcul est 24 minutes (à partir des données brutes cumulées sur 48 minutes), on peut définir une évolution relativement régulière des valeurs, susceptible d'être approximée relativement bien par une fonction simple.

Exemple :

Nous donnons ci-dessous un exemple d'approximation de  $\alpha_1(t)$ , défini dans la modélisation présentée dans l'exemple 2.

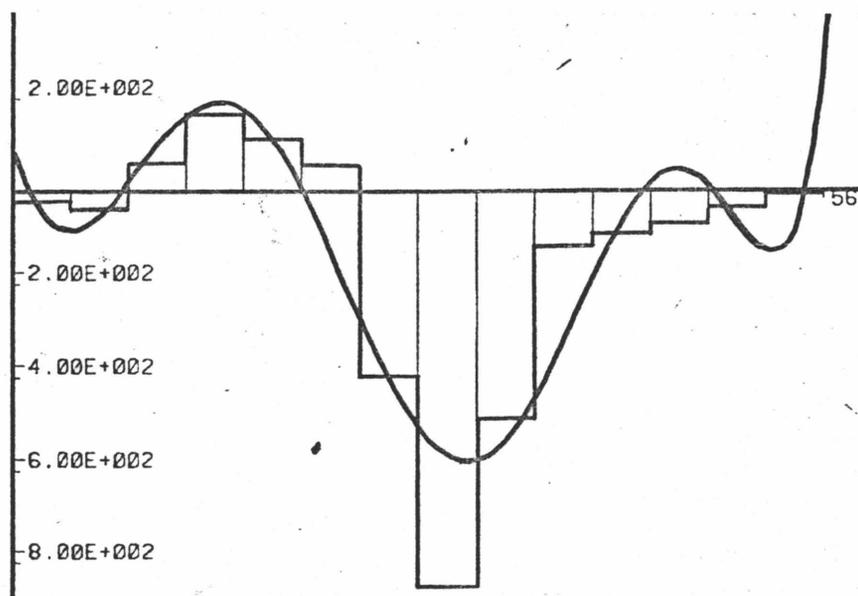


figure 208 : Approximation de  $\alpha_1(t)$  [exemple 2]

8 fonctions de base :

$$\psi_1(x) = 1$$

$$\psi_2(x) = x$$

$$\psi_3(x) = x^2$$

$$\psi_4(x) = x^3$$

$$\psi_5(x) = x^4$$

$$\psi_6(x) = x^5$$

$$\psi_7(x) = x^6$$

$$\psi_8(x) = x^7$$

La valeur absolue de l'aire différentielle est :  $5,15 \cdot 10^3$

Conclusion sur l'étude des  $\alpha_i$  en fonction du pas de temps.

Pour tous les coefficients  $\alpha_i$ , on constate que pour un pas de temps réduit, la morphologie des  $\alpha_i(t)$  suivant le temps est proche d'un bruit, tandis qu'une évolution est perceptible lorsque l'on choisit un pas de temps d'intégration allongé. Cela concorde avec nos précédentes allégations concernant une tendance à la désorganisation du processus lorsqu'on l'étudie trop finement (échelle inadéquate).

Ce type de constatation nécessite toutefois une confirmation par une étude plus systématique de l'influence des paramètres du modèle (nombre et nature des fonctions de base ...) et sur un échantillon représentatif de séquences pluvieuses intéressantes.

Une étude parallèle menée sur la sensibilité des modèles de transformation pluie - débit, vis-à-vis de la valeur du pas d'intégration du phénomène pluvieux, nous permettrait de décider, en connaissance de cause, de l'éventuel intérêt d'une démarche de ce type, en dehors des considérations strictes sur la véritable nature de la pluie.

### 5.5. Calcul de la trajectoire (cf. : chpt IV § 3.)

Ci-dessous, on donne 3 exemples de calcul de trajectoire, suivant différentes modélisations mises en oeuvre.

#### Exemple 1 :

Modélisation par recherche d'une équation de lame :  $H(x,y)$  - (fichier 18)

#### 1) Liste des postes retenus pour la modélisation

SAINT-PRIEST : 3  
 PIERRE-BÉNITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12

SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14  
 SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15  
 COLLONGES : 19

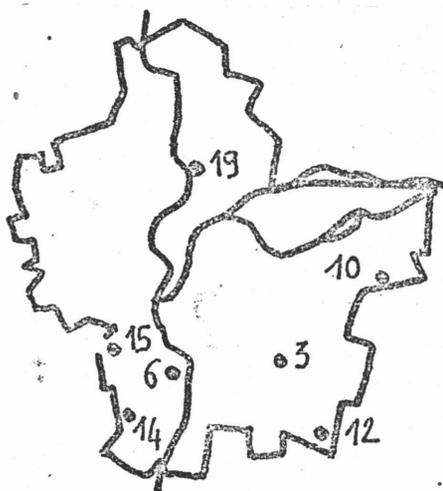


figure 209 : Emplacement des postes

#### 2) Liste des 5 fonctions de base choisies :

$$\phi_1(x,y) = 1$$

$$\phi_3(x,y) = y$$

$$\phi_5(x,y) = xy$$

$$\phi_2(x,y) = x$$

$$\phi_4(x,y) = x^2$$

#### 3) Pas de temps de calcul : 6 mn ; nombre total de pas de calcul : 54

On rappelle que le principe de calcul consiste à travailler sur des lames d'eau seuillées et en définir le barycentre pondéré dont les positions successives déterminent la trajectoire. Dans les trois cas présentés, le seuil de lame est pris égal à une intensité de 10 mm/h, ce qui signifie que seules les surfaces pour lesquelles l'intensité moyenne au pas de temps considéré dépasse 10 mm/h, sont prises en considération. Il est certain que pour certains pas de temps, le calcul n'a aucun sens (si en tout point considéré l'intensité est inférieure à 10 mm/h), on aura donc sur l'intervalle de temps complet considéré, possiblement plusieurs trajectoires définies.

Dans le cas de l'exemple 1, on a deux grandes séquences définissant deux trajectoires successives :

- séquence 1 du pas n° 9 au pas n°19 inclus, trajectoire bleue
- séquence 2 du pas n°21 au pas n°31 inclus, trajectoire verte

On rappelle qu'il y a 54 pas de calcul.

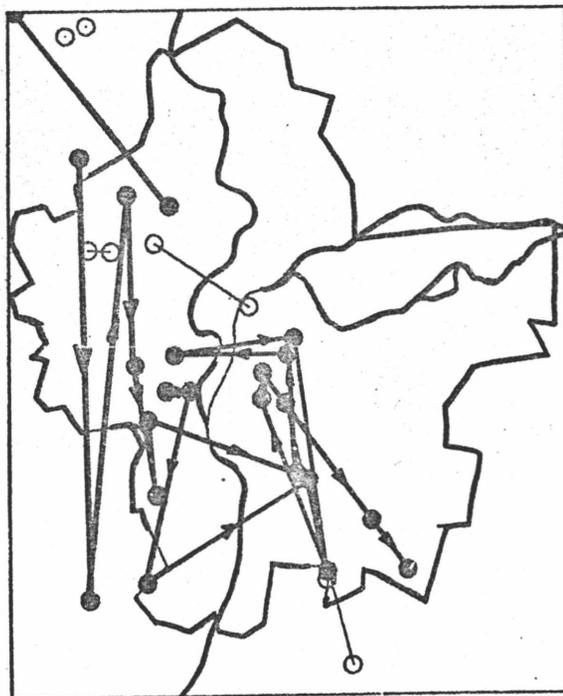


figure 210

Exemple 2 :

Modélisation par recherche d'une équation de lame  $H(x,y)$  - (fichier 19).

## 1) Liste des 7 postes retenus pour la modélisation

SAINT-PRIEST : 3

PIERRE-BÉNITE : 6

MIONS : 12

SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14

SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15

COLLONGES : 19

CROIX-LUIZET : 24

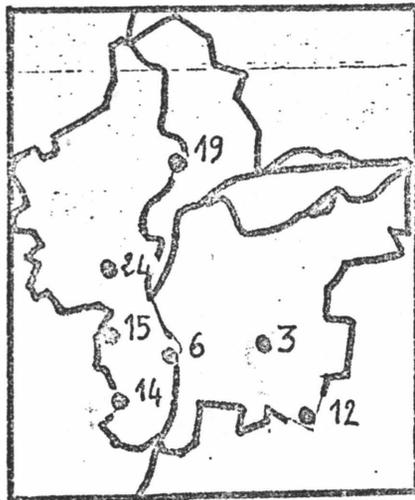


figure 211 : Emplacement des postes

## 2) Liste des 4 fonctions de base choisies pour définir l'approximante :

$$\phi_1(x,y) = 1$$

$$\phi_3(x,y) = x$$

$$\phi_2(x,y) = xy$$

$$\phi_4(x,y) = y^2$$

3) Pas de scrutation : 48 minutes

Pas d'interpolation : 24 mn      nombre total de pas de calcul : 14

Le seuil est pris à 10 mm/h.

On obtient une séquence unique sur laquelle une trajectoire est définissable, entre le pas n° 3 et le pas n° 9 inclus (14 pas au total).

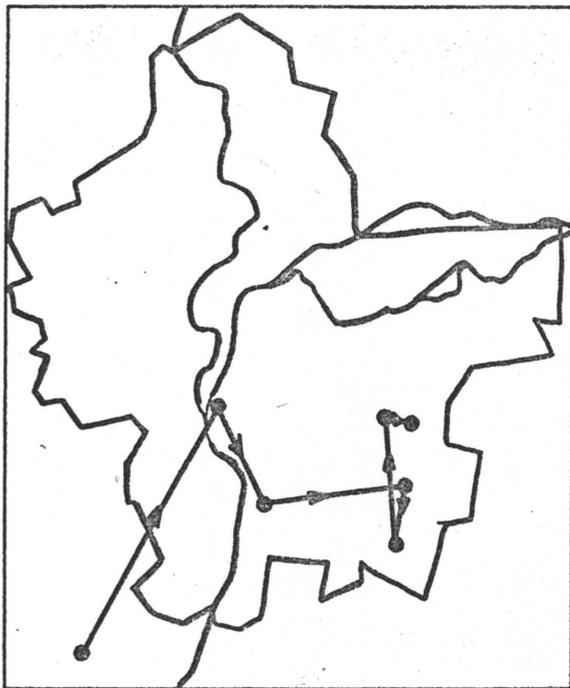


figure 212

Exemple 3 :

Modélisation par pondération simple sur les distances (fichier 20)

1) Liste des 8 postes retenus pour la modélisation

SAINT-PRIEST : 3  
 PIERRE-BÉNITE : 6  
 GENAS : 10  
 MIONS : 12

SAINT-GENIS-LAVAL (CHARLY) : 14  
 SAINT-GENIS-LAVAL (PRESSIN) : 15  
 COLLONGES : 10  
 CROIX-LUIZET : 24

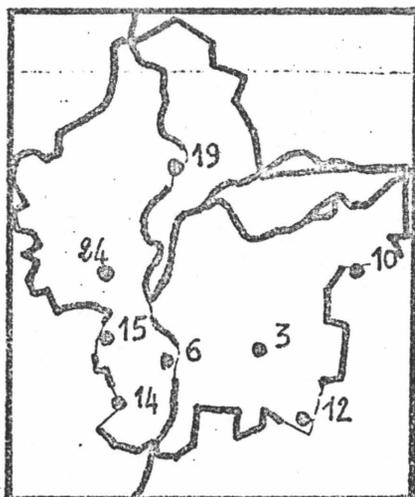


figure 213 : Emplacement des postes

2) Coefficient de pondération:  $\alpha = 2$

Distance d'influence : 10 kilomètres

Quadrillage : 10 x 10

3) Pas de scrutation : 48 mn

Pas d'interpolation : 24 mn    nombre total de pas de calcul : 14

Le seuil est pris à 10 mm/h

On obtient une séquence unique sur laquelle la trajectoire est définissable, entre le pas n° 4 et le pas n° 9 inclus (14 pas au total).

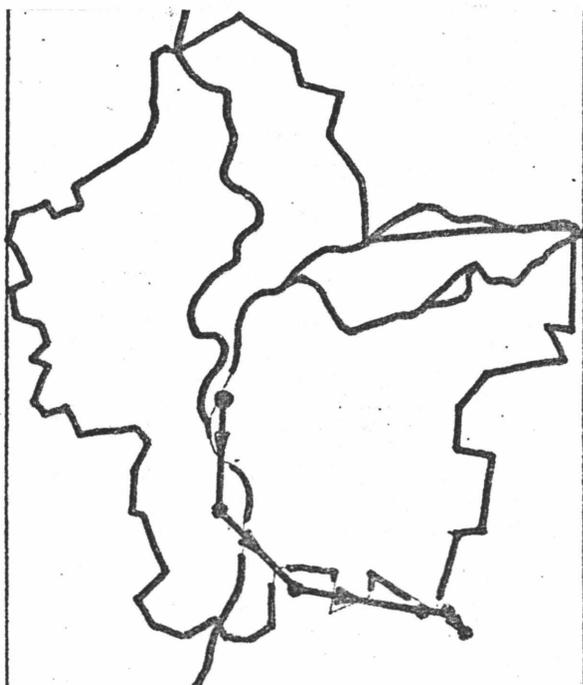


figure 214

Quelques réflexions à propos des résultats obtenus.

Dans les deux derniers cas, où l'intensité donnée toutes les 24 minutes est interpolée à partir des valeurs de mesure cumulées sur 48 minutes, on obtient une trajectoire qui, sur l'intervalle de temps où elle est définie, semble régulière.

Les deux modélisations indiquent bien un déplacement Ouest-Est, comme d'ailleurs les films montés à partir des représentations ponctuelles nous l'avaient laissé pressentir. Pourtant, dans le premier cas, on observe une dérive vers le Nord. Les insuffisances du réseau de mesure (8 postes) doivent être tenues pour responsables de ces divergences, en l'absence d'information plus complète.

Si on augmente le seuil, très rapidement, la notion de trajectoire perd sa signification. Ainsi, pour le pas d'interpolation de 24 minutes, le barycentre n'est plus défini que pour 3 pas sur 14 qu'en compte l'événement.

Si maintenant on examine la trajectoire donnée pour un pas de 6 minutes, la dérive globale Ouest-Est est rendue, mais la trajectoire est très irrégulière. En fait, nous devrions dire les trajectoires, puisque le barycentre n'est pas défini sur une séquence ininterrompue, mais sur plusieurs séquences. Il semble que la définition correcte d'une trajectoire relativement régulière passe par l'établissement d'un équilibre entre la valeur du seuil et celle du pas de temps, définition relative donc, et dont il faudra ensuite mesurer l'intérêt au sens des modèles. Aussi bien, les considérations sur l'irrégularité de l'objet - pluie nous ont plus d'une fois obligé à reporter la valeur du modèle relativement à l'échelle d'observation choisie.

A priori, il semble plus approprié de baisser la valeur du seuil. D'une part, la trajectoire sera ainsi définie sur un intervalle de temps significatif à l'échelle du phénomène, mais surtout la définition même de la "position de la lame" semble impliquer que celle-ci forme une tache continue sur la zone d'observation. Il est, en fait, plus difficile d'interpréter la position en terme de barycentre si celui-ci est le barycentre de plusieurs taches isolées les unes des autres.

Ces réflexions sont plus ou moins en contradiction avec la démarche classique en hydrologie, qui associe la position de la lame à un épicentre - ce qui implique, dans les termes de notre formulation, une valeur du seuil, la plus élevée possible - contradiction d'autant plus incontournable que nous savons que l'hypothèse d'une distribution spatiale simple des intensités n'est pas une hypothèse réaliste.

Seule une utilisation systématique du modèle de calcul de trajectoire nous permettra de définir dans l'avenir quel type de résultats il permet d'obtenir et à quelles conditions, et si ces résultats peuvent servir dans l'élaboration d'un modèle synthétique de la pluie.



C

C

CONCLUSION

Depuis dix ans, un effort important a été consenti pour constituer des outils permettant d'obtenir une meilleure appréhension des phénomènes mis en jeu dans le réseau d'assainissement, lors d'une averse.

En particulier, en collaboration entre les services techniques de la CO.UR.LY., le Laboratoire Méthodes de l'I.N.S.A. et la société d'informatique communale I.C.A.R.E., un outil de simulation de la transformation pluie - débit sur l'ensemble du réseau de la CO.UR.LY. a été conçu qui s'appelle SERAIL.

Avec l'apparition de ce nouvel outil, une description de la pluie (pluie synthétique modifiée) telle qu'elle a jusqu'alors été pratiquée, devient inadéquate. Notamment est remise en question la signification du concept de période de récurrence pour un phénomène, concernant les bassins de grande étendue ; période de récurrence qui reste pourtant un des concepts clef sur lequel se fondent les textes législatifs qui régissent la construction des réseaux et le règlement des litiges en cas de dysfonctionnement ayant entraîné des dommages.

En effet, pour les bassins de grande étendue, le flux pluvieux ne peut plus être caractérisé simplement par un seul paramètre (intensité moyenne durant la période intense ...) auquel les autres seraient fortement corrélés. Notamment, le problème du déplacement des flux sur le bassin ne peut plus être négligé.

Avant de tenter de résoudre ce problème très compliqué de la génération de la pluie statistique de récurrence connue sur le bassin de la CO.UR.LY. (600 km<sup>2</sup>), nous avons jugé qu'il était nécessaire, dans un premier temps du moins, d'être capable d'étudier certains événements pluvieux réellement apparus sur la CO.UR.LY. et de les décrire de manière suffisamment fine pour que les modèles de simulation en aval tournent avec le maximum d'efficacité. Nous avons appelé ce type de démarche, une démarche historique singulière. Même si elle ne permet pas directement de définir les périodes de récurrence, ce type de démarche est utile lorsque l'on veut faire du diagnostic de réseau. On pourra définir, par exemple, quelles seraient les modifications du réseau qui sont les plus efficaces vis-à-vis de tel ou tel événement repéré, pour avoir produit des dysfonctionnements.

Pour réaliser cette description fine d'une pluie réelle, il a fallu lancer une vaste expérimentation - installation de 30 postes de mesure toutes les 6 minutes -.

Un système informatique de dépouillement et stockage des 216 000 données mensuelles a été réalisé sur micro-ordinateur.

Concernant le traitement de ces données, les principaux impératifs sont les suivants :

- obtenir l'information, sous une forme utile aux techniciens en assainissement (calcul de lame ...), selon divers modèles ;
- avoir des moyens de valider ces modèles ;
- obtenir le plus qu'il est possible des représentations des résultats obtenus, pour un juger plus intuitif, plus qualitatif.

Une des qualités principales de ce système est la souplesse et la rapidité de mise en route des différents traitements, même si, en contrepartie, le matériel utilisé ne permet pas, pour des raisons de temps - calcul, la mise en forme de modèles trop sophistiqués. Sa structure modulaire lui permet d'autre part, d'intégrer d'autres traitements au fur et à mesure que les perspectives de recherche se dégageront. Nous avons déjà cité un certain nombre

de traitements susceptibles d'être ajoutés, en particulier d'autres modèles de calcul de lame ou des études de correspondance temps - espace.

Ceci devrait déboucher sur une caractérisation des pluies sur la CO.UR.LY. susceptible de nous permettre de reposer le problème de la génération de pluies statiques. Plus généralement, une méthodologie de recherche est dégagée qui pourra être appliquée ailleurs. En parallèle avec les recherches menées sur les autres phénomènes mis en jeu dans les réseaux d'assainissement, des progrès importants pourront être réalisés concernant la maîtrise des processus et les méthodes employées pour y arriver.

ANNEXES

## ANNEXE 1 :

Courbes intensité - durée - fréquence : Valeur des coefficients régionalisés pour la formule de MONTANA.

La circulaire interministérielle de 1977 relative au calcul des débits d'eau pluviale a choisi la formule type MONTANA :

$$(1) i_M(F,T) = a(F) T^{b(F)}$$

F : fréquence

T : durée

$i_M$  : intensité moyenne maximale sur la durée T de fréquence F

La France a été divisée en trois zones géographiques. On obtient le tableau suivant pour les valeurs de a et b.

Périodes de retour T	Paramètres		Durée t (mn)			
	a(T)	b(T)	15	30	60	120
<u>REGION I</u>						
10 ans	5.9	- 0.59	18	24	31.5	42
5 ans	5.0	- 0.61	14.5	19	24.5	32.5
2 ans	3.7	- 0.62	10.5	13.5	17.5	23
1 an	3.1	- 0.64	8	10.5	13.5	17.5
<u>REGION II</u>						
10 ans	6.7	- 0.55	22.5	31	42.5	58
5 ans	5.5	- 0.57	17.5	23.5	32	43
2 ans	4.6	- 0.62	13	17	22	28.5
1 an	3.5	- 0.62	10	12.5	16.5	21.5
<u>REGION III</u>						
10 ans	6.1	- 0.44	28	41	60.5	89
5 ans	5.9	- 0.51	22	31	44	61.5
2 ans	5.0	- 0.54	17.5	24	33	45
1 an	3.8	- 0.53	13.5	19	26	36



ANNEXE 2 :Comparaison d'une pluie synthétique type CHICAGO et type NORMAND.

La pluie est une pluie décennale de durée deux heures, discrétisée au quart d'heure et centrée, sur la période intense, en 15 minutes.

On se place en région I, donc :

$$(1) \quad I = 5,9 t^{-0,59}$$

I : intensité (en mm/mn)

t : durée en mn

Pour la méthode type CHICAGO en pratique, on calcule, pour les différentes durées, la valeur de l'intensité moyenne, par l'équation de MONTANA, puis on centre cette valeur sur l'instant de pointe choisi.

On obtient les valeurs :

Durée	Intensité moyenne maximale (mm/h)	Hauteurs précipitées (mm)	Intensités du hyétogramme
15 mn	72	18	72
45 mn	37	28	20
75 mn	28	35	13
105 mn	23	40	10
120 mn	21	42	9

Pour la méthode type NORMAND, la période de retour n'est pas la même pour les différentes durées. On a :

$$T(15 \text{ mn}) = 10 \text{ ans} ; T(30 \text{ mn}) = 8,6 \text{ ans} ; T(1 \text{ h}) = 6,1 \text{ ans} ; T(2 \text{ h}) = 3,7 \text{ ans}$$

Les valeurs correspondantes :

Durée	Intensité moyenne maximale (mm/h)	Hauteurs précipitées (mm)	Intensités du hyétogramme
15 mn	72	18	72
30 mn	45	22	18
60 mn	26	26	8
120 mn	14	28	2

Représentation des hyétogrammes obtenus :

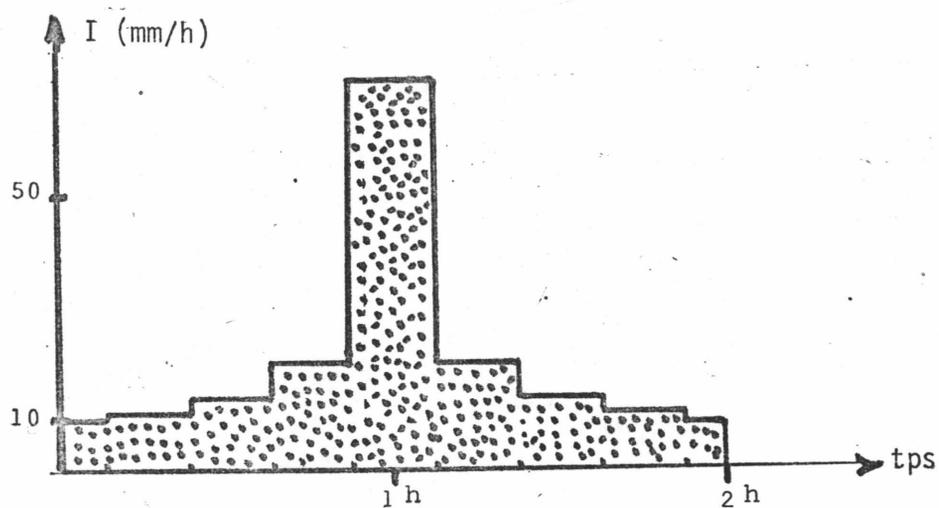


figure II : Pluie de projet décennale type CHICAGO (d'après HEMAIN)

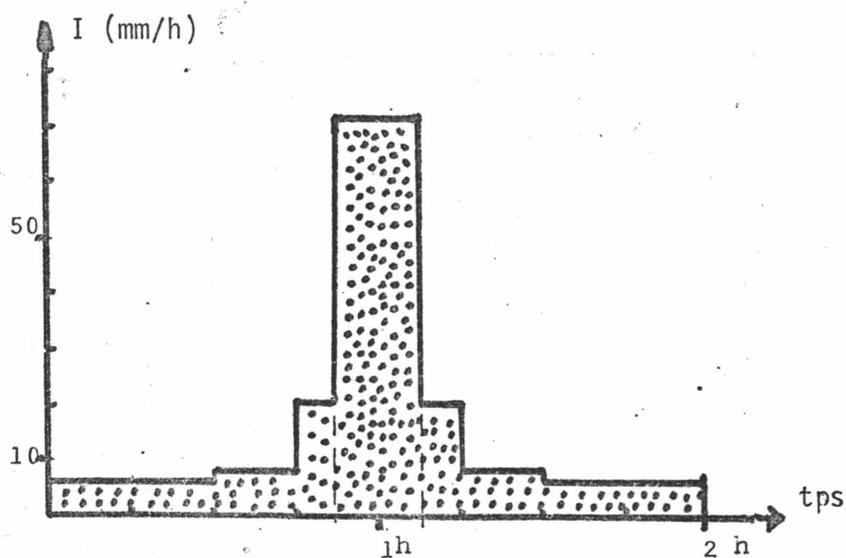


figure III : Pluie de projet décennale type NORMAND (d'après HEMAIN)

ANNEXE 3LISTE DES PROGRAMMES CONTENUS DANS LE DISQUE PLUVIOPROG VERSION 1 :

FICHER Ø : TRANSFERT DE FICHERS DE UNIØ VERS UNI1  
 FICHER ØØ : TRANSFERT DE FICHERS DE UNIØ VERS UNI1  
 FICHER Ø1 : DUPLICATION D'UN DISQUE  
  
 FICHER 1 : LISTE DES PROGRAMMES  
 FICHER 2 : TRANSFERT MINICASSETTE-CASSETTE TEKTRONIX (V1)  
 FICHER 3 : TRANSFERT MINICASSETTE-CASSETTE TEKTRONIX (V2)  
 FICHER 4 : FORMATAGE D'UN DISQUE DONNEES  
 FICHER 5 : LISTE DES PLUVIOS SUPPOSES EN SERVICE  
 FICHER 6 : LISTE DE TOUS LES PLUVIOS PREVUS  
 FICHER 7 : CREATION SUR DISQUE D'UNE BIBLIOTHEQUE  
 FICHER 8 : LISTE DEFINITIVE DES PLUVIOS POUR LE MOIS  
 FICHER 9 :  
 FICHER 1Ø : TRANSFERT SUR DISQUE DES DONNEES (V2)  
 FICHER 11 : VERIFICATION DES DONNEES RENTREES SUR DISQUE  
 FICHER 12 : HISTOGRAMME DES HAUTEURS JOURNALIERES  
 FICHER 13 : CONSTRUCTION DE HYETOGRAMMES EN VUE DU STOCKAGE D'UN EVENEMENT INTERESSANT  
 FICHER 14 : TRANSFERT SUR DISQUE DES DONNEES (V1)  
  
 FICHER 15 : FORMATAGE D'UN DISQUE EVENEMENTS INTERESSANTS  
 FICHER 16 : FORMATAGE D'UN DISQUE "MODELISATION"  
 FICHER 17 : FORMATAGE D'UN DISQUE "INFORMATION PONCTUELLE"  
  
 FICHER 2Ø : TABLEAU DES H TOTAL POUR TOUS LES PLUVIOS  
 FICHER 21 : HISTOGRAMMES SUPERPOSES POUR 2 PLUVIOS  
 FICHER 22 : TOUS LES HISTOGRAMMES A LA MEME ECHELLE  
  
 FICHER 3Ø : CHOISIR UN EPISODE PARMIS CEUX REPERTORIES  
 FICHER 31 : CONSTRUIRE LES HYETOGRAMMES CORRESPONDANTS  
  
 FICHER 4Ø : TRONC COMMUN MODELISATION  
 FICHER 41 : INTERPOLATION SIMPLE PAR LES DISTANCES  
 FICHER 42 : INTERPOLATION CROISEE PAR LES DISTANCES  
 FICHER 43 : EQUATION  $H = H(X,Y)$   
  
 FICHER 46 : TRONC COMMUN REPRESENTATION PONCTUELLE  
 FICHER 47 : REPRESENTATION PLANE PONCTUELLE  
 FICHER 48 : REPRESENTATION PERSPECTIVE PONCTUELLE  
 FICHER 49 : STOCKAGE DE L'INFORMATION PONCTUELLE  
  
 FICHER 5Ø : LEVER LES POINTS DE LA CARTE  
 FICHER 51 : COORDONNEES DES POINTS DE LA CARTE  
 FICHER 52 : COORDONNEES DES PLUVIOS  
 FICHER " NBFICH52" : NOMBRE TOTAL DE PLUVIOS  
 FICHER 53 : TRACER LA CARTE  
 FICHER 54 : MISE A JOUR DES FICHERS PLUVIOS  
  
 FICHER 6Ø : REPRESENTATION FACE CACHEE QUADRILLAGE  
 FICHER 61 : REPRESENTATION FACE CACHEE  $H = H(X,Y)$

LISTE DES FICHIERS CONTENUS SUR LE DISQUE "PLUPRO2"

FICHER 1 : LISTE DES FICHIERS CONTENUS

.....

FICHER 2 : LISTE DES PLUVIOMETRES  
FICHER 3 : COORDONNEES DES PLUVIOMETRES  
FICHER 4 : COORDONNEES DES POINTS DE LA CARTE

.....

FICHER 10 : TRONC COMMUN EXPLOITATION PONCTUELLE  
FICHER 11 : REPRESENTATION PLANE  
FICHER 12 : REPRESENTATION PERSPECTIVE  
FICHER 13 : HYETOGRAMMES  
FICHER 14 : HYETOGRAMMES MOYENS  
FICHER 15 : ETUDE DES DISTANCES D'INFLUENCE

.....

FICHER 20 : TRONC COMMUN EXPLOITATION MODELISATION

FICHER 21 : REPRESENTATION LAME (TYPE 1)  
FICHER 22 : REPRESENTATION LAME (TYPE 2)

FICHER 23 : ETUDE DES COEFFICIENTS DE FONCTIONS DE BASE  
FICHER 24 : ETUDE DES ECARTS APPROXIMANTE/MESURE

FICHER 25 : HYETOGRAMME MOYEN PARTIE 1 (TYPE 1)  
FICHER 26 : HYETOGRAMME MOYEN PARTIE 1 (TYPE 2)  
FICHER 27 : HYETOGRAMME MOYEN TRAITEMENT PROPREMENT DIT

FICHER 28 : DEPLACEMENT (TYPE 1)  
FICHER 29 : DEPLACEMENT (TYPE 2)

.....

FICHER 30 : REPRESENTATION PLANE ZONE PLUVIEUSE (TYPE 1)  
FICHER 31 : REPRESENTATION PLANE ZONE PLUVIEUSE (TYPE 2)

.....

ANNEXE 4 : Organisation des fichiers sur les disques-mois (sur lesquels sont transférées les données recueillies in situ).

Pour chaque pluviomètre, deux fichiers sont créés.

- Un fichier données (data), sur lequel sont enregistrées toutes les valeurs de hauteur d'eau non nulles dans l'ordre où elles apparaissent lors de la relecture (à savoir l'ordre antichronologique).

valeurs enregistrées	1	2	10	12	20	15	5	1	2	4	3	2	1	...	inscrit sur disque
numéro d'enregistrement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...	implicite

Supposons que l'on opère sur le pluviomètre 1, la première valeur enregistrée correspond effectivement à la dernière valeur non nulle enregistrée pour le mois et le pluviomètre considéré.

- Il est nécessaire, maintenant, de situer chronologiquement l'épisode pluvieux décrit ; pour ce faire, on crée un deuxième fichier, appelé fichier pointeur.

Schéma :

E 9	P 1	P 2	
			1
			2
			⋮
inscrit sur le fichier			implicite

La variable E9 permet de dater le début de chaque "pluie" (au sens défini ci-avant).

Les variables P1 et P2 repèrent le numéro dans le fichier données du dernier et du premier enregistrement (au sens chronologique), pour cette pluie.

La quatrième colonne implicite (fichier à accès aléatoire) permet de numéroter les pluies.

E9 représente exactement le nombre de pas de 6 minutes écoulés à partir de l'origine des temps (1er jour du mois à 00 h 00 mn), jusqu'au début de la pluie.

Deux autres fichiers sont nécessaires pour gérer le fichier-données, et le fichier-pointeur.

Ce sont :

a) le fichier "nombre-pointeur" qui enregistre le nombre de valeurs stockées dans le fichier-pointeur ;

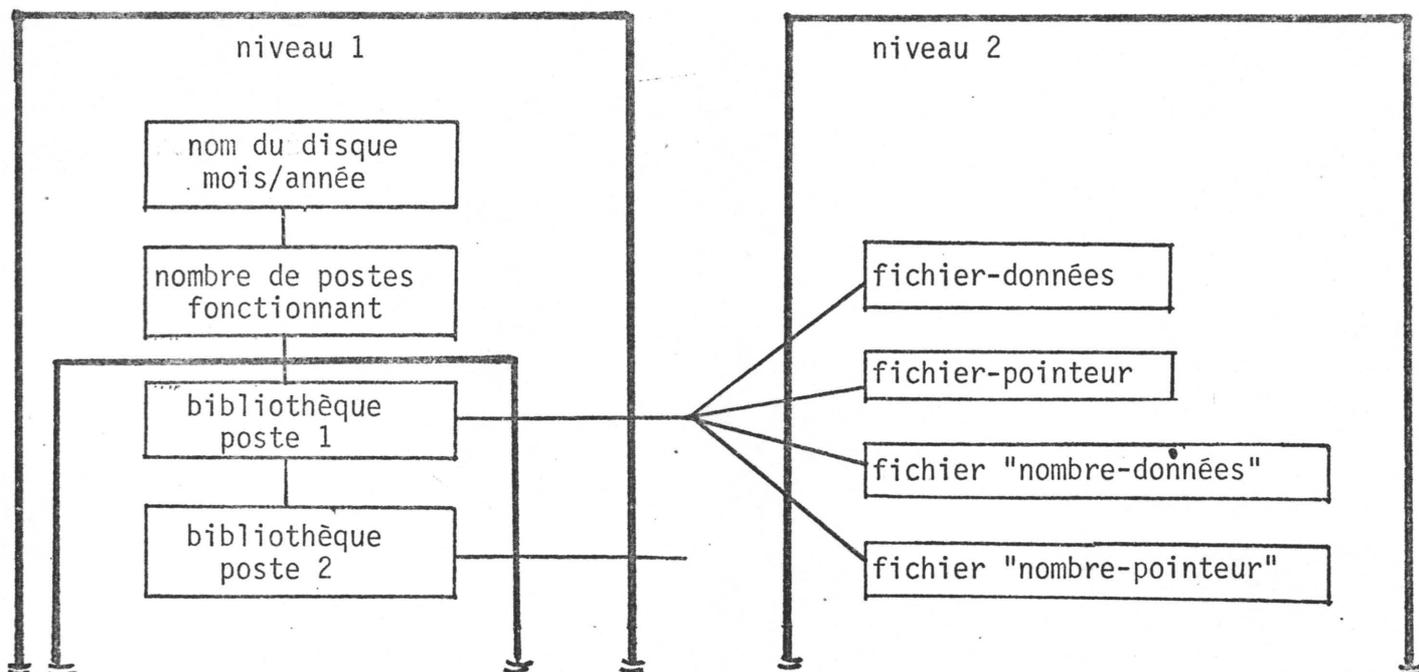
b) le fichier "nombre-données" qui enregistre le nombre de valeurs stockées dans le fichier-données.

Ces deux fichiers permettent, en particulier :

- l'extension des deux fichiers-données et fichier-pointeur, sans risquer de détruire des données antérieures ;

- une vérification de la cohérence des enregistrements, laquelle est effectuée automatiquement à chaque modification des fichiers.

Schéma I de l'organisation hiérarchique des fichiers sur disquette



Remarque :

Un programme de vérification de l'information stockée sur disque a été mis au point.

Il permet, pour un pluviomètre fixé, :

- a) d'extraire le fichier-pointeur et de l'afficher
- b) d'afficher l'information suivant les mêmes normes que celles utilisées pour le transfert sur disque.

Ainsi, en cas de problème, il est possible d'en repérer l'origine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. THIBAULT  
"Eléments pour une phénoménologie en hydrologie urbaine"  
Thèse DI -INSA -p. 313- 1981
- [2] S. THIBAULT  
"Sciences et techniques de l'assainissement"  
Tome 1 : Hydrologie Urbaine Polycopie - INSA - 1982
- B. CHOCAT, S. THIBAULT  
"Sciences et techniques de l'assainissement"  
Tome 2 + polycopie - INSA - 1982
- B. CHOCAT  
Tome 3
- [3] BEDIOT  
"La météorologie"  
VIe série - N° 20 - mars et juin 1980 - p. 3-7.
- [4] J. JACQUET  
"Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes  
enhydrologie de surface"  
La Houille Blanche - N° 2/1971 - p. 6.
- [5] REMENIAS  
"Hydrologie de l'ingénieur"  
Eyrolles 1976.
- [6] B. CHOCAT  
"Un système d'aide à la gestion, la prévision et la conception des  
équipements d'assainissement"  
Thèse DE - INSA - p. 313 - 1981

- [7] BROCHET  
"Les réseaux climatologiques en France"  
La Météorologie - VI série - N° 20-21 - mars-juin 1980 - p. 13-21.
- [8] STU  
"Catalogue des appareils de mesure de précipitations"  
Document provisoire - avril 1985.
- [9] SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE  
"Radars et précipitations atmosphériques"  
15-16 juin 1983  
En particulier les articles de :  
G. JACQUET et al  
"Intérêt technique et économique des radars d'investigation des "précipitations" en matière d'assainissement urbain"
- [10] M. CICCIONE  
"Essais de prévision immédiate sur les données du radar de dammartin en goelle" - rapport de stage de recherche - Ecole National de la Météorologie - juin 1983.
- [11] H. ANDRIEU  
"Etude radar météorologie et hydrologie urbaine"  
Rapport d'avancement N° 3 - juin 1984 - Cergrenne.
- [12] DESBORDES  
"Expérimentation récente sur bassins urbains"  
La Houille Blanche - N° 4/5 - 1980 - p. 235-243.
- [13] MINISTERE DE L'EQUIPEMENT  
"Qualité des eaux superficielles, épuration, hydrologie urbaine"  
Journées d'Information Nationale - Paris - mai 1977 - p. 207.

- [14] DESBORDES  
"Reflexions sur les méthodes de calcul des réseaux d'assainissement pluvial"  
Thèse DI - Université des Sciences et Techniques du Languedoc - 1974 - p. 171.
- [15] DESBORDES  
"Etude générale de l'assainissement pluvial urbain"  
La Houille Blanche N°1 - 1975 - p. 37-43.
- [16] B. CHOCAT, S. THIBAUT  
"Modélisation de la pluviométrie sur la région lyonnaise"  
Rapport A.V. 7902 - Convention ICARE - INSA 1979 - p. 15.
- [17] GRISOLLET  
"Etude des averses orageuses de la région parisienne"  
La Météorologie N° 11 - 1948 - p. 175-195
- [18] CALVET  
"Les fortes intensités de précipitations à Paris"  
La Météorologie - VI série N° 20.21 - mars et juin 1980 - p. 99-105.
- [19] MINISTERE DES TRANSPORTS, direction de la météorologie  
"Relation intensité-durée des précipitations à Bron"  
Période 1970-1980 - LYON - février 1982.
- [20] MASSON  
"Analyse d'une longue série pluviométrique"  
Montpellier - bel air - 1920-1971, La Météorologie - VI série - N°20-21  
mars et juin 1980 - p. 105-117
- [21] HEMAIN  
"Guide de construction et d'utilisation des pluies de projet"  
Rapport L/H/M/, 24/83 - octobre 1983.

- [22] J.C. HEMAIN  
"Chapitre III.1 - La pluie"  
D'un livre à paraître...
- [23] KEIFER-CHU  
"Synthetic storm pattern for drainage design"  
Journal of the Hydraulics Division - p. 1332 - august 1957.
- [24] B. CHOCAT  
"Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial"  
Thèse DI - INSA - p. 304 - 1978.
- [25] BANDYOPADHYAY  
"Synthetic storm pattern and run-off for Gauhati, India"  
Journal of the Hydraulics Division - P. 8887 - mars 1972 - pp. 845-857.
- [26] HUFF  
"Time distribution of rainfall in heavy storms"  
Water Resources Research - Vol. 3 - N°4 - 1977 - pp. 1007-1019.
- [27] NORMAND  
"Hydrologie urbaine et petits bassins versants urbanisés"  
L'Hydrologie et l'Ingénieur - Ecole Normale Supérieure d'Hydraulique-  
Session de perfectionnement pour l'ingénieur - GRENOBLE 1976.
- [28] DESBORDES, RAOUS  
"Fondements de l'évolution d'une pluie de projet urbaine : méthode d'analyse et application à la station de Montpellier Bel Air"  
La Météorologie - VIe Série N° 20 - mars-juin 1980 - p. 317-327.

- [29] B. CHOCAT et al  
"Etude comparative des résultats fournis par la méthode de CAQUOT et le modèle de réservoir linéaire"  
T.S. M-L'eau - juillet 1981 - p. 417-423.
- [30] REYNIER  
"Etude d'un modèle hydrologique urbain"  
Rapport de D.E.A. - Génie Civil - INSA - 1978.
- [31] "Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations"  
Circulaire Interministérielle N° 77 284/INT - 1977 - p. 62 + annexes.
- [32] J. NIEMCZYNOMICZ  
"Areal Rainfall - an improved input for modeling run-off"  
Proceeding of the third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - SWEDEN - june 1984 - Vol. 1 - p. 335-341.
- [33] J. NIEMCZYNOMICZ  
"Area intensity-duration - frequency curves and statistical areal reduction factors for short-term rainfall events in lund"  
Department of Water Resources Engineering - Lund Institute of Technology  
Report N° 8065.
- [34] ROCHE  
"Hydrologie de surface"  
Gauthiers-Villars- PARIS - 1963 - p. 430.
- [35] ITURBE et MEJIA  
"On the transformation of point rainfall to areal rainfall"  
Water Resources Research - Vol. 10 - N° 4 - august 1974 - p. 729-73
- [36] NGUYEN, ROUSSELLE, MCPHERSON  
"Evaluation of areal versus point rainfall with sparse data"  
Revue Canadienne de Génie Civil - Vol. 8 - N° 2 - 1981 - p. 173-178.

- [37] NGUYEN, V.T.V.  
"Caractérisation hydrologique de la pluie pour le contrôle et la planification des systèmes de drainage urbain" - Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal - Québec - avril 1979 - 71 pp., 4 appendices.
- [38] NGUYEN, ROUSSELA  
"A stochastic model for the time distribution of hourly rainfall depth"  
Water resources research - Vol. 17 - N° 2 - avril 1981 - p. 399-409.
- [39] PHILIPPE  
"Etude des averses orageuses à l'échelle urbaine"  
Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien, protocole 80.47.014.223.93.43 -  
Octobre 1982.
- [40] RAFFY - GALEA - OBERLIN  
"Etude de l'abattement journalier et son "inverse" sur une surface de 100 km<sup>2</sup>  
en région parisienne"  
La Méthodologie - VI série - N° 20 - Mars-Juin 1980.
- [41] GALEA, MICHEL, OBERLIN  
"Analyse quantitative du phénomène de pluie ponctuelle maximale sur une  
surface - Coefficient d'épicentrage des averses de 1 h à 24 h".  
La Houille Blanche - N° 7/8 - 1982 - p. 537-541.
- [42] GALEA  
"Analyse quantitative du phénomène de pluie ponctuelle maximale sur une  
surface - Coefficient d'épicentrage des averses de 1 h à 24 h"  
CEMAGREF (groupement d'Antony) - Novembre 1980.
- [43] POINCARE  
"Distribution et marche des pluies dans le département de la Meuse, le  
bassin supérieur de la rivière de Meuse et une zone avoisinante du bassin  
de la Seine"  
Annales des Ponts et Chaussées - n° 46 - tome II - (1873) - p. 227-267.

- [44] KOCH P.  
"Les réseaux d'égouts"  
Editions Dunod - 1967.
- [45] NGUYEN et al  
"Le dépistage des orages pour le contrôle des réseaux de drainage urbain"  
T.S.M. L'eau - juin 1980 - p. 267-271.
- [46] HINDI W.N.A., KELWAY D.S.  
"Determination of storm velocities as an aid to the quality control of recording raingage data"  
Journal of Hydrology - 32 - pp. 115-137.
- [47] EINFALL, SCHILLING  
"A storm tracking procedure for a micro-computer"  
Proceedings of the third international conference on urban storm drainage.  
Göteborg, Sweden - June 1984 - Vol. 1 - p. 353-361.
- [48] BEAUDOIN et al  
"Reliability of the design storm concept in evaluting runoff peak flow"  
Water Resources Bulletin - Vol. 19 - N° 3 - June 1983 - p. 483-487.
- [49] DESBORDES  
"Application des modèles aux études de ruissellement urbain -  
Le programme RERAM"  
La Houille Blanche - N) 4/5 - 1980 - p. 333-339.
- [50] JACQUET G.  
"Incertitude sur les pluies de projet pour concevoir un réseau d'assai-  
nissement sur des bassins versants de taille supérieure à 10 km<sup>2</sup>"  
Journées d'études précipitations atmosphériques - 2-3 mai 1984 - Paris -  
23 p.
- [51] "Guide for collection, analysis, and use of urban stormwater data"  
Conference report, Tidewater Inn, Easton Maryland (USA) - Nov. Dec. 1976 -  
American society of civil engineers.

- [52] "Notice descriptive du pluviomètre transducteur d'impulsions ROI 3030A précis mécanique"
- [53] AUTEG  
"L'électronique au service de la mesure"  
56 rue du Progrès - 38170 SEYSSINET-PARISSET
- [54] GUILLOT, DUBAND  
"Les précipitations en 6 minutes, premier examen de quelques mois d'enregistrement sur cassette magnétique"  
La Houille Blanche - N° 7/8 - 1981 - p. 569-577.
- [55] FERREO, GALEA  
"Saisie directe sur le site de l'information pluviographique"  
La Houille Blanche - N° 7/8 - 1981 - p. 471-479.
- [56] COLIN, ROUQUEROL  
"Elaboration d'une chaîne standardisée d'enregistrement numérique de données pluviométriques sur le site d'observation"  
Société Hydrotechnique de France - Journées d'études précipitations atmosphériques - 2-3 mai 1984 - pp. 19-22.
- [57] PERSOONS et LAURENT  
"Télémesure hydrologique par réseau téléphonique commuté"  
La Houille Blanche - N° 7/8 - 1981 - p. 479-487.
- [58] Journées d'étude "informatique, automatismes et exploitation des réseaux d'assainissement" - Rapport de synthèse ENPC - décembre 1983 - 60 p.
- [59] KHELIL, CHOCAT  
"Mise en place d'un système de mesures pluviographiques - Premier rapport d'avancement : Traitement des données"  
Convention INSA-COURLY - N° 2-539 - Octobre 1984.

- [60] OBERLIN, GALEA, ROSIQUE  
"Le tarage des pluviographes"  
La Météorologie VI° série - N° 20 - Mars-Juin 1980 - p. 23-33.
- [61] CTGREF  
"Etalonnage des pluviographes à augets basculeurs"  
Agence de Bassin Seine-Normandie CTGREF Hydrologie (1974).
- [62] OBERLIN G.  
"Influence des corrections de tarage d'un pluviographe sur le calcul des intensités"  
CTGREF - Hydrologie - Note Pi.09.01.73 - 1973.
- [63] BOCQUILLON, CAMBON  
"Etude des pluies orageuses sur la région parisienne"  
Rapport du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier - 4/77 -  
Février 1977 - 42 p. + annexes.
- [64] BEDIOT, BELLOSTAS, BOCQUILLON, MASSON  
"Pluies orageuses en région parisienne"  
La Météorologie VI° série - N° 20 - Mars-Juin 1980 - p. 287-295.
- [65] AZOULAY  
"Nouveau pluviographe à capteur de pression et faible temps d'intégration"  
La Météorologie VI° série - N<sup>OS</sup> 20 et 21 - Mars-Juin 1980 - 6.p.
- [66] LOVEJOY  
"La géométrie fractale des nuages et des régions de pluie et les simulations aléatoires"  
Société Hydrotechnique de France "Radars et précipitations atmosphériques"  
16 juin 1983.

- [67] MANDELBROT  
"Les objets fractals : forme, hasard et dimension"  
Paris, Flammarion - 1975.
- [68] LOVEJOY  
"An analysis of rain areas in terms of fractals"  
Preprint Vol 20th - Conference on radar meteor AMS Boston - pp. 476-484.
- [69] MISME P.  
"Dimension des cellules de pluies"  
La Météorologie VI° série - N° 20 - Mars-Juin 1980 - p. 299-303.
- [70] KHELIL, CHOCAT  
"Archivage des données pluviométriques - Deuxième rapport d'avancement"  
Convention INSA-COURLY - N° 2-539 - Mars 1985.
- [71] CORGIER, BOULENDES  
"Rapport de projet de fin d'études, Génie Civil, INSA, 1983.
- [72] CREUTIN, OBLED, TOURASSE  
"Analyses spatiale et temporelle des épisodes pluvieux cévenols"  
La Météorologie VI° série - N° 20 - Mars-Juin 1980 - p. 233-243.
- [74] LAURENT P.J.  
"Approximation et optimisation"  
Enseignement des Sciences - Hermann Editeur - Paris - 1972.
- [75] DUCHON J.  
"Fonctions splines du type plaque mince en dimension 2"  
Séminaire d'analyse numérique - n° 231 - USMG Grenoble.

- [76] "Système d'annonce de crues modèles hydrologiques"  
Services Techniques de la Ville de Nice - Sept. 1982.
- [77] DELHOMME J.P.  
"Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau"  
Thèse de Docteur-Ingénieur - Université de Paris VI - 1976.
- [78] CHILES J.P.  
"Géostatistique des phénomènes non-stationnaires"  
Thèse Docteur-Ingénieur - Université de Nancy I - 1977.
- [79] ONSOY H.  
"Contribution à la méthodologie de l'analyse des données pluviométriques - Application à la Turquie"  
Thèse VSTL - Montpellier - 152 p. + annexes 83 p.
- [80] GANDIN L.S. (1963)  
"Objective analysis of meteorological field"  
Traduction IPST - Jerusalem - 1965.
- [81] BOCQUILLON, MASSON, ONSOY  
"Calcul des lames d'eau à partir des relevés pluviométriques ponctuels : méthode M.T.H."  
La Météorologie VI<sup>o</sup> série, - N<sup>o</sup> 20 - Mars-Juin 1980 - p. 201-205.
- [82] DAMANT Christine et al  
"Radar rain force casting for waste water control"  
Journal of Hydraulic Engineering - Vol. 109 - N<sup>o</sup> 2 - Feb. 1983 - p. 293-297.
- [83] LIZE, VIESIER  
"Rapport de projet de fin d'études"- INSA - Génie Civil - 1984.
- [84] GAGLIARDI, LEMAIRE  
"Rapport de projet de fin d'études" - INSA - Génie Civil - 1985.

