

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES  
74, rue de la Fédération - 75-PARIS (15<sup>me</sup>) - Tél. 783 94-00

DIRECTION DU SERVICE GÉOLOGIQUE ET DES LABORATOIRES  
Boîte postale 818 - 45-Orléans-La-Source - Tél. 87.06.60 à 64

---

# ÉTUDE GÉOSTATISTIQUE DE L'EXHAURE DES MINES DE FER

EN FONCTION DE LA PLUVIOMÉTRIE

APPLICATION A

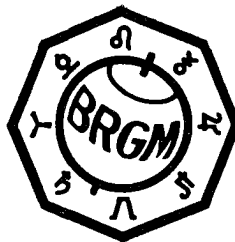
## LA MINE DE SAINT-PIERREMONT

(Meurthe et Moselle)

par

B. AMBROISE

ÉCOLE DES MINES DE NANCY



Service Géologique Régional Nord-Est  
11, Rempart Saint-Thiébault  
57-METZ — Tél. 68.79.29

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES  
74, rue de la Fédération - 75-PARIS (15me) - Tél. 783 94-00

DIRECTION DU SERVICE GEOLOGIQUE ET DES LABORATOIRES  
Boîte postale 818 - 45-Orléans-La Source - Tél. 87.06.60 à 64

ETUDE GEOSTATISTIQUE DE L'EXHAURE  
DES MINES DE FER  
EN FONCTION DE LA PLUVIOMETRIE

APPLICATION A  
LA MINE DE SAINT-PIERREMONT  
(Meurthe et Moselle)

par

B. AMBROISE  
ECOLE DES MINES DE NANCY

Service géologique régional Nord-Est  
11, rempart Saint-Thiébault  
57-Metz - Tél. 68.79.29

## AVANT-PROPOS

Cette étude se situe dans le cadre d'un travail d'option de dernière année à l'Ecole des Mines de Nancy. Elle a été retenue par le professeur de l'option "morphologie mathématique", Monsieur J. SERRA, sur proposition du directeur de service régional de Metz du B.R.G.M., Monsieur M. GUILLAUME, qui ont dirigé le travail du stagiaire Monsieur B. AMBROISE.

L'objectif de ce stage était de cerner les liaisons entre les venues d'eau au fond d'une mine, et leurs causes climatiques.

Une méthode classique dans ce genre de recherche consiste à déterminer la structure du filtre à partir d'éléments différentiels. Ici, tout au contraire, c'est à partir d'une expression globale des variations, synthétisées à travers les fonctions de covariance, qu'on a pu déterminer la réponse du filtre à une impulsion.

En plus de l'avantage théorique de ce genre de méthode, on remarquera qu'elle se prête très bien à un traitement sur ordinateur, car elle fournit quelques paramètres moyens à partir d'un grand nombre de données.

Matériellement, l'étude a été facilitée grâce à l'aide et au prêt de documents de l'I.R.S.I.D. (service géologique) et de quelques mines de fer, St-Pierremont en particulier. La liaison entre l'I.R.S.I.D. et ces mines de fer était assurée par Monsieur F. DESCAVES, ingénieur à l'I.R.S.I.D.

## S O M M A I R E

- 1 - INTRODUCTION
- 2 - GENERALITES SUR L'EXHAURE
  - 2.1 - Introduction
  - 2.2 - Origine des eaux d'exhaure
  - 2.3 - Etude du filtre
    - 2.3.1 - Définition du filtre
    - 2.3.2 - Incidence de l'exploitation des mines sur le filtre
    - 2.3.3 - Bassins hydrogéologiques & bassins d'alimentation
- 3 - DEFINITION DES OUTILS MATHEMATIQUES
  - 3.1 - Fonction aléatoire stationnaire, variable régionalisée
  - 3.2 - Variogramme & fonction de covariance
    - 3.2.1 - Définitions
    - 3.2.2 - Propriétés
    - 3.2.3 - Cas d'une dérive linéaire de la variable régionalisée
  - 3.3 - Fonction de dilution
  - 3.4 - Ajustement d'un variogramme expérimental à un modèle théorique - application au modèle :

$$2 \Gamma (h) = 2 C \left[ 1 - e^{-\frac{h}{h_0}} \left( 1 + \frac{h}{h_0} \right) \right]$$

## 4 - APPLICATION A LA MINE DE SAINT-PIERREMONT

### 4.1 - Introduction

4.1.1 - Choix de SAINT-PIERREMONT

4.1.2 - Présentation de la mine

4.1.3 - Nature des données

4.1.4 - Utilisation des données

### 4.2 - Etude de la pluviométrie

4.2.1 - Introduction

4.2.2 - Précipitations annuelles

4.2.3 - Précipitations mensuelles

4.2.4 - Précipitations journalières

4.2.5 - Comparaison des pluviomètres de  
SAINT-PIERREMONT & d'AUBOUE

4.2.6 - Résumé des résultats obtenus

### 4.3 - Etude de l'exhaure de SAINT-PIERREMONT

4.3.1 - Introduction

4.3.2 - Etude statistique des exhaures de  
SAINT-PIERREMONT

4.3.3 - Etude géostatistique de l'exhaure  
du fond

### 4.4 - Détermination du filtre

4.5 - Prévision de l'exhaure à partir des précipitations,  
détermination théorique

## 5 - CONCLUSIONS

## Liste des annexes

- Annexe I - Programme de calcul des variogrammes & covariances
- Annexe II - Moyennes mensuelles de pluies et d'exhaure  
a, b, c pour la mine de SAINT-PIERREMONT (1944-64)
- Annexe III - Expérience d'arrêt de pompage du puits de la Forêt
- Annexe IV - Plan du fond de la mine de SAINT-PIERREMONT
- Annexe V - Situation au fond des mines du bassin d'OTTANGE-AMERMONT
- Annexe VI - Coupe géologique

## Liste des figures

		Pages
<u>Figure 2.1</u>	- Nappes aquifères avant et après les dépilages .....	4
<u>Figure 2.2</u>	- Schéma des circulations des eaux superficielles et souterraines .....	7
<u>Figure 2.3</u>	- Augmentations par paliers successifs des venues d'eau provenant des réserves géologiques .....	10
<u>Figure 3.1-2-3</u>	- Différents types de covariance et de variogramme .....	19
<u>Figure 3.4</u>	- Dérive linéaire, suivant x de la variable régionalisée $f(x)$ .....	21
<u>Figure 3.5</u>	- Répartition dans le temps d'une même quantité $\mu(t)$ avant et après dilution	23
<u>Figure 3.6</u>	- Somme des dilutions à l'instant x ....	24
<u>Figure 3.7</u>	- Dilution sans et avec retard au démarrage .....	25
<u>Figure 3.8</u>	- Variogramme théorique : $\frac{2}{2C} \Gamma \left( \frac{h}{h_0} \right) = 1 - e^{-\frac{h}{h_0}} \left( 1 + \frac{h}{h_0} \right) \dots$	28
<u>Figure 3.9</u>	- Loi gamma d'ordre 2 et son variogramme	29
<u>Figure 3.10</u>	- Abaque donnant $\frac{1}{C} F \left( \frac{h_0}{H} \right)$ pour loi gamma d'ordre 2 .....	32
<u>Figure 4.2</u>	- Décomposition d'une série chronologique .....	38

	Pages
<u>Figure 4.3</u>	- Histogrammes des précipitations annuelles à NANCY (1840-1959) ..... 40
<u>Figure 4.4</u>	- Dérive linéaire des précipitations annuelles à NANCY ..... 41
<u>Figure 4.5</u>	- Variogramme des pluies annuelles à NANCY (la dérive étant éliminée) .... 43
<u>Figure 4.6</u>	- Histogramme des précipitations annuelles à SAINT-PIERREMONT (1944-64) 45
<u>Figure 4.7</u>	- Comparaison des pluviométries mensuelles de SAINT-PIERREMONT (1925/35 - 1944/64) ..... 46
<u>Figure 4.8</u>	- Variogramme des précipitations de SAINT-PIERREMONT (1944-1964) ..... 48
<u>Figure 4.9</u>	- Histogramme, par saison, des pluies journalières à SAINT-PIERREMONT (1959-1964) ..... 51
<u>Figure 4.10</u> a, b, c, d	- Variogrammes, par saison, des pluies journalières à SAINT-PIERREMONT et AUBOUE (1959-1964) ..... 53
<u>Figure 4.11</u>	- Résultats statistiques pour les pluies journalières à SAINT-PIERREMONT et AUBOUE (1959-1964) ..... 53 quinto
<u>Figure 4.12</u>	- Comparaison des pluviométries saisonnières de SAINT-PIERREMONT (1959-1964) ..... 56
<u>Figure 4.13</u>	- Variations annuelles composées d'exhaure et de pluviométrie à SAINT-PIERREMONT (1944-1964) ..... 60

	Pages
<u>Figure 4.14</u> - Moyennes sur 5 ans de la pluviométrie des exhaures à SAINT-PIERREMONT (1944-1964) .....	61
<u>Figure 4.15</u> - Variations mensuelles comparées d'exhaure et de pluviométrie à SAINT-PIERREMONT (1944-1964) .....	63
<u>Figure 4.16</u> - Variogrammes de l'exhaure du fond à SAINT-PIERREMONT (étés 1959-1964) ...	67
<u>Figure 4.17</u> - Préviation de l'exhaure $c(o)$ connaissant la pluie $p(x)$ jusqu'au jour $T < 0$ .....	73

## 1 - INTRODUCTION

La région de la vallée de la Moselle et du Bassin ferrifère de Lorraine se trouve placée devant un problème de plus en plus difficile à résoudre : celui de l'alimentation en eau, non seulement des agglomérations comme METZ et BRIEY pour la consommation courante, mais aussi de toutes les industries sidérurgiques, grosses consommatrices d'eau, des vallées de l'Orne et de la Fentsch.

Toutes les réserves connues étant déjà totalement exploitées, de nombreuses recherches sont en cours pour trouver de nouvelles nappes exploitables, même très éloignées de la vallée de la Moselle. Parallèlement, sont entrepris des essais de bilans hydrologiques afin de savoir ce que deviennent les eaux de pluie, travaux menés par le B.R.G.M. pour inventorier les ressources hydrauliques du Bassin Lorrain.

Un autre facteur très important joue dans la région : la présence d'un grand nombre de mines de fer a considérablement perturbé le régime des nappes aquifères et des cours d'eau, qui ont une grande part de leur débit détournée au fond des mines ; au fur et à mesure de leur exploitation, celles-ci collectent un volume de plus en plus important d'eau qu'il faut alors exhaurer au jour.

On conçoit donc qu'il est particulièrement important de mieux connaître le phénomène de l'exhaure, non seulement en décrivant son mécanisme, mais aussi en étudiant ses variations dans le temps, afin d'essayer de prévoir à temps son évolution. Une telle étude a d'ailleurs été entreprise par J. Chanzy en 1926 et reprise en 1960 par le B.R.G.M. (cf bibliographie).

C'est dans ce cadre de recherches que se situe ce rapport qui veut reprendre la description du phénomène en utilisant les outils et les méthodes de la Géostatistique, application de la Théorie des Variables Régionalisées, permettant de dégager d'un grand nombre de données les lois générales qui les régissent. Une application n'a pu être faite, faute de temps, que sur une petite période de temps et pour une seule mine, SAINT-PIERREMONT ; cependant la méthode générale reste valable dans tous les cas, et pourra être appliquée dans d'autres conditions, lors de travaux ultérieurs.

Nous commencerons donc par présenter de façon générale le phénomène de l'exhaure, en définissant les circuits possibles des eaux ainsi que le "filtre" constitué par les morts-terrains ; puis nous définirons les outils mathématiques fondamentaux : fonction aléatoire stationnaire, variogramme et covariance, fonction de dilution, dont nous nous servirons dans la troisième partie : l'application pratique de ces outils y sera faite pour la mine de SAINT-PIERREMONT ; nous étudierons d'abord la pluviométrie et l'exhaure par elle-même, avant de déterminer le "filtre" et d'essayer de dresser un modèle de prévision de l'exhaure.

## 2 - GENERALITES SUR L'EXHAURE

### 2.1 - Introduction

Dès le début de l'exploitation des mines de fer de Lorraine s'est posé le problème des venues d'eau au fond et de leur évacuation, ou exhaure. Ce problème est résolu à l'échelle de chaque mine par l'addition au fur et à mesure des besoins, de pompes supplémentaires, ce qui augmente le prix de revient du minerai. D'autre part ces venues d'eau se font au détriment des nappes aquifères, ce qui perturbe l'alimentation en eau de la région.

On conçoit qu'il importe de mieux connaître le phénomène de l'exhaure pour déterminer les facteurs, tant climatiques que géologiques, qui le régissent.

C'est pourquoi, après avoir déterminé l'origine de ces venues d'eau, ainsi que le circuit général dans lequel elles se situent, nous étudierons le "filtre" que constituent les morts-terrains et son évolution dans le temps (suivant les saisons ou d'une année à une autre).

## 2.2 - Origine des eaux d'exhaure

Les eaux que l'on peut trouver dans le sous-sol sont de 3 types :

- tout d'abord les eaux mères de constitution qui sont emmagasinées dans les roches depuis leur formation ;

- ensuite les réserves géologiques, appelées aussi eaux fossiles ; c'est le volume d'eau qui resterait dans le sous-sol en l'absence de toute alimentation extérieure et au stade final de tarissement de tous les exutoires naturels par écoulement gravitationnel. L'exutoire de plus basse altitude définit donc pour la nappe un seuil de drainage théorique au-dessous duquel commence la réserve géologique (cf. fig. 2.1 voir page 4) ;

- enfin les réserves saisonnières provenant de la réalimentation pluviométrique, par infiltration ; ce sont les eaux qui sont ensuite drainées vers les exutoires naturels.

En fait toutes les eaux de pluie ne s'infiltrent pas dans le sol mais elles se répartissent en trois fractions ;

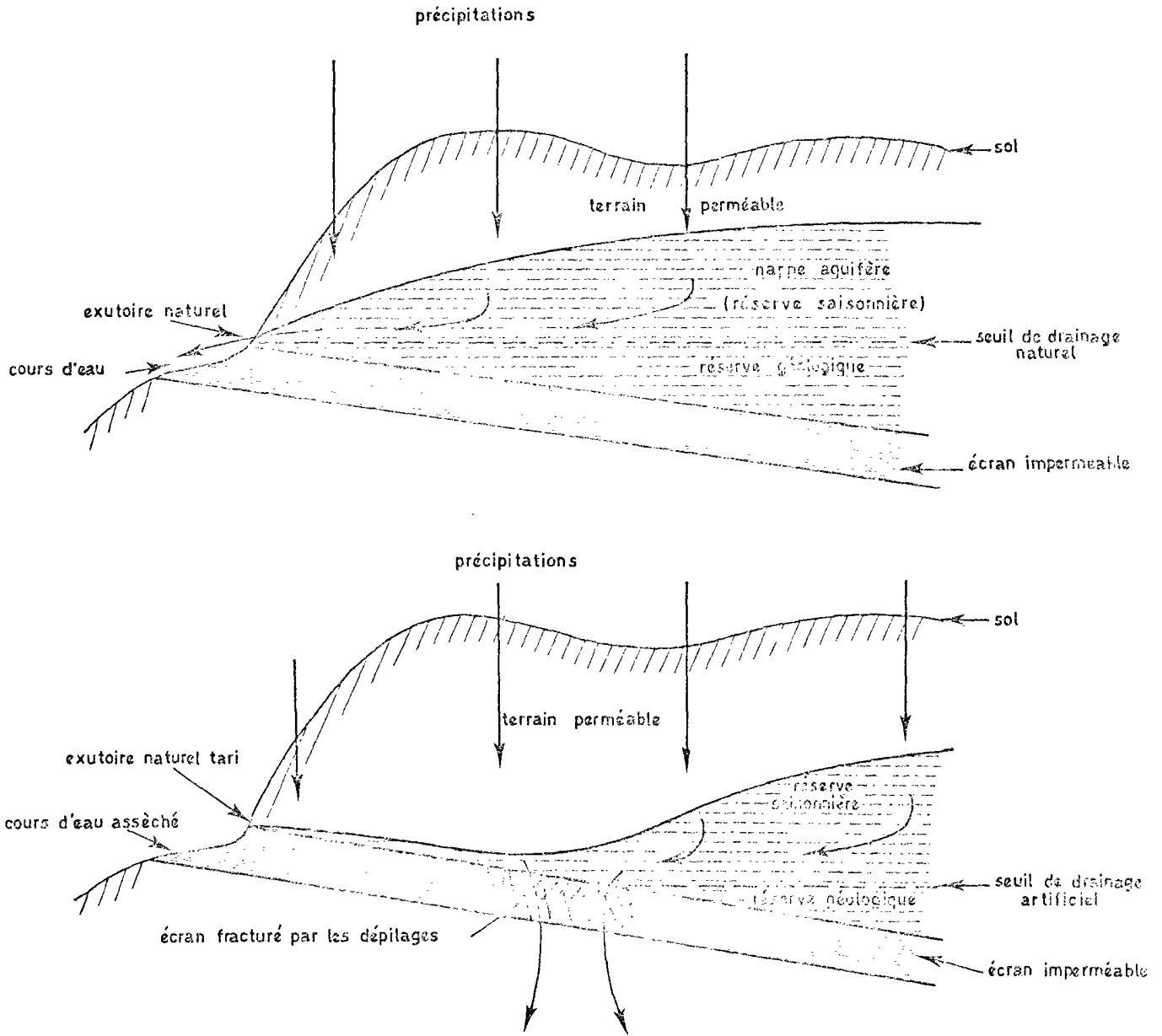


Fig 2.1 : Nappes aquifères avant et après les dépilages

elles peuvent :

- soit ruisseler sur le sol pour se rassembler dans les cours d'eau ;

- soit être absorbées par évaporation dans l'atmosphère, ou par la végétation : c'est le phénomène de l'évapotranspiration ;

- soit enfin s'infiltrer dans le sous-sol pour former des nappes souterraines.

Il est d'ailleurs très difficile de chiffrer l'ordre de grandeur de ces trois fractions.

En effet, le ruissellement ne pourrait être connu que par des mesures fréquentes des débits de tous les cours d'eaux d'une même région, pouvant d'ailleurs s'étendre sur plusieurs bassins orographiques ; il faut aussi noter que lorsqu'une rivière traverse un terrain perméable, une partie de son débit peut s'infiltrer ; faute de telles mesures l'estimation du ruissellement ne peut pas être faite valablement.

Il en est de même pour l'évapotranspiration (évaporation dans l'atmosphère et absorption par la végétation), d'autant plus qu'elle varie énormément d'une saison à une autre, et aussi suivant la nature de la végétation (forêts, prés, champs...) et l'épaisseur des limons superficiels. Une estimation des hauteurs d'eau (en mm) absorbées par évapotranspiration, pour chaque demi-décade d'un mois déterminé, a été faite empiriquement par J. Chanzy (cf. bibliographie) pour la région d'AUBOUE :

Septembre	: 9	, Décembre	: 1	, Mars	: 7	, Juin	: 20
Octobre	: 4	, Janvier	: 1	, Avril	: 11	, Juillet	: 30
Novembre	: 3	, Février	: 3	, Mai	: 14	, Août	: 50

Cependant ces chiffres ne tiennent pas suffisamment compte des conditions locales, ainsi que des fluctuations du climat suivant les années.

Ainsi il ne semble pas possible jusqu'à présent de déterminer avec une certaine précision les eaux d'infiltration (ou résidu suivant Chanzy) à partir des précipitations atmosphériques.

Les eaux d'exhaure ont donc deux provenances principales (qui seront explicitées au § 2.3.2) : d'une part les eaux d'infiltration pluviométrique, d'autre part les réserves géologiques.

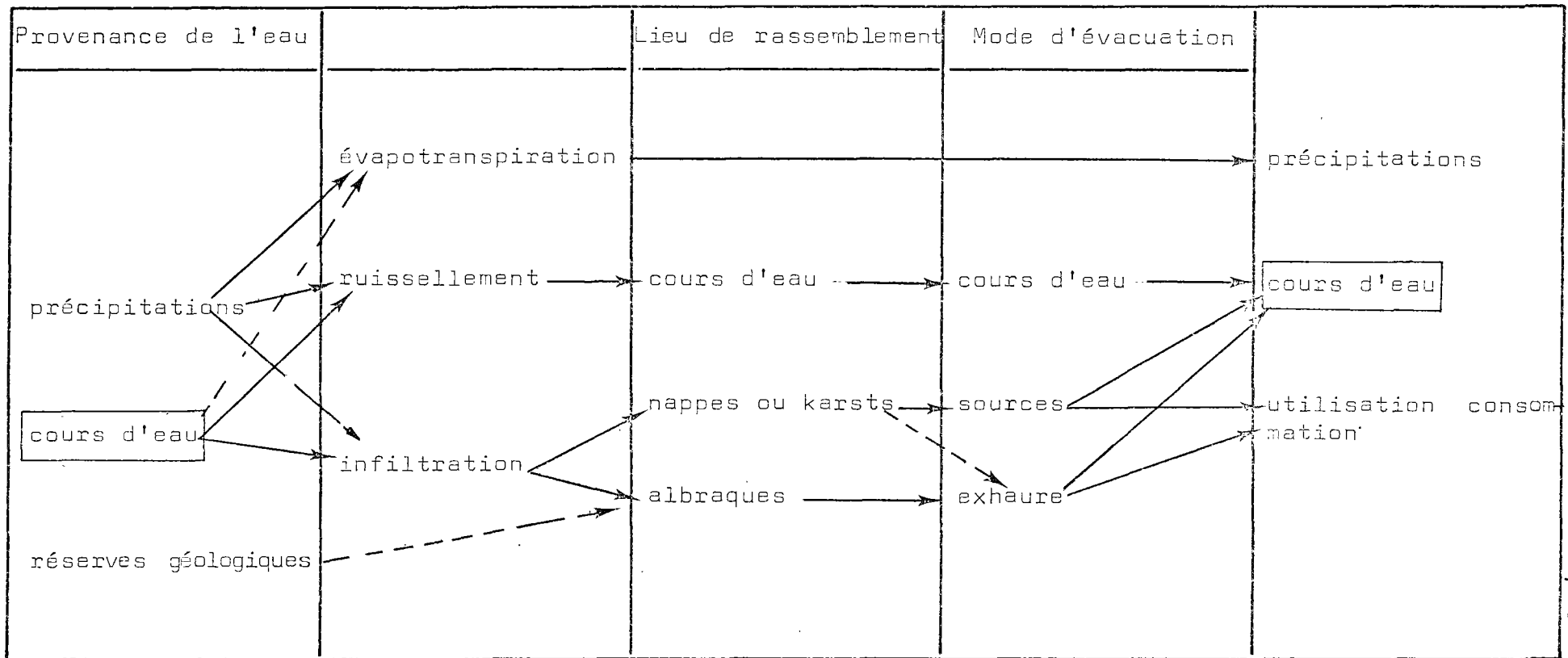
Il arrive aussi qu'il y ait un recyclage des eaux d'exhaure, c'est à dire que ces eaux après refoulement dans des cours d'eau, s'infiltreront de nouveau partiellement, décrivant ainsi un cercle fermé : ceci semble être le cas de certaines mines de la vallée de l'Orne sans que le mécanisme en soit bien connu.

Le schéma suivant (fig. 2.2) résume les différents circuits que peuvent suivre les eaux superficielles et souterraines provenant soit des précipitations locales, soit des cours d'eau, soit aussi des réserves géologiques.

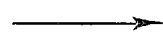
## 2.3 - Etude du filtre

### 2.3.1 - Définition du filtre

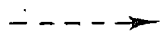
En l'absence de toute exploitation minière, les seules circulations d'eau à l'intérieur des terrains sont provoquées par l'infiltration et l'évacuation des eaux de pluie à travers les morts-terrains : ceux-ci constituent un filtre.



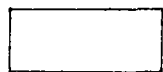
(Fig. 2.2) Schéma des circulations des eaux superficielles et souterraines



liaisons normales



liaisons dues à un changement de structure du filtre lors des dépilages par exemple



mise en évidence des recyclages possibles des eaux d'exhaure

Ce filtre comporte tout d'abord en surface une couche de limon généralement recouverte de végétation ; ce limon joue le rôle d'une éponge, le passage par infiltration des eaux de pluie n'étant possible qu'après sa saturation complète ; c'est à ce niveau que joue principalement l'évapotranspiration, puisque par capillarité la végétation et l'évaporation peuvent pomper toute l'eau sur plusieurs mètres de profondeur, en période de sécheresse. Il y a donc en surface un grand volant d'eau, variable suivant les saisons, qui régularisera l'influence de la pluie au fond : ainsi en été un gros orage aura moins d'incidence au fond qu'une pluie faible mais répartie sur plusieurs jours, capable de saturer la couche superficielle.

Sous ce niveau se succèdent des couches perméables et des écrans imperméables définissant autant d'horizons aquifères indépendants.

L'alimentation de ces horizons se fait soit par infiltration verticale directe, soit latéralement aux affleurements perméables pour les horizons inférieurs.

Dans certaines assises proches de la surface, il faut noter la présence possible de karsts, ou diaclases aquifères, pouvant constituer de véritables rivières souterraines creusées par dissolution du calcaire par l'eau et qui peuvent être en relation directe avec le jour par des puits ou des cassures ; ces karsts constituent des itinéraires de circulation préférentielle et rapide des eaux d'infiltration ; ils peuvent d'ailleurs changer de forme et de caractéristique au fur et à mesure de leur érosion et aussi suivant le débit lié aux précipitations en surface (s'il existe des seuils, des siphons, des trop pleins..).

### 2.3.2 - Incidence de l'exploitation des mines sur le filtre

L'exploitation des mines de fer par la méthode dite des "chambres et piliers" crée lors des dépilages l'éboulement des morts-terrains, ce qui entraîne la cassure des écrans imperméables supérieurs ; l'influence des dépilages peut d'ailleurs, pour des mines peu profondes, se manifester jusqu'en surface par des failles ou des affaissements.

Les dépilages ont pour effet de mettre en communication avec le fond les horizons aquifères supérieurs en créant des exutoires artificiels ; si ceux-ci sont en contre-bas des exutoires naturels, les dépilages vont substituer au drainage naturel un drainage artificiel qui concernera non seulement les réserves saisonnières mais aussi la partie de la réserve géologique située au-dessus du nouveau seuil de drainage (cf fig. 2.1 page 4).

La réserve géologique va donc se manifester au fond, à chaque nouvelle cassure importante, par un brusque apport d'eau qui va décroître rapidement pour se stabiliser au bout d'un laps de temps relativement faible (de l'ordre de quelques mois au maximum) à un palier supérieur au précédent et légèrement décroissant au fur et à mesure du tarissement de la réserve supérieure, établissement d'un régime transitoire ; ce processus est suffisamment long pour qu'on puisse considérer ce palier comme constant pendant une période de quelques années (cf fig. 2.3) ; ainsi les réserves géologiques se manifestent au fond par un apport constant mais augmentant par paliers avec l'avance de l'exploitation qui fracture de plus en plus les écrans imperméables.

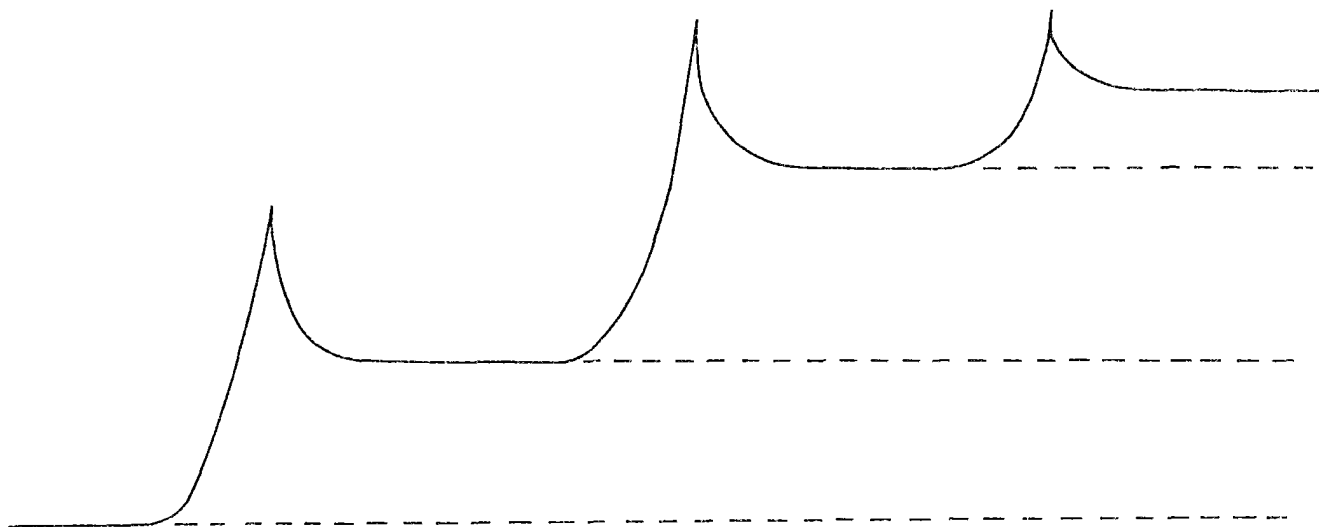


Fig. 2.3 : Augmentation par paliers successifs des venues d'eau provenant des réserves géologiques

Ces dépilages jouent aussi sur les réserves saisonnières qui provoquent un apport généralement bien supérieur à celui des réserves géologiques mais beaucoup plus variable suivant les facteurs saisonniers, ce qui parallèlement se traduit par le tarissement des nappes aquifères et donc celui des puits et des sources en surface.

L'alimentation en eau des régions minières se trouve alors menacée à long terme ; jusqu'à présent, l'exhaure des mines exploitées permet, à plus grand frais puisque la hauteur de refoulement est plus importante, d'approvisionner les agglomérations et les industries et de mainte-

nir le débit de certains cours d'eau qui sans le rejet des eaux d'exhaure seraient totalement asséchés ; cependant la fermeture d'un certain nombre de mines risque de rendre ce palliatif insuffisant.

De plus, l'augmentation des venues d'eau au fond avec l'avance des chantiers, tout en rendant les conditions de travail plus pénibles, en rend l'évacuation plus difficile et coûteuse : en effet, cette évacuation, avec un gros coefficient de sécurité, se fait grâce à une surcapacité de pompage nécessitant des investissements d'autant plus élevés que les venues d'eau sont fortes ; si l'exhaure n'intervient que pour quelques % dans le prix de revient du minerai, ceux-ci pourraient en période de récession, s'avérer déterminants dans la décision de fermer des mines, ce qui risque de défavoriser dès le départ les mines les plus exposées aux infiltrations.

Il est donc intéressant à plusieurs titres de connaître de façon plus précise le phénomène de l'exhaure et son évolution dans le temps, pour essayer d'en prévoir l'augmentation et ainsi déterminer à temps les chantiers à abandonner ainsi que les réseaux de collecte des eaux et d'exhaure les plus adaptés : la fermeture de certaines mines pose en effet le problème de savoir s'il faut maintenir au fond des stations de pompage pour éviter de noyer ces mines et d'augmenter l'exhaure des mines situées en aval pendage dans le cas où des relations existeraient entre elles.

### 2.3.3 - Bassins hydrogéologiques & Bassins d'alimentation

L'exhaure d'une mine ne fait pas intervenir que les pluies tombant à l'intérieur de sa concession ; au contraire, par les cours d'eau, les karsts, les grandes nappes aquifères, elle peut être influencée par des régions assez éloignées définissant son bassin d'alimentation.

Cette notion de bassin d'alimentation est liée à celle de bassin hydrogéologique fermé (cf B.R.G.M. A 1941) : "ce sont des ensembles souterrains, géographiquement, géométriquement et géologiquement bien définis et dont l'alimentation assurée exclusivement par infiltration d'eaux de surface (pluies, cours d'eau) est entièrement restituée à l'extérieur sur le périmètre même du bassin ou à sa périphérie, à l'exclusion de tous échanges aquifères souterrains latéraux avec des ensembles contigus". Les bassins d'alimentation sont les zones de surface délimitées par ces bassins hydrogéologiques fermés.

On conçoit donc bien que le bilan hydrologique (eaux qui entrent, eaux qui ressortent) ne peut pas se faire valablement à l'échelle d'une seule mine mais bien plutôt au niveau d'un ensemble de mines, à condition de pouvoir définir leur bassin hydrogéologique ; cette détermination est généralement très difficile et imprécise, cependant les failles principales peuvent fournir des indications sur leurs limites latérales : l'expérience minière semble montrer que la surface de rejet d'une faille est généralement imperméable (roches broyées, brèche de calcaire et d'argile souvent cimentée de calcite) ; par contre des circulations d'eau importantes se manifestent souvent de part et d'autre du plan de faille dans des zones de fractures sans rejet, ou à très faible rejet.

Cette constatation, fréquente en profondeur, souffre cependant des exceptions à faible profondeur en particulier les circulations karstiques superficielles identifiées dans la région de SAINT-PIERRE-MONT traversent des plans de faille.

Dans la suite de ce rapport, nous ne nous attacherons pas à essayer d'établir le bilan hydrologique de certains bassins ; une approche de bilan a déjà été faite pour le bassin ferrifère de Lorraine (cf B.R.G.M. A 1.641) ; nous nous contenterons d'essayer de mettre en évidence les relations qui existent entre la pluie et l'exhaure lors du passage de l'eau à travers le filtre.

Cette étude, assez simple sur le plan théorique, le sera beaucoup moins dans la réalité du fait de l'existence d'un filtre très complexe, évoluant constamment dans le temps et sur lequel jouent de nombreux facteurs variant également (climatiques, géologiques, géographiques ...).

### 3 - DEFINITION DES OUTILS MATHÉMATIQUES

Avant de pousser plus avant l'étude du phénomène de l'exhaure, il faut définir des notions et outils mathématiques, comme les fonctions aléatoires stationnaires, les variogrammes et fonctions de covariance, et les fonctions de dilution, qui seront nécessaires pour l'application des méthodes et des résultats de la géostatistique, et l'ajustement d'un variogramme expérimental à un modèle théorique.

#### 3.1 - Fonction aléatoire stationnaire - variable régionalisée

Une variable aléatoire est une variable dépendant du hasard, d'un tirage au sort ; cette variable peut être dé-

finie par plusieurs composantes ; à chaque tirage au sort correspond une réalisation de la variable aléatoire

Une fonction aléatoire peut être considérée comme une variable aléatoire ayant un nombre infini de composantes : si la fonction aléatoire  $f(x)$  est définie dans un espace à une dimension (il s'agit alors d'un processus stochastique), à chaque point  $x$  de l'axe des  $x$  correspond la valeur  $f(x)$  de la composante de la fonction aléatoire ; les composantes en tous les points  $x$ , sont liées entre elles par la fonction aléatoire  $f(x)$  au cours d'une même réalisation.

- une fonction aléatoire  $f(t)$  est dite stationnaire d'ordre deux (ou au sens large) si :

- son espérance mathématique (ou moyenne)  $m(t) = E \left[ f(t) \right] = \frac{1}{V} \int_V f(t) dt$  est une valeur constante .m. indépendante du point  $t$ , lors de toutes les réalisations.

- sa covariance  $K(t_1, t_2) = E \left[ f(t_1) f(t_2) \right]$  ne dépend que de la différence  $\tau = t_1 - t_2$  dans ce cas  $K(t_1, t_2) = K(\tau)$

- une variable régionalisée est une fonction, aléatoire ou non, de l'espace ou du temps, qui varie avec une certaine apparence de continuité, sans qu'il soit possible de la représenter par une fonction mathématique extrapolable, en général.

3.2 - Variogramme et fonction de covariance de variables régionalisées

3.2.1 - Définition

- On définit le variogramme  $2\gamma(h)$  d'une variable régionalisée  $f(x)$  définie sur un champ infini pour  $x$  par :

$$2\gamma(h) = \int [f(x+h) - f(x)]^2 dx$$

c'est la moyenne, pour toutes les valeurs de  $x$ , du carré de l'accroissement algébrique de la fonction  $f$  entre les instants  $x$  et  $(x+h)$ .

- De même on définit la fonction de covariance  $\varphi(h)$  de la fonction  $f(x)$  par :

$$\varphi(h) = \int f(x) \cdot f(x+h) \cdot dx$$

c'est la moyenne du produit des valeurs prises par la fonction  $f$  aux instants  $x$  et  $(x+h)$ .

En utilisant la notation symbolique du produit de convolution de 2 fonctions :

$$\varphi = \overset{\vee}{f} * f$$

$\overset{\vee}{f}(x)$  étant la transposée de  $f(x)$  :

$$\overset{\vee}{f}(x) = f(-x)$$

- Le variogramme et la fonction de covariance d'une fonction  $f(x)$  sont des fonctions symétriques et positives, c'est-à-dire que :

$$\begin{cases} \varphi(h) = \varphi(-h) \\ \varphi(h) \geq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} 2\gamma(h) = 2\gamma(-h) \\ 2\gamma(h) \geq 0 \end{cases}$$

avec, en plus, les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi(0) &> 0 & \gamma(0) &= 0 \\ 0 \leq \varphi(h) &\leq \varphi(0) & \gamma(h) &\geq 0 \end{aligned}$$

ces 2 fonctions sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} 2 \gamma(h) &= 2 \left[ \varphi(0) - \varphi(h) \right] \\ 2 \varphi(h) &= \left[ 2 \gamma(\infty) - 2 \gamma(h) \right] \end{aligned}$$

Sachant que  $\varphi(0) = \gamma(\infty)$  est la variance à priori

$$\int f(x)^2 dx$$

et que :  $\varphi(0) = \gamma(\infty) = F(\infty)$  avec

$$F(h) = \frac{2}{h^2} \int_0^h (h-x) \gamma(x) dx$$

- On définit également les fonctions de covariance de 2 variables régionalisées  $f(x)$  et  $g(x)$  par :

$$\begin{aligned} \varphi_{fg}(h) &= \int f(x) \cdot g(x+h) dx \text{ ou } \varphi_{fg} = \overset{\vee}{f} * g \\ \varphi_{gf}(h) &= \int g(x) \cdot f(x+h) dx \text{ ou } \varphi_{gf} = \overset{\vee}{g} * f \end{aligned}$$

$\varphi_{fg}(h)$  est la moyenne, pour toutes les valeurs de  $x$ , du produit de la valeur de la fonction  $f$  à l'instant  $x$  et celle de la fonction  $g$  à l'instant  $(x+h)$  ; et inversement pour  $\varphi_{gf}(h)$

s'il n'y a pas de corrélation entre  $f(x)$  et  $g(x+h) \forall x$ ,  
 $g(x+h)$  varie de façon incohérente quand  $f(x)$  est  
 donné et  $\varphi_{fg}(h)$  est faible.

Si, au contraire, il y a une forte corrélation  
 pour un décalage de  $h_0$ ,  $\varphi_{fg}(h_0)$  sera élevé.

La fonction de covariance  $\varphi(h)$  de  $f(x)$   
 est un cas particulier ( $f(x) = g(x)$ ) de la fonction  
 de covariance  $\varphi_{fg}(h)$  et  $\varphi_{gf}(h)$   
 on trouve de même:

$$\begin{aligned} \varphi_{fg}(h) &= \varphi_{gf}^v(h) = \varphi_{gf}(-h) \\ \varphi_{gf}(h) &= \varphi_{fg}^v(h) = \varphi_{fg}(-h) \end{aligned}$$

### 3.2.2 - Propriétés

Les variogrammes et fonctions de covarian-  
 ces, et surtout leurs comportements à l'origine et à l'infini,  
 permettent de décrire les variables régionalisées étudiées car  
 ils traduisent les corrélations entre 2 instants et donc le  
 caractère plus ou moins aléatoire (ou, inversement, prévisi-  
 ble de la variable).

#### - Comportement à l'origine (pente à l'origine) : $h = 0$

Il est directement lié aux propriétés de conti-  
 nuité et de régularité de la variable régionalisée, une pente  
 nulle traduisant une variable très continue et régulière.

En particulier, il peut arriver que le variogramme  
 tende non pas vers 0 quand  $h$  tend vers 0 mais vers une va-

leur  $2 C_0$  positive appelée constante de pépité (fig. 3.2 page 19)

$$2 C_0 = \lim_{h \rightarrow 0} 2 \gamma(h) = 2 \left[ \varphi(0) - \lim_{h \rightarrow 0} \varphi(h) \right]$$

une forte constante de pépité traduisant une variable assez aléatoire, une variable purement aléatoire est définie par un variogramme d'équation :

$$\begin{aligned} 2 \gamma(h) &= 0 & h &= 0 & ) \\ 2 \gamma(h) &= 2 C_0 & h &\neq 0 & ) \end{aligned} \quad (\text{fig. 3.1 page 19})$$

- La croissance plus ou moins rapide du variogramme quand  $h$  croît, représente exactement la manière plus ou moins rapide dont se détériore l'influence d'un échantillon donné (caractérisé par la valeur de la fonction) en des instants de plus en plus lointains et permettant de définir une zone d'influence d'un échantillon.

- Comportement à l'infini : h infini

Celui-ci permet de préciser la notion de zone d'influence : il arrive que les corrélations entre  $f(x)$  et  $f(x+h)$ , pour toutes les valeurs de  $x$ , s'estompent et même disparaissent quand  $h$  augmente.

Dans ce cas le variogramme croît jusqu'à un palier d'ordonnée  $2C$  qu'il atteint asymptotiquement (pour  $h$  infini) ou effectivement, pour une valeur  $h_0$  appelée portée de la régionalisation : ceci signifie qu'un échantillon pris à un instant  $t$ , a de l'influence jusqu'à l'instant  $(t + h_0)$ , ou encore qu'il y ait indépendance entre  $f(x)$  et  $f(x+h)$  pour  $h \geq h_0$  (cf fig. 3.2 & 3 page 19).

$2\gamma(h)$

$2C_0$

0

h

$\dot{\phi}(h)$

$C_0$

0

h

Fig. 3.1 : variations et dérivées d'une variable aléatoire sans

$2\gamma(h)$

$2(C+C_0)$

0

h

$\dot{\phi}(h)$

$C+C_0$

C

0

h

Fig. 3.2 : cas de forte dépendance à l'origine, la dérivée est toujours négative

$2\gamma(h)$

$2(C+C_0)$

0

$h_0$

h

$\dot{\phi}(h)$

$C+C_0$

C

0

$h_0$

h

Fig. 3.3 : variations et dérivées d'une variable aléatoire avec un effet de seuil à l'origine

- L'effet de pépite, qui caractérise le caractère aléatoire de la variable régionalisée, est défini par

$$\Sigma = \frac{C_0}{C}$$

(variable purement aléatoire si  $\Sigma = 1$ ).

- Ainsi la variable régionalisée  $f(x)$  est mieux définie par la connaissance du variogramme associé, ou de la fonction de covariance, et en particulier :

- du comportement à l'origine : tangente à l'origine, constante de pépite,

- du comportement à l'infini : palier, portée finie ou non.

### 3.2.3 - Cas d'une dérive linéaire de la variable régionalisée

- Il y a dérive de la variable régionalisée  $f(x)$  quand sa moyenne  $\overline{f(x)}$  en un instant  $x$ , pour toutes les réalisations possibles, dépend de cet instant  $x$  ; la variable  $f(x)$  est donc la somme de 2 composantes :

- une tendance générale ou dérive  $\overline{f(x)}$

- une fluctuation aléatoire stationnaire autour de cette tendance,  $f'(x)$

$$f(x) = \overline{f(x)} + f'(x)$$

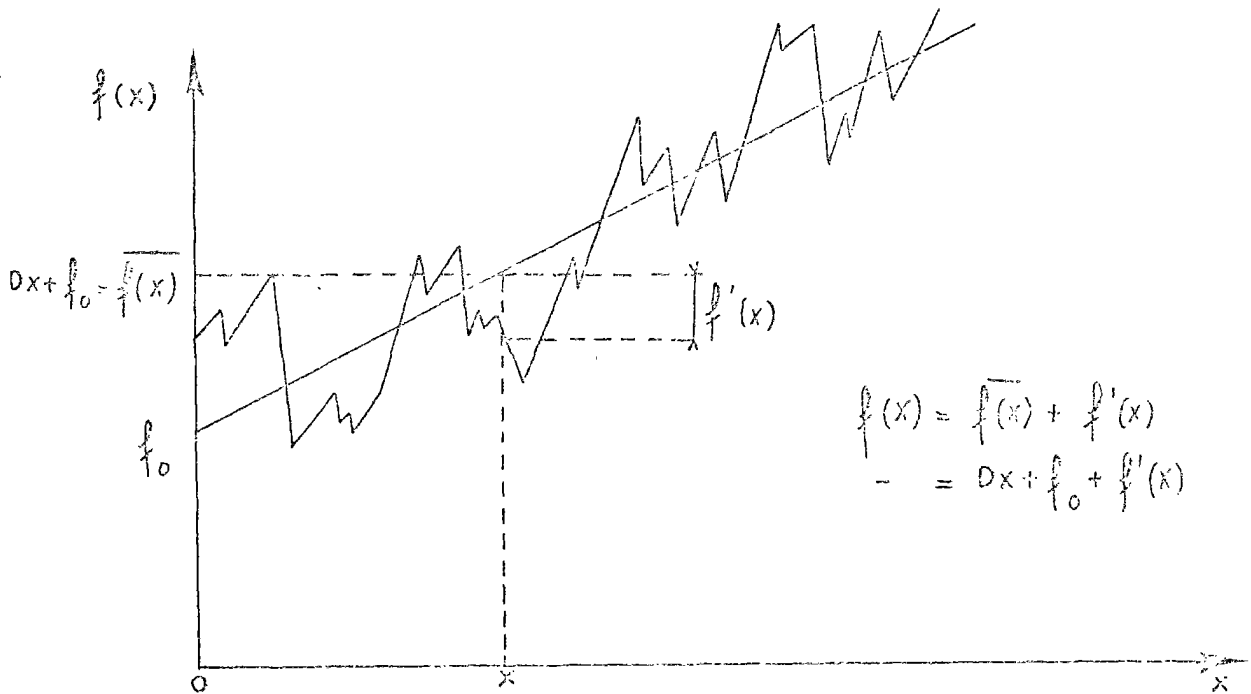
la moyenne  $\overline{f(x)}$  n'étant plus indépendante du point  $x$ , l'hypothèse de stationnarité de la fonction aléatoire  $f(x)$  n'est plus satisfaite, sauf dans le cas d'une dérive linéaire caractérisée par le gradient constant  $D$  :

alors :  $\overline{f(x)} = D \cdot x + f_0$  (cf fig. 3.4 page 21)

alors  $f(x) = f'(x) + D \cdot x + f_0$

$$f(x+h) - f(x) = [f'(x+h) - f'(x)] + Dh$$

$$2\gamma(h) = 2\gamma'(h) + D^2 \cdot h^2 \text{ puisque } f'(x) \text{ est stationnaire}$$



$$\begin{aligned} f(x) &= \overline{f(x)} + f'(x) \\ &= Dx + f_0 + f'(x) \end{aligned}$$

Fig. 3.4 : Dérive linéaire de la variable régionalisée suivant x

Le variogramme  $2\gamma(h)$  de la fonction  $f(x)$  est donc  $2\gamma'(h)$  celui de la fonction stationnaire, c'est à dire sans dérive, majoré d'un terme parabolique  $D^2 \cdot h^2$  qui pour des valeurs de  $h$  élevées, modifie considérablement la forme du variogramme  $2\gamma'(h)$ , alors qu'il n'intervient pas pour les petites valeurs de  $h$ .

Pour étudier  $f(x)$  à partir du variogramme il faut donc déterminer la pente  $D$  de la dérive, éliminer le

terme  $D^2 h^2$  pour obtenir  $2\gamma'(h)$  et étudier  $f'(x)$  sachant que  $f(x) = f'(x) + D \cdot x + f_0$ ,

- voyons l'influence d'une dérive linéaire de  $f(x)$  sur ces fonctions de covariance avec  $g(x)$ :

$$f(x) = f'(x) + D \cdot x + f_0$$

$$\varphi_{f g}(h) = \int f(x) \cdot g(x+h) dx$$

$$= \varphi_{f' g}(h) + D \varphi_{x g}(h) + f_0 \bar{g} \quad \bar{g} \text{ moyenne de } g(x)$$

$$\varphi_{g f}(h) = \varphi_{g f'}(h) + D \varphi_{g x}(h) + \frac{D}{I_0} \bar{g}$$

$$= \check{\varphi}_{f g}(h)$$

### 3.3 - Fonction de dilution

- Soit une quantité  $\mu(t)$  concentrée initialement à l'instant  $t$ ; il y a dilution de  $\mu(t)$  dans le temps quand cette quantité  $\mu(t)$  se trouve ensuite répartie sur un intervalle de temps déterminé.

La fonction de dilution  $f(h)$  définit la fraction de la quantité  $\mu(t)$  qui, après dilution, se retrouvera à l'instant  $(t+h)$ ; soit  $\mu_f(t+h)$  la quantité à l'instant  $(t+h)$  provenant de la dilution de  $\mu(t)$ :

$$\mu_f(t+h) = f(h) \mu(t) \quad (\text{cf fig. 3.5 page 23})$$

La fonction de dilution  $f(h)$  est définie sur un certain intervalle  $[0 T]$ , fini ou non, indiquant la zone

d'influence de  $\mu(t)$  après dilution ; d'autre part, comme la quantité initiale  $\mu(t)$  doit se conserver après dilution cela suppose que :

$$\int_0^T f(h) dh = 1 \quad \text{et} \quad \mu(t) = \int_0^T \mu_f(t+h) dh$$

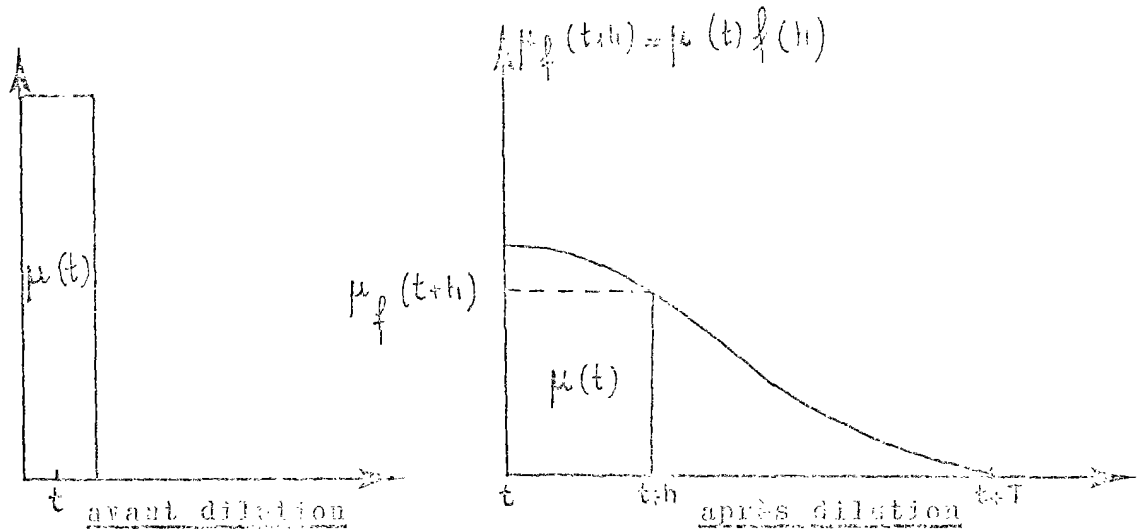


Fig. 3.5 : Répartition dans le temps d'une même quantité avant et après dilution

- Si plusieurs quantités  $\mu(t_i)$  sont implantées à des instants différents  $t_1, t_2, \dots, t_i$ , chacune va se diluer dans le temps suivant la loi de dilution  $f(h)$  ; à un instant quelconque  $x$ , s'ajouteront entre eux les résultats de toutes ces dilutions ; soit  $\mu_f(x)$  cette quantité :

$$\mu_f(x) = \sum_i \mu(t_i) \cdot f(x - t_i)$$

$$\mu_f(x) = \sum_i \mu(x - h_i) \cdot f(h_i)$$

en posant  $h_i = x - t_i$

Or, la fonction de dilution est définie sur un certain intervalle  $[0, T]$  : ainsi ne pourront intervenir en .x., donc contribuer à la quantité  $\mu_f(x)$ , que les quantités  $\mu(t_i)$  implantées à un instant  $t_i$ , précédant de moins de T l'instant .x. (car il faut que  $h_i = x - t_i \leq T$ ) et n'étant pas postérieur à l'instant x (car il faut que  $t_i = x - h_i \geq 0$ ).

Exemple : la fonction de dilution est linéaire décroissante et définie sur l'intervalle  $[0, T]$  ; on suppose que les quantités  $\mu(t_i)$ , implantées à différents instants .t<sub>i</sub>, sont toutes égales à  $\mu$  (cf fig. 3.6).

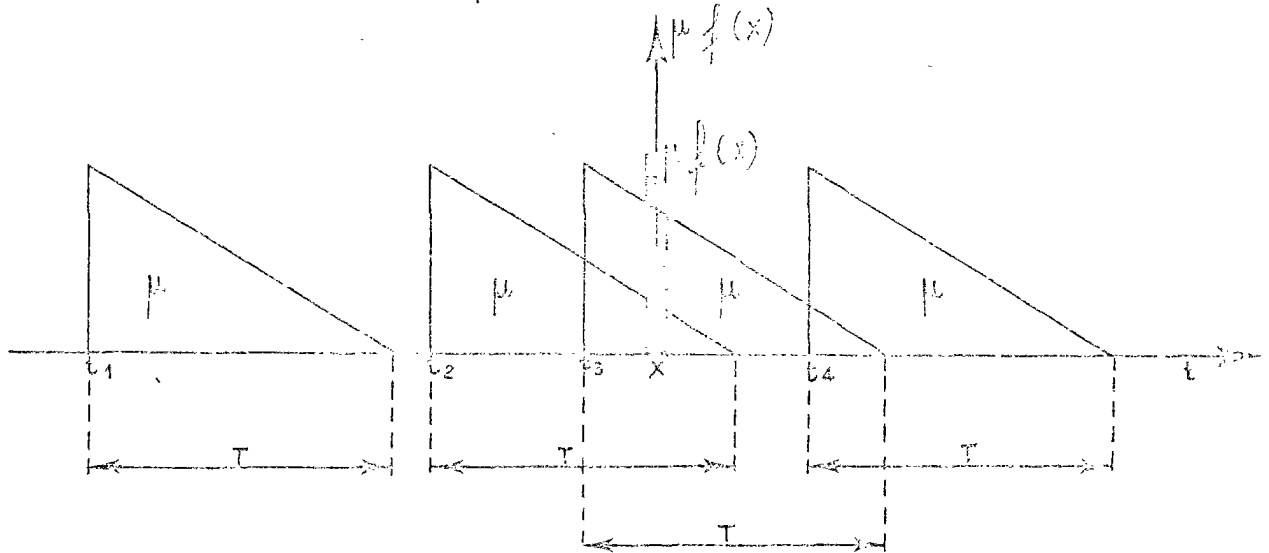


Fig. 3.6 : Somme des dilutions à l'instant x

seuls les instants  $t_2$  et  $t_3$  pour lesquels  $0 \leq x - t_i \leq T$  influenceront la quantité  $\mu_f(x)$  obtenue en .x. après dilution, influences définies par les coefficients  $f_f(x - t_2)$  pour  $\mu(t_2)$  et  $f_f(x - t_3)$  pour  $\mu(t_3)$

$$\mu_f(x) = f_f(x - t_2) \mu(t_2) + f_f(x - t_3) \mu(t_3)$$

- en passant à la notation différentielle on obtient :

$$\mu_f(x) = \int_0^T \mu(x-h) f_f(h) dh$$

ou encore avec la notation du produit de convolution :

$$\mu_f = \mu * f$$

... il se peut que la dilution ne commence qu'après un retard  $\tau$ , correspondant par exemple au temps de traversée de la quantité  $\mu(t)$  passant à travers un filtre.

La proportion de  $\mu(t)$  intervenant à l'instant  $x$  est alors :

$$f(x - t - \tau) \quad \text{et non plus : } f(x - t).$$

La quantité que l'on retrouve après dilution de  $\mu(t)$  en  $x$  est maintenant :

$$\mu_f(x) = \mu(t) f(x - t - \tau) = \mu(x + \tau - h) f(h)$$

en posant :  $h = x - t - \tau = \mu_f(x - \tau)$ .

Si la dilution commence avec un retard  $\tau$ , le résultat en  $x$  de cette dilution est le même que celui de la dilution sans retard en  $(x - \tau)$  (cf fig. 3.7).

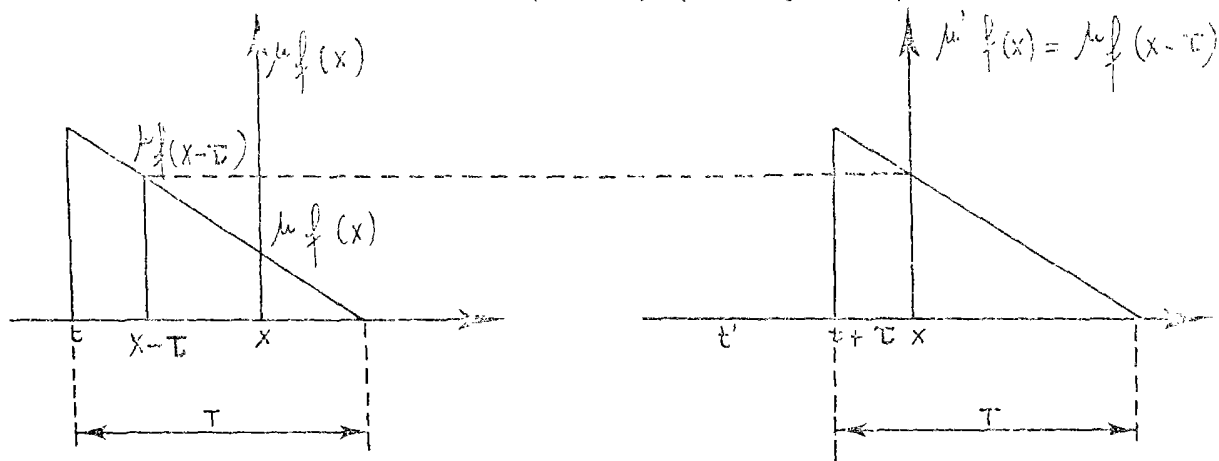


Fig. 3.7 : Dilution sans et avec retard au démarrage

En reprenant la notation différentielle on obtient de même :

$$\begin{aligned} \mu'_{\frac{f}{\tau}}(x) &= \int_0^{\tau} \mu(x-\tau+h) \frac{f}{\tau}(h) dh \\ \mu'_{\frac{f}{\tau}}(x) &= \mu'_{\frac{f}{\tau}}(x-\tau) \end{aligned}$$

### 3.4 - Ajustement d'un variogramme expérimental à un modèle théorique

Les variogrammes sont définis théoriquement sur un champ d'observation infini ; dans la pratique cependant, les observations ne sont faites que sur une période de durée  $.H.$  ; le variogramme obtenu à partir de ces observations en nombre limité ne sera vraiment représentatif du phénomène étudié que pour des valeurs de pas  $h$ , faibles par rapport à la durée  $.H.$  de l'échantillon (en pratique :  $h \leq \frac{H}{2}$ ) de telle sorte que le nombre de couples  $\left[ \frac{f}{\tau}(x), \frac{f}{\tau}(x+h) \right]^2$  soit suffisant pour éliminer en moyenne la composante aléatoire.

Ajuster un variogramme expérimental défini sur un champ  $.H.$  à un modèle théorique, c'est déterminer l'équation et la forme de ce variogramme s'il était défini sur un champ d'observation infini ; connaissant ce modèle  $2 \Gamma(h)$  il sera alors possible d'en déduire la fonction origine  $\frac{f}{\tau}(x)$ .

Il existe un certain nombre de modèles simples pour lesquels calculs et abaques ont déjà été faits (cf thèse de J. Serra) en particulier à une dimension :

Le schéma de Matheron  $\left\{ \begin{array}{l} 2 \gamma(h) = \frac{2C}{h_0} h, \quad h \leq h_0 \\ 2 \gamma(h) = 2C, \quad h \geq h_0 \end{array} \right.$

Le schéma de Fomery       $2 \gamma (h) = 2C \left[ 1 - e^{-\frac{h}{h_0}} \right]$

Nous allons étudier l'ajustement au modèle théorique :

$$2 \Gamma (h) = 2C \left[ 1 - e^{-\frac{h}{h_0}} \left( 1 + \frac{h}{h_0} \right) \right]$$

(cf fig. 3.8 & 9 - pages 23 & 29)

qui est celui d'une fonction gamma d'ordre 2 :

$$f(x) = F \frac{x}{h_0^2} e^{-\frac{x}{h_0}} \quad \text{avec } x \geq 0$$

(cf fig. 3.9)

en posant  $2C = \frac{F^2}{2 h_0}$  notons que  $\int_0^{\infty} f(x) dx = F$

ce variogramme est caractérisé :

- par son palier asymptotique  $2C$
- par sa tangente à l'origine nulle
- par son point d'inflexion de coordonnées

$$\left[ h_0, 2C \left( 1 - \frac{2}{e} \right) \right]$$

- par sa pente d'inflexion  $p = \frac{2C}{h_0 e}$  avec  $e = 2,718$

Soit maintenant un variogramme expérimental défini sur un champ H, et dont la forme générale est semblable à celle de  $2 \Gamma(h)$  ; ajuster ce variogramme à un tel modèle consiste à déterminer les paramètres  $h_0$  et  $2C$  qui conviennent.

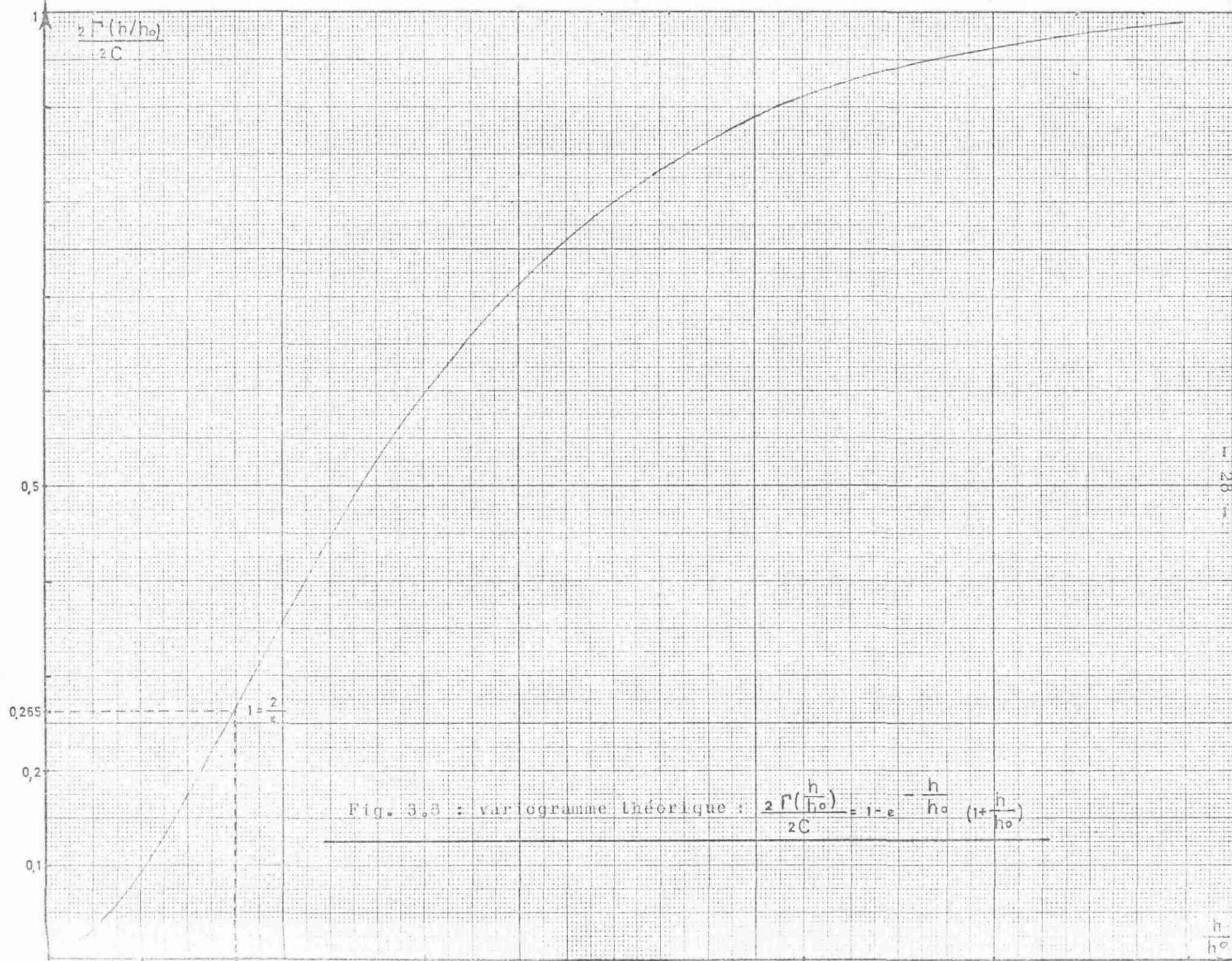


Fig. 3.3 : variogramme théorique :  $\frac{2\Gamma(\frac{h}{h_0})}{2C} = 1 - e^{-\frac{h}{h_0} (1 + \frac{h}{h_0})}$

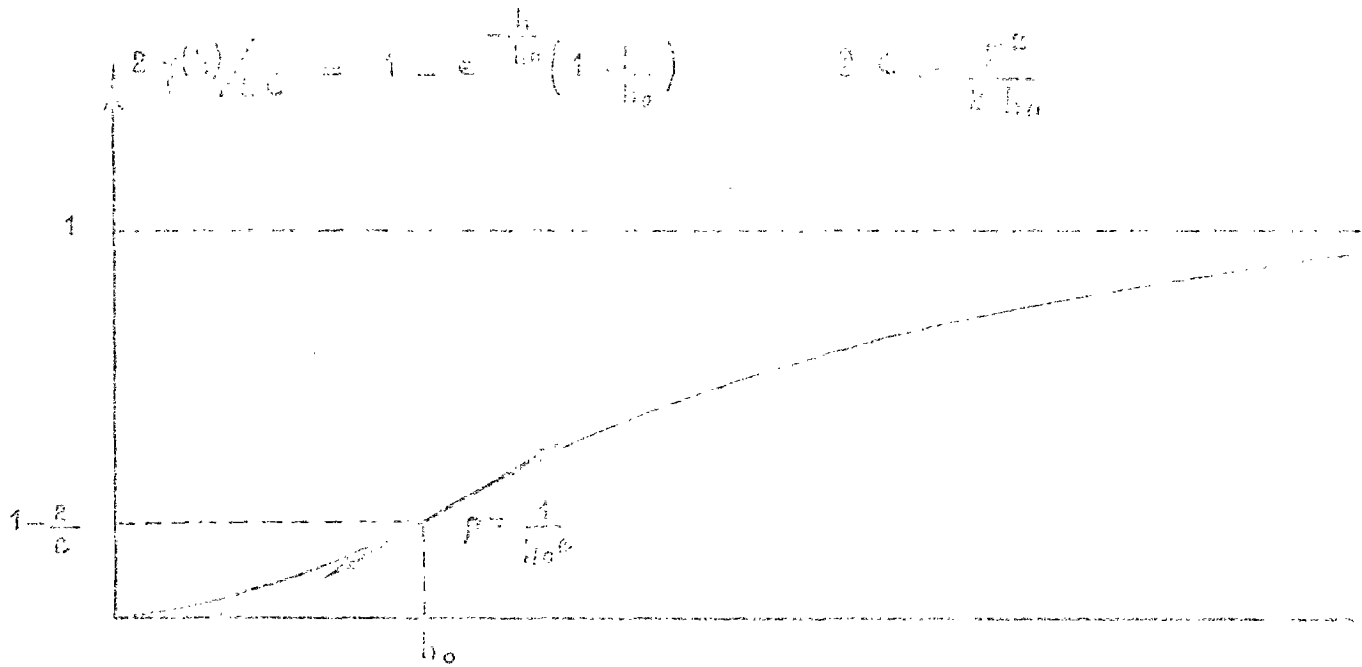
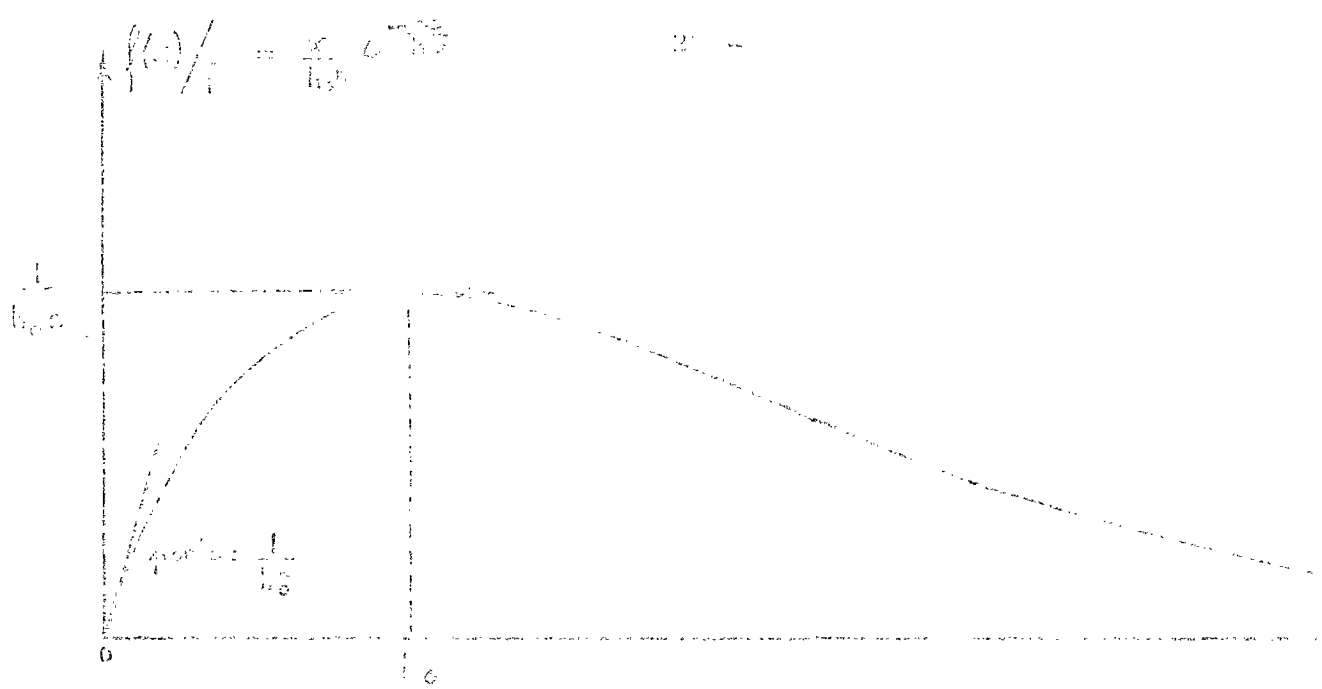


Fig. 3.9 : Loi des n d'ordre 2 et son variogramme

Les caractéristiques du variogramme sont :

- l'attente de son champ  $H$
- une estimation graphique  $p$  de la pente d'interflexion
- une estimation  $\sigma^{2*}$  de la variance à priori des observations dans le champ  $H$ .

Or, on sait (cf à 3.2.1) que cette variance  $\sigma^{2*}$  dans un champ  $H$  est déterminée par :

$$\sigma^{2*} = F(H) = \frac{2}{H^2} \int_0^H (H-x) \gamma(x) dx$$

avec  $F(x) = C$

dans le cas présent :

$$\sigma^{2*} = F(H) = \frac{2}{H^2} \int_0^H (H-x) C \left[ 1 - e^{-\frac{x}{h_0}} \left( 1 + \frac{x}{h_0} \right) \right] dx$$

$$F(H) = C \left[ 1 - \frac{4h_0}{H} + \frac{6h_0^2}{H^2} - \frac{h_0}{H} e^{-\frac{H}{h_0}} \left( 1 + \frac{3h_0}{H} \right) \right]$$

ainsi la détermination de  $2C$  et  $h_0$  se fera par la résolution du système :

$$\sigma^{2*} = C \left[ 1 - \frac{4h_0}{H} + \frac{6h_0^2}{H^2} - \frac{h_0}{H} e^{-\frac{H}{h_0}} \left( 1 + \frac{3h_0}{H} \right) \right]$$

$$p = \frac{2C}{h_0 e}$$

soit encore :

$$\sigma \left( \frac{h_0}{H} \right) = \frac{2 \sigma^{2*}}{2C} = \frac{1 - \frac{4h_0}{H} + \frac{6h_0^2}{H^2} - \frac{h_0}{H} e^{-\frac{H}{h_0}} \left( 1 + \frac{3h_0}{H} \right)}{h_0 e}$$

$$\theta \left( \frac{h_0}{H} \right) = \frac{2 \sigma^{2*}}{2C} = \frac{2 \sigma^{2*}}{p^* e} \cdot \frac{1}{h_0} = \frac{2 \sigma^{2*}}{p^* c H} \cdot \frac{H}{h_0}$$

La première équation  $\hat{h}_0(h_0)$  qui ne dépend que de  $\frac{h_0}{H}$  est valable quelque soit le  $\frac{h_0}{H}$  varlogramme expérimental (cf fig. 3.10 page 32).

La deuxième équation  $\hat{h}_0(h_0)$  est une hyperbole qui dépend, par  $H, G^{2.5}$  et  $\rho^*$ , du  $\frac{h_0}{H}$  varlogramme.

L'intersection de ces 2 courbes donnera la valeur de  $\frac{h_0}{H}$  et de  $\frac{2G^{2.5}}{2C}$  et donc de  $h_0$  et  $C_0$ .

Une vérification de la validité de l'ajustement pourra être faite par les coordonnées du point d'inflexion et le palier de varlogramme expérimental.

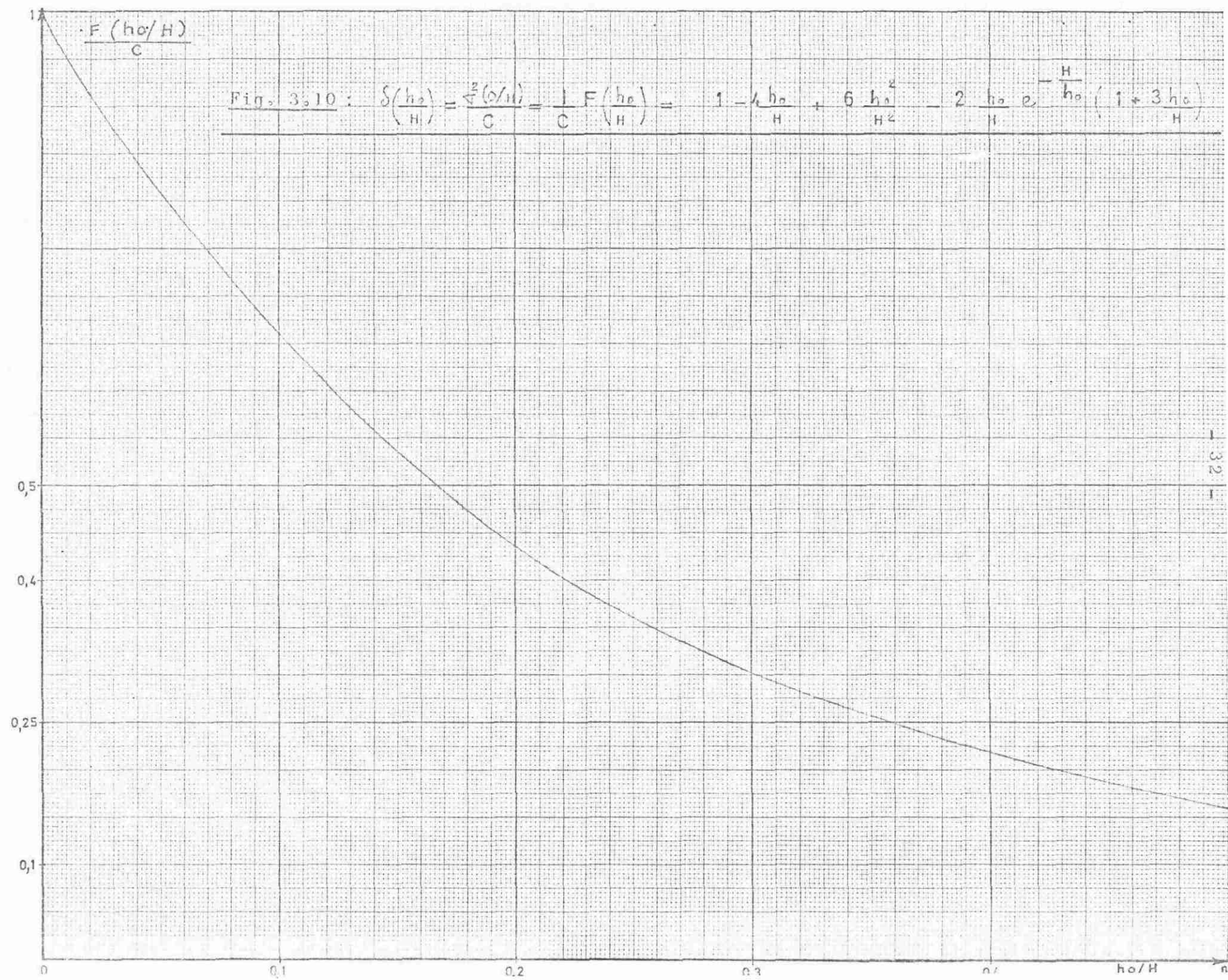
#### 4 - APPLICATION A LA MINE DE SAINT-PIERRE-MONT

##### 4.1 - Introduction

##### 4.1.1 - Choix de Saint-Pierre-Mont

Pour étudier de façon précise l'exhaure, il faut considérer une mine où des mesures de pluviométrie locale et d'exhaure sont faites très fréquemment, tous les jours si possible ; d'autre part, son système d'exhaure et de collecte des eaux doit être le plus possible indépendant des mines avoisinantes pour en simplifier l'étude ; enfin si ces mesures sont effectuées sur une grande période, cela doit permettre de déterminer l'évolution de l'exhaure et donc du filtre en fonction de l'avance de l'exploitation.

Deux mines au moins possèdent des mesures journalières de pluie et d'exhaure sur plus de 35 ans : SAINT-PIERRE-MONT et AUBOUE (Mine du Paradis). Comme première application nous considérerons la mine de SAINT-PIERRE-MONT.



#### 4.1.2 - Présentation de la mine de Saint-Pierremont

La concession de la mine de SAINT-PIERRE-MONT - MANCIEULLES (917 ha) se trouve dans le bassin d'AMER-MONT - LANDRES - OTTANGE (cf monographie de la mine dans le rapport du B.R.G.M. 1960) ; elle est limitée au Nord par les mines de MAIRY, TUCQUEGNIEUX et ANDERNY-CHEVILLON, au Sud par une zone inexploitée au Nord de la faille de Bois d'Avril ; l'altitude moyenne varie entre 250 et 270 mètres.

Sur la majeure partie de la concession, affleurent des marnes imperméables qui protègent partiellement des infiltrations les assises du calcaire de Jaumont fortement diaclasées et fissurées ; ce niveau joue un rôle très important dans le mécanisme d'infiltration des eaux car il est directement influencé par le régime local des pluies : il existe tout un réseau de circulations karstiques qui en font un réservoir très complexe, et dont une partie a pu être reconnue (cf rapport MAUBEUGE) : en particulier une diaclase très aquifère a été décelée en 1930 à 20 mètres de profondeur et une grande partie de son débit est pompée au puits de la Forêt créé à cette date ; ce pompage diminue d'autant l'exhaure du fond car les dépilages ont créé des communications très rapides entre les karsts et le fond, et d'autre part il permet une économie substantielle due à une hauteur de refoulement beaucoup plus faible.

L'exploitation au fond se fait à une profondeur d'environ 180 mètres ; à ce niveau les venues d'eau ont trois provenances :

- L'Ouest de la concession qui n'est que très peu exploité où l'on constate un débit faible et variant peu suivant les précipitations (de 2 à 5 m<sup>3</sup>/mn) et qui peut corres-

pondre à l'écoulement d'une réserve géologique.

- Des quartiers déjà exploités à l'Est qui fournissent l'eau potable, avec un débit faible et assez peu variable (2 à 5 m<sup>3</sup>/mn) comme si les terrains avaient retrouvé une certaine cohésion et stabilité diminuant l'importance et la rapidité des infiltrations.

- Enfin, les quartiers en cours d'exploitation qui fournissent un débit beaucoup plus variable et important puisqu'il peut dépasser 25 m<sup>3</sup>/mn.

- L'exhaure totale du fond est donc toujours supérieure à 4 m<sup>3</sup>/mn et peut dépasser 30 m<sup>3</sup>/mn.

L'exhaure du puits de la Forêt, qui en moyenne est du même ordre de grandeur que celle du fond, présente des variations beaucoup plus importantes, allant d'un débit nul, en été généralement, à plus de 40 m<sup>3</sup>/mn l'hiver ; ceci est dû à la faible épaisseur du filtre à ce niveau où il n'y a pas de grand volant d'eau et où l'évapotranspiration joue un grand rôle (cf mémoire de L. KLEIN).

Les eaux du fond, après avoir été rassemblées dans des albraques situées à une profondeur de 153 mètres, sont exhaurées et évacuées dans des cours d'eau dont les lits sont bétonnés (Mance & Woigot), sauf une partie des eaux potables servant à l'alimentation de la mine et des agglomérations voisines.

#### 4.1.3 - Nature des données

Trois séries de données ont été relevées à la mine de SAINT-PIERREMONT, avec une interruption de 1940

à 1944 :

- depuis 1925, des mesures journalières, faites à heure fixe, de pluviométrie (mn/jour) au moyen d'un pluviomètre normalisé, sur le carreau de la mine,

- depuis 1925, également des mesures journalières des venues d'eau au fond faites à des déversoirs dans les différents quartiers de la mine, la mesure instantanée de débit à ces déversoirs est la valeur attribuée au débit moyen de la journée (m<sup>3</sup>/mn).

C'est le débit des déversoirs, donc des venues d'eau réelles, qui est significatif, et non pas celui des pompes d'exhaure ; en effet, l'exhaure ne suit pas exactement les variations des venues, du fait de la présence d'albraques où sont rassemblées les eaux et qui constituent un volant d'eau important ; le volume de ces albraques varie (dépôt des boues), leurs caractéristiques géométriques sont peu connues ainsi d'ailleurs que le débit exact des pompes ; d'autre part pour des raisons de coût moindre de l'électricité, le pompage se fait plutôt de nuit et les jours fériés que pendant la journée, les eaux étant stockées temporairement dans les albraques. C'est pourquoi il vaut mieux utiliser les mesures de débit faites aux déversoirs.

- Depuis 1930, date de création du puits de la Forêt, existe le relevé journalier des débits moyens de pompage de ce puits (m<sup>3</sup>/mn). En fait, tout ce qui passe dans le karst de la forêt n'est pas exhaure : une galerie bétonnée le reliant à la salle de pompage, seule une partie difficile à déterminer et variable suivant le niveau de l'eau dans le karst est détournée vers le puits où le pompage est permanent, le

nombre des pompes en action étant déterminé par le niveau de l'eau dans la galerie. Le reste du débit du karst doit vraisemblablement s'écouler au fond de la mine : en effet un arrêt de pompage du puits entraîne une augmentation des venues d'eau au fond avec un retard de moins de 24 heures : la relation est donc très rapide.

#### 4.1.4 - Utilisation des données

Nous avons vu que la fraction des eaux de pluie s'infiltrant effectivement et pouvant contribuer à l'exhaure variait fortement suivant les saisons ; ceci est particulièrement sensible si on considère l'évapotranspiration ; ces variations vont se traduire par une dérive saisonnière systématique de l'exhaure. Il importe pour rendre possible l'étude de l'exhaure par des méthodes géostatistiques, de se placer dans des périodes pendant lesquelles l'influence saisonnière est relativement constante ou au moins ne semble introduire qu'une dérive linéaire, dont il est possible de tenir compte.

Si on reprend les abattements sur la pluie dus à l'évapotranspiration que J. Chanzy a déterminé pour chaque mois (cf & 2.2) on peut diviser à priori l'année en 4 saisons de 3 mois qui répondent à peu près à ces conditions :

L'automne	(Septembre, Octobre, Novembre)
L'hiver	(Décembre, Janvier, Février)
Le printemps	(Mars, Avril, Mai)
L'été	(Juin, Juillet, Août)

cette séparation valable, pour l'évapotranspiration, ne le sera aussi pour l'exhaure que si le temps de traversée du

filtre (ou encore la portée de la dilution) est relativement faible par rapport à l'échantillon choisi de 90 jours ; alors pour chaque saison de 90 jours, on pourra comparer pluie et exhaure et en déduire la fonction de dilution traduisant la nature du filtre.

Afin d'avoir un plus grand nombre de données, on considère des groupes de 5 années ce qui donne des courbes expérimentales beaucoup plus régulières et donc mieux ajustables à des modèles théoriques ; on peut penser qu'en 5 ans les dépilages n'ont pas trop modifié la structure du filtre ; par contre il sera possible de comparer entre eux les résultats obtenus pour chaque groupe de 5 ans et déterminer ainsi l'influence de l'exploitation sur l'évolution de l'exhaure : cette étude, faute de temps, n'a pas pu être menée à bien dans le cadre de ce rapport.

Ainsi les données de pluviométrie, de venues d'eau au fond et d'exhaure du puits de la Forêt ont été regroupées en 4 saisons de 90 jours pour les 4 groupes de 5 années hydrologiques (de Septembre à Août) suivants :

Septembre 1944-Août 1949, 1949-54, 1954-59, 1959-64

ces données ont été reproduites sur cartes perforées de façon à pouvoir faire les calculs sur ordinateur (IBM 1130).

## 4.2 - Etude de la pluviométrie

### 4.2.1 - Introduction

- Pour déterminer la fonction de dilution de la pluie dans le temps lors de la traversée du filtre constitué par les morts-terrains, il faut d'abord étudier séparé-

ment l'entrée et la sortie du filtre, c'est à dire la pluviométrie et l'exhaure (ou les venues d'eau). Nous allons tout d'abord étudier la pluviométrie et ses variations dans le temps et dans l'espace :

- Dans le temps, cette étude doit se faire à plusieurs échelles ; en effet, les données constituent une série chronologique dont il faut connaître la tendance générale et les variations saisonnières qu'il faudra éliminer pour ne plus considérer que les fluctuations élémentaires qui seules caractérisent réellement le phénomène à cette petite échelle (cf fig. 4.2 page 38).

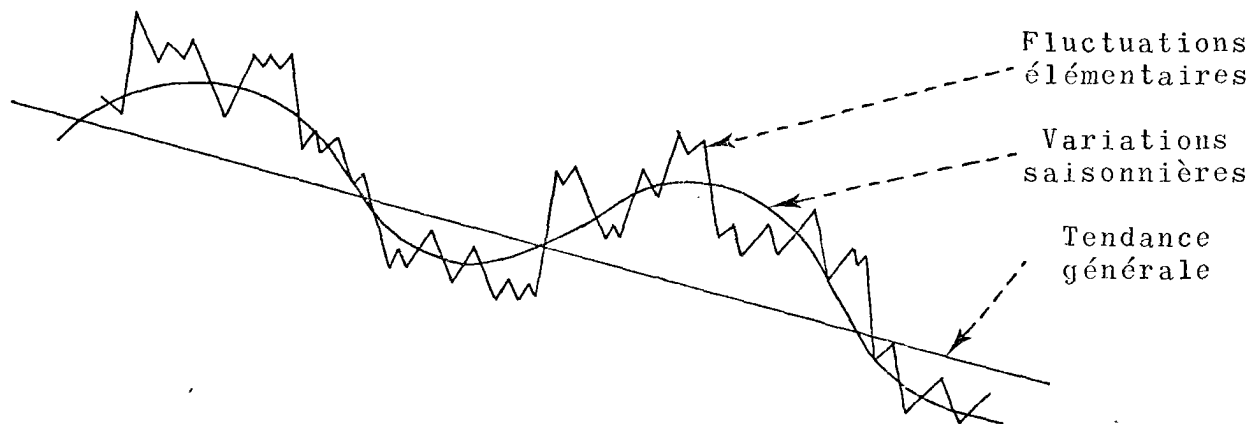


Fig. 4.2 : Décomposition d'une série chronologique

Pour déterminer la tendance générale, c'est à dire l'évolution climatique à long terme, qui peut se manifester par une dérive systématique, des cycles climatiques ou encore l'indépendance d'une année à une autre, nous utiliserons les précipitations annuelles.

Pour connaître les variations saisonnières dans l'année nous prendrons les précipitations mensuelles, qui

permettront également de comparer une même saison ou un même mois d'une année à une autre.

Enfin, les mesures journalières permettront d'étudier la répartition des pluies et des masses de nuages suivant les saisons ainsi que de la nature des impulsions pluviométriques subies par le filtre ; cette étude a été faite pour les 4 saisons des années hydrologiques 1959-1964.

- Il faut également étudier les variations de la pluie dans l'espace : en effet les mesures de précipitations se font de façon ponctuelle ; or, nous avons vu que le bassin d'alimentation de l'exhaure d'une mine pouvait recouvrir une région beaucoup plus vaste que la concession elle-même.

Il est donc nécessaire de déterminer à quelle région on peut étendre valablement les mesures d'un pluviomètre, et donc de comparer des pluviomètres entre eux pour connaître l'influence du relief, de l'altitude ou de la position géographique sur la pluie ; cette comparaison a été faite, également pour les années 1959-64 entre les pluviomètres de SAINT-PIERREMONT et de la mine du Paradis (AUBOUE).

#### 4.2.2 - Précipitations annuelles

- Le bassin ferrifère ne possédant pas de pluviomètre suffisamment ancien, nous utiliserons celui de Nancy qui est en service depuis 1840. Les conditions climatiques des deux régions ne semblant pas fondamentalement différentes nous considèrerons comme valables pour le bassin ferrifère les résultats qualitatifs obtenus pour NANCY (70 kms au Sud du bassin).

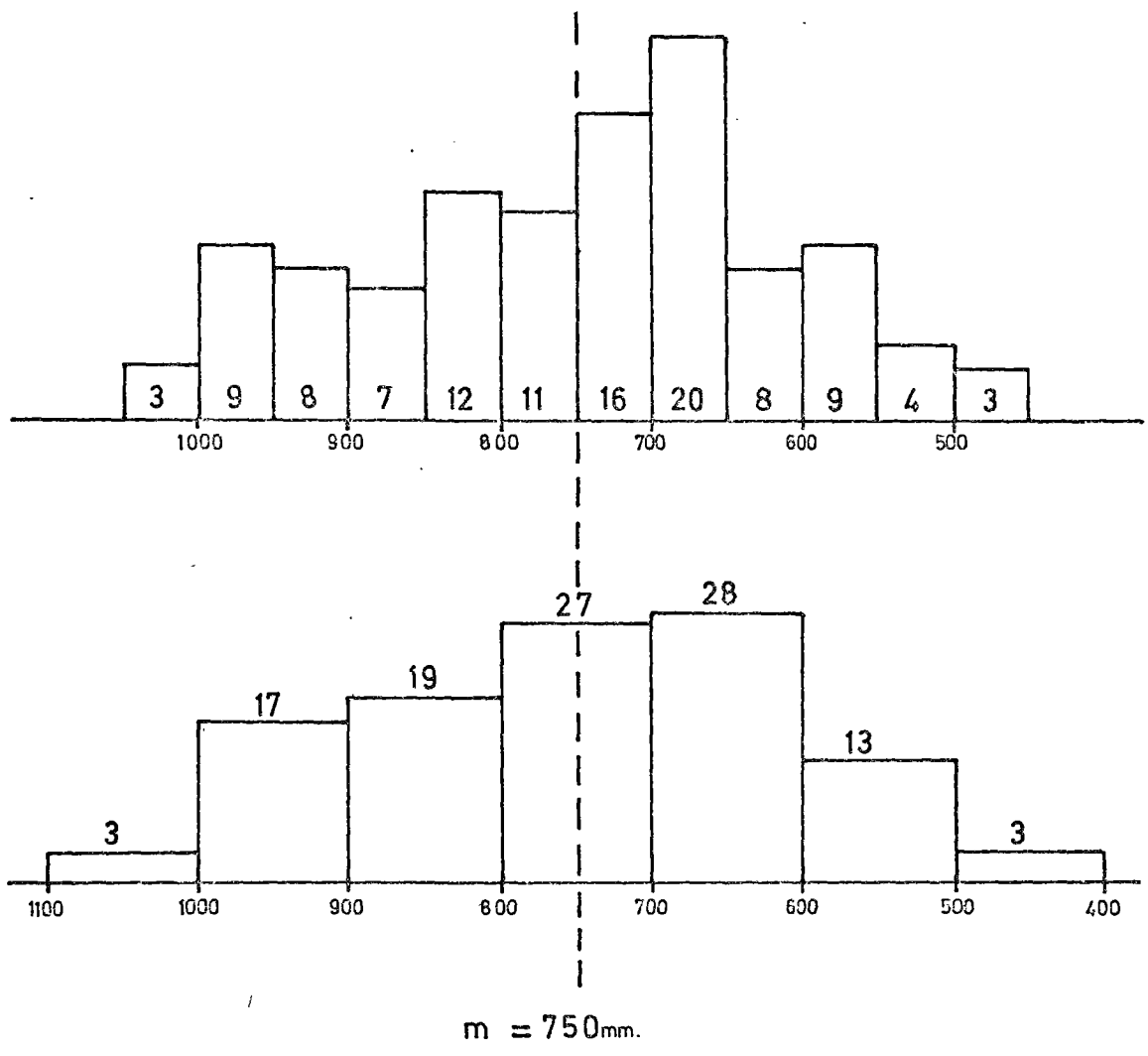


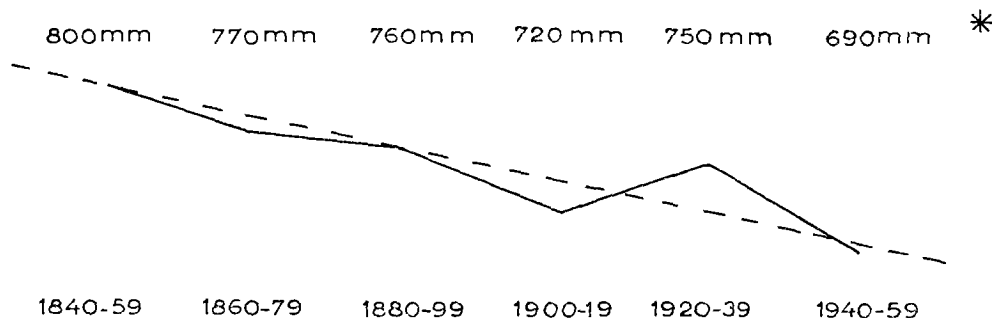
Fig. 4.3 : Histogrammes des précipitations annuelles à Nancy de 1840 à 1959

L'étude a porté sur 120 années, de 1840 à 1959, avec 110 mesures valables, ce qui donne une moyenne de précipitations annuelles :  $m = 750$  mm/an avec une variance et un écart type :  $\sigma^2 = 18\ 300$

$$\sigma = 135 \text{ mm/an}$$

- L'histogramme des 110 mesures (cf fig. 4.3 p. 40) est très étalé entre 550 et 1000 mm/an ce qui montre la grande dispersion des pluies annuelles, cependant les hauteurs de pluie les plus fréquentes sont entre 650 et 750 mm/an.

Il faut noter également une faible dérive linéaire décroissante des pluviométries annuelles : si on considère les moyennes effectuées sur 20 ans on obtient la courbe suivante : (fig. 4.4 p. 41)



\* moyenne sur 14 ans : il manque les mesures des 6 années de guerre

Fig. 4.4 : Dérive linéaire des pluviométries annuelles à Nancy

ceci signifierait que le climat lorrain devient plus sec : en 100 ans, la pluviosité annuelle a diminué de 100 mm soit de 12,5 % soit encore de 1 mm par an. La dérive est caractérisée par le coefficient  $D = -1 \text{ mm/an}^2$ .

- A partir des 110 mesures on obtient le variogramme  $2 \gamma'(h)$  (fig. 4.5 page 43) dont on a déduit le terme  $D^2 h^2$  dû à la dérive (cf & 3.2.3).

Ce variogramme expérimental s'ajuste très simplement à un effet de pépité pur de palier  $2 C_0 = 34.000$

$$\begin{aligned} (2 \gamma'(h) &= 0 && \text{si } h = 0 \\ (2 \gamma'(h) &= 2 C_0 = 34.000 && \text{si } h \neq 0 \end{aligned}$$

il y a donc indépendance totale, d'une année à une autre, des précipitations annuelles qui fluctuent de façon tout à fait aléatoire, donc imprévisible, autour de la tendance générale caractérisée par la dérive linéaire décroissante ; ceci est d'ailleurs confirmé par l'histogramme (fig. 4.3 p. 41) très étalé entre 500 et 1000 mm.

Ceci est un résultat très important qui permet de considérer chaque année comme une réalisation particulière de la variable aléatoire régionalisée dans le temps que constitue la pluie ; il sera alors possible d'ajouter les résultats obtenus pour l'ensemble de chaque année pour obtenir ceux d'un groupe d'années.

Ainsi nous avons pu montrer :

- L'existence d'une faible dérive linéaire décroissante
- L'indépendance des pluviométries annuelles d'une année à une autre.

#### 4.2.3 - Précipitations mensuelles

- A SAINT-PIERREMONT existe un pluviomètre depuis 1925 ce qui représente une période suffisamment

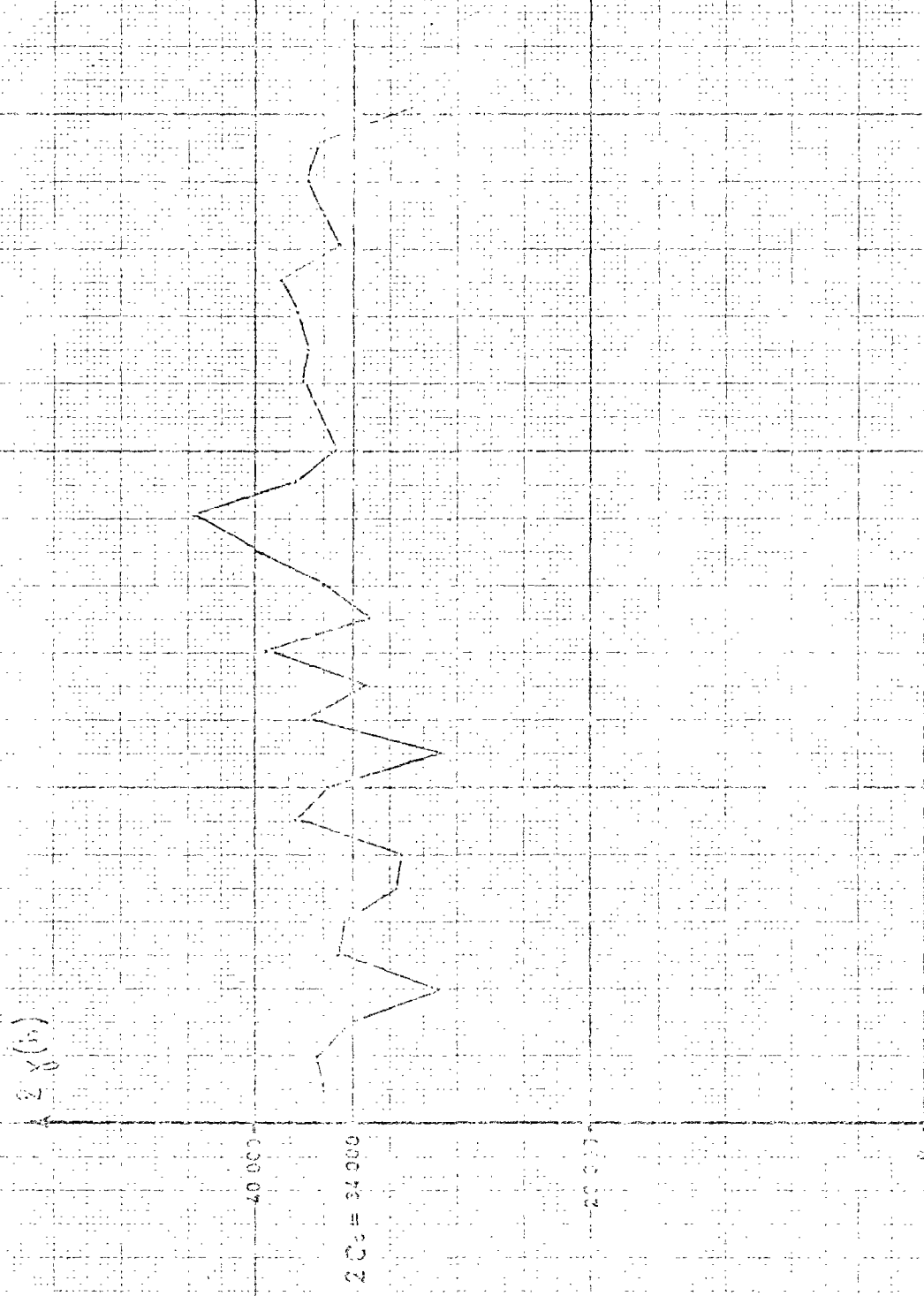


Fig. 1.3. A. I. L. 1948. The design of the computer (M. I. L. 1948. 1948. 1948.)

longue pour une étude statistique des pluviosités mensuelles (mm/j) et de leurs variations saisonnières.

- Considérons une période de 20 ans : 1944-64 soit 240 données avec des mois de 30 jours ; nous obtenons une moyenne générale  $m = 2,1$  mm/jour et une variance et un écart type  $\sigma^2 = 1,50$

$\sigma = 1,2$  mm/jour ce qui correspond à une forte dispersion autour de la moyenne.

- Pour l'ensemble des 240 mesures, on observe l'histogramme de la fig. 4.6 ci-dessous qui montre également une forte dispersion entre 0 et 4 mm/jour avec une plus grande fréquence pour une pluviosité de 1 à 1,5 mm/jour.

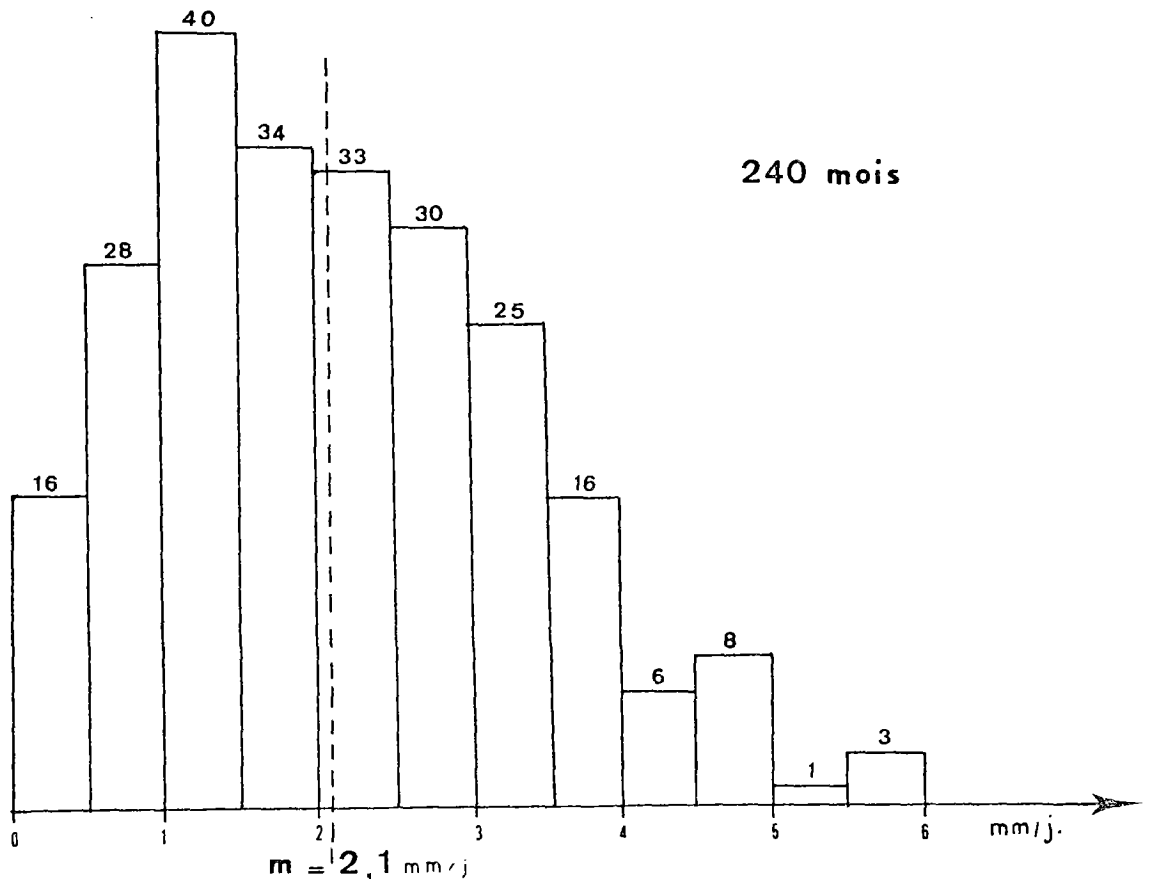


Fig. 4.6 : Histogramme des précipitations mensuelles de St-Pierremont (1944-1964)

- Cependant, tout ceci ne donne qu'une vue très générale sur les pluviosités mensuelles car on ne tient pas compte des variations saisonnières ; pour les mettre en évidence nous allons prendre 360 données correspondant aux 2 périodes 1925-1935 et 1944-1964.

Soit 30 ans pour l'ensemble, on obtient une moyenne  $m = 2,05 \text{ mm/j}$  avec une variance et un écart type

$$\sigma^2 = 1,5$$

$$\sigma = 1,2 \text{ mm/j}$$

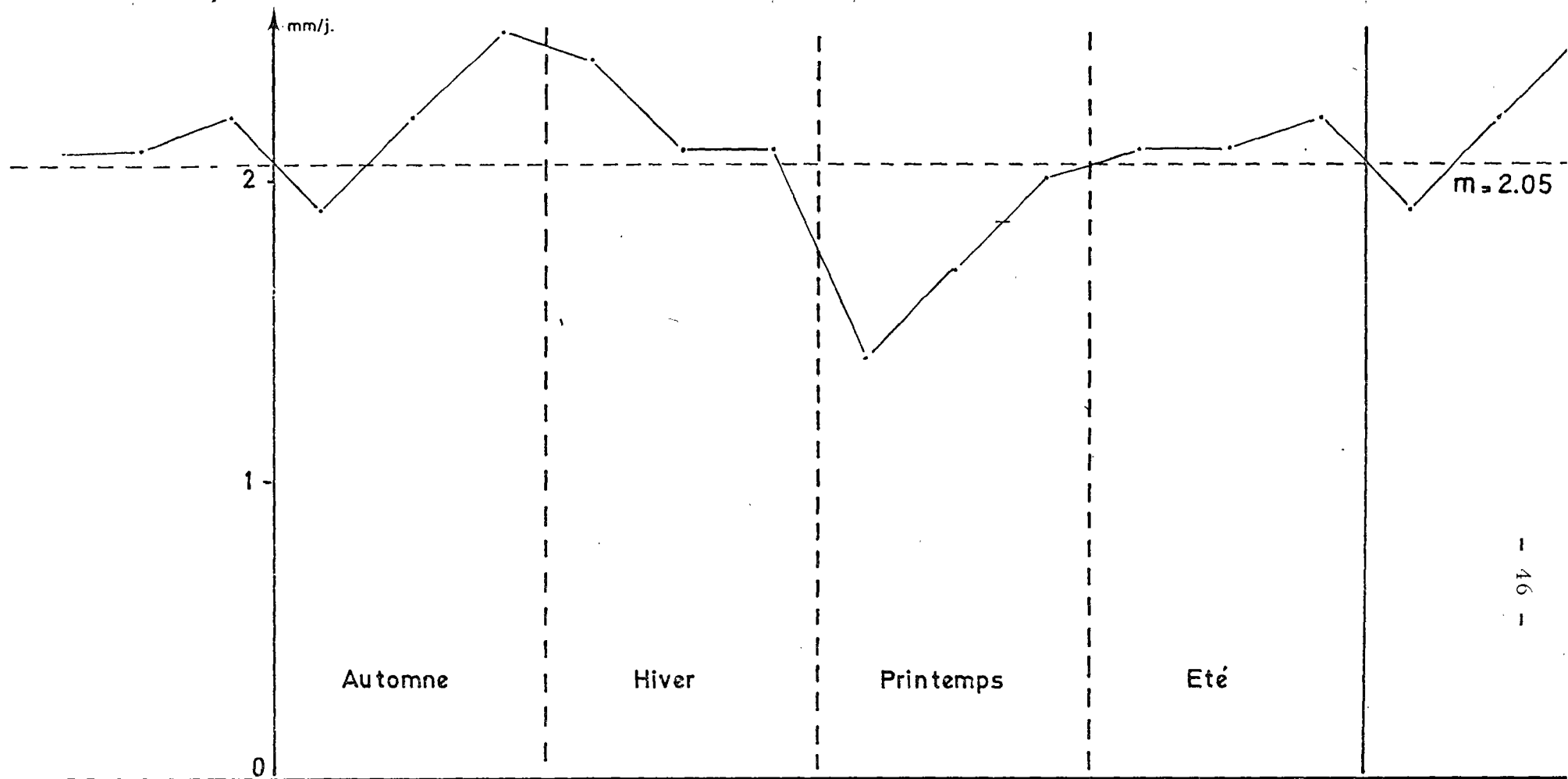
ce qui est identique aux résultats précédents sur 20 ans. Pour chaque mois nous obtenons une pluviosité moyenne sur 30 ans avec une variance et un écart type, résultats consignés dans le tableau de la figure 4.7 page 46.

Ces résultats mettent en évidence l'existence de 3 saisons assez bien différenciées :

- Une saison pluvieuse - correspondant aux mois de Novembre et Décembre (2,5 mm/jour en Novembre).

- Une saison sèche qui lui succède - ce sont les mois de Mars et d'Avril (1,4 mm/jour en Mars).

- Une saison de pluviosité moyenne - de Mai à Octobre (2,1 mm/jour en moyenne).



J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	M
(mm./j) moyenne m			1,9	2,2	2,5	2,4	2,1	2,1	1,4	1,7	2,0	2,1	2,1	2,2			
Variance $\sigma^2$			1,4	1,9	1,9	1,9	1,1	1,5	1,0	0,8	1,2	1,0	1,7	1,8			
(mm./j) ecart-type			1,2	1,4	1,4	1,4	1,0	1,2	1,0	0,9	1,1	1,0	1,3	1,3			

Les variations des pluviosités mensuelles, d'un mois à un autre, sont donc importantes puisqu'elles vont presque du simple au double.

Enfin, la comparaison des écarts-type pour chaque mois montre que l'importance des pluies d'une année à l'autre est très variable pour tous les mois ( $\sigma \neq \underline{m}$ ) cependant on peut noter que les mois pluvieux sont aussi<sup>2</sup> les plus variables ( $\sigma = 1,4$  mm/jour) tandis que les mois secs sont plus stables ( $\sigma = 0,9$  mm/j).

- Pour mieux mettre en évidence les interactions entre les mois, considérons le variogramme des précipitations mensuelles de SAINT-PIERREMONT sur 20 ans (1944-64) (fig. 4.8 page 48).

Le variogramme s'ajuste simplement au covariogramme théorique :

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= 0 && \text{si } h = 0 \\ 2\gamma(h) &= 2,4 + 0,2 h && \\ 2\gamma(h) &= 3 && \text{si } h \geq a = 3 \text{ mois} \end{aligned}$$

avec une portée  $a = 3$  mois, une constante de pépite  $2C_0 = 2,4$  et un palier  $2C = 3$  (cf & 3.2.2).

On constate donc un fort effet de pépite puisque

$$\xi = \frac{2 C_0}{2 C} = 80\% \quad :$$

Les précipitations mensuelles sont très fortement aléatoires donc imprévisibles ; cependant l'indépendance totale n'est atteinte qu'après 3 mois : on retrouve bien la notion de saison de 3 mois ainsi que l'alternance de saisons sèches et pluvieuses mise en évidence par "l'effet de trou" pour un décalage de 4 mois, décalage que l'on retrouve entre Novembre et Mars.

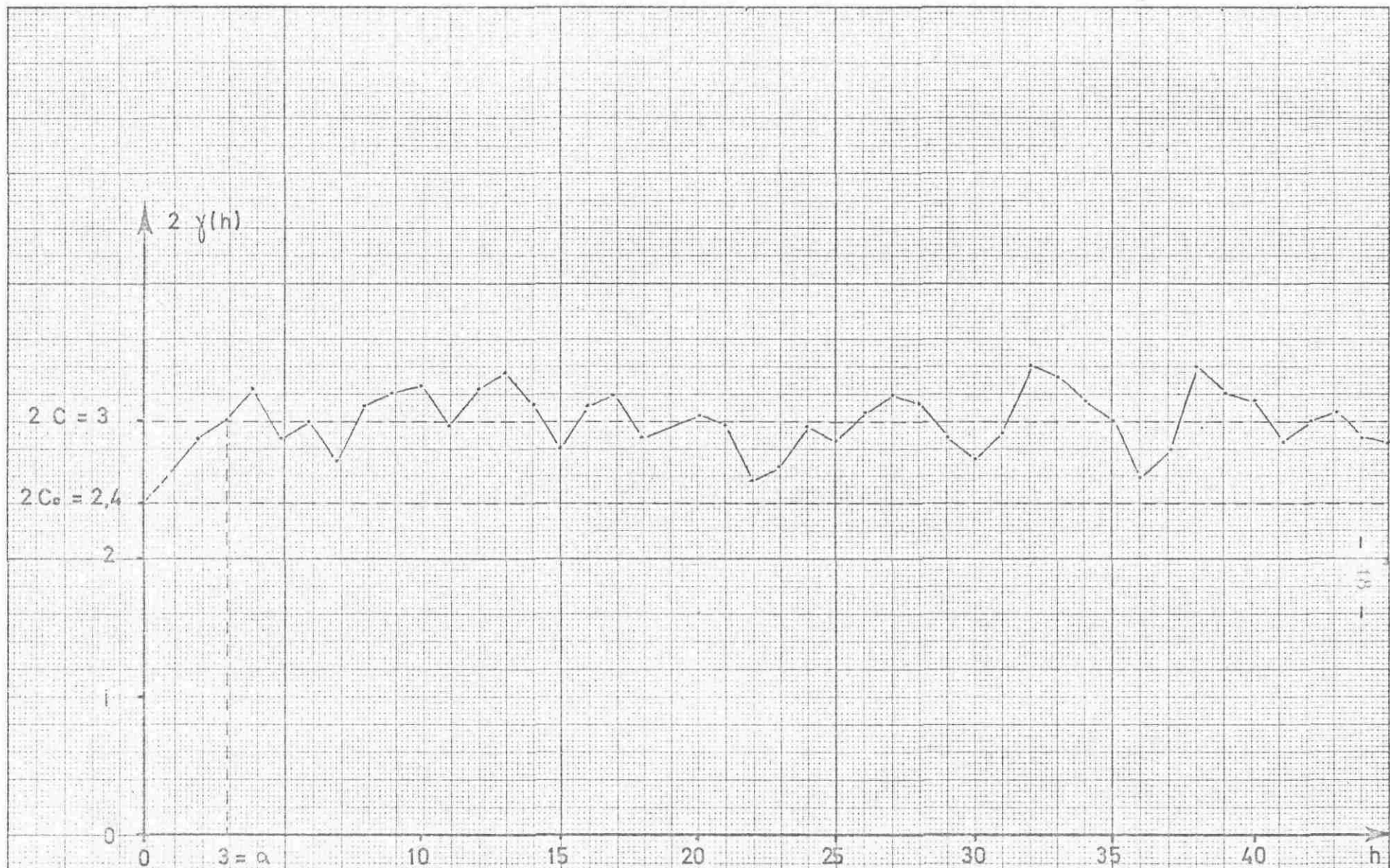


Fig. 4.8 : Variogramme des pluies mensuelles de St-Pierremont (1944-1964)

D'autre part, on ne trouve pas de corrélation significative pour un même mois d'une année à une autre, puisque pour un décalage de 12 mois il y a indépendance : ceci est un résultat important qui précise celui obtenu pour les pluviosités annuelles : pour chacun des mois on peut considérer les pluviométries mensuelles indépendantes d'une année à une autre et ajouter les résultats de chaque année pour avoir ceux d'un groupe d'années.

Nous avons donc :

- montré l'existence de variations saisonnières importantes d'un mois à un autre,
- retrouvé et justifié la notion de saison de 3 mois,
- montré l'indépendance des pluies mensuelles d'une année à une autre.

#### 4.2.4 - Précipitations journalières

- De ce qui précède, nous déduisons l'existence de saisons de 3 mois dans lesquelles les pluies et l'évapotranspiration sont, soit constantes en moyenne, soit sujettes à une dérive à peu près linéaire, ce qui permet de satisfaire à l'hypothèse de stationnarité de la variable régionalisée, la pluie dans le temps, par l'étude des covariogrammes (cf & 3.2.3).

Nous garderons donc cette division en 4 saisons et nous regrouperons les résultats pour un ensemble de 5 années : de Septembre 1959 à Août 1964 ; ayant montré & 4.2.3 l'indépendance des précipitations mensuelles et donc saisonnières d'une année à une autre, nous obtiendrons pour les 5 années une

moyenne et une variance :

$$m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 m_i \quad \sigma^2 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \sigma_i^2$$

de même pour les covariogrammes :

$$2 \gamma(h) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 2 \gamma_i(h) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 2 \gamma'_i(h) + \frac{1}{5} h^2 \sum_{i=1}^5 D_i^2$$

Pour chaque saison nous aurons donc 5 périodes de 90 jours soit 450 données en prenant des années de 360 jours.

- Les moyennes, variances et écart-type pour les 4 saisons sont rassemblés dans le tableau 4.11, donnant également les résultats obtenus à AUBOUE.

Le principal résultat à retenir est la très grande dispersion des pluies journalières ( $\sigma \neq 2\text{mm}$ ) quelque soit la saison. Cependant les pluies d'été semblent avoir les intensités les plus variables ( $\sigma = 4,9 \text{ mm/j}$ ) ce qu'on peut expliquer par de grosses pluies d'orage, et en particulier à une pluie exceptionnelle de 56,5 mm en un jour qui augmente considérablement la variance ; par contre en hiver les pluies semblent plus faibles et plus réparties dans le temps, moins intenses ( $\sigma = 3,9 \text{ mm/j}$ ). Enfin, notons que les moyennes journalières peuvent varier de 15%, entre le printemps et l'automne.

- Un histogramme des hauteurs de pluies journalières a été fait pour chaque saison avec 460 données par saison c'est à dire en prenant des années de 365 jours (fig. 4.9 page 51).

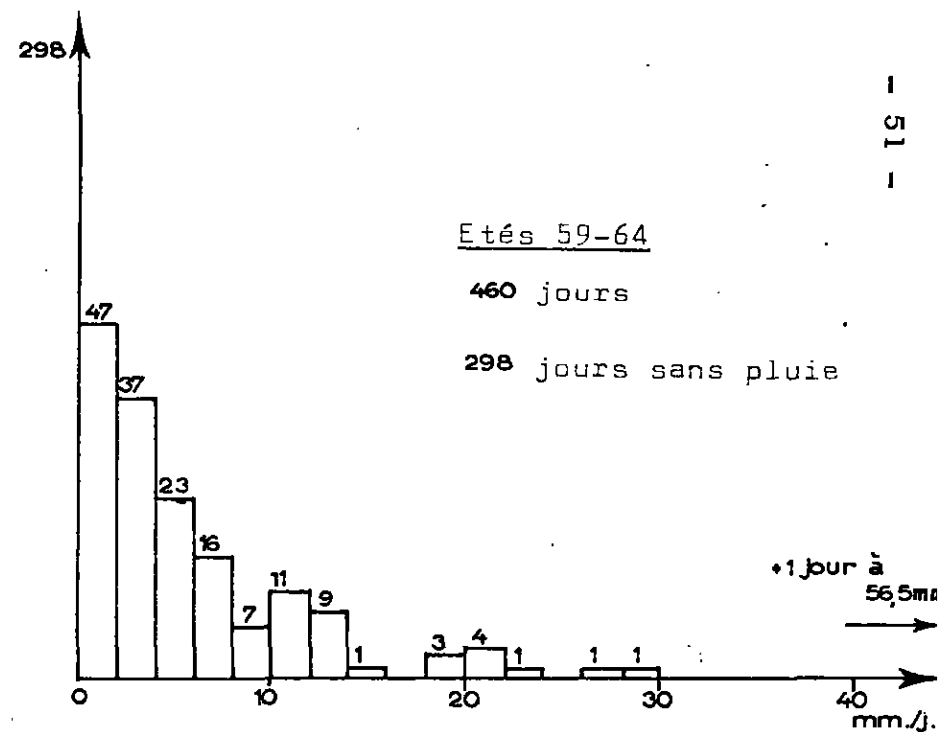
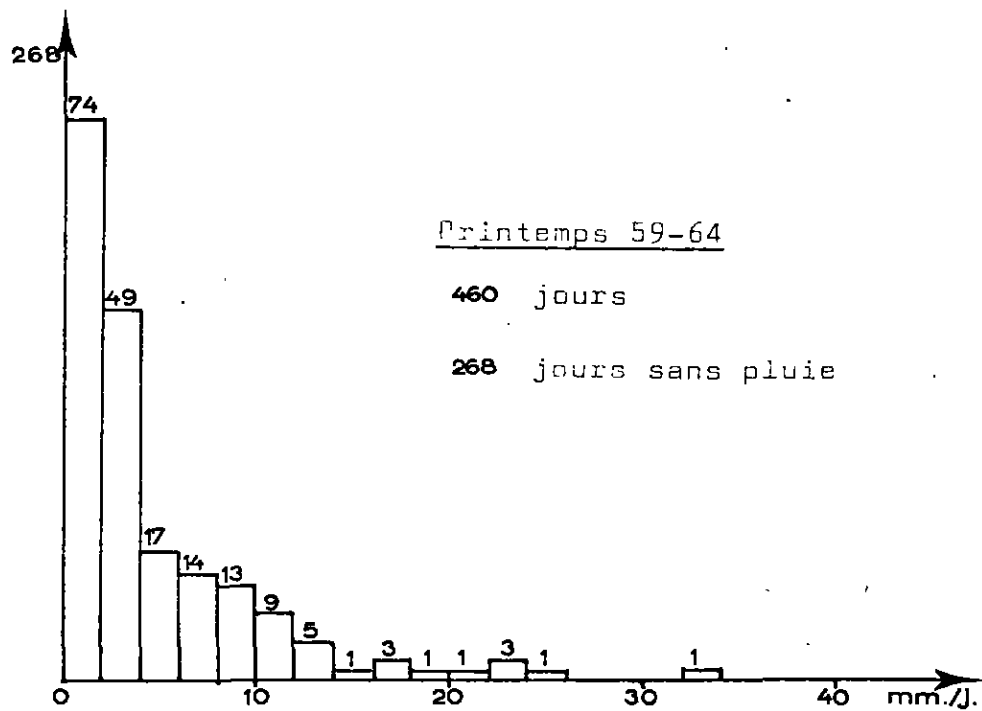
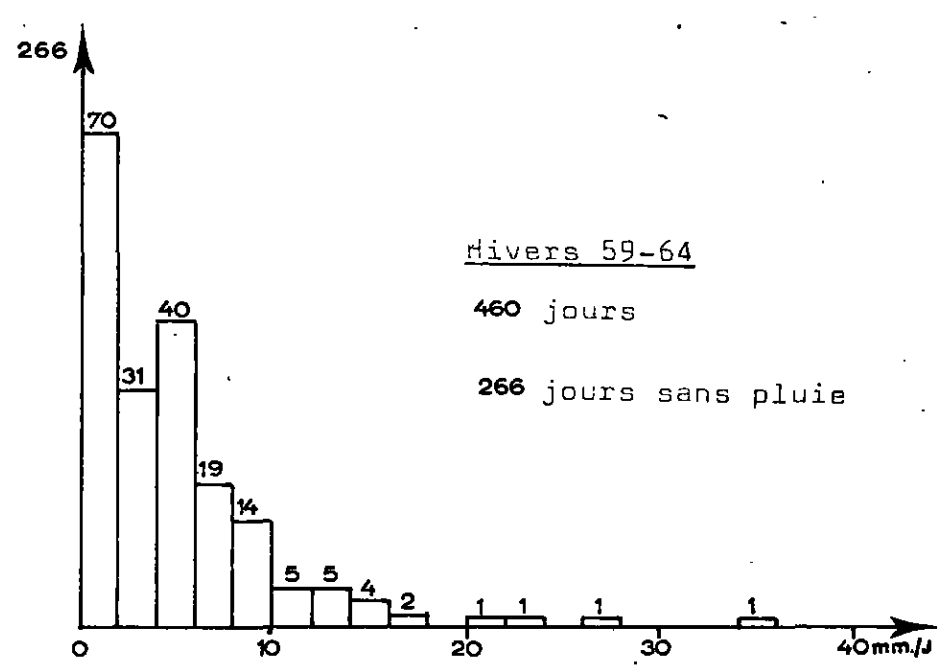
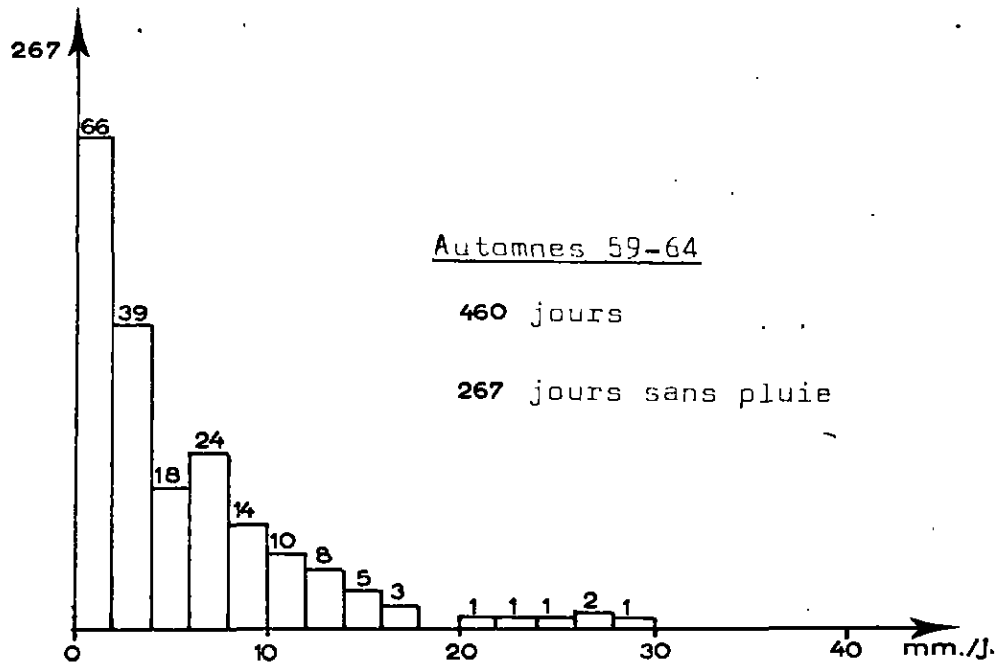


Fig. 4.9 : Histogrammes des pluies journalières à St-Pierremont (1959-1964)

Ces histogrammes confirment qu'il y a beaucoup plus de fortes pluies ( $\geq 18$  mm/jour) en été que dans les autres saisons et en particulier l'hiver : sur 460 jours par saison, il y en a 11 en été, 6 et 7 en automne et au printemps, et seulement 4 en hiver.

Il faut également noter le nombre remarquablement semblable de jours où la pluviosité est nulle ou inférieure à 2 mm/jour : sur 460 jours il y en a 333, 336, 342, 345, en automne, en hiver, au printemps et en été, c'est à dire plus des 2/3 des jours.

- Les variogrammes obtenus pour ces 4 saisons avec 450 données permettent de mieux connaître la répartition des pluies (cf fig. 4.10 pages 53). Quelque soit la saison, ces variogrammes sont caractérisés par un effet de pépité important et un palier atteint pour une portée de quelques jours (cf fig. 4.2 page 53 quinto). La portée indique la durée moyenne de passage des vagues successives de pluie : ainsi c'est en hiver que les pluies durent le plus longtemps, les masses de nuages stationnant près de 6 jours au-dessus de SAINT-PIERREMONT : il s'agit bien en hiver de pluies faibles mais durables.

Par contre, au printemps les masses de nuages passent beaucoup plus rapidement, soit qu'elles sont moins étendues, soit qu'elles se déplacent plus rapidement.

En été enfin, il faut noter la pointe, pour un décalage de 2 jours, qu'on peut attribuer au temps orageux qui dure 2 jours au plus ; à ces orages s'ajoutent des pluies estivales moins brutales, si bien que finalement l'indépendance des pluies n'est de nouveau atteinte qu'après 4 jours.

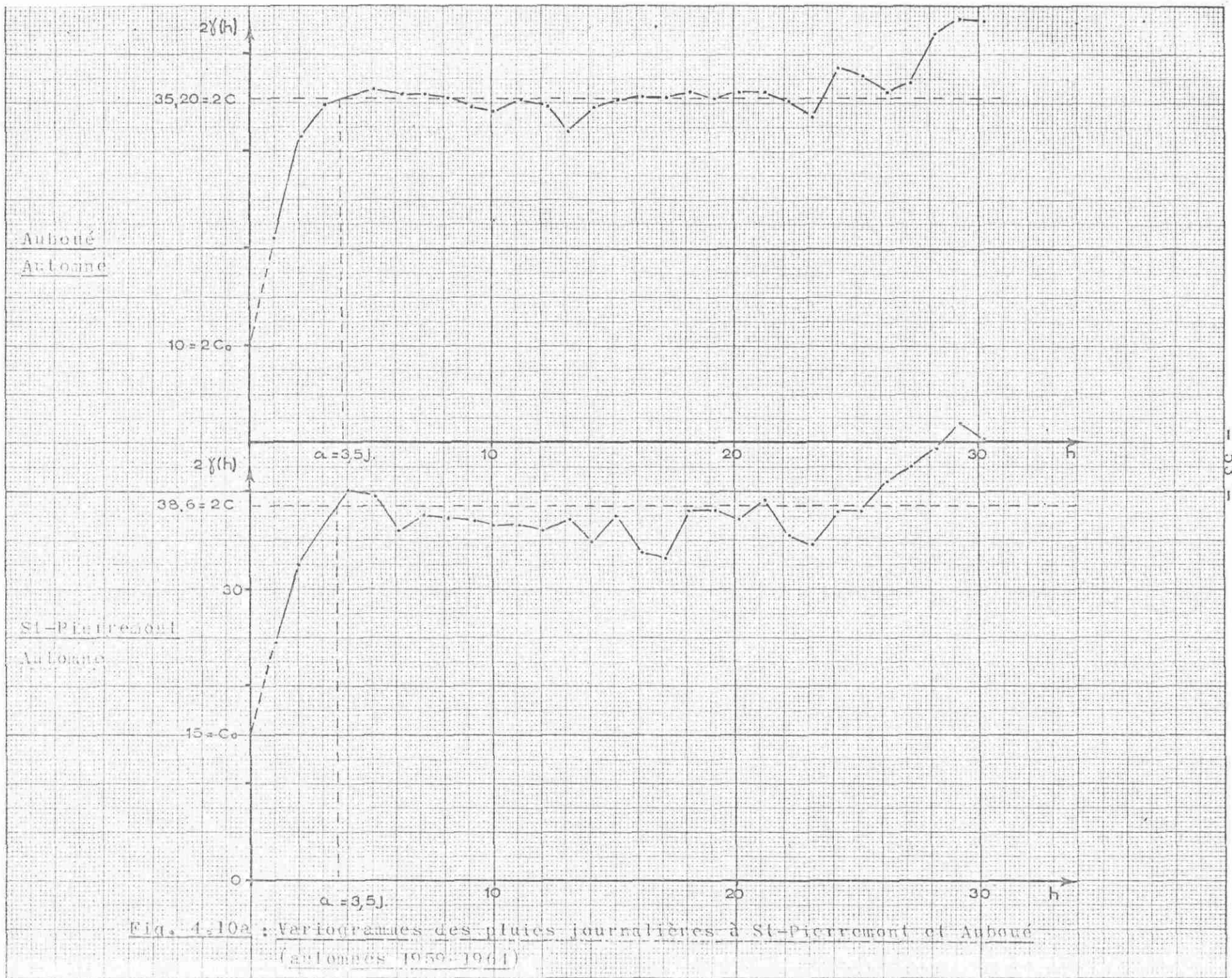


Fig. 4.10a : Variogrammes des pluies journalières à St-Pierre-d'Artois et Auboué  
 (automne 1959-1961)

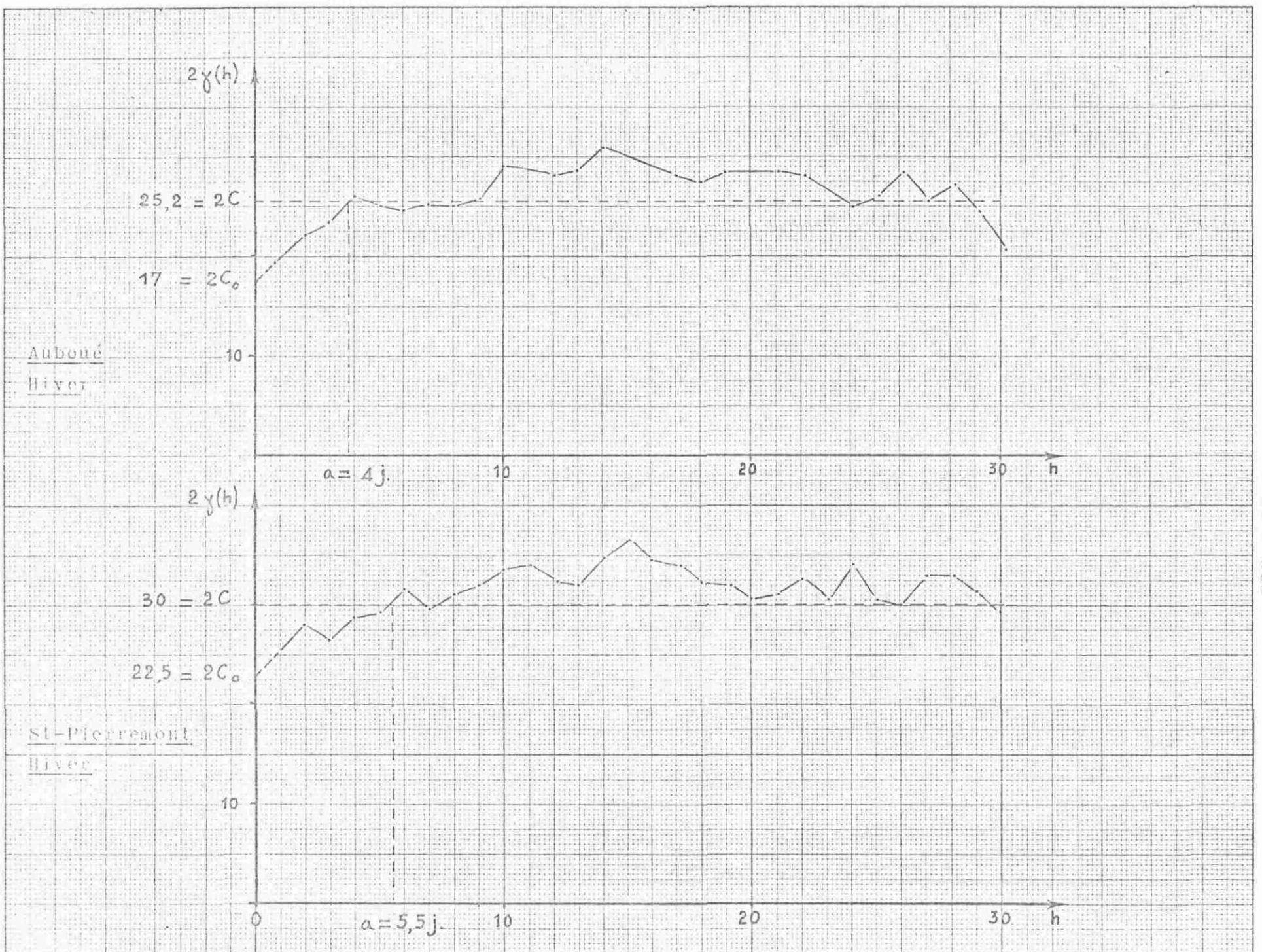
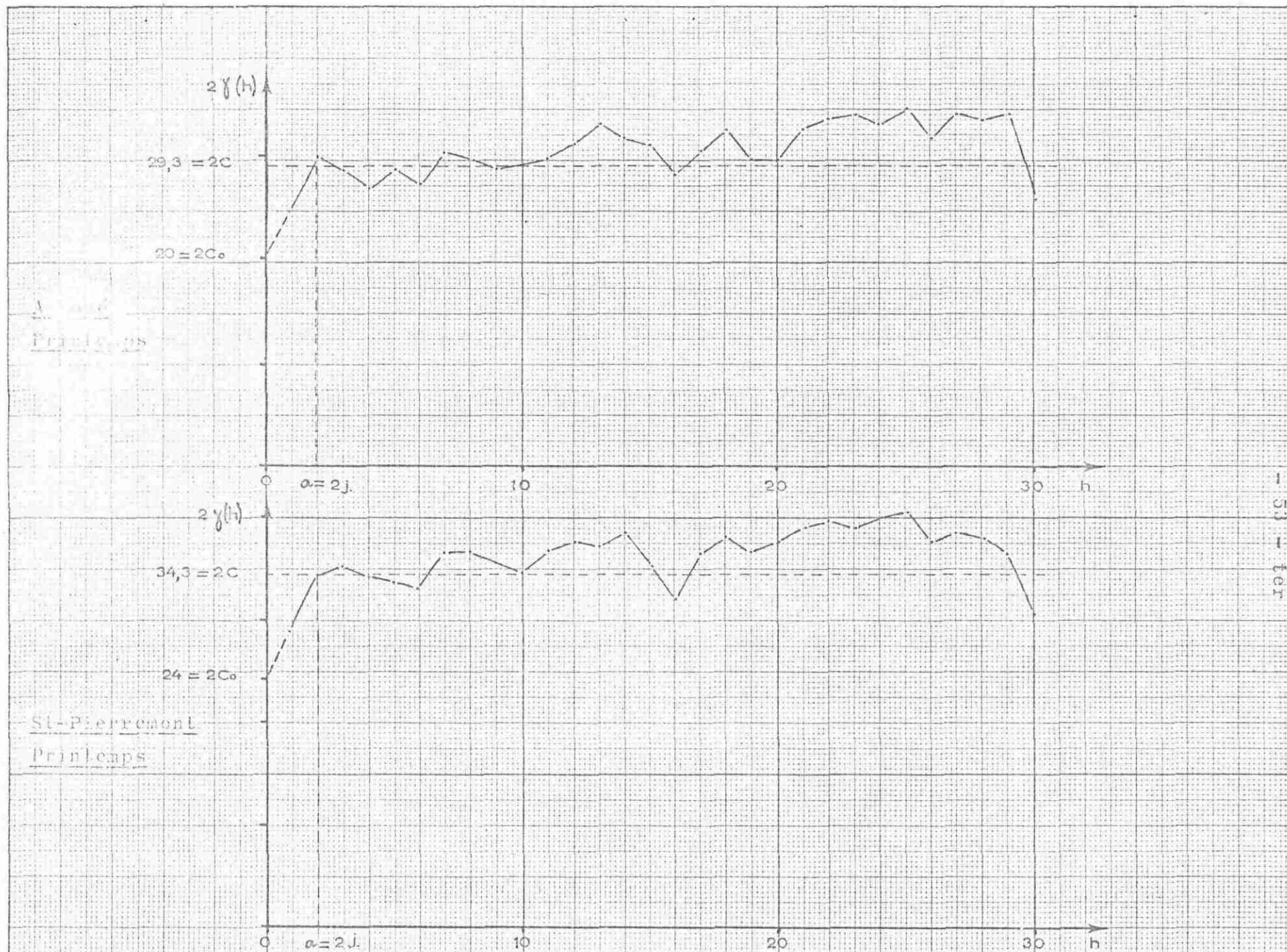


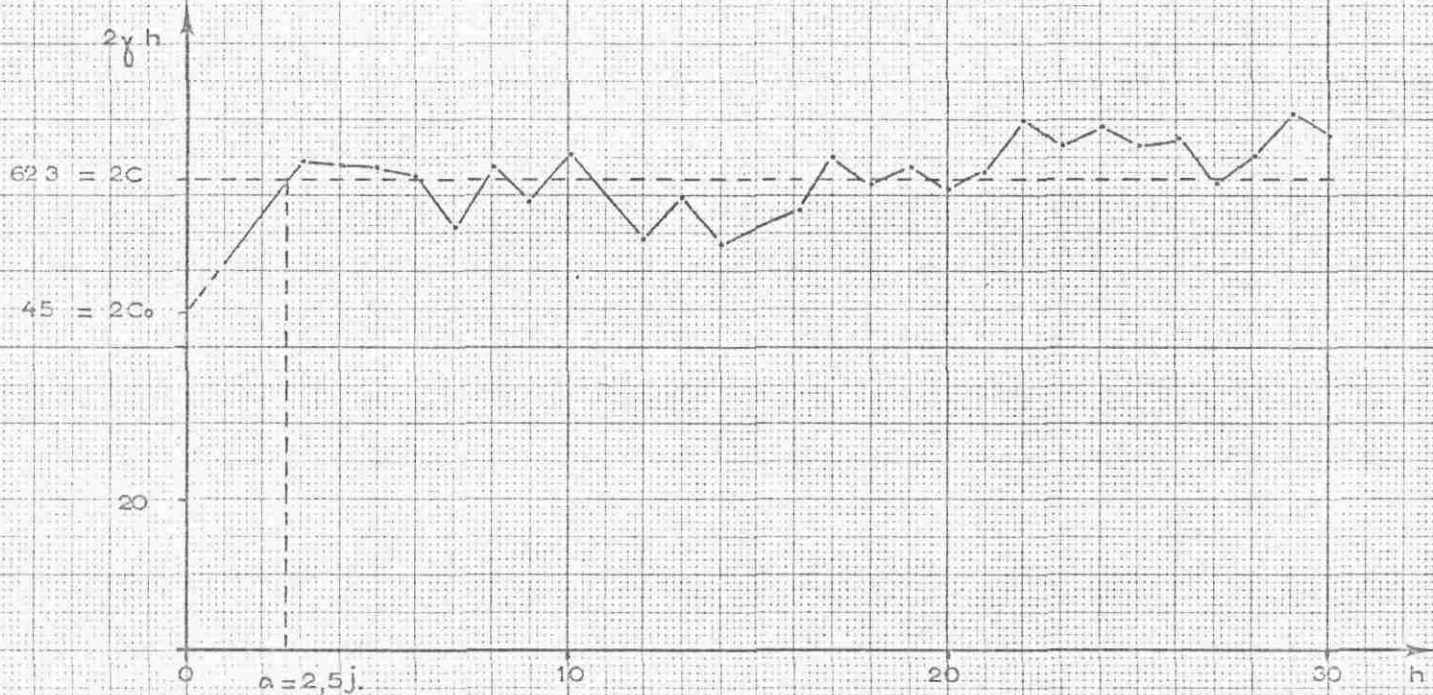
Fig. 4.10. Variations des plates journalières de St-Pierre-Font et d'Auboué (hivers 1959-1960)



153 - 1er

Fig. 4.10c : Variogrammes des pluies journalières de St-Pierre-mont et d'Auboué (printemps 1959-1964)

Arbonne  
Eté



St-Pierremonl  
Eté

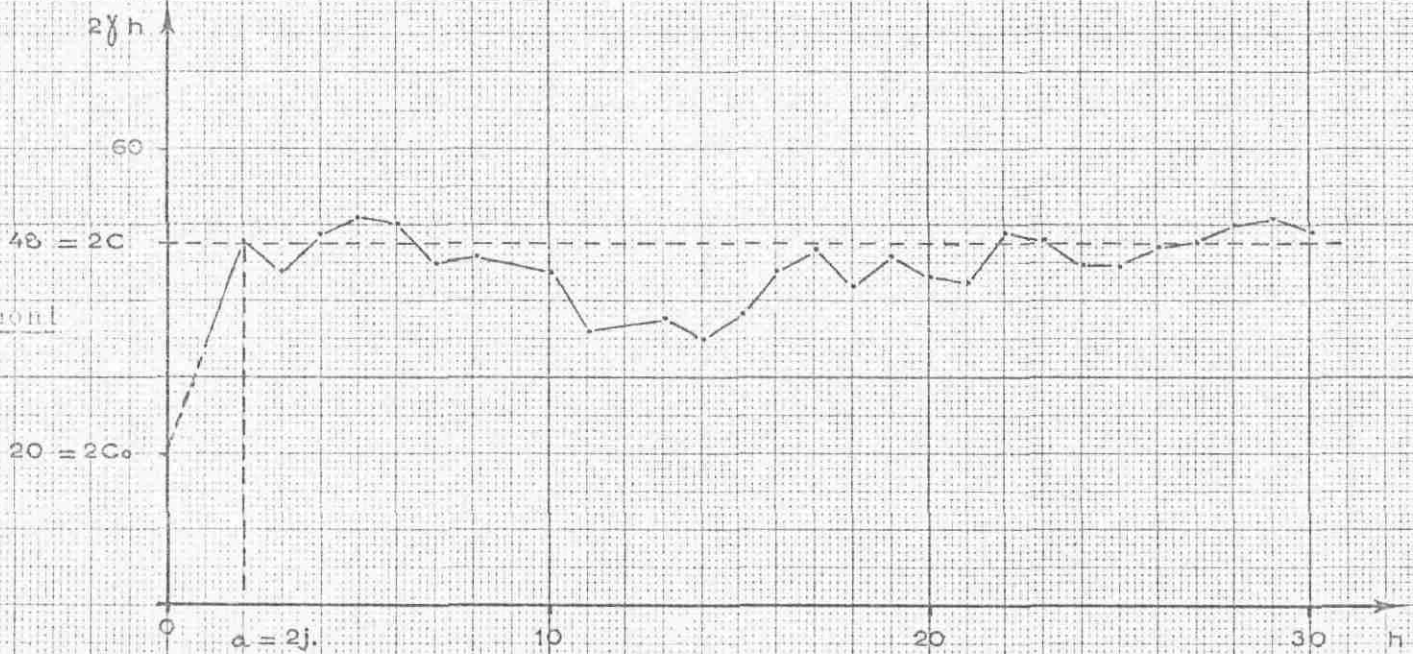


FIG. 4.10d - Variogrammes des pluies journalières de St-Pierremonl et d'Arbonne (étés 1959-1964)

Désignation		Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
Moyenne (mm/j)	ⓈP	2.25	2.03	1.93	2.12	2.08
	Ⓐ	2.12	1.74	1.95	2.35	2.04
Variance	ⓈP	19.31	15.02	17.16	24.03	18.88
	Ⓐ	17.61	12.60	14.63	31.15	19.00
Ecart-Type (mm/j)	ⓈP	4.40	3.90	4.15	4.9	4.35
	Ⓐ	4.20	3.50	3.80	5.6	4.35
Portée (j)	ⓈP	3.5	5.5	2	2	
	Ⓐ	3.5	4	2	2,5	
Effet de pépité	ⓈP	0.45	0.75	0.7	0.4	
	Ⓐ	0.30	0.65	0.65	0.7	

ⓈP : SAINT-PIERREMONT

Ⓐ : AUBOUE Rive du Paradis

Fig 4.11 : Résultats statistiques sur les pluies journalières à SAINT-PIERREMONT et AUBOUE (1959-1964)

Ainsi nous avons pu déterminer suivant les saisons la durée moyenne des vagues de pluie et retrouver le régime des pluies (orageux l'été, faible et durable en hiver, bourrasques et giboulées au printemps).

Les résultats que nous venons d'établir sont valables pour une période de 5 ans : 1959-64. Pour pouvoir les généraliser, il faudrait les comparer à d'autres périodes et ainsi avoir une vue plus précise de la climatologie locale.

#### 4.2.5 - Comparaison des pluviomètres de SAINT-PIERREMONT et d'AUBOUE

Il existe très peu de pluviomètres dépendant de la Météorologie Nationale dans le bassin ferrifère : il n'y en a qu'un à la mine de Bure, plus quelques uns à la périphérie : METZ-FRESCATY, SEREMANGE à l'Est, LONGUYON à l'Ouest ; il n'y en a donc pas dans un rayon de 20 kms autour de SAINT-PIERREMONT.

Cependant, un certain nombre de mines possèdent ou ont possédé des pluviomètres sur leur carreau, mais les relevés ne sont pas toujours réguliers ce qui fausse totalement l'étude (puisque à un jour donné on attribue parfois la somme des pluies de plusieurs jours précédents).

La comparaison se fera avec le pluviomètre de la mine du Paradis d'AUBOUE qui existe depuis 1925 et dont les relevés sont journaliers. Ce pluviomètre se trouve à l'altitude 250 mètres, à 13 kms au Sud-Est de SAINT-PIERREMONT dont il est séparé par la vallée de l'Orne qui entaille assez profondément le plateau (altitude 200 m dans la vallée).

Nous prendrons encore la période de 5 années hydrologiques 1959-64 avec des mois de 30 jours, soit 450 données par saison. Pour ces 5 ans la moyenne générale est de 2,08 mm/j à SAINT-PIERREMONT et de 2,04 mm/j à AUBOUE avec des variances 18,88 et 19,00.

Si on considère les précipitations mensuelles sur 5 ans, la comparaison ne permet pas de mettre en évidence une différence significative entre les 2 pluviomètres, si ce n'est peut-être un régime légèrement plus régulier à AUBOUE (cf fig. 4.12 page 56).

Il en est de même si on regarde les résultats statistiques obtenus pour chaque saison sur 5 ans (cf fig. 4.11 page 53 quinto). La très forte variance d'été pour AUBOUE ( $\sigma^2 = 31,15$ ) s'explique par 2 très gros orages dont un de 59,4 mm/jour.

De même enfin les variogrammes pour chaque saison sont très semblables : les portées sont identiques, (sauf toutefois en hiver) ce qui est normal puisque les masses de nuages passant à SAINT-PIERREMONT se retrouvent à AUBOUE, car il n'existe pas d'obstacle important entre les deux pluviomètres (cf fig. 4.11 page 53 quinto).

Ainsi on peut admettre que la pluviométrie ne varie pas de façon appréciable entre AUBOUE et SAINT-PIERREMONT.

Il serait intéressant de faire la même comparaison avec un pluviomètre, s'il existe, se trouvant un peu au Nord de SAINT-PIERREMONT pour compléter et préciser ce résultat pour toute la région.

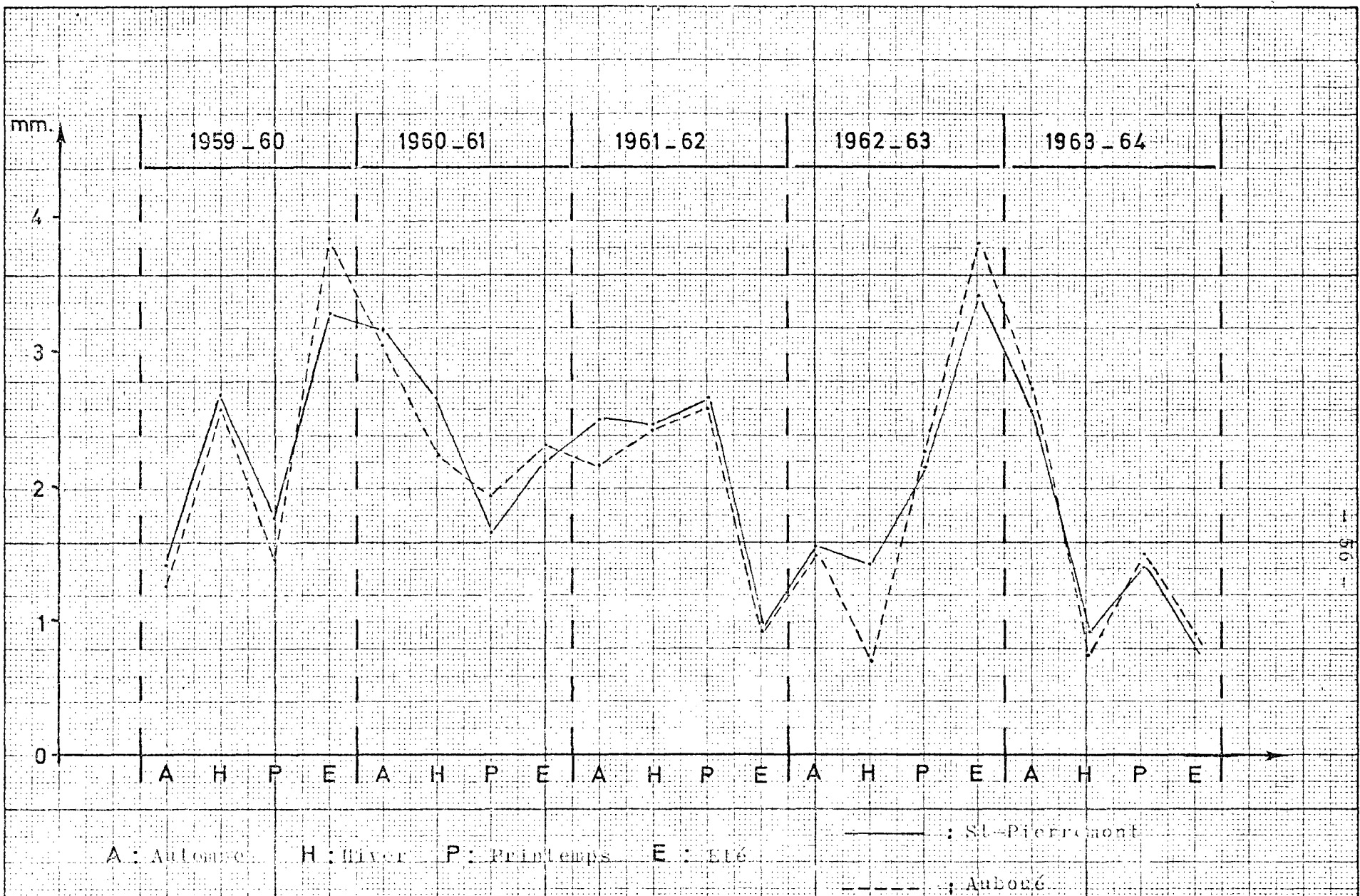


Fig. 4.12 : Comparaison des pluviométries saisonnières de St-Pierremontr et d'Auboué (1959-1964)

Malgré tout, nous pouvons admettre que les mesures de pluviométrie faites à SAINT-PIERREMONT sont valables sur une grande partie au moins de son bassin d'alimentation.

#### 4.2.6 - Résumé des résultats obtenus

Ainsi les outils géostatistiques nous ont permis de retrouver des résultats connus par l'expérience, comme l'existence de saison d'environ 3 mois et une certaine alternance de saisons sèches et pluvieuses. Mais ils nous ont permis également de dégager d'un grand nombre de données pluviométriques quelques lois générales de la pluviométrie dans la région de SAINT-PIERREMONT :

- Le caractère totalement aléatoire, et donc imprévisible, des précipitations annuelles.

- Le caractère fortement aléatoire des précipitations mensuelles ainsi que pour un mois donné leur indépendance d'une année à une autre.

- L'existence de vagues successives de pluie et de nuages de durées différentes suivant les saisons et de l'ordre de quelques jours.

- Un régime des pluies pratiquement identique dans un rayon de 15 kms autour de SAINT-PIERREMONT, ce résultat pouvant être précisé s'il existait plus de pluviomètres dans la région.

L'introduction des méthodes géostatistiques dans la climatologie et la météorologie se révèle particulièrement intéressante puisqu'elle permet d'en dégager des lois générales.

### 4.3 - Etude de l'exhaure de SAINT-PIERREMONT

#### 4.3.1 - Introduction

Les venues d'eau au fond de la mine de SAINT-PIERREMONT sont de plusieurs natures :

- certaines proviennent de vieux quartiers abandonnés ; ces venues sont faibles et varient peu suivant les saisons et les précipitations, de 2 à 5 m<sup>3</sup>/mn environ, ce qui peut signifier :

- soit que depuis la fin de leur exploitation les terrains ont eu le temps de se tasser et de colmater partiellement les fissures des écrans imperméables créés par les dépilages,

- soit que les nappes aquifères ou les circulations karstiques ont été détournées en amont de ces quartiers au profit d'autres quartiers, ou d'autres mines, en exploitation.

- d'autres, au Sud, proviennent de quartiers non exploités ou en traçage, avec un débit également faible et peu variable (de 2 à 5 m<sup>3</sup>/mn) ; les écrans supérieurs n'ont pas encore été perturbés sensiblement.

- enfin, les venues principales viennent des quartiers en exploitation ; elles ont un débit très variable pouvant aller jusqu'à plus de 28 m<sup>3</sup>/mn ; une grande partie de ces venues doit venir de circulations karstiques car un arrêt de pompage au puits de la Forêt se fait sentir au fond en moins de 24 heures (cf annexe III).

Il semble donc que les précipitations atmosphériques se manifestent au fond :

- rapidement par la circulation karstique
- beaucoup plus lentement par lessivage à travers les terrains.

La présence du puits de la Forêt pose un autre problème : en effet, à ce niveau est prélevé un débit d'eau connu mais qui n'a pas nécessairement de relation directe avec le débit total du karst qui reste inconnu, puisqu'il est uniquement fonction du niveau d'eau dans la galerie de dérivation, et que celui du karst dépend de ses caractéristiques géométriques variables suivant le niveau (il peut exister des siphons, des seuils, des trop pleins...).

Ce prélèvement au puits de la Forêt modifie considérablement, comme nous venons de le voir, les venues d'eau au fond, puisqu'il est en moyenne du même ordre de grandeur que le débit au fond. Il ne peut être question, d'autre part, d'ajouter ces deux types d'exhaures journalières car si les communications sont rapides entre le karst et le fond, tout ce qui passe par le karst ne se retrouve pas intégralement au fond, ou tout au moins subit une dilution importante avant d'arriver au fond ; c'est ce que montre une expérience d'arrêt de pompage au puits de la Forêt en 1950 (cf annexe III).

Pour pallier cet inconvénient nous devons donc considérer, au moins pour commencer, des périodes de temps pendant lesquelles le débit du puits de la Forêt est nul ou faible, ce qui est généralement le cas l'été.

#### 4.3.2 - Etude statistique des exhaures de SAINT-PIERREMONT

- L'étude a été faite sur 20 ans (1944-64) pour les venues d'eau au fond et sur 15 ans (1944-54, 1959-64)

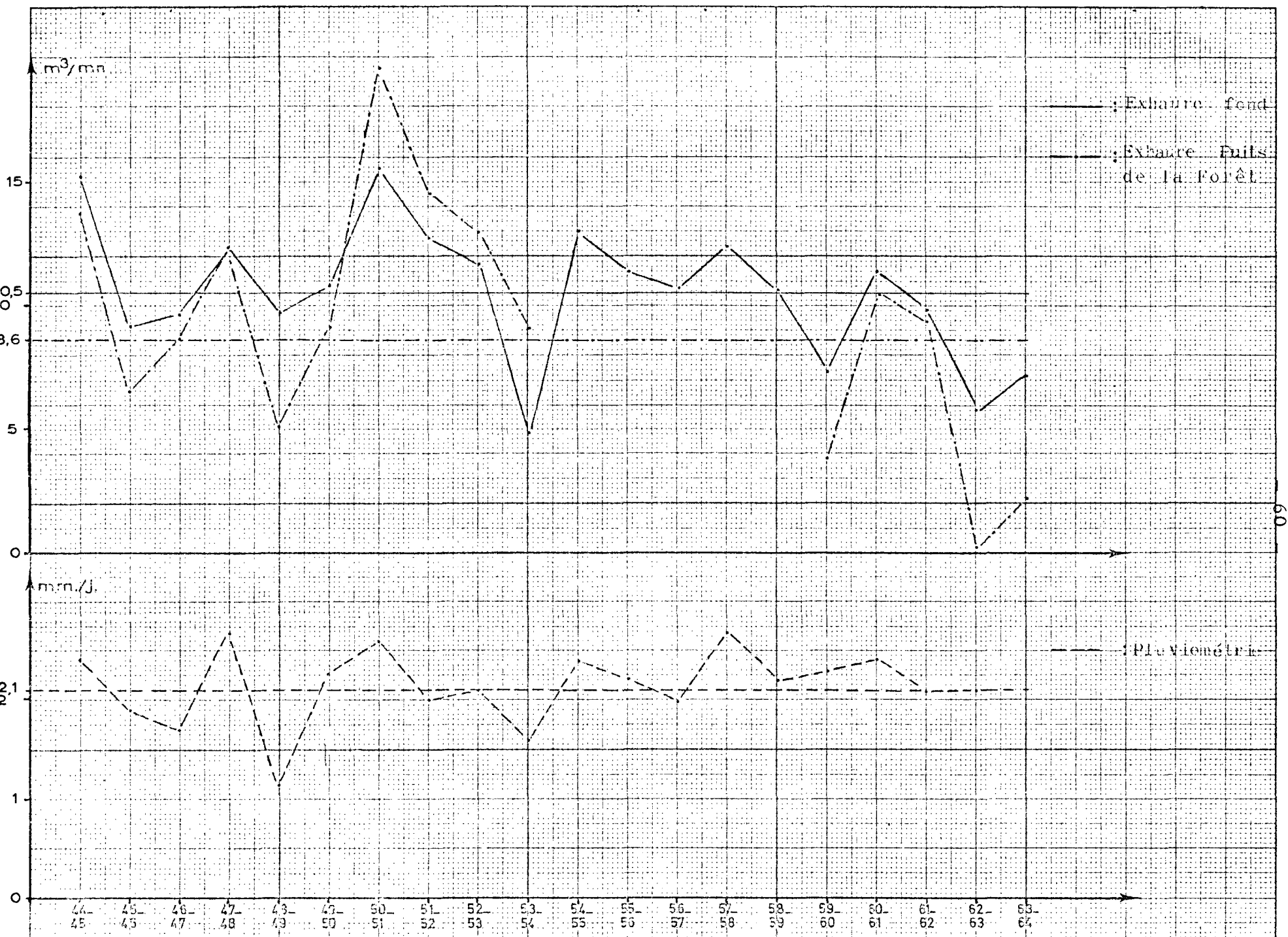


Fig. 4.13. Variations mensuelles comparées d'exhaure et de pluviométrie à St-Pierre-soul.

Année de pluie (U = 31.8)

pour l'exhaure du puits de la Forêt ; les moyennes mensuelles et annuelles ont été regroupées, ainsi que les pluviométries correspondantes, dans des tableaux (cf annexes II) - les exhaures moyennes sont :

pour le fond : 10,5 m<sup>3</sup>/mn

pour le puits : 8,6 m<sup>3</sup>/mn

avec une pluviométrie moyenne : 2,1 mm/j.

Il y a donc au puits un prélèvement du même ordre de grandeur que tout ce qui arrive au fond.

- Considérons tout d'abord les moyennes annuelles (cf fig. 4.13 page 60), nous constatons que les deux exhaures suivent de façon très nette les fluctuations de la pluviométrie ; il faut également noter une diminution très sensible des 2 exhaures au cours des 5 dernières années (1959-64) (cf fig. 4.14 page 61) alors que la pluviométrie est restée en moyenne identique.

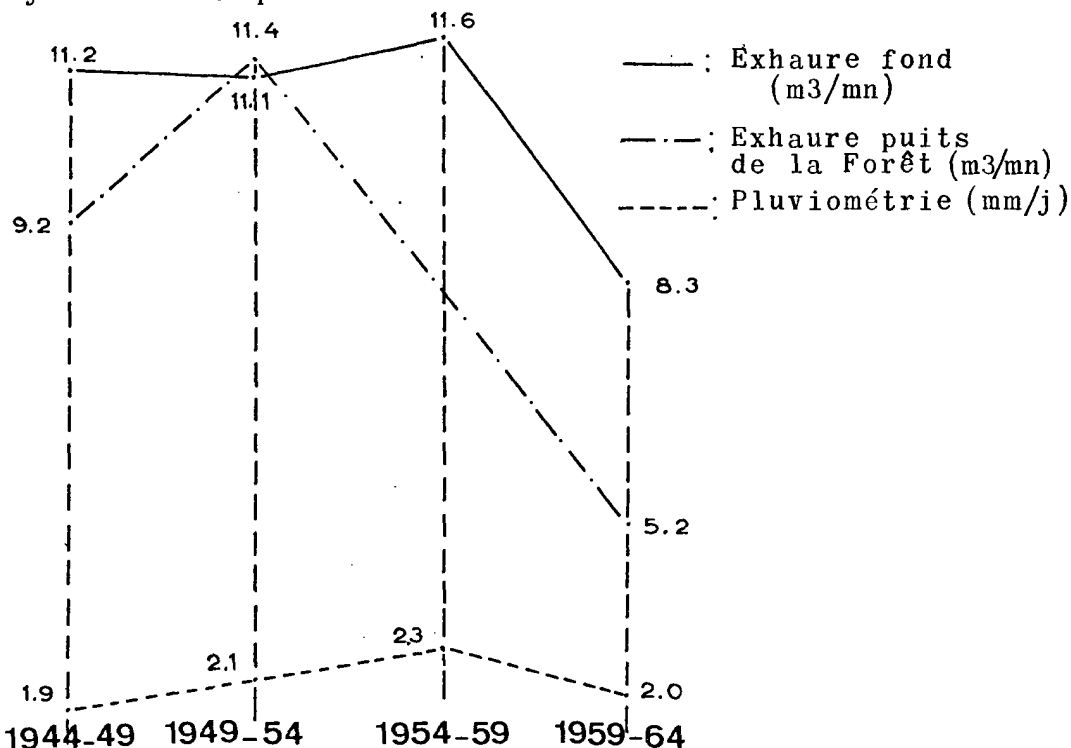


Fig. 4.14 : Moyennes sur 5 ans de pluviométrie et d'exhaure à Saint-Pierremont

Ceci peut signifier que le bassin d'alimentation de la mine a fortement diminué, c'est à dire qu'une partie importante des eaux d'alimentation est détournée par les travaux d'une mine située en amont pendage (Mairy, Tucquegnieux, Anderny-Chevillon) ; ce détournement semble se faire au niveau des circulations karstiques puisque le débit du puits de la Forêt s'en ressent très nettement ; en dehors de ce détournement, le régime de la mine ne semble pas s'être aggravé sensiblement en 20 ans, puisque de 1944 à 1959 l'exhaure du fond est restée à peu près constante.

- Etudions maintenant les variations saisonnières des exhaures (cf fig. 4.15 page 63) ; les exhaures semblent alors beaucoup moins liées aux pluviométries mensuelles et dépendre surtout de facteurs saisonniers, comme l'évapotranspiration :

minimum d'exhaure en été (forte évapotranspiration)  
maximum d'exhaure en hiver (faible évapotranspiration)

Il faut noter que le puits de la Forêt est beaucoup plus sensible que le fond aux variations saisonnières, ce qui est normal puisque le karst de la Forêt est beaucoup plus proche de la surface ; on peut décomposer l'année en 3 périodes :

- de Juin à Octobre où les exhaures sont minimales et à peu près constantes (de l'ordre de 6 m<sup>3</sup>/mn au fond et de 1 m<sup>3</sup>/mn au puits),

- d'Octobre à Février où les exhaures croissent fortement jusqu'à 16 m<sup>3</sup>/mn au fond et 23 m<sup>3</sup>/mn au puits,

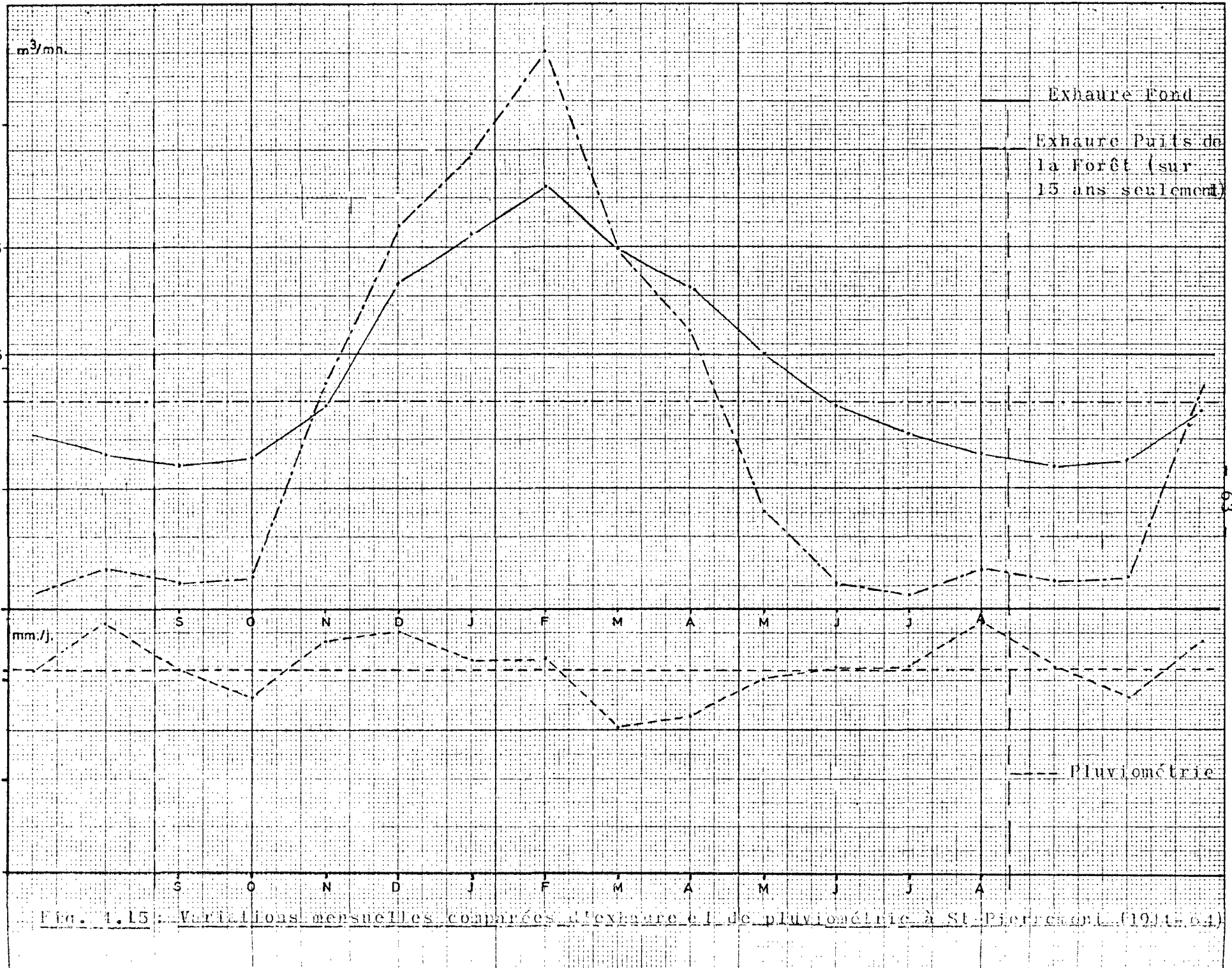


Fig. 1.15: Variations mensuelles comparées d'exhaure et de pluviométrie à St-Pierre-Quartier (1963-64)

- de Février à Juin où elles décroissent jusqu'au palier minimal.

Notons également que de Novembre à Mai le débit d'exhaure est plus élevé au puits qu'au fond, mais qu'en été il arrive fréquemment que le débit du puits soit nul durant de longues périodes.

#### 4.3.3 - Etude géostatistique de l'exhaure du fond

- Considérons les mesures d'exhaure du fond de SAINT-PIERREMONT pour les étés de 5 années hydrologiques 1959-64, pendant lesquels l'exhaure du puits de la Forêt a été nulle, sauf en Juin 62-63 (0,4 m<sup>3</sup>/mn) : ainsi les venues d'eau au fond n'ont pas été perturbées durant cette période par un prélèvement au puits de la Forêt ; il sera donc possible de déterminer, avec quelque précision, la dilution de la pluie à travers le filtre, c'est à dire la corrélation entre la pluie et l'exhaure.

- Pour chaque été, on obtient les moyennes et variances suivantes :

$$m_i = 5,34 \quad ; \quad 7,86 \quad ; \quad 6,88 \quad ; \quad 7,64 \quad ; \quad 5,23$$

$$\sigma_i^2 = 0,32 \quad ; \quad 0,88 \quad ; \quad 3,60 \quad ; \quad 4,28 \quad ; \quad 0,40$$

ce qui donne pour l'ensemble des 5 étés, considérés comme des réalisations indépendantes :

$$m = \frac{\sum m_i}{5} = 6,47 \text{ m}^3/\text{mn} \quad ; \quad \sigma^2 = \frac{\sum \sigma_i^2}{5} = 1,89 \quad ; \quad 2 \sigma^2 = 3,79$$

- Il faut également noter une dérive linéaire décroissante de l'exhaure de pente :

$$D = -0,027 \text{ m}^3/\text{mn}/\text{j} \quad (\text{cf fig. 4.16 page 67})$$

$$e(x) = e_0 + e'(x) + Dx$$

$$= 7,7 + e'(x) - 0,027 x \quad 0 \leq x \leq H = 90$$

cette dérive introduit un terme  $D^2 h^2$  dans le variogramme de l'exhaure ; elle joue aussi sur la variance  $2\sigma^2$  pour la valeur :

$$2 F(H) = \frac{2}{H^2} \int_0^H (H-x) \cdot D^2 \cdot x^2 \cdot dx = \frac{D^2 \cdot H^2}{6}$$

ici  $H = 90$  jours  $D^2 = 0,0007$   $\frac{D^2 H^2}{6} = 0,95$

Le double de la variance de  $e'(x)$  est donc

$$2 \sigma'^2(H^2) = 2 \sigma^2(H) - \frac{D^2 \cdot H^2}{6}$$

$$= 3,79 - 0,95 = 2,84$$

- Le variogramme  $2 \gamma(h)$  de  $e(x)$  pour cette période est donné à la figure 4.16 page 67 ; l'existence d'une dérive se traduisant par un terme  $D^2 h^2$  explique que  $2 \gamma(h)$  ne semble pas atteindre un palier ; cependant, en éliminant ce terme on obtient le variogramme  $2 \gamma'(h)$  de  $e'(x)$  :

$$2 \gamma'(h) = 2 \gamma(h) - D^2 h^2$$

avec  $2 \sigma'^2(H) = 2 \sigma^2(H) - \frac{D^2 h^2}{6}$

ce variogramme  $2 \gamma'(h)$  semble, au vu de sa forme, pouvoir s'ajuster à un variogramme  $2 \Gamma(h)$  d'une loi  $\gamma$  d'ordre 2 :

$$2 \Gamma(h) = 2 C \left[ 1 - e^{-\frac{h}{h_0}} \left( 1 + \frac{h}{h_0} \right) \right]$$

en effet :  $H = 90 \text{ j}$

$$p^* = 0,11$$

$$2 \sigma'^{2*} = 2,84$$

on sait (cf & 3.4) que :  $p^* = \frac{2 C}{h_0 e} = \frac{(2 C)}{2 \sigma'^{2*}} \left( \frac{H}{h_0} \right) \frac{2 \sigma'^{2*}}{H e}$

$$\text{donc : } \frac{2 \sigma'^{2*}}{2 C} = \frac{2 \sigma'^{2*}}{p^* H e} \quad \frac{H}{h_0} = 0,105 \frac{H}{h_0}$$

l'intersection de cette hyperbole avec l'abaque  $\delta \left( \frac{h_0}{H} \right)$

(cf fig. 3.10 page 32)

se fait au point

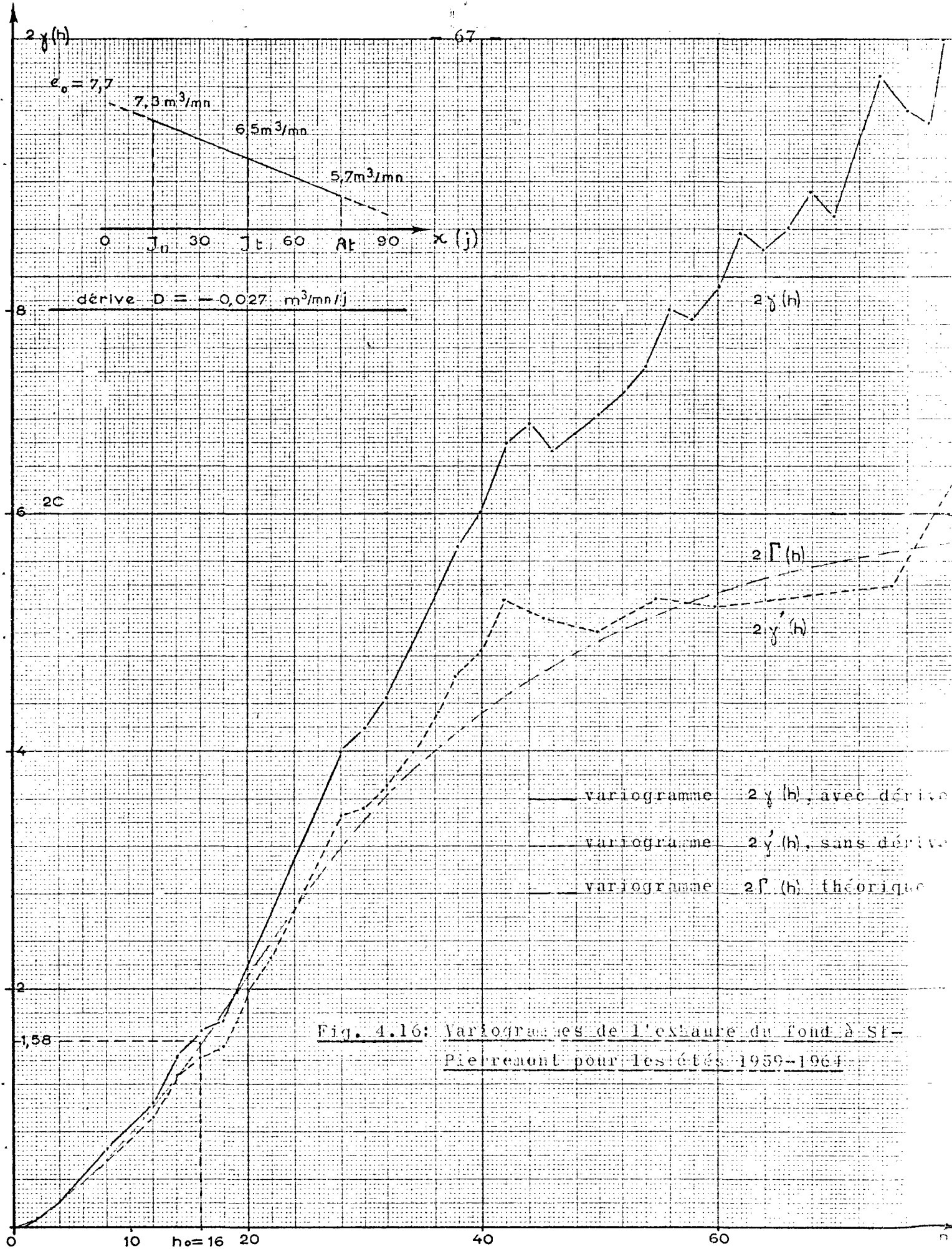
$$\begin{cases} \frac{h_0}{H} = 0,178 \\ \frac{2 \sigma'^{2*}}{2 C} = 0,48 \end{cases}$$

ce qui donne les 2 paramètres recherchés :

$$\begin{cases} h_0 = 16 \text{ jours} \\ EC = 6 \end{cases}$$

on peut vérifier que le point d'inflexion de la courbe expérimentale a pour coordonnées :

$$h_0 = 16 \quad ; \quad 2 \gamma'(h_0) = 1,55$$



ainsi le variogramme expérimental  $2\gamma'(h)$  s'ajuste très bien au modèle théorique :

$$2\Gamma(h) = 6 \left[ 1 - e^{-\frac{h}{16}} \cdot \left(1 + \frac{h}{16}\right) \right]$$

qui est le variogramme de la fonction (cf & 3.4)

$$E(x) = F \frac{x}{h_0^2} e^{-\frac{x}{h_0}} \quad \text{avec } F = \sqrt{2C \cdot 2h_0}$$

$$E(x) = 13,8 \frac{x}{2,56} e^{-\frac{x}{16}} = 0,054 x e^{-\frac{x}{16}}$$

avec  $F = 13,8 \text{ m}^3/\text{j}/\text{mn} = 20 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

ainsi l'exhaure ( $e'(x) + e_0$ ) semble provenir de masses d'eau de  $20 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  réparties dans le temps suivant un processus de Poisson et subissant une dilution de pondération :

$$f(x) = \frac{x}{256} e^{-\frac{x}{16}}$$

à cette exhaure  $e'(x)$  s'ajoute la dérive linéaire  $Dx$ .

#### 4.4 - Détermination du filtre

Nous venons donc de voir qu'en dehors d'une dérive linéaire dépendant des facteurs saisonniers (évapotranspiration) et pouvant les caractériser, on pouvait considérer l'exhaure comme le résultat de la dilution suivant une loi  $\gamma$  d'ordre 2 :

$$f(x) = \frac{x}{h_0^2} e^{-\frac{x}{h_0}} \quad \text{de masses d'eau réparties dans le temps suivant un processus de Poisson.}$$

Mais nous savons également que nous pouvons considérer l'exhaure comme le résultat du passage à travers un filtre, de fonction  $g(h)$ , des pluies  $p(x)$  ; c'est-à-dire que si l'on ne tient pas compte de la dérive linéaire de l'exhaure, à une constante additive près, l'exhaure et la pluie sont reliées par la relation :

$$e' = p * g$$

prenons la covariance des 2 membres :

$$\Phi_{e'} = e' * \check{e}' \quad p * \check{p} * g * \check{g} = \Phi_p * \Phi_g$$

en posant

$$\Phi_g = g * \check{g}$$

nous connaissons  $\Phi_{e'}$  (cf & 4.3) :

$$\Phi_{e'} = C e^{-\frac{h}{h_0}} \left(1 + \frac{h}{h_0}\right)$$

avec  $C = 3$ ,  $h_0 = 16$  jours pour les étés 1959-64 de même, nous savons (& 4.2.4) que la covariance des pluies est très facilement ajustable, en négligeant des transitions de l'ordre de quelques jours, à un effet de pépité pur de constante  $K$  indiquant que les pluies sont réparties dans le temps suivant un processus de Poisson :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Phi_p(h) = K & \text{si } h = 0 \\ \Phi_p(h) = 0 & \text{si } h \neq 0 \end{array} \right.$$

avec  $K = 24$  pour les étés 1959-64

on en déduit donc :

$$\phi_g(h) = \frac{\phi_{e'}(h)}{K} = \frac{C}{K} e^{-\frac{h}{h_0}} \left(1 + \frac{h}{h_0}\right)$$

qui est la connaissance de la fonction :

$$g(x) = \frac{G}{h_0^2} x e^{-\frac{x}{h_0}} \quad \text{avec} \quad G = \sqrt{\frac{2C}{K}} \cdot 2h_0$$

$$G = \frac{F}{\sqrt{K}} \cdot 2,8$$

ainsi

$$g(x) = \frac{E(x)}{\sqrt{K}} = 2,8 \frac{x}{256} e^{-\frac{x}{16}} = 0,011x e^{-\frac{x}{16}}$$

sachant que

$$\int_0^{\infty} \frac{x}{h_0^2} \cdot e^{-\frac{x}{h_0}} \cdot dx = 1$$

ainsi l'influence de la pluie croît pendant  $h_0 = 16$  J avant de décroître asymptotiquement vers 0 (cf fig. 3.9 page 29).

Si  $e'(x)$  est exprimée en  $m^3/mm$  et  $p(x)$  en  $mm/j$  alors :

F est exprimé en  $m^3/j/mn$  c'est-à-dire  $1440 m^3$   
 G est exprimé en  $m^3/j/mm/mn$  c'est-à-dire  $1,44 \cdot 10^6 m^2$

autrement dit :

$$F = 13,8 m^3/j/mn = 20 \cdot 10^3 m^3$$

$$G = 2,8 m^3/j/mm/mn = 4 \cdot 10^6 m^2 = 400 ha$$

G représente donc une surface qui, multipliée par une hauteur de pluie donnera la masse d'eau contribuant à l'exhaure. C'est donc un équivalent théorique du bassin d'alimentation.

1 mm de pluie donnerait  $4.10^3$  m<sup>3</sup> au fond.

Or, nous avons montré que les masses d'eau étaient en moyenne de l'ordre de  $20.10^3$  m<sup>3</sup>.

Ainsi il semblerait que chaque vague de pluie donne en moyenne  $\frac{20.10^3}{4.10^3} = 5$  mm de pluie ; tout ceci en supposant que toute la pluie s'infiltré effectivement.

- D'autre part, l'effet de la pluie ne se fait pas sentir immédiatement au fond mais seulement après un temps  $\tau$  correspondant à la traversée la plus rapide du filtre. Ce temps de réponse, qui doit être de l'ordre de quelques jours, n'a pu être déterminé avec précision.

- Ainsi nous avons pu déterminer la fonction de dilution  $g(x)$  de la pluie à travers le filtre

$$g(x) = G \frac{x}{h_0} e^{-\frac{x}{h_0}} = 2,8 \frac{x}{256} e^{-\frac{x}{16}} = 0,011 x e^{-\frac{x}{16}}$$

en exprimant la pluie en mm/j et l'exhaure en m<sup>3</sup>/mn cette dilution n'intervient qu'après un temps  $\tau$  de l'ordre de quelques jours.

- Une telle étude a été entreprise pour d'autres saisons et d'autres groupes d'années, cependant, elle n'a pas abouti à des résultats intéressants ; il semble que

dans tous ces cas, le puits de la Forêt perturbe trop considérablement l'exhaure du fond de sorte qu'on ne puisse pas définir ainsi la fonction du filtre et son évolution éventuelle au cours des dépilages.

- D'autre part, la connaissance de la dérive de l'exhaure pourrait permettre de déterminer la fraction  $q(x)$  de la pluie ne s'infiltrant pas :

$$(p - q) * g = e' + Dx + e_0$$

#### 4.5 - Prévision de l'exhaure à partir des précipitations, détermination théorique

Nous venons de définir le filtre par sa fonction de dilution associée  $f(h)$  qui, appliquée à la pluie, donne l'exhaure. La connaissance de cette fonction  $f(h)$  ainsi que celle de toutes les pluies journalières  $p(x)$  antérieures au jour .t. permettent donc de retrouver théoriquement l'exhaure  $e(t)$  de ce jour .t. :

$$e(t) = \int_0^{\infty} p(t-h) f(h) dh, e = p * f$$

$f(h)$  déterminant la proportion de la pluie  $p(t-h)$  qui se retrouve sous forme d'exhaure au fond, à l'instant .t.

Mais si nous voulons prévoir l'exhaure plusieurs jours à l'avance, et compte tenu du caractère fortement imprévisible des pluies journalières que nous avons déjà mis en évidence (& 4.2.4), nous ne pouvons connaître exactement qu'une partie de l'exhaure à venir. Soit  $t = 0$ , le jour dont on veut prévoir l'exhaure  $e(0)$ , connaissant la pluie  $p(x)$  et l'exhaure  $e(x)$ , jusqu'au jour  $T < 0$  antérieur au jour 0 (cf fig. 4.17 page 73).

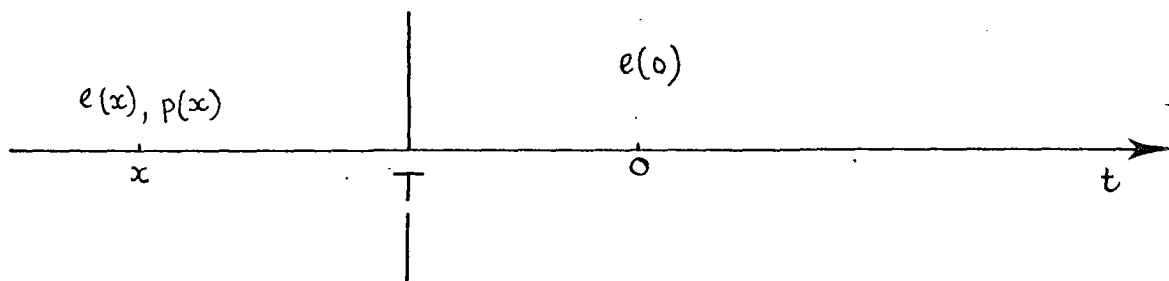


Fig. 4.17 : Prévision de l'exhaure e(0) connaissant la pluie p(x) jusqu'au jour T < 0

La contribution de toutes ces pluies antérieures au jour T à l'exhaure e (0) est défini exactement par :

$$e' (0) = \int_T^{\infty} p (t - h) f (h) dh$$

Reste inconnu, et donc à estimer au mieux, la contribution des pluies postérieures à l'instant T que nous ignorons : c'est-à-dire que nous devons estimer :

$$e'' (0) = \int_0^T p (t - h) f (h) dh, p (t - h) \text{ étant}$$

inconnue l'exhaure e(0) sera naturellement la somme des deux :

$$e (0) = e' (0) + e'' (0)$$

La pluie, étant supposée à peu près stationnaire dans le temps sur un échantillon de 90 jours, fluctue aléatoirement autour de sa moyenne  $\bar{p}$  indépendante du temps, nous pouvons alors prendre comme estimation de e''(0) l'intégrale :

$$e^{*''}(0) = \bar{p} \int_0^T f (h) dh$$

connaissant  $p$  par la moyenne des pluies antérieures et,  $f(h)$ , il sera facile d'en déduire :

$$H(T) = \int_0^T f(h) dh \text{ et } e^{*''}(0) = \bar{p} H(T)$$

alors :

$$e^{*}(0) = \int_T^{\infty} f(h) p(t-h) dh + \bar{p} \int_0^T f(h) dh$$

Cet estimateur  $e^{*}(0)$  est évidemment d'autant plus précis que la prévision se fait à plus court terme et que  $T$  est faible.

Application pratique

Cette application, faute de temps, n'a pu être faite : cependant, connaissant la dérive et la "fonction filtre" pour les étés 1959-64, la méthode ci-dessus serait directement applicable.

5 - CONCLUSIONS

Ainsi, après avoir présenté globalement le phénomène de l'exhaure et défini les outils et méthodes géostatistiques nécessaires, nous avons pu, en nous limitant à la mine de SAINT-PIERREMONT, déterminer géostatistiquement des lois générales régissant les pluviométries locales annuelles, mensuelles ou journalières ; de même nous avons pu définir la relation entre la pluie et l'exhaure sous forme d'une dilution de la loi  $\gamma$  d'ordre 2 :

$$G \frac{x}{h_0^2} e^{-\frac{x}{h_0}}$$

relation qui devrait permettre de prévoir l'exhaure en fonction des pluies tombées, et aussi déterminer l'influence des fonctions saisonnières sur la fonction des précipitations s'infiltrant réellement.

L'existence à SAINT-PIERREMONT du puits de la Forêt a rendu difficile une étude plus poussée de l'exhaure au fond ; cependant, la méthode qui a été décrite et appliquée est suffisamment générale pour pouvoir être utilisée pour d'autres mines, et en particulier AUBOUÉ-MOINEVILLE qui dispose de très nombreuses mesures ; il sera ainsi possible d'établir un modèle précis de l'exhaure des mines, tenant compte des nombreux paramètres, souvent non chiffrables, qui influent sur elle (facteurs saisonniers, avance de l'exploitation ...).

La détermination des relations entre la pluie et l'exhaure, ainsi que de la proportion des eaux de pluies s'infiltrant, pourrait alors permettre d'établir un bilan hydrogéologique exact pour toute la région et peut-être ainsi résoudre le problème de son alimentation en eau.

-----

## BIBLIOGRAPHIE

- Les Variables Régionalisées et leur Estimation  
G. MATHERON (Masson Editeur)
- Traité de Géostatistique Appliquée (2 Tomes)  
Mémoires du B.R.G.M.  
G. MATHERON (Editions Tech. & B.R.G.M.)
- Echantillonnage & Estimation Locale des Phénomènes  
de Transitions Miniers  
J. SERRA (2 Tomes) IRSID (Maizières-les-  
Metz)
- Contribution à l'Etude de l'Exhaure dans le Bassin de  
Briey J. CHANZY (Annales des Mines 1926-1930)
- Etude des réserves en Eaux Souterraines des Horizons  
Aquifères de l'Aalénien-Bajocien ; Bilan Hydrologique  
des Bassins de Longwy, d'Ottange-Amermont, de l'Orne.  
G. CASTANY - M. GUILLAUME - G. JEANDEL -  
J. de MAUTORT - B.R.G.M. (1960)
- Hydrologie du Bassin Ferrifère Lorrain (Première Note)  
P.L. MAUBEUGE - Bulletin Techn. des Mines  
de Fer de France N° 42 - 1er Trimestre 1956
- L'Exhaure Mixte de la Mine de SAINT-PIERREMONT  
L. KLEIN Vie Journées de l'Hydraulique  
(1960 - publié par la Houille Blanche).

## ANNEXE 1

### Programme de calcul de variogrammes et de covariances :

Ce programme a été établi pour fonctionner sur un IBM 1130.

Il permet d'obtenir pour des grandeurs  $f(x)$  et  $g(x)$  leurs moyennes, variances, covariances, statistiques, variogramme  $2\gamma(h)$  et covariance  $\Phi(h)$  croisées ( $f \neq g$ ) ou non ( $f \equiv g$ )

$$m_f = \int f(x) dx, \quad \sigma_f^2 = \int f(x)^2 dx - m_f^2, \quad \sigma_{fg} = \int f(x)g(x) dx - m_f m_g$$

$$2\gamma_{fg}(h) = \int [f(x+h) - f(x)][g(x+h) - g(x)] dx = 2\gamma_{g_f}(h)$$

$$\Phi_{fg}(h) = \int f(x)g(x+h) dx = \overset{\vee}{f} * g = \Phi_{g_f}(-h) = \overset{\vee}{\Phi}_{g_f}(h)$$

$$\Phi_{g_f}(h) = \int g(x)f(x+h) dx = \overset{\vee}{g} * f = \Phi_{fg}(-h) = \overset{\vee}{\Phi}_{fg}(h)$$

- Chaque donnée introduite P (I, J, K) est repérée par 3 indices indiquant :

- I : le rang du jour dans la période
- J : le rang de l'année dans le groupe d'années
- K : la grandeur considérée.

ANNEXE 1

L, indique la grandeur que l'on compare à la grandeur K

on pose :  $L \geq K$

Q, est un indice indiquant le couple K, L considéré :

$$Q = K + L - 1$$

NA1, NA2, NA3, sont les valeurs maximales attribuées à I, J, et K (ou L) ; par exemple dans le "listing" ci-joint on considère des périodes de NA1 = 90 jours sur NA2 = 5 ans et pour NA3 = 2 grandeurs.

- KH = N - 1 est le pas ou décalage considéré avec N variant de 1 à K D E

$[K D E - 1]$  est le nombre maximum de jours de décalage, ou pas maximum. X (K) est la valeur arbitraire donnée à la grandeur K, lorsque la mesure n'existe pas ; la grandeur K ne doit donc en aucun cas pouvoir prendre réellement cette valeur.

- VN et WN, V et W, VA et WA sont respectivement les nombres de mesures existantes, les moyennes, les carrés des moyennes de grandeurs K et L, et VW le produit de leurs moyennes.

BN est le nombre de jours où existent simultanément des mesures pour les grandeurs K et L et B B est leur covariance statistique  $\sigma_{KL}$  calculée sur ces BN jours.

ANNEXE 1

- Si on prend les grandeurs K et L aux instants I et M = I + KH : AN est le nombre de fois où existent simultanément des mesures pour les grandeurs K et L aux instants I et M.

EE est leur covariance statistique  $\sigma_{KL}$  calculée sur ces AN jours.

G (Q, N) est le variogramme croisé  $2 \gamma_{KL}(h)$  avec

$$Q = K + L - 1 \text{ et } h = N - 1$$

ZE (Q, N) et ZF (Q, N) sont les covariances croisées centrées  $\phi_{KL}(h)$  et  $\phi_{LK}(h)$  avec  $Q = K + L - 1$  et  $h = N - 1$

- Sous la forme présentée, ce programme donne les résultats (moyenne, variance, variogramme, covariance) ; pour chacune des NA 2 années. Pour avoir les résultats pour le groupe de NA 2 années, il faut faire la moyenne de 5 séries de résultats (il ne suffit pas de changer le bouclage sur J).

PAGE 1

// JOB T

LOG DRIVE	CART SPEC	CART AVAIL	PHY DRIVE
0000	0007	0007	0000

// \* CALCUL DES VARIOGRAMMES ET COVARIANCES

// FOR

\*IOCS(CARD,1403PRINTER,DISK)

\*LIST SOURCE PROGRAM

INTEGER Q

DIMENSION P(90,5,2),X(2),G(3,81),ZE(3,81),ZF(3,81)

NA1=90

NA2=5

NA3=2

KDE=81

X(1)=-1.

X(2)=0.

• READ(2,201)((P(I,J,1),I=1,NA1),J=1,NA2)

201 FORMAT(4(20F4.1/),10F4.1)

READ(2,202)((P(I,J,2),I=1,NA1),J=1,NA2)

202 FORMAT(5(16F5.2/),10F5.2)

DO 800 J=1,NA2

DO 500 K=1,NA3

DO 500 L=K,NA3

Q=K+L-1

V=0.

W=0.

VN=0.

WN=0.

B=0.

BN=0.

DO 50 I=1,NA1

IF(P(I,J,K)-X(K))15,14,15

15 V=V+P(I,J,K)

VN=VN+1.

14 IF(P(I,J,L)-X(L))16,40,16

16 W=W+P(I,J,L)

WN=WN+1.

40 CONTINUE

IF(P(I,J,K)-X(K))21,50,21

21 IF(P(I,J,L)-X(L))22,50,22

22 B=B+P(I,J,K)\*P(I,J,L)

```

BN=BN+1.
50 CONTINUE
V=V/VN
W=W/WN
VW=V*W
VA=V*V
WA=W*W
BB=B/BN-VW
WRITE(5,51)K,VN,V,VA,VW,BB,L
51 FORMAT(1H ,I5,5F20.2,I5)
DO 300 N=1,KDE
KH=N-1
A=0.
C=0.
D=0.
E=0.
AN=0.
I=1
2 M=I+KH
IF(P(I,J,K)-X(K))71,7,71
71 IF(P(M,J,K)-X(K))72,7,72
72 IF(P(I,J,L)-X(L))73,7,73
73 IF(P(M,J,L)-X(L))74,7,74
74 A=A+(P(M,J,K)-P(I,J,K))*(P(M,J,L)-P(I,J,L))
C=C-(P(M,J,K)+P(I,J,K))*(P(M,J,L)-P(I,J,L))
D=D-(P(M,J,K)-P(I,J,K))*(P(M,J,L)+P(I,J,L))
E=E+P(I,J,K)*P(I,J,L)
AN=AN+1.
7 I=I+1
IF(I+KH-NA1)2,2,1
1 CONTINUE
EE=E/AN-VW
G(Q,N)=A/AN
ZE(Q,N)=EE-(A+C)/(2.*AN)
ZF(Q,N)=EE-(A+D)/(2.*AN)
300 CONTINUE
500 CONTINUE
WRITE(5,52)((G(Q,N),Q=1,3),(ZE(Q,N),Q=1,3),(ZF(Q,N),Q=1,3),N=1,KDE
1)
52 FORMAT(1H1,9F12.2/(1H ,9F12.2))
800 CONTINUE
CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED  
IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR  
COMMON 0 VARIABLES 3324 PROGRAM 928

END OF COMPILATION

// XEQ



Année hydro- mois	1944- -45	1945- -46	1946- -47	1947- -48	1948- -49	1949- -50	1950- -51	1951- -52	1952- -53	1953- -54	1954- -55	1955- -56	1956- -57	1957- -58	1958- -59	1959- -60	1960- -61	1961- -62	1962- -63	1963- -64	Moyennes mensu- elles
S	4,2	5,5	5,2	3,6	14,0	3,5	5,5	8,2	4,1	3,4	8,3	5,5	7,3	5,3	9,7	4,8	4,9	4,1	4,9	5,4	5,9
O	6,9	4,6	4,4	3,3	9,0	3,4	9,1	6,9	6,1	3,0	11,9	5,3	8,2	8,5	8,1	4,3	7,5	4,1	4,6	5,0	6,2
N	19,7	4,0	3,7	3,1	11,0	3,9	11,8	8,5	14,0	3,1	13,2	5,5	9,9	9,5	10,2	4,2	13,3	5,0	4,4	7,4	8,3
D	12,7	3,9	9,7	4,0	11,8	12,5	23,1	12,0	32,5	3,0	18,1	9,2	12,0	9,7	13,8	4,3	17,1	13,2	4,6	11,9	13,5
J	14,7	4,5	13,2	31,5	14,5	14,1	27,8	25,1	19,7	3,1	22,7	18,9	12,3	14,8	19,5	9,9	20,0	11,9	4,5	6,5	15,5
F	33,1	21,9	10,9	31,2	12,1	24,3	22,2	20,6	18,0	4,8	21,1	17,1	17,5	23,0	13,2	11,2	19,8	15,1	4,1	8,9	17,5
M	16,1	17,1	20,3	15,2	11,7	18,3	22,0	19,1	14,1	8,0	14,8	14,7	19,1	20,9	10,0	13,5	13,2	12,1	6,0	9,1	14,8
A	10,9	11,4	19,6	13,7	11,2	12,1	24,6	20,5	9,5	9,2	12,7	13,5	14,5	12,1	11,1	11,2	9,5	16,9	7,9	11,6	13,2
M	10,9	11,4	10,9	11,7	8,3	13,8	12,8	10,7	7,5	7,3	9,7	12,4	9,9	15,8	11,8	8,1	10,1	13,1	5,5	6,5	10,4
J	9,2	11,3	8,5	7,7	5,7	10,4	10,6	8,8	5,8	4,7	8,6	10,4	7,0	13,0	8,7	6,0	8,6	9,2	7,7	5,0	8,3
J	7,6	7,9	6,3	8,8	4,2	7,8	8,7	6,9	4,4	3,3	7,7	13,8	5,6	9,6	6,5	5,1	7,1	6,3	9,4	4,8	7,1
A	6,5	5,9	4,0	13,7	3,7	5,3	9,2	5,0	3,8	4,2	8,5	9,7	5,3	7,4	5,3	4,7	6,7	5,1	5,9	5,9	6,3
Moyennes mensu- elles	15,2	9,1	9,7	12,3	9,7	10,8	15,6	12,7	11,6	4,8	13,1	11,3	10,7	12,5	10,6	7,3	11,5	9,7	5,8	7,3	10,5

Annexe IIb : Exhaustes mensuelles du fond de la mine de St-Pierre-mont 1944-1964  
(m<sup>3</sup>/mn)

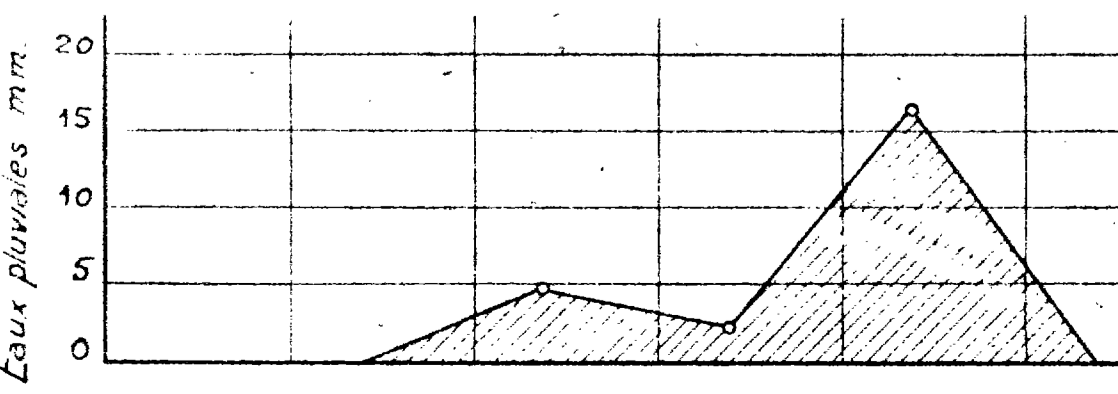
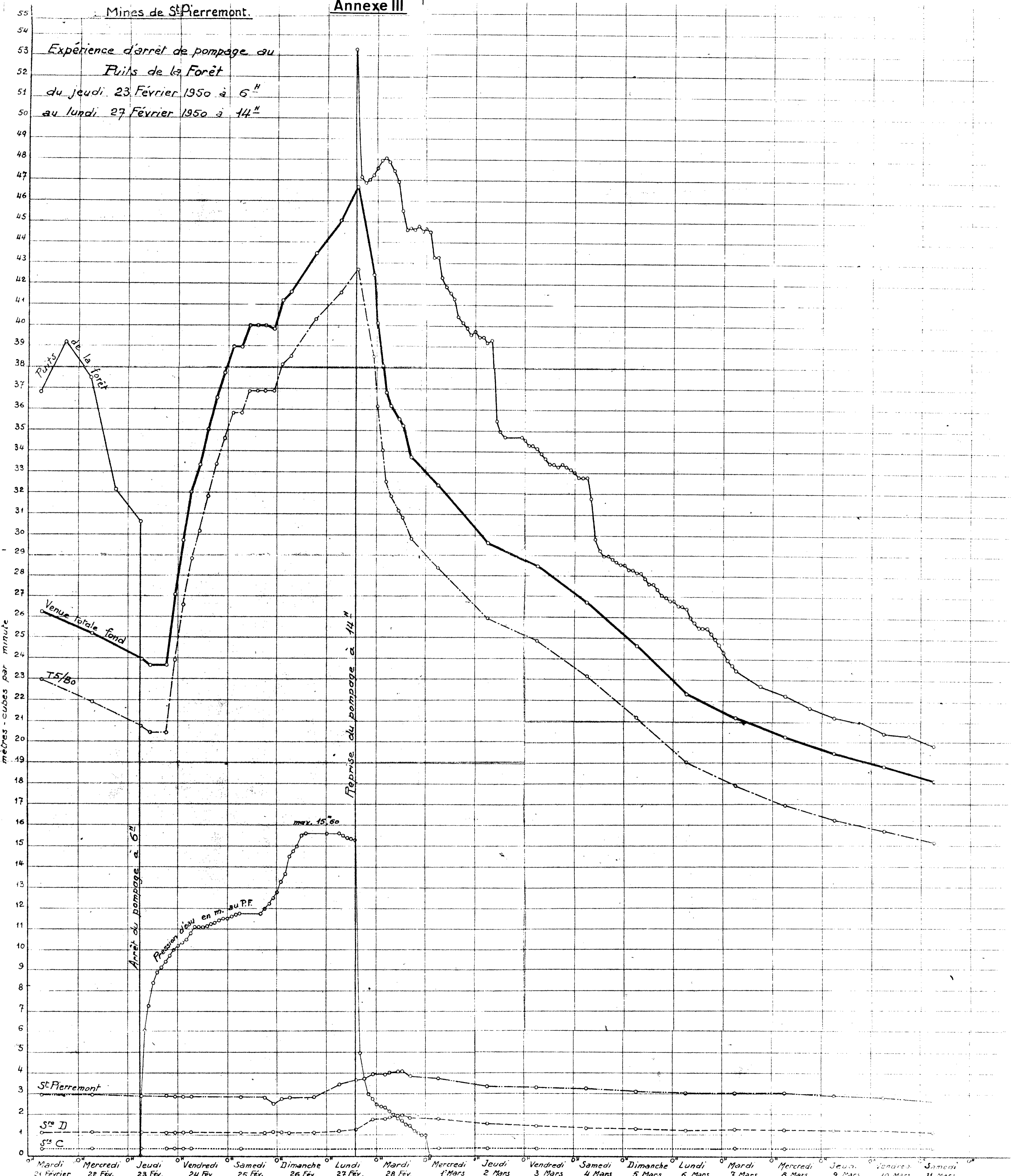
Années hydro- mois	1944- -45	1945- -46	1946- -47	1947- -48	1948- -49	1949- -50	1950- -51	1951- -52	1952- -53	1953- -54	1954- -55	1955- -56	1956- -57	1957- -58	1958- -59	1959- -60	1960- -61	1961- -62	1962- -63	1963- -64	Moyenne 1944-1964
S	3,6	1,7	2,4	0,6	1,5	2,1	3,7	2,2	2,9	1,7	4,5	1,3	1,9	3,8	1,6	0,0	1,9	1,5	2,8	0,6	2,1
O	3,5	0,4	1,0	0,8	0,9	2,0	0,9	0,2	3,0	0,9	2,6	2,0	2,5	1,3	2,4	1,9	3,6	3,4	0,5	2,1	1,8
N	4,5	0,3	1,3	3,1	2,1	3,0	3,9	3,5	4,8	0,5	1,5	1,0	1,4	1,1	1,6	2,5	3,8	2,6	1,3	4,8	2,4
D	3,1	2,3	1,8	5,5	1,2	2,6	3,7	1,0	3,6	0,9	3,0	4,3	1,3	1,6	4,2	3,7	2,1	2,1	2,6	0,1	2,5
J	2,1	1,7	2,0	4,1	1,1	0,8	2,4	3,7	0,2	1,9	3,4	2,6	1,1	3,3	2,6	2,1	2,8	3,2	1,0	1,1	2,2
F	2,7	4,4	1,5	2,1	0,8	3,2	2,4	2,3	2,1	1,3	3,1	0,3	3,9	4,7	0,1	2,1	2,9	2,1	0,5	1,3	2,2
M	0,4	0,5	3,4	0,5	1,0	0,3	3,0	3,3	0,1	0,8	1,1	1,1	2,6	0,9	1,7	2,2	0,4	2,6	2,9	2,0	1,5
A	1,7	1,5	1,5	1,9	0,5	3,0	2,4	0,8	1,4	1,2	0,2	3,0	0,5	1,7	2,5	1,0	2,6	2,2	1,2	1,0	1,6
M	2,5	4,3	1,7	1,7	1,4	2,5	1,1	1,3	0,5	0,9	2,3	1,2	1,2	4,9	2,7	1,9	1,9	3,1	2,2	1,0	2,0
J	1,6	2,1	1,4	3,2	0,7	2,2	3,5	2,2	2,6	1,4	2,3	1,8	1,3	2,7	3,0	1,4	2,5	0,0	5,3	0,5	2,1
J	1,0	1,8	1,5	2,9	0,2	2,7	1,5	0,6	3,0	1,6	3,5	4,6	3,1	2,7	0,7	4,7	3,2	1,6	0,8	0,4	2,1
A	1,8	1,5	0,9	5,6	2,0	2,9	3,0	2,3	1,6	5,7	1,4	3,2	2,6	3,5	2,8	3,8	0,8	1,1	4,1	1,2	2,6
Moyennes annuel- -les	2,4	1,9	1,7	2,7	1,1	2,3	2,6	2,0	2,1	1,6	2,4	2,2	2,0	2,7	2,2	2,3	2,4	2,1	2,1	1,3	2,1

Annexe IIa ; Pluies mensuelles à St.Pierremont 1944 - 1964 (m m/J)

Année hydro- mois	1944- -45	1945- -46	1946- -47	1947- -48	1948- -49	1949- -50	1950- -51	1951- -52	1952- -53	1953- -54	1954- -55	1955- -56	1956- -57	1957- -58	1958- -59	1959- -60	1960- -61	1961- -62	1962- -63	1963- -64	1964- -65
S	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4	0,0	1,6	6,0	0,0	0,0						0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
O	4,2	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	1,9	0,0	5,9	0,0						0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	1,3
N	26,2	0,0	0,0	0,0	8,1	1,4	18,4	11,7	30,2	0,0						0,0	25,4	2,3	0,0	17,4	9,4
D	35,8	0,0	11,5	5,0	9,7	20,0	35,9	19,0	49,4	0,0						3,6	22,2	27,0	0,0	3,5	10,2
J	16,7	0,6	17,9	51,7	13,7	14,5	43,8	40,8	24,8	0,0						11,7	27,3	20,4	0,0	0,0	18,9
F	39,6	40,6	11,3	44,3	7,6	30,4	34,1	33,0	27,5	0,0						12,6	32,3	27,0	0,0	5,5	23,0
M	19,5	20,1	33,0	14,5	9,2	17,7	32,2	30,4	13,9	2,3						14,2	6,9	6,3	1,8	0,0	14,8
A	8,3	8,3	21,3	10,6	2,8	10,6	36,6	26,0	4,9	7,2						7,0	0,4	27,1	0,5	0,1	11,4
M	10,0	5,9	6,2	1,8	0,2	12,4	11,5	6,3	0,2	0,0						0,0	3,9	2,1	0,0	0,0	4,0
J	3,3	3,2	1,0	0,0	0,0	1,9	5,7	1,1	0,0	0,0						0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,1
J	0,7	0,2	0,0	5,3	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0						0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
A	0,0	0,0	0,0	14,8	0,0	0,0	8,7	0,0	0,0	1,3						0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
Moyennes annuel- -les	13,7	6,5	8,6	12,3	5,1	9,1	19,5	14,5	13,0	0,9						4,0	10,5	9,3	0,2	2,2	8,6

Annexe II c : Exhaures mensuelles au puits de la Forêt de St-Pierremon  
1944-1954, 1959-1964 (m<sup>3</sup>/mn)

Expérience d'arrêt de pompage au Puits de la Forêt du jeudi 23 Février 1950 à 6<sup>h</sup> au lundi 27 Février 1950 à 14<sup>h</sup>

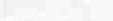








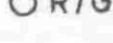
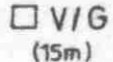






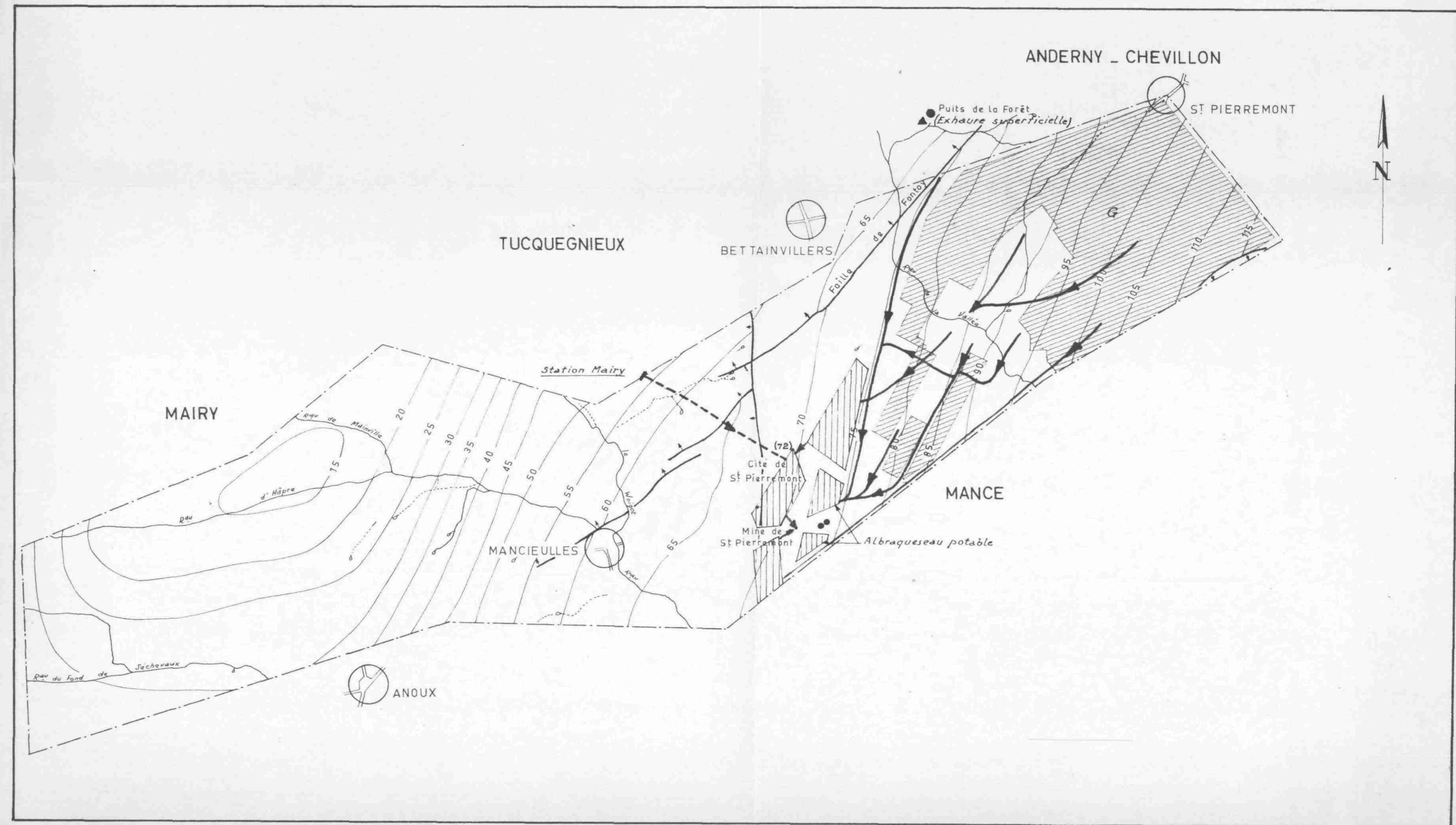
# MINE DE ST. PIERREMONT

Annexe IV

## SCHEMA DE LA SITUATION AU FOND

-  Limites de concessions
-  Faille et sens du rejet
-  Courbes de niveau du mur de la couche grise
-  Zones dépilées en couche: R=rouge, G=grise, J=jaune, N=noire.
-  Albrâques
-  Source ou venue localisée
-  Ecoulement par gravité
-  (13) Conduite et hauteur de refoulement
-  (210) +380 Puits d'exhaure avec cote au jour et hauteur de refoulement
-  R/G Bure d'exhaure avec écoulement, Rouge-Grise
-  V/G (15m) -d- -d- avec refoulement, Verte-Grise
-  +140 Exhaure par travers-bancs
-  +140 Affleurement avec sortie de galerie d'exhaure et cote du seuil

Echelle : 1/20000'





Annexe VI  
**COUPE GÉOLOGIQUE**  
 au Sud de l'ORNE  
 de PIERREVILLERS à DROITAUMONT

Echelles : longueurs : 1/20000<sup>e</sup>  
 hauteurs : 1/2000<sup>e</sup>

j2c-b	Marnes à Rhynchonelloidella	BATHONIEN
j2a	Caillasses à Anabacia	
j1c2	Marnes du Jarnisy { Oolithe de Vionville d' de Doncourt les Conflans Marnes de Gravelotte	N supérieur
j1c1	Oolithe de Jaumont	
j1b2	Calcaires siliceux de l'Orne	
j1b1	Calcaire corallien	moyen
	Calcaire du Haut-Pont	
j1a	Marno-calcaires d'Ottange	inférieur
	Marnes de Charences	
I6	Formation ferrugineuse - AALÉNIEN	LIAS
I5	Grès supraliasique - TOARCIEN supérieur	
	Dépilages en couches calcaires S2-S3	
	Dépilages en couche noire	

