

**D.E.A. NATIONAL D'HYDROLOGIE**

Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitative

**MEMOIRE**

**ESSAIS D'ESTIMATION ET DE CARACTERISATION  
FRACTALE  
DES PRECIPITATIONS SAHELIENNES**

Pascale FOUERE

Octobre 1990

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
DES MINES DE PARIS

UNIVERSITE PIERRE ET MARIE  
CURIE - PARIS 6

## SOMMAIRE

INTRODUCTION	p.1
A. LE NIGER	
A.1. La situation géographique.	p.2
A.2. Le climat.	p.2
A.3. Le projet EPSAT.	p.3
B. FRACTALS ET APPLICATIONS	
B.1. Les objets fractals.	
$\alpha$ . Introduction.	p.6
$\beta$ . Définition de la notion de fractals.	p.6
$\delta$ . Conclusion.	p.8
B.2. Applications du concept des fractals à l'hydrologie.	
$\alpha$ . Synthèse des études récentes.	p.10
$\beta$ . La méthode du comptage de boîtes.	p.14
$\delta$ . Une application concrète et détaillée.	p.17
C. LES DONNEES ET LA NOTION D'INTERMITTENCE.	
C.1. Les hyétogrammes.	p.22
C.2. Les courbes logistiques.	p.24
C.3. Conclusion	p.26
D. ESTIMATION DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS PAR ECHANTILLONAGE.	
D.1. Valeurs stables.	p.27
D.2. Valeurs variables.	p.29
D.3. Conclusion.	p.30
E. DIMENSION FRACTALE DES OCCURENCES DE PLUIES.	
E.1. Le principe.	p.31
E.2. Les résultats.	p.32
E.3. Les commentaires.	p.33
CONCLUSION	p.35

ANNEXES

ANNEXE 1

- \* Ensemble de Mandelbrot.
- \* Ensemble de Julia.

ANNEXE 2

- \* Figures des hyétogrammes de type 1.
- \* Figures des hyétogrammes de type 2.
- \* Figures des hyétogrammes linéaires.

ANNEXE 3

- \* Figures des fonctions dimensionnelles.
- \* Figures des fonctions logistiques.

## INTRODUCTION

Le concept des fractales permet une investigation et une meilleure compréhension des processus irréguliers existant dans les différents champs géophysiques.

Ce concept est une liaison fondamentale entre deux propriétés mathématiques importantes des flux en turbulence:

- \* intermittence (haute variabilité des champs)
- \* invariance d'échelle (grande portée dans le temps et dans l'espace)

Le caractère intermittent inhérent aux précipitations est développé en partie C de ce mémoire. Tandis que la propriété d'invariance d'échelle, dont quelques quantités associées à des champs d'échelles différentes trouvent par certaines transformations des rapports d'échelles similaires, est étudiée en partie E. Certains auteurs ont montré que les propriétés statistiques de certaines quantités peuvent être décrites par un exposant unique (notion d'échelle simple).

Mais, cependant les processus naturels restent trop complexes pour les réduire à un seul exposant. Ainsi, d'autres auteurs ont trouvé de multiples échelles dans leur modèle Log-normal pour la propriété d'intermittence (notion de dimensions multifractales). Le principe est de prendre en compte l'étendue des variabilités d'échelles pour des intensités étudiées et de leur attribuer différentes dimensions fractales. Le traitement de données pluviométriques permettra d'estimer et de caractériser une dimension fractale aux précipitations sahéliennes.

## A. LE NIGER

### A.1. La situation géographique

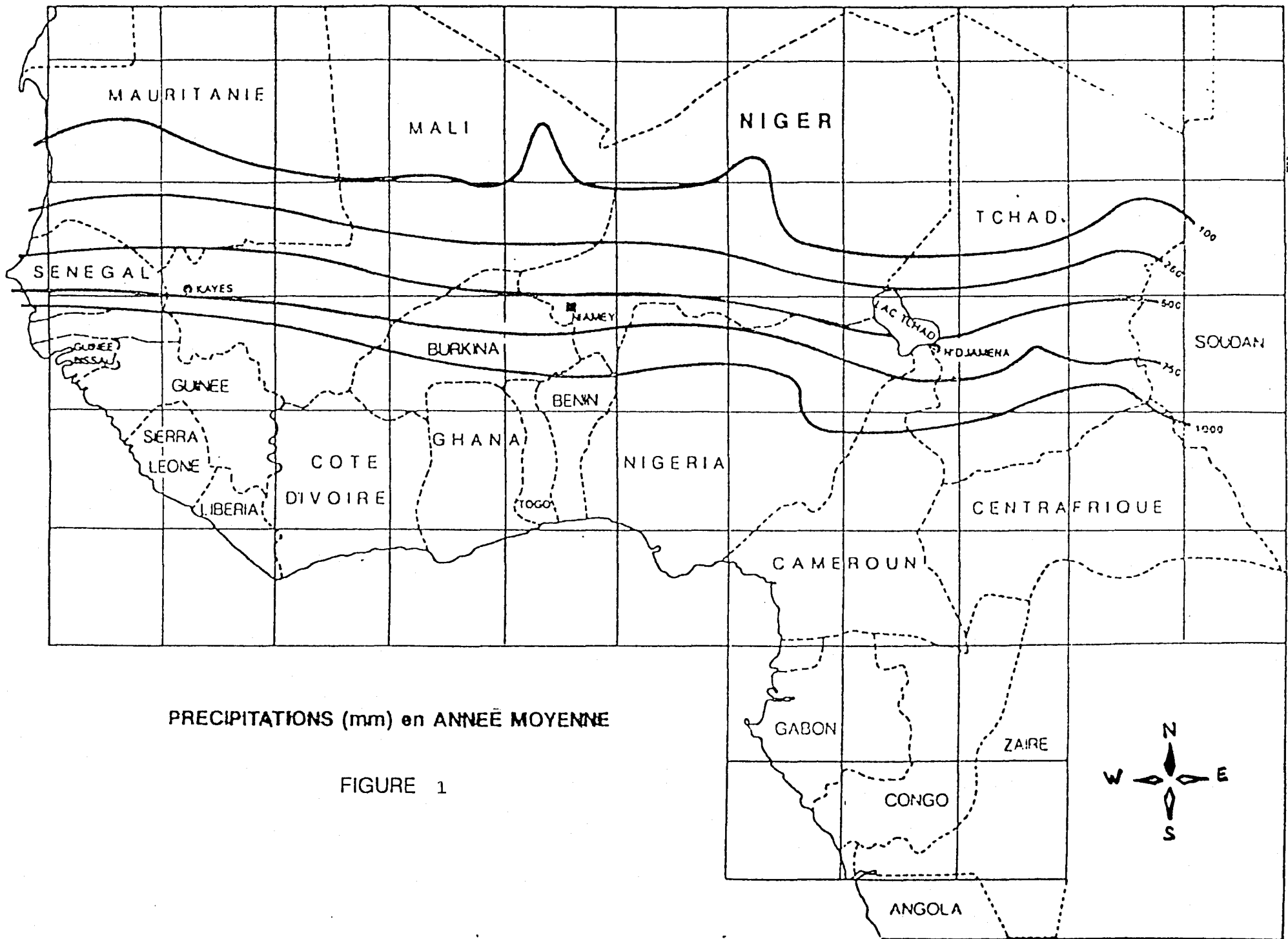
Le Niger est un état africain n'ayant aucun accès à la mer. Sa position géographique exacte s'étend entre les méridiens 1° et 16°E et entre les parallèles 12° et 22° N. La superficie de cet état est d'environ 1 267 000 km<sup>2</sup>. Sa structure réside essentiellement en un immense plateau aride, dont le Nord fait partie du Sahara. Au Sud s'étend la savane et le Sud-ouest est irrigué par le fleuve Niger.

### A.2. Le climat

La carte (fig.1) indique les précipitations moyennes (en mm) enregistrées sur une année. Un facteur de 10 sépare le Nord du Sud nigérien, il ne tombe que 100 mm par an en moyenne dans le Nord alors que les valeurs atteignent presque 1000 mm dans le Sud ( ceci est conforme à la situation géographique étudiée précédemment ). Les isohyètes suivent les parallèles de façon uniforme (avec une légère inflexion vers le Sud-ouest). La capitale Niamey trouve sa moyenne annuelle à 600 mm. Le climat nigérien présente deux saisons :

- \* une saison sèche de Novembre à Avril
- \* une saison humide de Mai à Octobre

En général, de Novembre à Avril, souffle un vent du Nord-



PRECIPITATIONS (mm) en ANNEE MOYENNE

FIGURE 1

Est, " l'Harmattan ", engendré par l'anticyclone du Sahara (c'est à dire par une masse d'air chaud et continental donc sec). Cet anticyclone atteint son maximum de développement en Janvier, puis s'affaiblit alors qu'arrive du Sud-Ouest une masse d'air maritime, plus froide, originaire de l'anticyclone de Saint-Hélène. Ce n'est que lorsque la mousson a atteint son maximum d'extension que tombent les fortes pluies. Enfin, vers le mois d'octobre, le phénomène s'inverse. Le contact de ces deux masses d'air porte le nom de convergence intertropicale dont la trace au sol est le front intertropical (F.I.T.). Dans toute l'Afrique intertropicale, les alternances de saison sont régies par le déplacement du F.I.T. sur un axe à peu près Nord-Sud. En général, les premières pluies se produisent en avril-mai, la pluviosité atteint son maximum au mois d'aout, et la saison sèche réapparaît en octobre. De temps en temps, on peut observer de petites pluies durant les premiers mois de l'année. La plus grande partie des pluies tombe aux mois de juillet et aout qui à eux-seuls représentent 90 % de la pluviométrie (fig.2).

### **A.3. Le projet EPSAT** (com. orale de V. Thauvin)

Le projet EPSAT-NIGER est une expérience pilote d'un programme d'Estimation des Précipitations par SATellite. Ainsi, les estimations des pluies au moyen du satellite com-

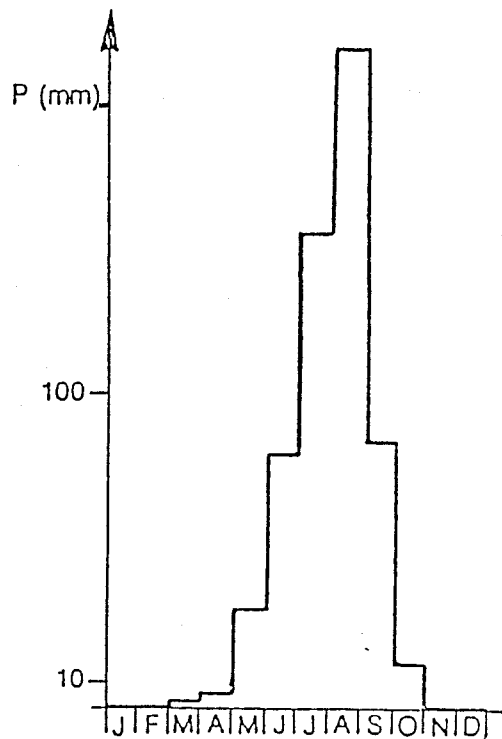
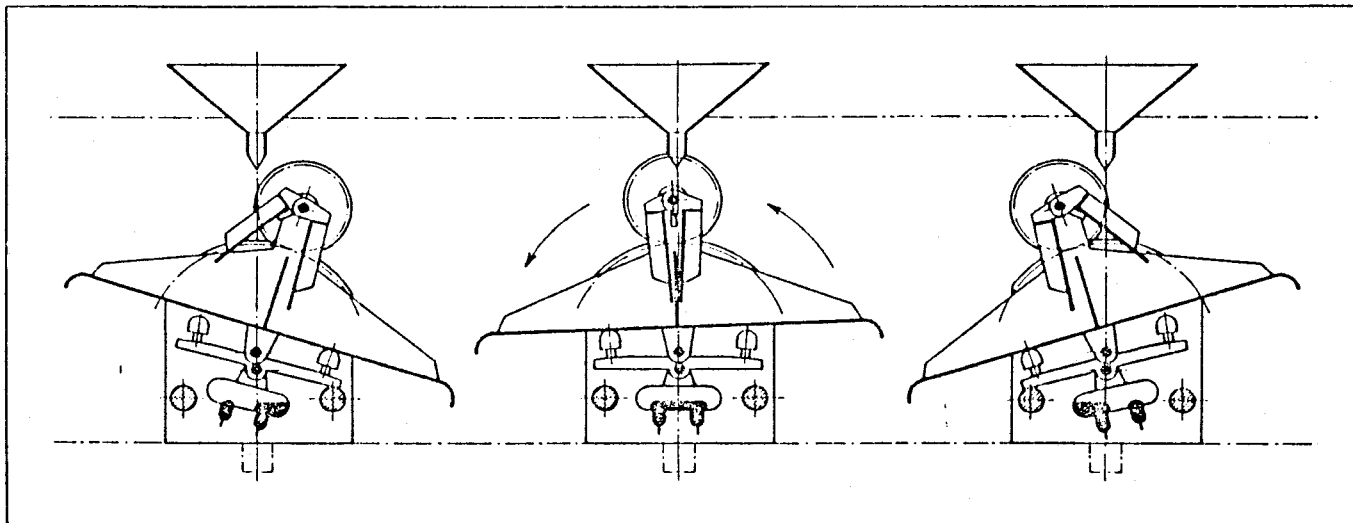


Figure 2 :  
 NIAMEY  
 Précipitation mensuelle  
 (entre 1905 et 1980)

Figure 4 : Schéma du transducteur à augets basculeurs.



Les pluviomètres permettent de compter le nombre d'unités incrémentales en volume de la pluie recueillie sur des intervalles de temps quelconque. Le dispositif le plus répandu est un système dit à "augets basculeurs" possédant deux petits récipients accolés pouvant tourner autour d'un axe horizontal. L'eau provenant du cône du receptrer s'écoule dans l'un d'eux, lorsqu'il est plein, le système bascule par suite de déplacement de son centre de gravité, assurant ainsi la vidange du premier auget et le positionnement du second sous l'orifice du cône. Chaque basculement correspond à un incrément de 0.5 mm de précipitation.



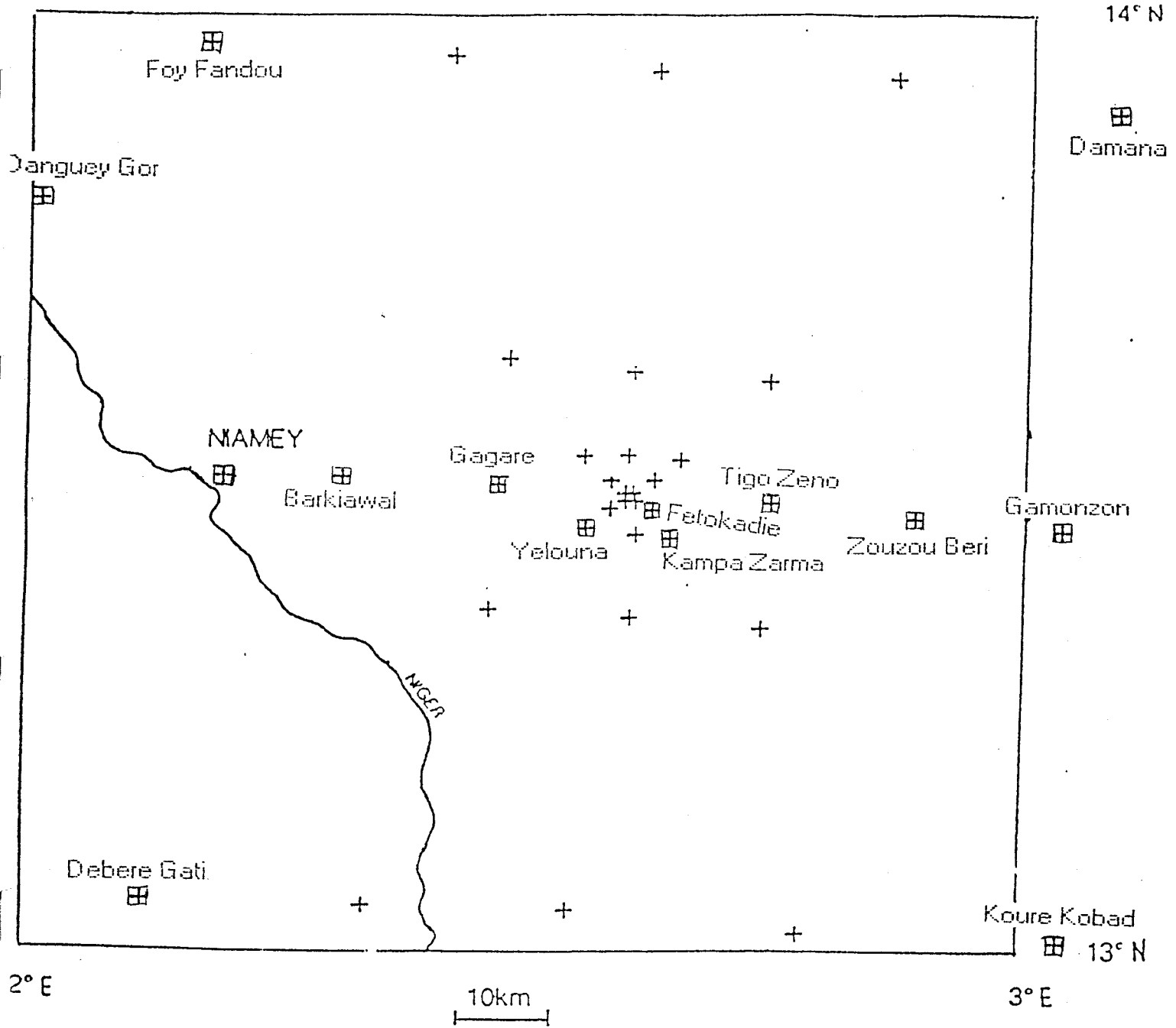
plètent les informations récoltées au sol par des méthodes plus classiques (en l'occurrence des pluviomètres). Les objectifs étant avec ces deux types de données d'améliorer la connaissance des systèmes précipitants sahéliens à des pas de temps fins et des pas d'espace variables.

De surcroit, cela permettra de fournir au modélisateur (climatologue, hydrologue, agronome...) une idée de l'erreur d'estimation commise lors du calcul de la pluie moyenne en fonction à la fois de la surface d'estimation et de la densité du réseau de mesures. Ce projet a démarré en 1985, et en 1989 le réseau était constitué de soixante dix huit pluviographes sur le degré carré de Niamey ( $10\ 000\text{ km}^2$ ). La situation de ce degré-carré s'étend exactement entre les méridiens  $2^\circ$  et  $3^\circ$  Est et les parallèles  $13^\circ$  et  $14^\circ$  Nord. La densité des pluviographes observée sur cette surface est variable avec, en général, des espacements entre les stations de 25 km sur les bords du domaine et de 1 km au centre (fig.3).

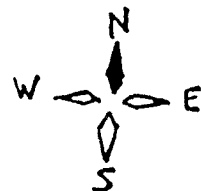
Les enregistreurs sont des pluviographes à augets basculeurs et à mémoire statique (fig.4). La sensibilité de ces appareils offre une précision sur la mesure des hauteurs précipitées de 0.5 mm et du temps de 1 seconde. Le mécanisme en est simple. A chaque fois que 0.5 mm de pluie sont récoltés, l'auget bascule et enregistre le moment du basculement. La moyenne des pluies annuelles passe de 400 mm au Nord à 800 mm

Figure 3

DEGRE CARRE DE NIAMEY



Saison des pluies de 1988  
37 postes pluviographiques



au Sud du domaine.

En 1988, le projet ne contenait que 37 postes pluviographiques dont les fichiers de 14 stations sont en notre possession. L'intitulé des stations, leur position exacte et divers renseignements sont classés dans les tableaux 1 et 2. Les données de ces fichiers pluviographiques sont emmagasinées sous une forme particulière (tableau 3) qu'il faudra par la suite remanier pour les intégrer dans de nombreux programmes informatiques.

L'étude, menée dans ce mémoire, traitera toutes ces données pluviométriques du Niger (présentées par l'ORSTOM) et tentera de déterminer par la méthode de comptages fonctionnel de boîtes les dimensions fractales de l'occurrence de pluies et par la méthode PDMS ( Probability Distribution-Multiple Scaling ) une fonction de codimension.

TABLEAU 1

EPSAT - NIGER 1988					
nom de la station	numéro de station	Période de fonctionnement			
		date du début	date de la fin	en secondes début fin	
YELOUNA EST	1321281000	05/07/88	28/10/88	16116360	26051640
KAMPA ZARMA	1321271000	09/07/88	30/09/88	16459200	23611810
GAGARE	1321309000	13/07/88	30/09/88	16806420	23621760
TIGO ZENO	1321295000	19/07/88	20/10/88	17326080	25354333
BARKIAWAL	1321310000	27/07/88	06/10/88	18011640	24138720
DANGUEY GOR	1321273000	23/06/88	07/10/88	15080400	24227400
FOY FANDOU	1321305000	20/07/88	25/10/88	17412120	25784200
DEBERE GATI	1321298000	21/07/88	05/10/88	20085675	24056250
KOURE KOBAD	1321313000	22/07/88	11/10/88	17583660	24574770
DAMANA	1321306000	23/07/88	15/09/88	17671020	22339680
ZOUZOU BERI	1321294000	29/07/88	29/09/88	18191310	23813520
GAMONZON	1321299000	05/08/88	29/09/88	18795450	23551460
NIAMEY POUDRIERE	1321280000	11/08/88	14/09/88	19305510	22235821
FETOKADIE	1321288000	07/07/88	28/10/88	16286535	26048100

TABLEAU 2

EPSAT - NIGER 1988			
Nom de la station	Fichier correspondant	Position géographique	
		Latitude d°/mn/s	Longitude d°/mn/s
YELOUNA EST	Yelouoe.lab	+13/27/07	+2/33/19
KAMPA ZARMA	Kampaoe.lab	+13/26/28	+2/38/58
GAGARE	Gagare.lab	+13/29/44	+2/28/27
TIGO ZENO	Tigozoe.lab	+13/28/32	+2/45/03
BARKIAWAL	Berkia.lab	+13/30/29	+2/19/02
DANGUEY GOR	Dangoe.lab	+13/47/51	+2/00/27
FOY FANDOU	Foyface.lab	+13/57/56	+2/10/38
DEBERE GATI	Deber2.lab	+13/03/22	+2/07/05
KOURE KOBAD	Koukoee.lab	+13/00/29	+3/02/33
DAMANA	Damanoe.lab	+13/53/16	+3/05/19
ZOUZOU BERI	Zouzoe.lab	+13/27/53	+2/53/55
GAMONZON	Gamonz.lab	+13/26/48	+3/02/39
NIAMEY POUDRIERE	Niapo.lab	+13/30/42	+2/08/58
FETOKADIE	Fetoee.lab	+13/28/13	+2/37/52

TABLEAU 3

Représentation d'un fichier ".lab"

1321273000	1988	6	1	1889	99998	448					
15080400				015210709		015210774	515210839	1015210887		1515210971	
2015211073				2515211178		3015211244	3515211304	4015211359		4515211413	
5015211480				5515211566		6015211685	6515211844	7015211994		7515212096	
8015212162				8515212237		9015212321	9515212403	10015212483		10515212588	
11015212717				11515212935		12015213389	12515214508	13015215324		13515215871	
14015216289				14515216642		15015216984	15515217356	16015217795		16515218060	
17015218359				17515218699		18015219049	18515219441	19015220198		19515221380	
20015711477				20015711528		20515711579	21015711650	21515711723		22015818036	
22015819492				22515820948		23015821070	23515821150	24015821192		24515821222	
25015821258				25515821324		26015821426	26515821515	27015821587		27515821645	
28015821715				28515821772		29015821812	29515821874	30015821937		30515822071	
31015822234				31515822365		32015822460	32515822569	33015822685		33515822826	
34015823113				34515823652		35015824053	35515824648	36015825215		36515825746	
37015826277				37515826878		38015827345	38515828062	39015829101		39516139458	
39516140065				40016140672		40516140730	41016140759	41516140809		42016140857	
42516140900				43016140948		43516140991	44016141020	44516141047		45016141118	
45516141161				46016141192		46516141219	47016141243	47516141267		48016141319	
48516141365				49016141428		49516367836	49516367914	50016367992		50516368087	
51016368363				51516368884		52016369303	52516369590	53016369682		53516369825	
54016369966				54516370168		55016370620	55516371175	56016371559		56516371800	
57016372102				57516373263		58016374049	58516374480	59016374866		59516375283	
60016376235				60516381759		60516382003	61016382247	61516382339		62016383010	

Première ligne du fichier ".lab"1

Position début-fin	Nombre de caractères	Information
1 à 10	10	Code 10 chiffres de la station
12 à 15	4	Année
17	1	Code précision
19	1	Code qualité
21 à 25	5	Hauteur totale de pluie
27 à 32	6	Dérive de temps en 1/100 000s
34 à 37	4	Nombre de couples hauteur-temps enregistré

De la seconde ligne à la fin du fichier

Six colonnes hauteur cumulée-temps cumulé  
 composées de 13 caractères chacune  
 dont les 5 premiers caractères indiquent la hauteur cumulée  
 et les 8 caractères suivants indiquent le temps cumulé

le temps est exprimé en secondes à partir du début de l'année  
 la hauteur est exprimée en 1/10 mm

## B. FRACTALS ET APPLICATIONS

### B.1. Les Objets Fractals.

#### α. Introduction

L'origine du terme Fractal ainsi que l'apport mathématique de ce concept sont le fruit des travaux du mathématicien français Benoît MANDELBROT. L'ébauche du concept de dimension fractale fait partie d'une "certaine" mathématique, qui a été créée entre 1875 et 1925, et qui tomba par la suite dans l'oubli. Ce n'est qu'à partir des années 1960 que Mandelbrot consulta les essais de cette époque et trouva son inspiration principale dans l'oeuvre de Norbert Wiener (1920). Cet essai traitait d'un modèle probabiliste du mouvement brownien et Mandelbrot lui empruntera le terme de "chaos" pour décrire une forme extrême du désordre naturel. L'idée motrice étant que la géométrie de la nature est chaotique et mal représentée par l'ordre parfait des formes usuelles d'Euclide (ou du calcul différentiel). Cette documentation ne fut que le point de départ des réflexions du mathématicien, ce n'est que plus tard qu'il a conçu, mis au point et utilisé sa nouvelle géométrie.

#### β. Définition de la notion de fractals.

Le terme fractal provient du mot latin fractus désignant

un objet de forme irrégulière et discontinue. L'objet fractal est caractérisé par trois propriétés :

- \* auto-similarité
- \* dimension fractale
- \* influence du hasard

C'est au travers d'exemples concrets que ces trois propriétés seront explicitées dans la suite de ce mémoire. Par définition, l'**auto-similarité** est la qualité essentielle des fractals : " chaque partie de l'objet considéré est une image réduite du tout ", et la dimension fractale mesure le degré d'irrégularité de l'objet.

Un exemple classique de courbe fractale parfaitement auto-similaire est la courbe de Von Koch. Elle se traduit par un processus récursif dont le principe est le suivant (fig.5) :

Le motif initial est formé de quatre segments de droite de longueurs égales dont les deux du milieu forment les cotés d'un triangle équilatéral. Chaque segment est ensuite remplacé par le motif initial réduit à un tiers de sa taille. ce procédé peut être répété indéfiniment. La détermination de la dimension d'une telle courbe se fera grace à la formule suivante :

$$D = \text{Log}(N) / \text{Log}(1/r)$$

où N est le nombre de segments

r est le rapport d'homothétie

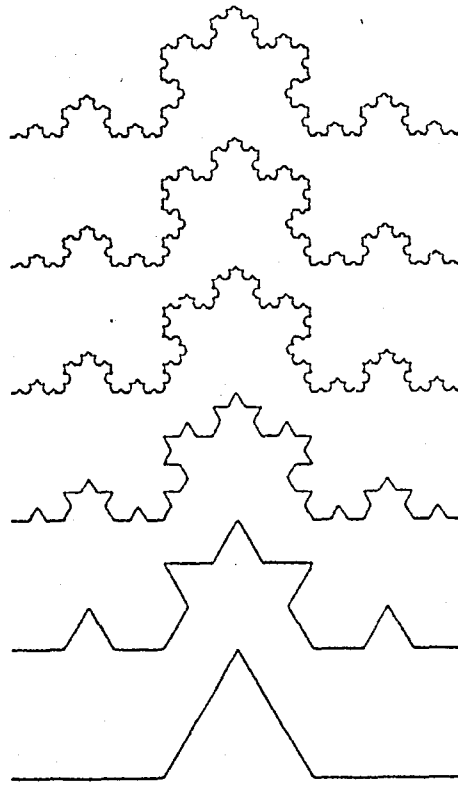


Figure 5 : Courbe de Koch

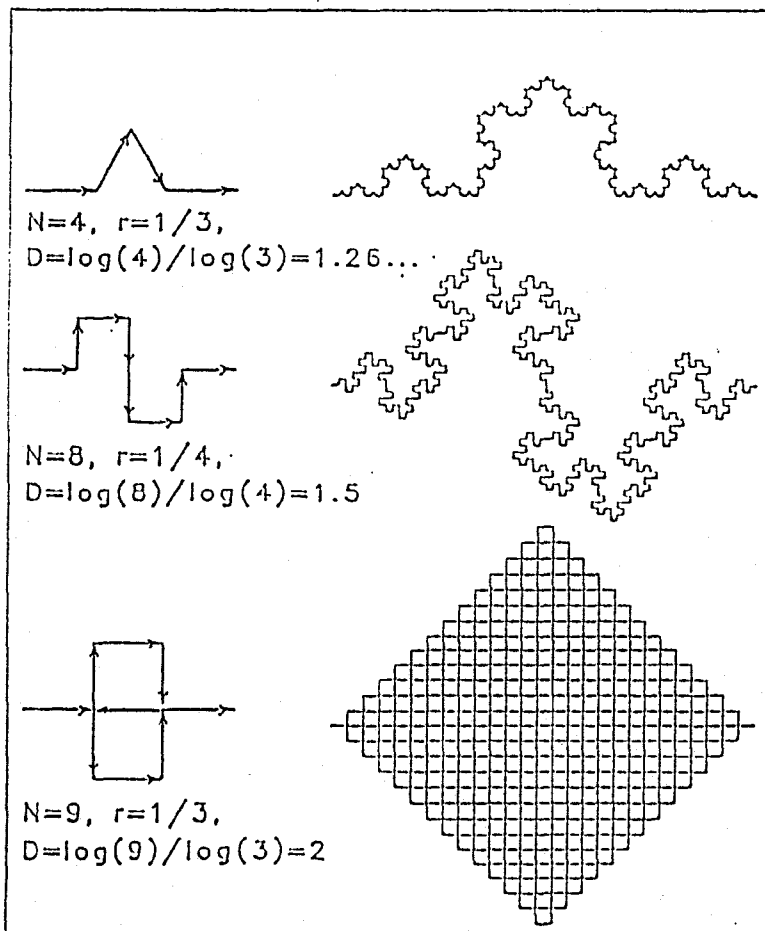


Figure 6 : Autres courbes fractales



Ainsi, dans le cas de la courbe de Von Koch on obtient :

$$r = 1/3 \text{ et } N = 4 \text{ d'où } D = \text{Log}(4) / \text{Log}(3) = 1.26$$

D'autres exemples sont notés figure 6.

Le cas concret développé par Mandelbrot dans son livre est la mesure de la cote de Bretagne et le principe de la courbe de Von Koch ne peut s'y appliquer. Les phénomènes qui ont modelé la cote bretonne au cours des siècles font que la limite terre-eau est irrégulière (fig.7a et 7b:les segments ne sont plus identiques entre eux).

Ainsi, l'influence du **hasard** permet de généraliser le modèle de la courbe de Von Koch. L'objectif de représenter le plus précisément la cote est atteint par l'étude du mouvement brownien (fig.8).

#### δ. Conclusion

Très critiqués par le monde scientifique, les travaux de Mandelbrot ont fini par aboutir et à passer des notions intuitives à des théories mathématiques et à être très largement reconnus actuellement. Il y a déjà deux siècles, les grands mathématiciens Lagrange et Laplace avaient éliminé toutes représentations graphiques de leurs essais. La géométrie fractale rompt avec cette tradition, et au contraire, grâce aux ordinateurs, elle peut atteindre son apogée au niveau graphisme (Peitgen & Richter 1986 et Peitgen & Saupe 1988). Ces images

fractales sont les résultats visuels obtenus par des méthodes mathématiques usuelles, pures et abstraites (ensemble de Julia et ensemble de Mandelbrot en Annexe 1).

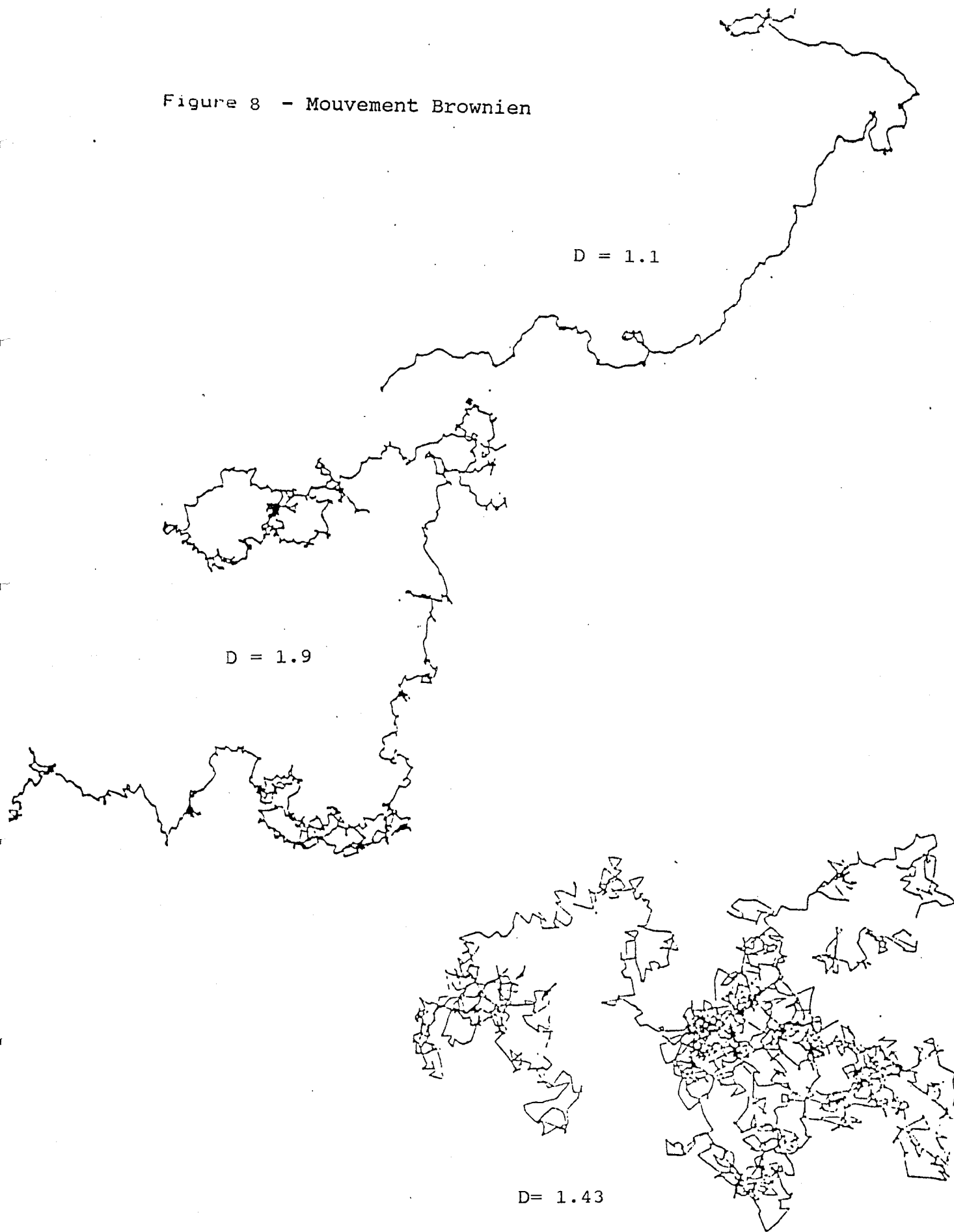
Figure 7a: Cartographie de la côte de Bretagne  
( échelle : 1 / 1 000 000 )



Figure 7b: Cartographie de la côte de la Presque-île de Crozon  
( échelle : 1 / 200 000 )



Figure 8 - Mouvement Brownien



## **B.2. Applications du concept des Fractals à l'Hydrologie.**

Dans cette étude, l'application du concept des fractals portera sur les précipitations dont l'étude est à la frontière de la météorologie et de l'hydrologie. Le caractère intermittent intrinsèque à la notion de précipitation sera l'élément fondamental de ce propos. Le cycle de l'eau, dont les trois phénomènes principaux sont l'évaporation, la condensation et les précipitations, décrit un bilan mondial constant, alors qu'il est visible que toutes les régions du globe ne sont pas arrosées de manière homogène.

Deux idées sont à retenir (P.Hubert 1990) : quelque soit le pays arrosé, les périodes pluvieuses ne sont que de quelques heures par an, et, au cours de ces périodes, les épisodes de fortes intensités pluvieuses sont extrêmement courts. Par exemple, une étude faite sur la capitale du Niger (Niamey) suggère que la moitié de la hauteur d'eau tombée annuellement surviendrait pendant une durée cumulée ne dépassant pas trois heures.

Ainsi, ce problème d'intermittence lié au temps, mais aussi à l'espace conduit à développer et à renouveler les notions **d'invariance d'échelle.**

### **α. Synthèse d'études récentes.**

En suivant ce type de raisonnement et en observant la

distribution des stations de mesures (réseaux pluviographiques), cette dernière est parfaitement hétérogène ; plus dense sur les continents et surtout plus dense à proximité des grands centres de population. Lovejoy, Schertzer et Ladoy (1986) ont caractérisé cette hétérogénéité par une dimension fractale  $D_m$  telle que le réseau météomondial implanté à la surface de la Terre (dimension  $E=2$ ) possède une dimension empirique  $D_m = 1.75$ . C'est la dimension de corrélation. L'étude des structures fractales permet de simuler le comportement de phénomènes naturels complexes. Là encore, Schertzer et Lovejoy (1984) ont étudié le mouvement de l'atmosphère qui résulte de tourbillons de toutes tailles et de toutes intensités. Les petits et les grands phénomènes atmosphériques possèdent des propriétés communes et quelle que soit l'échelle, la représentation de l'objet étudié reste identique. Par conséquent, cette loi mathématique d'invariance d'échelle permet de déterminer la dimension de ces mouvements atmosphériques. Pour commencer, l'étude portera sur le périmètre des nuages. La méthode employée sera comparable à celle de la formation du flocon de Koch.

Précisément, les données utilisées par Lovejoy sont fournies par des radars et des satellites. La dimension des périmètres des nuages obtenue ainsi est de 1.35 (un peu supérieur à 1.26). La détermination de la dimension des mouvements atmosphériques est plus complexe. A petite échelle, la perturbation paraît

volumique alors qu'à grande échelle, elle paraît plane par rapport au rayon de terrestre.

Ainsi, une autre proposition est énoncée : " une loi unique d'invariance d'échelles régit la dynamique à la fois des petites et des grandes échelles ". Cette loi définit une dimension particulière dite **elliptique** :  $D_{el} = 2.555$  .

Ce terme décrit parfaitement le mouvement des tourbillons moyens plus généralement elliptiques que circulaires. On définira l'invariance d'échelle d'anisotropie, privilégiant certaines directions telles que la verticale (du fait de la gravité) et l'axe de rotation de la Terre (du fait de la force de Coriolis).

Afin de garder un caractère réaliste, toutes simulations faites sur les mouvements atmosphériques devront conserver cette notion d'anisotropie, ainsi que la notion d'intermittence des phénomènes (souvent décrit par des lois de probabilité dite **hyperbolique** ).

Etudions maintenant une autre application des Fractals, celle que Lovejoy a faite avec Tardieu et Monceau (1982). Une situation météorologique est analysée suivant sa structure linéaire (ou ligne de grains), la perturbation sélectionnée est celle qui traversa notre pays les 14 et 15 décembre 1980. Après une analyse fractale des cartes des précipitations, l'hypothèse d'absence d'échelle caractéristique sur ces zones de

pluies (lignes de grains) est acceptée et trois paramètres en découlent :

\* Dimension fractale caractérise la complexité des formes.

$$P = ( A^D )^{1/2}$$

A : aire

P : périmètre

D = 1.38 en régions tropicales

(1.35 en régions de latitudes moyennes)

\* Exposant H de la fonction de structure

$$dR = dX^H \quad \text{avec } H = 0.5$$

Il détermine l'intensité des dépendances des fluctuations dR (intensité de pluie) en fonction de dX (axe horizontal).

\* Distribution des fluctuations extrêmes

$$\text{Pr}(dR > dr) = ( dr )^{-\alpha} \quad \text{avec } \alpha = 5/3$$

Cette distribution est de type hyperbolique.

En 1983, Lovejoy développe à nouveau ce type de problème et fait intervenir l'effet NOE .

L'effet NOE est une propriété importante déduite de cette fonction Pr (fig.9).

Ainsi, on observe que quelque soit l'intervalle de temps considéré, la fonction Pr est discontinue et la plus grande discontinuité domine toutes les autres (définition de l'effet NOE).



Concrètement, ces larges discontinuités correspondent à des lignes de grains (ou front de pluie). Comme le caractère hyperbolique d'une loi de probabilité est invariant pour des changements d'échelles spatio-temporelles, les fronts de pluie obéissent à la loi d'invariance d'échelle et les aires de pluie n'ayant pas d'échelle caractéristique sont par conséquent des fractales.

### **B. La méthode du comptage de boîtes.**

Cette méthode du comptage de boîtes a été développée dans un article de Lovejoy, Schertzer et Tsonis (1987). En se fondant sur un article de Lovejoy (1982.A), cet auteur a analysé des images satellitaires en Infra-Rouge de plusieurs nuages et a mesuré toutes les aires et tous les périmètres excédant un seuil préalablement établi. Pour un seuil de 1 à 1 000 km, il établit une relation d'échelle

$P = A^{D/2}$ , où D est la dimension fractale des périmètres des nuages et dont sa valeur est de  $1.35 \pm 0.05$ .

Il s'est avéré par la suite que le cas d'échelle simple, pour laquelle une grande échelle est semblable à une plus petite (auto-similaire) est un cas spécial et rare.

Ainsi, la stratification et la rotation atmosphériques (gravité et force de Coriolis) seront, comme nous l'avons déjà vu, caractérisées par des dimensions elliptiques (ex.  $d_{e1} = 2.555$

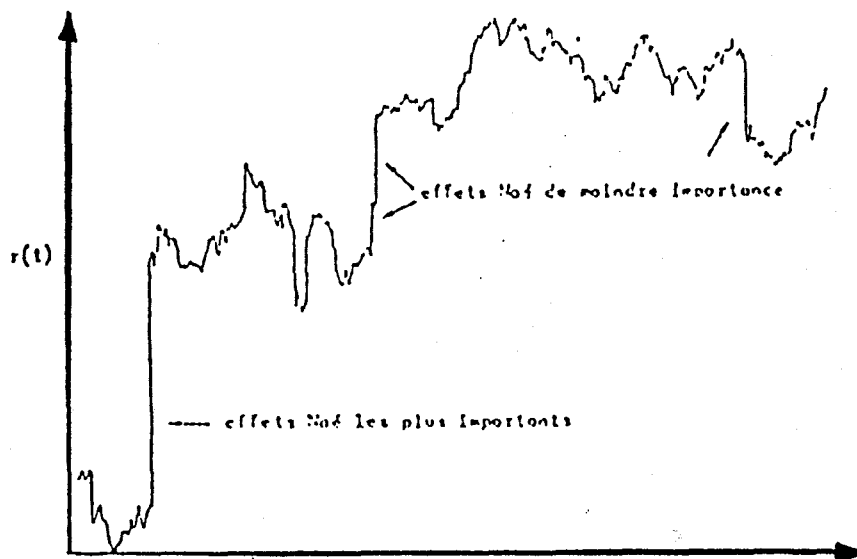


Figure 9 : Effet NOE

Simulation d'une série temporelle de la pluie  $r(t)$  construit par l'addition de plusieurs variables aléatoires indépendantes venant d'une distribution  $dt$ . On remarque que dans n'importe quel intervalle, une grande partie du changement en  $r(t)$  est due à un seul grand "saut", d'où le comportement intermittent et "erratique".

TABEAU 4

Dimension fractale  $D_2$  des régions du plan où les précipitations excèdent un seuil défini.

*Fractal dimension  $D_2$  of the plane regions where rainfall exceeds a given threshold.*

Seuil (mm)	Dimension
10	1,94
20	1,86
30	1,68
40	1,44

TABEAU 5

Dimension fractale  $D_1$  des régions de droites de différentes directions où la précipitation excède un seuil défini

*Fractal dimension  $D_1$  of the line regions where rainfall exceeds a given threshold according to different directions.*

Seuil (mm)	Direction			
	SE-NO	E-O	NE-SO	N-S
10	0,94	0,96	0,94	0,95
20	0,86	0,90	0,86	0,86
30	0,74	0,76	0,71	0,70
40	0,58	0,62	0,55	0,53

dans les champs de vents horizontaux).

De plus, les échelles anisotropiques étaient à la base d'un formalisme appelé " invariance d'échelle généralisée ". Maintenant, l'échelle ne dépend plus de la notion de distance, mais plutôt de la taille de l'élément considéré (volume d'un nuage). Ainsi, cette notion laisse entrevoir non pas une seule mais plusieurs dimensions fractales.

En résumé, la relation A-P n'est pas appropriée aux événements de fortes intensités ni adaptée à l'étude de l'anisotropie. Les avantages de la technique du comptage de boîtes sont la simplicité de son application et l'estimation directe de la dimension elliptique. La démarche de cette méthode est la suivante :

Une fonction  $f(r)$  est établie dans laquelle  $r$  est la position et  $T$  un seuil fixé. Les éléments intervenant dans une série de données seront ceux répondant à la condition de dépassement :  $f(r) \geq T$  , on observe qu'en augmentant la valeur de  $T$ , on obtient une fonction  $D(T)$  décroissante. Certaines hypothèses sont énoncées telles que le processus est stationnaire et les grandes valeurs de  $f$  représentent des événements rares et intenses.

En appliquant cette méthode à des données de réflectivités radar, les résultats obtenus par les trois auteurs sont visibles dans la figure 10 ( la pente des droites diminue lors

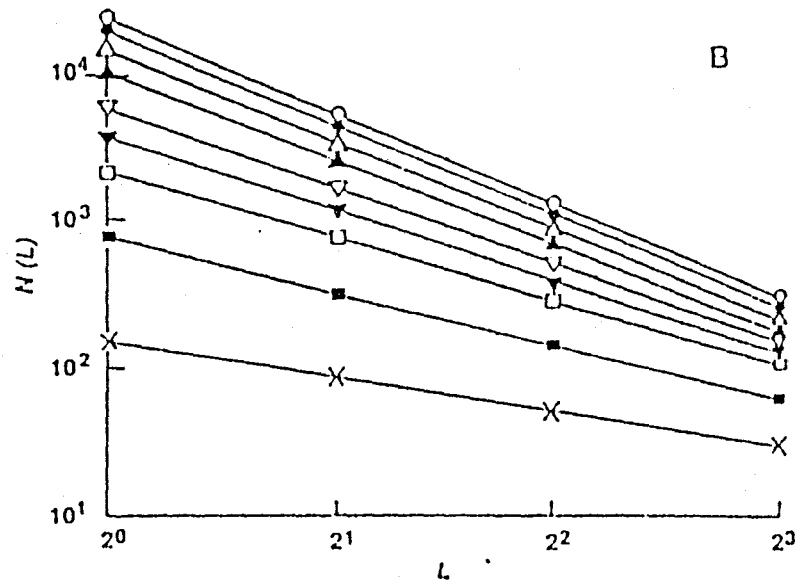
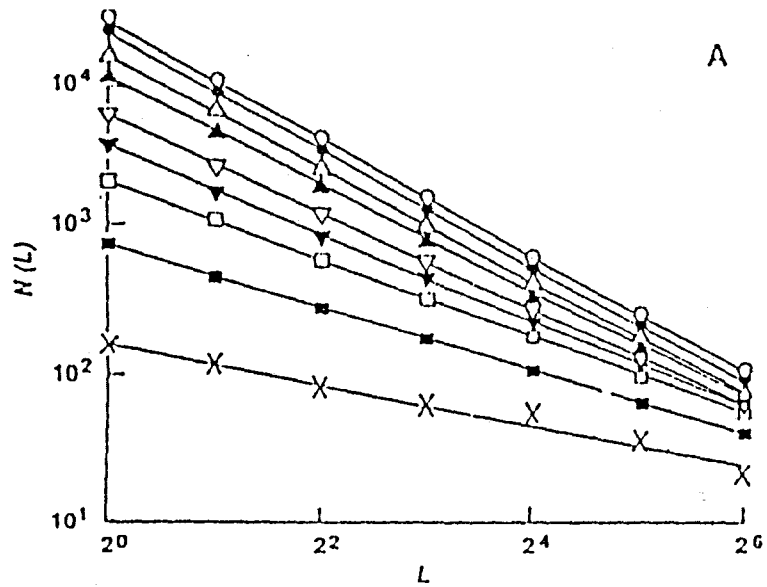


Figure 10 : A. Représentation de  $N(L)$  en fonction de  $L$  pour neuf seuils de réflectivité radar. La taille des boîtes (axe horizontal) augmente d'un facteur 2 à chaque incrément.

Les différents symboles indiquent les valeurs de tous les seuils. La pente est négative et décroît de 1.24 à 0.40.

B. Analyse est similaire, mais les boîtes sont de forme cubique. Les valeurs des pentes varient de 2.18 à 0.81.

que la valeur de T augmente ).

Ainsi, dans cette étude, le caractère multifractal apparait. Cette propriété de multifractalité du champ des précipitations permet de caractériser la variabilité spatiale et l'anisotropie du champ pluviométrique en zone intertropicale (Hubert et Carbonnel 1988). Ce dernier article traite d'une averse au Burkina-Faso observée sur une surface de 10 000 km<sup>2</sup> (degré carré de Ouagadougou) dont le réseau se compose de 111 pluviomètres. La direction de la ligne de grains étudiée est d'Est au Sud-Ouest avec une vitesse de 60 km/h. Pour caractériser le réseau, on détermine une dimension de corrélation  $D_m$ . Pour cela, on centre en chaque station un cercle de rayon L et on note le nombre de stations contenues à l'intérieur de ce cercle  $n(L)$ . Ensuite, on place la moyenne  $\langle n(L) \rangle$  en fonction du rayon L dans un diagramme Log-Log (fig.11).

On obtient :  $\langle n(L) \rangle = L^{D_m}$

où  $D_m = 1.55 \pm 0.05$  (pente de la droite).

Désormais, un seuil d'intensité de pluie est fixé et, de la même façon que précédemment, on place  $n(L)$  en fonction de L pour chaque seuil.

( figure 12: seuil de 10 mm - droite du haut -  
seuil de 40 mm - droite du bas - )

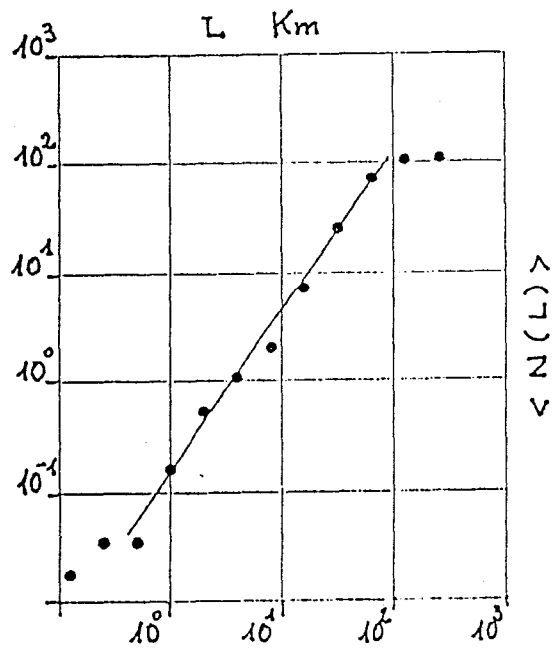


Fig. 11 Dimension fractale du réseau de mesure.

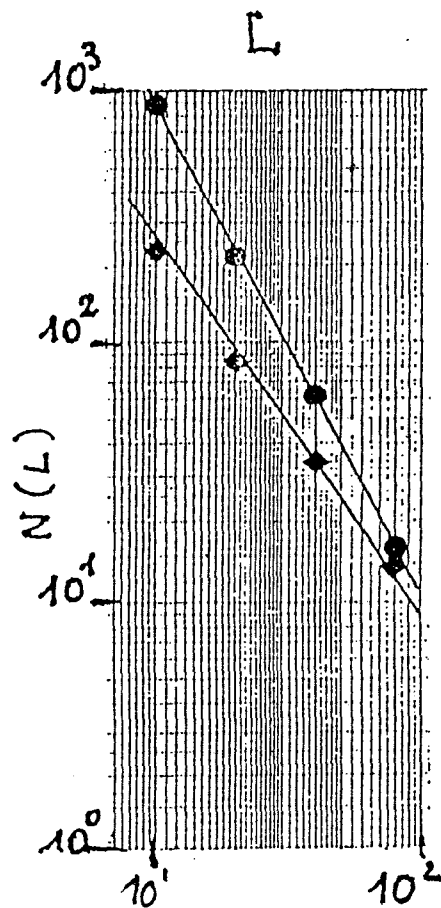


Fig. 12 Dimension fractale des régions délimitées par des seuils de précipitation (de haut en bas) de 10, 40 mm.

On observe à nouveau dans cette étude les mêmes résultats que dans l'article précédent, c'est à dire que pour un seuil croissant, la dimension diminue (tableau 4).

Mais, pour aborder le problème de l'anisotropie toujours par la technique de comptage de boites, il suffit de transformer ces boites en rectangles et la dimension sera maximale pour les boites orientées dans le sens de la perturbation (tableau 5).

**δ. Une application concrète et détaillée de cette méthode ou la notion de poussière de Cantor (P.Hubert & J.P. Carbonnel 1989)**

La localisation des deux stations étudiées (Dédougou et Ouagadougou) se trouve sur le territoire du Burkina-Faso (fig.13). La pluie, étant considérée comme un phénomène intermittent, définit une succession d'états secs et pluvieux. Pour distinguer ces deux états, trois paramètres sont nécessaires.

- \* une surface (aire)
- \* un intervalle de temps
- \* un seuil de précipitation

Ainsi, un intervalle de temps est dit pluvieux pour une surface donnée si une quantité d'eau météorique supérieure à un seuil choisi a été précipitée.

Par conséquent, dans cette étude, l'instrument permettant de définir avec précision une aire d'observation (confondue à sa

surface de collecte) est le pluviomètre. Les relevés sont faites tous les matins à 8 heures, l'intervalle de temps est donc de 24 heures et le seuil de précipitation est de 0.1 mm. Dans ce type d'étude, la notion de "poussière de Cantor" (notion développée par B. Mandelbrot sur la figure 14) est la mieux appropriée à la détermination d'une dimension fractale, tandis que la méthode du comptage de boîtes sera à nouveau employée pour déterminer les dimensions de deux séries de données (horaires et journalières).

Le principe est le suivant : on réalise un maillage sur un segment, c'est à dire que l'on dispose plusieurs carrés de cotés a (fig 17,18).

Le but étant de recouvrir par ces boîtes, le phénomène à étudier. Cette notion est la base de la méthode du comptage de boîtes vue dans le paragraphe précédent.

La relation entre le nombre de boîtes  $N(a)$  et la taille des boîtes est la suivante :

$$\text{Log}( N(a) ) = - D * \text{Log}(a) + \text{constante}$$

$N(a)$  est déterminé pour plusieurs valeurs de a.

L'estimation de la dimension fractale D est l'opposé de la pente de la régression de N en fonction de a dans un diagramme Log-Log.



### Etude de la série de données journalières

Les données pluviométriques sont celles de la station de Dédougou (fig. 13) où les observations ont été réalisées du 01.01.1922 au 31.12.1966, soit pendant 45 ans (autrement dit une sequence de  $2^{14} = 16\ 384$  jours consécutifs). Les 45 années d'observations sont représentées sur la figure 15.

Chaque ligne correspondant à une année, le première ligne en trait plein permet d'apprécier la longueur totale d'une année (s'étendant du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre). Dans ces tracés, seules les journées pluvieuses sont marquées.

Le principe de comptage de boites a permis l'étude de 15 séries de boites de tailles différentes allant de 1 jours à 16 384 jours (fig.16).

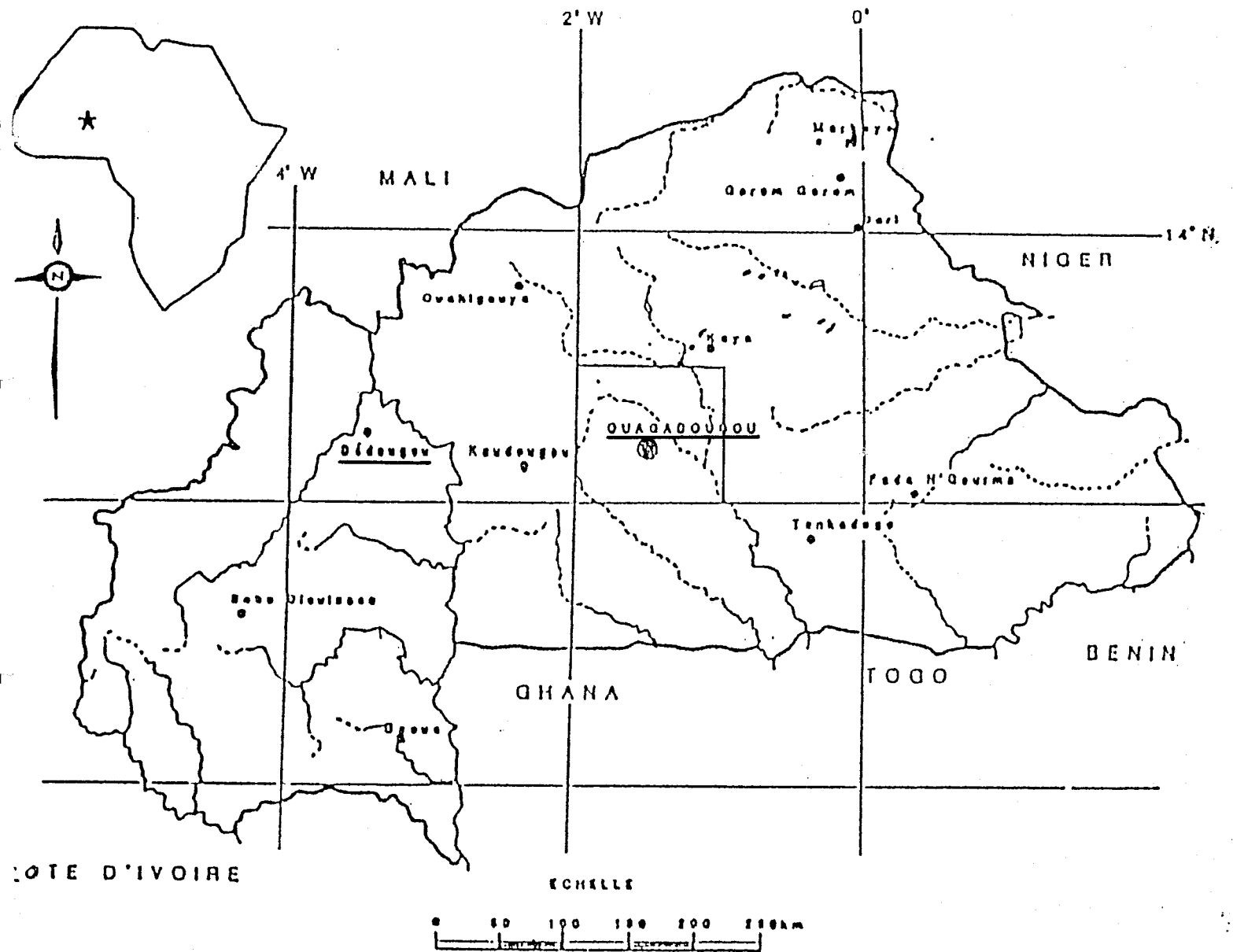
Grâce à l'alignement de certains points, trois dimensions sont mises en évidence. Pour les points représentatifs 1 et 2, correspondant à la taille de boites de 1 et 2 jours, la dimension fractale est de 0.238. Pour les points représentatifs 4 et 8 (c'est à dire de 8 à 128 jours), la dimension est 0.786. Pour les points représentatifs de 9 à 15 (c'est à dire de 256 à 16 384 jours), la dimension est de 1.

L'intérêt de cette série journalière est l'obtention de la valeur 0.786, car elle correspond à peu près à la saison des pluie dans l'année en Afrique soudano-sahélienne et dont la dimension a pour valeur 0.783 (explication en figure 17).



stations différentes (mais toujours sous le même climat) montre une certaine similarité. Cette étude permet d'observer deux dimensions dépendantes du temps.

Pour une échelle de temps allant de quelques heures à quelques jours, la dimension fractale obtenue est 0.2, tandis que pour une échelle de quelques jours à quelques mois, la dimension est de 0.8.



Situation géographique du degré-carré de Ouagadougou (Burkina-Faso)

Figure 13

Localisation des stations étudiées

	Longitude Ouest degré.minute	Latitude Nord degré.minute
Dédougou	3.29	12.28
Ouagadougou-ORSTOM	1.31	12.22

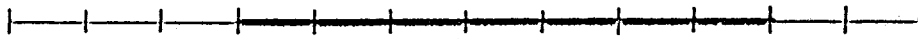


Figure 14 : Principe de la poussière de CANTOR.

Segment initial



Générateur



$$N=7 \quad n=12 \quad D = \frac{\log N}{\log n} = \frac{\log 7}{\log 12}$$

Figure 17 : Générateur d'une poussière de Cantor de dimension  $\frac{\log 7}{\log 12} = 0.783$ .  
 A chaque étape, le segment initial (représentant une année) est divisé en  $n=12$  segments élémentaires (les 12 mois de l'année). Seuls  $N=7$  segments élémentaires (représentant les 7 mois de la saison des pluies au Burkina-Faso) seront pris en considération.

Figure 15 : 45 années d'observations pluviométriques journalières (de 1922 à 1966) à Dédougou (Burkina-Faso). Chaque ligne correspond à une année d'observations. La première ligne, en trait plein, permet d'apprécier la longueur totale de l'année du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre.

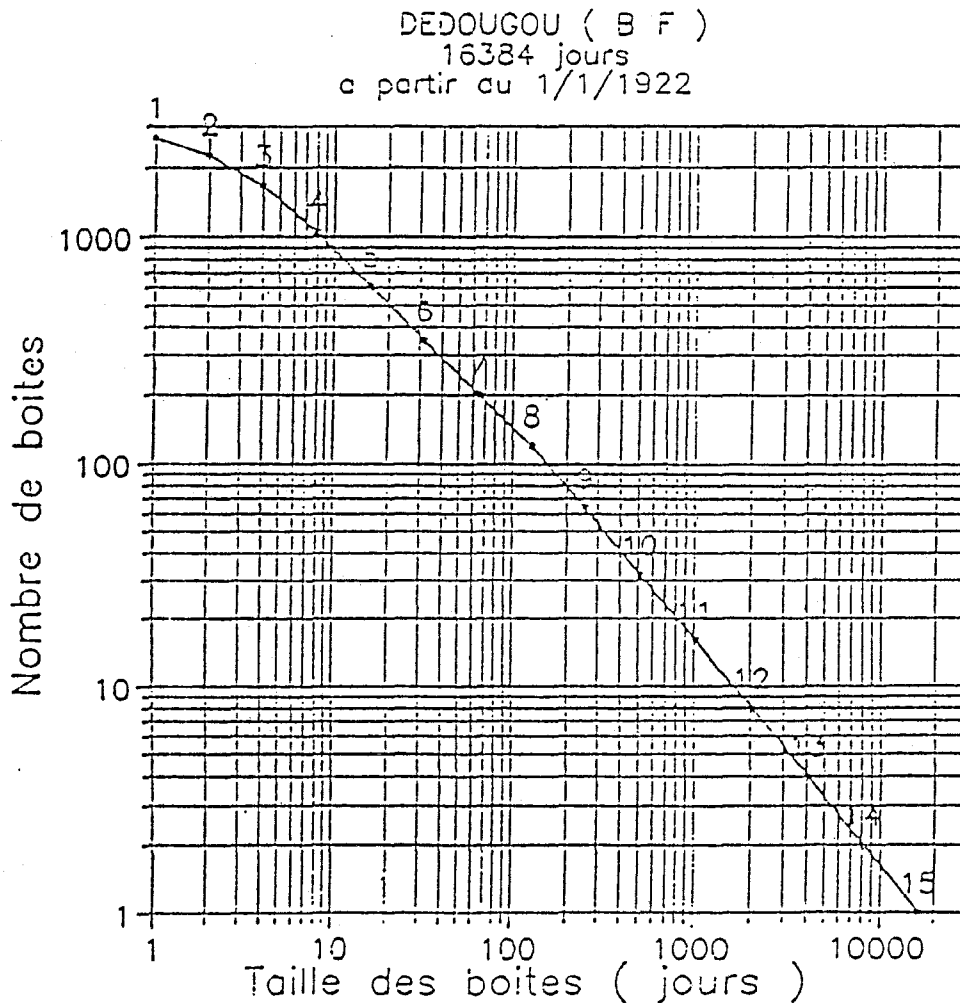


Dedougou ( Burkina Faso )

N°	Taille de boite ( jours )	Nombre de boites
1	2 <sup>0</sup> = 1	2679
2	2 <sup>1</sup> = 2	2272
3	2 <sup>2</sup> = 4	1667
4	2 <sup>3</sup> = 8	1051
5	2 <sup>4</sup> = 16	610
6	2 <sup>5</sup> = 32	348
7	2 <sup>6</sup> = 64	202
8	2 <sup>7</sup> = 128	120
9	2 <sup>8</sup> = 256	64
10	2 <sup>9</sup> = 512	32
11	2 <sup>10</sup> = 1024	16
12	2 <sup>11</sup> = 2048	8
13	2 <sup>12</sup> = 4096	4
14	2 <sup>13</sup> = 8192	2
15	2 <sup>14</sup> = 16384	1

$D=0.786$   
 $r=-0.999$   
 $D=1.000$   
 $r=-1.000$

Figure 16



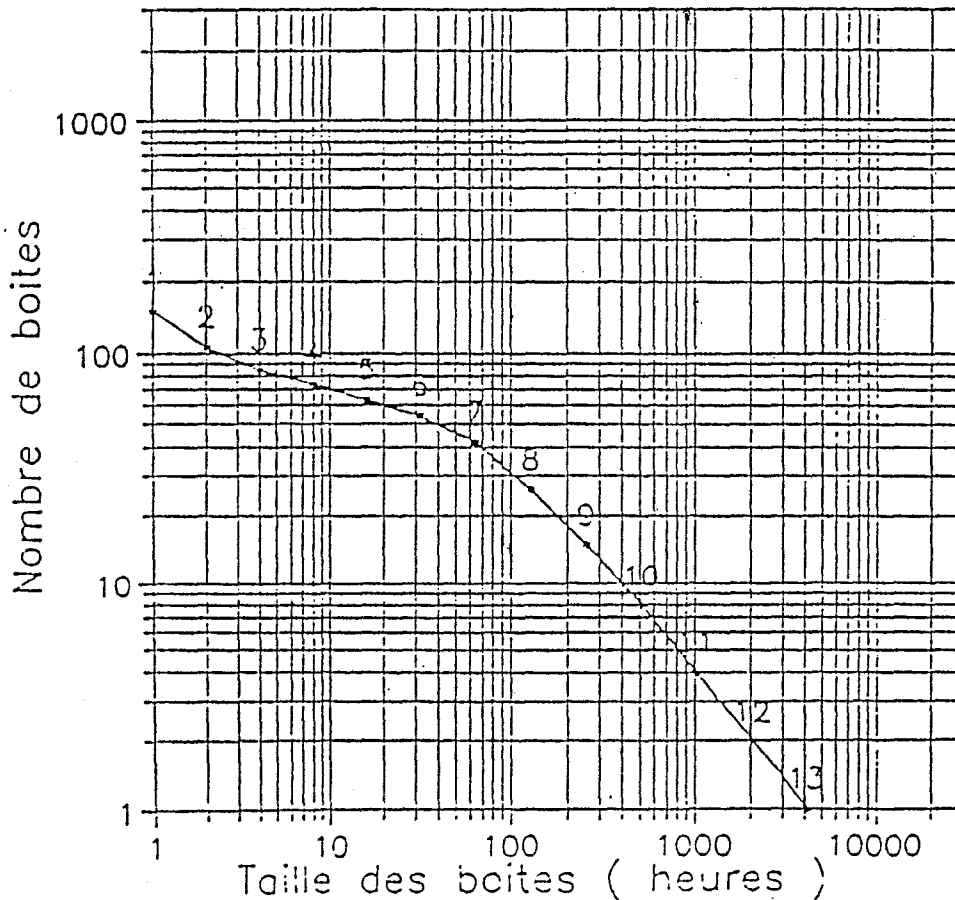
Ouagadougou-ORSTOM ( Burkina Faso )

Taille de boîte    Nombre de boîtes  
( heures )

1	2 <sup>0</sup>	1	150	
2	2 <sup>1</sup>	2	106	
3	2 <sup>2</sup>	4	85	] D=0.220 r=-0.999
4	2 <sup>3</sup>	8	74	
5	2 <sup>4</sup>	16	63	
6	2 <sup>5</sup>	32	54	] D=0.743
7	2 <sup>6</sup>	64	42	
8	2 <sup>7</sup>	128	26	
9	2 <sup>8</sup>	256	15	] D=1.000 r=-1.000
10	2 <sup>9</sup>	512	8	
11	2 <sup>10</sup>	1024	4	
12	2 <sup>11</sup>	2048	2	
13	2 <sup>12</sup>	4096	1	

Figure 18

OUAGADOUGOU ORSTOM ( B F )  
4096 heures  
a partir du 1/5/1986 a 0 h





### C. LES DONNEES ET LA NOTION D'INTERMITTENCE.

Dans ce mémoire, les méthodes énumérées plus haut vont être appliquées aux 14 fichiers de données pluviométriques provenant du Niger. Le nom, la position et d'autres renseignements sur les postes sont indiqués dans les tableaux 1 et 2 de la partie A. Toutes ces données ont été enregistrées pendant la saison des pluies et par conséquent, s'étalent de mai à octobre. En figure 19, cette durée de fonctionnement des quatorze stations est indiquée. L'année considérée dans cette étude est l'année 1988. La localisation est le degré-carré de Niamey. Successivement, les figures concernant les hyétogrammes, les courbes logistiques, les estimations des hauteurs de pluies (partie D) et les fonctions dimensionnelles (partie E) seront explicitées par la suite.

#### C.1. Les hyétogrammes.

Toutes les figures sont rassemblées en annexe 2. Les échelles pour le temps et pour l'intensité ont été volontairement imposées et sont identiques pour les quatorze stations, afin de permettre une comparaison plus rapide entre elles. Malheureusement, il est difficile de représenter de façon claire et distincte sept mois consécutifs sur une seule page (fig. 20).

La graduation qui découle de ce choix, implique pour les hyéto-grammes de type 1, un intervalle de 200 000 secondes (soit 56 heures) en figure 20 A. Tandis que pour les hyéto-grammes de type 2, l'intervalle sera de l'ordre de 50 000 secondes (soit 14 heures) en figure 20 B.

Pour ces dernières figures, la période choisie est celle du fonctionnement commun à toutes les stations. Ainsi, dans ces deux types de hyéto-grammes, les pics représentent les moments pluvieux dont l'intensité est relativement forte (plusieurs basculements de 0.5 mm sont enregistrés, mais à ces échelles, ne peuvent être distingués).

Le choix d'une échelle logarithmique permet une bonne représentation des moments de faible intensité, alors que l'échelle linéaire (figure 20 C) mettra en évidence les variations des fortes intensités.

En résumé, les pics de fortes intensités dépassent rarement l'ordre de grandeur d'une graduation de type 2, c'est à dire que l'état pluvieux n'excède guère 14 heures, tout en restant très variable dans cette limite de temps (par exemple: la station de Gagare atteint 0.5 mm en une seconde). Au contraire, les paliers correspondants aux faibles intensités s'étalent sur 650 000 secondes (soit 8 jours). Cette dernière valeur correspond à la valeur maximale enregistrée (station de Danguay Gor) sur toutes les stations.

Figure 19 :

Durée de fonctionnement  
des 14 stations pluviographiques

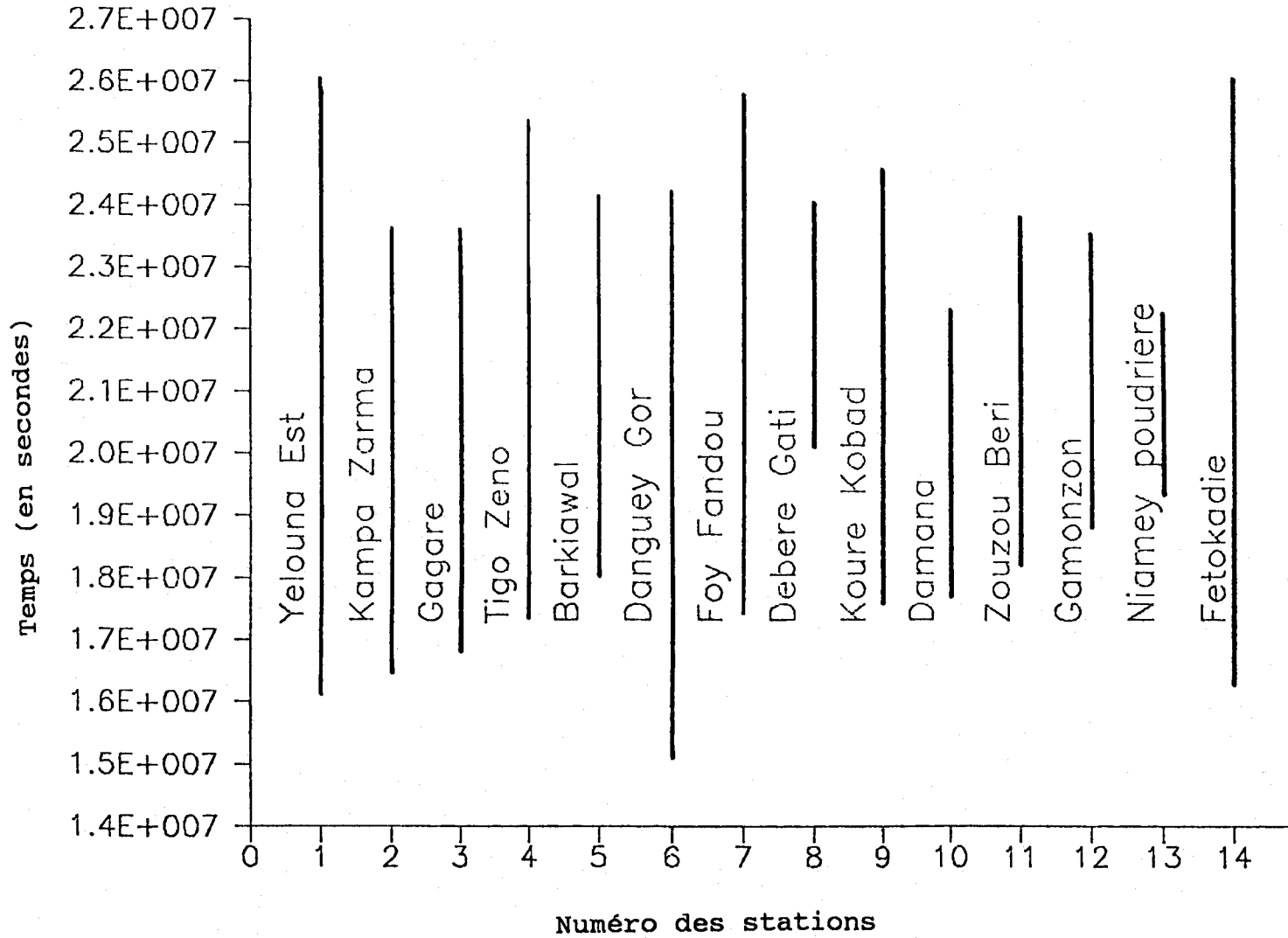


Figure 20 A : FETOKADIE (hyetogramme 1)

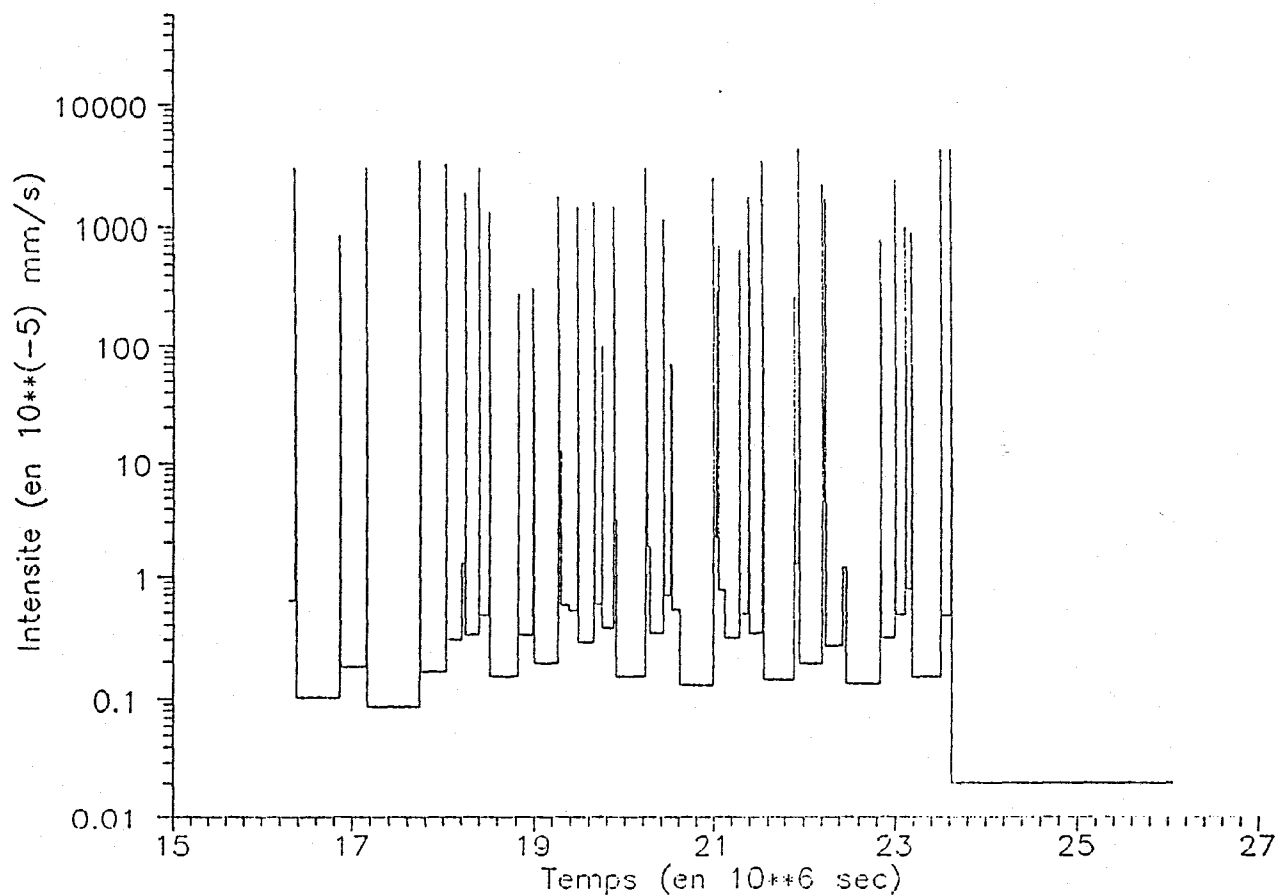


Figure 20 B : FETOKADIE (hyetogramme 2)

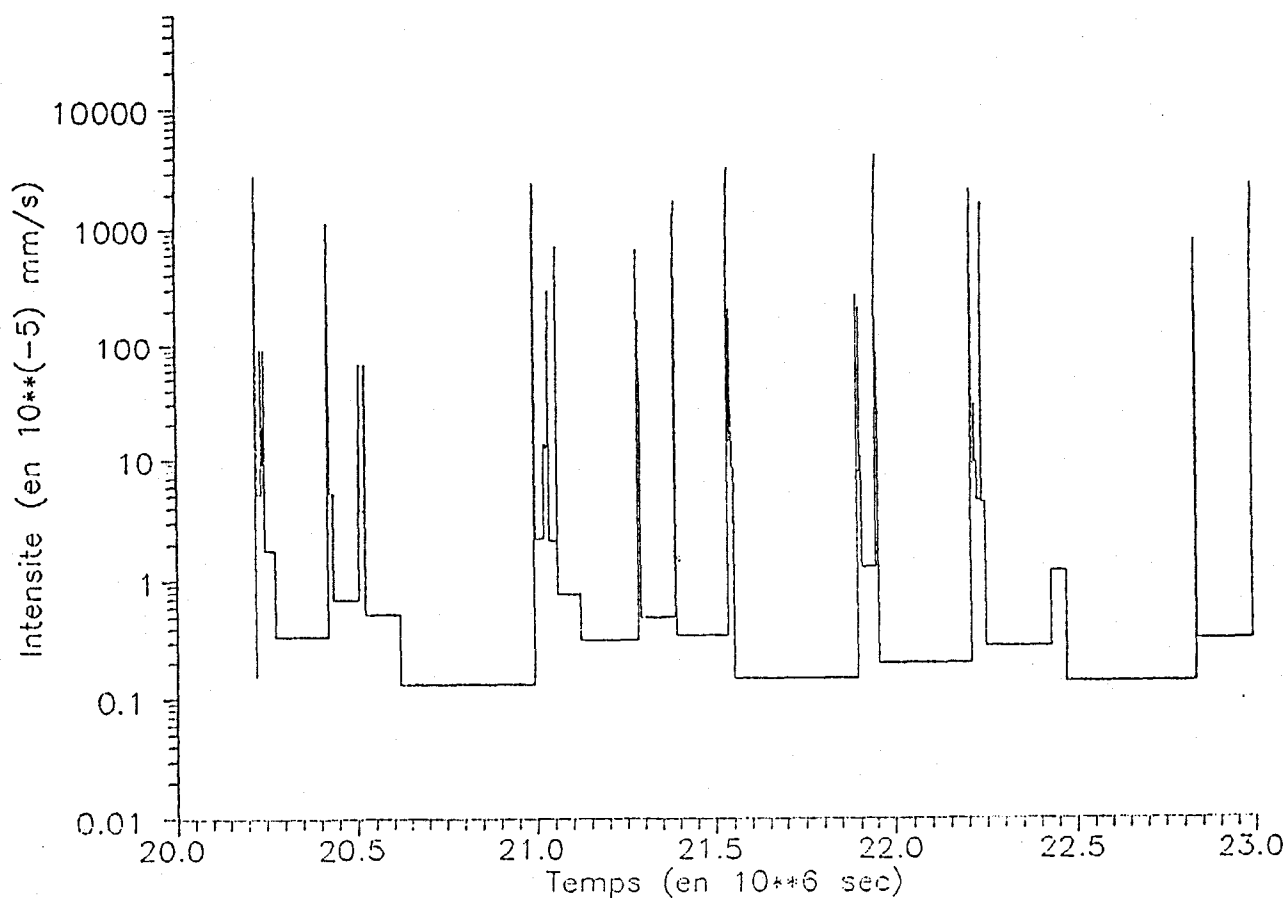
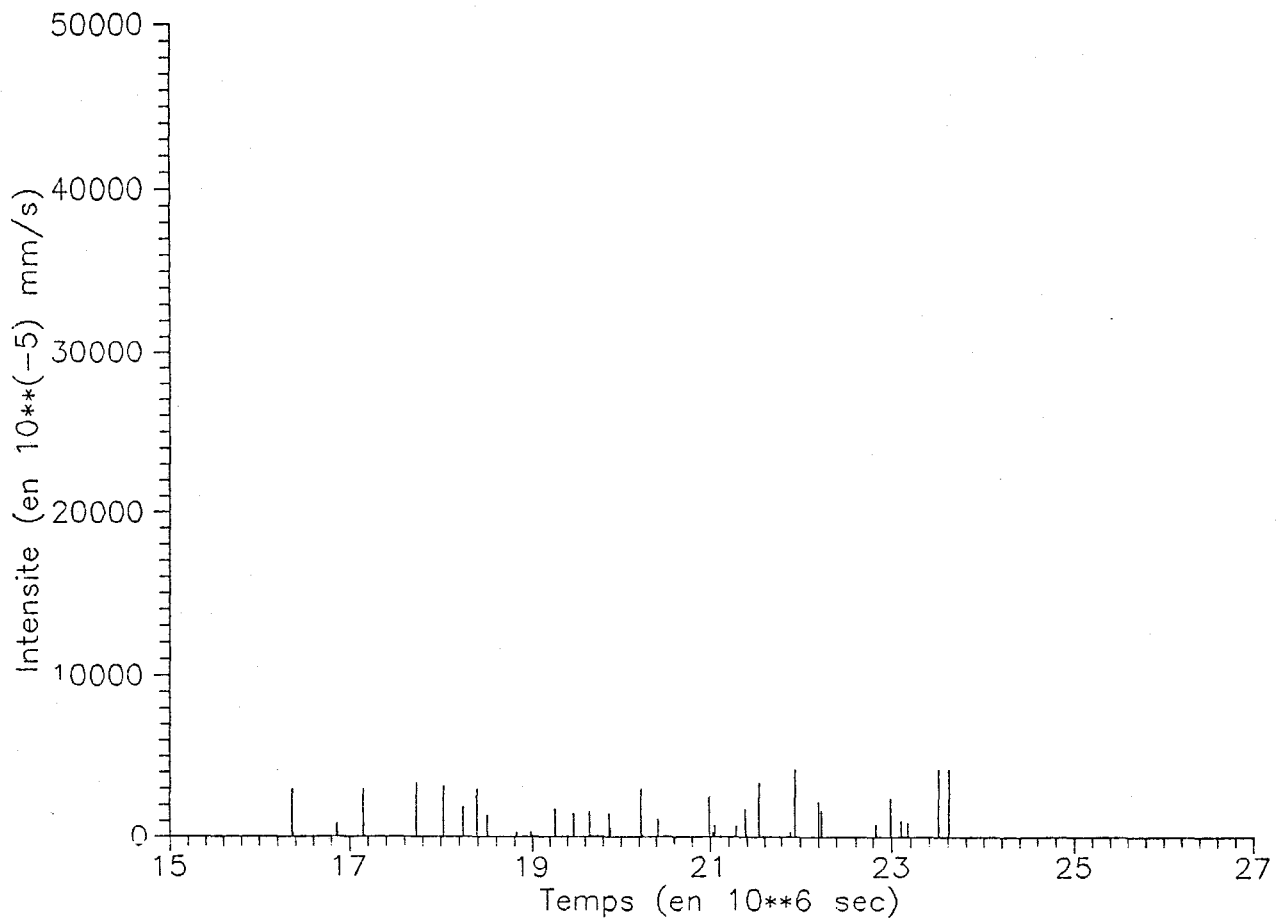
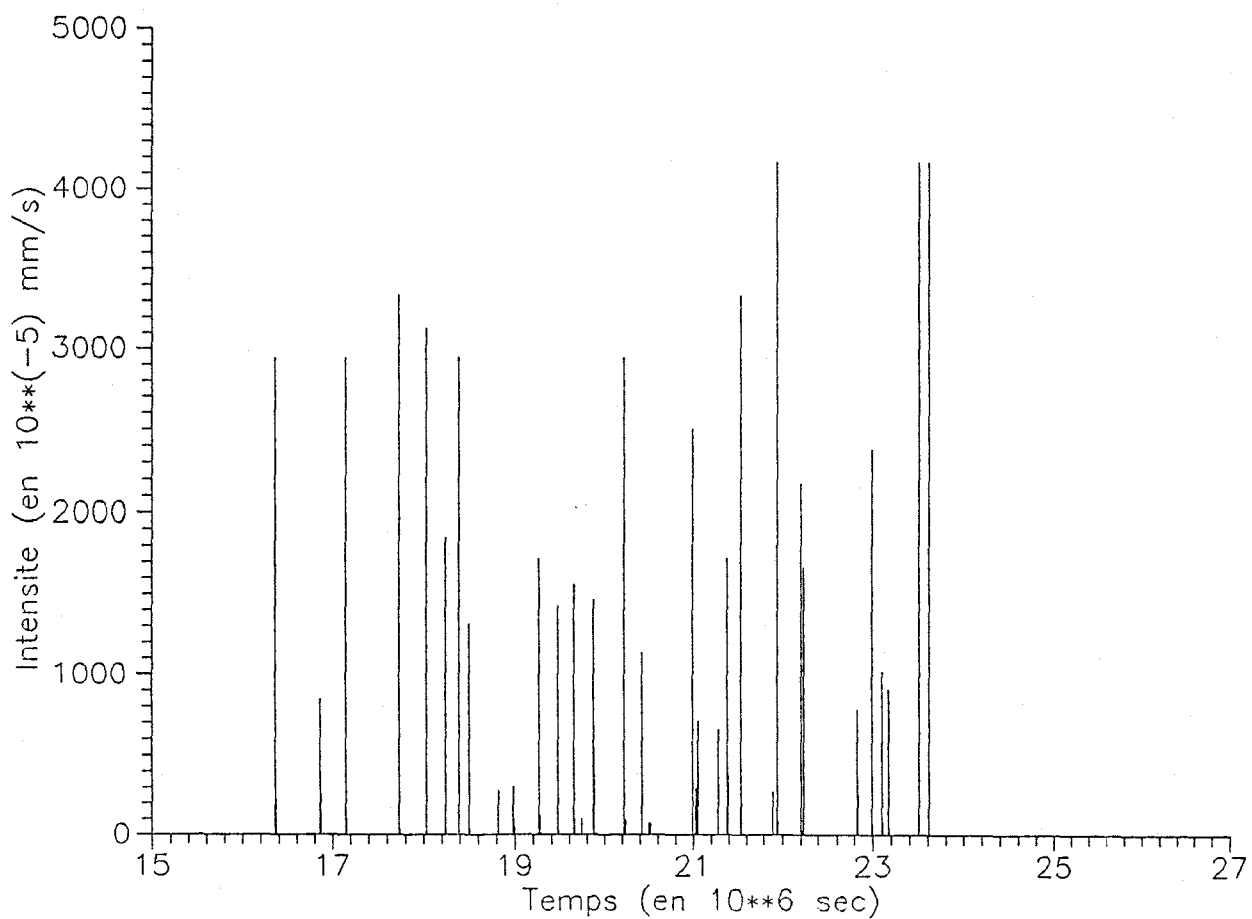


Figure 20 c : FETOKADIE (hyetogramme lineaire)



FETOKADIE (hyetogramme lineaire)



Le caractère intermittent des pluies est plus visible sur les diagrammes linéaires. Les faibles valeurs ne décollant pas de l'axe des abscisses, seuls les pics de fortes intensités indiquent les variations brutales et irrégulières de ce climat nigérien.

### C.2. Les courbes logistiques.

ou les fonctions  $\Sigma T - \Sigma H$  (annexe 3)

#### Le principe:

Un autre traitement de ces fichiers va être appliqué. Toujours pour un seuil déterminé, on cumule les intervalles de temps où le seuil est dépassé et simultanément on calcule la hauteur de précipitation cumulée correspondante (fig. 21). Cette opération est renouvelée pour autant de seuils que souhaité. Ensuite, sur un diagramme où les temps cumulés sont portés en fonction des hauteurs cumulées, les valeurs correspondantes à chaque seuil s'y inscrivent suivant la représentation type donnée en figure 22, c'est à dire de figures de la forme de courbes logistiques.

#### Résultats

Là encore, toutes les figures des différentes stations ont la même configuration. La signification de ce type de courbes indique que le temps cumulé et la hauteur cumulée augmentent, quand le seuil d'intensité diminue. La seule différence

Figure 21

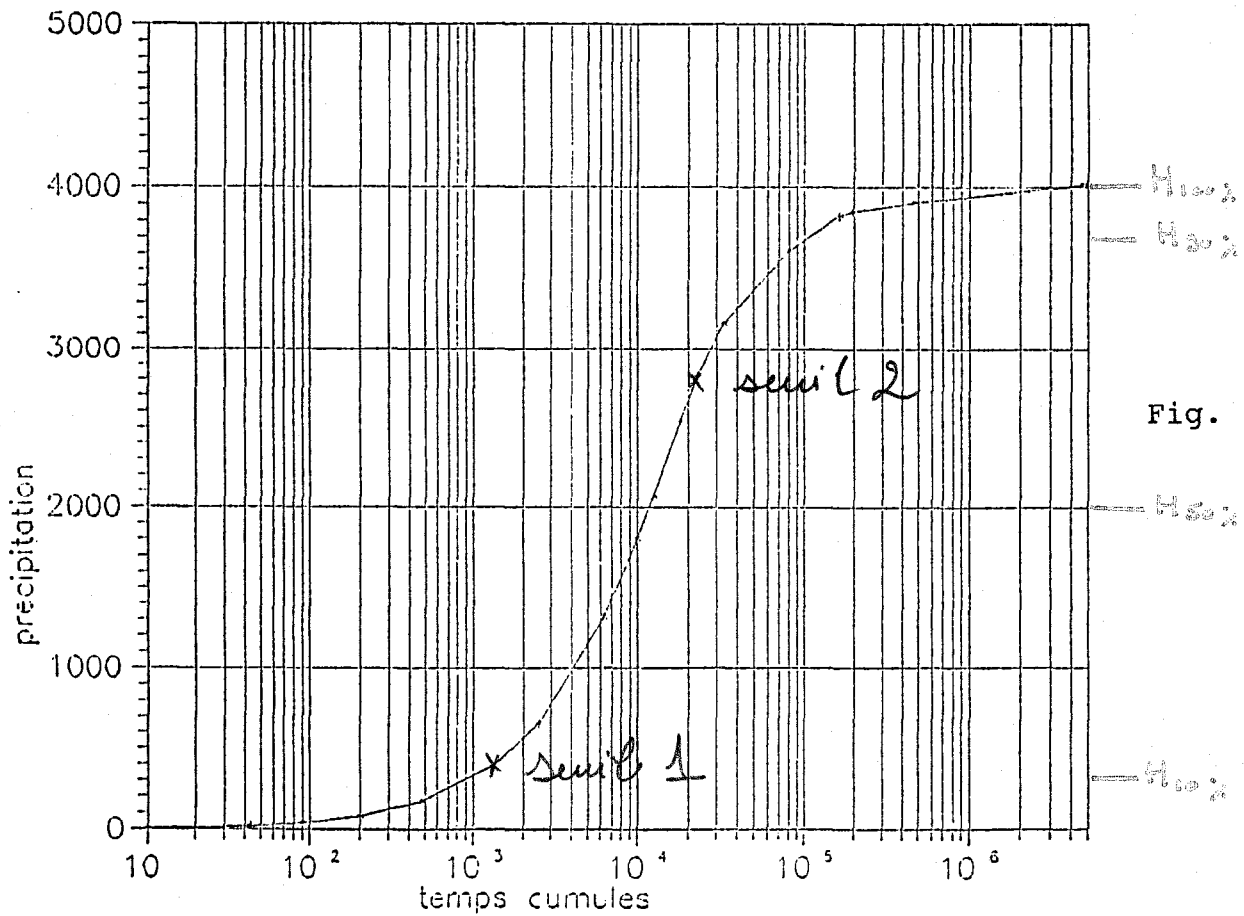
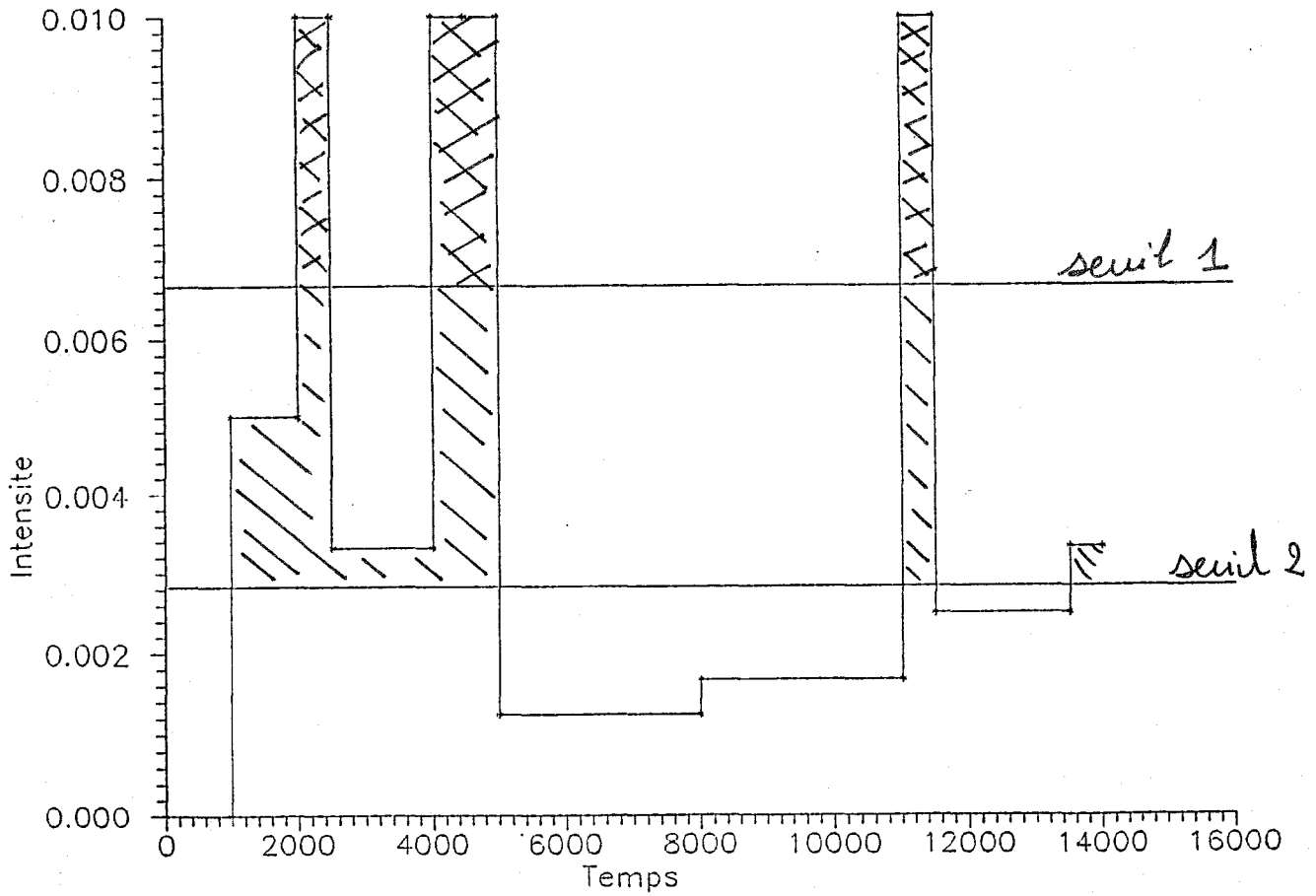


Fig. 22

réside dans le fait que les fonctions atteignent leur palier pour des valeurs différentes (variant de 180 à 520 mm). Cela est dû aux fluctuations entre les stations, mais surtout aux longueurs différentes des séries.

D'autres calculs statistiques (tableau 6) seront effectués sur ces figures, tels les calculs sur les hauteurs cumulées (comme  $H_{10}$ ,  $H_{50}$  et  $H_{90}$ ) et leurs temps correspondants (c'est à dire  $T_{10}$ ,  $T_{50}$  et  $T_{90}$ ).

#### Commentaires

Sur les graphiques représentant les courbes logistiques des quatorze stations, on observe une variation brute toujours au même moment, c'est à dire pour un temps cumulé d'environ  $10^4$  secondes ( $2^{H78}$ ). Plus précisément, en analysant les calculs classés dans le tableau 6, l'observation précédente est mise en évidence par les chiffres de la colonne  $T_{50}$ , la moyenne étant égale à  $10.3 * 10^3$  secondes. Cette similitude entre les valeurs ne sera pas aussi flagrante pour les colonnes  $T_{10}$  et  $T_{90}$ . En ce qui concerne les hauteurs, les valeurs de chaque colonne montrent des contrastes plus importants (surtout pour les valeurs  $H_{90}$ ). Si l'on étudie la colonne des hauteurs mesurées à 90 % de la hauteur totale ( $H_{90}$ ), la moyenne calculée donne environ 330 mm avec une limite supérieure atteignant 513 mm et une limite inférieure de 153 mm. Tout ceci correspondant à un écart-type de 110. Les variations seront de moindre importance pour les



valeurs de  $H_{50}$  (moyenne = 182 et écart-type = 57) et de  $H_{10}$  (moyenne = 37 et écart-type = 11). Ainsi, le renseignement que donne les valeurs  $T_{50}$  informe sur le régime pluviométrique commun à toutes ces stations du degré carré étudié.

Le caractère intermittent dans ces données est plus visible sur les représentations graphiques. Pour un seuil relativement fort, le temps total enregistré est faible et pour un seuil faible, le temps cumulé est grand. Ainsi, les événements intenses sont de courte durée et ils apportent à eux-seuls la moitié de la hauteur cumulée en  $10^4$  sec. Ceci met en évidence le caractère intermittent de ce régime.

### **C.3. Conclusion.**

L'étude menée sur les hyétogrammes et sur les courbes logistiques met en évidence de deux façons différentes, le caractère intermittent du régime pluviographique du degré carré de Niamey. Les hyétogrammes linéaires et la forme des courbes logistiques sont représentatives de ce phénomène.

tableau 6 : Valeurs obtenues à partir des courbes logistiques.

Stations	Haut. 90 % mm	Temps 90 % $10^3$ s	$T_{90}/T$ $10^{-3}$	Haut. 50 % mm	Temps 50 % $10^3$ s	$T_{50}/T$ $10^{-3}$	Haut. 10 % mm	Temps 10 % $10^3$ s	$T_{10}/T$ $10^{-3}$
Yelouna	472.5	110	11	262.5	14	1.4	52.5	1.4	0.14
Kampa Z.	415.8	100	14	231.0	12	1.7	46.2	1.2	0.17
Gagare	414.0	120	18	230.0	12	1.8	46.0	1.1	0.16
Tigo Z.	369.0	95	12	205.0	11	1.4	41.0	1.1	0.14
Barkia.	279.0	110	18	155.0	10	1.6	31.0	0.9	0.15
Danguéy	324.0	80	9	160.0	8	0.9	36.0	0.8	0.09
Foy F.	189.0	90	11	105.0	7	0.8	21.0	0.6	0.07
Debere	306.0	80	20	170.0	7.5	1.9	34.0	0.75	0.19
Koure K.	333.0	105	15	185.0	11	1.6	37.0	1.1	0.16
Damana	198.0	50	11	110.0	9	1.9	22.0	0.7	0.15
Zouzou B.	360.0	80	14	200.0	11	1.9	40.0	1.2	0.21
Gamonzon	288.0	100	17	160.0	9	2.3	32.0	0.8	0.25
Niamey P.	153.0	50	17	85.0	5.5	1.9	17.0	0.5	0.17
Fetokadie	513.0	90	9	285.0	17	1.7	57.0	1.8	0.16
Moyenne	329.8	90	14	181.7	10.3	1.6	36.6	1.0	0.16
Ecart typ	110.5	20	3.5	56.7	2.9	0.4	11.3	0.3	0.04

**D. ESTIMATION DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS  
PAR ECHANTILLONAGE.**

L'objectif de cette partie est d'établir à partir des données récoltées par l'ORSTOM sur quatorze stations, une estimation des hauteurs de précipitations par échantillonnage. Le terme "échantillonnage" implique un processus aléatoire qui sera appliqué à toutes les données.

**D.1. Les valeurs stables quelque soit l'intervalle de temps étudié.**

Dans le tableau 7, deux types de valeurs vont intervenir: les valeurs, dites stables, représentent les valeurs obtenues sans manipulation des fichiers ".lab" (définis dans le tableau 3). Les autres, dites variables, sont des résultats qui ont été préalablement échantillonnés et testés cinquante fois et dont ils représentent la résultante de ces cinquante choix aléatoires.

Intensité minimale: les valeurs sont données en  $10^{-4}$  mm/s et varient entre  $0.0020 \cdot 10^{-4}$  et  $0.0117 \cdot 10^{-4}$  mm/s pour les quatorze stations étudiées. Cette intensité minimale correspond à l'intensité la plus petite enregistrée dans les fichiers ".lab" et ceci quelque soit l'intervalle de temps choisi.

Intensité maximale: les valeurs sont encore données en  $10^{-4}$  mm/s et varient de 0.036 à 0.5 mm/s, où 0.5 mm/s est la valeur maxi-

male enregistrée en une seconde. Lors des enregistrements, à la station de Gagare, la valeur de 0.5 mm est atteinte en une seconde. Ainsi, dans ce cas, la précision de l'instrument est insuffisante et cette valeur est donnée seulement par saturation, le pas de temps d'une seconde étant trop grand. Ces valeurs sont aussi indépendantes de l'intervalle de temps choisi et correspondent aux valeurs trouvées dans les fichiers originaux.

Durée de la séquence: cette durée correspond à la différence entre le moment de la dernière et de la première mesure enregistrées pendant la saison des pluies. Le temps des fichiers ".lab" a pour origine le début de l'année. Les durées varient donc entre 2 930 000 et 9 935 000 secondes (c'est à dire entre environ 34 et 115 jours).

Vraie valeur: est donnée en 0.1 mm. Cette vraie valeur correspond à la précipitation enregistrée dans les stations toujours à partir des fichiers ".lab". Les précipitations moyennes des 14 stations varient entre 173.5 mm et 584.5 mm.

Ces valeurs sont extrêmement contrastées malgré leur proximité kilométrique, mais leur ordre de grandeur reste tout à fait dans les normes saisonnières de cette région du Niger.

## D.2. Les valeurs variant suivant l'intervalle de temps choisi.

Un traitement informatique est appliqué à toutes les données des fichiers ".lab" afin d'obtenir des estimations. Pour cela, le programme effectuera un certain nombre de tirages aléatoires (50) pour chaque intervalle de temps choisi.

Intervalle de temps est donné en secondes. Six intervalles ont été choisis de 15 minutes à un jour (avec comme intermédiaire 30 mn, 1, 2 et 12 heures).

Moyenne: est donnée en 0.1 mm. Pour chaque intervalle de chaque tirage aléatoire, une hauteur de précipitation est estimée et une moyenne est déduite de ces 50 valeurs. On remarque que plus l'intervalle est petit et plus la moyenne est proche de la "vraie valeur". Ainsi, plus l'intervalle est de courte durée, plus la précision est grande. Un test d'égalité entre la vraie valeur, qui est connue, et les moyennes de la population des estimations permet d'affirmer que les valeurs obtenues ne sont pas biaisées.

Valeur minimale: (en 0.1 mm) représente la précipitation minimale calculée à partir de l'échantillonnage. Pour un intervalle de courte durée, les valeurs restent proches de la vraie valeur moyenne. Mais, plus l'intervalle de temps devient long, plus le contraste des valeurs est grand. Tout ceci est analogue pour les valeurs maximales.

Tableau 7 : Calculs statistiques

Station	Intens mini $10^{-4}$ mm/s	Intens maxi $10^{-4}$ mm/s	Durée évt en sec	inter valle en sec	vrai val. 0.1 mm	Moy. en 0.1 mm	Val. mini 0.1 mm	Val. maxi 0.1 mm	Ecar type	Asym.	Coef. de var.
Yelouna	0.0020	416.67	9935000	900	5245	5202	4718	5852	299	0.09	0.057
				1800		5167	4335	6765	611	0.70	0.118
				3600		5283	3474	7535	931	0.12	0.176
				7200		5198	1878	10260	2116	0.18	0.407
				43200		6568	884	23030	6084	1.24	0.926
				86400		6558	213	31200	8219	1.51	1.253
Kampa Z	0.0085	500.0	7153000	900	4690	4653	4399	5199	210	1.20	0.045
				1800		4746	3841	5521	413	0.01	0.087
				3600		4854	3553	6152	674	0.15	0.139
				7200		4582	1511	8083	1904	-0.08	0.416
				43200		4239	589	18380	3721	1.62	0.878
				86400		3505	172	31030	5314	3.26	1.516
Gagare	0.0088	5000	6815000	900	4625	4625	4218	5055	206	0.27	0.045
				1800		4584	3518	5382	446	-0.54	0.097
				3600		4831	2618	7535	931	0.13	0.193
				7200		4403	1984	10110	2195	1.47	0.499
				43200		4526	559	18060	4585	1.19	1.013
				86400		5364	254	39560	8526	2.26	1.589
Tigo Z.	0.0028	625.0	8028000	900	4120	4117	3499	4942	402	0.19	0.098
				1800		4181	3350	5285	536	-0.03	0.128
				3600		3930	1737	6044	1305	-0.09	0.332
				7200		4036	1252	8860	2075	0.58	0.514
				43200		5263	607	26800	5581	1.94	1.060
				86400		4801	179	65430	9999	4.27	2.083
Barkia.	0.0079	454.5	6127000	900	3115	3135	2752	3534	207	0.25	0.066
				1800		3186	2086	4265	578	-0.18	0.181
				3600		3153	1887	5439	878	0.53	0.278
				7200		2996	1682	8138	1292	1.81	0.431
				43200		3538	481	18470	3747	2.12	1.059
				86400		3334	209	29050	5464	2.93	1.639
Danguey	0.0055	714.29	9147000	900	3675	3675	3237	4047	211	-0.03	0.057
				1800		3643	2766	4232	402	-0.62	0.110
				3600		3523	2181	5703	889	0.46	0.252
				7200		3982	1541	8292	1960	0.47	0.492
				43200		4129	541	23150	4733	2.28	1.146
				86400		3305	197	28590	5136	3.29	1.554
Foy F.	0.0022	1000	8372000	900	2105	2118	1899	2409	135	0.23	0.064
				1800		2093	1689	2552	191	-0.14	0.091
				3600		2091	1215	3366	490	0.08	0.234
				7200		2080	861	4502	727	1.11	0.350
				43200		1882	197	13140	2837	2.34	1.507
				86400		1882	150	23200	3805	4.13	2.022

Station	Intens mini 10 <sup>-4</sup> mm/s	Intens maxi 10 <sup>-4</sup> mm/s	Durée évt en sec	inter valle en sec	vrai val. 0.1 mm	Moy. en 0.1 mm	Val. mini 0.1 mm	Val. maxi 0.1 mm	Ecar type	Asym.	Coef. de var.
Debere	0.0117	545.45	3971000	900	3360	3418	3017	4236	257	0.86	0.075
				1800		3416	2699	4278	389	0.11	0.114
				3600		3325	1320	6674	1344	0.36	0.404
				7200		2977	932	8796	1704	1.33	0.572
				43200		5163	373	23780	6430	1.53	1.245
				86400		2505	152	25910	4642	3.61	1.853
Koure	0.0065	454.55	6991000	900	3760	3755	3465	4152	185	0.47	0.049
				1800		3720	3381	4381	237	0.88	0.064
				3600		3816	2351	5154	797	-0.18	0.209
				7200		3685	1721	6458	1073	0.27	0.291
				43200		3713	668	14950	3670	1.53	0.988
				86400		2568	271	27260	4532	4.12	1.765
Damana	0.0099	357.14	4669000	900	2390	2321	2020	2842	212	0.63	0.091
				1800		2364	1723	3284	397	0.45	0.168
				3600		2347	1414	3692	525	0.46	0.224
				7200		2376	950	4940	975	0.62	0.410
				43200		2245	162	16100	2791	2.84	1.243
				86400		2560	137	19810	3830	2.70	1.496
Zouzou	0.0065	500.00	5622000	900	4020	3974	3594	4395	211	0.14	0.053
				1800		3964	2673	5072	605	-0.07	0.153
				3600		3922	1931	6612	1227	0.47	0.313
				7200		4144	1600	8635	1761	1.03	0.425
				43200		3719	458	14750	3749	1.19	1.008
				86400		3162	202	20270	5017	2.16	1.587
Gamonz	0.0063	454.55	4756000	900	3200	3231	2842	3637	185	0.30	0.057
				1800		3310	2508	4222	516	0.13	0.156
				3600		3150	1753	5865	952	1.09	0.302
				7200		3285	1642	8468	1496	1.71	0.455
				43200		3229	364	16180	4016	1.56	1.244
				86400		1967	214	21760	3723	3.77	1.893
Niamey	0.0107	500.00	2930000	900	1735	1718	1516	2007	122	0.39	0.071
				1800		1707	1186	2368	311	0.49	0.182
				3600		1695	888	3082	582	1.05	0.343
				7200		1839	634	4604	959	1.16	0.521
				43200		1888	156	7444	2178	1.50	1.154
				86400		1719	89	17670	3932	3.42	2.287
Fetoka.	0.0021	416.67	9762000	900	5845	5832	5245	6473	383	0.28	0.066
				1800		5880	4473	8343	587	-0.41	0.100
				3600		5880	4473	8343	873	0.50	0.148
				7200		6189	2756	10060	1822	0.20	0.294
				43200		6099	677	22850	4605	1.41	0.755
				86400		4576	246	26400	5484	1.89	1.198

Ecart-type: conjointement à ce qui vient d'être dit au dessus, l'écart-type est d'autant plus grand que l'intervalle augmente.

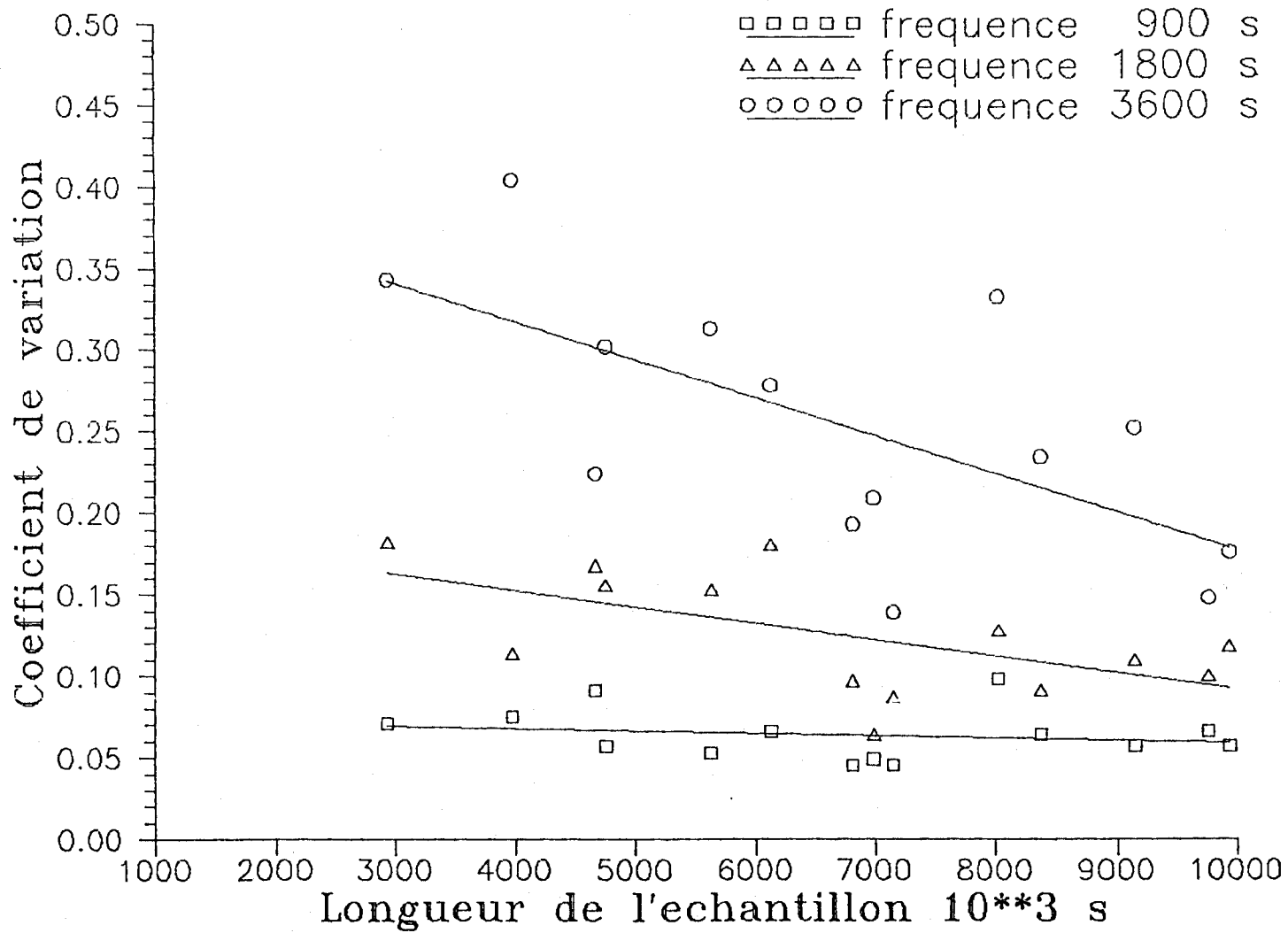
Coefficient de variation: est le rapport entre l'écart-type et la moyenne des estimations pour chaque intervalle de temps différent. Dans ce cas encore, ce rapport augmente quand l'intervalle de temps choisi augmente à son tour.

### D.3. Conclusion.

La figure 23 représente le coefficient de variation en fonction de l'échantillon pour trois fréquences (c'est à dire trois intervalles de temps de 900, 1800 et 3600 secondes). Ceci donne une représentation et met en évidence une corrélation existante entre les 14 stations pour une fréquence donnée.



Figure 23



## E. DIMENSION FRACTALE DES OCCURENCES DE PLUIES.

### E.1. Le principe.

En se référant au paragraphe C, la fonction dimensionnelle donne une valeur de dimension différente suivant le seuil d'intensité de pluie fixé par la méthode de comptage de boites. Par exemple, la figure 24 est la représentation type qui sera obtenue des 14 stations pluviométriques. Pour chaque station, quatre seuils d'intensité (de valeurs respectives  $1.10^{-6}$ ,  $1.10^{-5}$ ,  $2.10^{-3}$  et  $2.10^{-2}$  mm/s) seront étudiés.

Vingt cinq tailles de boites (en abscisse) ont été considérées, la taille de chacune d'entre elles est donnée en temps (secondes) variant de façon régulière ( 1, 2,  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $2^4$ , ...,  $2^{24}$  secondes).

Le principe est de compter le nombre de fois où le seuil est dépassé pour une taille de boite donnée pendant toute la période de fonctionnement des postes pluviographiques. Cette opération est effectuée pour les 25 tailles de boites et est recommencée pour les 4 seuils. Les résultats sont placés dans un diagramme Log-Log. Le but est de déterminer une dimension fractale pour chacun de ces 4 seuils.

Fig. 24

# NIAMEY POUDRIERE

*4 seuils d'intensités différents*

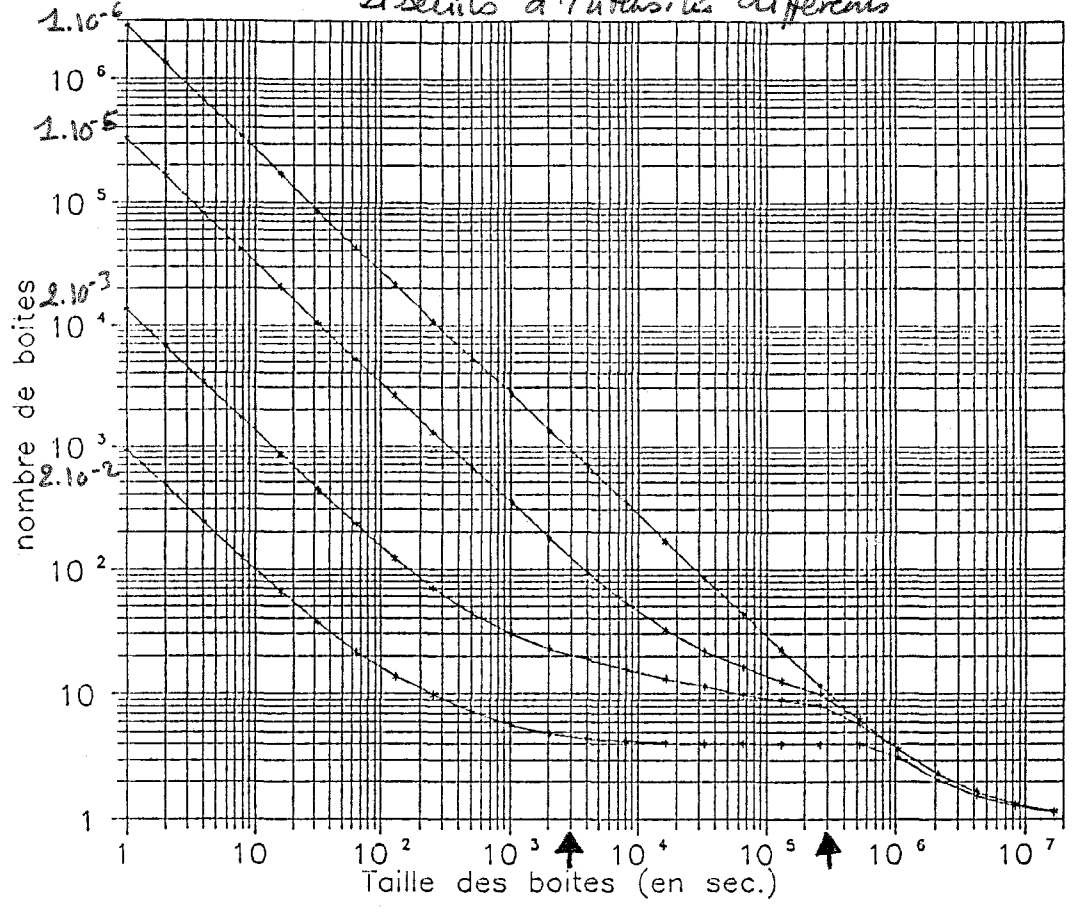
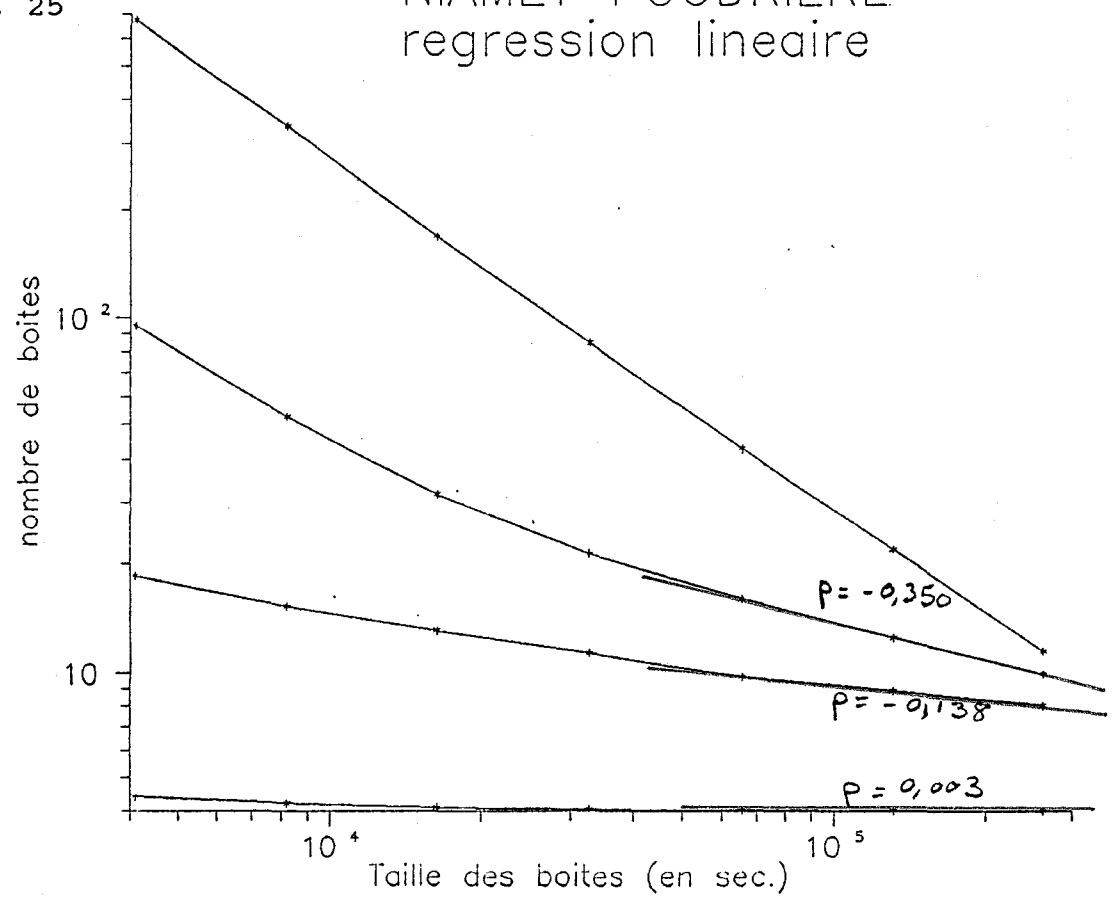


Fig. 25

# NIAMEY POUDRIERE

regression lineaire



## E.2. Les résultats.

Toujours en se référant à la figure 24, trois phases sont visibles le long de l'axe des abscisses: la première est comprise entre 1 et  $10^4$  secondes, la seconde entre  $10^4$  et  $10^6$  secondes et enfin la dernière entre  $10^6$  et  $2 \cdot 10^7$  secondes (de 11 jours à 232 jours). Déjà, à partir de ces trois séparations, quelques ordres de grandeurs se vérifieront sur toutes les stations.

Dans la première phase, quatre droites parallèles et de pente -1 s'incurvent un peu avant la fin de cette phase (à l'exception de la droite correspondante au seuil  $1 \cdot 10^{-6}$  mm/s, qui conserve sa pente de -1 jusque pour une valeur supérieure à  $10^6$  s). Il n'y a pas d'interprétation à faire sur ces droites parallèles. Les boîtes sont d'une durée bien trop courte pour être représentatives (elles ne donnent plus de renseignements nouveaux). Dans la dernière phase, les quatre courbes se rejoignent et forment à nouveau quatre courbes plus ou moins confondues dont la pente est différente de la valeur -1. Cette phase restera sans intérêt, puisque la taille des boîtes est proche de la longueur totale des séries.

Il n'y aura que la seconde phase pour laquelle des différences sensibles seront enregistrées sur les 14 stations et c'est en cela que cette partie nous intéressera tout particulièrement.

Quelque soit la station étudiée, la configuration de ces courbes reste semblable. Ainsi, le travail consiste à repérer la partie linéaire de chacune des courbes et d'en calculer la pente par une régression linéaire. Plus précisément les points représentatifs de cette linéarité se situeront entre  $3 \cdot 10^4$  et  $3 \cdot 10^5$  secondes (fig. 25). A partir de cette régression linéaire, un tableau récapitulatif (tableau 8) indique la dimension observée pour chaque seuil préalablement fixé.

### E.3. Les commentaires.

On remarque immédiatement que pour chaque seuil, quelque soit la station, les dimensions sont du même ordre de grandeur. Ainsi, on en déduit une valeur moyenne et l'écart-type correspondant à chaque seuil.

Pour le seuil 0.00001 mm/s, la moyenne des dimensions est 0.292

et l'écart-type est de 0.043

Pour le seuil 0.002 mm/s, la moyenne des dimensions est 0.132

et l'écart-type est de 0.038

Pour le seuil 0.02 mm/s, la moyenne des dimensions est 0.022

et l'écart-type est de 0.016

Le seuil 0.00001 mm/s est si faible que l'on peut supposer les évènements dont l'intensité est inférieure à ce seuil comme un évènement sec et ceux dont l'intensité est supérieure comme un

évènement pluvieux (idée développée par P. Hubert et J.C. Carbonnel en 1989). Pour une échelle de temps allant de quelques heures à quelques jours (de 8 heures à 83 heures exactement), la dimension moyenne est de 0.292 et celle trouvée dans l'article était de 0.220, ce qui est relativement assez proche. Mais, les données que nous possédons ne couvrent pas une assez longue durée pour aller au delà de cette observation.

En conclusion, le caractère multi-fractal est remarquable, car pour une même échelle de temps, plusieurs dimensions apparaîtront en fonction de la valeur du seuil. En règle générale, plus le seuil augmente, plus la dimension diminue. Toutes les figures de fonction dimensionnelle correspondantes à ce paragraphe sont rassemblées en Annexe 2.

Tableau 8 : Dimensions fractales de l'occurrence des pluies pour trois seuils d'intensité.

Stations	SEUILS en mm/s		
	0.00001	0.002	0.02
Yelouna	0.216	0.106	0.022
Kampa Zarma	0.253	0.125	0.008
Gagare	0.260	0.120	0.029
Tigo Zeno	0.272	0.155	0.050
Barkiawal	0.287	0.133	0.047
Danguy Gor	0.263	0.132	0.008
Foy Fandou	0.280	0.123	0.015
Debere Gati	0.289	0.130	0.027
Koure Kobad	0.362	0.116	0.009
Damana	0.333	0.060	0.015
Zouzou Beri	0.329	0.119	0.010
Gamonzon	0.336	0.238	0.049
Niamey P.	0.350	0.138	0.003
Fetokadie	0.259	0.156	0.018
Moyenne	0.292	0.132	0.022
Ecart-type	0.043	0.038	0.016

## CONCLUSION

Dans ce mémoire, le caractère d'intermittence a été démontré, ainsi qu'un grand nombre d'estimations de hauteurs de précipitations a été développé et une dimension fractale calculée pour différents seuils d'intensité.

Mais une nouvelle méthode, nommée P.D.M.S. (Probability Distribution Multiple Scaling), récemment développée par D. Lavallée (1990) donne existence à une fonction de codimension. Cette dernière a l'avantage de traiter de façon directe les données de bases. Ainsi, la valeur traduite par cette fonction est non seulement invariante d'échelle, mais aussi indépendante de la dimension de l'espace dans lequel le champs géophysique est implanté. Cette fonction de codimension fera l'objet de nombreuses études et s'avérera intéressante pour caractériser un système.



## Références bibliographiques

- BRUNET-MORET Y., ROCHE M. (1966)  
Etude théorique et méthodologique de l'abatement des pluies.  
Cahiers de l'ORSTOM , n° 4, pp 3-13.
- DELHOMME J.P. (1976)  
Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau.  
Thèse, Ecole des mines de Paris.
- DEWDNEY A. (1985)  
Ensemble de Mandelbrot.  
Pour la science, 96, pp 87-93.
- DEWDNEY A. (1988)  
Ensemble de Julia.  
Pour la science, 123, pp 109-113.
- DUBOIS J., CHEMINEE J.L. (1988)  
Application d'une analyse fractale à l'étude des cycles éruptifs du Piton de la Fournaise (La Réunion): modèle d'une poussière de Cantor.  
C.R. Acad. Sci. Paris, t.307, série II, pp 1723-1729.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. (1988)  
Caractérisation fractale de la variabilité et de l'anisotropie des précipitations intertropicales.  
C.R. Acad. Sci. Paris, t.307, série II, pp 909-914.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. (1989)  
Dimensions fractales de l'occurrence de pluie en climat soudano sahélien.  
Hydrol. continent., vol.4, n° 1, pp 3-10.
- HUBERT P. (1990)  
Le grand livre de l'eau.  
Manufacture, pp 195-205.
- JULIEN R., BOTET R., KOLB M. (1985)  
Les agrégats.  
La recherche, n° 171, 16, pp 1334-1343.
- LABORDE J.P., LEMPEREUR R. (1986)  
Les pluies sur des petits bassins versants: une fonction aléatoire dont on peut estimer le variogramme.  
Hydrol. continent., vol. I, n° 1, pp 3-13.
- LAVALLEE D., SCHERTZER D., LOVEJOY S. (1990)  
On the determination of the codimension function.  
Scaling, Fractals and Non-Linear Variability in Geophysics, edited by D. Schertzer and S. Lovejoy, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- LOVEJOY S., TARDIEU J., MONCEAU G. (1982)  
Etude d'une situation frontale: analyse météorologique et fractale.  
La Météorologie, série VI, n° 29-30, pp 111-118.
- LOVEJOY S. (1982 A)  
Area - Perimeter relation for rain and clouds areas.  
Science 216, pp 185-187.
- LOVEJOY S. (1983)  
La géométrie fractale des nuages et des régions de pluie et les simulations aléatoires.  
La houille blanche, n° 5-6, pp 431-436.
- LOVEJOY S., SCHERTZER D., LADROY P. (1986)  
Fractal characterization of inhomogeneous geophysical measuring networks.  
Nature, vol. 319, n° 6048, pp 43-44.
- LOVEJOY S., SCHERTZER D., TSONIS A.A. (1987)  
Functional Box-Counting and Multiple Elliptical Dimensions in Rain.  
Science, 235, pp 1036-1038.
- MANDELBROT B. (1989)  
Les objets fractals suivi de "survol du langage fractal"  
(troisième édition)  
Flammarion, 268 p.
- PEITGEN H.O., RICHTER P.H. (1986)  
The beauty of fractals.  
New York, Springer-Verlag.
- PEITGEN H.O., SAUPE D. (1988)  
The science of fractal images.  
New York, Springer-Verlag.
- ROUSSIN-BARIAC M. (1985)  
Etude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride.  
Thèse, Université Paris-Sud (Orsay).
- SCHERTZER D., LOVEJOY S. (1984)  
Des fractales dans l'atmosphère.  
Sciences et Techniques, 5, pp 17-19.
- SCHERTZER D., LOVEJOY S. (1987)  
Singularités anisotropes, divergences des moments en turbulence  
Invariance d'échelle généralisée et processus multiplicatifs.  
Annales Math. du Québec, 11, pp 139-181.

## ANNEXES

### ANNEXE 1

- \* Ensemble de Mandelbrot.
- \* Ensemble de Julia.

### ANNEXE 2

- \* Figures des hyétogrammes de type 1.
- \* Figures des hyétogrammes de type 2.
- \* Figures des hyétogrammes linéaires.

### ANNEXE 3

- \* Figures des fonctions dimensionnelles.
- \* Figures des fonctions logistiques.

## ANNEXE 1

### L'ENSEMBLE DE MANDELBROT

Lorsque l'on soumet les nombres du plan complexe à une certaine opération indéfiniment répétée, les nombres qui sont extérieurs à cet ensemble s'enfuient à l'infini, tandis que ceux qui sont intérieurs se contentent de légers glissements autour de leur valeur initiale. Près de la frontière, l'approche de l'instabilité se traduit par des va et vient, d'où les étonnantes variétés de figures très esthétiques (fig. 1 à 6).

Le mathématicien B. Mandelbrot fut le premier à s'intéresser à la géométrie fractale, c'est à dire à l'étude de figures dont le nombre de dimension est fractionnaire.

Le contour qui limite l'ensemble de Mandelbrot est donc un fractal et grâce à un ordinateur, tout comme le ferait un microscope, on peut étudier ce contour à différentes échelles.

En général, à une échelle plus petite, on retrouve la figure initiale, mais elle n'est pas tout à fait identique.

Mais, comment expliquer ce processus itératif qui donne naissance à l'ensemble de Mandelbrot ?

On choisit un nombre complexe  $c$  variable, puis on calcule l'expression

$$z^2 + c$$

(où  $z$  est un nombre complexe quelconque)

La valeur initiale de  $z$  est zéro, d'où l'expression devient à nouveau égale à  $c$ . Ensuite, on remplace la valeur de  $z$  par  $c$  et on obtient  $c^2 + c$ . En continuant ce processus on a  $(c^2 + c)^2 + c$

Ainsi, suivant les valeurs données à  $c$ , les différentes itérations forment de magnifiques figures illustrant les livres de H.O. PEITGEN.

Figure 1 - Vue globale de l'ensemble de Mandelbrot.

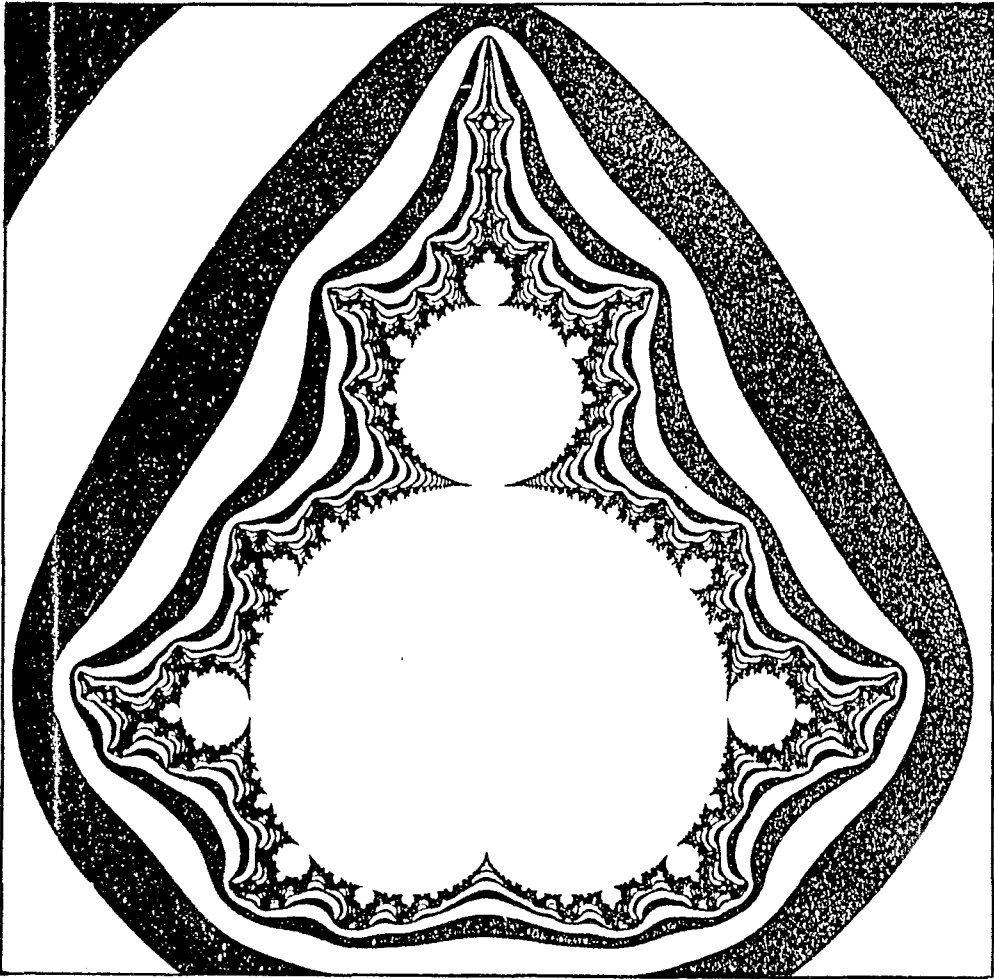


Figure 2 - Agrandissement d'une zone frontalière de l'ensemble de Mandelbrot et représentation avec des lignes équipotentiellles.

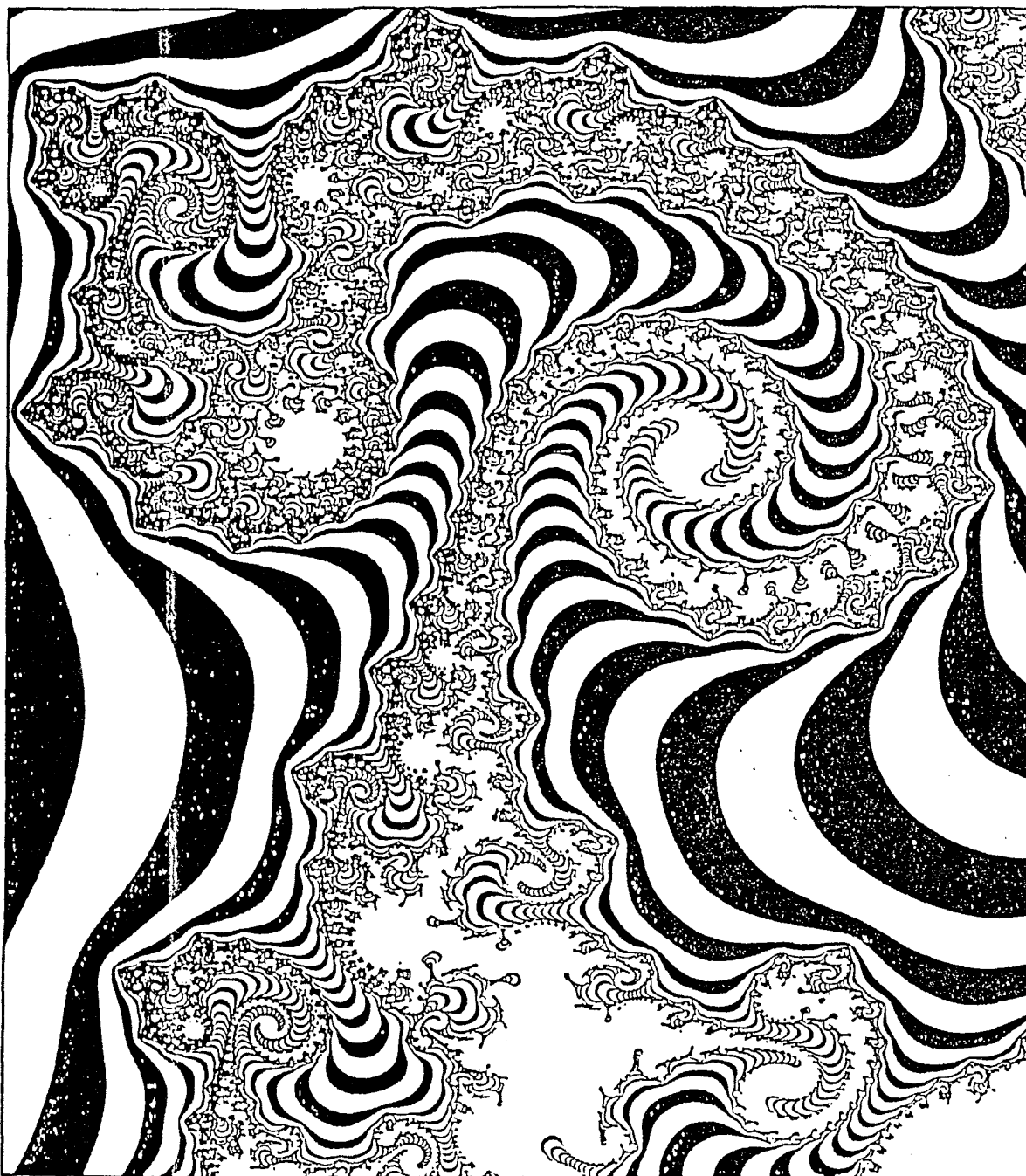


Figure 3 - Agrandissement encore plus fort de l'ensemble de Mandelbrot.

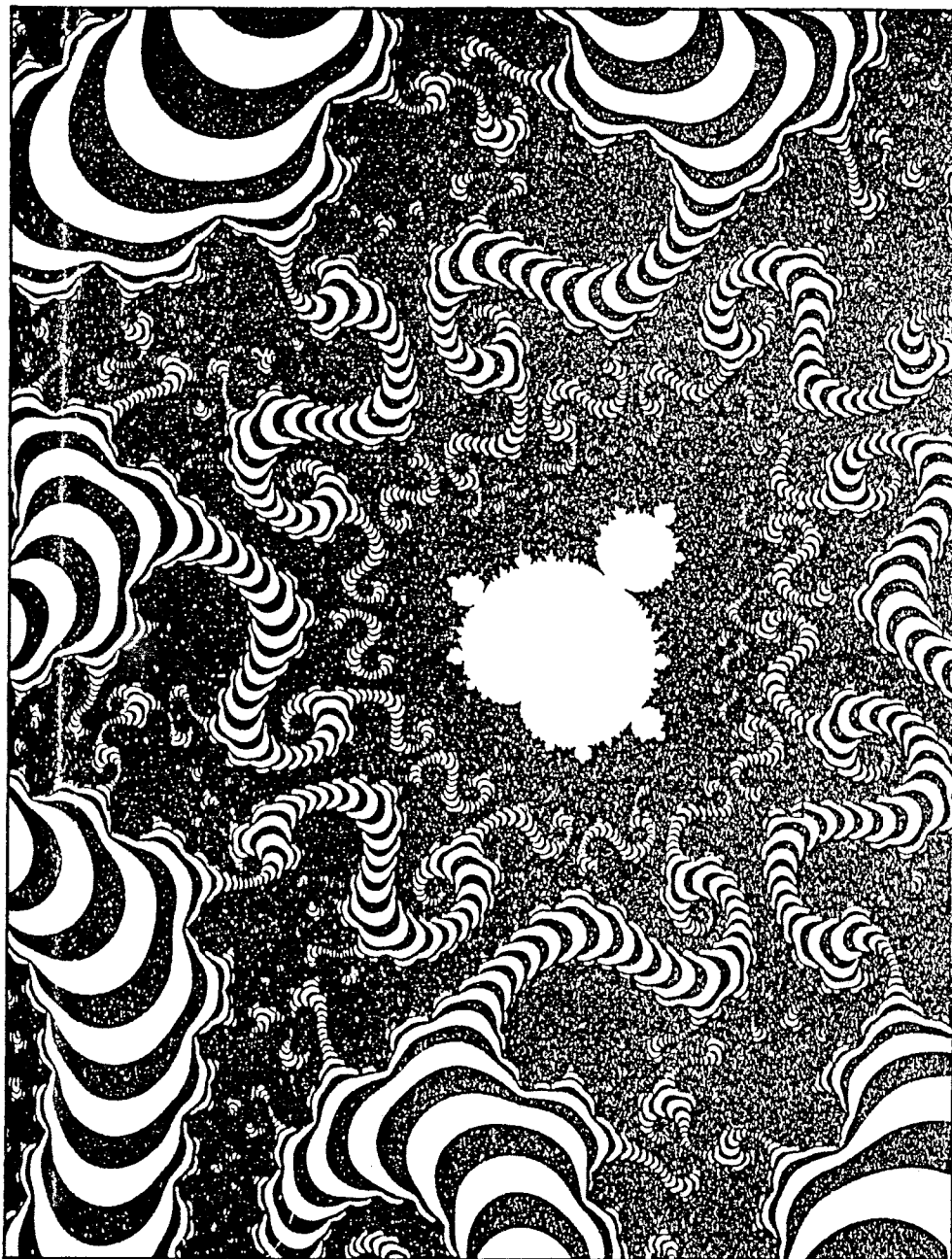


Figure 4 - Représentation des lignes de champ autour de l'ensemble de Mandelbrot (orthogonales aux équipotentiels).

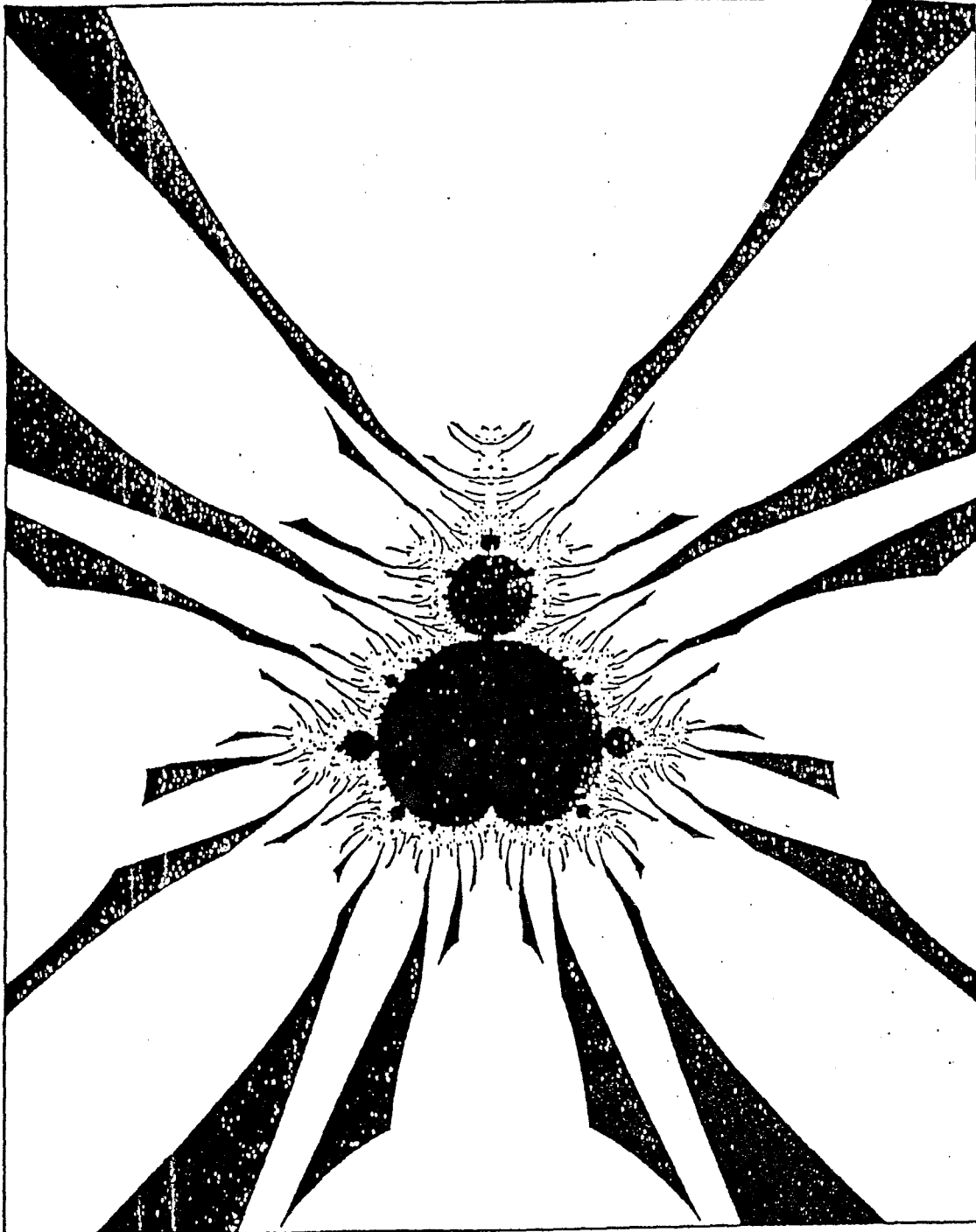




Figure 5 - Agrandissement d'une partie de la figure précédente.  
Cette figure pourrait être celle d'un agrandissement  
de l'ensemble de Mandelbrot.

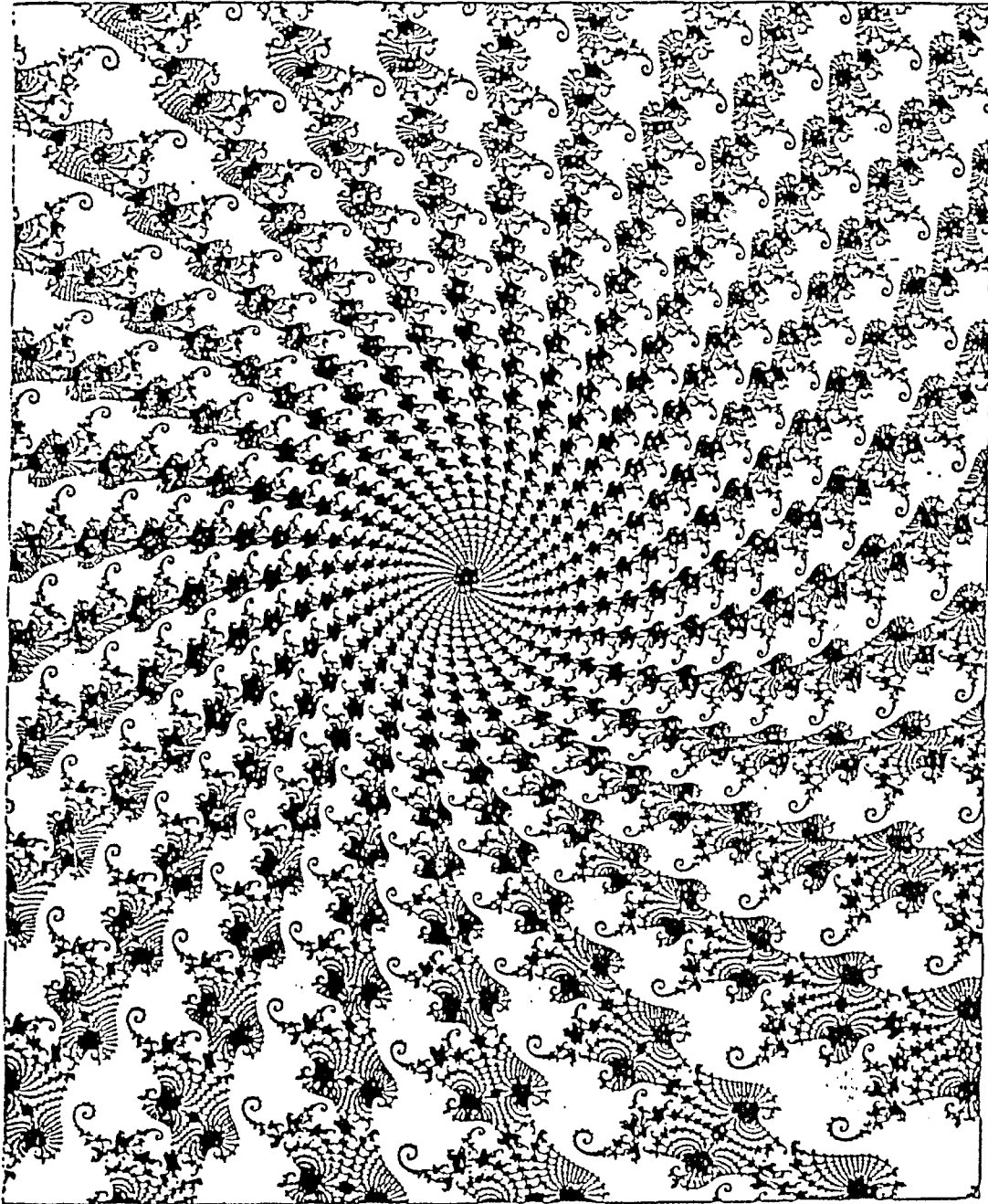
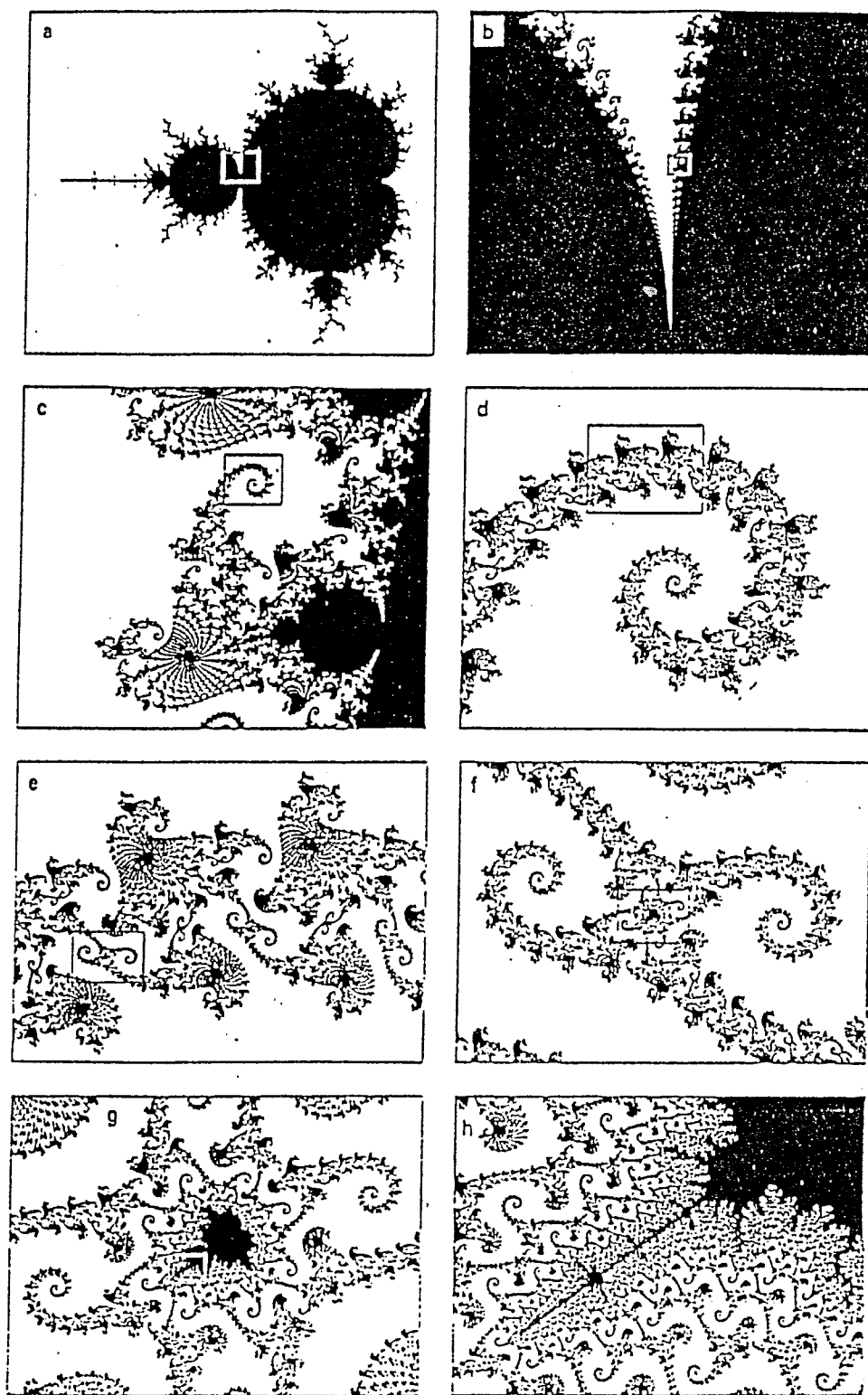


Figure 6 - Agrandissements progressifs d'une zone de l'ensemble de Mandelbrot.



## ANNEXE 1

### ENSEMBLE DE JULIA

Dans ce cas, la valeur de  $c$  est fixée tandis que la valeur initiale de  $z$  varie.

Pour chaque nouvelle valeur de  $c$ , dans la formule d'itération, on obtient un nouvel ensemble de Julia (fig. 7 et 8).

En résumé, l'ensemble de mandelbrot est une sorte de regroupement de tous les ensembles de Julia. Et la différence entre ces deux ensembles réside dans le fait que le premier ne possède pas la propriété d'auto-similarité par rapport au second.

Figure 7 - Ensembles de Julia pour différentes valeurs de  $c$

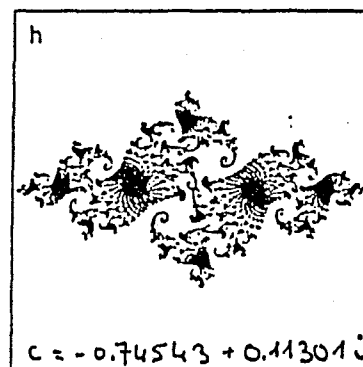
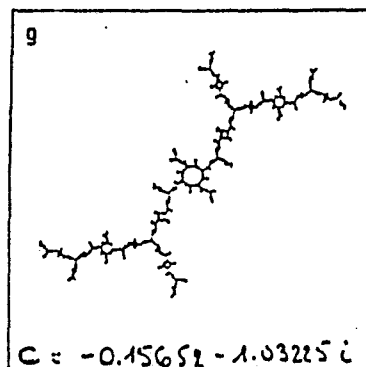
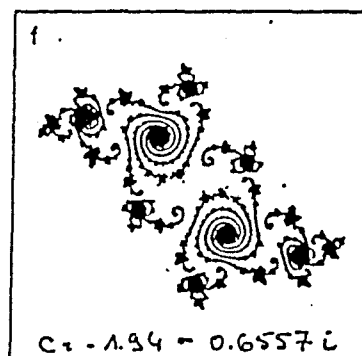
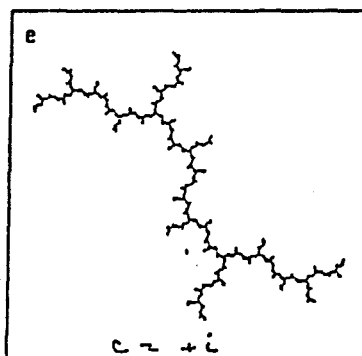
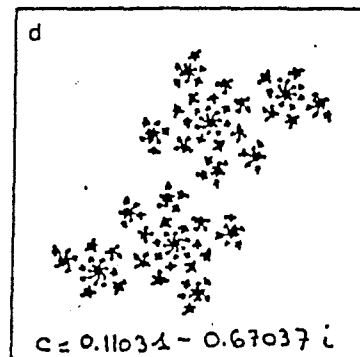
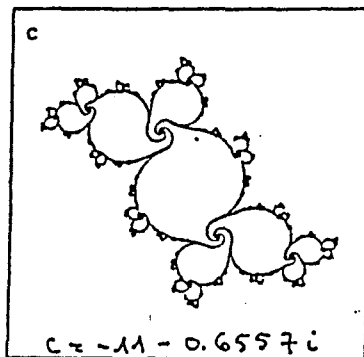
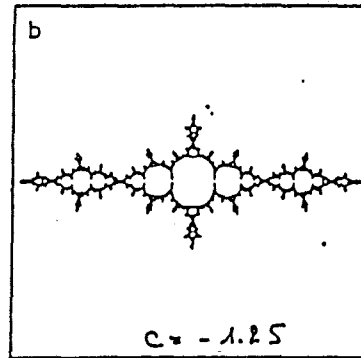
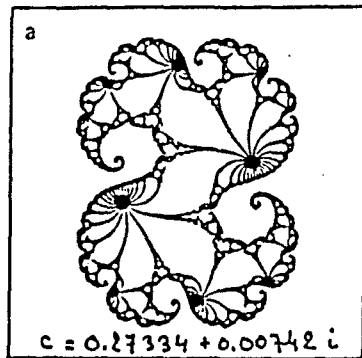
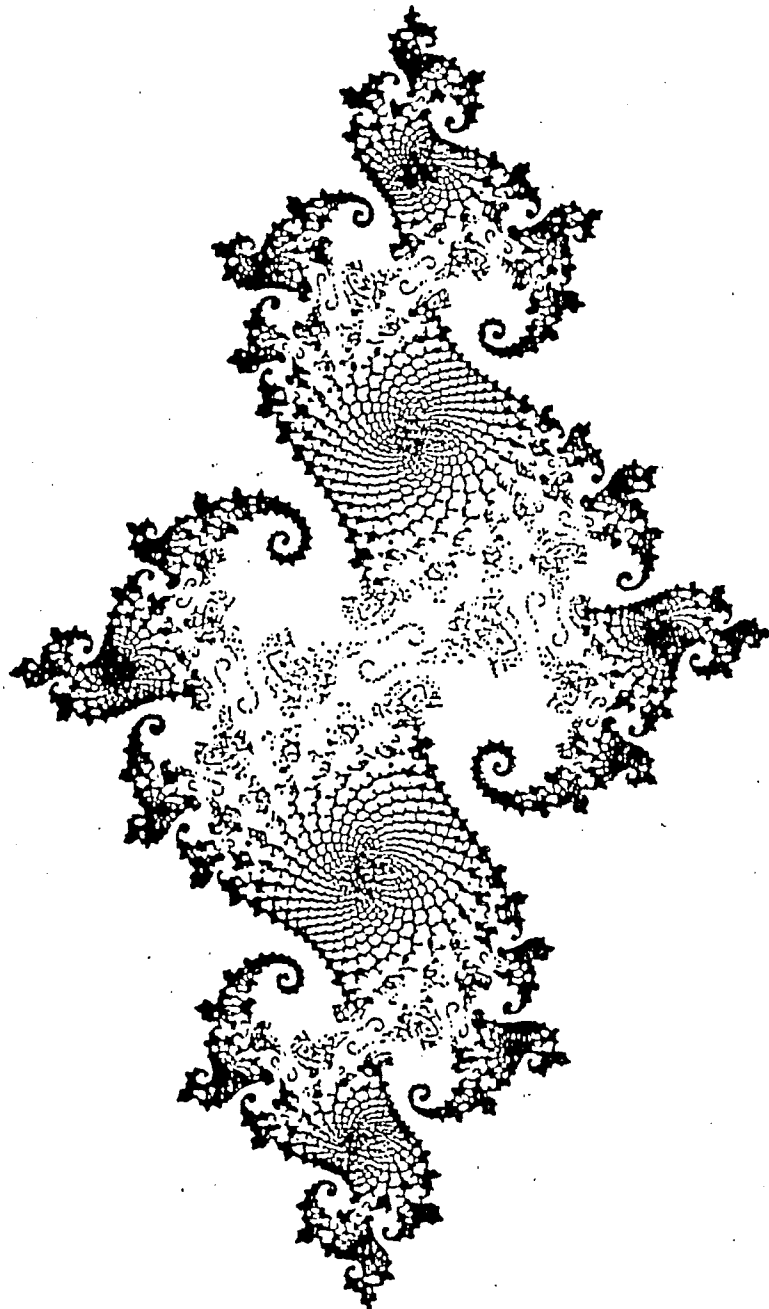
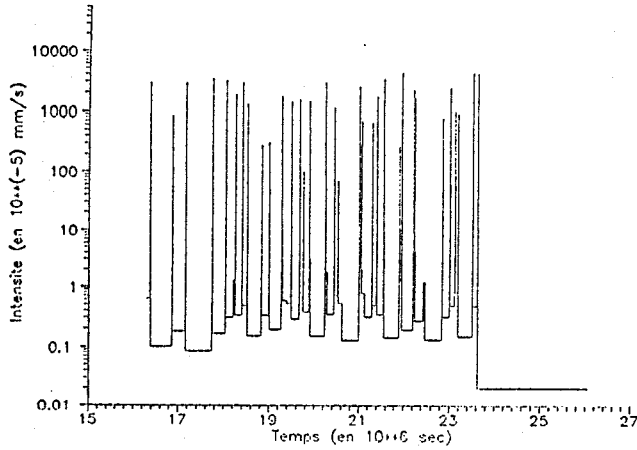


Figure 8 - Ensemble de Julia pour  $c = -0.74543 + 0.1130i$ .

Cette valeur est particulière parce que l'ensemble de Mandelbrot est très similaire dans cette partie du plan de  $c$  (voir fig.7 pour situer la fig.11).

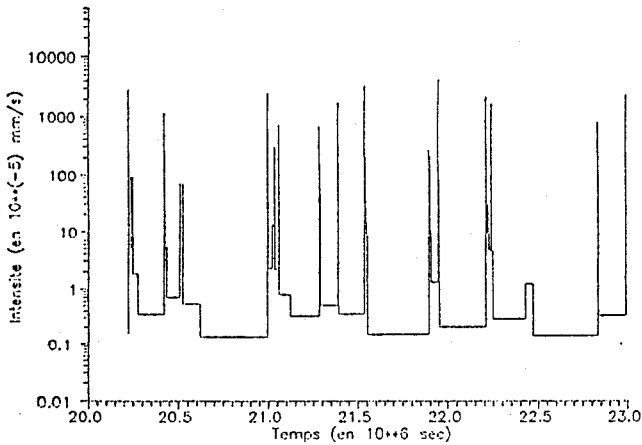


FETOKADIE (hyetogramme 1)



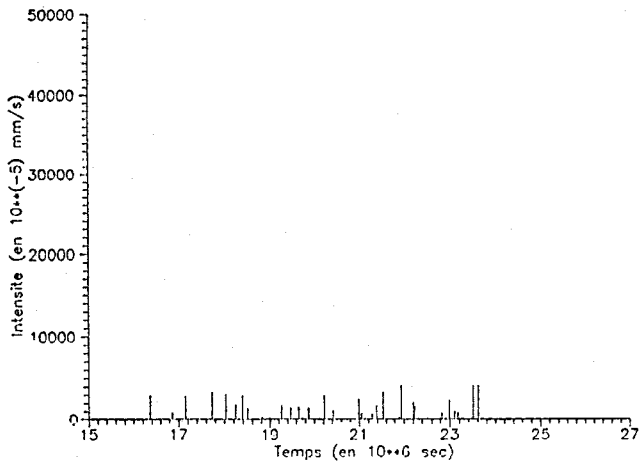
**Hyetogramme de type 1**  
L'échelle logarithmique choisie englobe toutes les valeurs de la période de fonctionnement

FETOKADIE (hyetogramme 2)



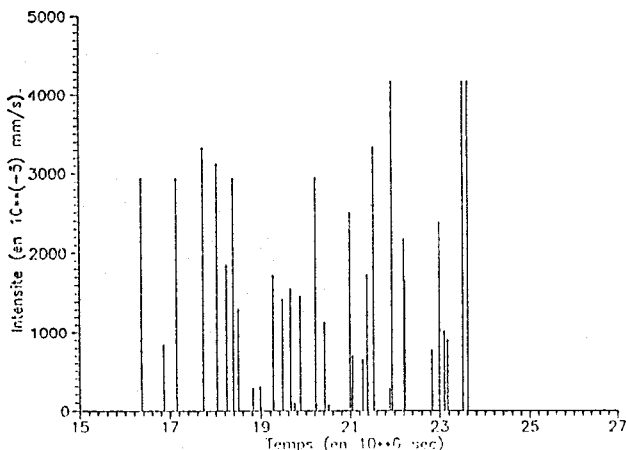
**Hyetogramme de type 2**  
L'échelle logarithmique englobe uniquement la période commune de fonctionnement

FETOKADIE (hyetogramme lineaire)



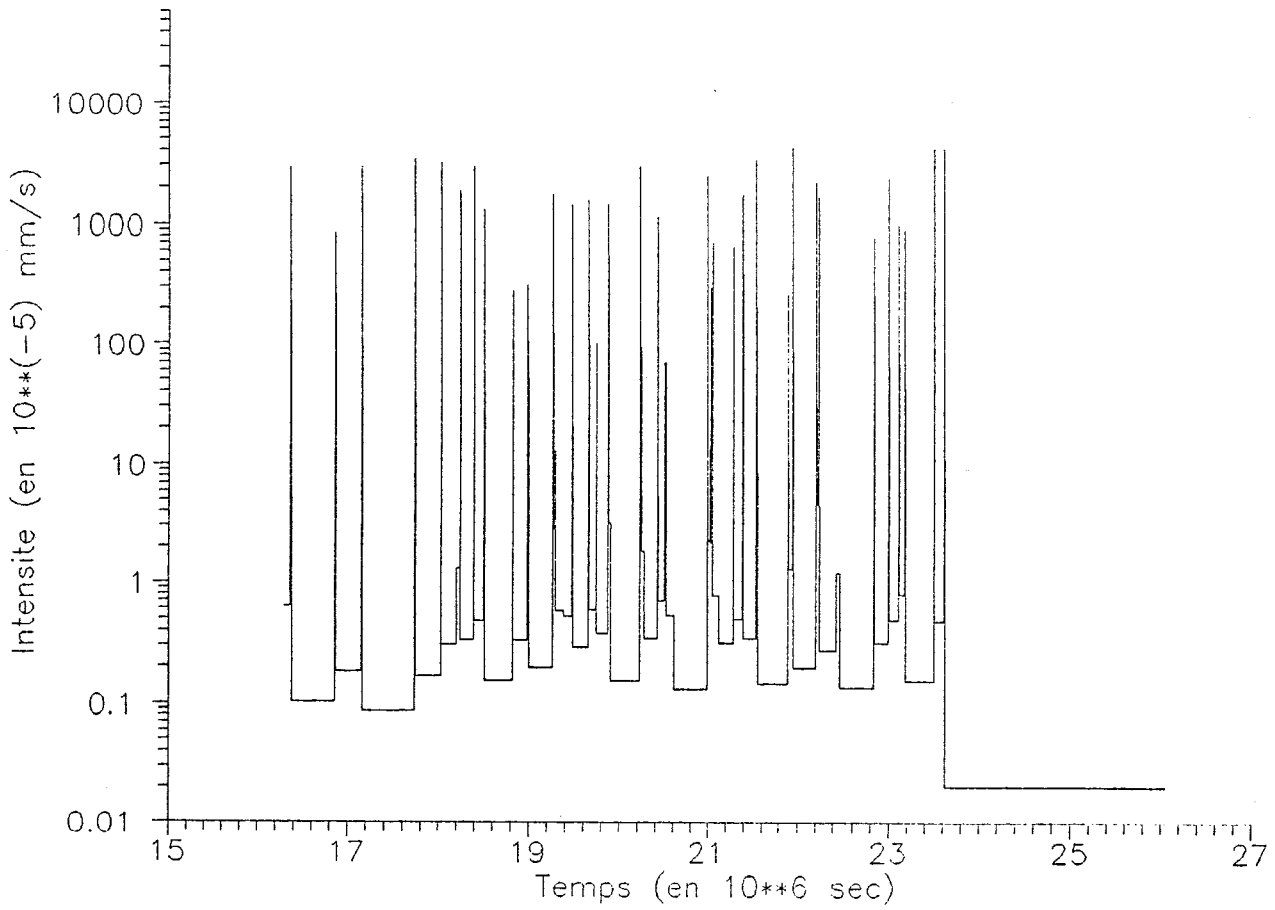
**Hyetogramme linéaire**  
L'échelle linéaire englobe toutes les valeurs de la période de fonctionnement

FETOKADIE (hyetogramme lineaire)

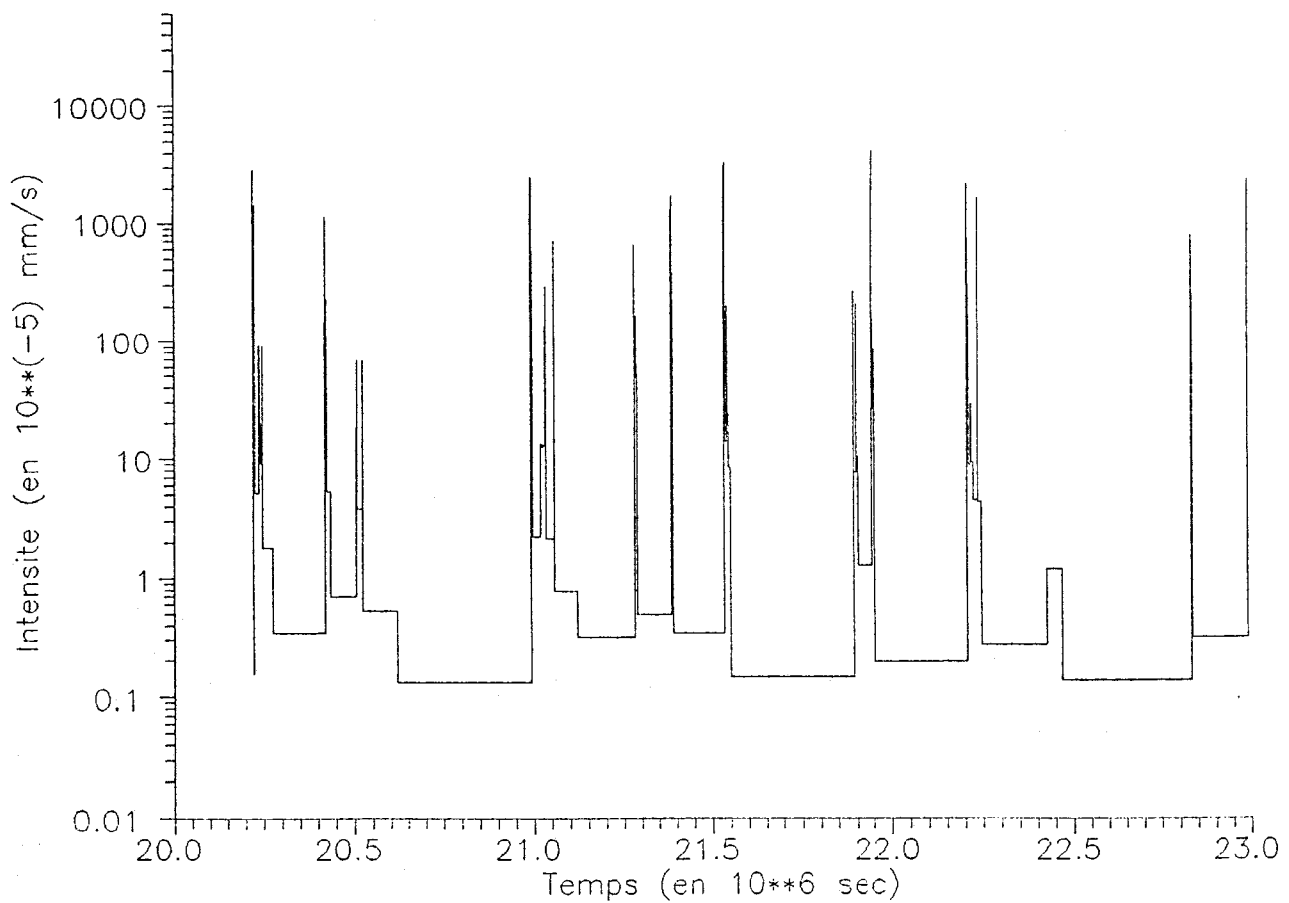


**Hyetogramme linéaire**  
L'axe des ordonnées ne tient compte que des valeurs de chacune des stations

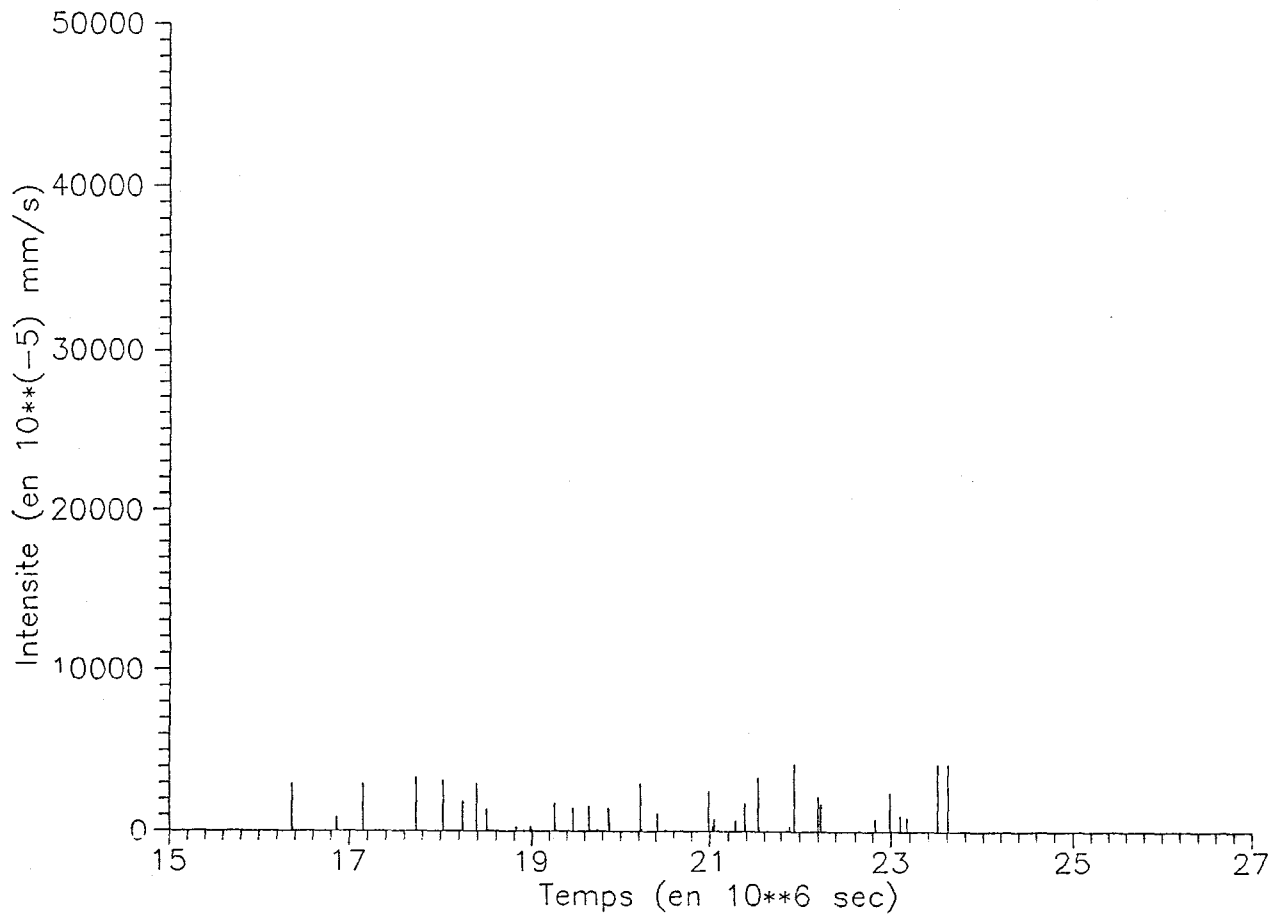
# FETOKADIE (hyetogramme 1)



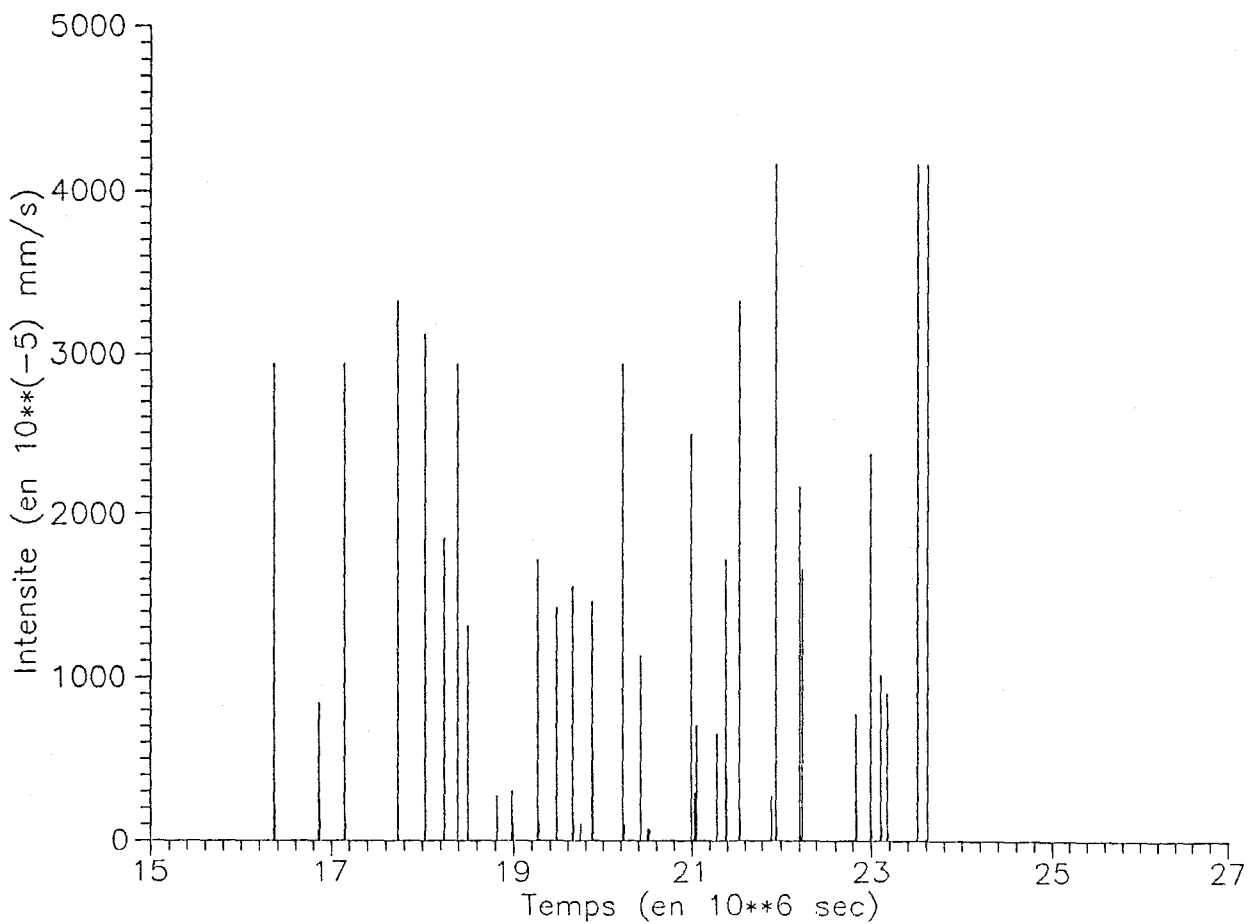
# FETOKADIE (hyetogramme 2)



# FETOKADIE (hyetogramme lineaire)

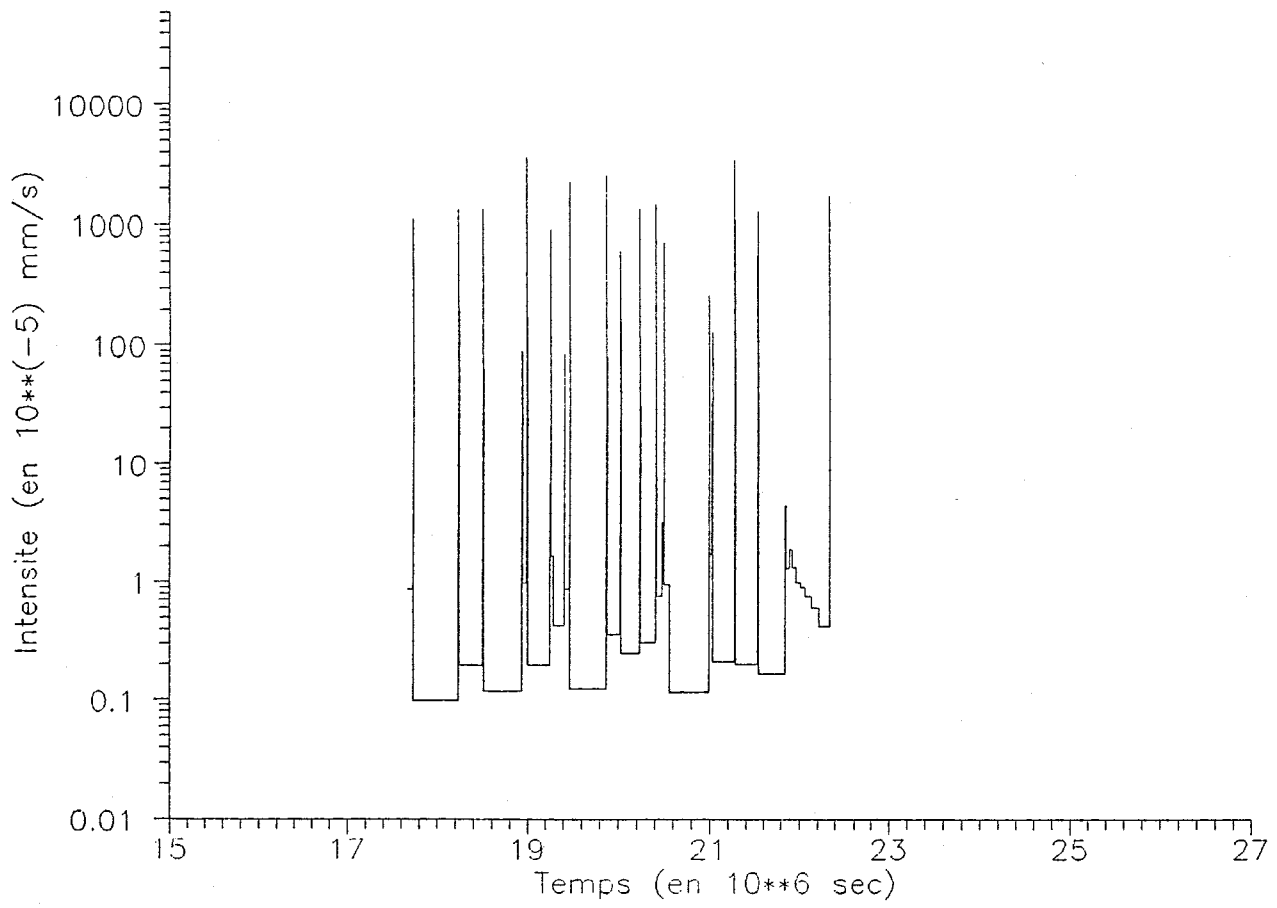


# FETOKADIE (hyetogramme lineaire)

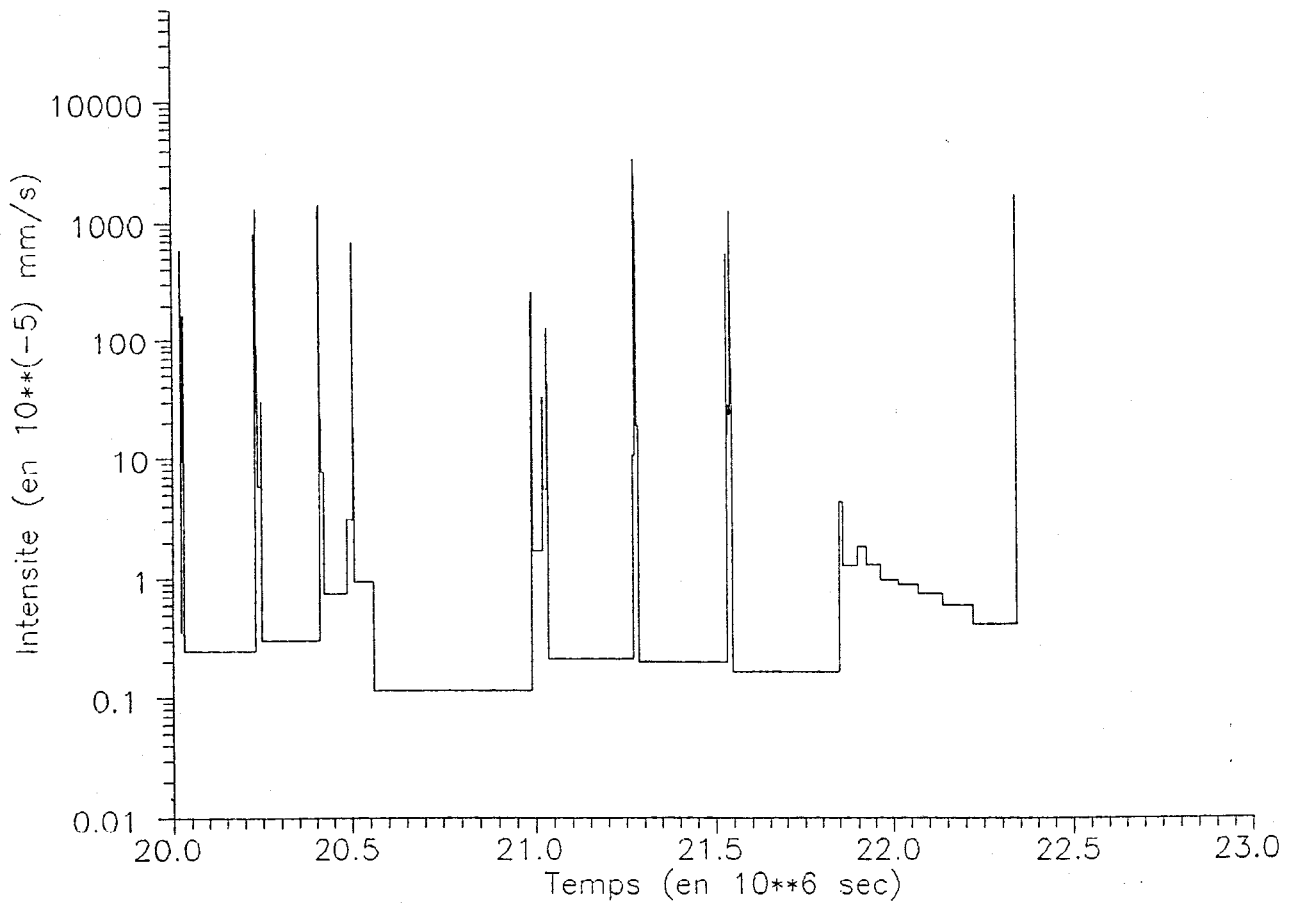




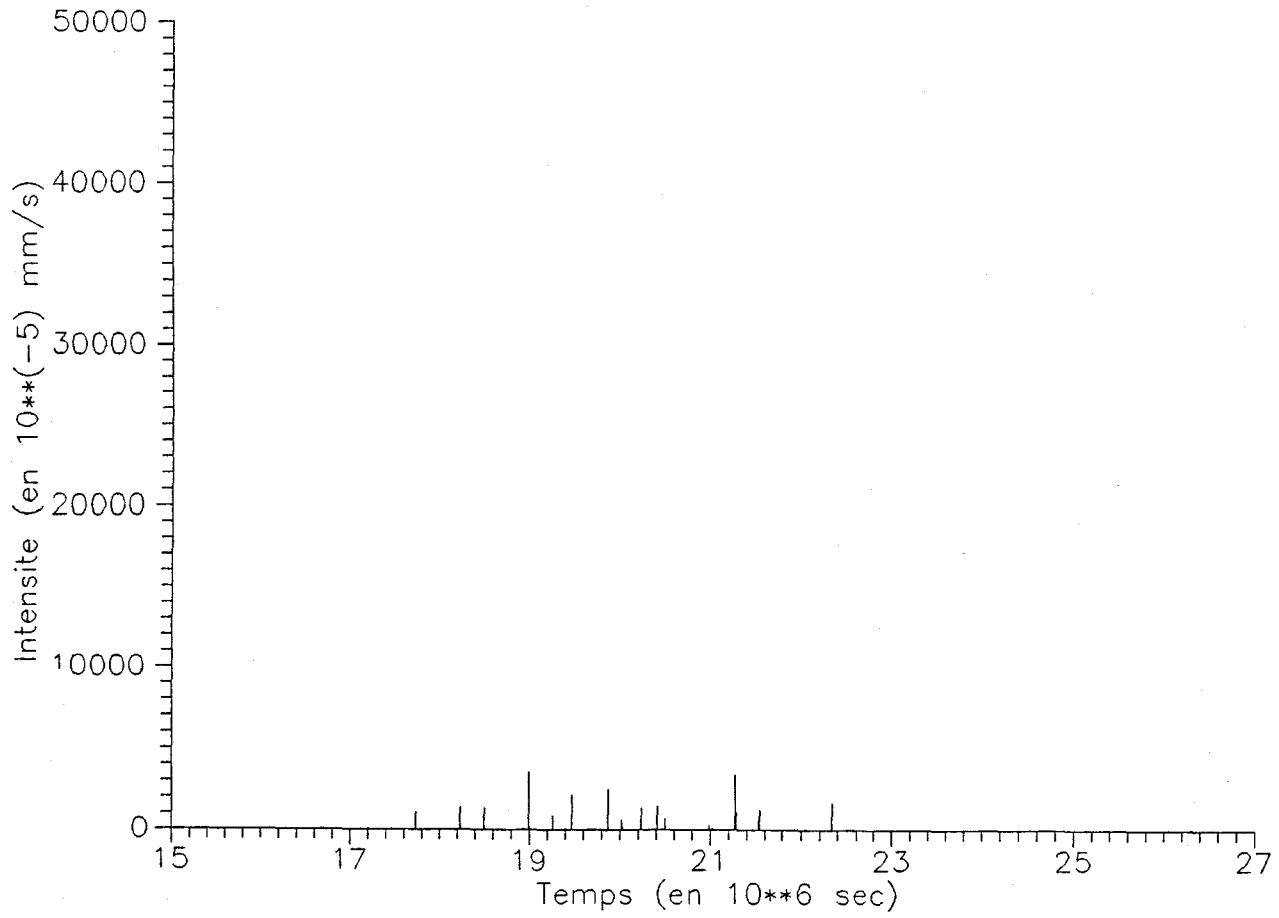
# DAMANA (hyetogramme 1)



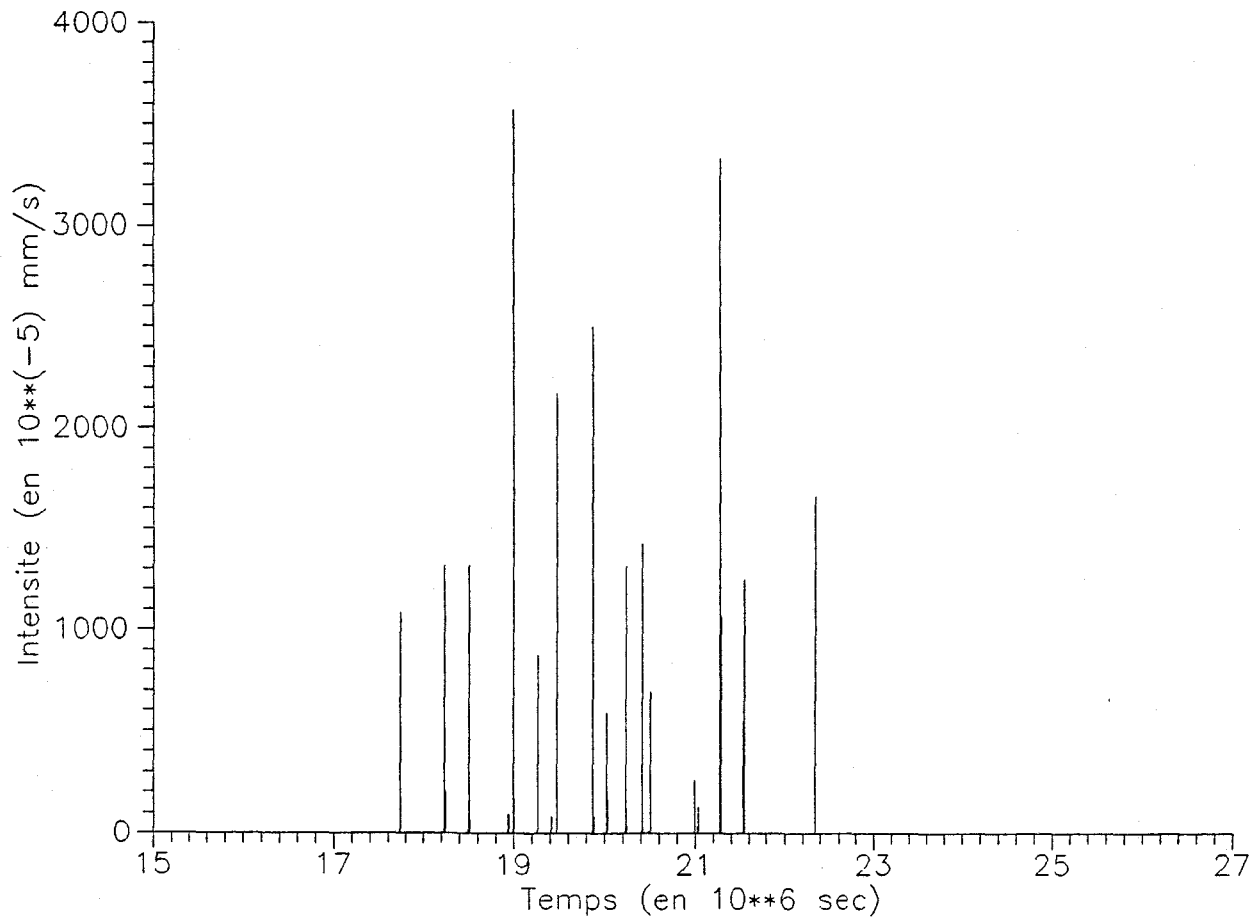
# DAMANA (hyetogramme 2)



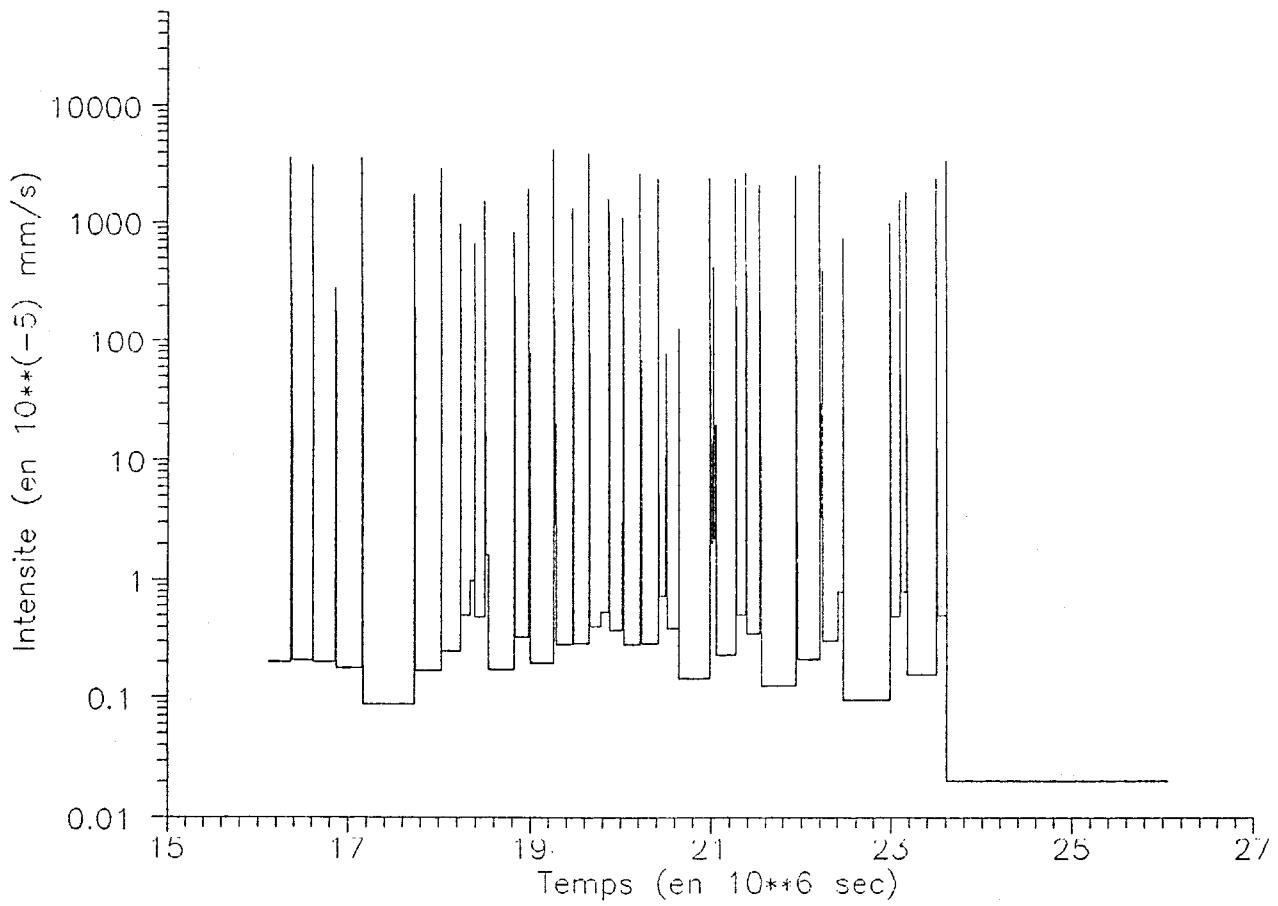
# DAMANA (hyetogramme lineaire)



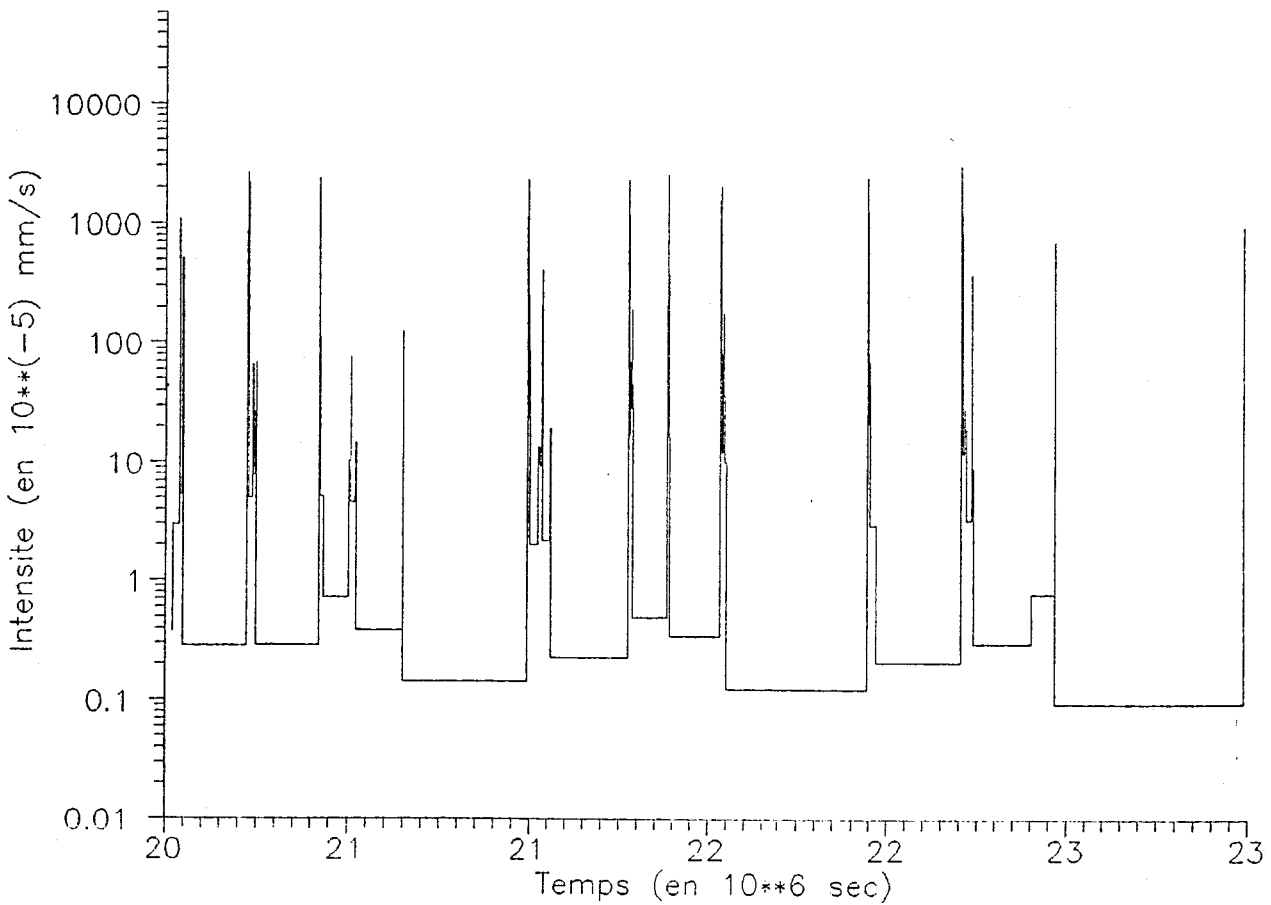
# DAMANA (hyetogramme lineaire)



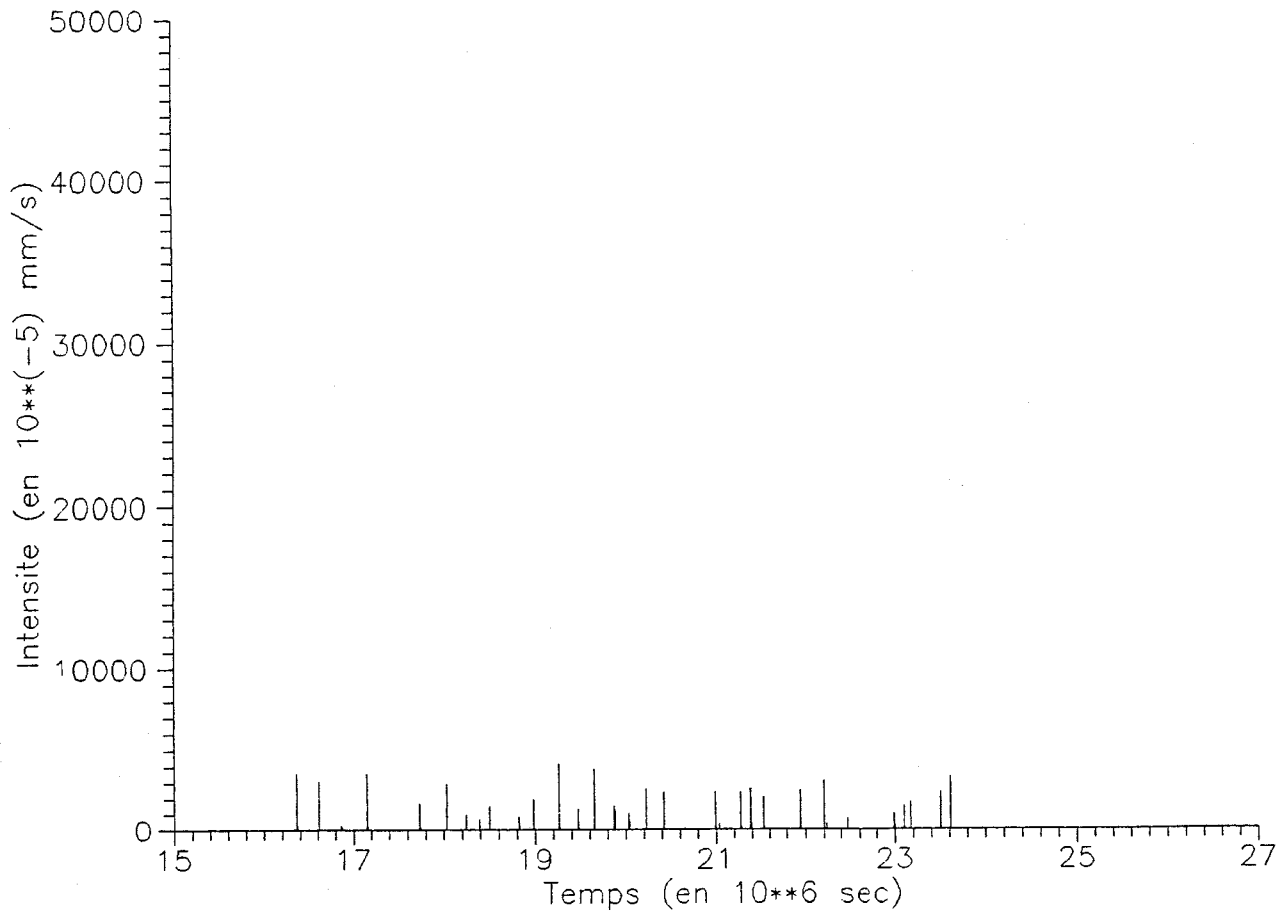
# YELOUNA EST (hyetogramme 1)



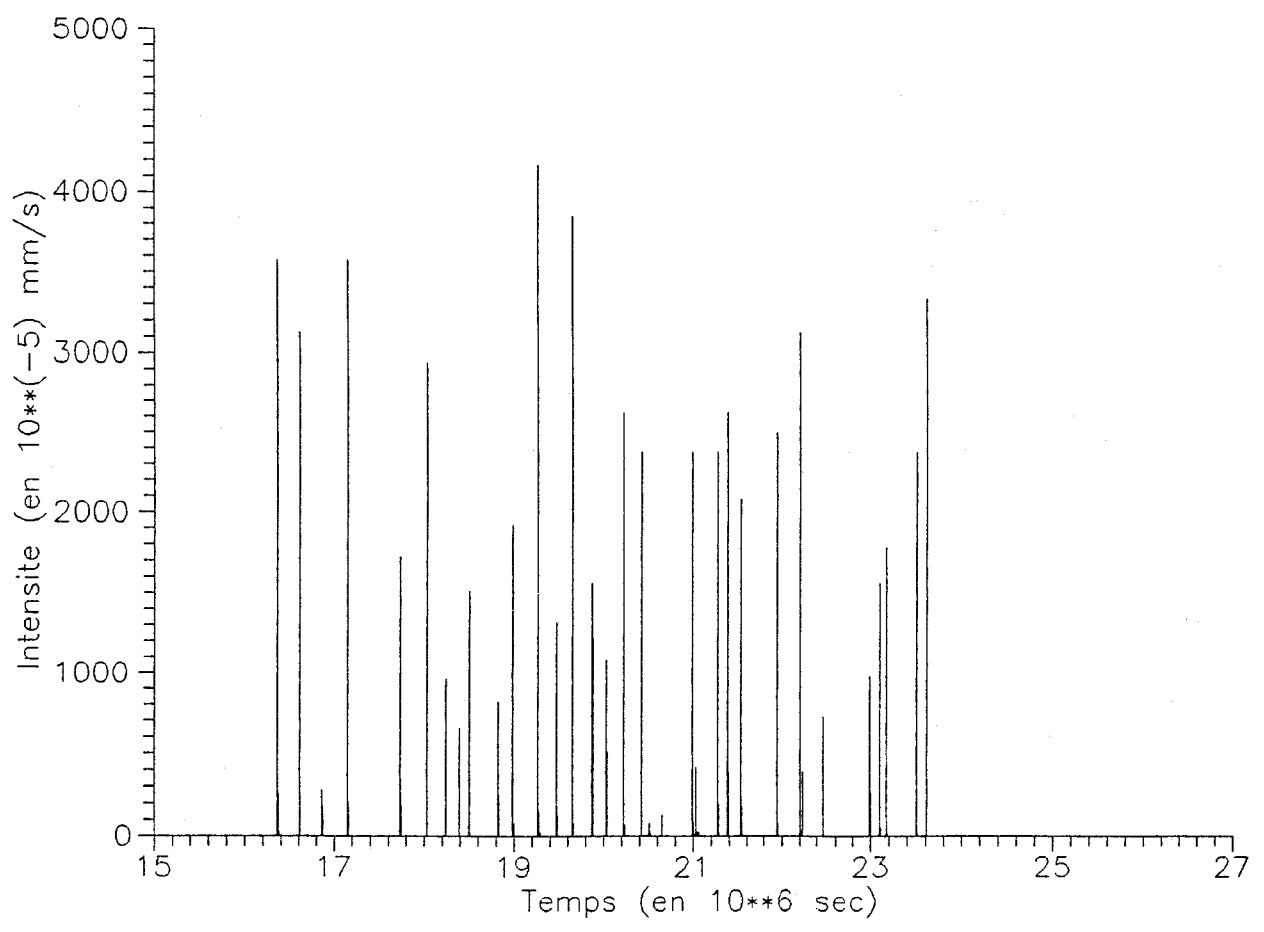
# YELOUNA EST (hyetogramme 2)



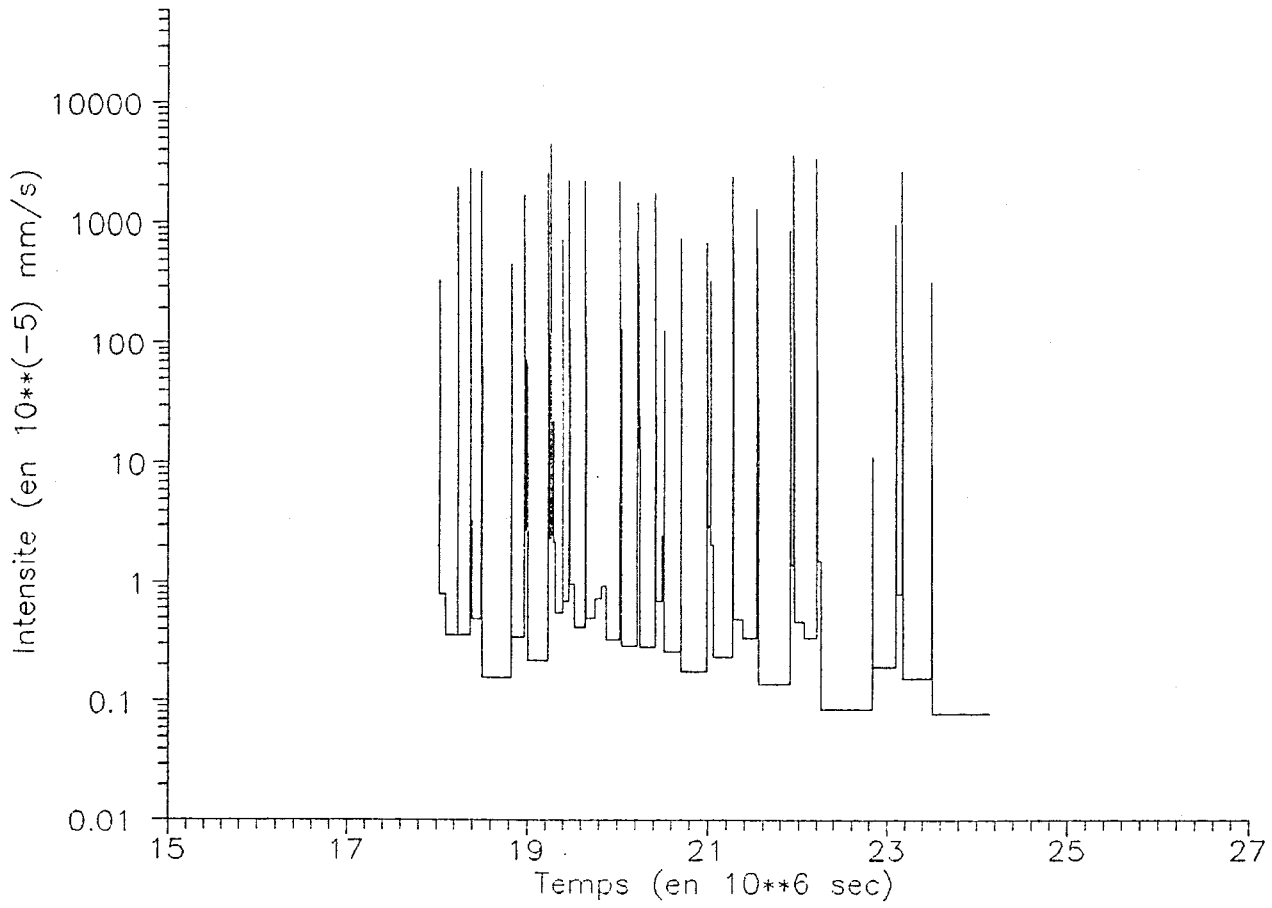
# YELOUNA EST (hyetogramme lineaire)



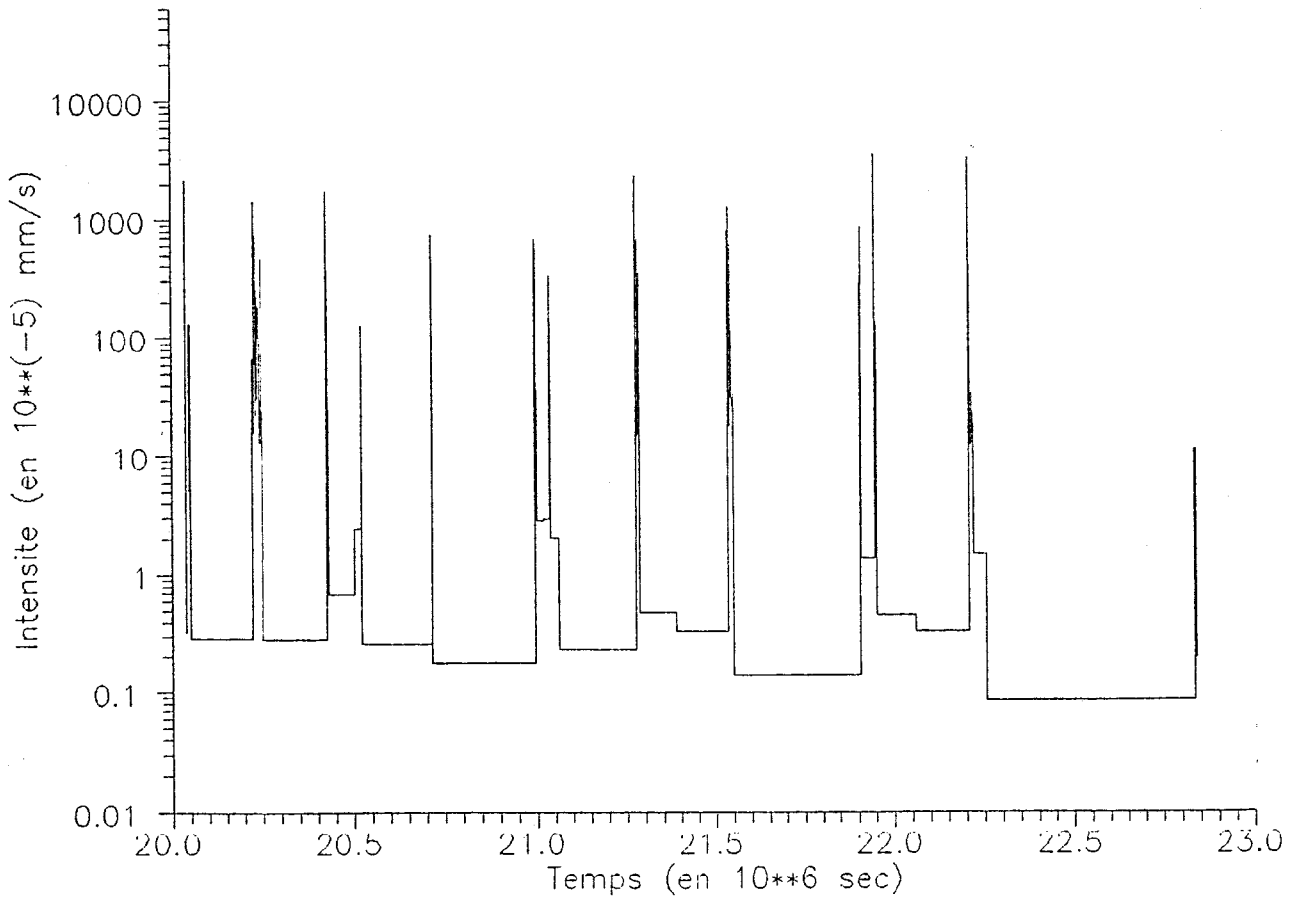
# YELOUNA EST (hyetogramme lineaire)



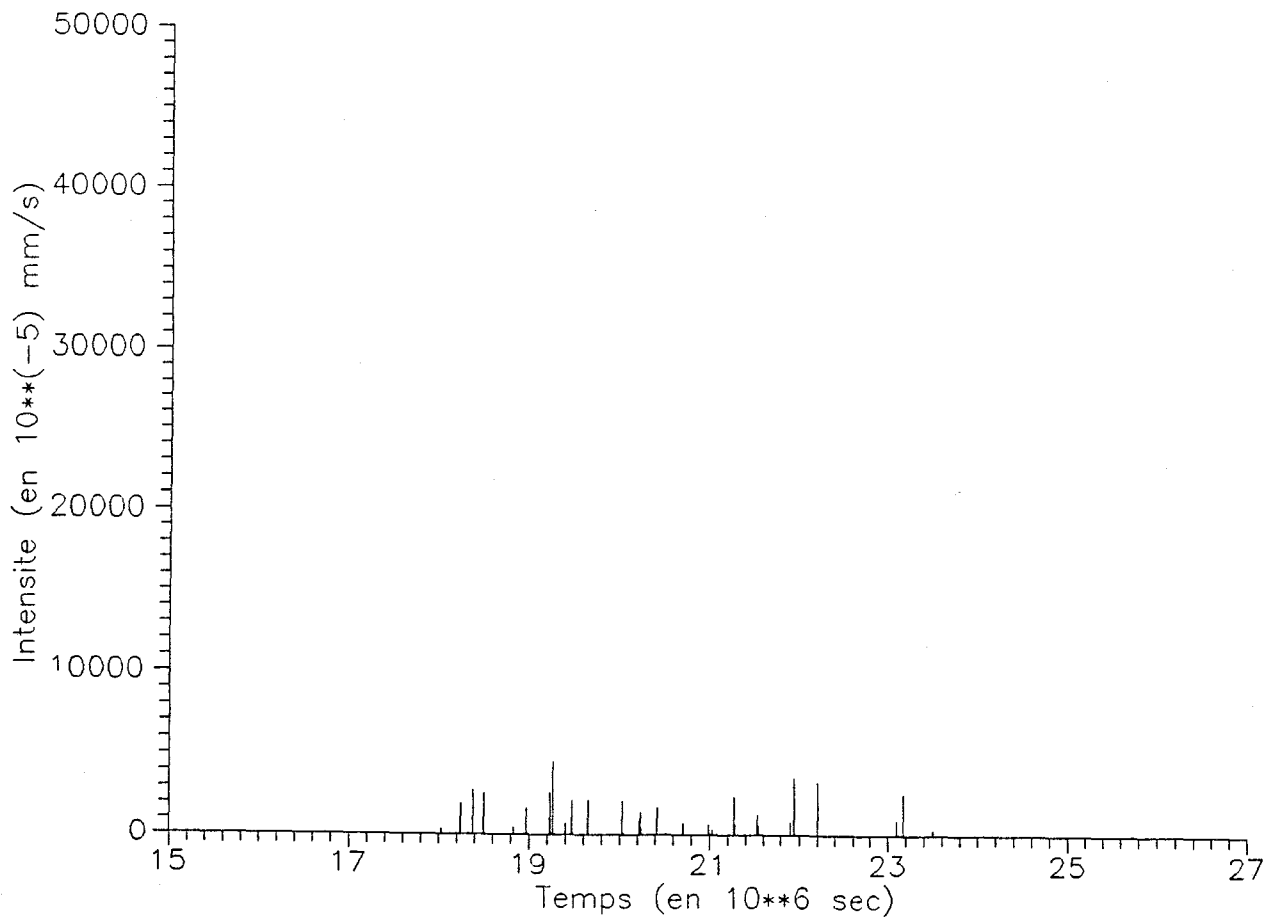
# BARKIAWAL (hyetogramme 1)



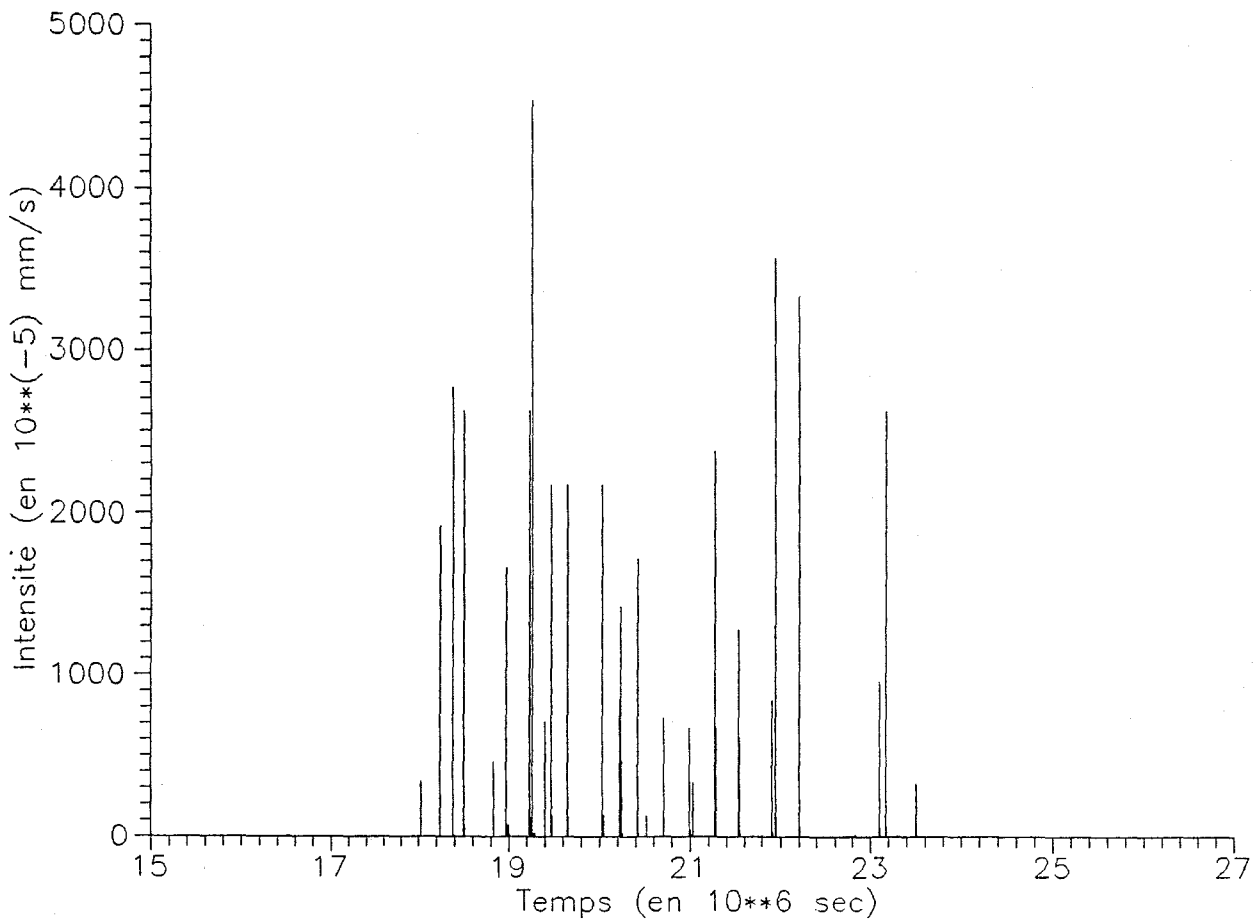
# BARKIAWAL (hyetogramme 2)



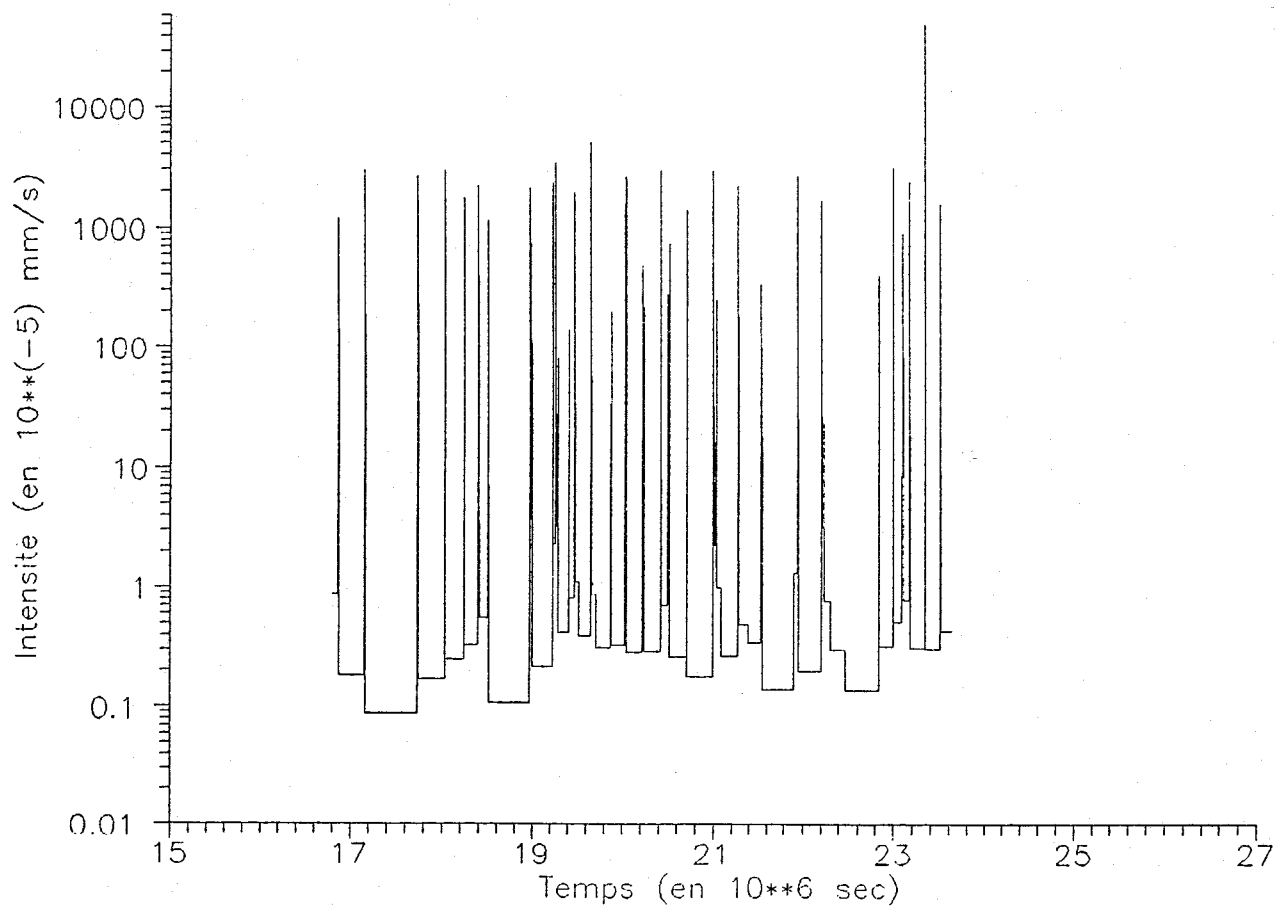
# BARKIAWAL (hyetogramme lineaire)



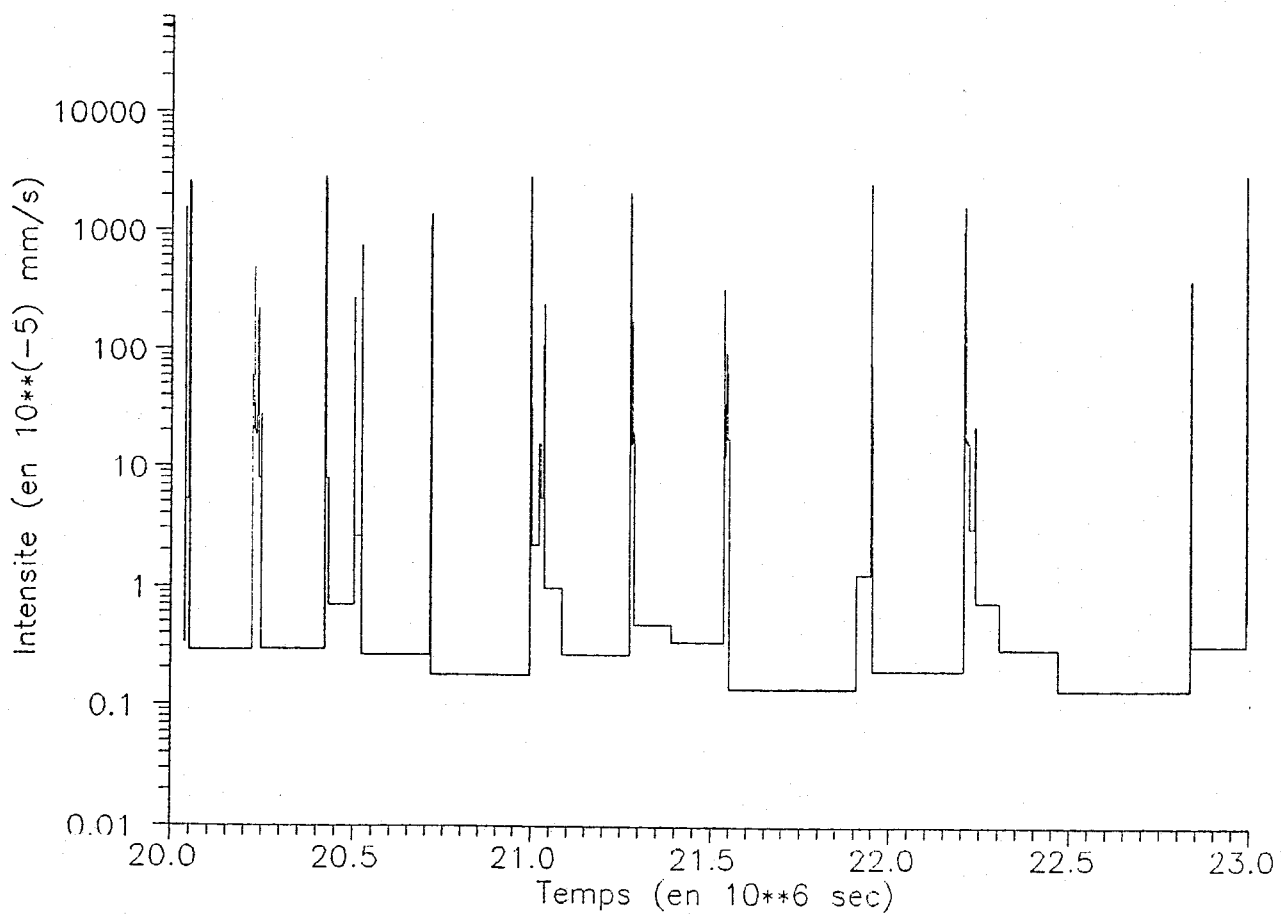
# BARKIAWAL (hyetogramme lineaire)



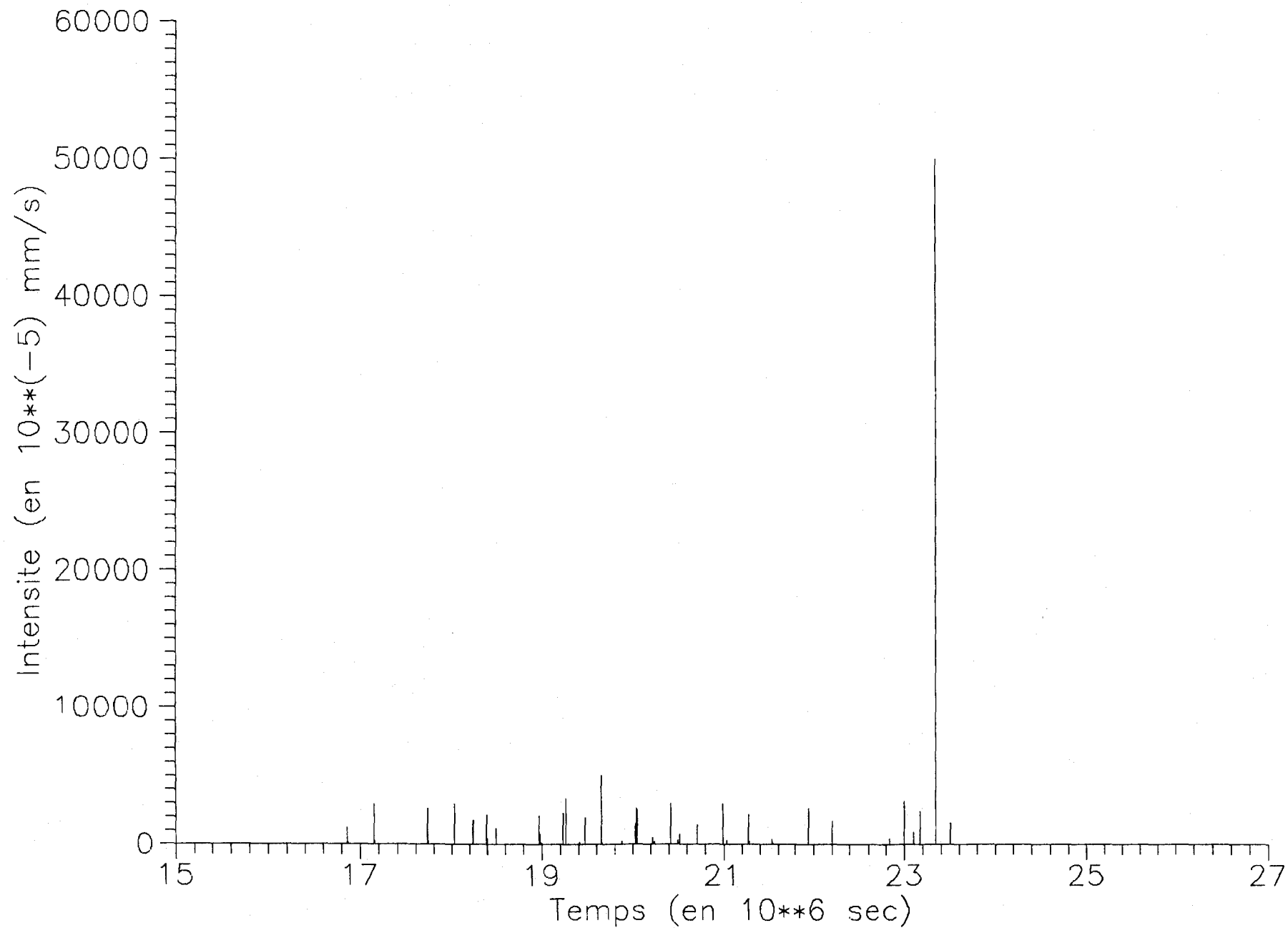
# GAGARE (hyetogramme 1)



# GAGARE (hyetogramme 2)

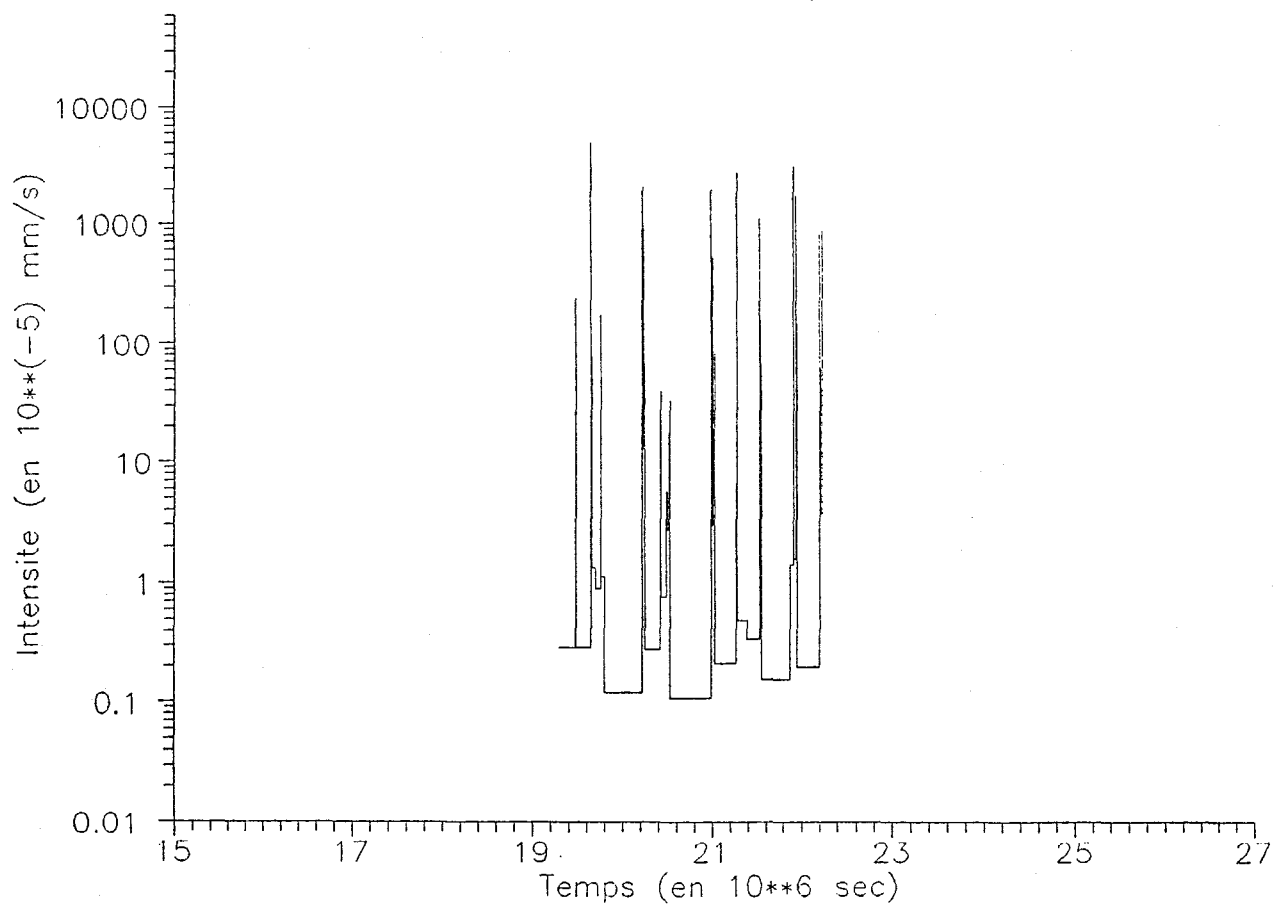


# GAGARE (hyetogramme lineaire)

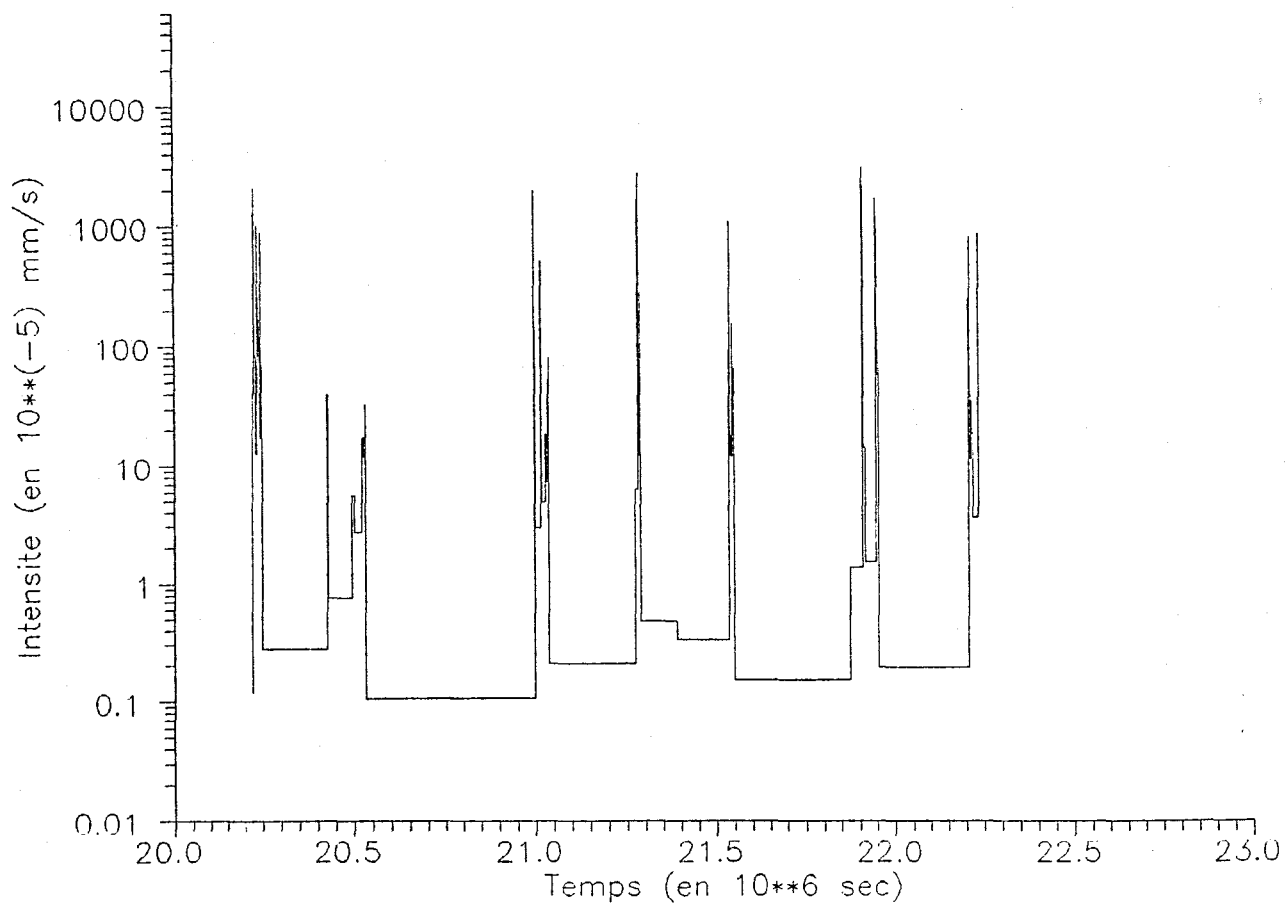




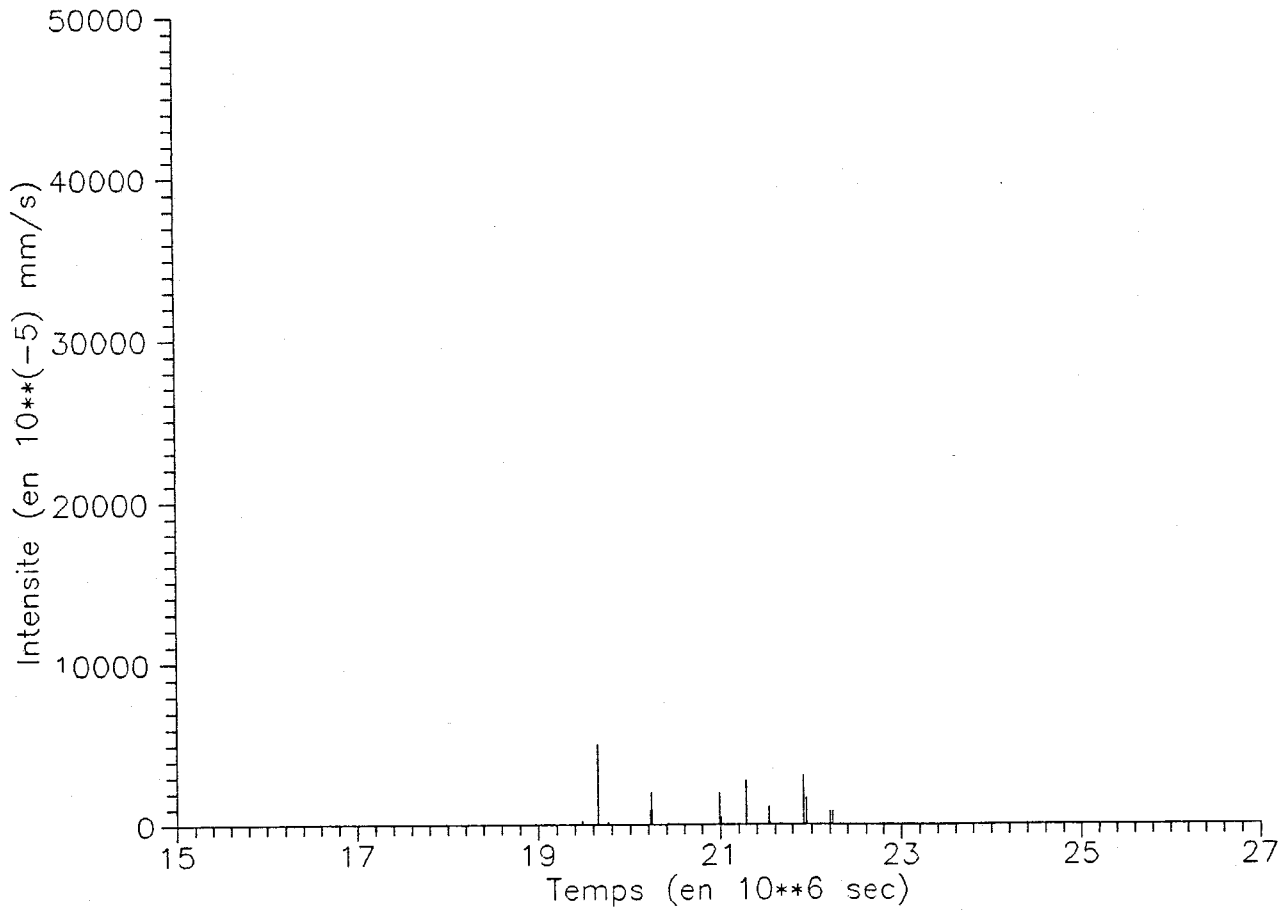
# NIAMEY POU德里ERE (hyetogramme 1)



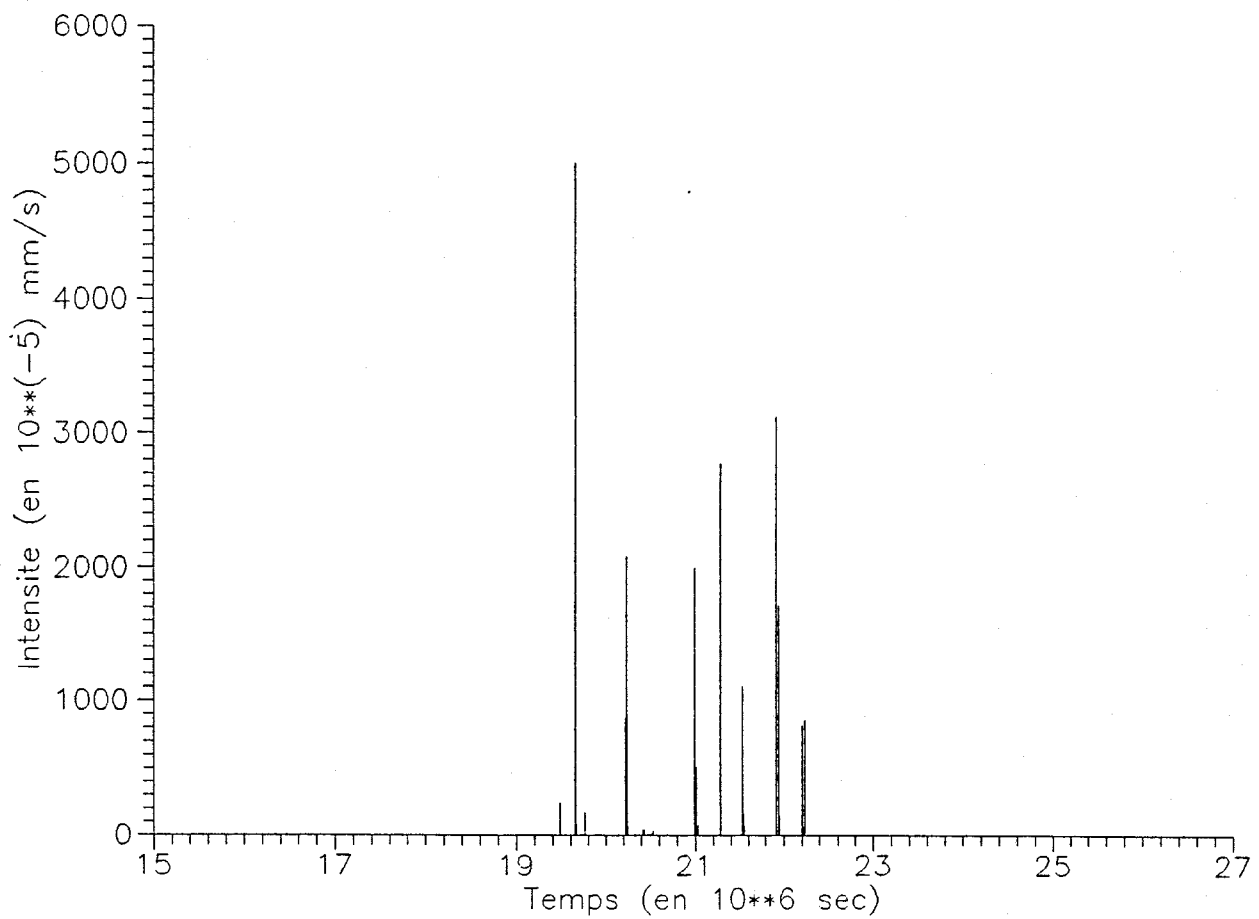
# NIAMEY POU德里ERE (hyetogramme 2)



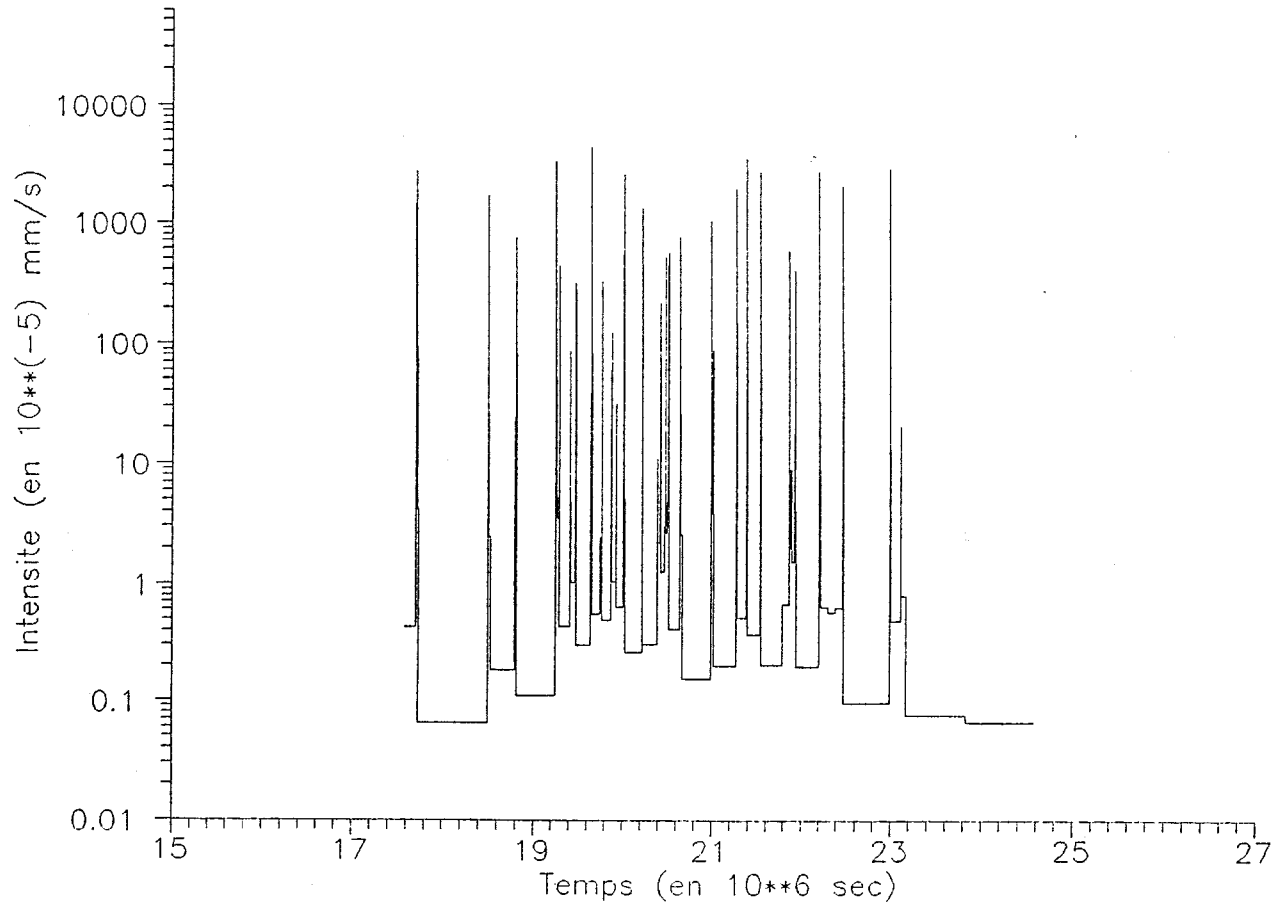
# NIAMEY POU德里ERE (hyetogramme lineaire)



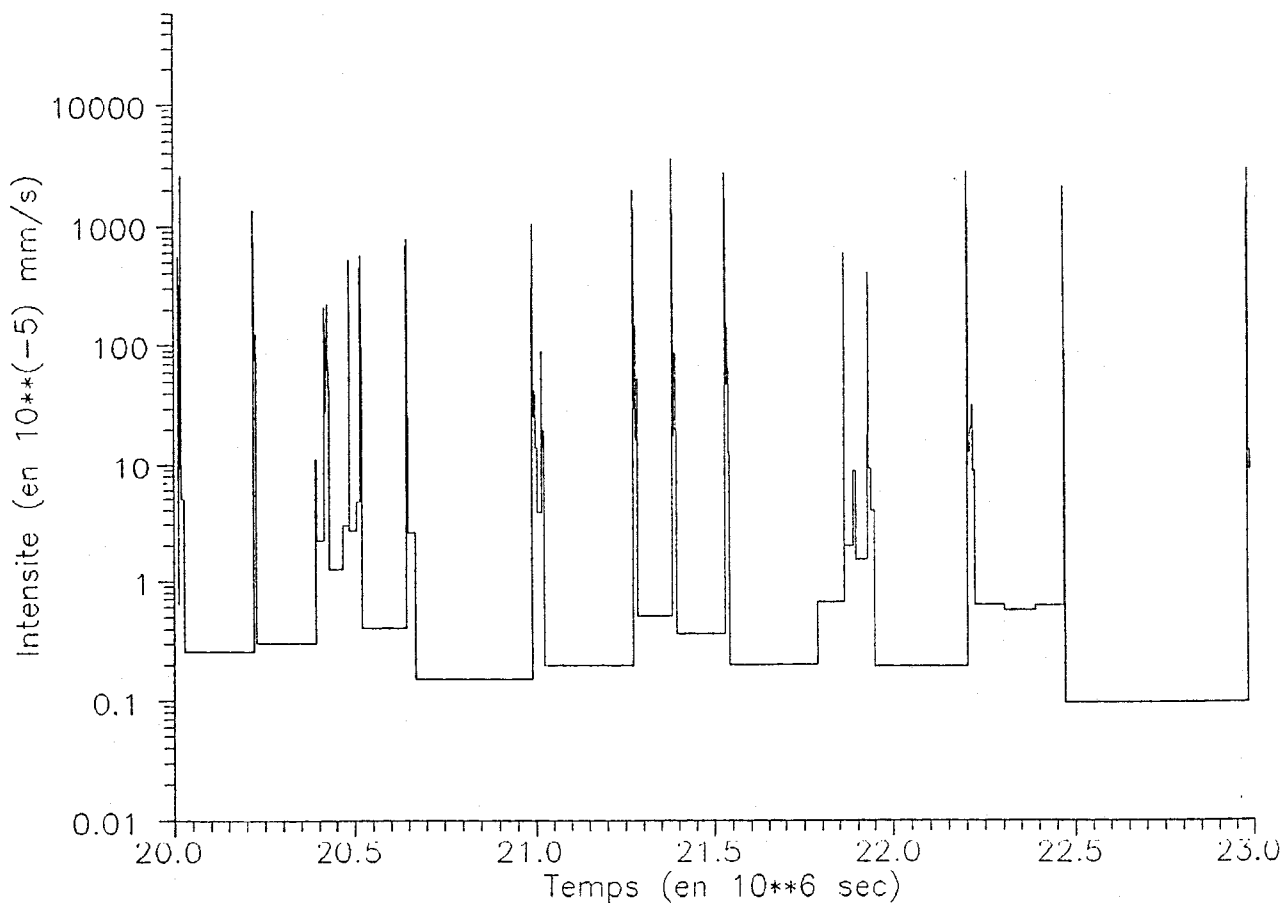
# NIAMEY POU德里ERE (hyetogramme lineaire)



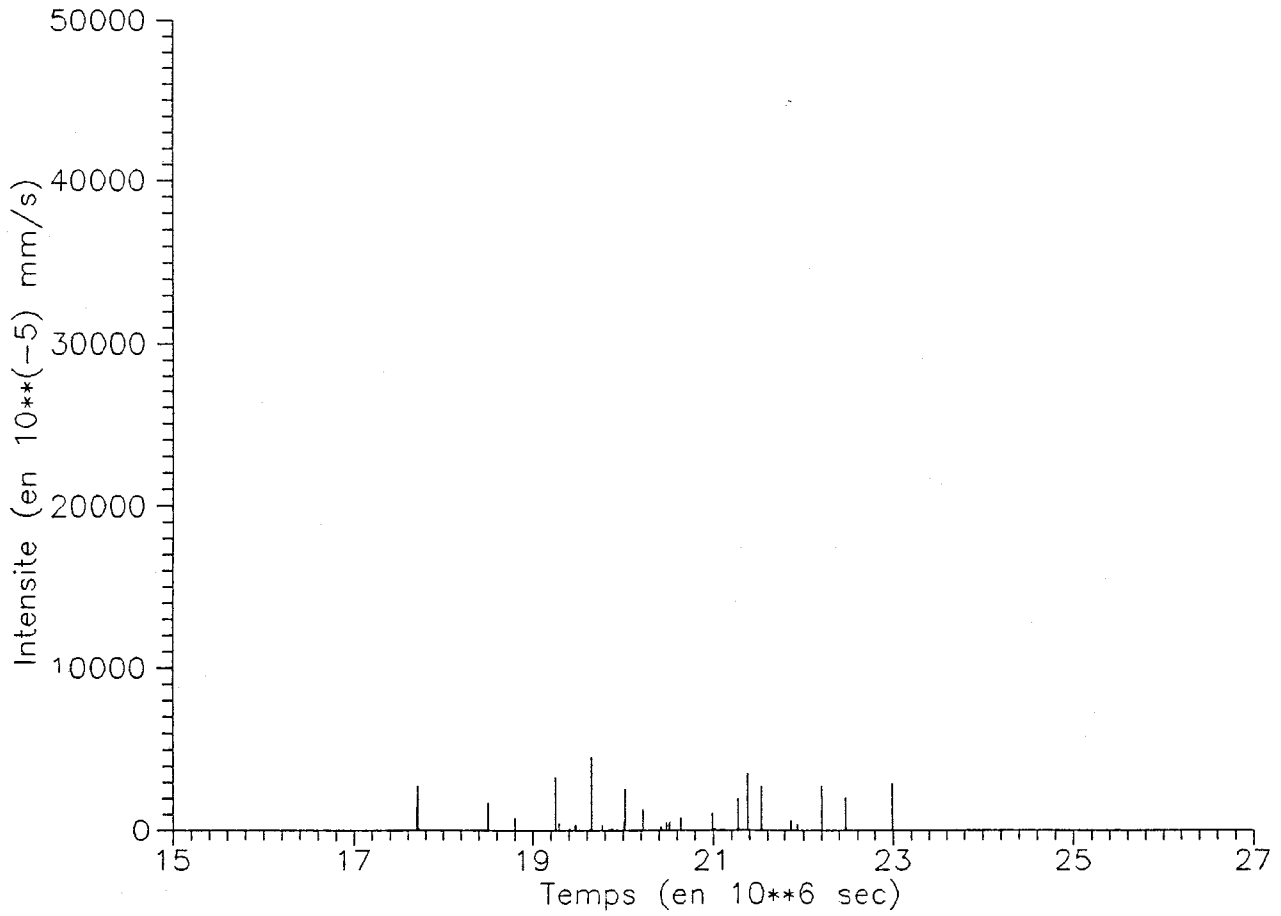
# KOURE KOBAD (hyetogramme 1)



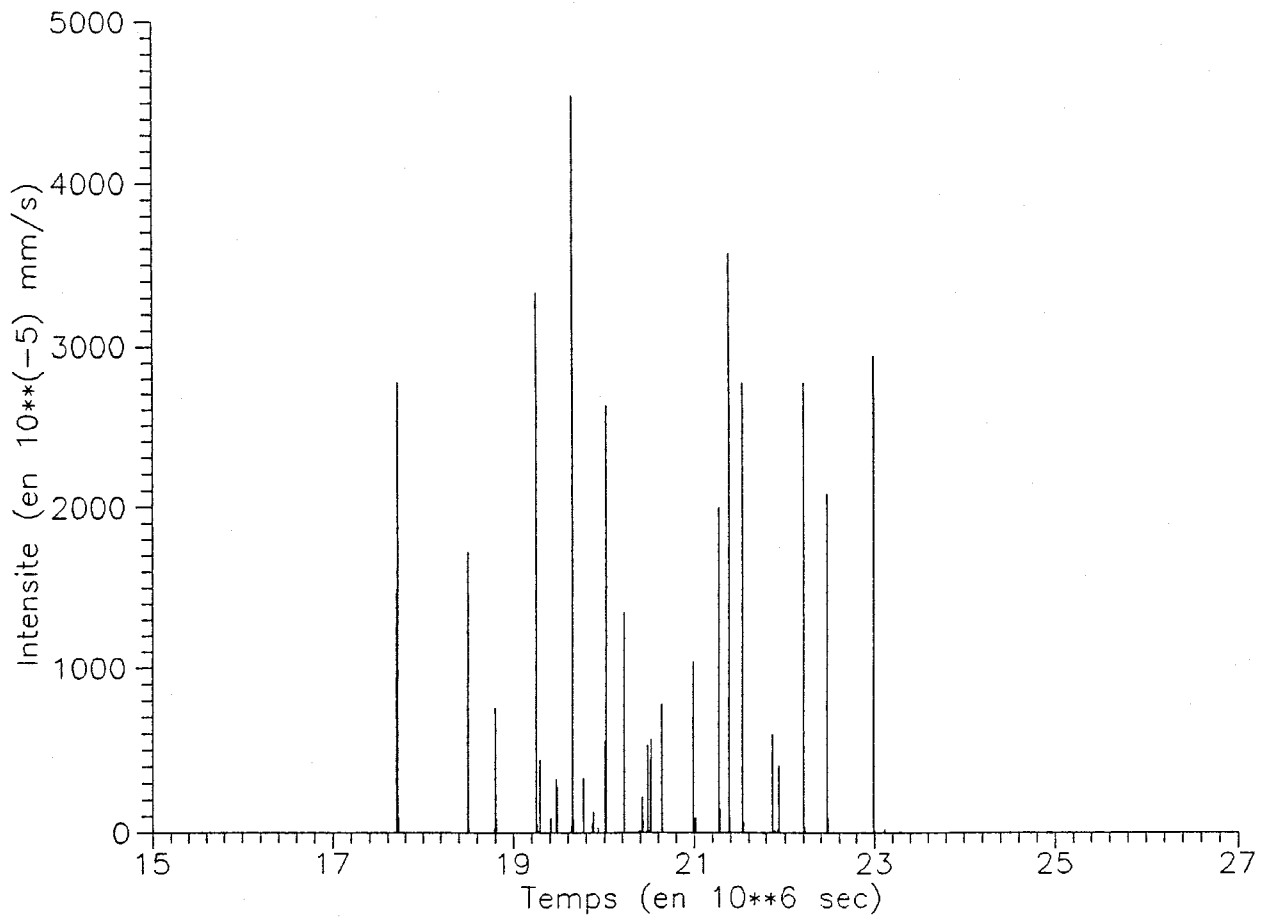
# KOURE KOBAD (hyetogramme 2)



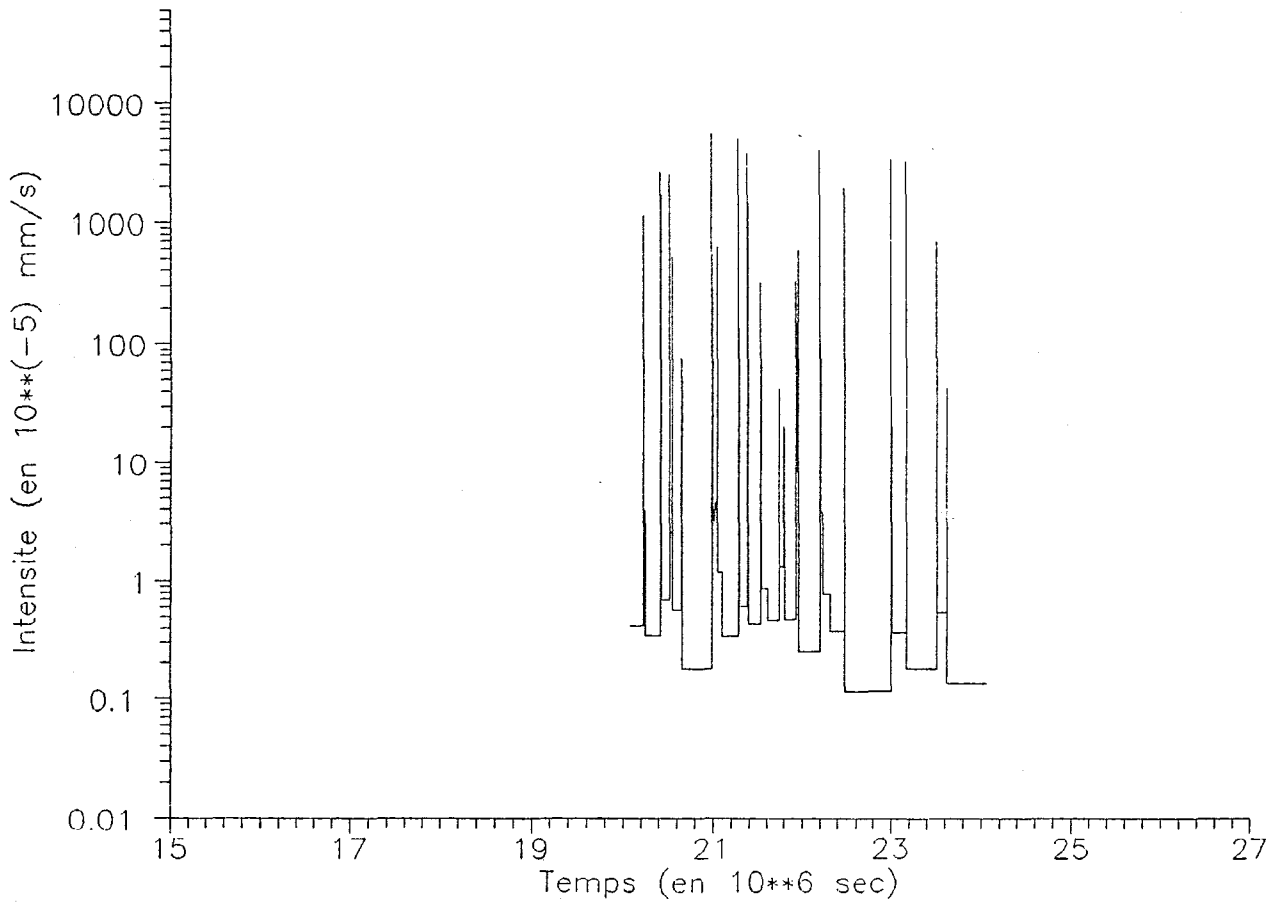
# KOÛRE KOBAD (hyetogramme lineaire)



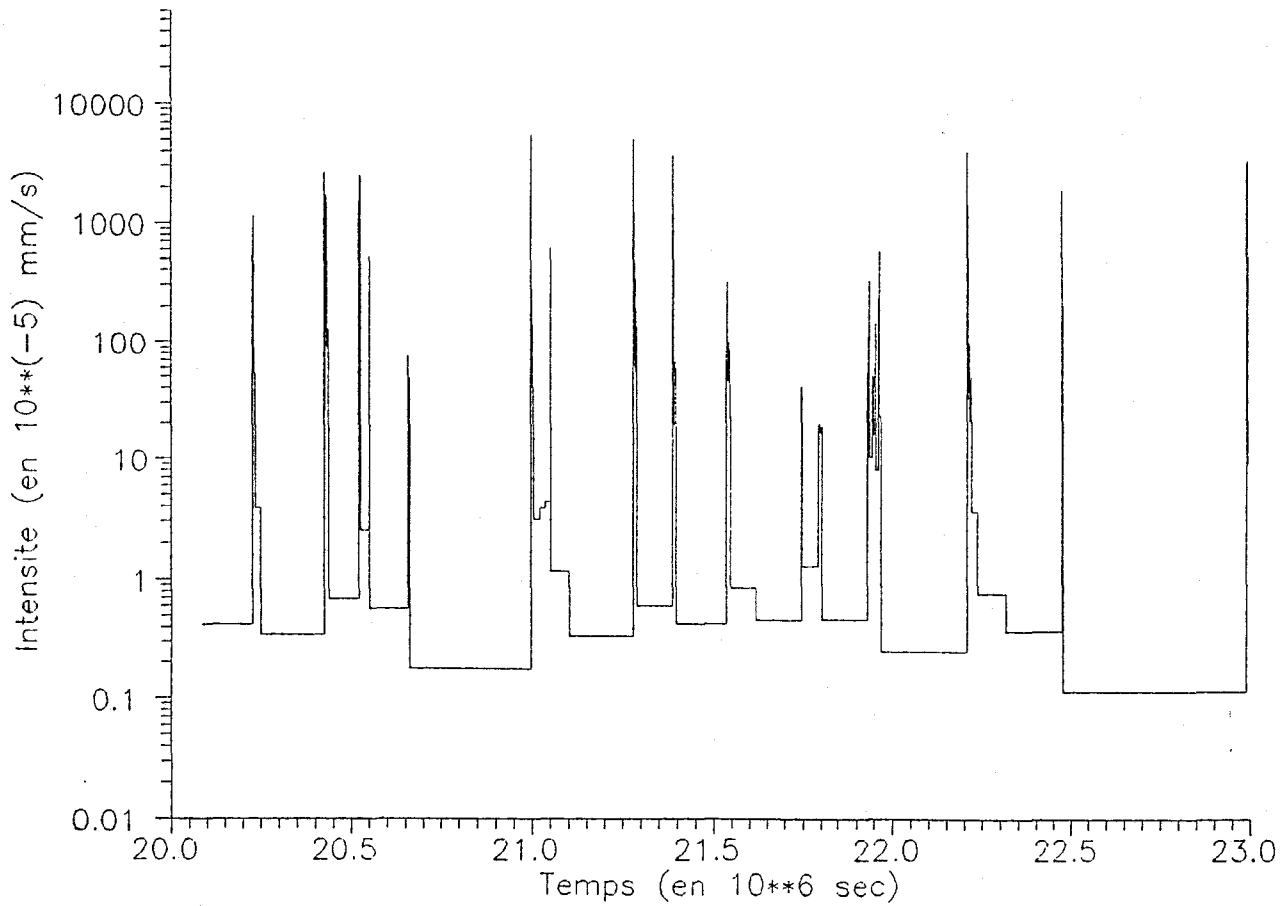
# KOÛRE KOBAD (hyetogramme lineaire)



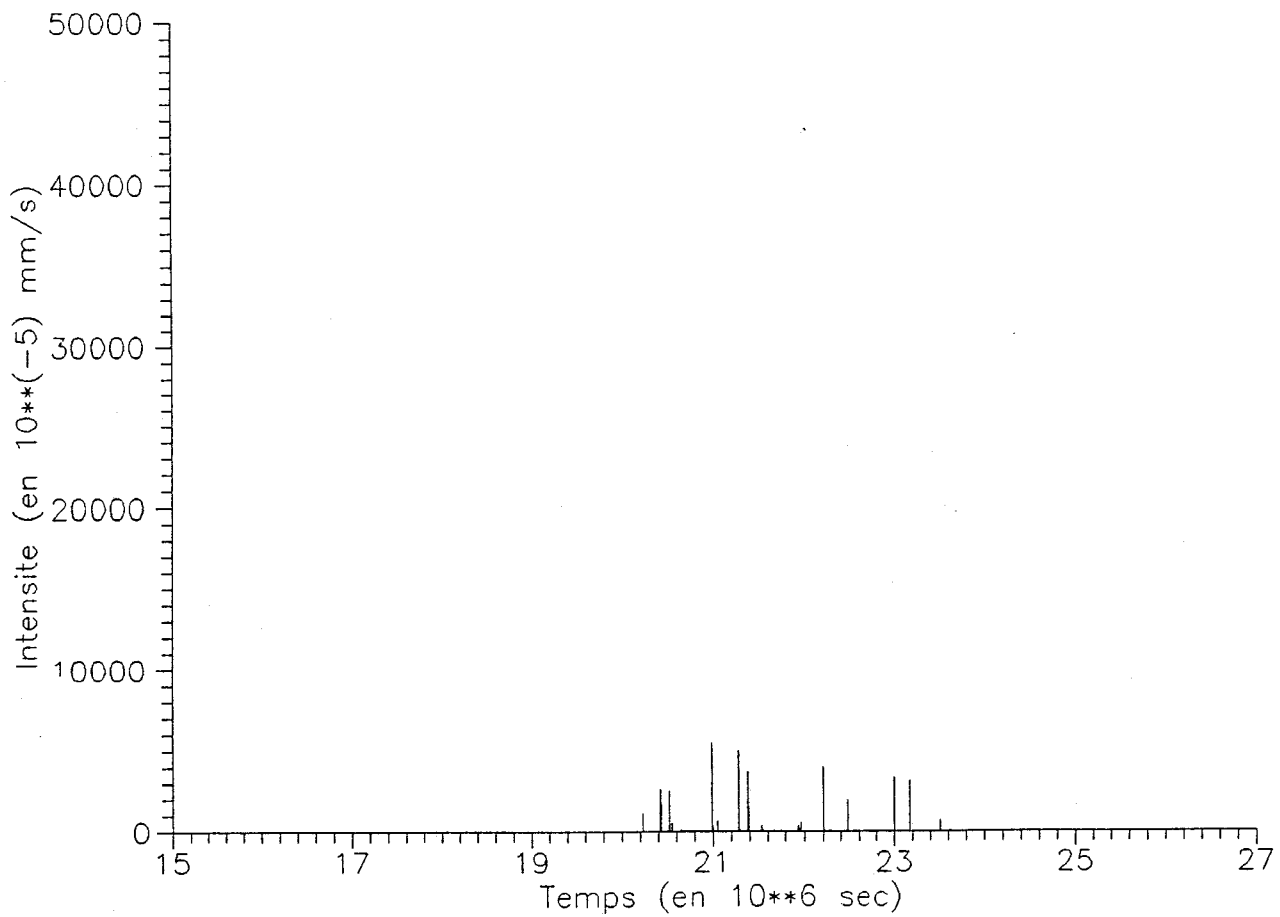
# DEBERE GATI (hyetogramme 1)



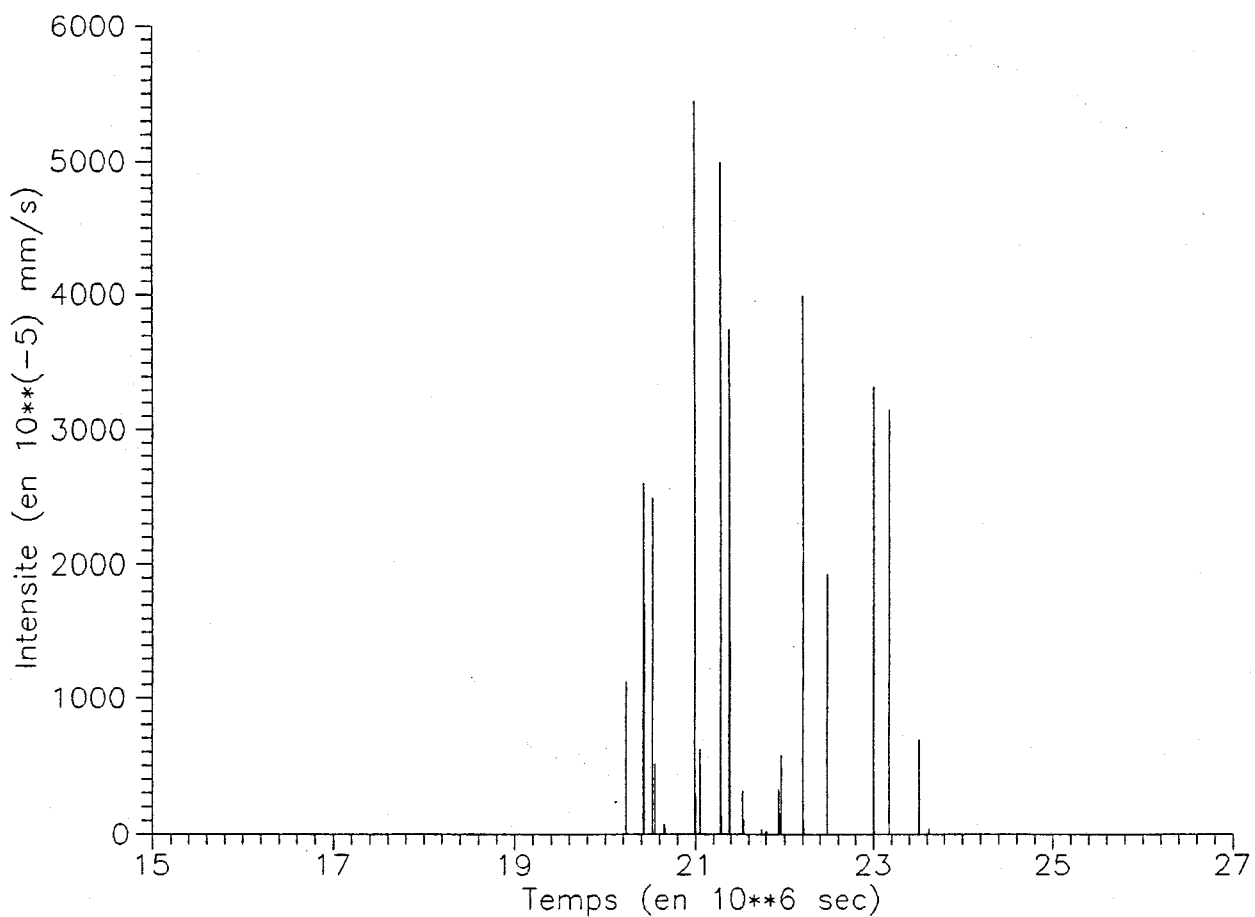
# DEBERE GATI (hyetogramme 2)



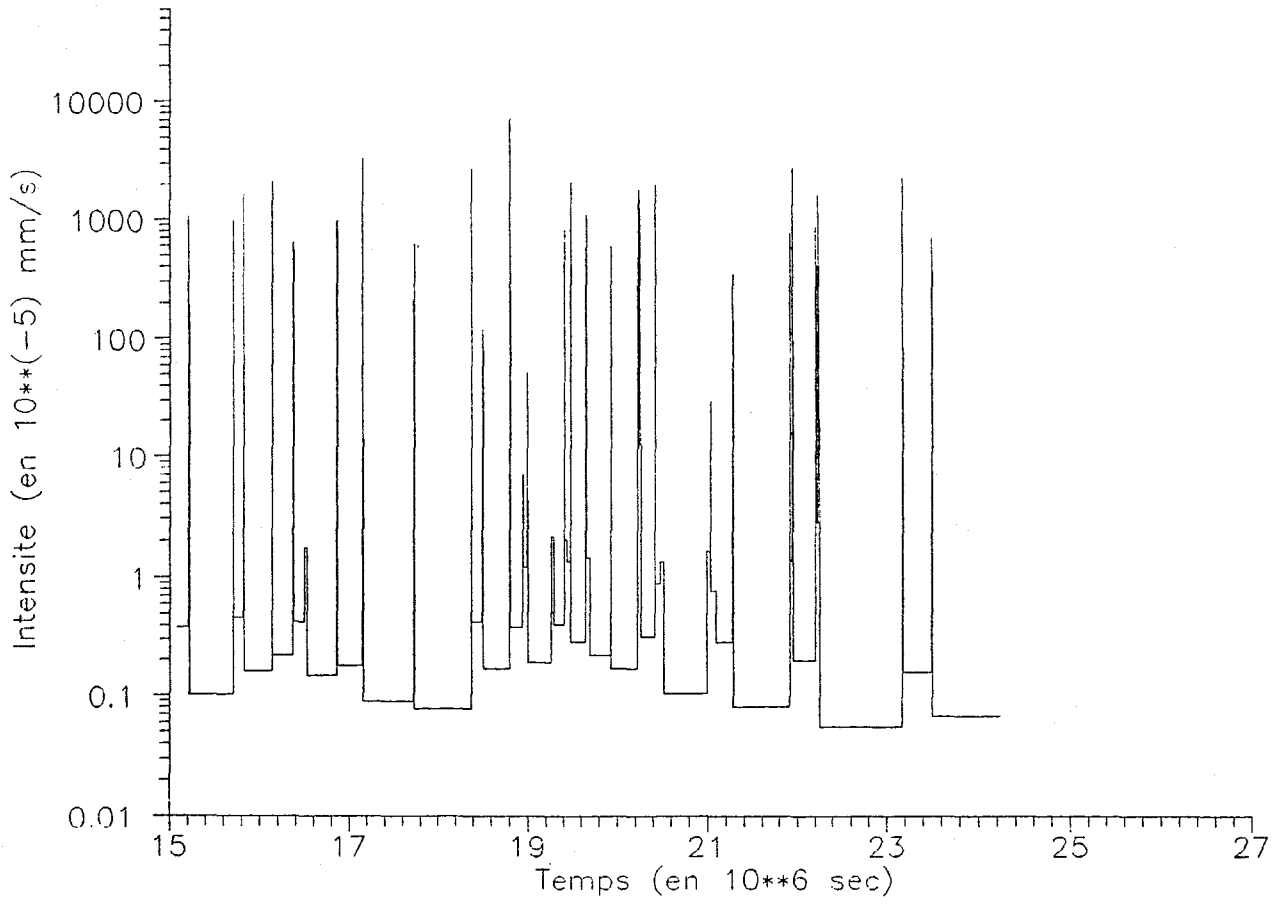
# DEBERE GATI (hyetogramme lineaire)



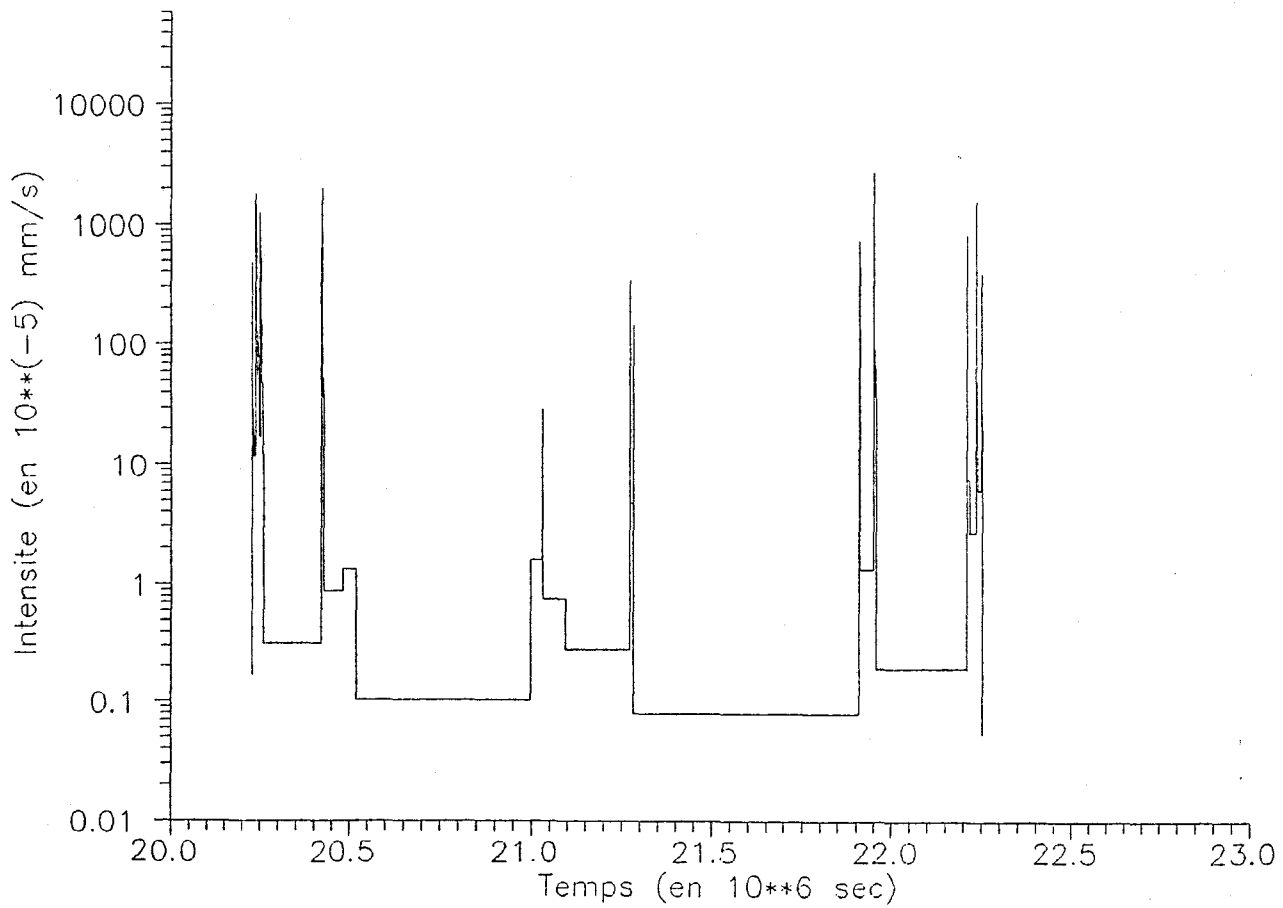
# DEBERE GATI (hyetogramme lineaire)



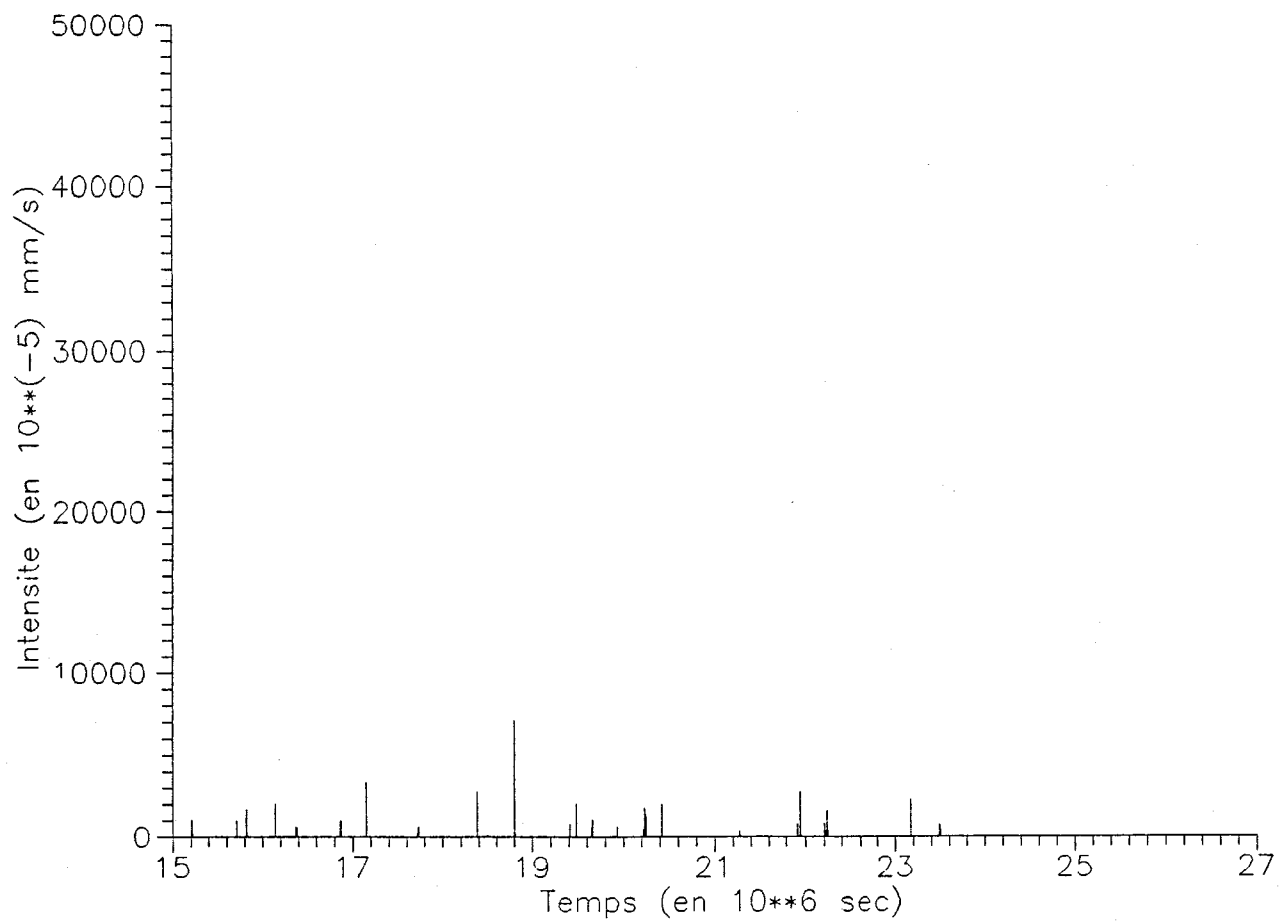
# DANGUEY GOR (hyetogramme 1)



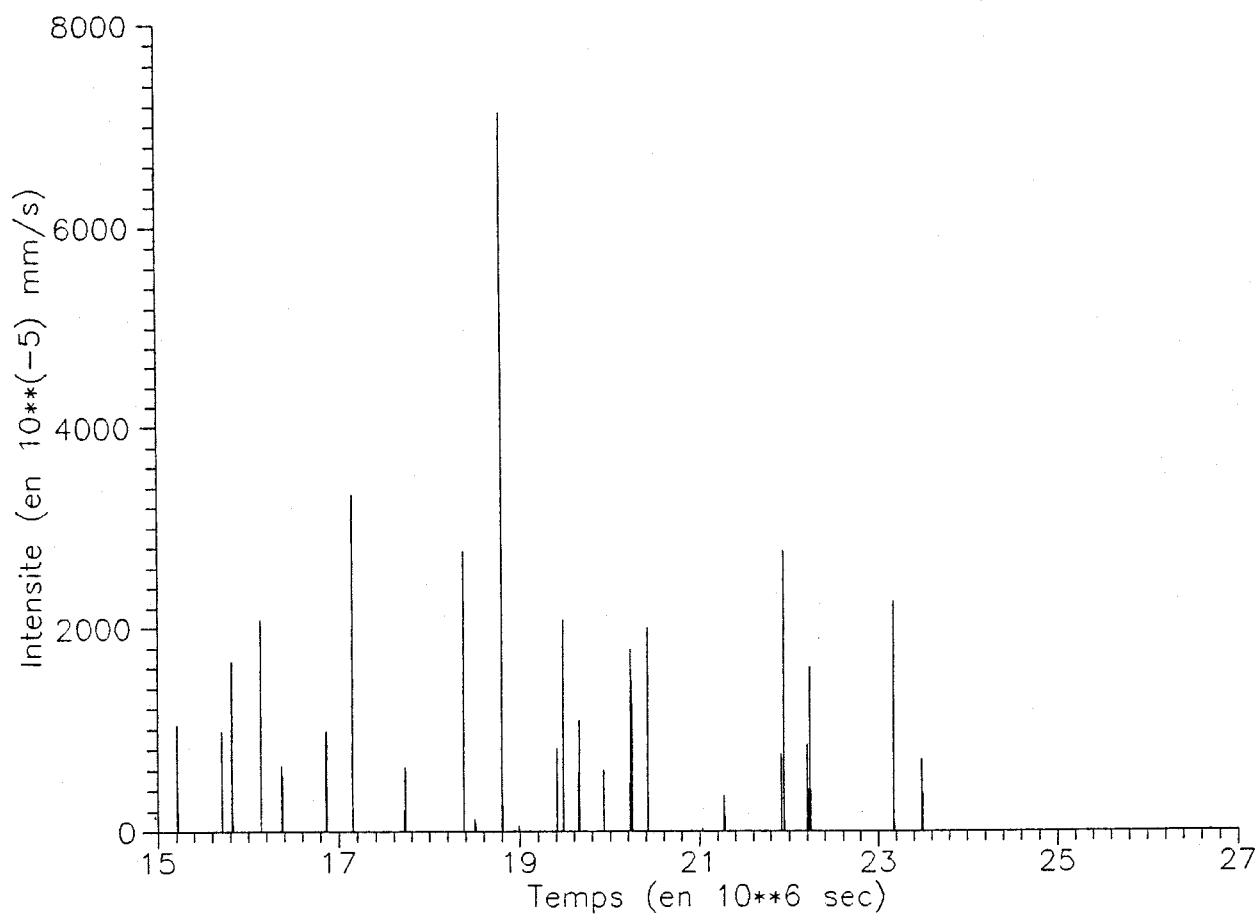
# DANGUEY GOR (hyetogramme 2)



# DANGUEY GOR (hyetogramme lineaire)

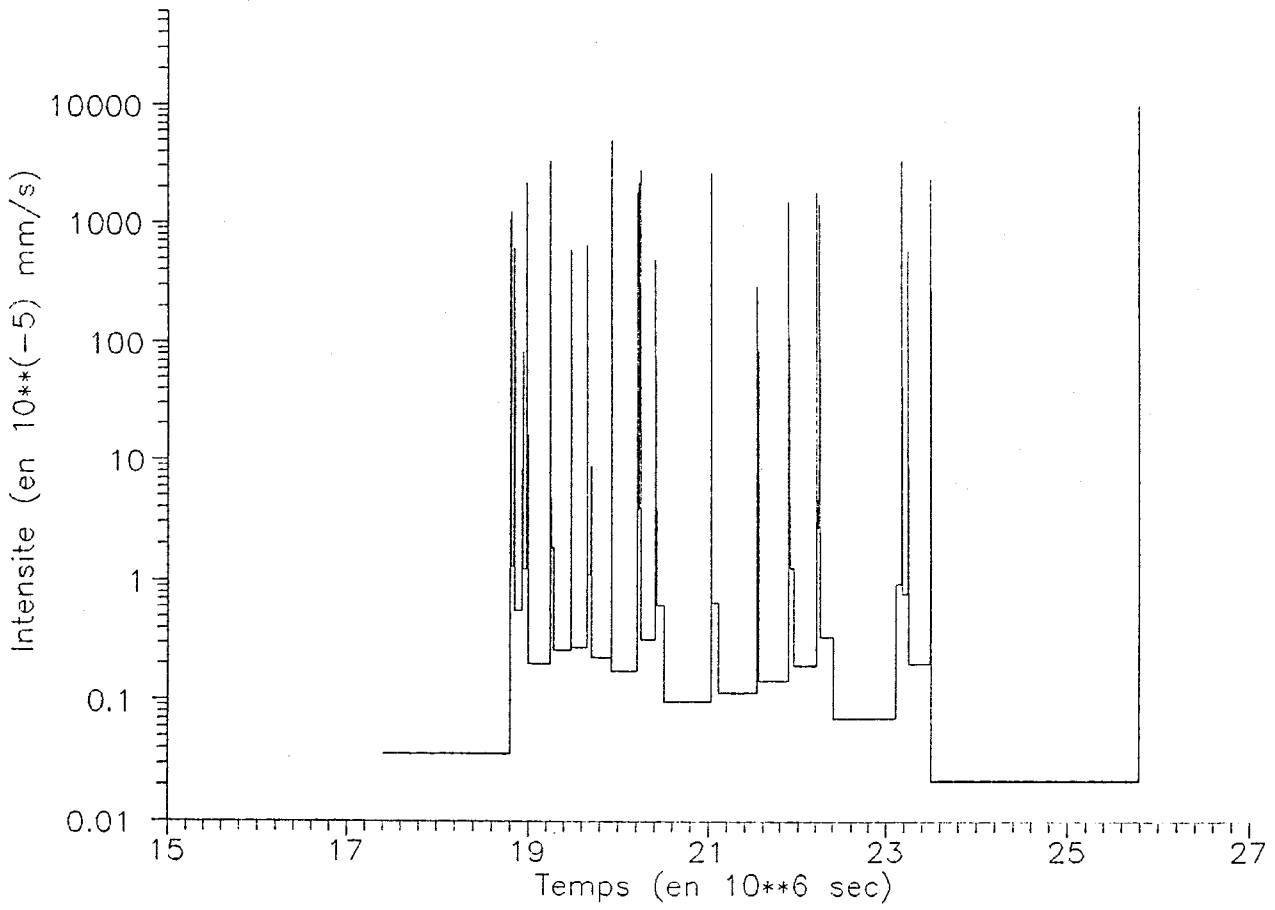


# DANGUEY GOR (hyetogramme lineaire)

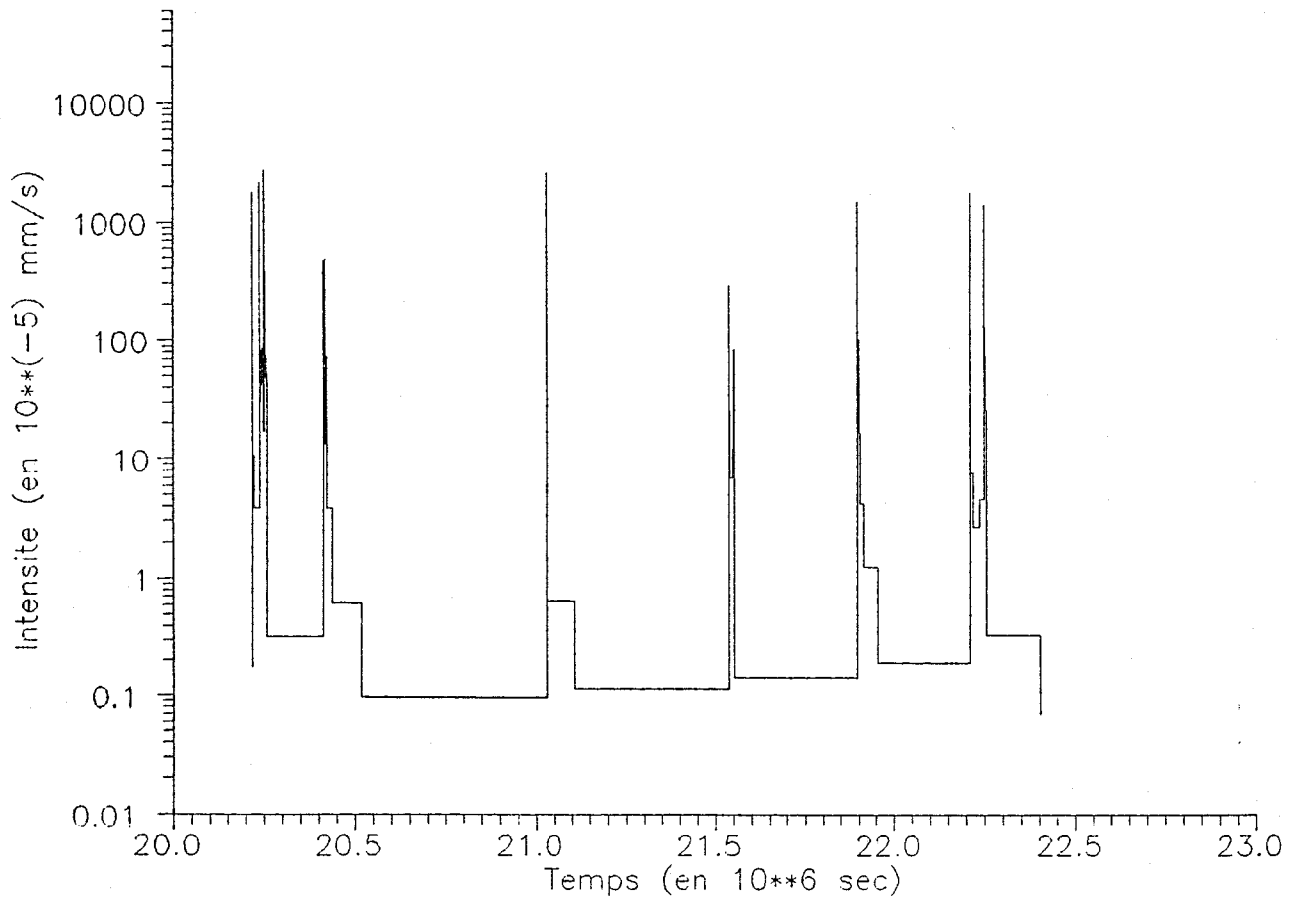




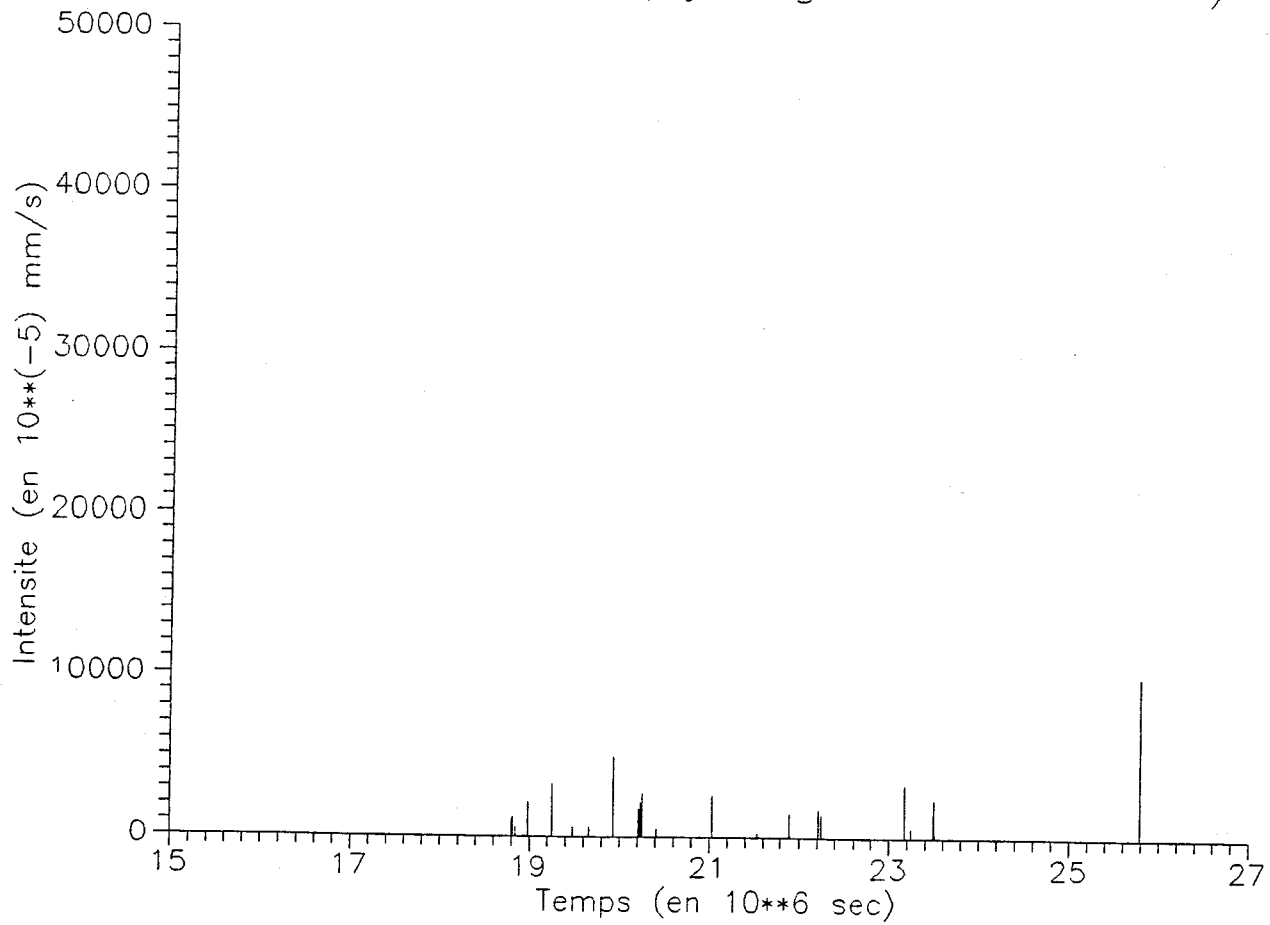
# FOY FANDOU (hyetogramme 1)



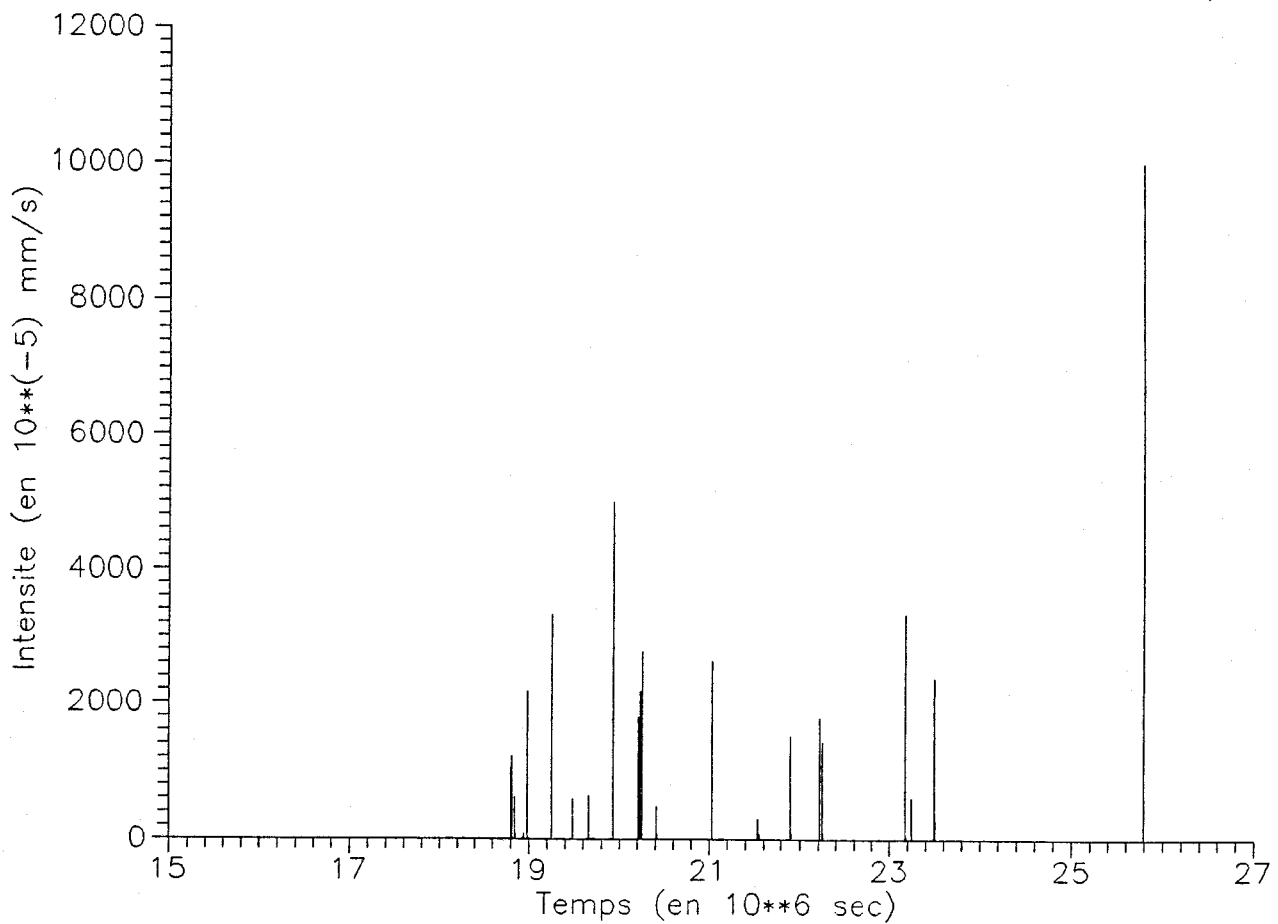
# FOY FANDOU (hyetogramme 2)



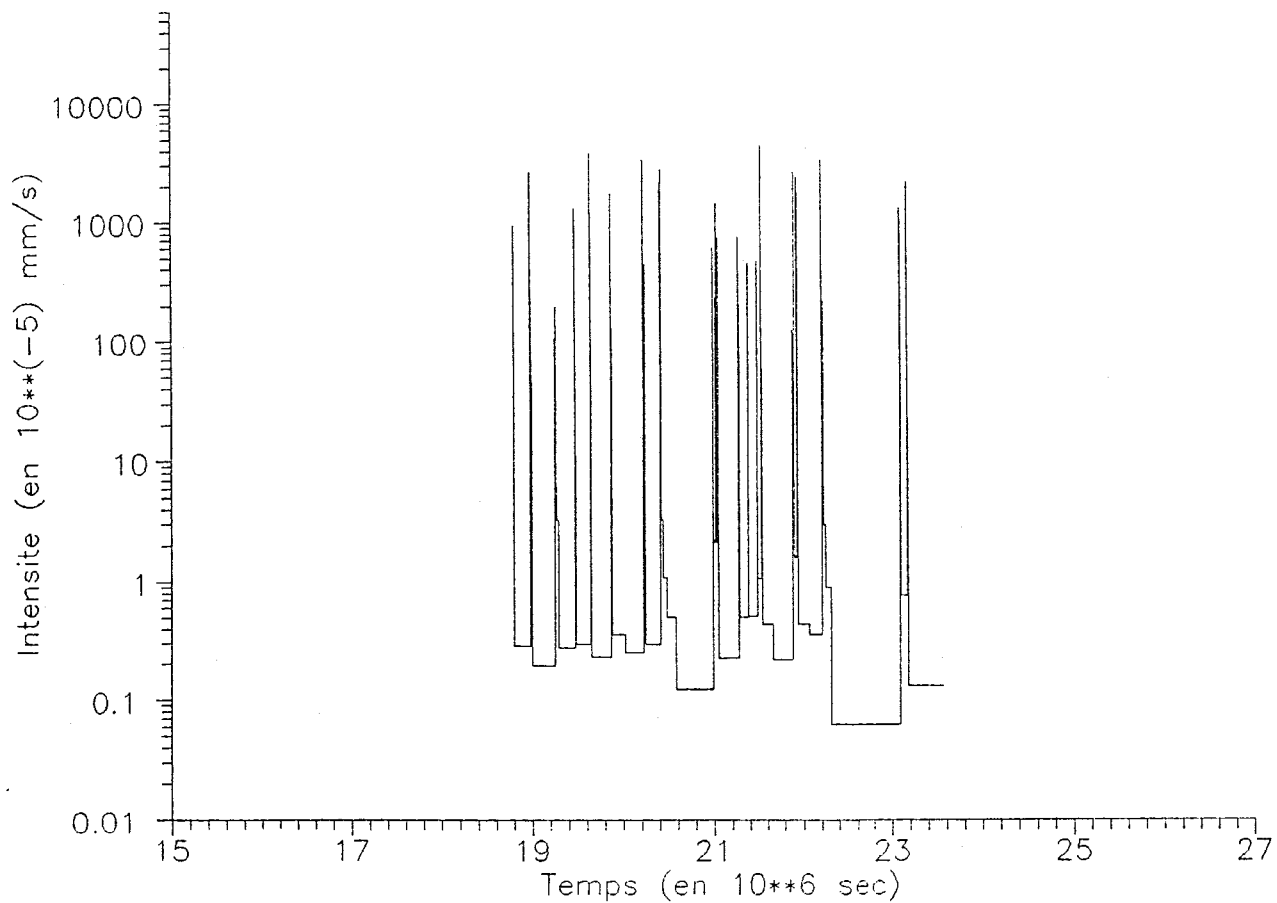
# FOY FANDOU (hyetogramme lineaire)



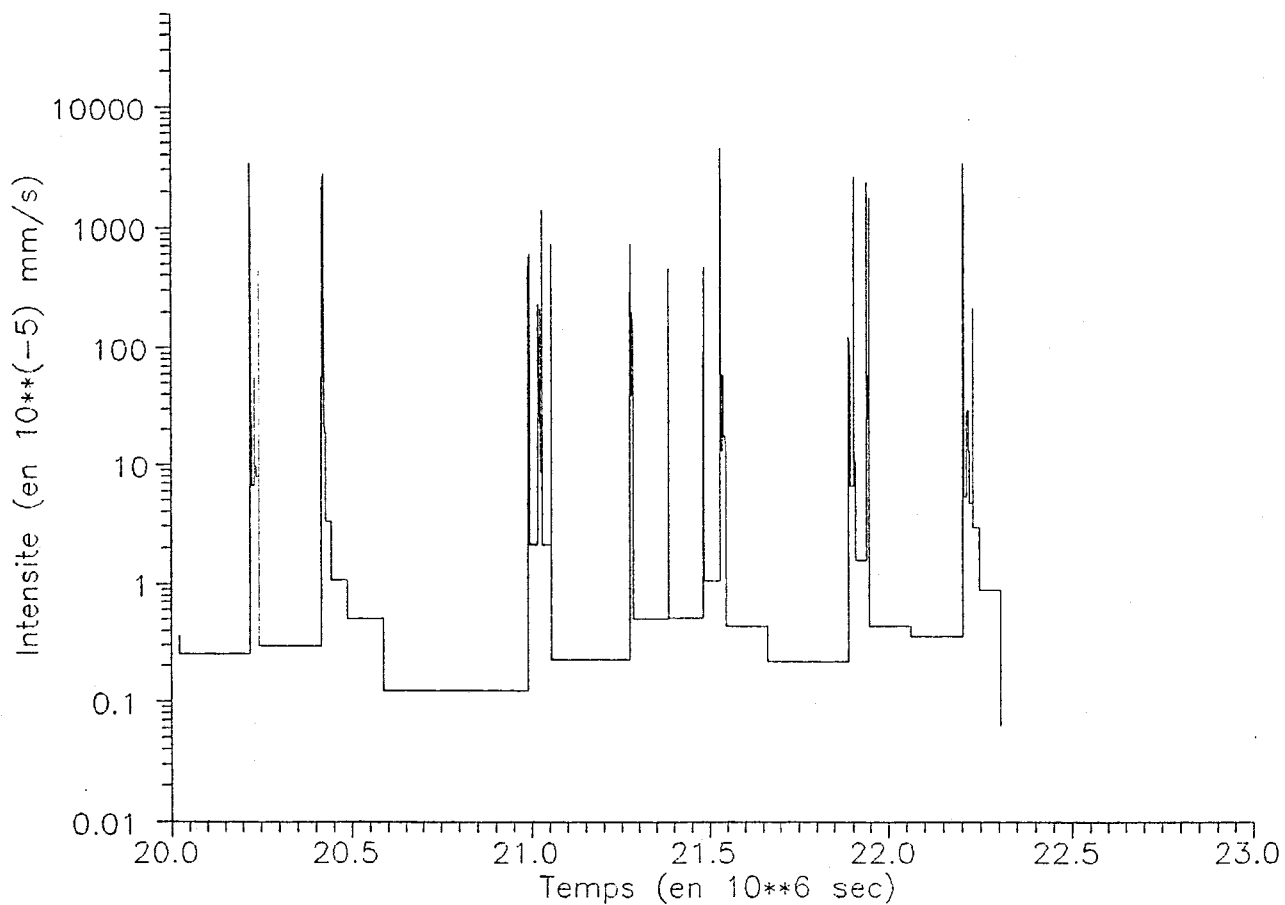
# FOY FANDOU (hyetogramme lineaire)



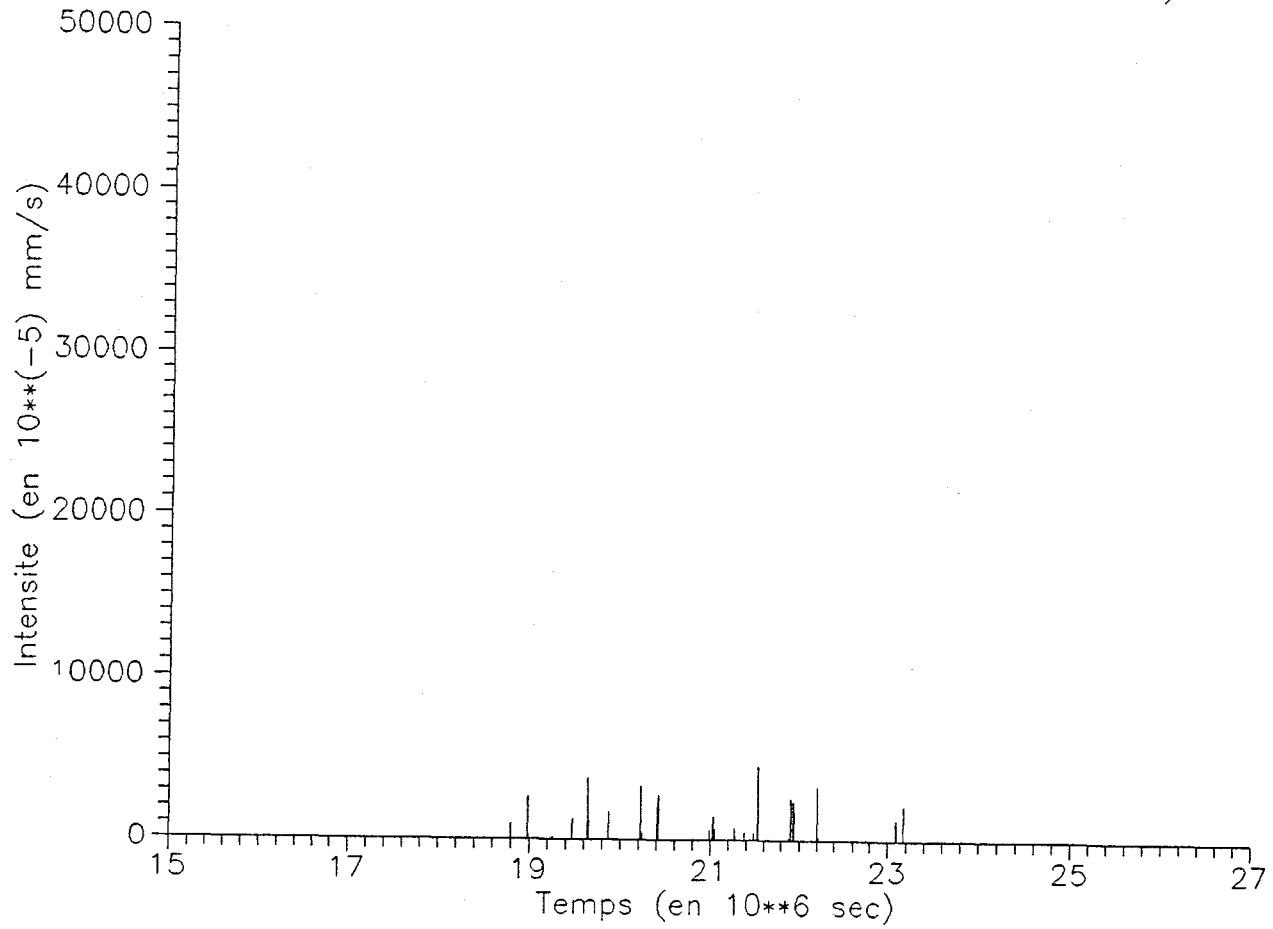
# GAMONZON (hyetogramme 1)



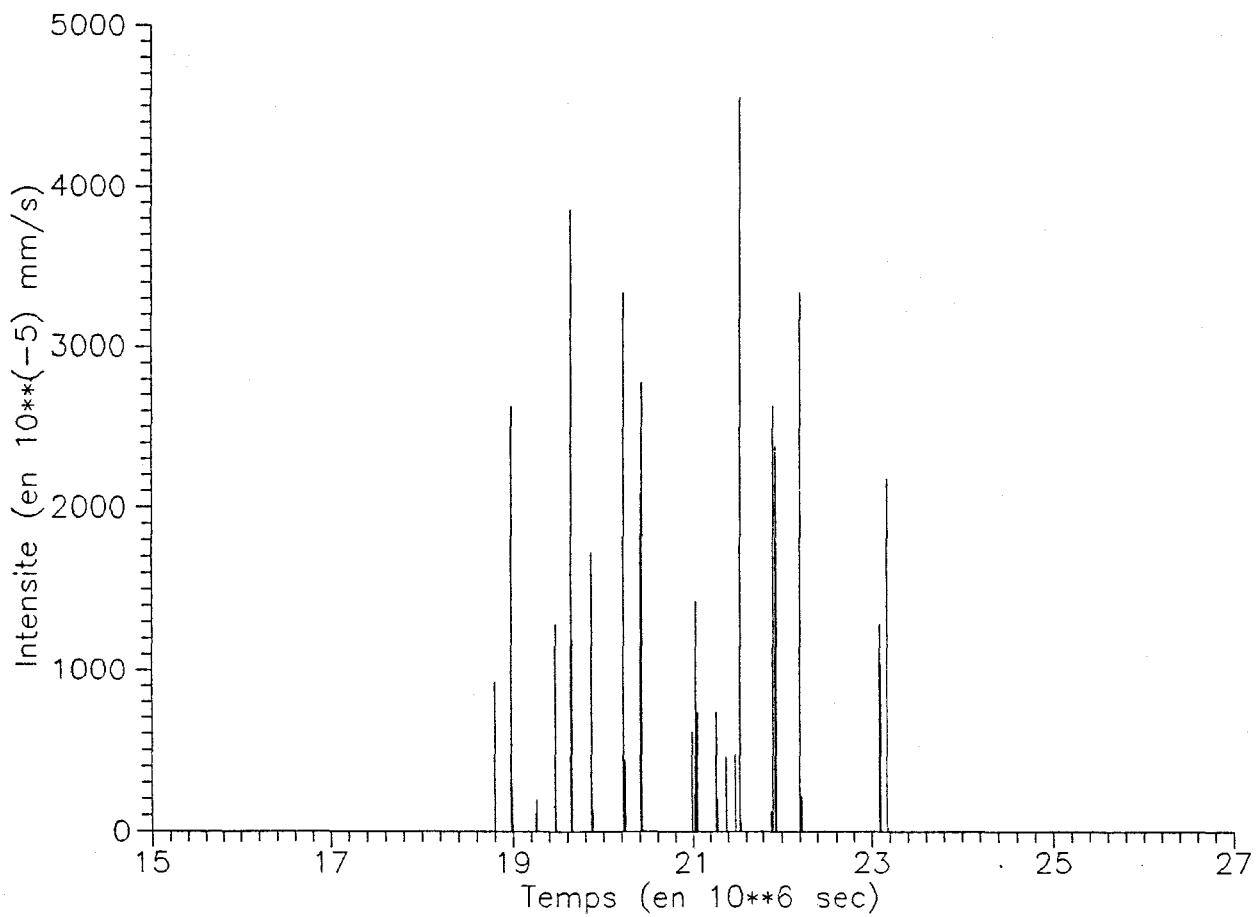
# GAMONZON (hyetogramme 2)



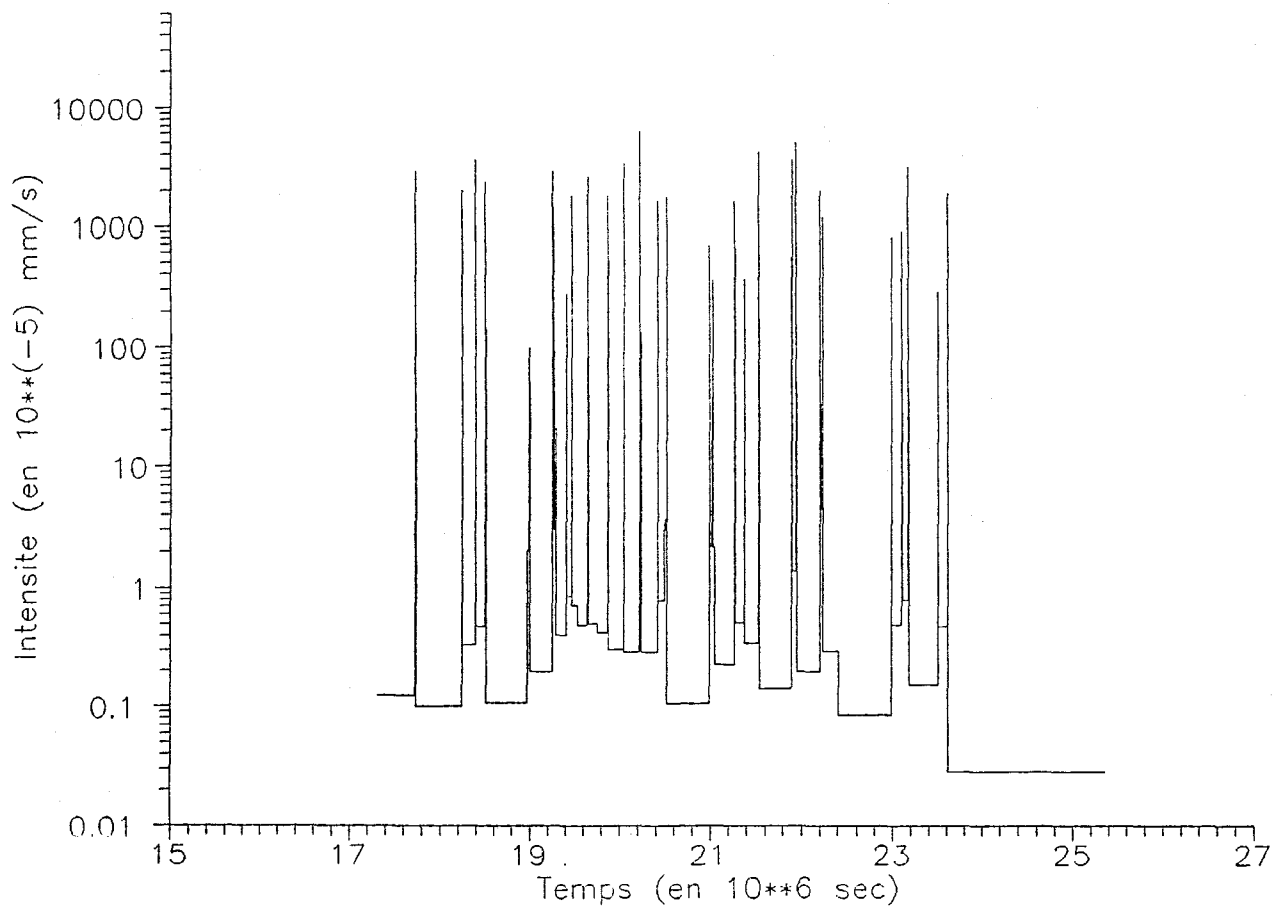
# GAMONZON (hyetogramme lineaire)



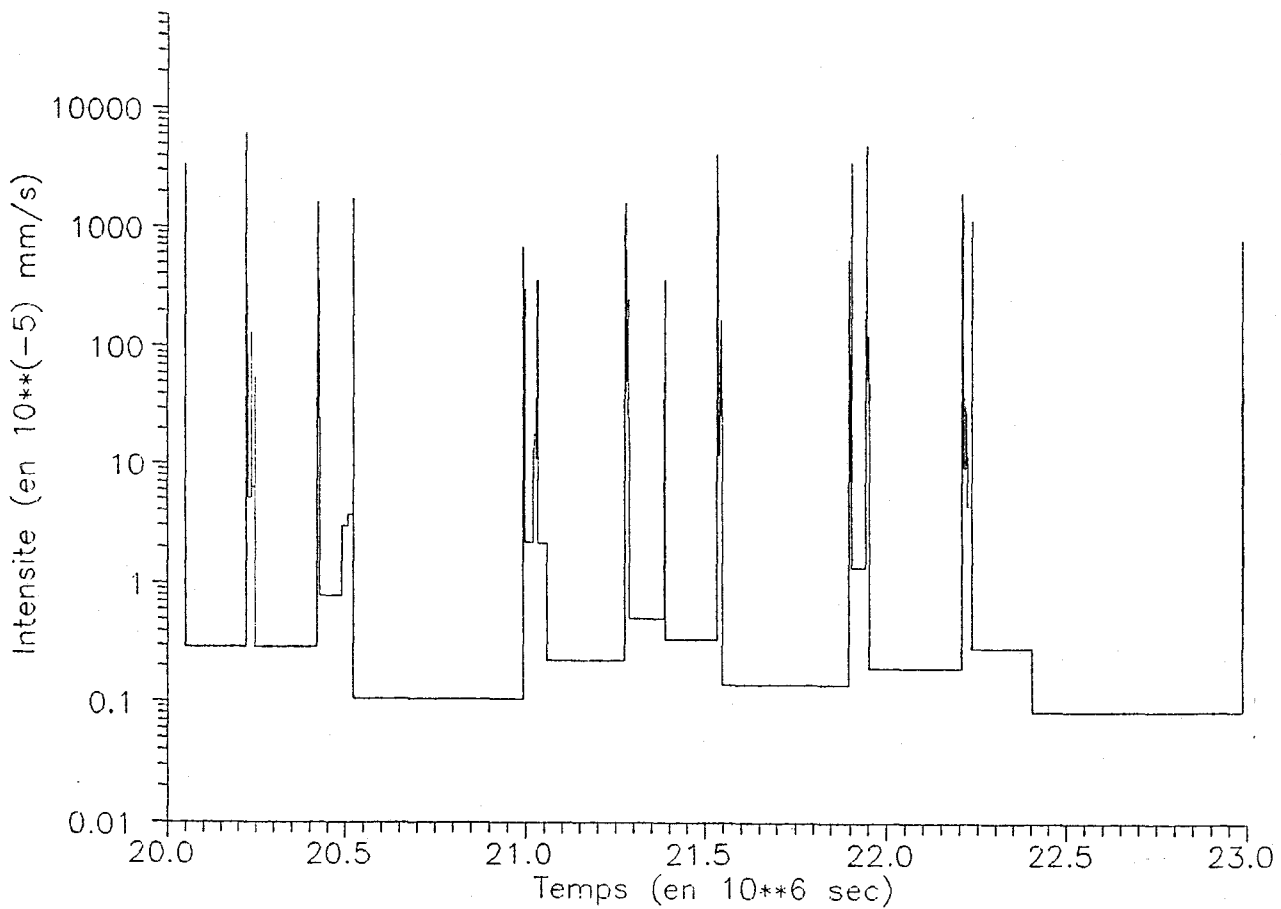
# GAMONZON (hyetogramme lineaire)



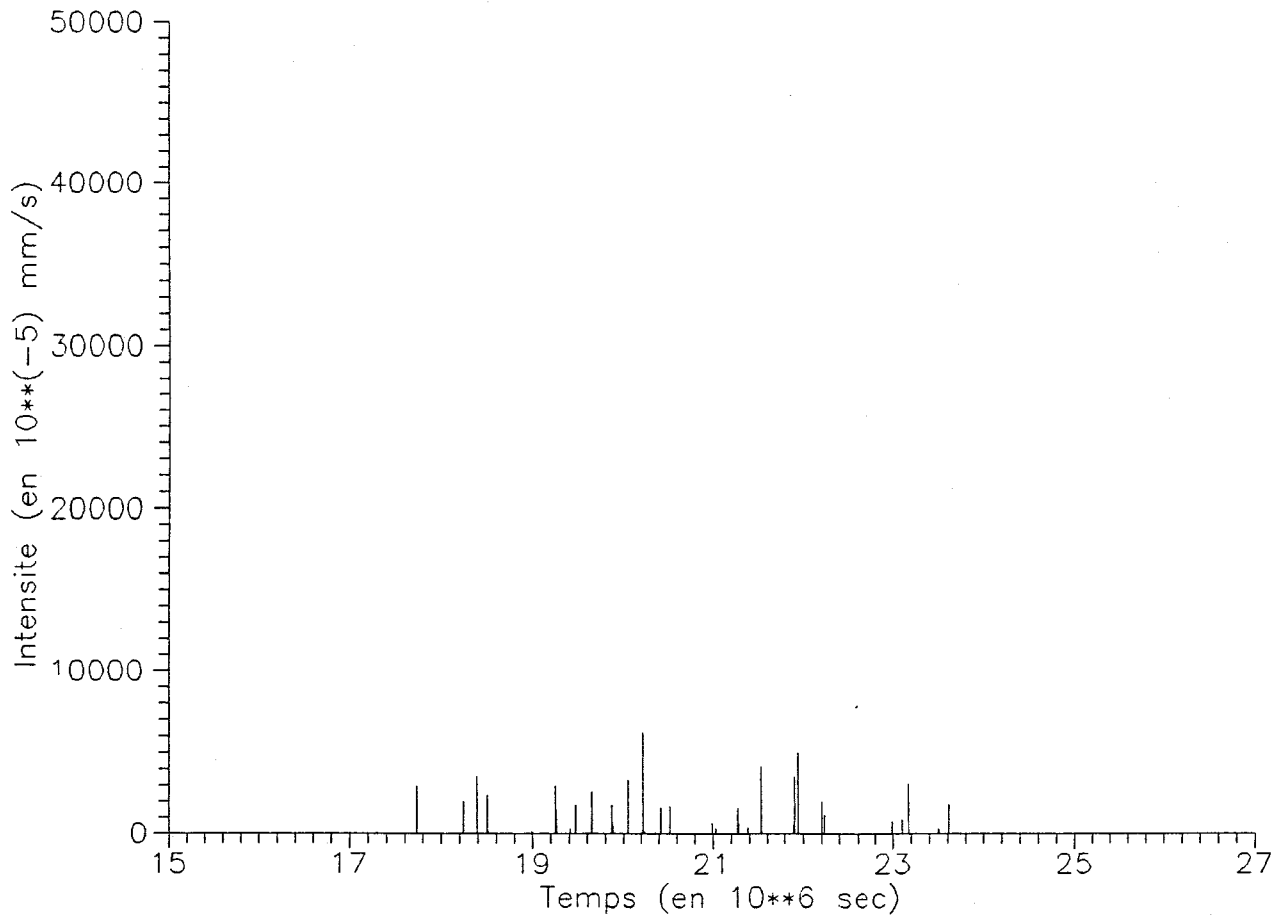
# TIGO ZENO (hyetogramme 1)



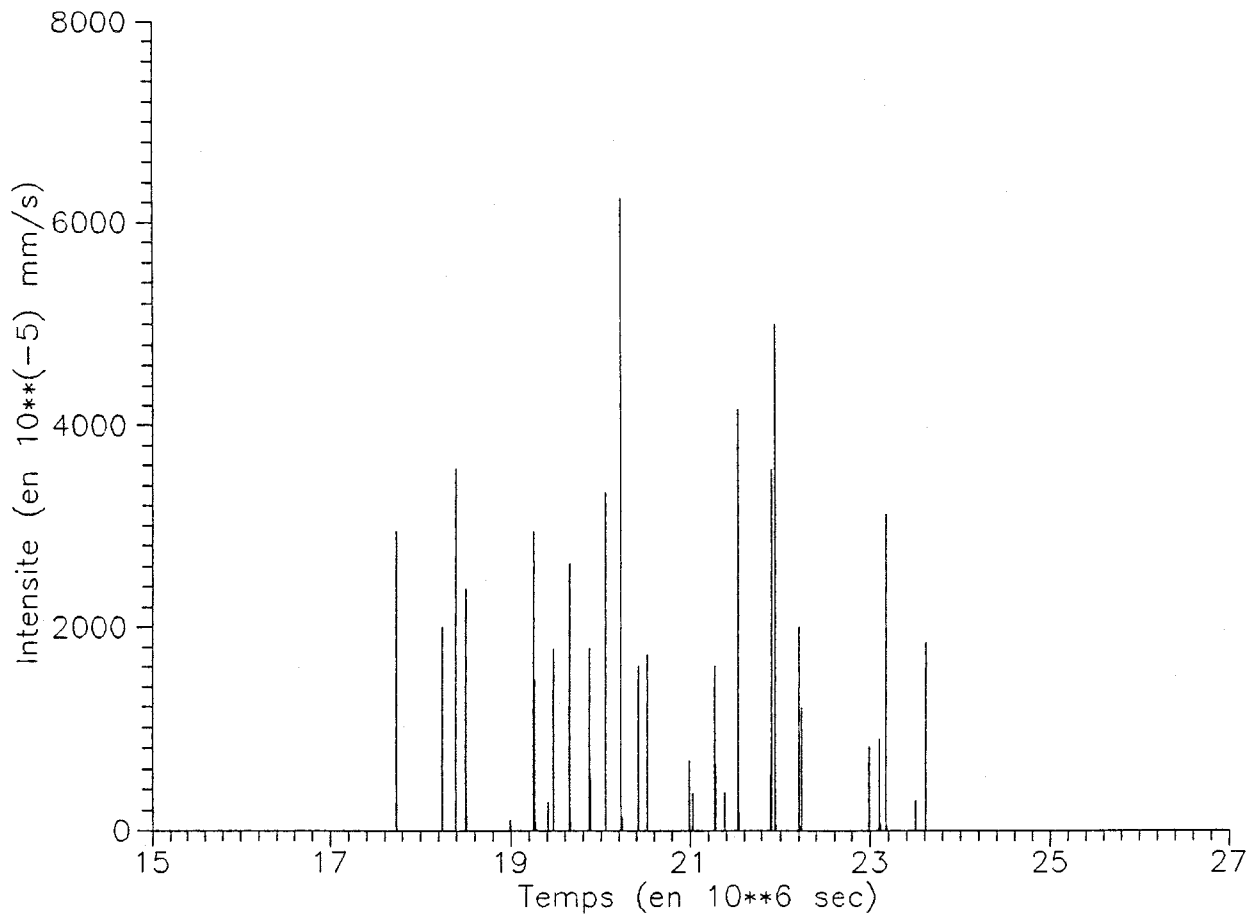
# TIGO ZENO (hyetogramme 2)



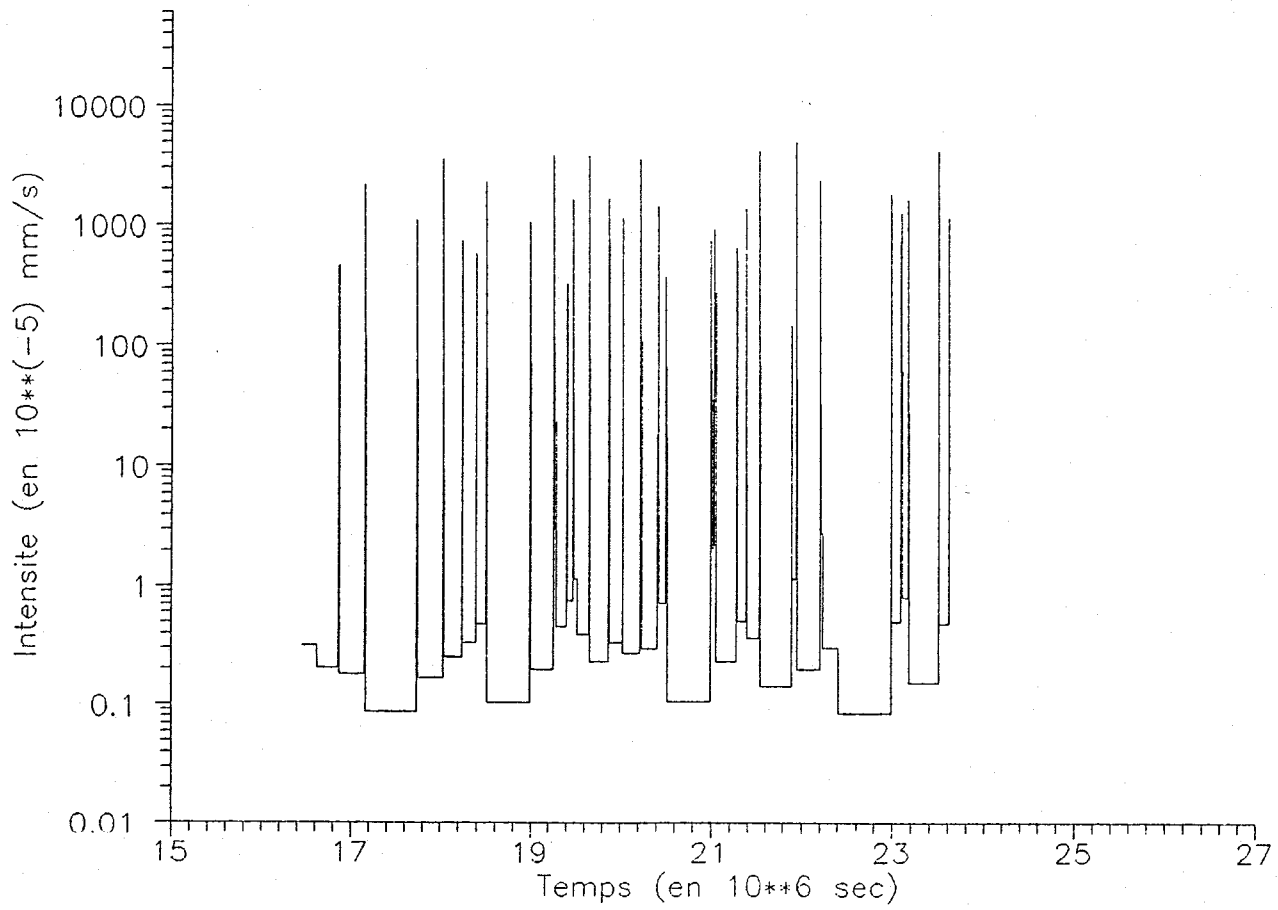
# TIGO ZENO (hyetogramme lineaire)



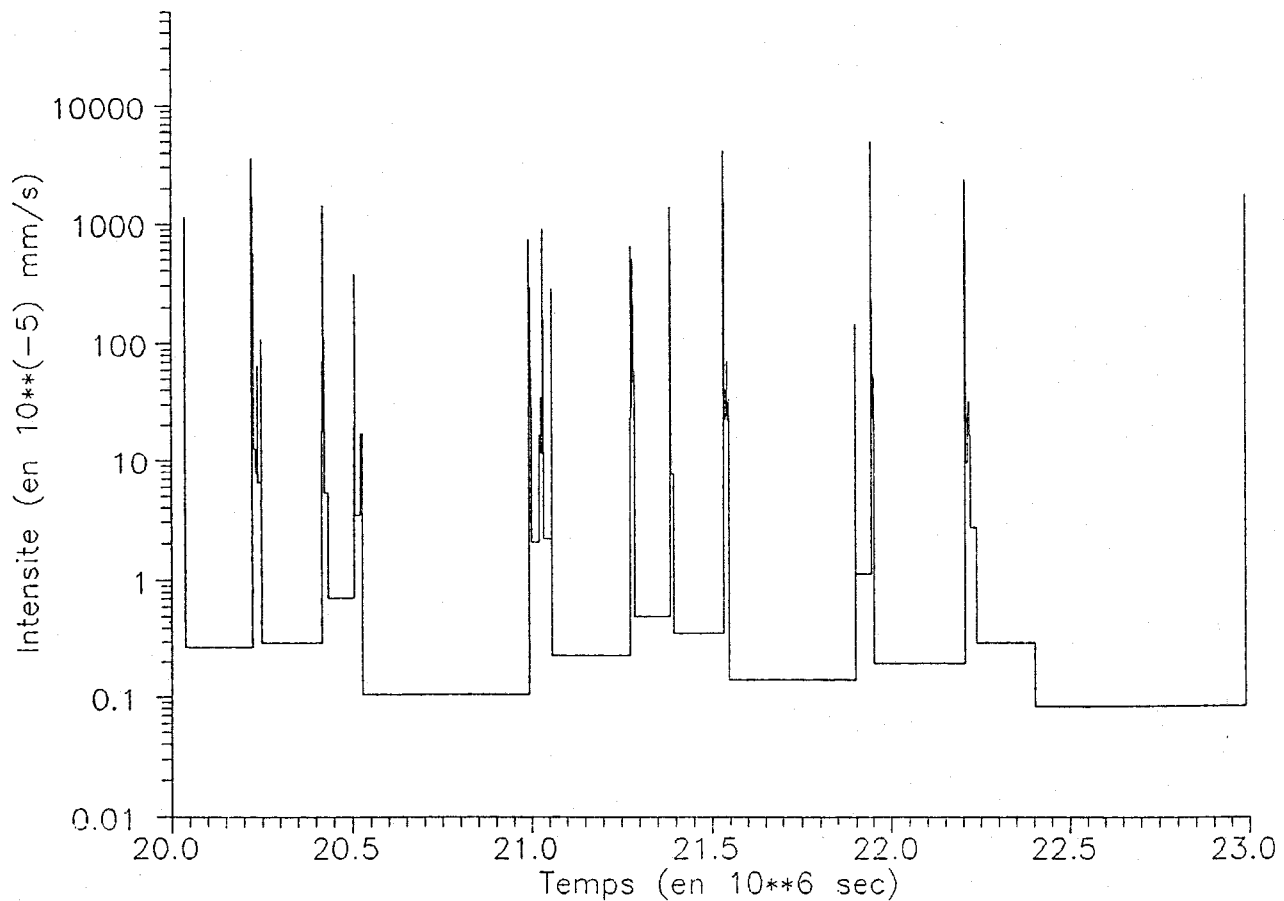
# TIGO ZENO (hyetogramme lineaire)



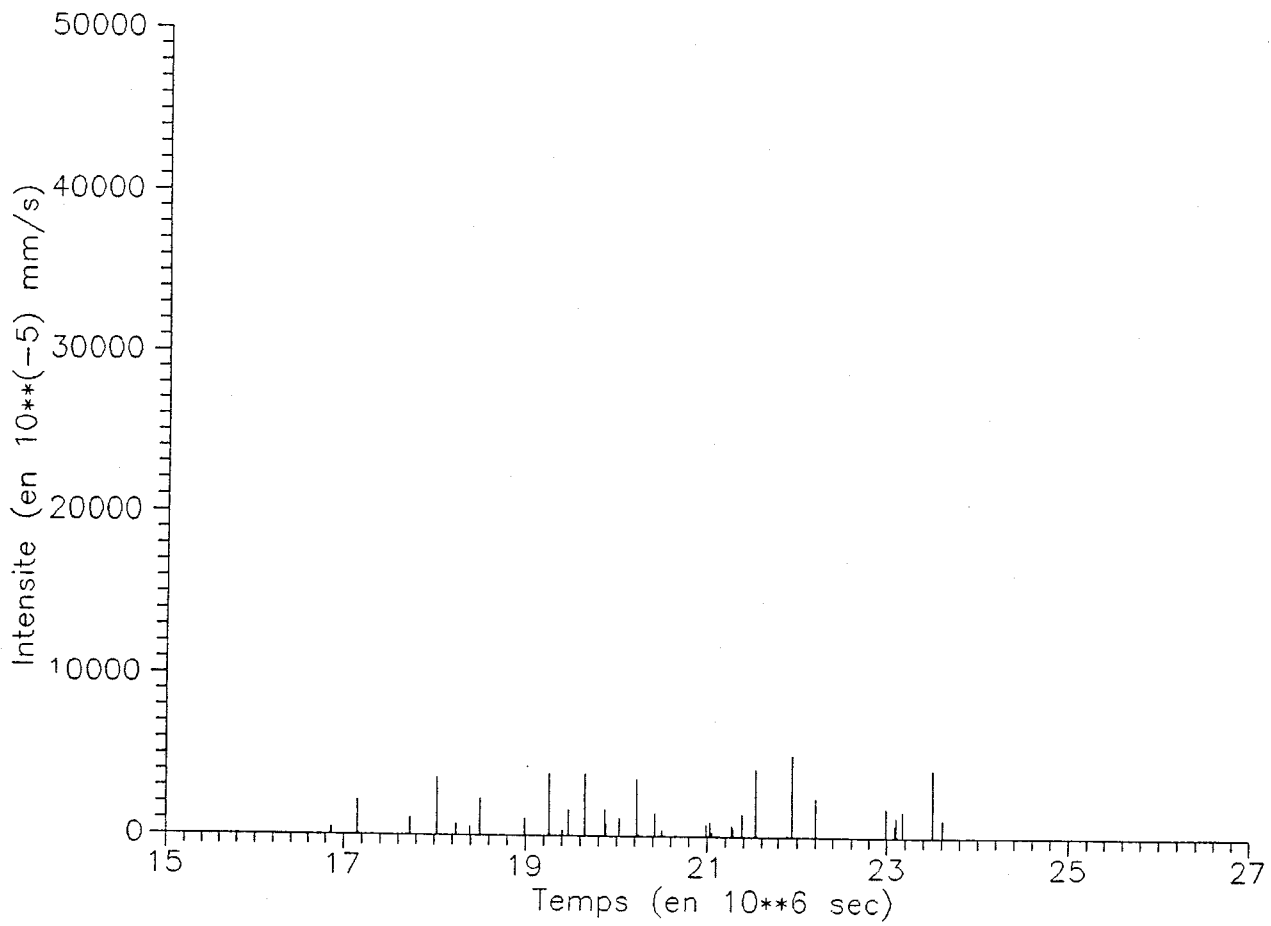
# KAMPA ZARMA (hyetogramme 1)



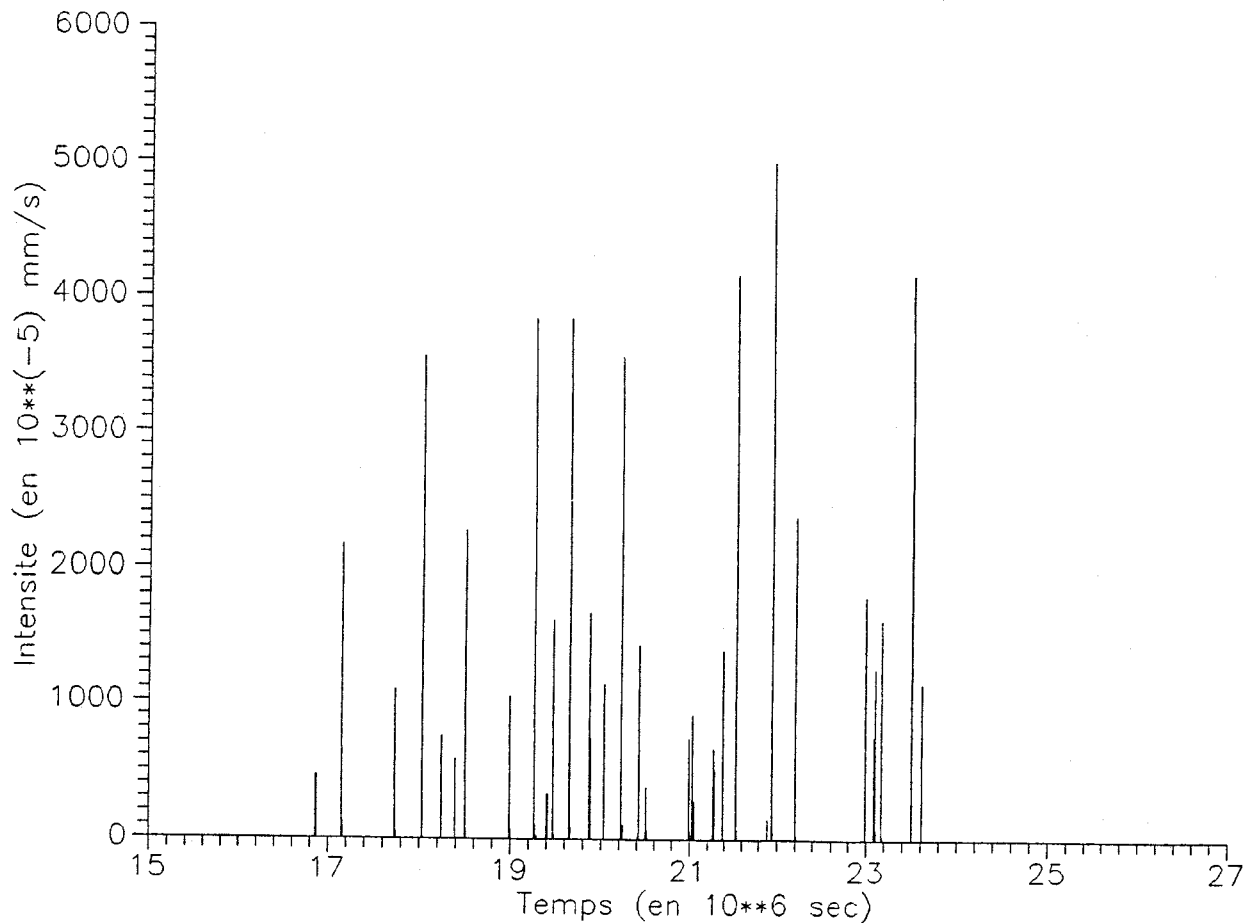
# KAMPA ZARMA (hyetogramme 2)



# KAMPA ZARMA (hyetogramme lineaire)

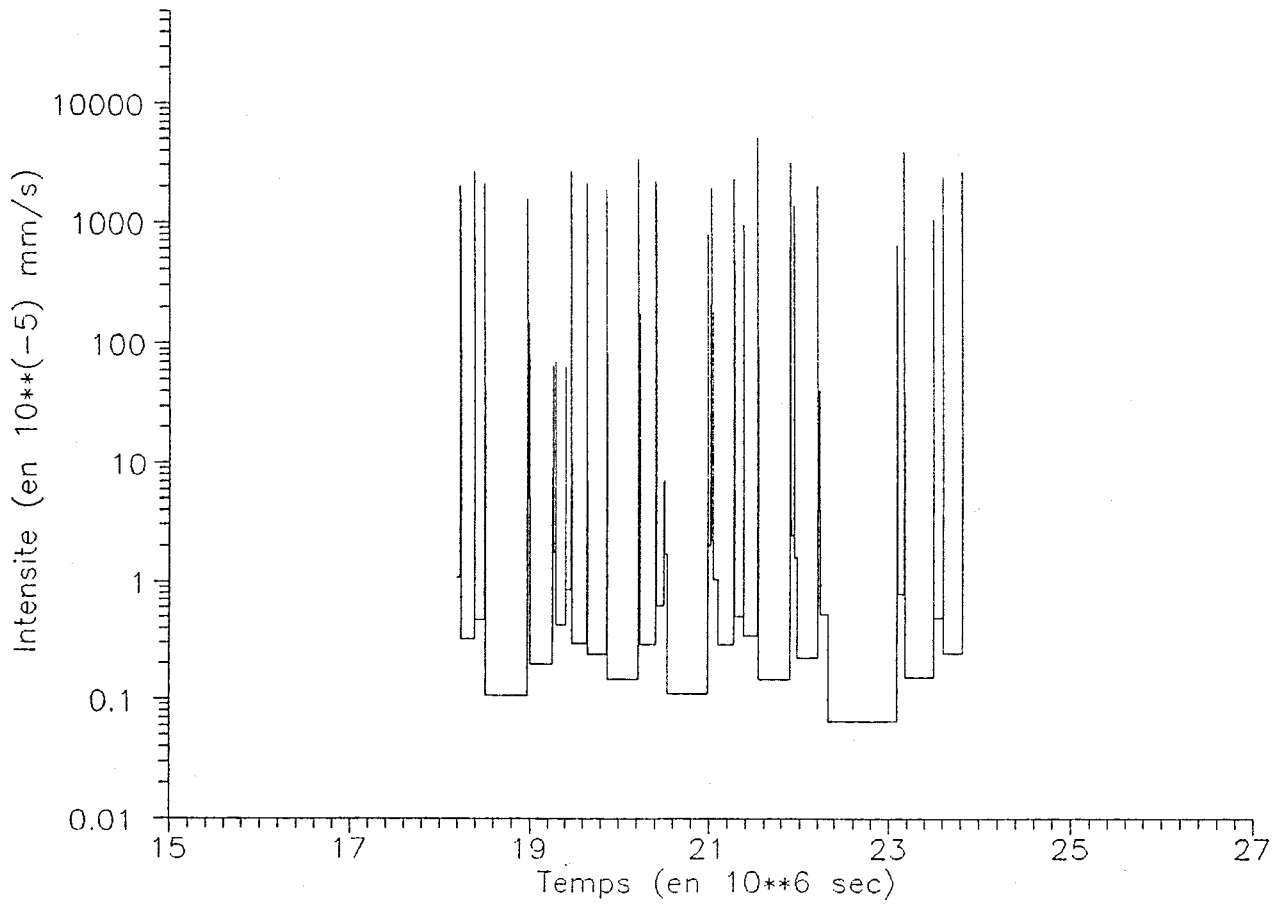


# KAMPA ZARMA (hyetogramme lineaire)

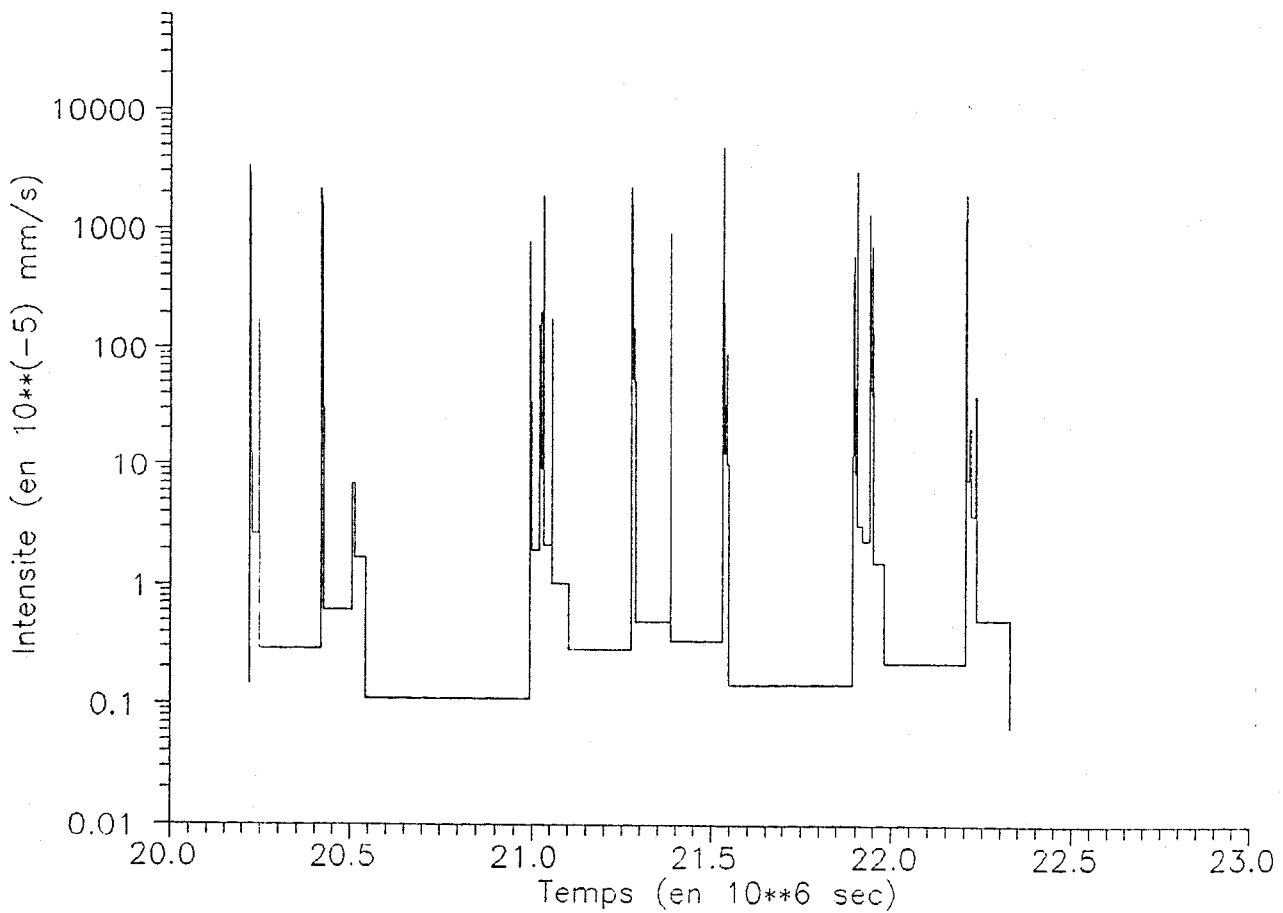




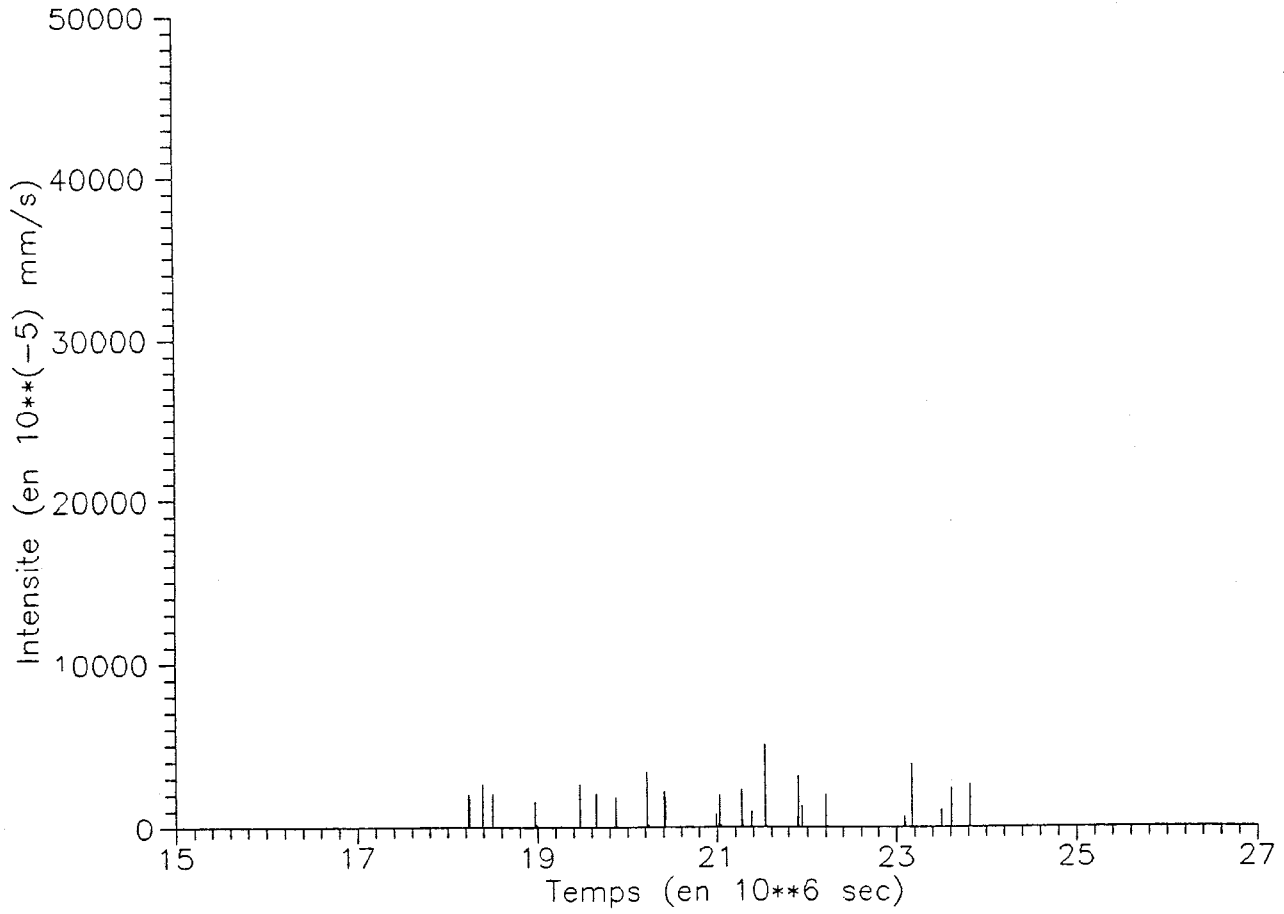
# ZOUZOU BERI (hyetogramme 1)



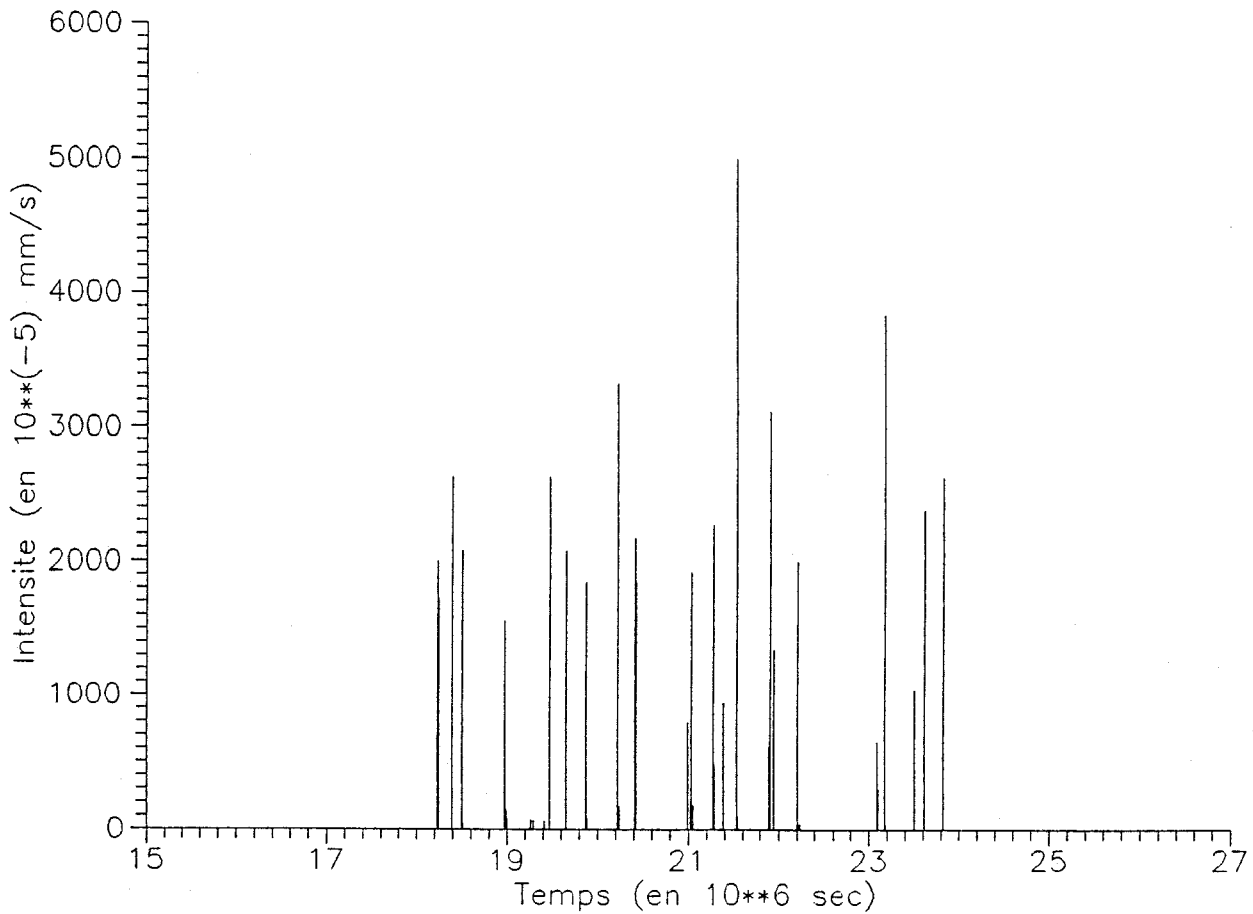
# ZOUZOU BERI (hyetogramme 2)



# ZOUZOU BERI (hyetogramme lineaire)

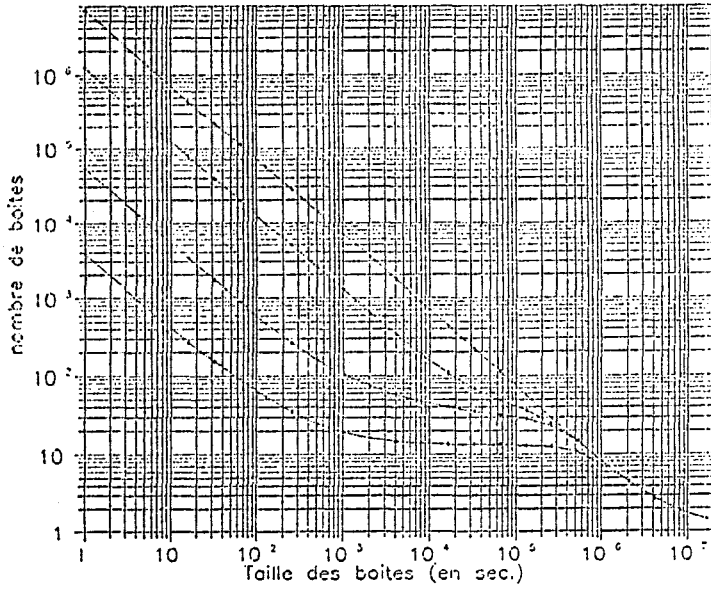


# ZOUZOU BERI (hyetogramme lineaire)



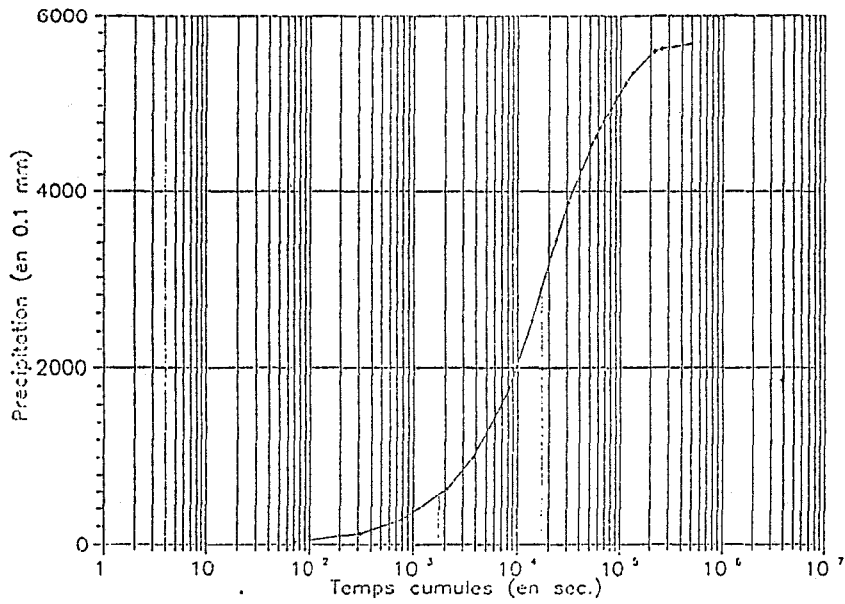
ANNEXE 3

FETOKADIE



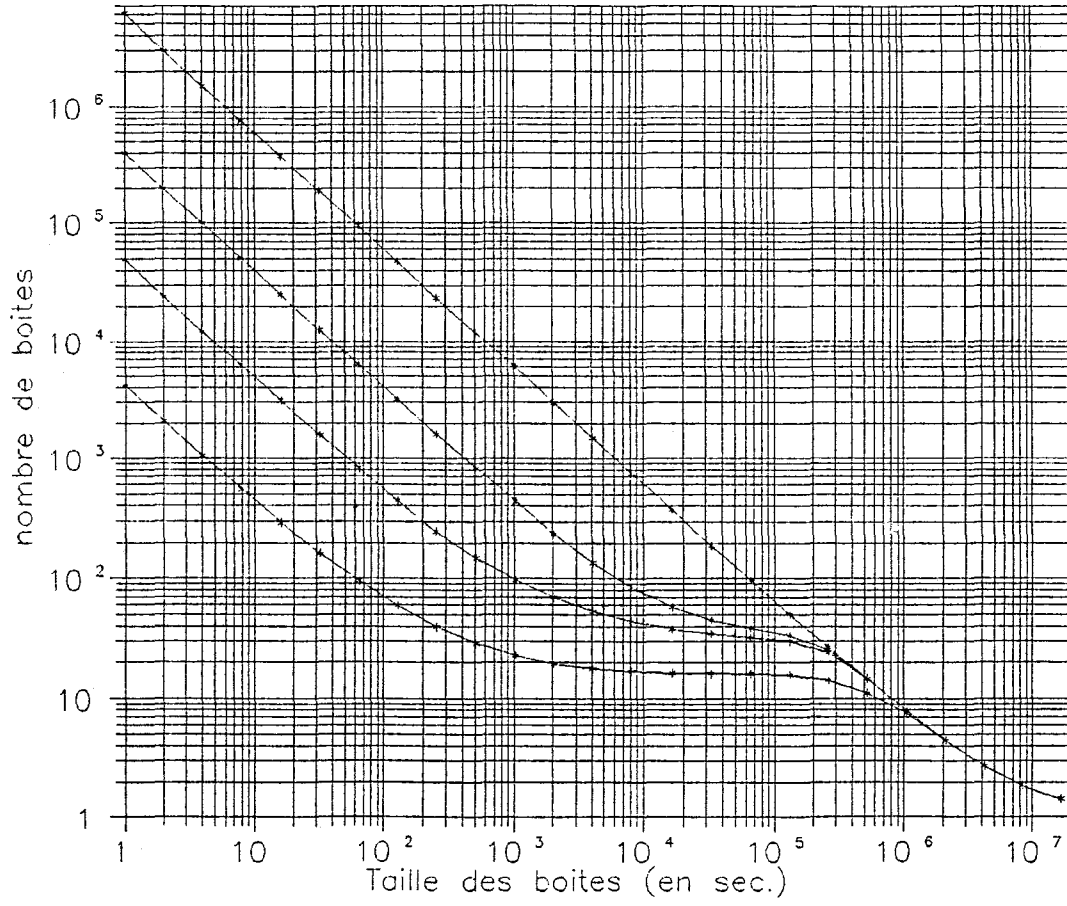
Fonctions dimensionnelles

FETOKADIE

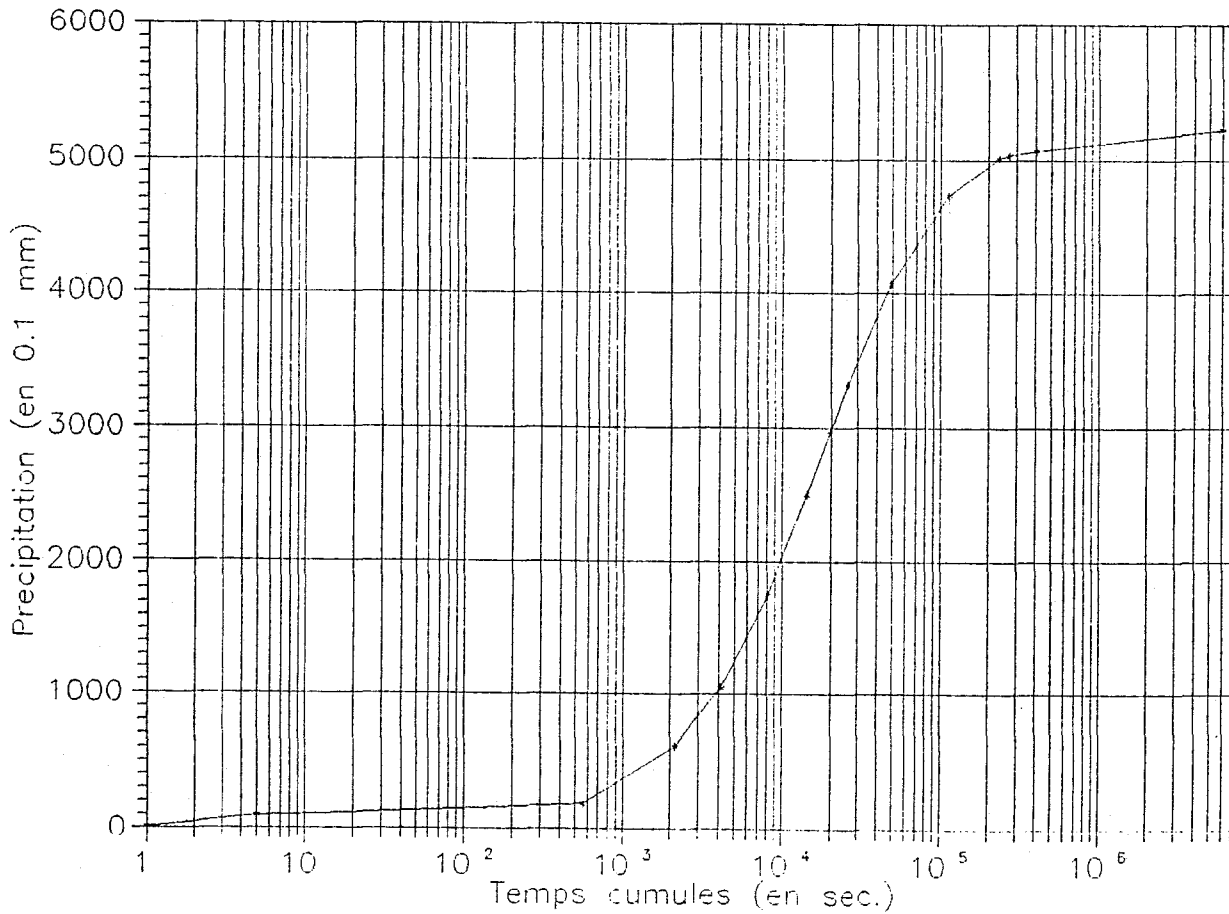


Courbes logistiques

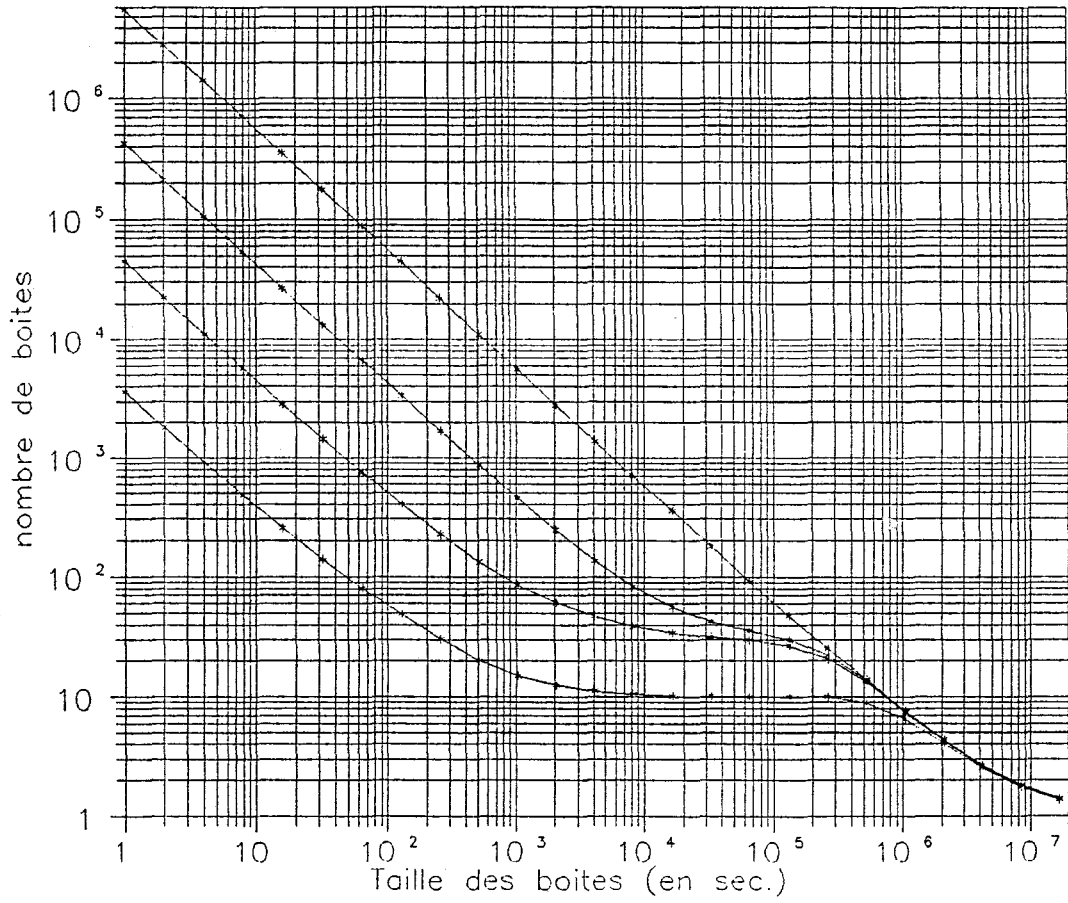
# YELOUNA EST



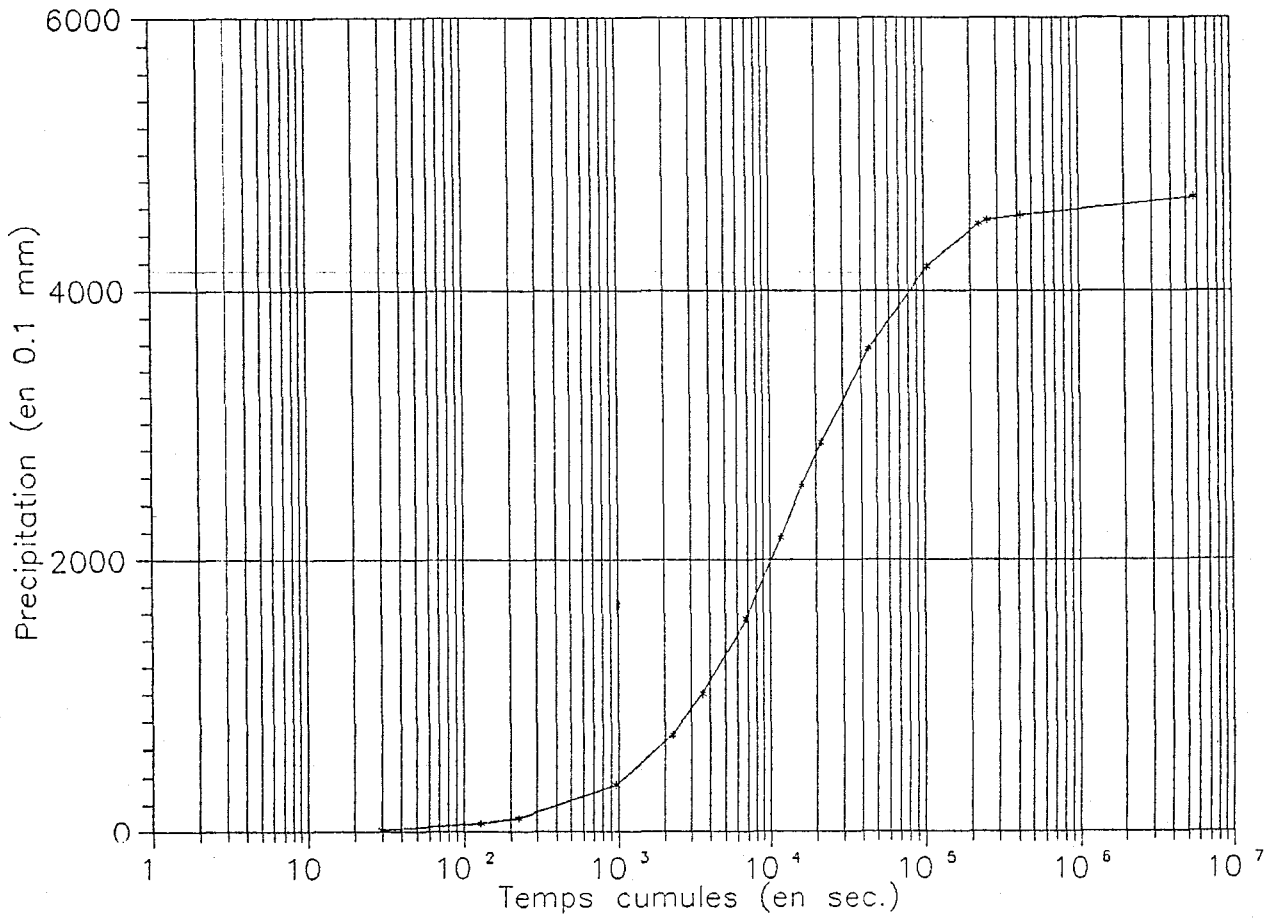
# YELOUNA EST



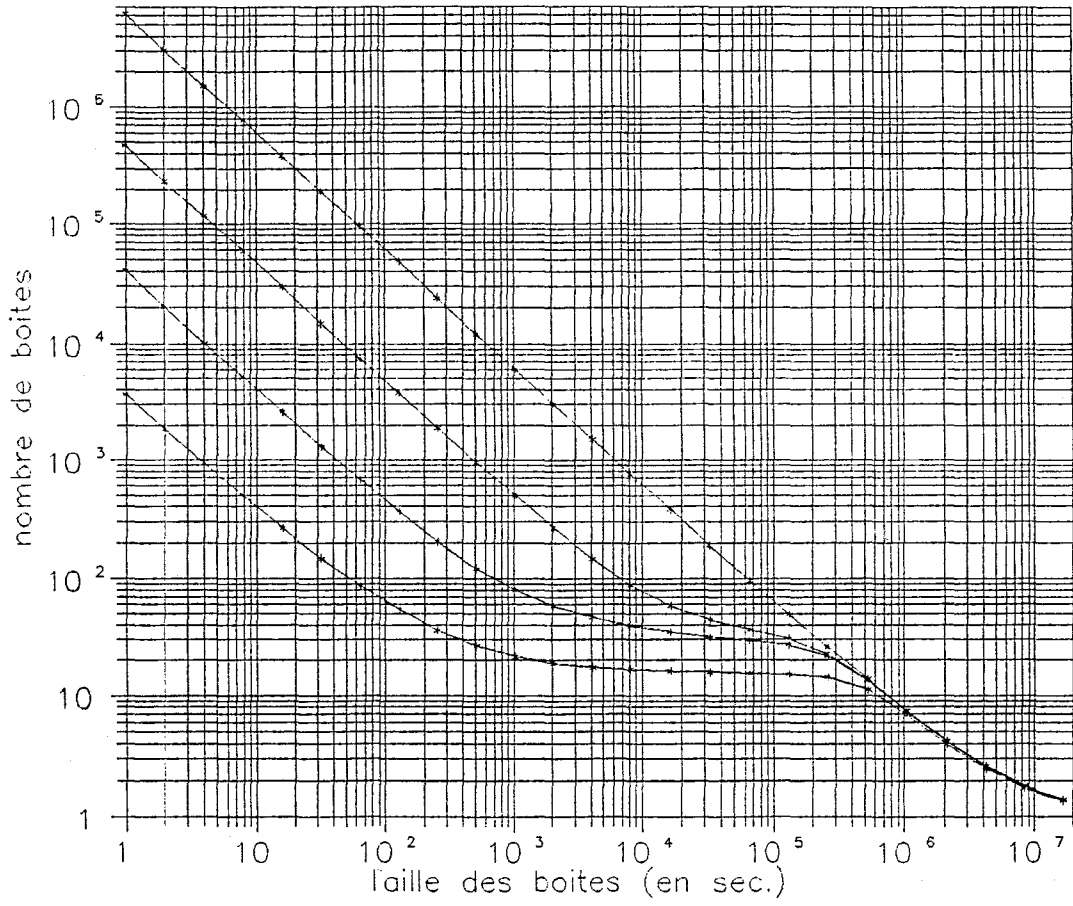
# KAMPA ZARMA



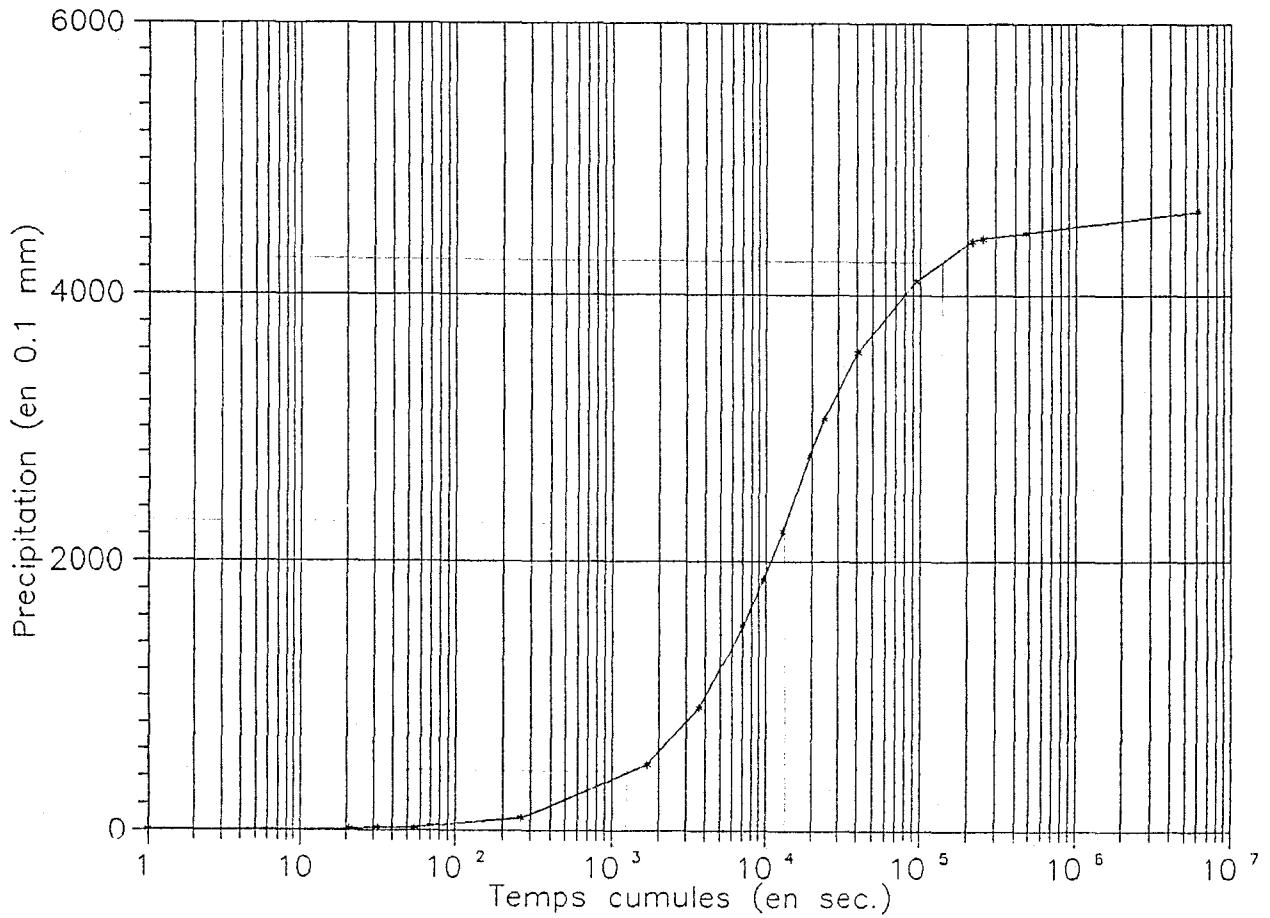
# KAMPA ZARMA



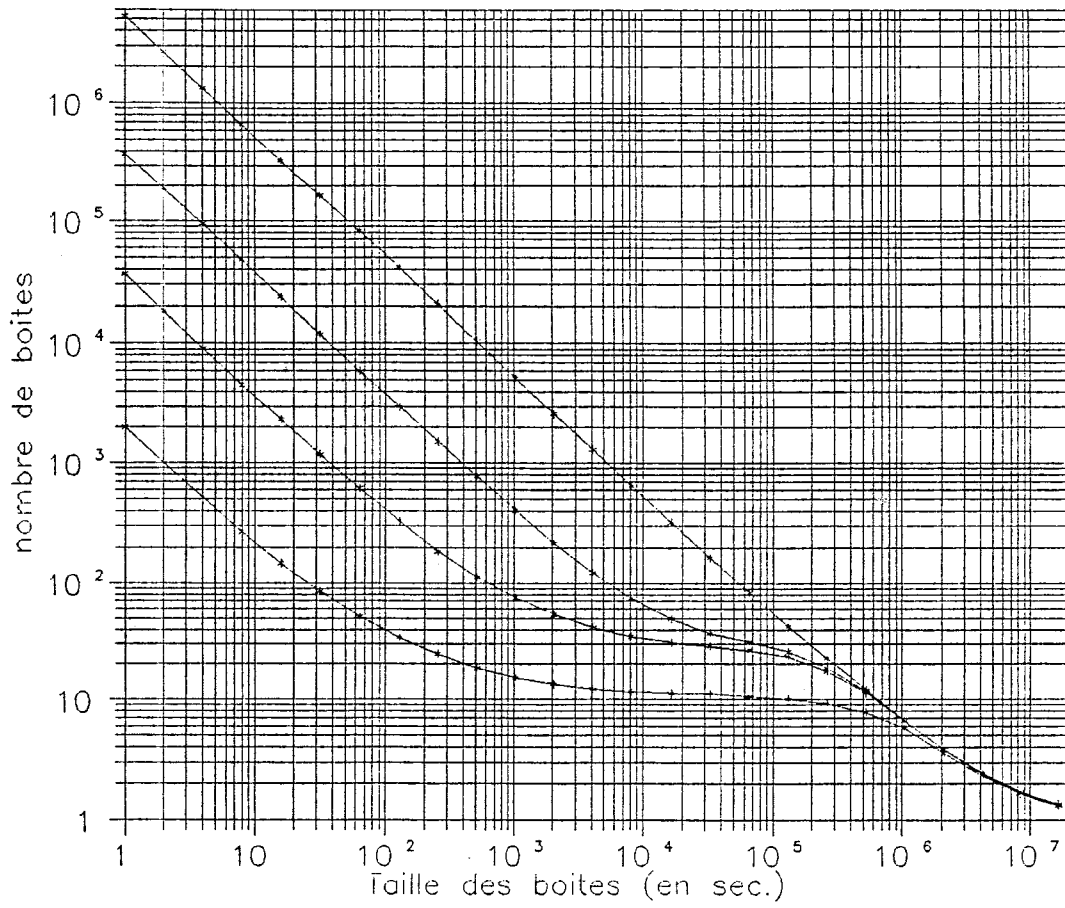
# GAGARE



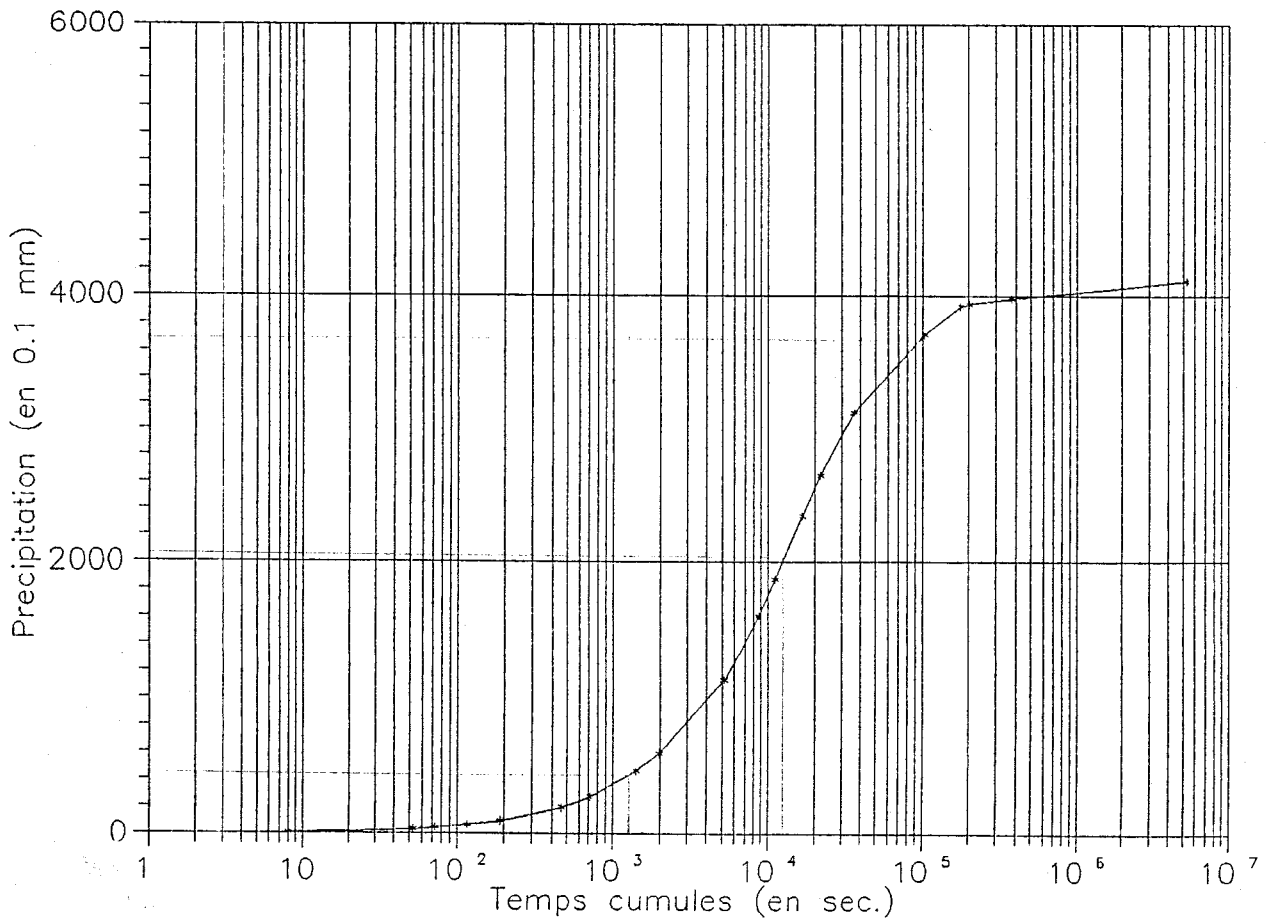
# GAGARE



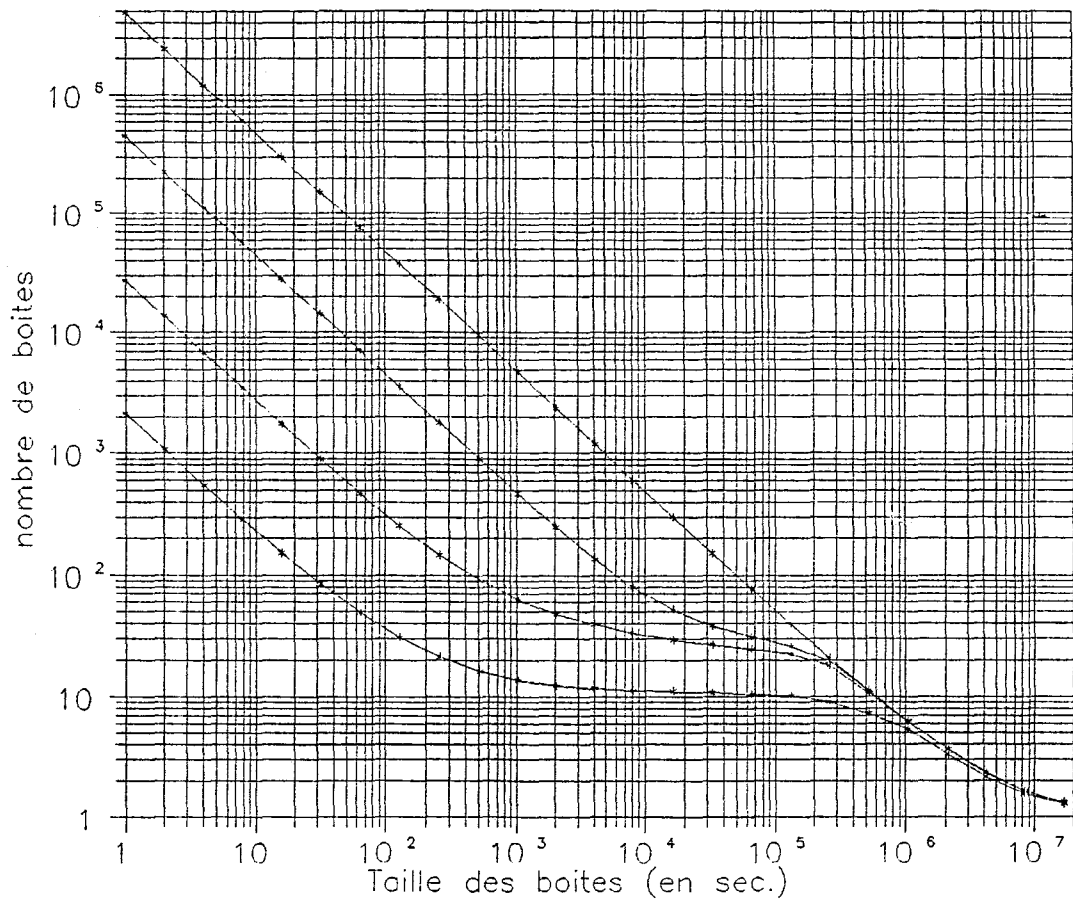
# TIGO ZENO



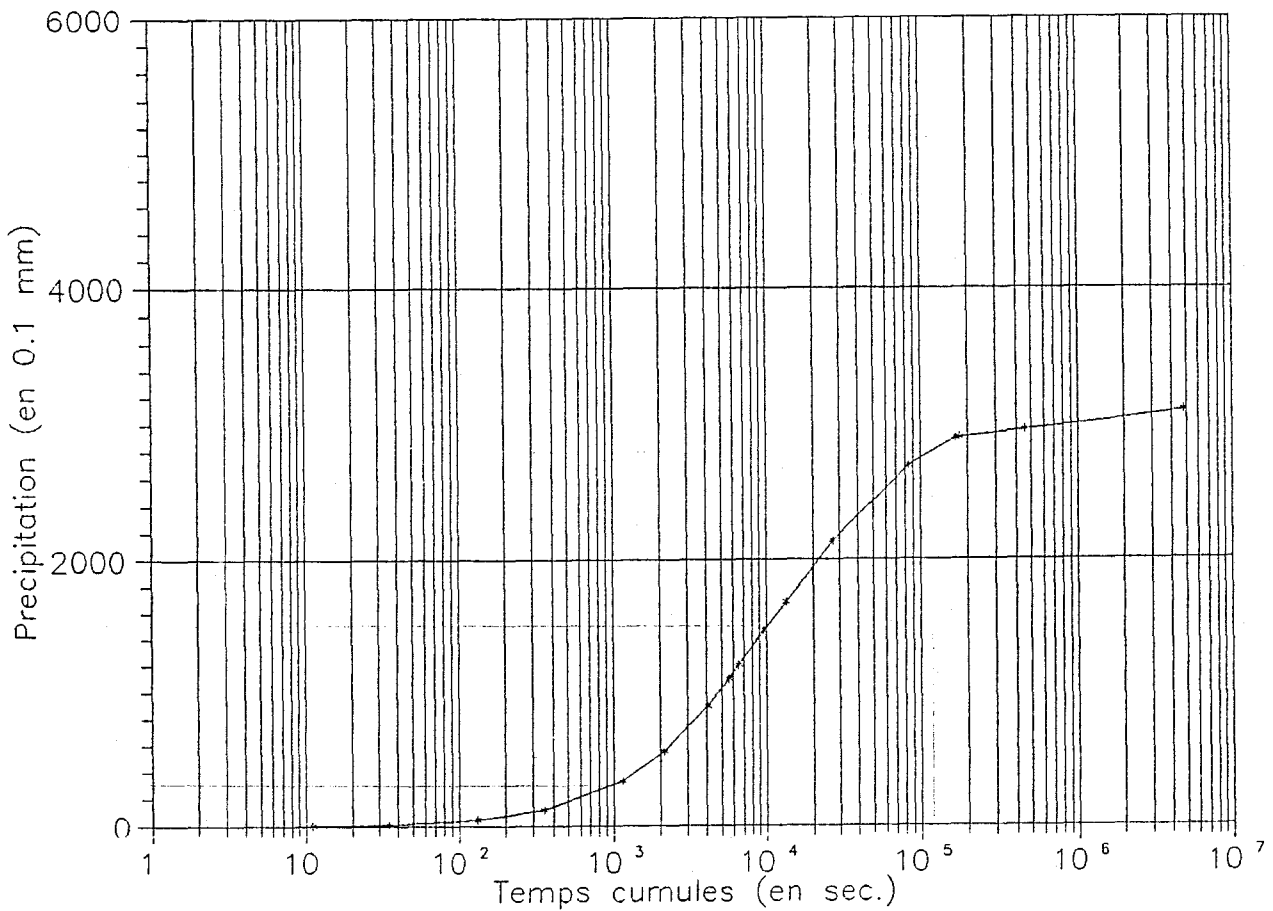
# TIGO ZENO



# BARKIAWAL

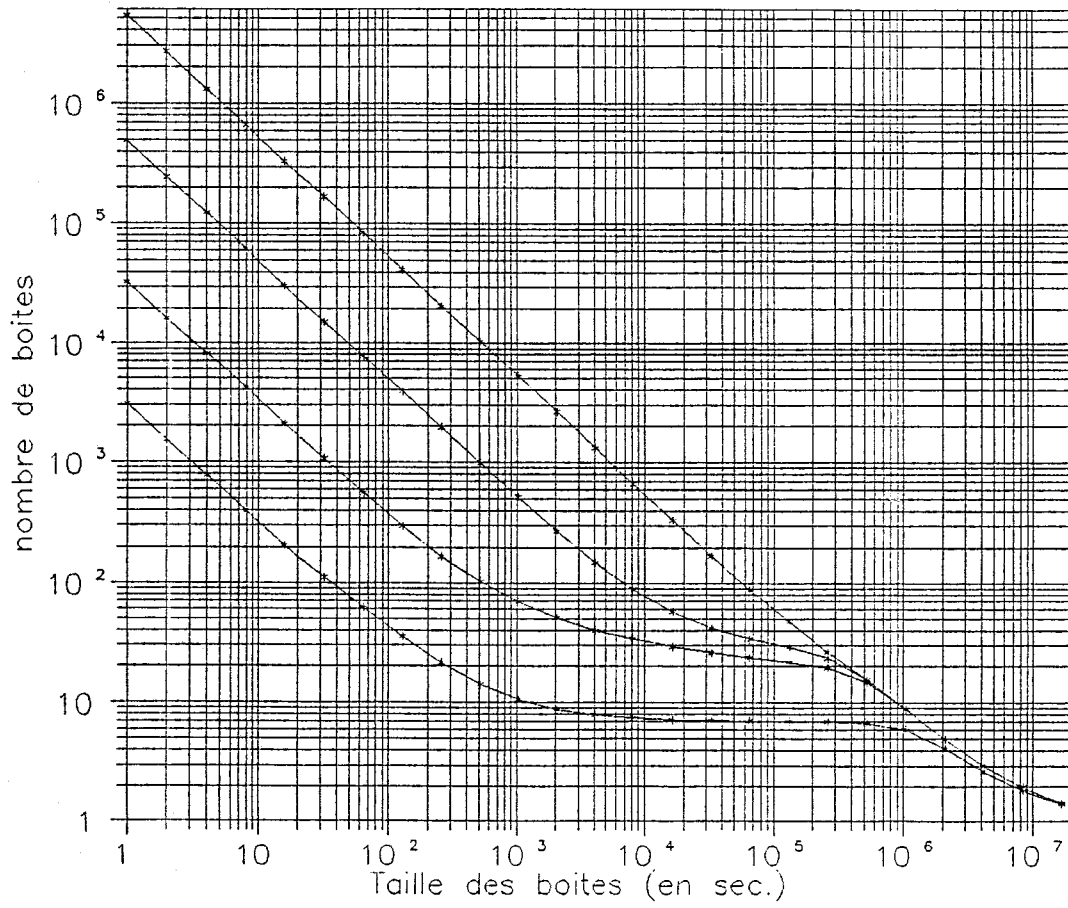


# BARKIAWAL

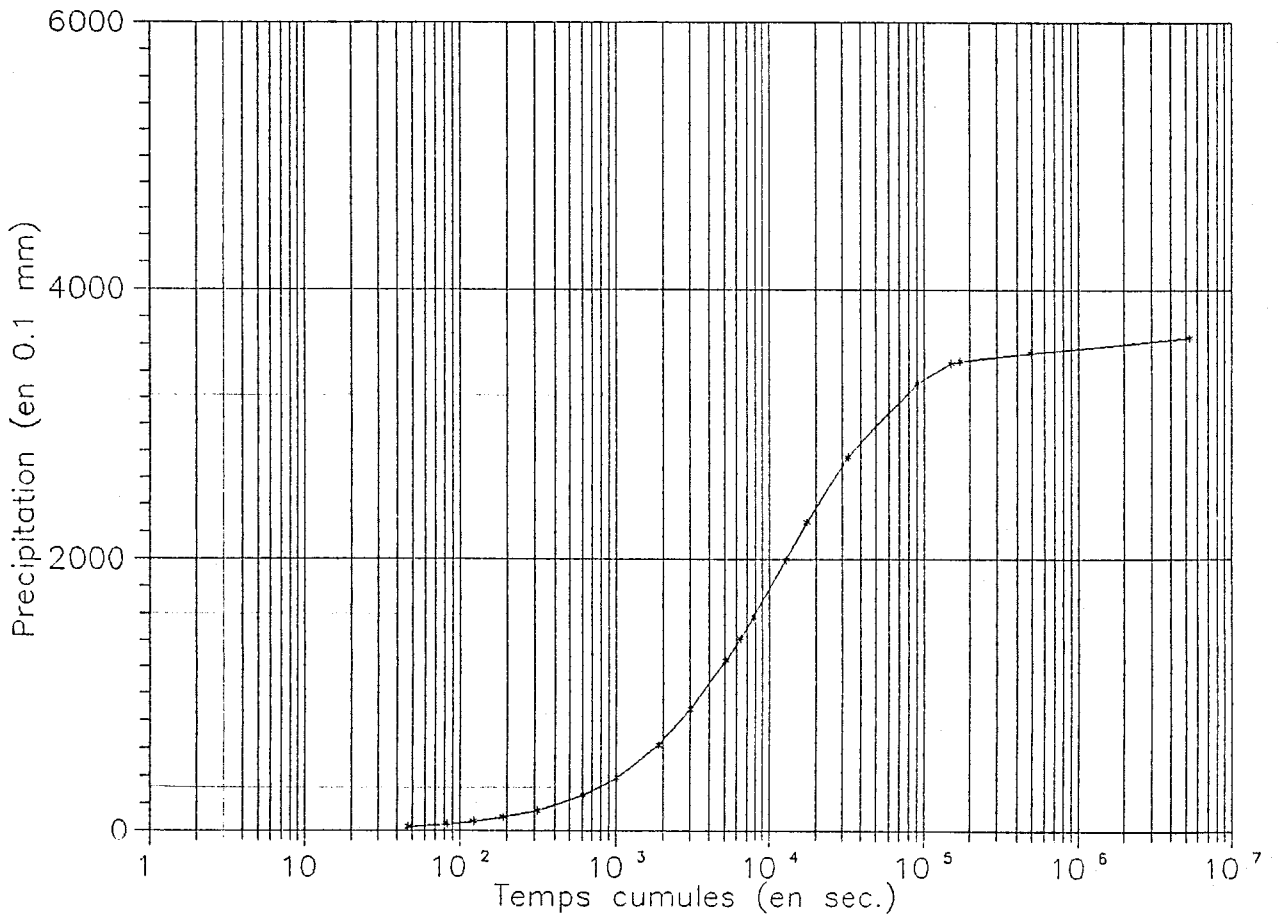




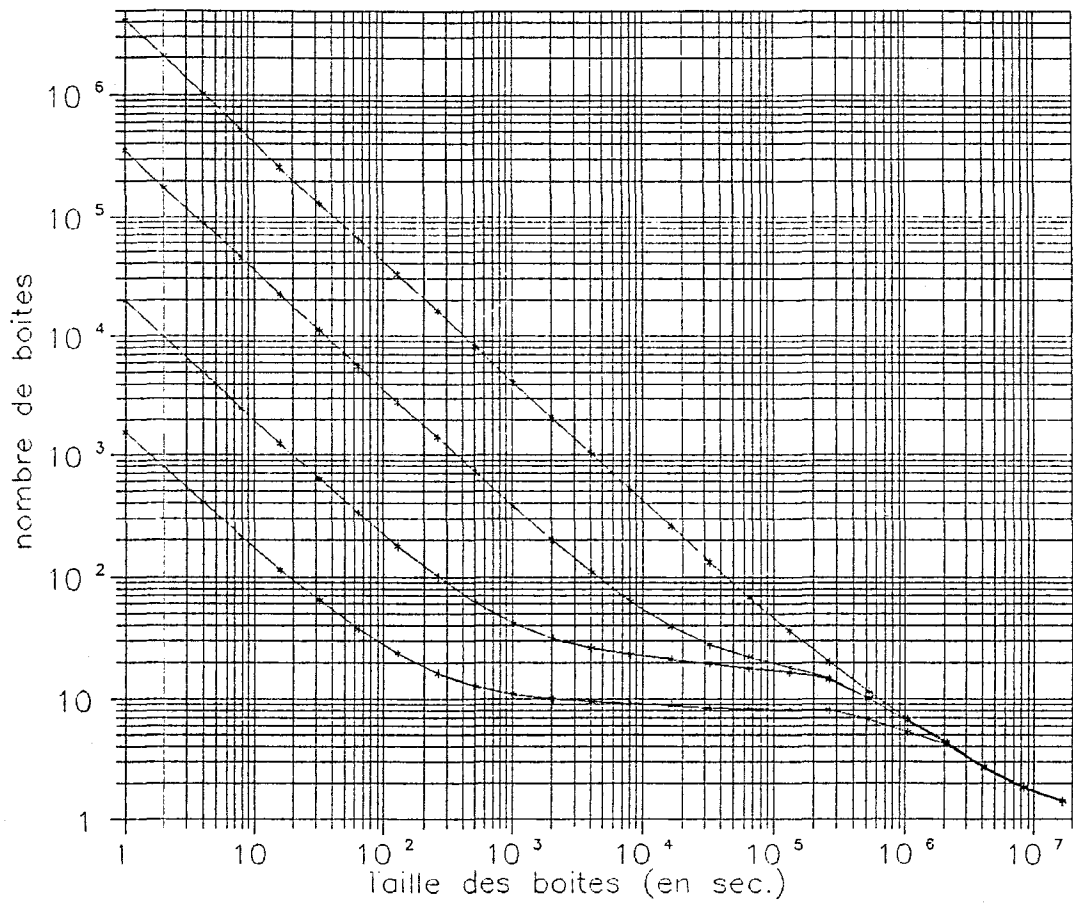
# DANGUEY GOR



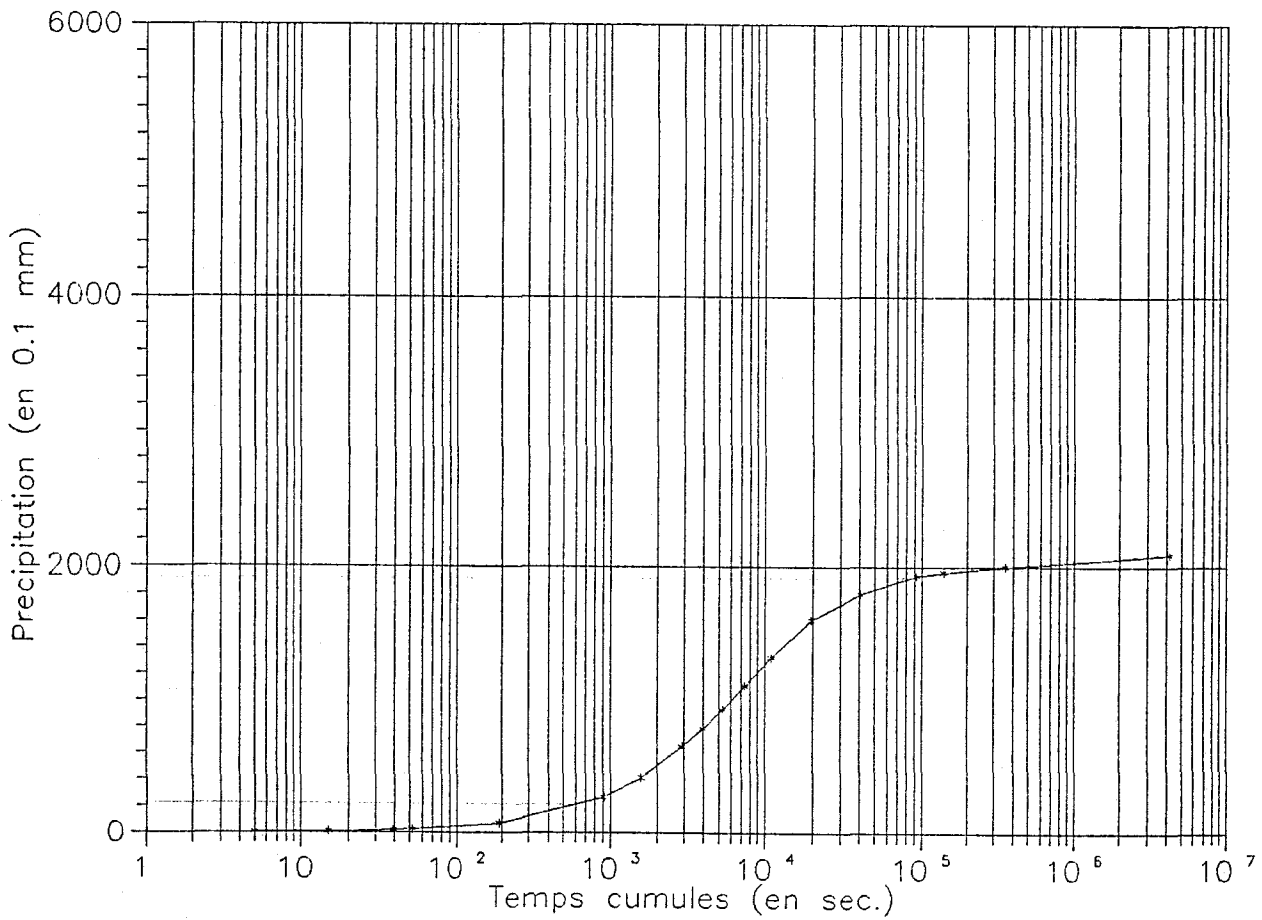
# DANGUEY GOR



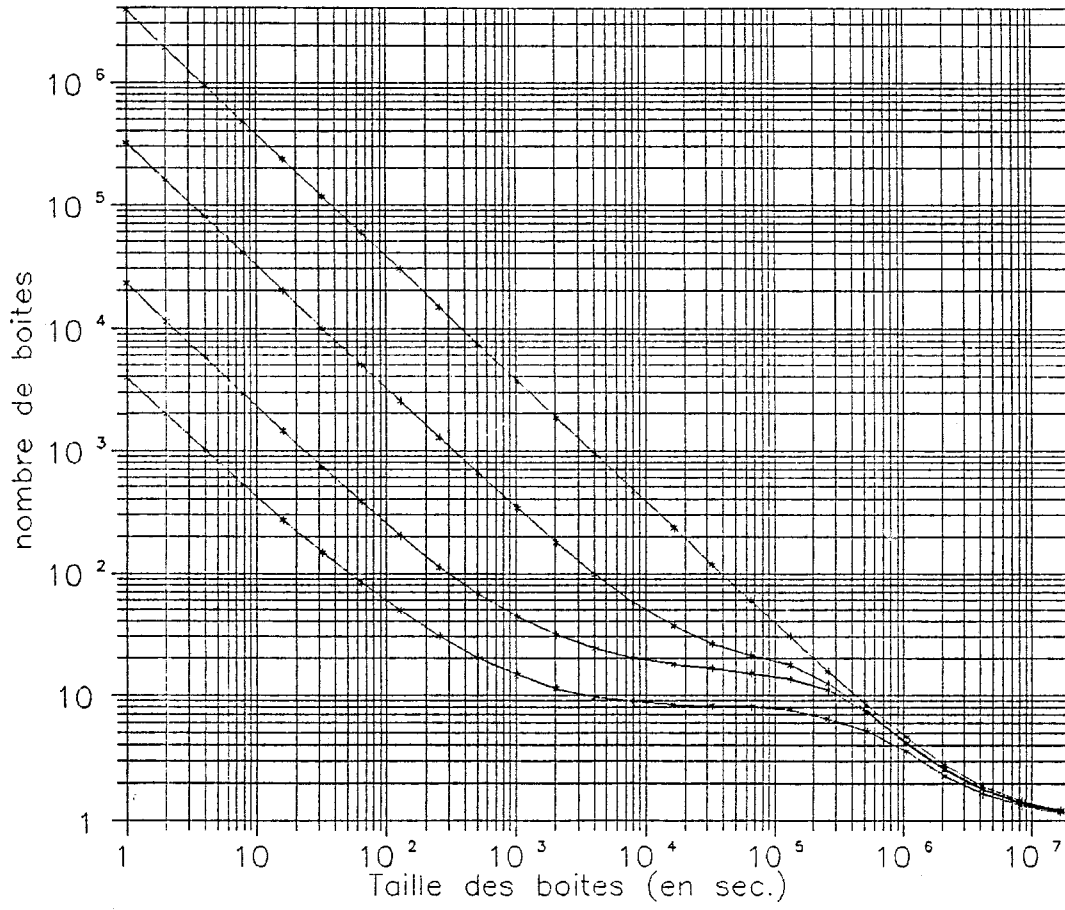
# FOY FANDOU



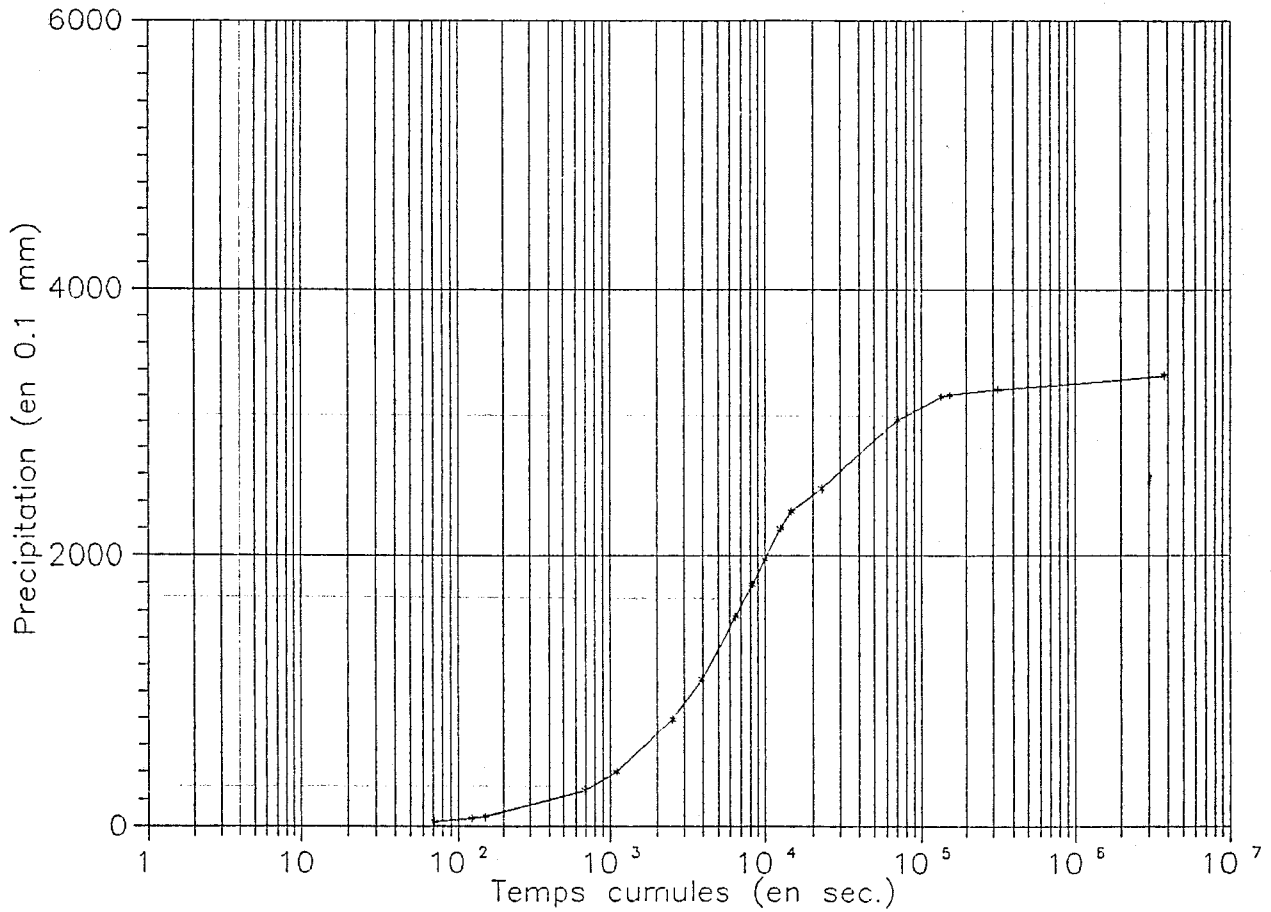
# FOY FANDOU



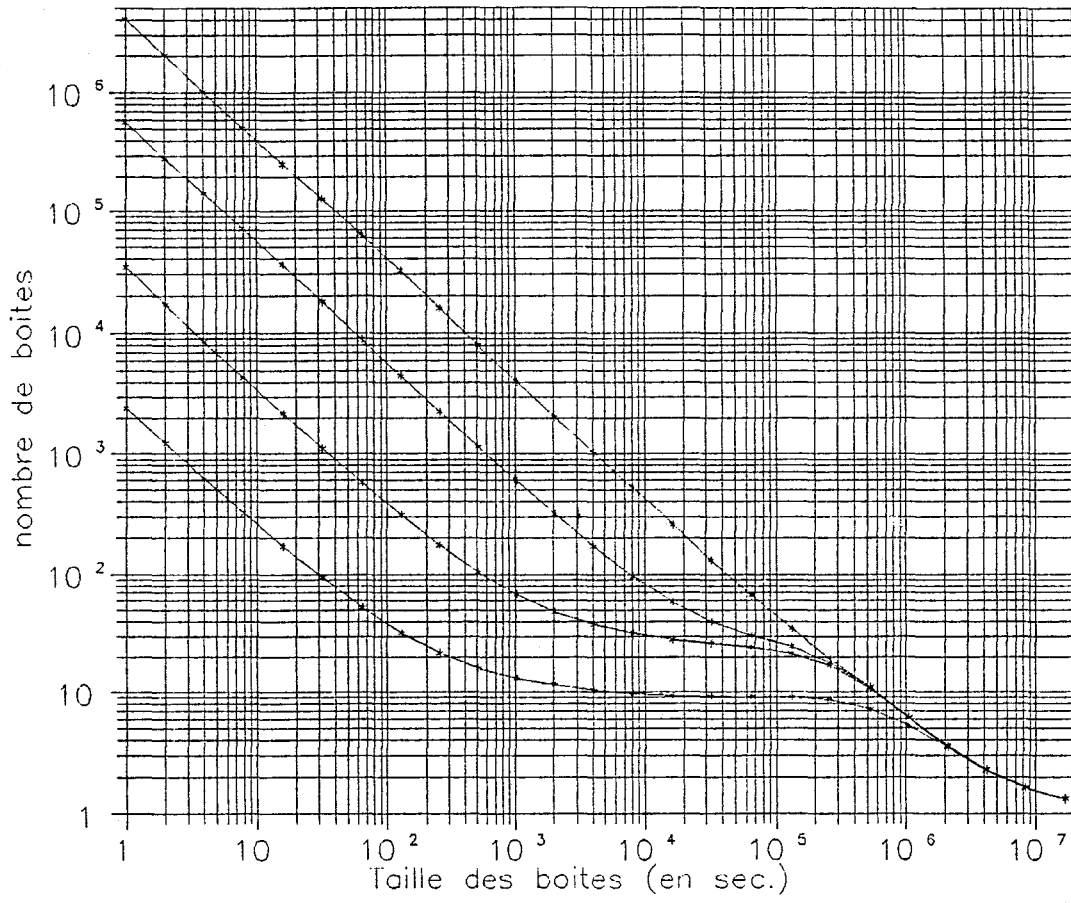
# DEBERE GATI



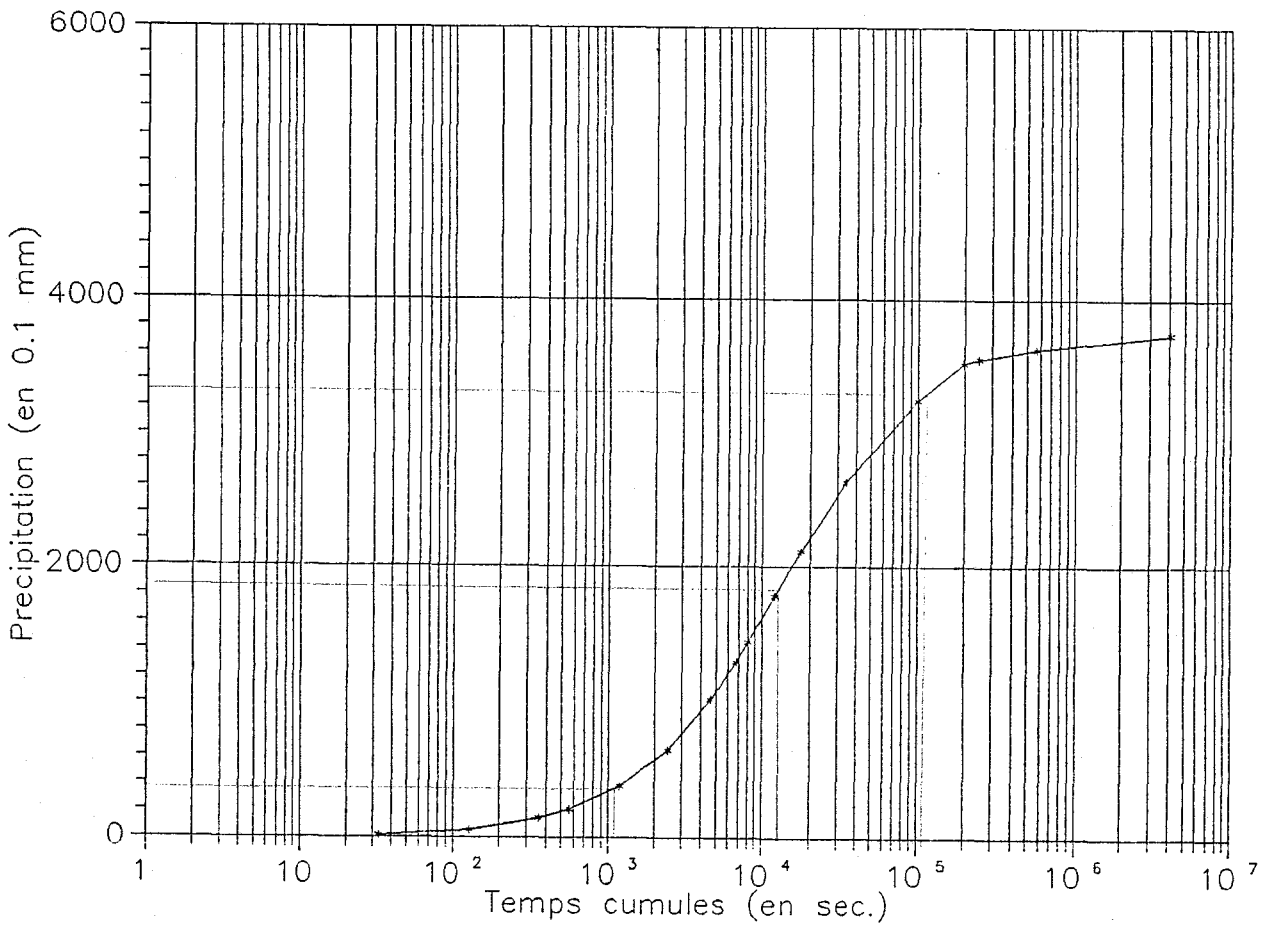
# DEBERE GATI



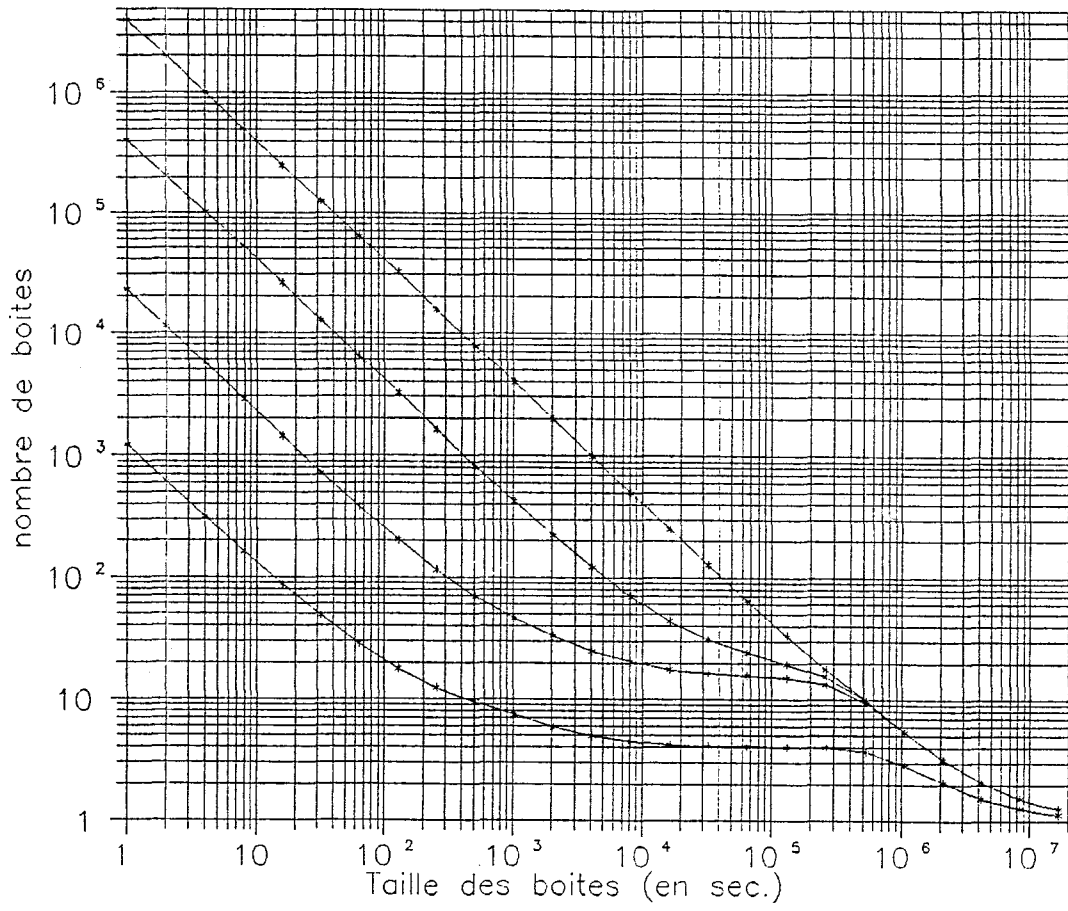
# KOURE KOBAD



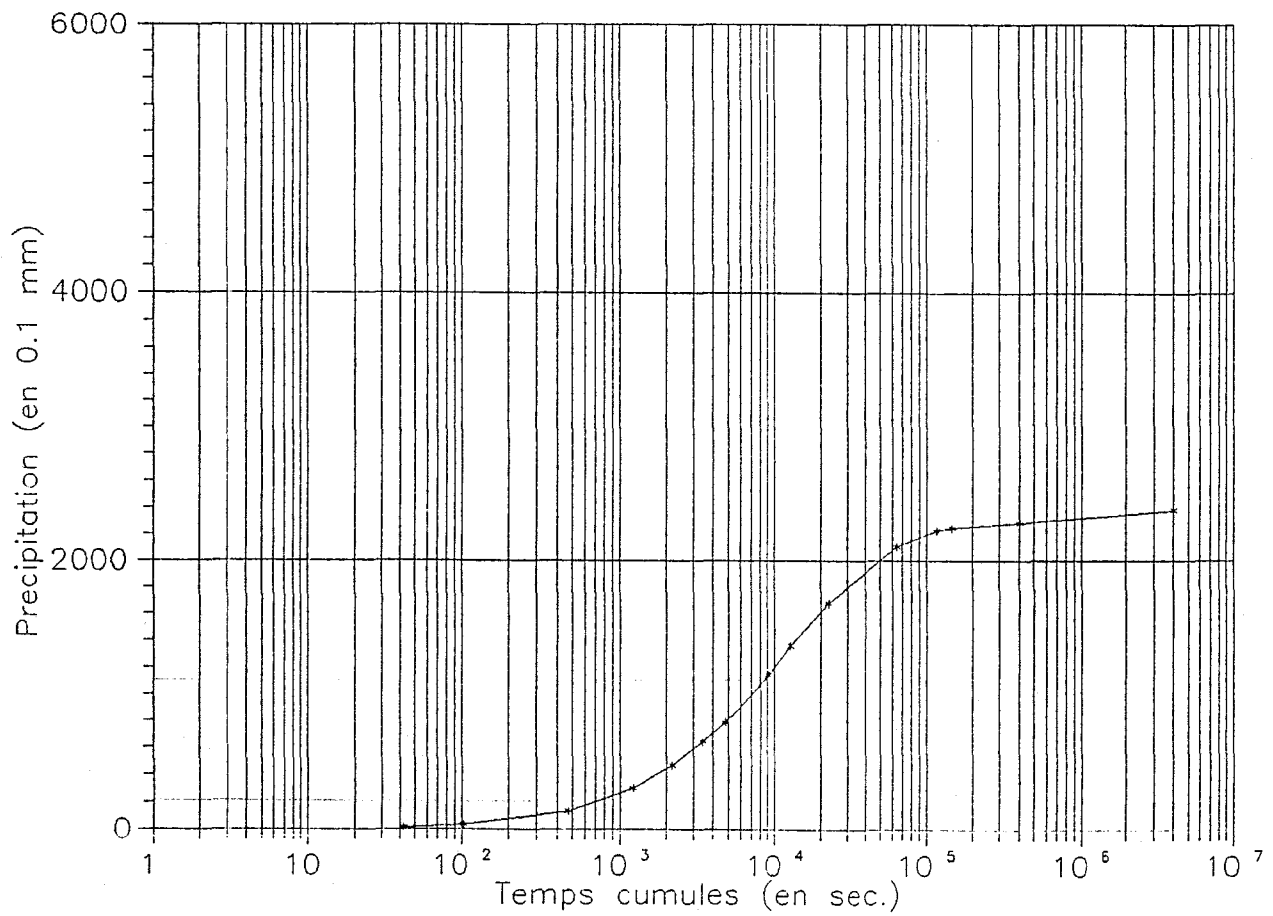
# KOURE KOBAD



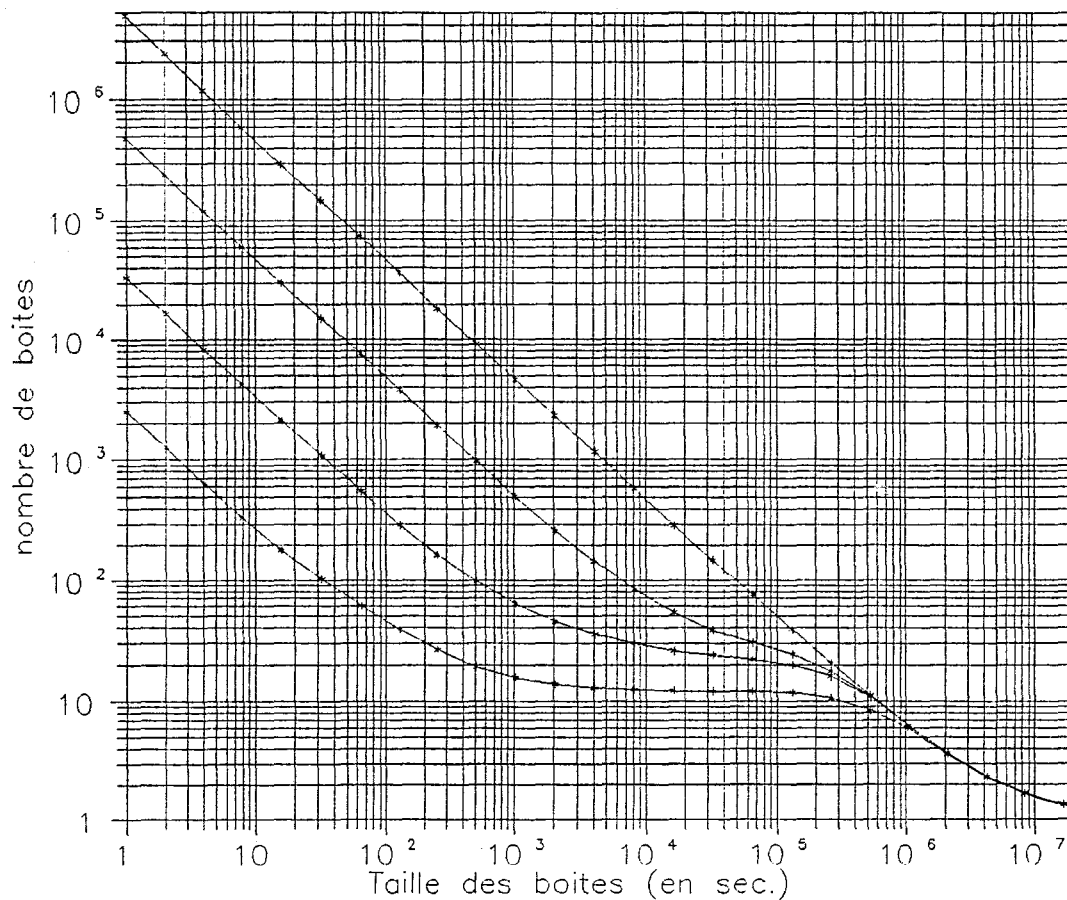
# DAMANA



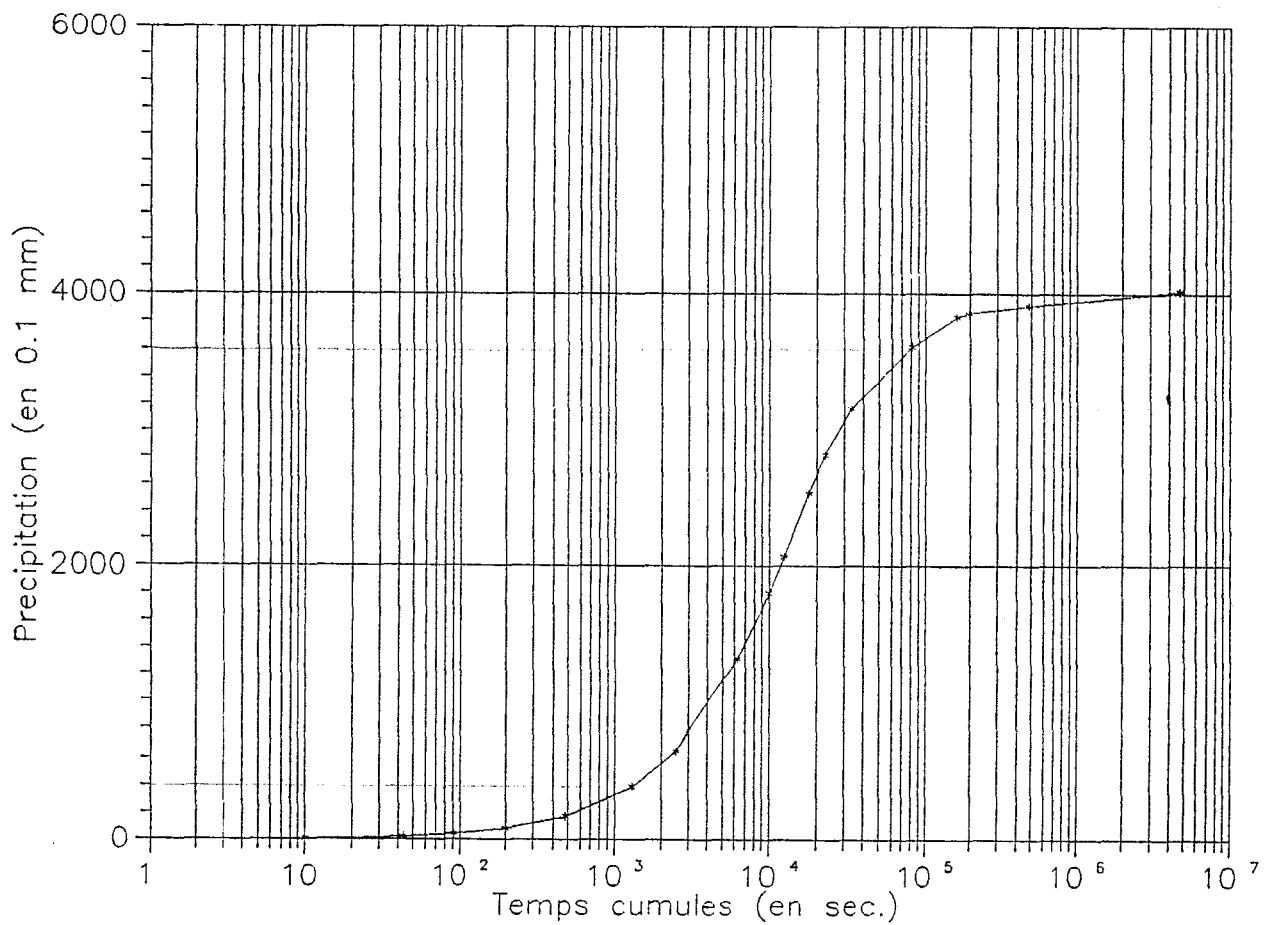
# DAMANA



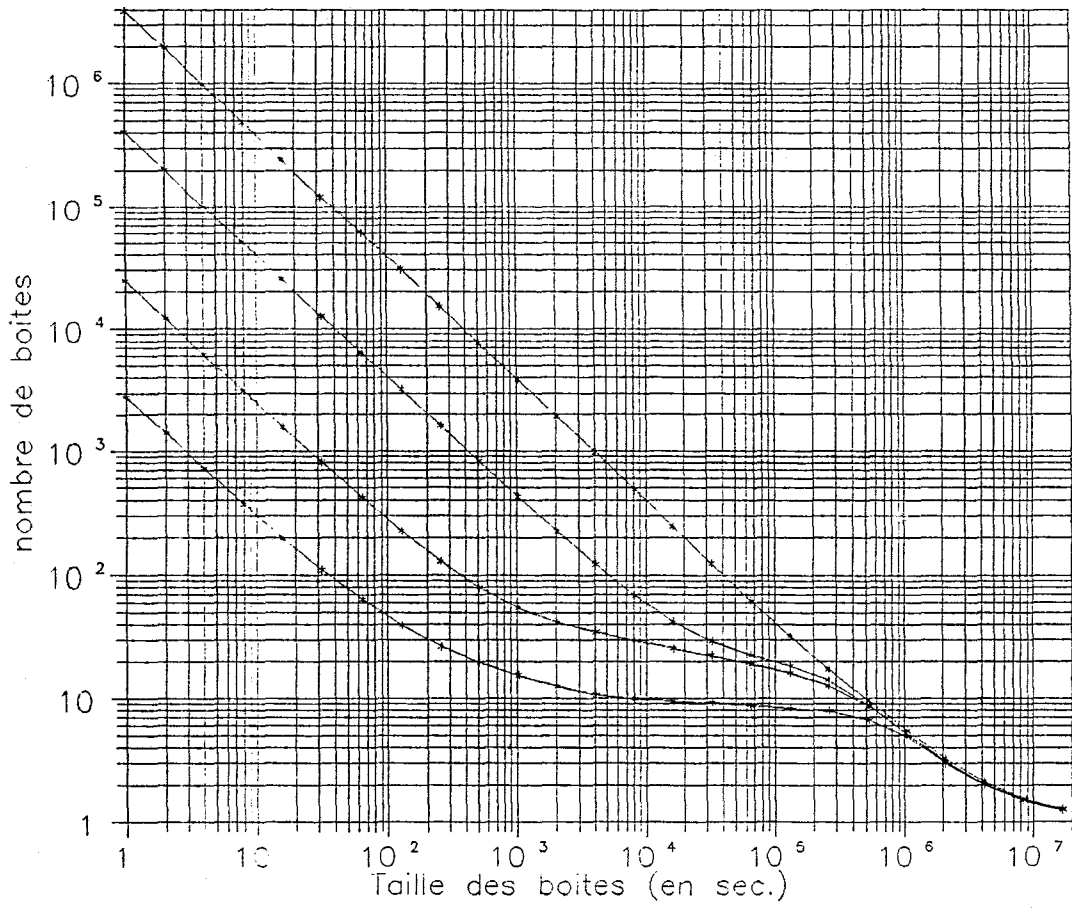
# ZOUZOU BERI



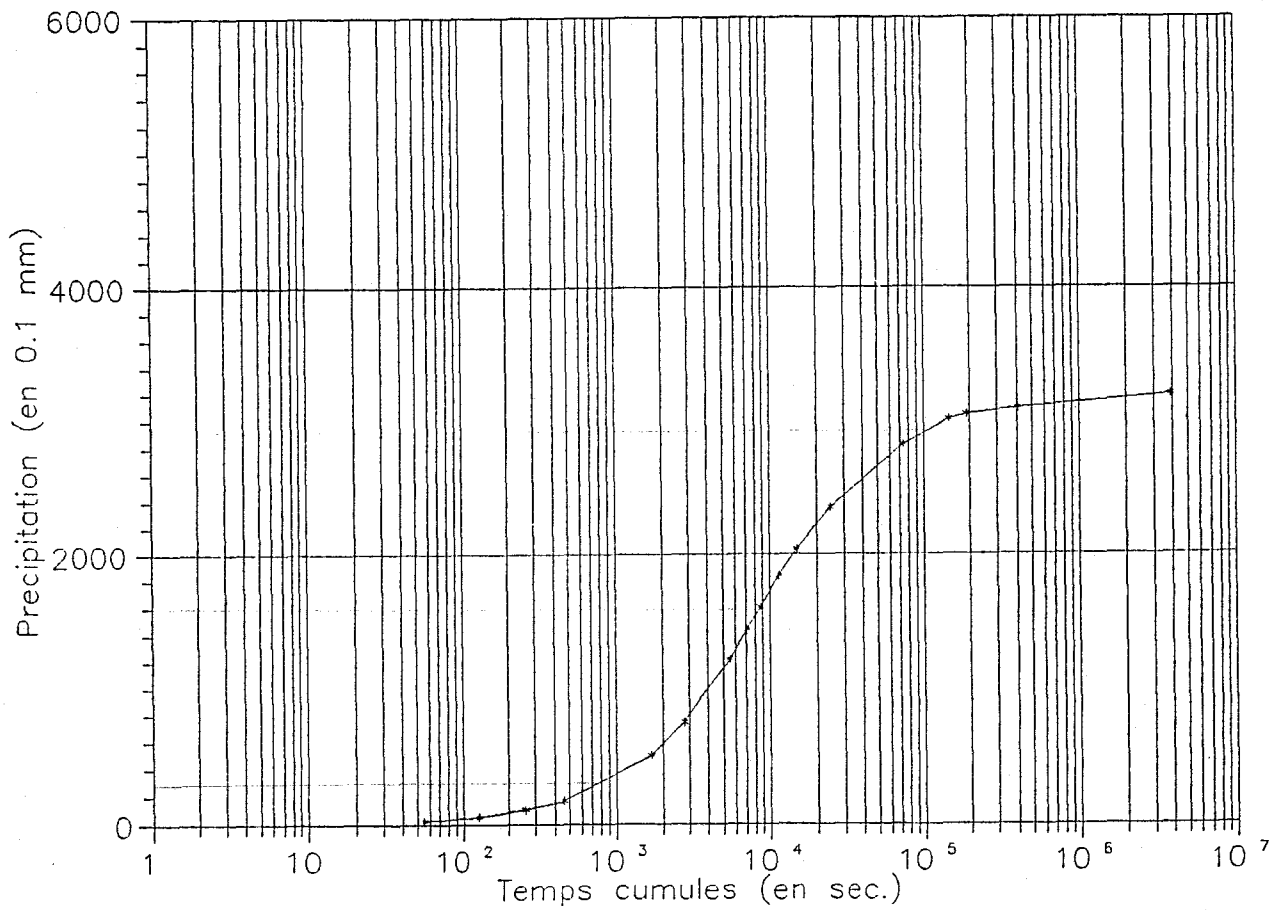
# ZOUZOU BERI



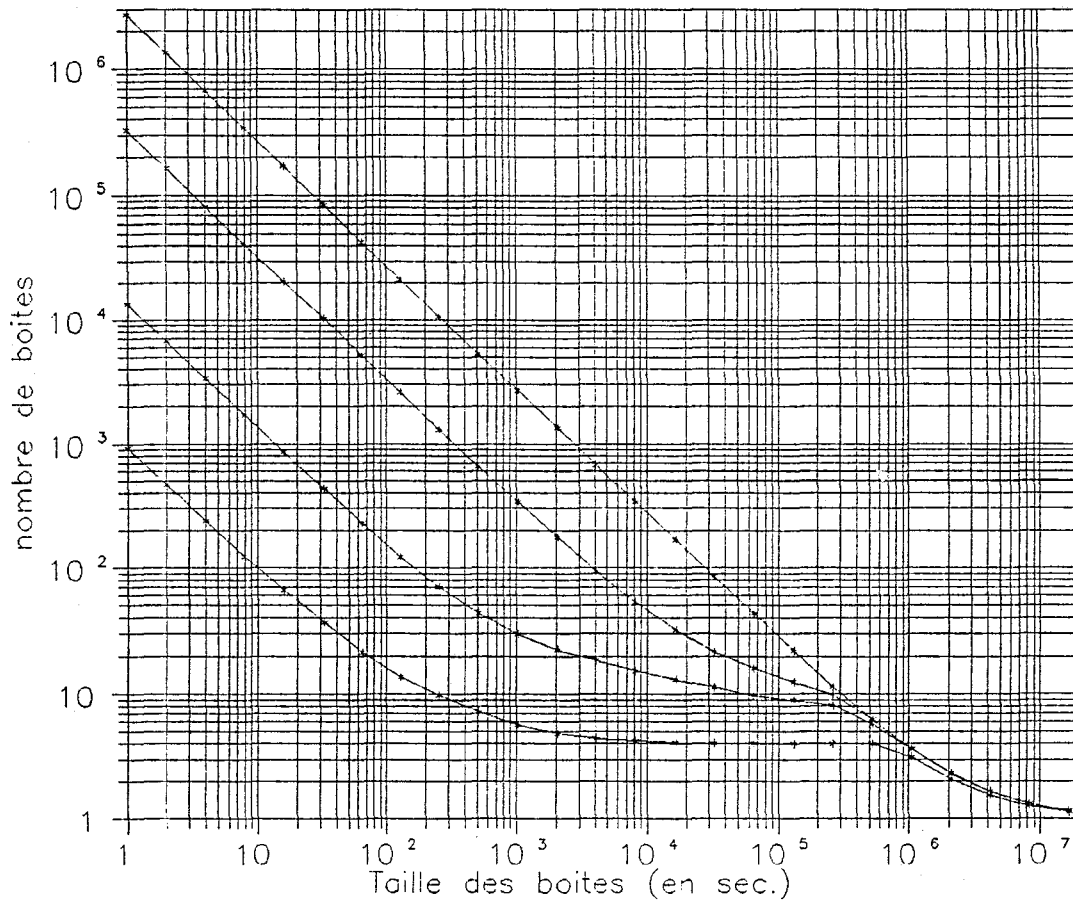
# GAMONZON



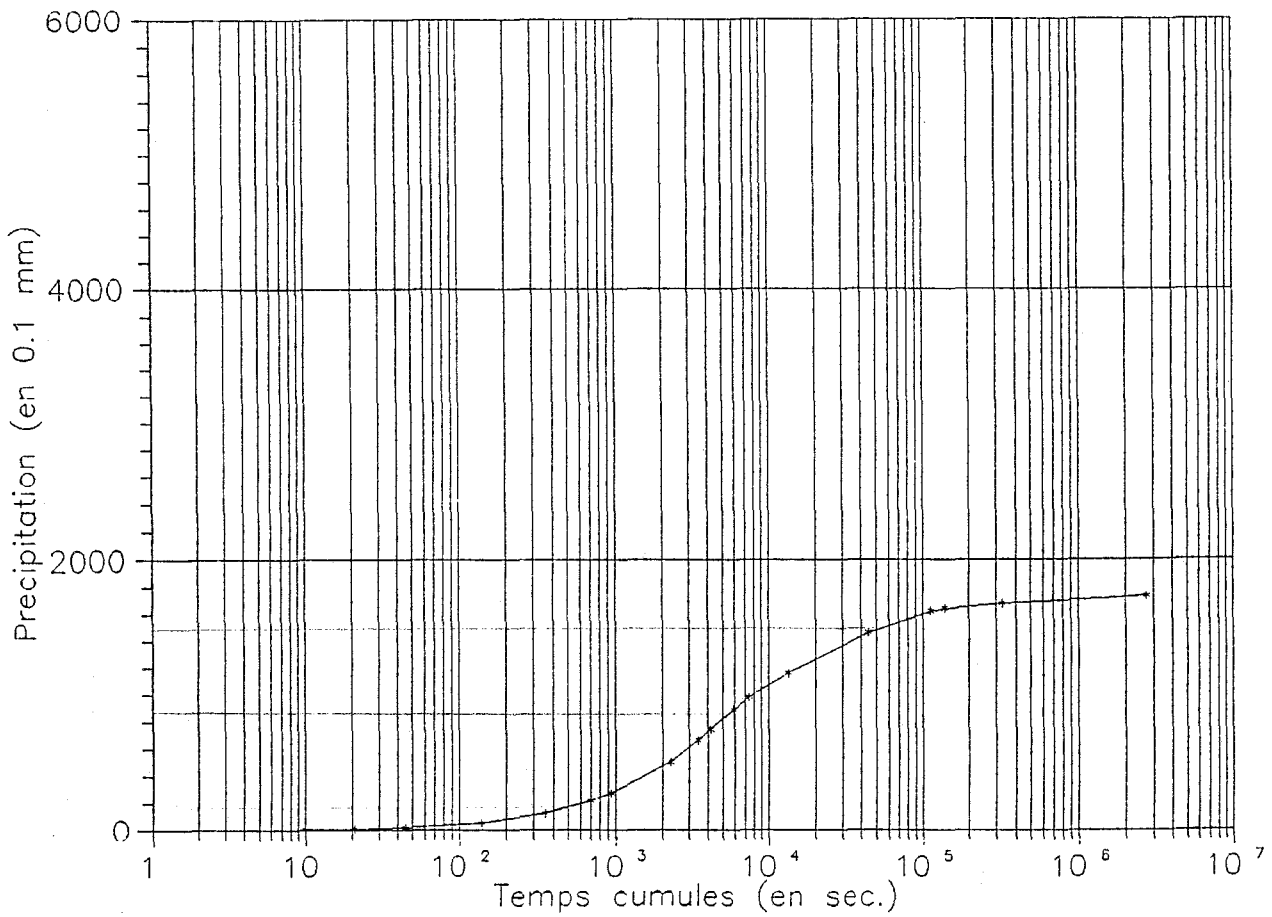
# GAMONZON



# NIAMEY POUDRIERE

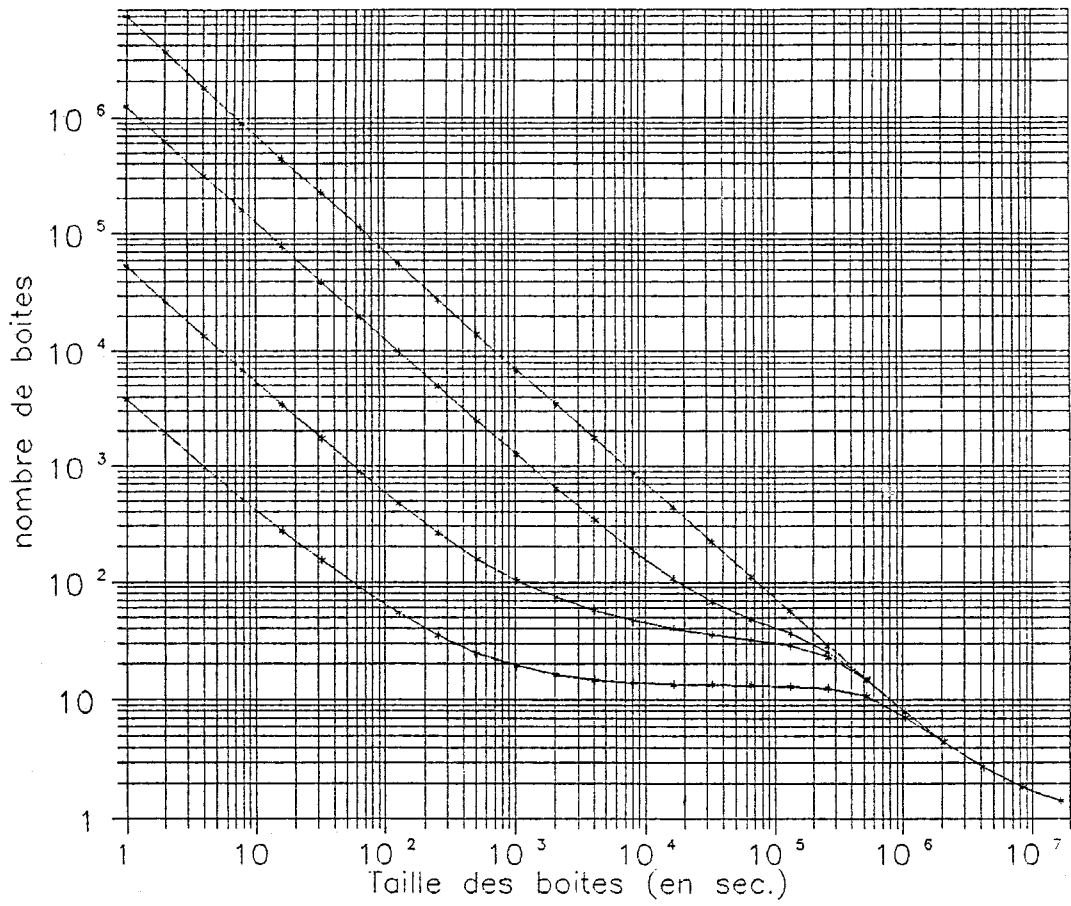


# NIAMEY POUDRIERE





# FETOKADIE



# FETOKADIE

