

**Office de la Recherche Scientifique
et Technique Outre-Mer**

**COMITÉ INTER-ÉTATS
d'ETUDES HYDRAULIQUES**

ETUDE GENERALE DES AVERSES EXCEPTIONNELLES EN AFRIQUE OCCIDENTALE



République du SENEGAL

par

Y. BRUNET-MORET

Ingénieur Hydrologue de l'O.R.S.T.O.M.

OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE
et TECHNIQUE OUTRE-MER

COMITE INTER-ETATS
d'ETUDES HYDRAULIQUES

ETUDE GENERALE
des AVERSES EXCEPTIONNELLES
en AFRIQUE OCCIDENTALE

République du SENEGAL

par Y. BRUNET-MORET
Ingénieur Hydrologue de l'ORSTOM

Août 1963

Par Convention n° 16/M/62/S du 16 Mars 1962, il a été confié à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer l'étude systématique des pluies en Afrique Occidentale.

Cette étude, basée sur l'analyse des relevés pluviométriques et des enregistrements de pluviographes, a pour buts principaux de déterminer les hauteurs de précipitations journalières de fréquence rare et d'établir les courbes intensités-durées pour diverses périodes de récurrence, sur l'ensemble de l'Afrique Occidentale et du TCHAD.

A - ETUDE des PLUVIOMETRIES JOURNALIERES
du SENEGAL

I - DONNEES d'OBSERVATION -

Les éléments dont nous disposons comprennent, en y incluant les observations de 1961, les relevés de 82 stations totalisant 1717 années complètes d'observations pluviométriques journalières. Seules, neuf de ces stations ont une période d'observation de 40 ans ou plus.

Nous devons tout d'abord faire les remarques suivantes sur la valeur des observations :

- Il a été fréquent que le pluviomètre, placé dans une localité ait été changé de place au changement d'observateur, ces déplacements ont pu atteindre ou dépasser le kilomètre et modifier la position du pluviomètre par rapport à l'orographie, au vent dominant. Mais nous ne pouvons avoir de précisions sur les anciens emplacements et il n'a pas été possible de tenir compte de ces modifications que nous estimerons sans importance réelle pour l'étude des pluviométries journalières, étant donné le relief peu accentué des régions étudiées.

- Certains pluviomètres peuvent se trouver dans des positions défectueuses par rapport aux obstacles préexistants ou qui se sont développés : arbres, constructions Il n'est pas question de tenir compte de ces imperfections.

- Les erreurs d'observation sont nombreuses ; nous avons été témoins des suivantes :

L'observateur néglige les dixièmes de millimètre et arrondit systématiquement la hauteur au millimètre inférieur. Cela peut avoir une influence - relativement faible - sur le total annuel.

Il arrive que certains observateurs, dans le cas de pluies supérieures à 10 mm, comptent bien le nombre d'éprouvettes de 10 mm, mais écrivent en dixièmes de millimètres le contenu de la dernière éprouvette : ainsi, 50,6 mm au lieu de 56 mm. Cela se vérifie facilement d'après le nombre abusif des zéros au rang des unités, et nous n'avons pas tenu compte des années ainsi observées.

- Les négligences d'observation sont fréquentes : l'observateur néglige de relever les petites averses, et celles-ci sont totalisées (évaporation en moins) avec la première averse un peu forte : le nombre de jours de pluie est réduit et la plupart des averses inférieures à 10 mm disparaissent.

- Les erreurs de mesure sur les observations relativement anciennes, antérieures à 1926, sont quelquefois difficiles à déceler si l'observateur n'a pas spécifié le matériel utilisé. A la création du Service Météorologique, les pluviomètres "Association" et les éprouvettes millimétriques manquaient. Il a été utilisé des éprouvettes graduées en centimètres cubes et des récipients quelconques (seaux, touques d'essence) dont la surface d'ouverture n'était pas toujours bien mesurée. Dans bien des cas, l'observateur a inscrit le nombre de centimètres cubes relevés et l'a divisé par 40 pour trouver la hauteur pluviométrique, alors que d'après les notes, la surface du récipient ~~était~~ n'était pas de 400 cm². Certains relevés ont pu être corrigés, bien d'autres ont été abandonnés.

- Un point délicat est celui de la définition du "jour de pluie". Les Services Météorologiques demandent des relevés à heures fixes (deux fois par jour) et comptent comme jour de pluie toute période de 24 heures (commençant au relevé du matin) pendant laquelle il a été mesuré au moins 0,1 mm. Il peut donc se produire qu'une petite pluie soit tombée dans le seau pluviométrique et ait été évaporée avant le relevé suivant. Il se peut aussi que l'heure du relevé du matin soit arrivée pendant une averse et que la hauteur totale de cette averse soit comptée sur deux jours différents. Or, nous cherchons à établir la loi de répartition de la pluviométrie par période de 24 heures, indépendamment de l'heure du début de cette période. Dans certains cas, avec l'aide des fiches originales de l'observateur, la hauteur totale peut être rétablie. Dans bien d'autres cas, cela n'est pas possible. A vrai dire, il est assez rare, sauf dans les stations météorologiques "d'observation", que l'observateur se dérange avant la fin de l'averse. Notons, de plus, que certains observateurs ont manifestement compté comme pluie les fortes rosées qui peuvent se produire.

Pour conclure ces remarques sur la valeur des observations, nous pensons cependant que, dans l'ensemble, elles sont bonnes, sinon il n'aurait pas été possible de dégager les tendances générales de la distribution telles qu'elles seront précisées plus loin.

II - METHODE d'ETUDE -

Le nombre d'années d'observation, une quarantaine au maximum pour les stations privilégiées, ne permet pas d'estimer avec assez d'exactitude la valeur de la hauteur de probabilité une fois en cinq ans, uniquement au vu du rangement en ordre décroissant des pluviométries journalières. Pour une station observée pendant 40 ans par exemple, les écarts entre les 10 précipitations les plus fortes de chaque station varient de façon beaucoup trop irrégulière pour que, en choisissant la 4ème valeur qui devrait correspondre à la fréquence décennale, on trouve bien effectivement l'averse décennale : on peut obtenir une valeur nettement trop faible si le nombre d'averses très fortes a été anormalement faible pendant les 40 ans considérés, ou une valeur nettement trop forte si le nombre d'averses très fortes a été anormalement élevé. Cependant, la distribution de l'ensemble des valeurs classées, comme il a été dit plus haut, présente pour l'ensemble des stations étudiées, des caractères communs qui vont faciliter notre tâche.

A - PREMIERES CONSTATATIONS sur la REPARTITION des PLUVIOMETRIES JOURNALIERES -

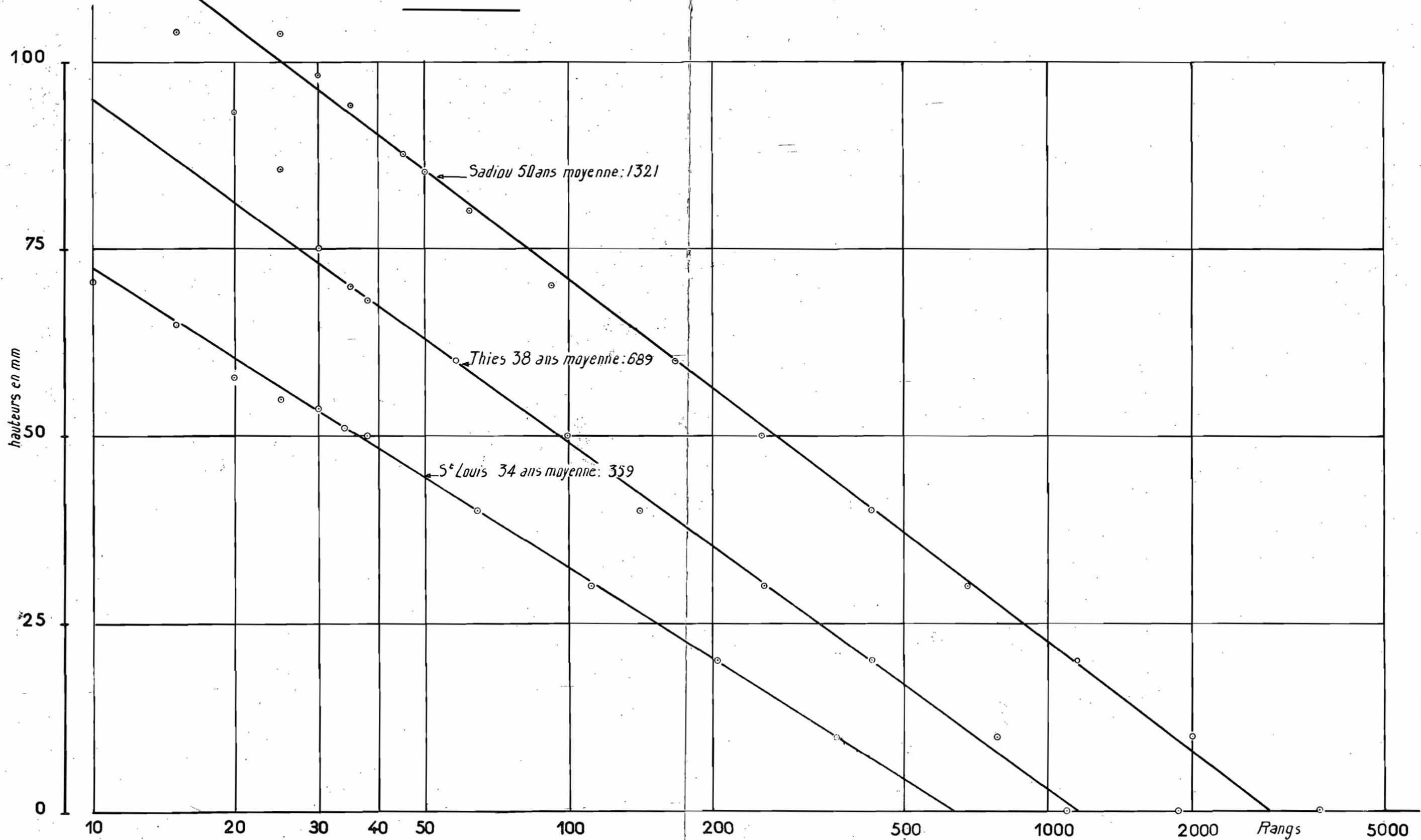
Les pluviométries journalières des stations ont été classées en ordre décroissant, en rangeant d'abord les N (N nombre d'années d'observation) premières valeurs, puis les autres par classes de 10 en 10 mm jusqu'à 0,1 mm.

Si nous portons en coordonnées semi-logarithmiques : p, la hauteur, et \log_r , logarithme du rang r, nous constatons que les points représentatifs s'alignent sur une certaine distance - depuis $p = 10$ ou 20 mm jusqu'à $r = N$ environ. Ils s'en écartent pour les très fortes et les très faibles fréquences.

Pour faciliter les comparaisons des diagrammes représentatifs des diverses stations, il serait intéressant de définir les droites qui s'ajustent sur les diagrammes, pour deux points caractéristiques. Le premier point caractéristique de la droite d'ajustement est l'intersection avec l'axe des abscisses qui a pour coordonnées $p = 0$ et une valeur de $\log r$ que nous désignerons par $\log r_0$. Le point r, de la courbe expérimentale correspondant à $p = 0$, est très mal connu, comme nous le verrons plus loin, mais il est clair qu'il s'écarte nettement de la droite d'ajustement.

On pourra prendre comme second point caractéristique de la droite, celui dont l'abscisse est $\log \frac{r_0}{10}$. Ce point est toujours situé à la fois sur la courbe et sur la droite d'ajustement, puisque en pratique les stations présentent plus de 10 averses par an, $\frac{r}{10}$ est donc supérieur à N. On désigne par β_1 , l'ordonnée correspondant à $\log \frac{r_0}{10}$.

Gr_1
Pluviométries journalières
rangées



Nous constatons que le produit $r_0 \times p_1$ pour les diverses stations est proportionnel au produit N (nombre d'années) P (pluviométrie moyenne annuelle) :

$$r_0 \times p_1 \times K = N \times P \quad (1)$$

En effet, si on détermine graphiquement pour chacune des 119 stations du MALI et du SENEGAL (stations ayant 10 années ou plus d'observations journalières disponibles), le coefficient K , on vérifie que K est sensiblement constant : sa valeur moyenne est de 0,456.

Les écarts, par rapport à cette valeur, sont très faibles; on peut les préciser comme suit : soit K_i , une des valeurs trouvées pour K , la moyenne étant 0,456, n le nombre de stations pluviométriques, la dispersion est définie par l'écart-type qui est égal à :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 0,456)^2}{n - 1}}$$

on trouve que cet écart-type est égal à 0,009.

Le coefficient de variation qui est égal au rapport de l'écart type à la grandeur aléatoire que l'on étudie, soit ici le rapport K , est égal à $\frac{0,009}{0,456}$, soit 2 %.

Ce coefficient de variation très petit, montre qu'en pratique on peut admettre que K est bien une constante.

L'existence de ce véritable invariant K montre que l'ensemble des distributions des pluviométries journalières que nous avons à étudier obéit à une relation unique et nous allons, dans ce qui suit, chercher une représentation mathématique qui s'approchera le plus possible de cette relation qu'on ne peut pas espérer trouver au stade actuel des études.

Quelle est la signification pratique de la formule trouvée plus haut ? Admettons que la droite d'ajustement coïncide avec la courbe réelle des points représentant p en fonction de n , jusqu'à l'axe des abscisses. L'abscisse r_0 devient alors le nombre total d'observations de jours de pluie.

$\frac{r_0}{N}$ est le nombre de précipitations journalières par an.

si \bar{p} est la moyenne des précipitations journalières

$$P = \frac{r_0}{N} \bar{p}$$

et dans ces conditions la relation (1) s'écrit :

$$K r_0 p_1 = r_0 \bar{p}$$

$$\bar{p} = K p_1$$

or, la distance sur l'axe des abscisses entre le point $\log r_0$ et le point $\frac{r_0}{10}$ est constante et égale à 1. p_1 définit donc la pente des droites d'ajustement.

Si p_1 était constant, c'est-à-dire si \bar{p} était constant pour toutes les stations, toutes les droites seraient parallèles. Ceci n'est pas exact en réalité, et, dans ces conditions, la pente des droites est une fonction linéaire de \bar{p} qui croît légèrement avec P.

Plus la hauteur de précipitation annuelle est grande, plus la pente de la droite augmente, ce qui indiquerait que le nombre de jours de pluie augmenterait moins vite que P. Malheureusement, tout ceci suppose que la courbe expérimentale soit confondue avec la droite d'ajustement, ce qui n'est pas tout à fait exact. Les explications que nous donnons restent donc approximatives. N'ayons pas de regret, le nombre exact de jours de pluie est très difficile à déterminer car les observateurs prennent de la rosée pour de la pluie, ne comptent pas parfois les faibles averses, etc... de sorte que, même si la courbe expérimentale s'ajustait jusqu'au bout à la droite, il serait difficile d'arriver à une valeur précise de \bar{p} et, par suite, à une détermination exacte des divers paramètres définissant le faisceau de droites.

B - CHOIX de la RELATION -

Ayant constaté qu'il existait une relation unique définie par un invariant entre les droites s'ajustant sur les courbes expérimentales, nous avons essayé d'ajuster une relation mathématique simple à ce faisceau de courbes expérimentales.

Nous avons envisagé une relation de forme exponentielle et une relation gaussio-logarithmique, le procédé d'analyse étant graphique dans les deux cas. L'accord entre les hauteurs pluviométriques de fréquence

donnée déterminée suivant ces deux lois est très bon jusqu'à la probabilité d'une fois en 10 ans. Cet accord est moins bon pour les probabilités plus rares, la détermination gaussio-logarithmique correspondant à des pluies plus fortes dans tous les cas. La relation exponentielle risque de conduire à des valeurs sous-estimées, ce qui serait dangereux. C'est pour cette raison que notre choix s'est porté sur la relation gaussio-logarithmique.

C - UTILISATION de la LOI GAUSSIO-LOGARITHMIQUE -

M. ROCHE avait déjà étudié la répartition des hauteurs des pluies journalières tropicales (non cycloniques) sur un certain nombre de stations d'Afrique comprises entre le 4ème parallèle Sud et le 17ème parallèle Nord. En considérant les hauteurs comme une suite de variables aléatoires indépendantes, il a admis qu'elles suivaient une loi gaussio-logarithmique tronquée.

Avant de préciser l'expression de cette relation, il semble nécessaire de procéder à un bref rappel des définitions correspondant à ce type de loi.

Une loi gaussique est de la forme :

$$F(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{s} \right)^2} dx$$

$F(x)$ étant la probabilité ou le nombre de chances sur 100 pour que la variable aléatoire étudiée soit inférieure ou égale à la valeur de x . Pour une valeur de x exceptionnellement forte, $F(x)$ est très voisin de 1. On utilise plus fréquemment la probabilité au dépassement qui est égale à $1 - F(x)$.

\bar{x} est la moyenne arithmétique de la variable aléatoire x .

$$s \text{ est son écart-type} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

On écrit plus fréquemment la formule de GAUSS sous sa forme réduite :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2} u^2} du \text{ avec } u = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

Les valeurs de $F(x)$ sont fournies par les tables de l'intégrale de GAUSS en fonction de u que l'on appelle l'écart réduit.

La courbe représentant

$$e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{s} \right)^2}$$

est symétrique, ce qui signifie que les valeurs très fortes ou très faibles de la variable, qui ont le même écart par rapport à \bar{x} , ont la même probabilité. Autrement dit, si on considère des précipitations annuelles, si $\bar{x} = 1400$ mm et si l'année décennale humide est de 2000 mm, l'année décennale sèche, donc de même probabilité, présenterait une hauteur de précipitation égale à $1400 - (2000 - 1400) = 800$ mm. Ceci n'est pas vrai pour de nombreux phénomènes, par exemple, la courbe des hauteurs d'averses journalières est asymétrique. On revient alors à la loi de GAUSS en prenant une valeur réduite égale à une fonction linéaire du logarithme de la variable :

$$u = a + b \log x$$

On a ainsi une loi gaussio-logarithmique.

En toute rigueur on devrait, pour une station pluviométrique donnée, considérer la collection de tous les relevés journaliers, y compris les valeurs $x = 0$, c'est-à-dire les jours pour lesquels il n'a pas plu. Pour une année (non bissextile), on disposerait donc de 365 valeurs. Or, dans bien des applications, on ne considère que les hauteurs de précipitations supérieures à une limite donnée et plus fréquemment à la limite 0 ; c'est-à-dire qu'on ne prend en compte que les valeurs non nulles. On a affaire, dans ce cas, à ce qu'on appelle une distribution tronquée.

Si $F_1(x)$ est la probabilité pour que la hauteur de précipitation journalière soit supérieure ou égale à x (en rapportant cette probabilité aux 365 hauteurs journalières de l'année y compris les jours à précipitation nulle), $F_1(0)$ la probabilité pour que la hauteur de pluie soit supérieure à 0 (par exemple, si le nombre de jours de pluie est en moyenne de 122 jours par an, $F_1(0) = \frac{1}{3}$), $\frac{F_1(x)}{F_1(0)}$ est la probabilité tronquée.

Ceci étant posé, la loi logarithmique s'écrit comme suit :

$$\frac{F_1(x)}{F_1(0)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

$$\text{avec } u = \frac{\log x - \overline{\log x}}{s}$$

- $F_1(x)$ est la probabilité pour que x soit supérieure ou égale à x , (probabilité rapportée au nombre total de jours pendant la durée d'observation).
- $F_1(0)$ est la probabilité pour que la hauteur ne soit pas nulle.
- $\overline{\log x}$ est la moyenne de toutes les valeurs de $\log x$, en ne considérant que les jours pluvieux.
- s est l'écart-type de $\log x$.

L'expérience montre que l'ajustement ne se fait correctement entre la loi gaussio-logarithmique et la courbe expérimentale qu'en prenant $F_1(0)$ un peu inférieur à la valeur expérimentale. La détermination directe de $\overline{\log x}$ et s serait beaucoup trop laborieuse ; on utilisera pour chaque station des procédés graphiques.

Dans ces conditions, les opérations à effectuer pour chaque station pluviométrique sont les suivantes :

- rangement des hauteurs pluviométriques journalières par ordre décroissant et détermination de leur fréquence tronquée $\frac{F_1(x)}{F_1(0)}$. Pour la valeur de $F_1(0)$ on prendra, pour un premier essai, les $\frac{2}{3}$ de la valeur expérimentale.
- pointage sur papier gaussio-logarithmique en portant en abscisse (échelle logarithmique) la hauteur en mm et en ordonnée (échelle gaussique) la fréquence tronquée expérimentale correspondante (voir graphique 2).

En pratique, on prend les 20 premières valeurs, puis on ne considère que les averses, de 10 en 10 mm, jusqu'à la hauteur 10 mm.

- Les points doivent s'aligner, en vertu de la relation indiquée plus haut, pour la majeure partie de la courbe ainsi tracée. On vérifie l'alignement des points. Si l'alignement est insuffisant, on procède à un nouvel essai avec une autre valeur de $F_1(0)$. Nous reviendrons plus loin sur le choix de $F_1(0)$.

- Une fois les points alignés le mieux possible, on peut déterminer sur le graphique les valeurs de $\overline{\log x}$ et de s qui servent avec la valeur de $F_1(0)$ choisie, à calculer les hauteurs x correspondant aux probabilités $F_1(x)$ données. Cette détermination est facile :

en effet : $\log x = \overline{\log x}$ correspond à $u = 0$ et pour $u = 0$ $\frac{F_1(x)}{F_1(0)}$, fréquence tronquée, est égale à $\frac{1}{2}$. Il suffit, sur le graphique, de prendre l'abscisse correspondant à cette valeur de l'ordonnée.

D'autre part, s est la pente de la droite par rapport à l'axe des ordonnées. On la détermine pratiquement en considérant le point d'ordonnée $\frac{F_1(x)}{F_1(0)} = 0,001$.

Il semblerait que la détermination de $\overline{\log x}$ et de s soit inutile puisqu'il suffit, pour trouver x correspondant à la valeur $F_1(x)$ donnée, de porter $\frac{F_1(x)}{F_1(0)}$ en ordonnée sur la droite représentative de la

relation générale, laquelle est déterminée graphiquement. Mais dans les recherches qui ont précédé la mise au point des cartes de précipitations journalières de faible fréquence, il était très important de vérifier si les paramètres $F_1(0)$, s et $\overline{\log x}$ présentaient, entre eux, avec la hauteur de précipitation moyenne ou avec la latitude des relations simples. On verra plus loin que cette recherche n'a pas donné des résultats très satisfaisants.

Si la détermination graphique de $\overline{\log x}$ et de s **ne présente** pas de difficulté, il n'en est pas de même de $F_1(0)$; en effet, pour une variation notable de cette valeur, les points restent alignés. Mais heureusement, comme on va le voir par l'exemple suivant, une mauvaise détermination de $F_1(0)$ n'a pas une grosse influence sur $\overline{\log x}$ et s et encore moins sur les valeurs obtenues pour les hauteurs de précipitations de probabilité rare.

Prenons l'exemple d'une station pour laquelle la relation gaussio-logarithmique soit exactement définie par :

$$F_1(0) = 0,100 \quad s = 0,300 \quad \overline{\log x} = 1,173$$

Supposons que, au lieu de prendre $F_1(0) = 0,100$, on ait pris $F_1(0) = 0,080$ ou $F_1(0) = 0,125$. Portons graphiquement les points représentatifs obtenus en divisant $F_1(x)$ expérimental par $F_1(0)$ et en portant en abscisse x correspondant pour des valeurs de x variant de 5 et 5 mm. On constate que sur les deux diagrammes nouveaux les points restent sensiblement alignés pour des valeurs de x comprises entre 25 et 100 mm. Déterminons graphiquement $\overline{\log x}$ et s pour ces deux nouvelles droites, ainsi que les hauteurs journalières de faible probabilité ; on obtient le tableau ci-dessous :

$F_1(0)$	0,080	0,100	0,125
$\overline{\log x}$	1,230	1,173	1,114
s	0,286	0,300	0,315
Hauteurs journalières de probabilité annuelle	56,4 mm	56,2 mm	56,1 mm
1 fois en 2 ans	68,4	68,4	68,4
5	86,1	86,5	87,1
10	101	101,5	102
20	116,5	118	120
50	140	142	145
100	159	162	167

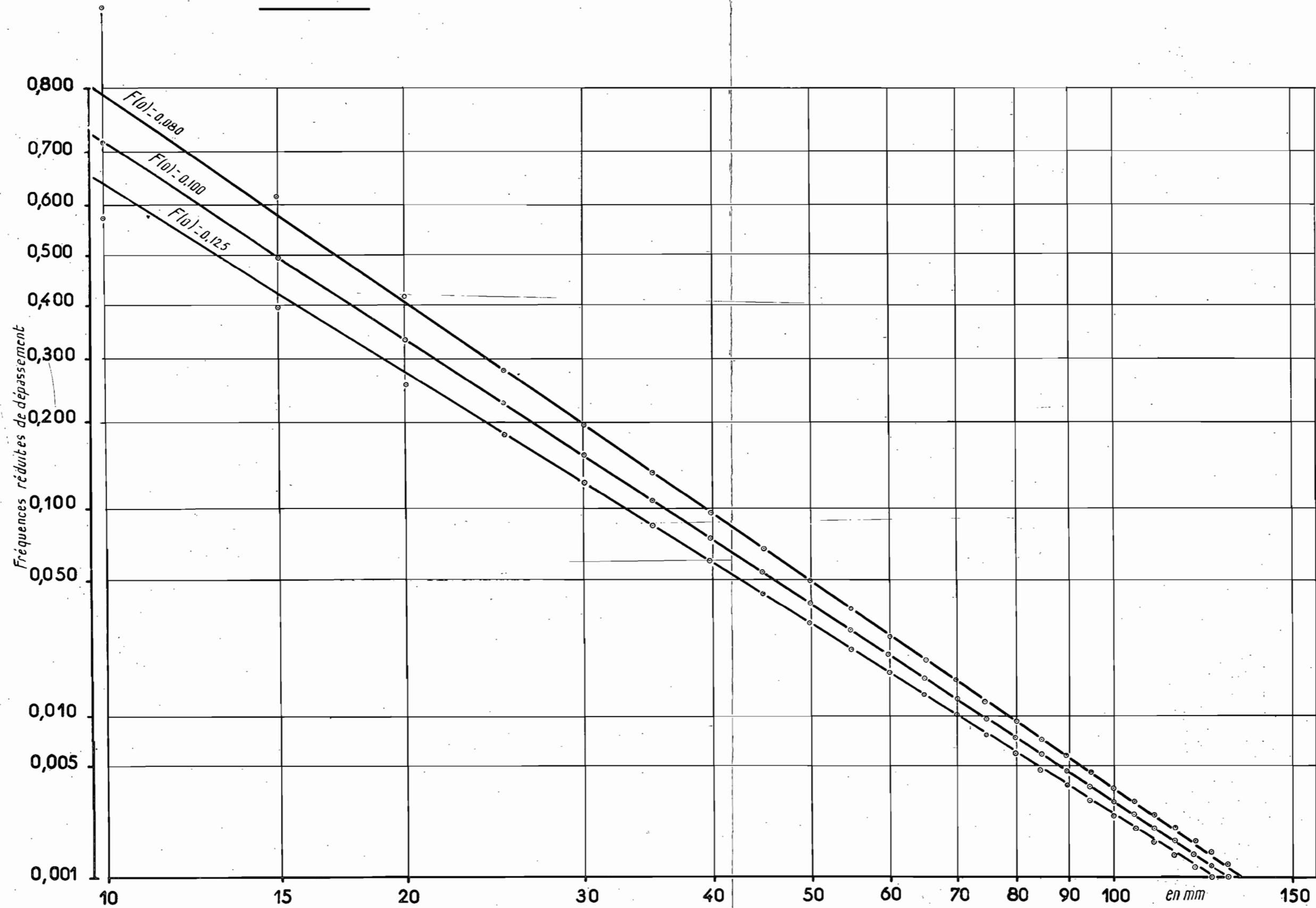
Malgré une forte variation de $F_1(0)$, les valeurs extrêmes de la hauteur de pluie décennale 101 et 102 mm sont très voisines, et même pour la précipitation centenaire, l'écart est encore très acceptable.

L'incertitude sur le choix de $F_1(0)$ est donc sans conséquence grave sur le résultat. Par contre, elle introduit une certaine dispersion dans la comparaison des valeurs d'un même paramètre pour diverses stations.

Loi gaussio-logarithmique de répartition

Gr_2

Détermination des paramètres



III - RESULTATS de l'ANALYSE -

Le tableau I ci-après résume les résultats obtenus en analysant, par une loi gaussio-logarithmique, les relevés de 57 stations du SENEGAL pour lesquelles nous avons 10 années ou plus de relevés journaliers.

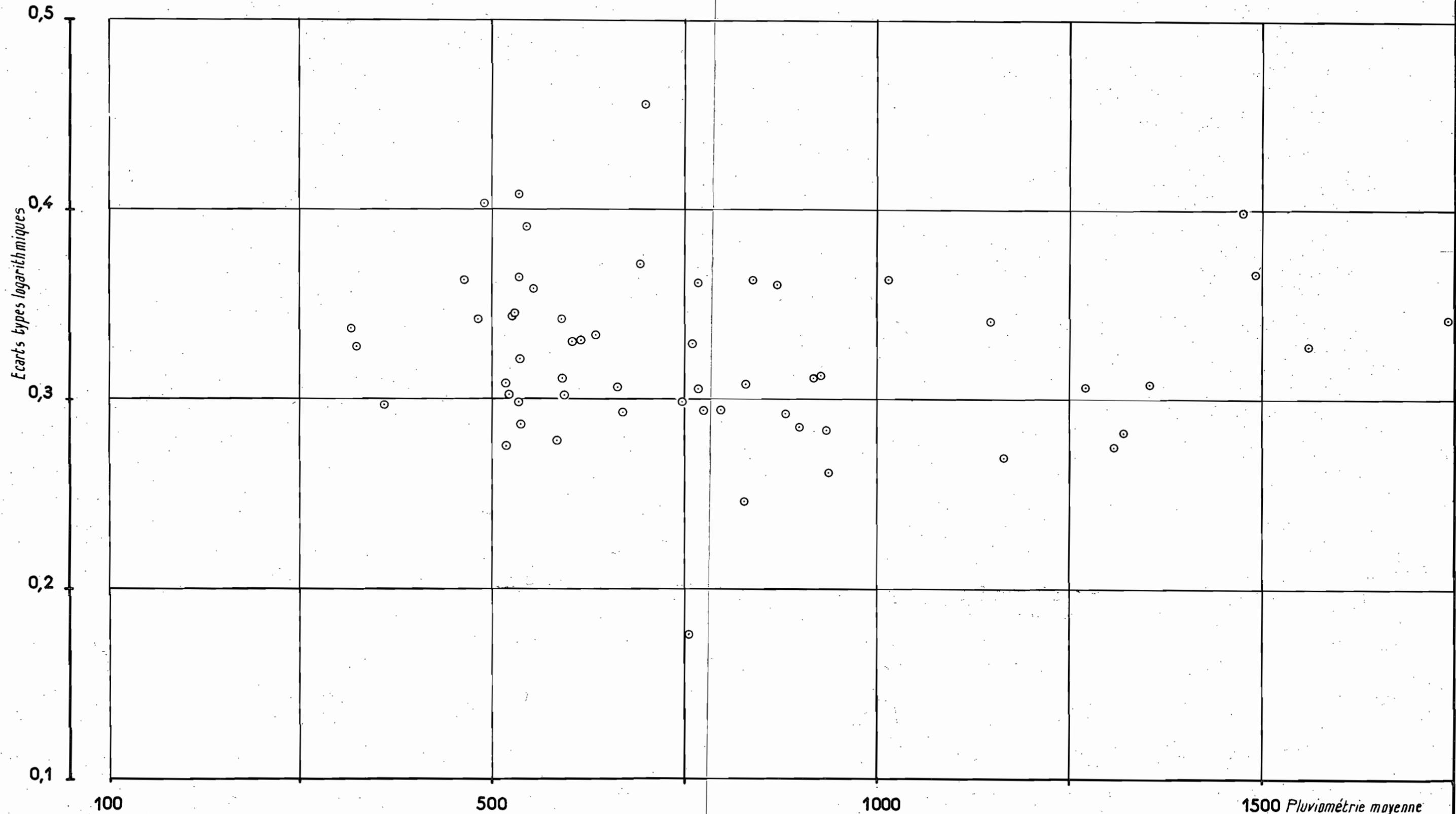
Nous donnons par station :

- la hauteur pluviométrique moyenne annuelle en millimètres,
- le nombre d'années d'observation,
- les valeurs obtenues graphiquement pour $F_1(0)$, $\overline{\log x}$ et s qui déterminent la loi de répartition. On en déduit, dans chaque cas, les hauteurs de précipitations correspondant aux diverses fréquences,
- les valeurs en millimètres des hauteurs journalières de probabilité annuelle, une fois en 2 ans, une fois en 5 ans, une fois en 10 ans, une fois en 20 ans, une fois en 50 ans et une fois en 100 ans,
- on a ajouté, à côté de ces valeurs calculées, les valeurs expérimentales en mm des hauteurs journalières de fréquence annuelle, une fois en 2 ans et une fois en 5 ans, telles qu'elles résultent du simple classement des pluviométries journalières.

L'accord entre les valeurs calculées et valeurs expérimentales est bon pour les probabilités annuelles et de 1 fois en deux ans, moins bon pour la probabilité 1 fois en 5 ans, ce qui est normal puisque les stations présentent des périodes d'observations portant en général sur moins de 40 ans. L'échantillon est alors insuffisant pour déterminer une valeur précise de l'averse quinquennale et la valeur extrapolée à partir de la droite ajustée est plus sûre.

Gr_3

Ecart s types logarithmiques



TABIEAU I

HAUTEURS de PRECIPITATIONS JOURNALIERES EXCEPTIONNELLES
aux DIVERS POSTES d'OBSERVATIONS

Stations	$F_1 (e)$	$\log x$	σ	Nombre d'années	Moy. an	annuelle calc: exp	1/2 ans calc: exp	1/5 ans calc: exp	1/10 calc: exp	1/20 calc: exp	1/50 calc: exp	1/100 calc: exp
PODOR	0,0521	1,097	0,337	42	317	44,0: 43,8	56,2: 54,5	75,0: 75,4	91,1: 109	136	159	
DAGANA	0,0439	1,172	0,327	39	325	47,2: 47,0	60,5: 63,8	80,4: 77,2	97,5: 116,5	145	170	
ST. LOUIS Ville	0,0322	1,306	0,297	34	359	51,8: 51,2	65,8: 64,4	86,3: 75,5	104: 122,5	150	173	
LOUGA	0,0761	1,093	0,363	36	464	55,7: 56,0	71,4: 66,0	95,8: 96,3	117: 141	178	209,5	
BAKEL	0,0522	1,180	0,342	43	483	54,3: 54,3	69,4: 72,5	93,2: 88,5	113,5: 136,5	170,5	200	
KELEMER	0,0830	1,030	0,403	11	489	59,0: 63,0	77,5: 73,8	107: 105,9	133,5: 164	211	252,5	
BARKEDJI	0,0702	1,200	0,308	13	518	55,3: 52,0	68,6: 68,4	88,1: 90,0	104,5: 123	149,5	172	
COKI	0,0476	1,322	0,275	23	519	56,8: 56,0	69,9: 72,8	88,5: 88,4	104: 120,5	144,5	164,5	
MATAM	0,0652	1,255	0,302	42	522	59,6: 59,0	74,0: 75,0	94,9: 97,2	112,5: 131,5	160	183,5	
DARA	0,0671	1,189	0,345	24	529	61,7: 56,0	78,5: 73,3	104: 108,1	126,5: 151	189	220	
DAROUHOUSTY	0,0703	1,161	0,344	13	527	58,7: 62,0	74,3: 72,5	98,4: 98,0	119: 142,5	177,5	207,5	
YANG YANG	0,0576	1,280	0,298	38	535	59,9: 60,0	74,3: 71,5	95,3: 98,0	113: 132	160,5	184	
LINGUERE	0,0811	1,117	0,364	27	534	60,3: 60,9	77,8: 79,0	104: 91,5	127: 153	192	226	
DAKAR Hopital	0,0889	1,044	0,408	44	534	64,1: 66,0	84,1: 85,7	116: 106,3	145: 179	230	262	
DAKAR OUAHAN	0,0652	1,198	0,321	21	538	56,6: 56,7	71,0: 70,9	92,5: 88,8	110,5: 131	161	186	
SAGATA LOUGA	0,0652	1,230	0,286	14	538	53,0: 56,0	64,9: 70,0	82,0: 80,4	96,4: 112	134,5	153	
DAKAR BEL AIR	0,0703	1,113	0,391	13	544	63,4: 63,8	83,2: 89,0	114,5: 106,0	142: 174	224	267	
DAKAR HANN	0,0685	1,172	0,371	20	556	66,4: 65,4	85,9: 80,3	116: 91,4	143: 174,0	220	261	
M'BAO	0,0553	1,378	0,278	33	585	68,7: 70,0	84,0: 84,8	106: 102,6	124: 144,5	172,5	196,5	
DAKAR YOFF	0,0731	1,198	0,342	15	591	64,1: 67,2	81,1: 79,4	107: 94,2	129,5: 154,5	192,5	224,5	
THILMAKA	0,0869	1,200	0,311	21	592	60,0: 59,0	74,0: 75,7	94,6: 100,8	112: 131	159,5	179,5	
SAGATA LINGUERE	0,0480	1,370	0,302	19	594	70,4: 68,8	88,1: 87,0	114: 112,2	136: 160,5	195,5	225	
RUFISQUE	0,0438	1,370	0,330	25	604	75,2: 75,5	96,5: 88,6	129: 120,2	156,5: 187	233	272	
TIVAOUANE	0,0668	1,245	0,331	41	616	66,2: 66,4	83,4: 86,2	109,5: 108,7	132: 156,5	194	220	
M'BAKE	0,0830	1,202	0,334	22	635	65,4: 64,0	81,9: 88,0	107: 109,4	129: 153,5	188,5	218,5	

TABLEAU I (Suite 1)

HAUTEURS de PRECIPITATIONS JOURNALIERES EXCEPTIONNELLES
aux DIVERS POSTES d'OBSERVATIONS

Stations	F ₁ (o)	log x:	σ	Nombre d'années	Moy. an	annuelle		1/2 ans		1/5 ans		1/10:	1/20:	1/50:	1/100:
						calc	exp	calc	exp	calc	exp	calc	calc	calc	calc
KOMBOLE	0,0685	1,285	0,306	20	663	66,2	66,5	81,8	81,0	104,5	95,0	125	146,5	178	204,5
DIOURBEL	0,0587	1,319	0,293	42	669	64,7	65,0	80,0	76,8	102	105,7	120,5	140	170	194,5
THIES	0,1104	0,938	0,456	31	699	67,9	68,0	91,2	99,9	130,5	146,8	165,5	208	275	336
BAMBEY	0,1141	1,109	0,371	32	693	69,6	69,0	88,1	84,0	117,5	119,9	143	172	216	254
NAMARY	0,0322	1,600	0,176	17	755	69,4	68,4	80,0	82,9	94,0	93,8	104,5	115,5	130,5	142
M'BOUR	0,0596	1,346	0,329	27	759	79,6	81,0	100,5	99,0	132,5	121,6	159,5	190	235	273
KIDIRA	0,0782	1,284	0,299	35	748	67,0	67,0	82,1	79,5	104,5	105,0	123	143,5	173,5	198,5
KAFFRINE	0,0811	1,257	0,305	27	767	65,2	65,0	80,5	78,8	102,5	105,4	121	141,5	171,5	197
GOUDIRY	0,0961	1,277	0,294	21	798	67,9	65,5	82,6	78,7	104	105,1	122	141,5	170	194
M'BOSS	0,0761	1,295	0,294	12	776	66,7	73,4	81,5	81,6	103,5	98,2	122	141,5	170,5	194,5
FATICK	0,0562	1,480	0,246	39	828	77,1	77,5	92,1	89,9	113,5	112,5	130,5	149	174,5	195,5
KAOLACK	0,0708	1,326	0,308	43	830	74,1	74,0	91,8	85,2	118	116,5	140	164,5	200	230
KOUMPENTOUM	0,0902	1,230	0,363	19	840	81,5	83,0	104	90,2	138	115,0	168,5	202,5	253,5	298
THIADIAYE	0,0843	1,216	0,361	13	768	76,2	80,0	97,3	92,6	130	114,8	158	190	238	280
FOUNDIOUGNE	0,0644	1,421	0,292	34	883	83,9	84,0	103,5	104,2	131	125,1	154,5	180	217,5	248
KOUNGHEUL	0,0782	1,330	0,285	28	900	70,2	70,0	85,3	85,5	107,0	115,0	125,5	145,5	174	198
JOAL	0,0761	1,295	0,360	18	871	87,7	86,2	112	111,8	150	149,3	183	220,5	276,5	325
TAMBACOUNDA	0,1057	1,240	0,311	37	918	69,7	70,0	86,0	84,5	109	111,3	128,5	150	182	208,5
GUENETO	0,1014	1,243	0,312	36	927	69,9	70,0	85,5	84,5	104,5	114,1	129	151	183	210
MAKA COULIBENTAM	0,0941	1,302	0,283	23	935	69,2	70,2	83,4	80,0	104	100,5	121,5	140	167,5	189

TABLEAU I (Suite 2)

HAUTEURS de PRECIPITATIONS JOURNALIERES EXCEPTIONNELLES
aux DIVERS POSTES d'OBSERVATIONS

Stations	$F_1(o)$	$\overline{\log x}$	σ	Nombre d'années	Moy. an	annuelle	1/2 ans	1/5 ans	1/10	1/20	1/50	1/100
						calc: exp	calc: exp	calc: exp	calc: exp	calc: exp	calc: exp	calc: exp
NIORO du RIP	0,0527	1,466	0,261	26	938	77,7: 77,0	94,1: 91,8	117,5: 111,9	136,5: 157	186	210	
DIALACOTO	0,1426	1,155	0,363	32	1016	80,6: 80,3	101: 100,0	132,5: 133,4	160: 191	237,5	278	
VELINGARA	0,1691	1,180	0,341	27	1148	81,3: 76,5	100: 115,4	128,5: 153,9	153: 180	220	255	
LINKERING	0,1014	1,370	0,269	15	1166	77,3: 75,5	92,3: 83,7	114: 98,4	131: 150,5	177,5	200	
KOLDA	0,1169	1,315	0,306	39	1271	83,8: 80,5	102: 101,0	129: 131,5	151,5: 176	213	243	
KEDOUGOU	0,1169	1,340	0,275	39	1308	77,1: 77,0	91,6: 90,5	113,5: 101,0	131: 150,5	178	200,5	
SEDHIOU	0,1095	1,361	0,282	50	1321	82,0: 85,3	98,4: 103,8	122: 128,0	142: 163,5	195	220	
IMHOR	0,1170	1,346	0,308	13	1352	90,8: 88,5	110,5: 114,7	140: 131,2	165: 192	232	265,5	
KARTIACK	0,1223	1,281	0,399	16	1474	121: 120,0	155,5: 149,6	211: 173,0	260: 317	406,5	481	
DILOULOU	0,1303	1,315	0,366	21	1491	114,5: 113,4	140: 145,5	190,5: 201,6	231: 270	344	404	
ZIGUINCHOR	0,1304	1,346	0,328	42	1560	103: 106,9	127: 127,0	162: 159,9	193: 226	276	318	
OUSSOUYE	0,1317	1,366	0,342	26	1739	115,5: 115,0	143,5: 143,8	185,5: 169,4	222: 262,5	323	374	

IV - DISCUSSION des RESULTATS de l'ANALYSE -

Les stations ont été classées dans le tableau 1 par région et par hauteur de précipitation annuelle croissante. Il serait ainsi facile de dégager a priori des tendances générales dans les variations des divers paramètres.

A part quelques points aberrants, on voit que $F_1(0)$ croît nettement avec la hauteur de précipitation annuelle et passe de 0,5 environ à 0,13, ce qui est normal ; $\log x$ croît également avec une dispersion plus grande de 1,1 environ à 1,35.

Les relations avec s sont moins nettes. On a porté sur un graphique les valeurs des écarts-types s de $\log x$ telles qu'elles résultent du tableau 1. La dispersion est très grande, on note en particulier la valeur 0,456 pour THIES et 0,176 pour NAMARY. Il semble que s soit vaguement constant quelle que soit la hauteur de précipitation annuelle. Pour l'ensemble des 97 stations - 1573 années d'observations - la moyenne pondérée des écarts-types est de 0,320. Le coefficient de variation est de 11 %, ce qui met bien en lumière la dispersion.

Il est évident qu'un certain nombre de points aberrants correspondent à des valeurs aberrantes de $F_1(0)$. On serait tenté, après ce qui a été dit plus haut, de choisir $F_1(0)$ de façon à ce qu'il varie régulièrement du haut en bas du tableau 1. Mais nous verrons plus loin que la dispersion dans les valeurs de $F_1(0)$ s et $\log x$ est due certainement, pour quelques stations, à des causes physiques indépendantes de la faible valeur de l'échantillon statistique et des erreurs qui pourraient être introduites par suite de la part d'arbitraire qui intervient dans les opérations d'ajustement. Dans ces conditions, choisir $F_1(0)$ de telle façon qu'il varie bien régulièrement avec la hauteur de précipitation annuelle, reviendrait à fausser les données brutes disponibles, ce qu'il convient d'éviter à tout prix, au stade actuel des études tout au moins.

Malgré les recherches effectuées dans plusieurs directions, nous n'avons pas pu lier individuellement les constantes de la répartition $F(0)$ s et $\log x$ à la hauteur de précipitation annuelle. Ceci tient, en partie, pour le SENEGAL, à la diversité des régimes pluviométriques. En effet, vers DAKAR et ST-LOUIS, le front des alizés intervient dans le régime des précipitations.

- Il est notoire que sur la côte les précipitations journalières de faible fréquence sont plus fortes que dans l'intérieur, à hauteurs de précipitation annuelle égales.

- Enfin, entre le climat de la CASAMANCE et celui du FERLO, il y a des différences telles qu'il serait bien extraordinaire que les relations générales puissent s'appliquer sans correction.

Une autre cause de dispersion correspond à des microclimats locaux. Les quelques études, du genre de celle-ci, qui ont déjà été effectuées, par exemple celle du bassin du KOUILOU, ont montré que certaines stations subissaient fréquemment des orages violents et que d'autres, au contraire, ne voyaient que rarement de tels phénomènes.

Les stations sont généralement très éloignées les unes des autres, de sorte qu'une étude systématique de ces singularités locales est impossible. Cependant, dans la région de DAKAR, bien connue pour la répartition irrégulière des averses orageuses, il y a cinq stations assez rapprochées les unes des autres (elles sont distantes de moins de 6 km), pour qu'on puisse avoir une idée des répercussions de cette hétérogénéité sur les hauteurs d'averses exceptionnelles. Les résultats de cette étude sont portés sur le tableau ci-dessous :

Stations	Moyenne	Nombre d'années	Pluviométrie journalière de probabilité annuelle : 1 f. en 10 ans :	
DAKAR HOPITAL	534 mm	44	64,1	145
OUAKAM	538	21	56,6	110,5
BEL AIR	544	13	63,4	142
HANN	556	20	66,4	143
YOFF	591	15	64,1	129,5

Notons que OUAKAM et HANN, qui sont à 5 km l'un de l'autre, ont la même période d'observation.

Mais, dans le cas présent, l'hétérogénéité spatiale de la distribution des fortes averses n'est pas seule à intervenir; le nombre d'années d'observation ou, comme disent les statisticiens, la dimension de l'échantillon, peut être insuffisant.

Afin de voir l'influence de l'échantillon, nous avons analysé tout particulièrement quatre séries de 20 années, chacune tirée de ces stations ; en voici les résultats, la quantité $F_1(0)$ ayant été choisie égale à 0,0685 pour chacune des quatre séries.

	OUAKAM		HANN		HOPITAL 20 premières années		HOPITAL 20 dernières années	
	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.
Moyenne	552		556		540		570	
log x	1,180		1,172		1,186		1,160	
s	0,340		0,371		0,356		0,396	
Hauteur de probabilité annuelle	59,6	60,0	66,4	65,4	64,4	62,5	71,3	70,5
1 fois en 2 ans	75,5	72,8	85,9	80,3	82,6	85,7	94,0	91,9
5	99,8		116,5		110,5		130	
10	121		143		135		162	
20	144		174		162,5		200	
50	179		220		204		257	
100	209		260		240		307	

L'exemple des deux séries de DAKAR HOPITAL, montre bien l'influence de l'échantillon. Dans le cas présent, une période de 20 ans semble tout à fait insuffisante pour déterminer même l'averse quinquennale et il est possible que les divergences entre les résultats des 3 séries de HANN et de DAKAR HOPITAL proviennent uniquement de périodes d'observations

trop courtes, comme pourront le vérifier les statisticiens dans le nota ci-dessous (1).

Les exemples qui précèdent montrent l'influence des singularités locales et de la durée de la période d'observations ; un déplacement de l'appareil de quelques kilomètres, au vent ou sous le vent, en haut ou en bas d'un accident orographique peut, sans modifier beaucoup le total annuel, donner lieu à des averses exceptionnelles nettement plus fortes ou plus faibles.

D'autre part, des séries d'observations trop courtes peuvent conduire à des évaluations nettement différentes des averses exceptionnelles. L'étude effectuée a porté sur des séries de 20 ans ; des périodes de 30 à 40 ans donnent certainement lieu à une sûreté plus grande dans nos calculs, mais il est possible que, dans certains cas, une durée de 40 ans ne soit pas suffisante pour obtenir, même après ajustement de la relation gaussio-logarithmique, un résultat assez précis.

Tout ceci montre qu'il n'y a pas lieu de se scandaliser des valeurs aberrantes du tableau I, et il n'y a pas beaucoup d'espoir de les éliminer complètement.

Mais il ne faudrait pas en déduire non plus que, par suite de l'existence de ces assez nombreux points aberrants, toute généralisation et toute interpolation sont impossibles. La situation de la presque île du CAP VERT, sans être exceptionnelle, ne correspond pas au cas général de l'Afrique de l'Ouest, où le relief assez monotone est garant d'une certaine homogénéité. On retiendra simplement, lorsqu'on utilisera les cartes de précipitations exceptionnelles, qu'il existe des singularités locales qu'il convient de ne pas négliger.

Quant à la connaissance des précipitations exceptionnelles, dans le cas général, notons que les données du tableau I seront traduites sur une carte, ce qui éliminera automatiquement les points aberrants.

(1) Nous avons appliqué à ces estimations "graphiques" les méthodes d'analyse de la variance. Le rapport du test F de SNEDECOR est égal à 2,13 et, en tenant compte du nombre de degrés de liberté, il y a une probabilité de 5 % pour que cette quantité soit supérieure à 2,60 par le simple effet du hasard en supposant que les quatre séries ont la même moyenne logarithmique. La quantité B du test BARTLETT est égale à 11,65 : sa distribution est celle de χ^2 avec 3 degrés de liberté ; il y a une probabilité de 1 % pour que cette quantité soit supérieure à 11,24 par le simple effet du hasard en supposant que les quatre séries ont la même variance. Le cas de OUAKAM semble particulier, il est presque certain qu'il s'agit d'un site plus "abrité", mais il est très vraisemblable que les trois autres séries proviennent de la même population et l'on pourrait sûrement, en faisant varier $F_1(0)$, déterminer graphiquement $\log x$ et s de façon à améliorer les probabilités des tests de SNEDECOR et de BARTLETT sans pour cela modifier beaucoup, d'ailleurs, les hauteurs calculées de probabilité rare.

V - EXPLOITATION des RESULTATS -

Les valeurs qui nous semblent déterminées avec le plus de précision sont celles des pluviométries journalières de probabilité annuelle. C'est pourquoi nous avons rapporté les hauteurs de fréquence plus faible à la hauteur de fréquence annuelle. Nous avons donc porté sur des graphiques les rapports, station par station, des hauteurs de probabilité 1 fois en 2 ans, en 5 ans, en 10 ans, en 20 ans à cette hauteur de probabilité annuelle en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle.

La dispersion des points des graphiques croît lorsque la probabilité décroît (nous donnons en annexe les graphiques correspondant à 1/2 et 1/10), mais il ne semble pas que le rapport soit fonction de la longitude. Nous avons tracé sur chaque graphique une courbe moyenne représentant la variation de ce rapport avec la hauteur moyenne annuelle. Ces courbes sont reproduites sur le graphique ci-après.

Nous avons tracé, sur les cartes jointes, le réseau des isohyètes moyennes annuelles de 100 en 100 mm et le réseau des lignes d'égalés hauteurs (de 5 mm en 5 mm) des pluviométries journalières de probabilité une fois par an.

Cette carte est moins précise que la précédente : pour tracer les lignes, nous avons utilisé les différentes déterminations malgré leur dispersion, en tenant compte du nombre d'années d'observations.

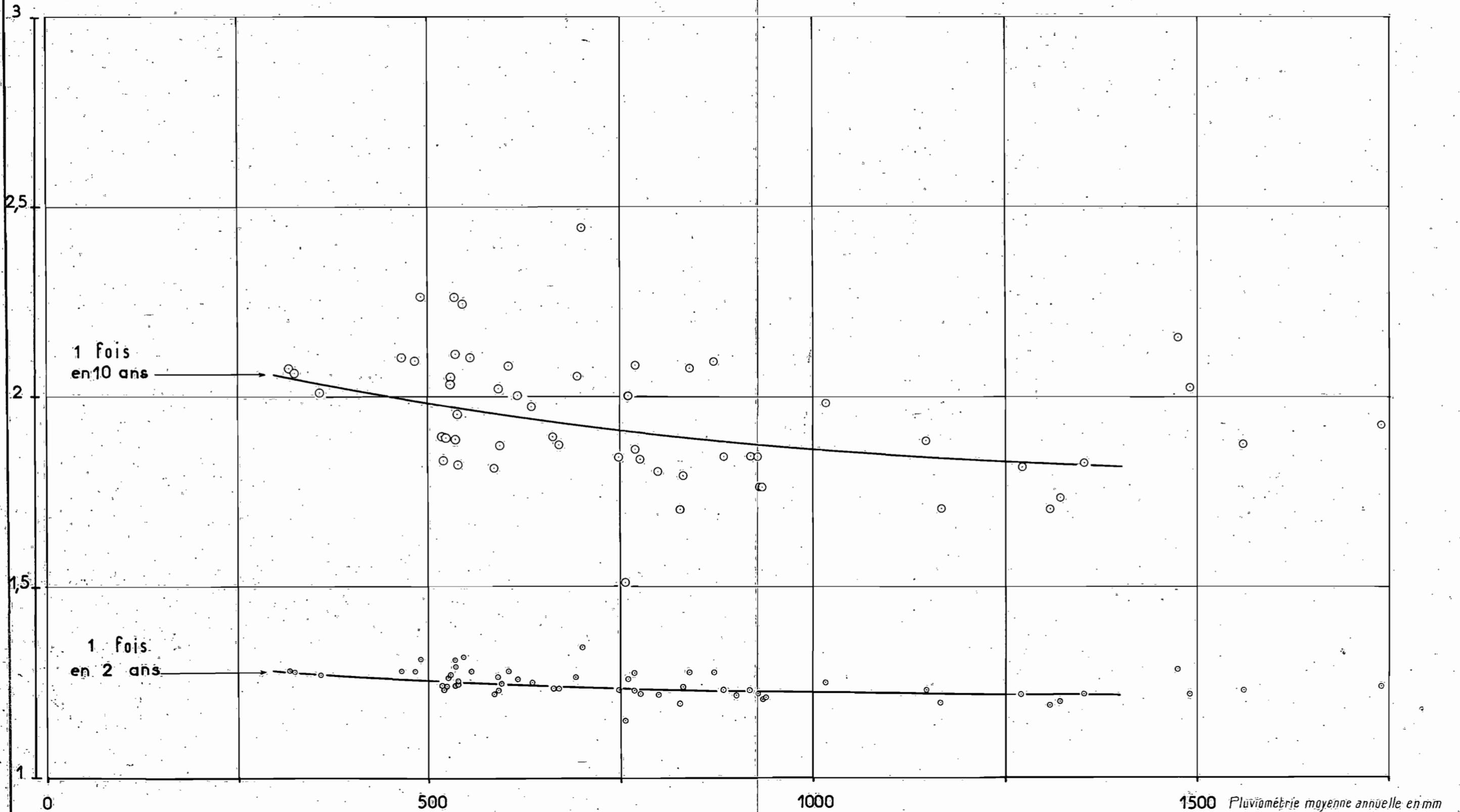
L'ensemble des deux cartes et du graphique précédent permettent de déterminer, avec une précision qu'il est difficile de chiffrer, des hauteurs pluviométriques journalières ponctuelles jusqu'à la probabilité 1 fois en 20 ans. Nous n'avons pas osé aller au-delà. On trouvera ci-contre la carte des précipitations décennales.

Nous remarquons que les lignes d'égalés hauteurs journalières de probabilité annuelle ne suivent pas le tracé des isohyètes : cette hauteur journalière diminue très nettement le long d'une isohyète annuelle lorsque l'on va vers l'Est.

Pour calculer en un point quelconque la hauteur de précipitation correspondant à une fréquence qui ne soit ni annuelle, ni décennale, on cherchera sur la carte (graphique 7), la hauteur de précipitation moyenne annuelle, sur la carte (graphique 8), la hauteur journalière de probabilité annuelle, et, sur le graphique 6, en fonction de la hauteur de précipitation annuelle trouvée sur la carte 7 et de la fréquence donnée (1 fois en 5 ans ou en 20 ans), la valeur du rapport entre précipitation de fréquence annuelle et celle de la fréquence donnée. Il suffira alors de multiplier par ce rapport la hauteur de fréquence annuelle trouvée sur la carte 8 pour obtenir la hauteur de fréquence cherchée. La fréquence la plus courante

Gr_5

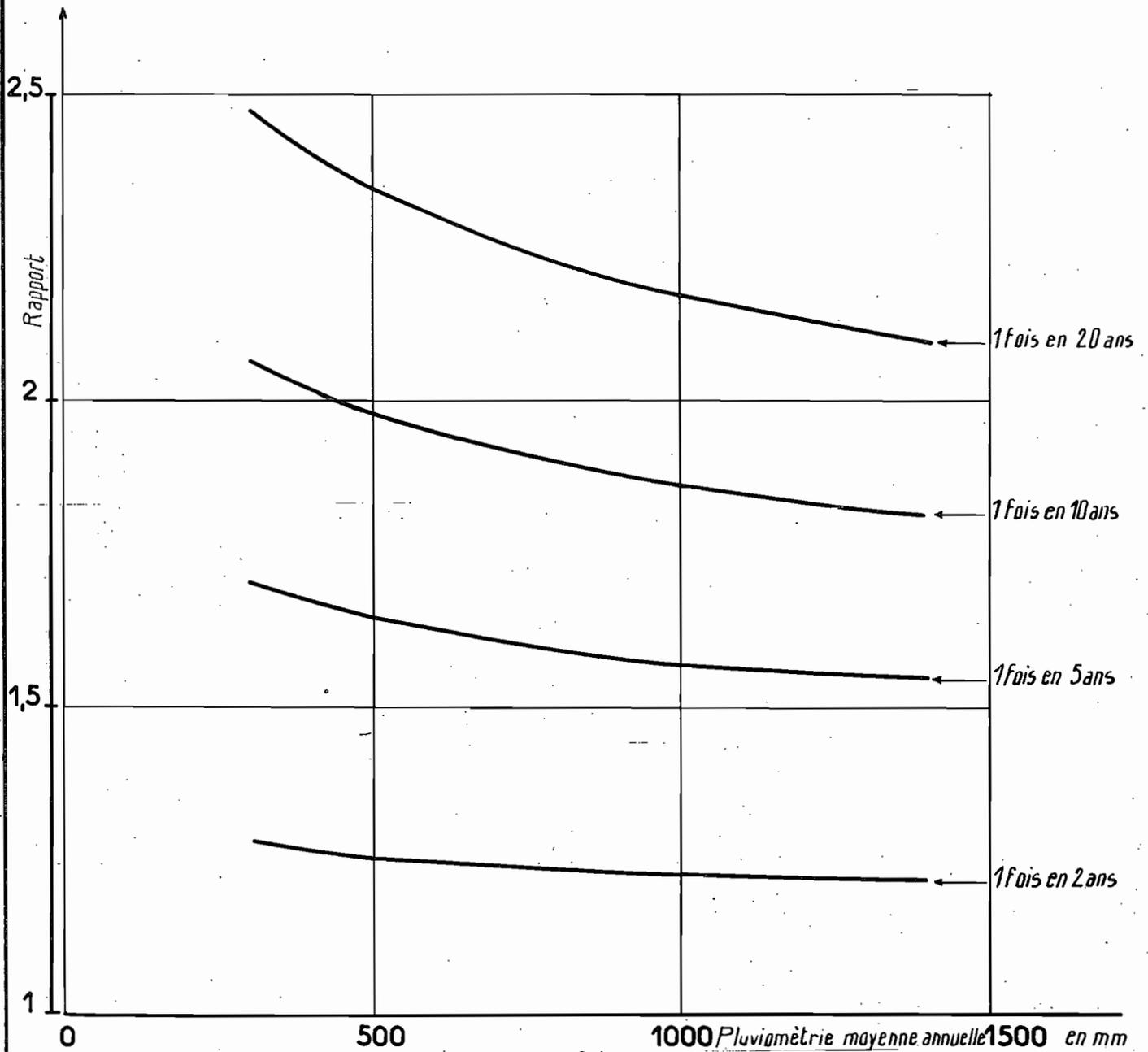
Rapport à la hauteur journalière de probabilité annuelle
de la hauteur de probabilité
1 fois en 10 ans - 1 fois en 2 ans



SÉNÉGAL

Gr_6

Rapport des hauteurs journalières de diverses probabilités à la hauteur de probabilité annuelle



utilisée étant la fréquence décennale, c'est la raison pour laquelle nous avons jugé utile de faire ces opérations et d'établir la carte correspondant à cette fréquence (graphique 9).

Les données fournies par ces cartes ne tiennent pas compte des singularités locales ; elles correspondent à des situations moyennes. Pour une zone de faible étendue qui, de façon notoire, serait particulièrement exposée aux orages, il faudrait majorer les valeurs de la carte de 10 à 20 %. Pour une surface assez étendue, par exemple au-delà de 20 à 25 km², de telles singularités s'estompent dans la moyenne.

W 18°

SÉNÉGAL

Isohyètes annuelles

Gr_7

Echelle 1/2.500.000

N 16°

14

Dakar

Rufisque

Thies

Khombola

Bambey

M'Bour

Fatick

Foundiougne

Kaolack

Kaffrine

Niara du Rip

Maka Kolibantan

Gueneto

Dialacoto

Velingara

Kolda

Ziguinchor

Sedhiou

Dassouy

Bakel

Kidira

Goudiry

Tambacounda

Kedougou

300

400

500

600

700

800

900

1000

1400

1500

1600

1700

1800

Dagana

Podor

S^t Louis

Louga

Coki

Yang-Yang

Dara

Linguere

Thilmaka

M'Baké

Diourbel

Koungheul

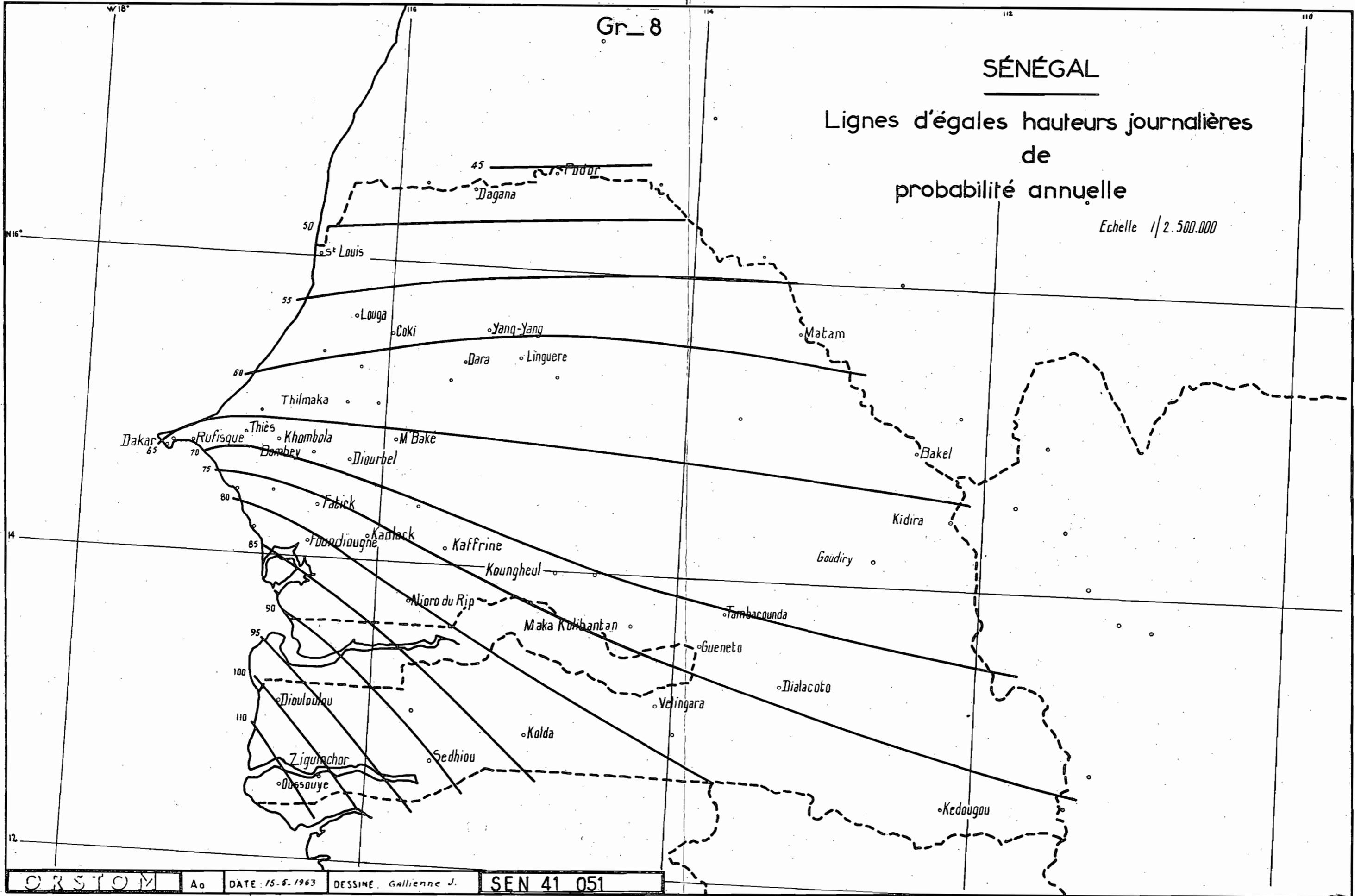
Kedougou

Gr_8

SÉNÉGAL

Lignes d'égales hauteurs journalières de probabilité annuelle

Echelle 1/2.500.000



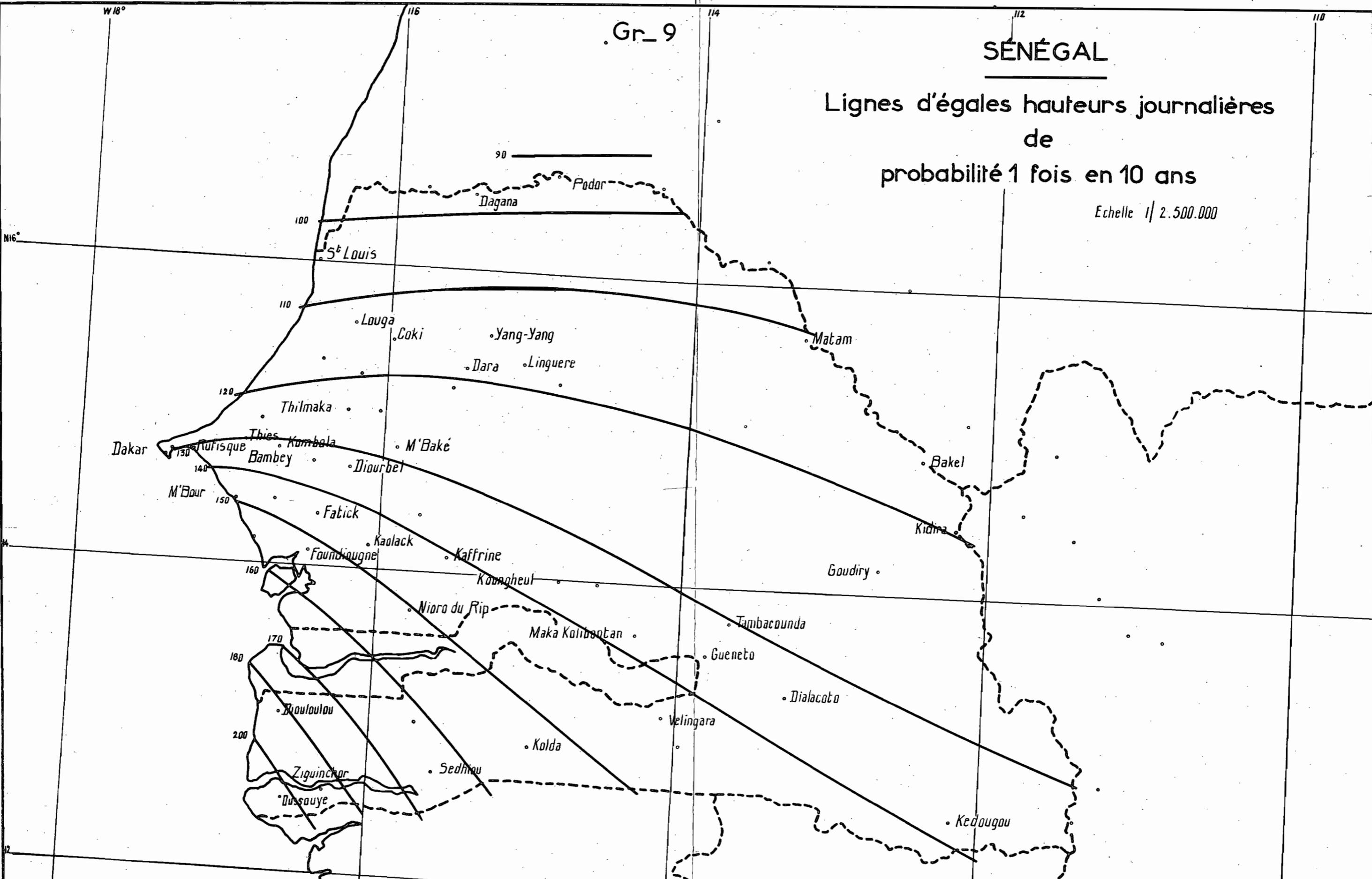
Gr_9

SÉNÉGAL

Lignes d'égaux hauteurs journalières
de
probabilité 1 fois en 10 ans

Echelle 1/2.500.000

90



B - ETUDE des INTENSITES - COURBES INTENSITES-DUREE

L'étude de la pluviométrie journalière peut être considérée comme une étude d'intensité en 24 heures, mais peut se faire à partir de relevés pluviométriques journaliers. L'étude d'intensité dont il va être question concerne des durées bien plus courtes et les documents de base ne peuvent être que les diagrammes de pluviomètres enregistreurs ou pluviogrammes.

L'idéal serait de pouvoir dépouiller les enregistrements en laps de temps définis (par exemple 5, 10, 15, 20, 30 minutes, etc....), de les classer comme nous avons fait pour les pluviométries journalières, et d'essayer d'ajuster une loi de répartition.

Cette méthode n'est malheureusement pas applicable : non seulement le nombre d'années d'enregistrement est très réduit à chaque station, mais de plus, aucune année n'est complète : il manque toujours un ou plusieurs enregistrements importants car l'entonnoir du pluviographe se bouche facilement (insectes morts, débris végétaux, et surtout poussières et sables soulevés par le vent qui précède chaque tornade).

Les enregistrements anciens sur appareils à siphon ne sont pas d'un grand intérêt, les incidents de fonctionnement étant très fréquents. Nous avons cependant dépouillé tout ce qui était utilisable dans le domaine des précipitations supérieures à 40 mm par jour.

Les enregistrements sur appareils à augets basculeurs ont été dépouillés à partir des précipitations supérieures à 10 ou 15 mm par jour. Aucune correction n'a été faite sur les documents originaux : il est probable que certaines eussent été indispensables car tous les appareils n'ont pas été réglés avant mise en route, et nous avons constaté que ce type d'enregistreur peut être faux de 10 % avant réglage.

Les pluviogrammes ont été systématiquement dépouillés par périodes de 5 minutes, en partant de la période de plus forte intensité. Pour

chaque averse, on a déterminé la courbe intensité-durée. Cette courbe est établie comme suit : on considère la période de 5 minutes qui encadre le maximum et on calcule l'intensité moyenne, puis on prend une période plus longue de 10 minutes et on calcule l'intensité moyenne, on prend une suite de valeurs croissantes de l'intervalle de temps encadrant le maximum d'intensité : 10', 15', 20', 30', 45', 60', 90', 120', 150', 300' ; l'intensité moyenne décroît, bien entendu, au fur et à mesure que l'intervalle de temps t ou durée croît. La courbe décroissante de l'intensité moyenne, en fonction de la durée t , est la courbe intensité-durée.

Au cours de cette opération, le diagramme des intensités de précipitations reste tel quel. On ne classe pas les intensités par valeurs décroissantes ; il en résulterait, si on opérait ainsi, des diagrammes artificiels qui pourraient donner lieu à des erreurs dans les applications. La seule condition est le choix de l'intensité maximale comme point de départ des opérations.

On peut être amené à tracer les diagrammes intensité-durée correspondant aux averses des diverses fréquences : fréquence annuelle ou décennale par exemple. Ces diagrammes sont déterminés à partir de l'analyse des courbes intensité-durée pour toutes les averses ou, à la rigueur, pour toutes les fortes averses pour lesquelles on dispose d'enregistrements.

Nous avons utilisé ce qui était à notre disposition dans la zone sahélienne et soudanaïenne, entre les pluviométries moyennes annuelles 200 et 1300 mm, de l'Océan Atlantique à ABECHE : au total 145 stations-années (années incomplètes) pour 58 stations. Quarante de ces stations correspondent à des pluviographes groupés sur des bassins expérimentaux étudiés par l'ORSTOM. Tous les enregistrements ne nous ont donné que 16 totaux pluviométriques ayant dépassé 100 mm en 24 heures.

Cette masse de pluviogrammes est manifestement insuffisante, tant par la faible densité spatiale des enregistreurs que par la trop courte durée de leur fonctionnement, pour obtenir des résultats précis.

Nous avons groupé les enregistrements par zone : 12 zones correspondant à des hauteurs de précipitations annuelles variant sensiblement de 100 en 100 mm, 150 à 250 mm, 250 à 350 mm etc.... Nous avons établi, dans chaque zone, des courbes intensité-durée pour des précipitations journalières de 20, 40, 60, 80 mm en faisant les moyennes des intensités-durées des précipitations comprises entre 20 mm - 20 % et 20 mm + 20 % etc....

Si nous portons les résultats obtenus en coordonnées logarithmiques (durée en minutes, intensités en mm/h), nous constatons une rupture d'alignement des points. Cette singularité s'explique facilement lorsque l'on se reporte à la forme typique des diagrammes des tornades ; ceux-ci, dans leur forme la plus simple, comprennent une très courte période à assez faible intensité, l'averse préliminaire, une période à forte ou très forte intensité, qu'on appelle le corps, enfin une période pendant laquelle l'intensité décroît et peut se maintenir assez longtemps à une assez faible valeur, cette dernière partie de l'averse est appelée la traîne. La traîne peut comprendre une véritable averse secondaire par rapport au corps. Il existe d'ailleurs des tornades s'écartant de ce schéma classique : tornades sans traîne, tornades à deux ou trois pointes presque égales, etc... Le point de rupture des courbes intensités-durée sépare le corps de l'averse représentée à gauche de la traîne et de l'averse préliminaire représentée à droite.

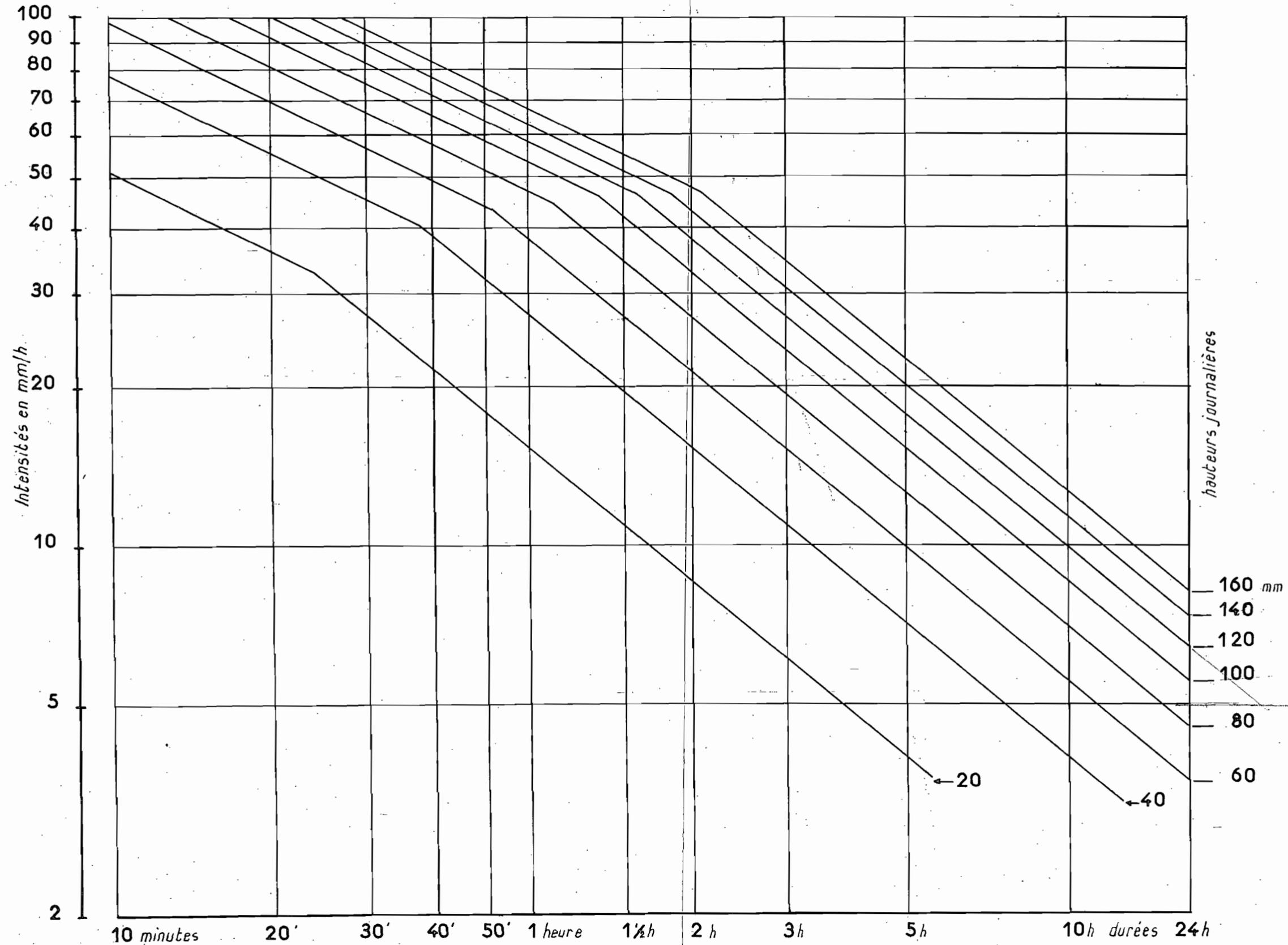
Le parallélisme des droites représentant ce que nous venons d'appeler la traîne est bon, non seulement entre les différentes hauteurs journalières dans une zone, mais également entre les zones. L'abaissement, durée de la rupture d'alignement, reste, pour une hauteur donnée, sensiblement la même pour les différentes zones, et l'on peut admettre le parallélisme des représentations des parties à gauche du point de rupture.

Le schéma final correspondant à la zone de BAMAKO une des mieux connues, est représenté sur le graphique n° 10 sur lequel les courbes intensité-durée moyennes correspondent à l'ensemble des précipitations journalières de 20,40,60 mm sont bien définies, les courbes 80 à 100 mm sont moins sûres, les courbes 120,140 et 160 mm sont des extrapolations.

Les différentes zones étudiées avaient, en fait, des limites légèrement différentes de celles données plus haut, les limites pratiques correspondaient aux différents groupes de pluviographes. Mais cependant, il n'a pas été possible de constituer des groupes de relevés correspondant à un même nombre de stations et de stations-années. Les réseaux de courbes ainsi tracés sont donc de valeurs inégales. Leur comparaison a cependant permis de constater qu'à hauteur journalière et durée égales, les intensités croissent lorsque la hauteur de précipitation annuelle diminue, tout au moins pour les fortes intensités : il faut, par rapport aux courbes de notre graphique-type (graphique n° 10), multiplier les ordonnées par un facteur fonction de la hauteur de précipitation moyenne annuelle.

Courbes intensités-durées
région de Bamako

Gr_10



Pour une hauteur moyenne annuelle de :

200 mm,	multiplier les intensités par 1,19
300 mm	1,18
400 mm	1,16
500 mm	1,14
600 mm	1,12
700 mm	1,10
800 mm	1,08
900 mm	1,05
1000 mm	1,02
1100 mm	0,99
1200 mm	0,95
1300 mm	0,91

Ces coefficients sont valables dans la zone sahélienne et soudanienne comprise entre les méridiens 0° et 12° Ouest. Nous n'avons pas assez de données pour assurer de leur constance à l'Ouest et à l'Est de cette zone. Il semblerait qu'ils diminuent un peu en allant vers l'Est.

On ne doit pas attacher une importance excessive à la précision des coefficients donnés plus haut, nous ne prétendons pas que leur valeur soit définie à 1 % près. Par ailleurs, les zones étudiées peuvent être, comme nous l'avons vu plus haut, légèrement décalées par rapport aux zones du tableau, c'est ainsi que le graphique n° 10 ne correspond pas exactement à la bande 1100 mm, d'où un coefficient de 0,99 au lieu de 1,00.

Nous disposons maintenant de toutes les données pour la détermination du diagramme intensité-durée correspondant à un point quelconque et à une fréquence quelconque.

On note pour le point donné la hauteur de précipitation annuelle, d'où on déduit la valeur du coefficient puis, grâce à la première partie de ce mémoire, on détermine l'averse exceptionnelle de 24 heures de la fréquence cherchée. Sur le graphique 10, on choisit la courbe intensité-durée correspondant à la hauteur d'averse exceptionnelle de 24 heures trouvée plus haut et on multiplie les ordonnées de cette courbe par le coefficient.

Considérons par exemple un point situé exactement à mi-distance de GOUDIRY et de KIDIRA et cherchons l'intensité de 30' pour l'averse

décennale. La hauteur de précipitation annuelle est de 790 mm (graphique 7); ce qui correspond à un coefficient de 1,08.

L'averse décennale de 24 h est de 122 mm (graphique 9). Sur le graphique 10, pour l'averse de 122 mm, l'intensité moyenne est de 83 mm/h en 30'. Pour la station considérée, l'intensité moyenne en 30' sera égale à $83 \text{ mm/h} \times 1,08 = \underline{89,6 \text{ mm/h}}$.

Pour réduire le nombre d'opérations à effectuer nous avons, pour le SENEGAL, déterminé les diagrammes intensité-durée correspondant aux diverses fréquences. Ces diagrammes ont été établis comme suit : considérons par exemple la fréquence décennale, on fait correspondre à chaque hauteur d'averse décennale une hauteur de précipitation moyenne annuelle. Il n'y a pas de difficulté pour cela, sauf pour la moyenne CASAMANCE. Dans ce cas particulier, une hauteur décennale de 160 mm correspond à des précipitations annuelles variant de 950 à 1300 mm, soit à des coefficients variant de 1,02 à 0,91. On prendra 1100 mm, ce qui donnera lieu à une erreur maximale de 8 % pour la région de SEDHIOU, mais on verra que, pour cette région particulière, il y a des causes d'erreur beaucoup plus graves.

On peut alors, pour la fréquence décennale, multiplier les ordonnées de chaque diagramme de la figure 10 par le coefficient correspondant à la hauteur moyenne annuelle liée à la hauteur de précipitation exceptionnelle de 24 heures.

On a ainsi établi, pour les fréquences annuelles 1/2 ans, 1/5 ans, 1/10 ans, 1/20 ans, les 5 diagrammes (graphiques 11 à 15), qui fournissent directement les courbes intensité-durée pour une fréquence donnée. Supposons, par exemple, que l'on désire obtenir la courbe intensité-durée de MATAM pour une fréquence décennale, sur le graphique 9 on trouve très sensiblement 110 mm pour l'averse de 24 heures, on a directement sur le graphique 14 le diagramme correspondant à une averse décennale de 110 mm en 24 heures.

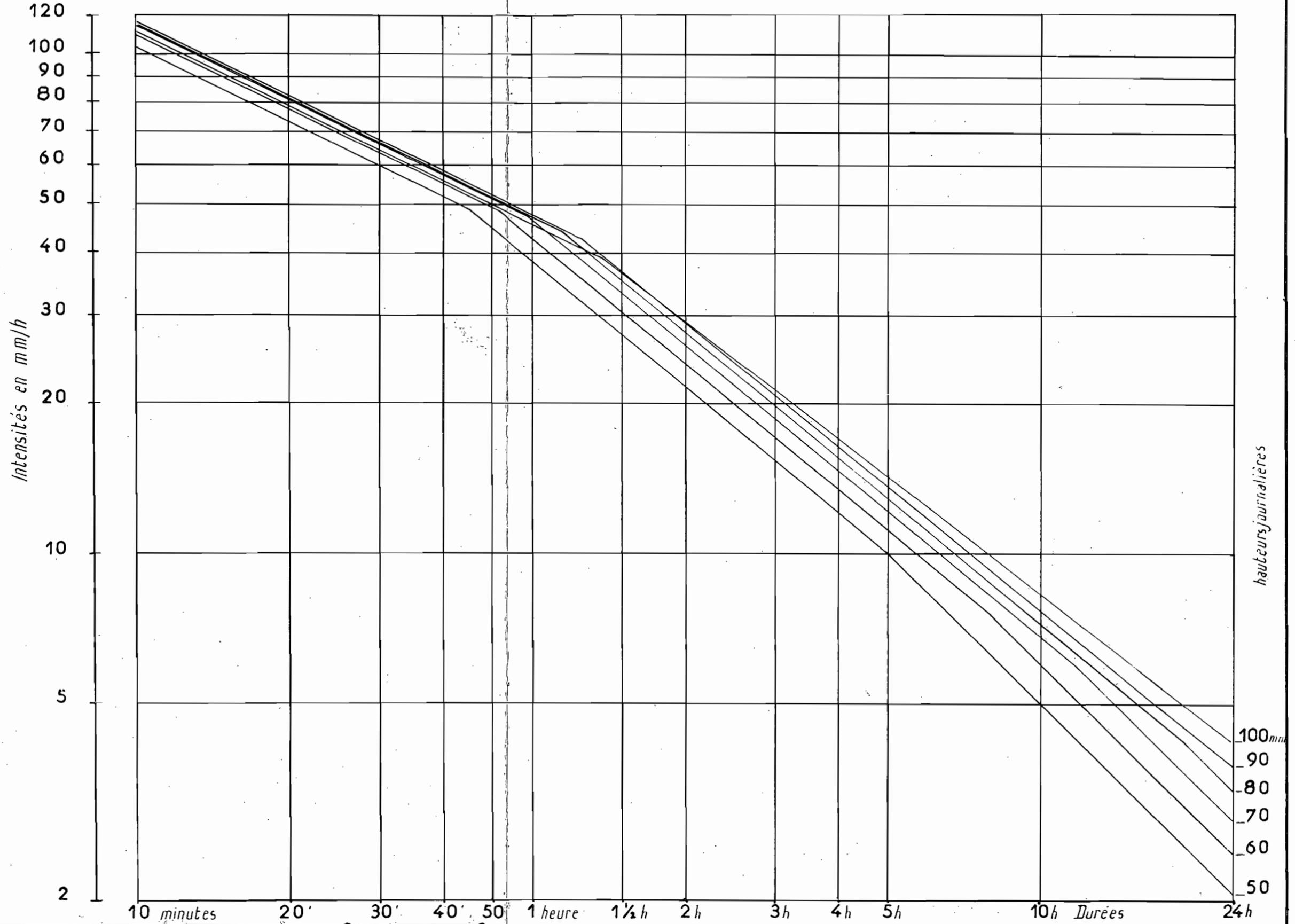
Cette opération ne doit pas donner l'illusion d'une précision absolue, il ne faut jamais perdre de vue les trois points suivants :

- 1° - Toutes ces opérations font abstraction des singularités locales ;
- 2° - Les courbes d'intensité-durée ont été établies principalement à partir des diagrammes de pluviographes installés au Nord de l'isohyète 1200 et surtout à l'intérieur ; elles ne s'appliquent certainement pas aussi bien pour les zones côtières ou la CASAMANCE.

Courbes intensités-durées

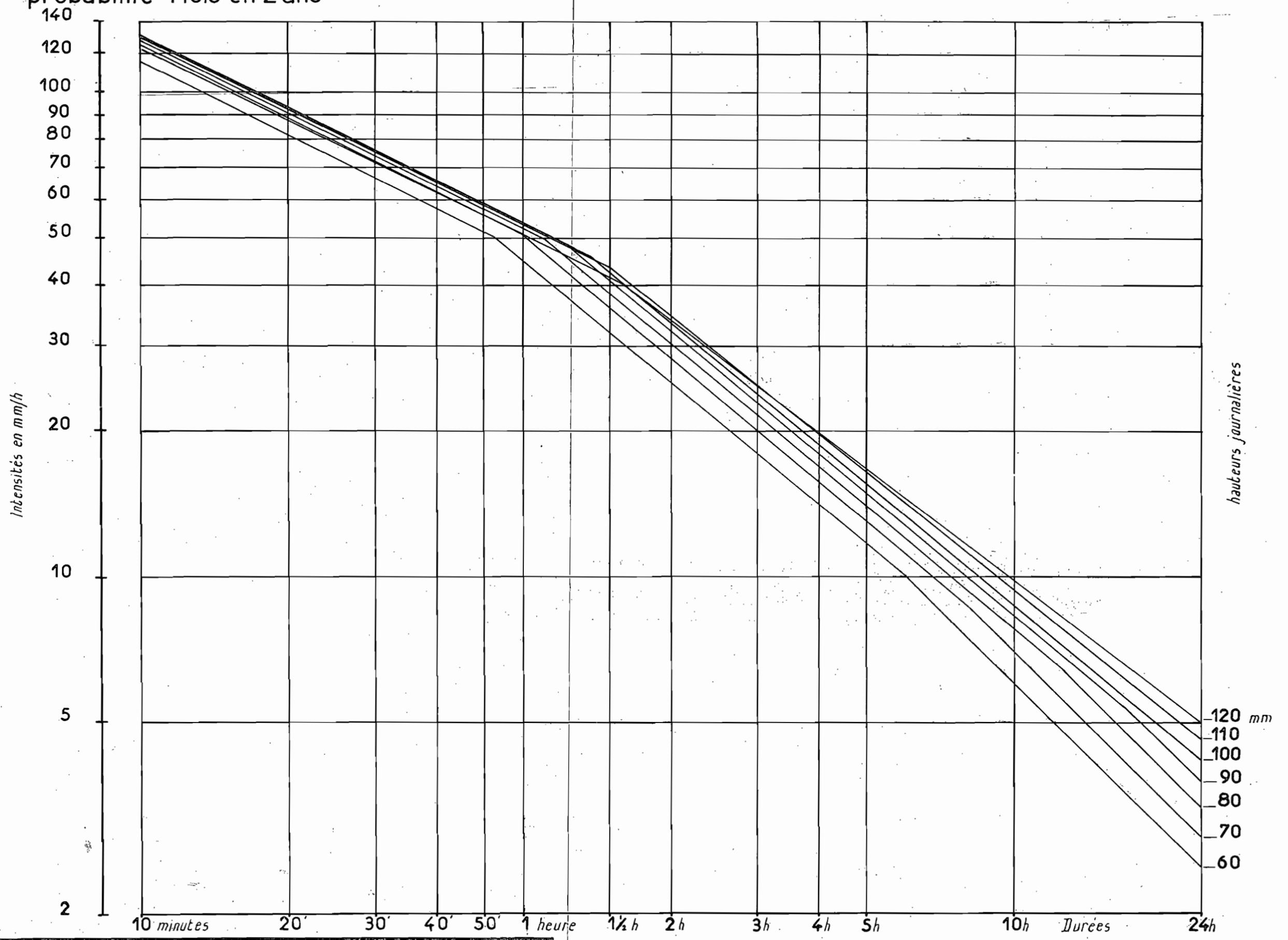
Gr_11

probabilité annuelle



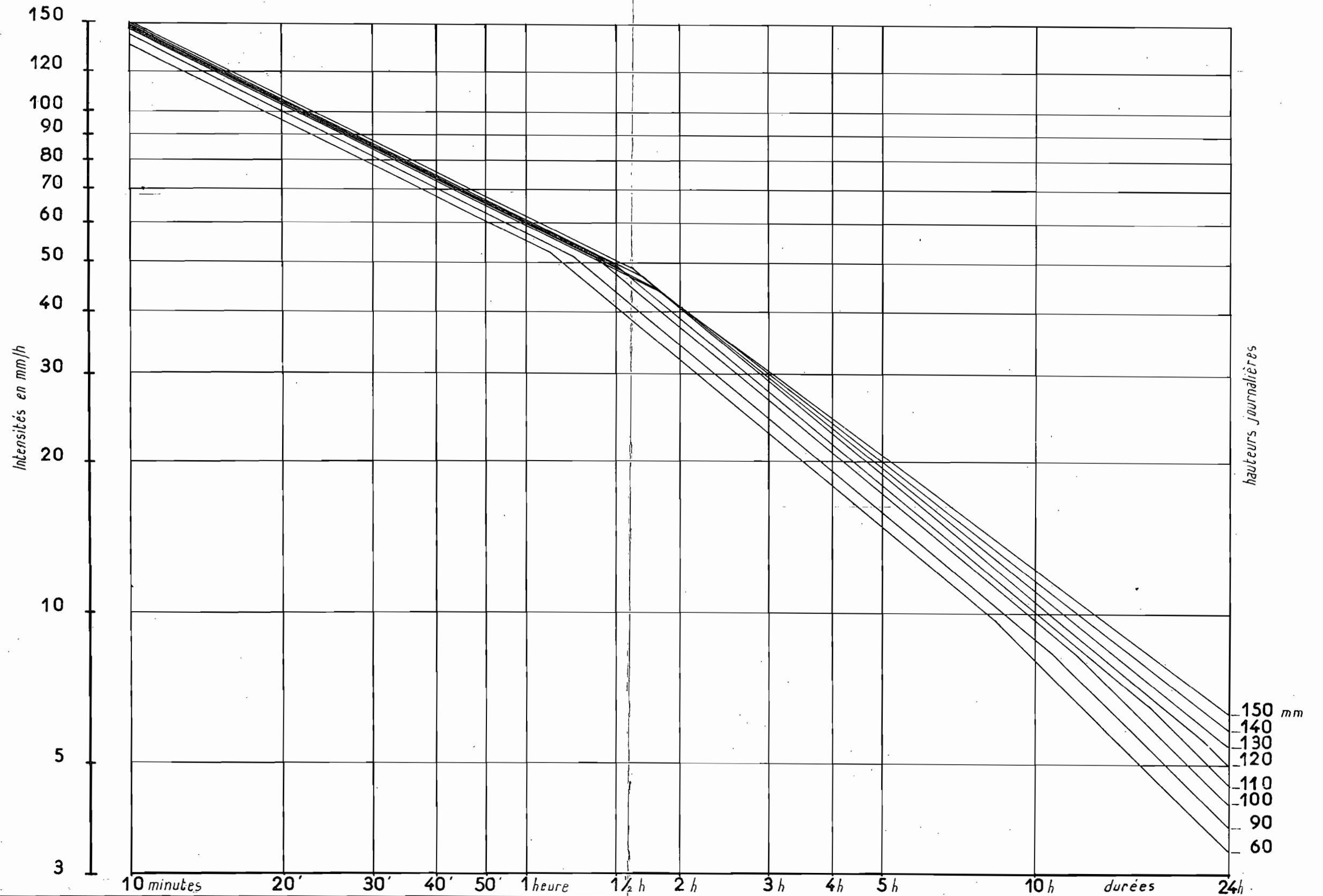
Courbes intensités-durées
probabilité 1 fois en 2 ans

Gr. 12



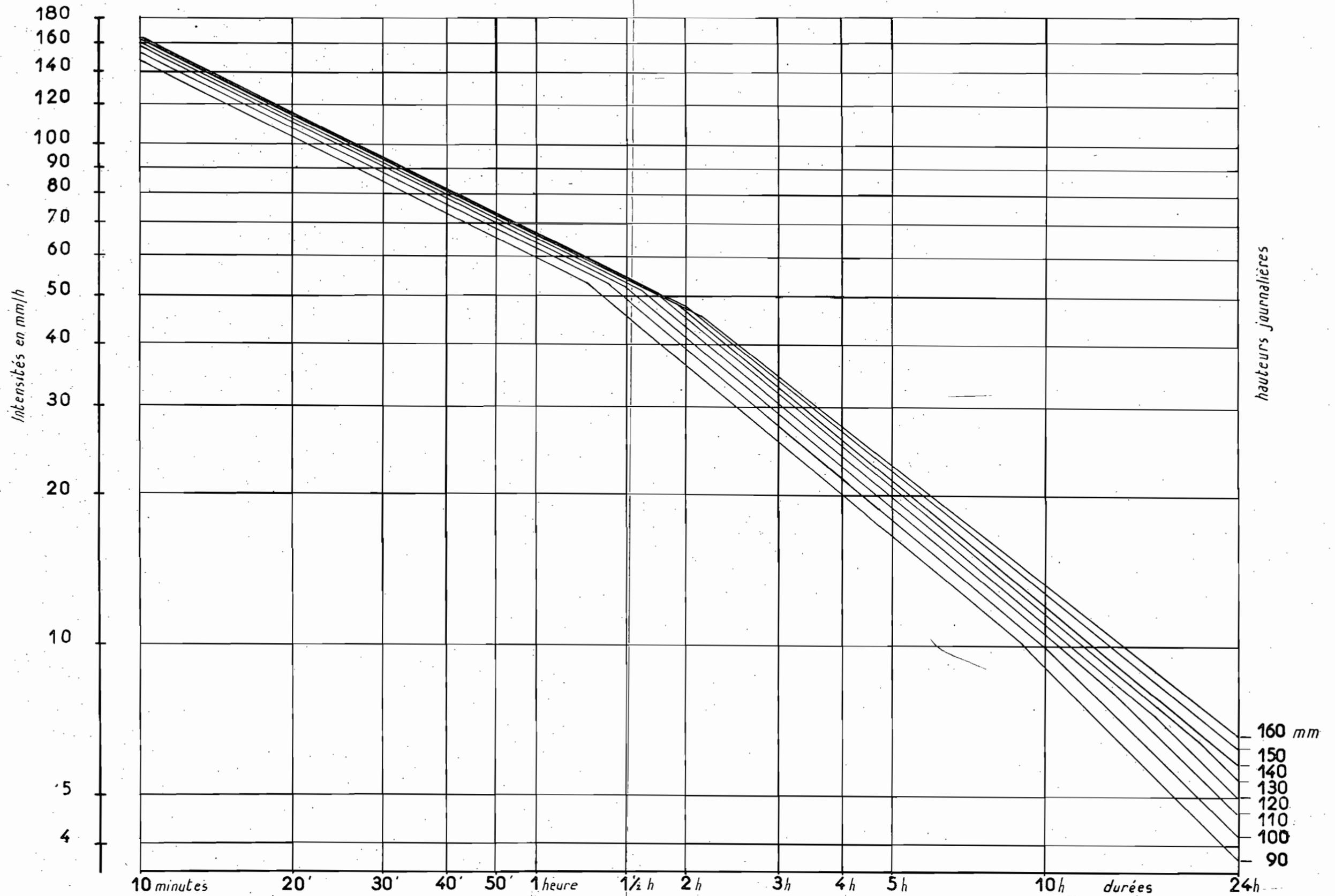
Courbes intensités-durées
probabilité 1 fois en 5 ans

Gr_13



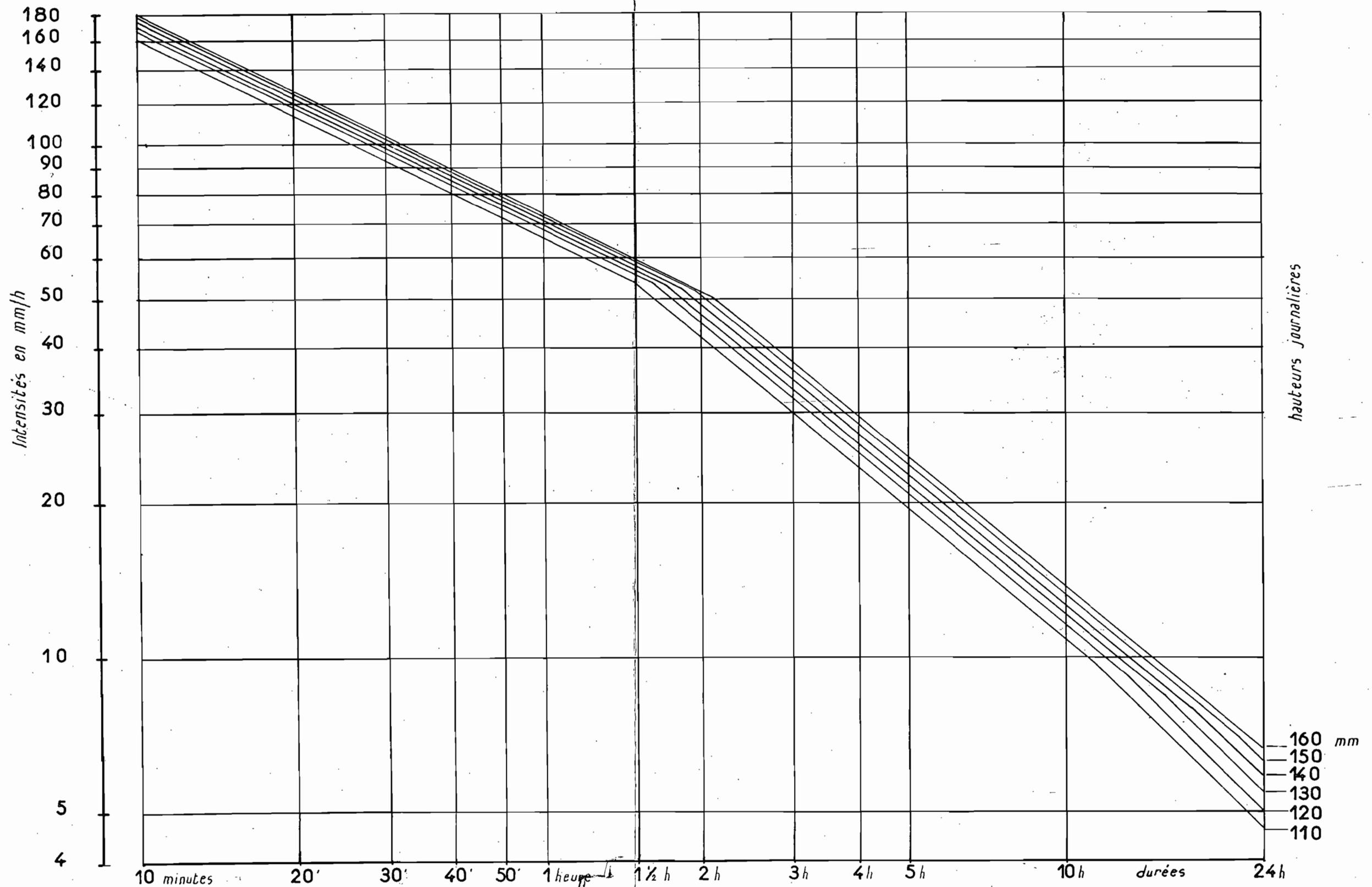
Courbes intensités-durées
probabilité 1 fois en 10 ans

Gr_14



Courbes intensités-durées
 probabilité 1 fois en 20 ans

Gr_15

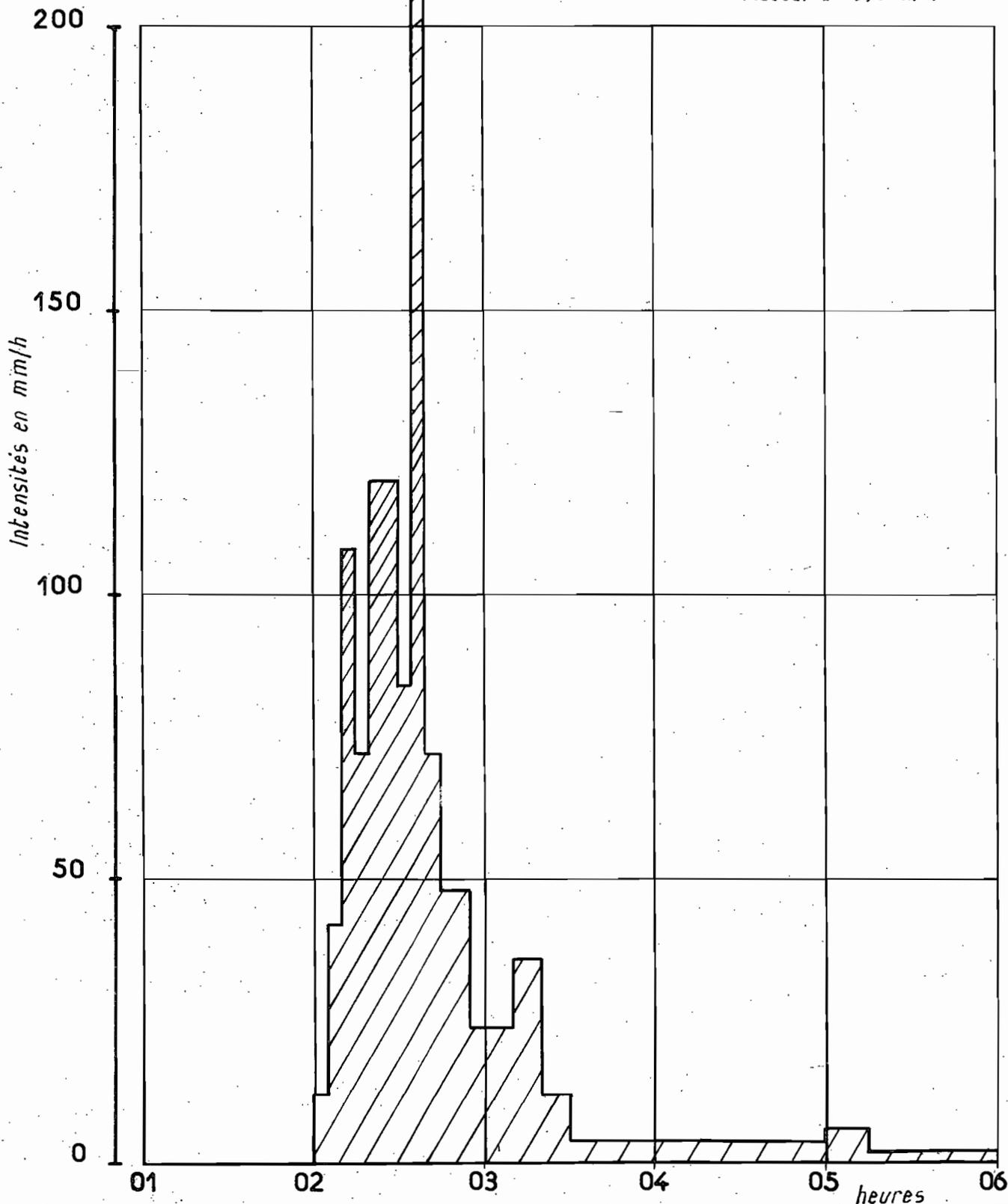


3° - Pour ces deux dernières régions, on trouve à la fois des averses simples ou tornades avec un corps, une traîne de faible intensité et parfois une ondée préliminaire (c'est le cas du graphique 16), et des averses multiples durant de 4 à 10 heures, parfois plus, avec un certain nombre de pointes séparées ou non par des périodes de faible intensité, c'est le cas du graphique 17.

Les tornades simples prédominent de façon certaine à l'intérieur du SENEGAL. Sur la côte et en CASAMANCE, ces tornades simples existent, mais il n'est pas impossible que ce soit les averses multiples qui prédominent. Malheureusement, le très petit nombre de diagrammes utilisables aux pluviographes de DAKAR, de ST. LOUIS et aux pluviographes ORSTOM de SÉBIKOTANE, pour les très fortes averses, ne permettent pas encore de préciser ce point. Il semble, en outre, que les averses soient plus nombreuses au cœur de la saison des pluies, en Septembre, et les averses simples en Juillet et au début d'Août, ou en Octobre. Des observations sur pluviographes pendant plusieurs années seraient très utiles pour préciser ce point. En attendant, les données des tornades simples fourniront des intensités trop fortes probablement, ce qui jouera en faveur de la sécurité.

HYÉTOGRAMME

Averse du 8 Octobre 1957 à DAKAR
Hauteur = 99,5 mm



Gr_17

HYÉTOGRAMME

Averse du 9 au 10 Septembre 1957 à DAKAR
Hauteur = 67 mm

