

Études sur bassins expérimentaux dans les territoires africains de la Communauté

par M^r J. RODIER
ingénieur en chef à l'Électricité de France
chef du service hydrologique
de l'Office de la Recherche Scientifique et
Technique Outre-Mer

et M^r C. AUVRAY
ingénieur E.I.H
maître de recherches hydrologue à
l'Office de la Recherche Scientifique et
Technique Outre-Mer

octobre 1959

ETUDES sur BASSINS EXPERIMENTAUX
dans les TERRITOIRES AFRICAINS de la COMMUNAUTE

par J. RODIER
Ingénieur en Chef à Electricité de France

Chef du Service Hydrologique
de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

et C. AUVRAY
Ingénieur E.I.H.

Maître de Recherches Hydrologue à
l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

I - AVANCEMENT des ETUDES

Les premiers bassins expérimentaux ont été aménagés en 1951, dans le Nord-CAMEROUN. Ce genre d'études n'a eu qu'un faible développement les premières années, la plupart des hydrologues étant absorbés par l'aménagement du réseau hydrologique de base. C'est surtout à partir de 1955 que leur nombre s'est considérablement accru ; le Service de l'Hydraulique de l'A.O.F., ayant compris l'intérêt de ces recherches, a demandé, en effet, à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, d'étudier dix bassins expérimentaux.

A la date du 30 Septembre 1959, 47 bassins ou ensembles de bassins ont fait l'objet de recherches, qui ont été menées par l'O.R.S.T.O.M. dans 90 % des cas. La répartition en a été la suivante, en conservant les divisions territoriales de 1957 : 7 au CAMEROUN, 8 au TCHAD, 1 en OUBANGUI-CHARI, 7 au MOYEN-CONGO, 23 en A.O.F. et au TOGO, 1 à MADAGASCAR.

La campagne 1959, qui vient de s'achever, portait sur 22 bassins. Les premiers efforts avaient surtout porté sur la zone sahélienne et, à un moindre degré, sur la zone du régime tropical pur. Actuellement, il s'agit surtout d'étudier les deux cas extrêmes : régimes désertique et sub-désertique d'une part, régime équatorial, d'autre part.

Les 22 bassins étudiés en 1959 se répartissent comme suit :

- zones désertiques et subdésertiques : (pluviométrie annuelle inférieur à 300 mm) : 5 bassins
- zone sahélienne : 2 bassins
- zone tropicale : 1 bassin
- zone tropicale de transition : 3 bassins
- zone équatoriale forestière : 6 bassins
- zone équatoriale de savane : 5 bassins

Les principes d'aménagement et d'exploitation ont déjà été exposés dans plusieurs publications. Chaque fois que le montant des crédits le permet, les études portent sur un ensemble de plusieurs bassins, par exemple : un de 3 km², un de 25 km², un de 100 km². Le bassin de 25 km² est considéré comme bassin principal ; il est doublé, chaque fois que cela est possible, par un bassin voisin de superficie équivalente, pour bien mettre en évidence les caractères généraux et éliminer les singularités locales. L'ensemble de plusieurs bassins de superficie croissante donne une idée des variations de la hauteur moyenne des averses et du débit maximum des crues, en fonction de la superficie étudiée. Celle-ci descend rarement au-dessous de 2 à 3 km². On voit que nos bassins sont nettement plus grands que ceux étudiés par les Services Forestiers ou les Services de Conservation des Sols ; la nature du ruissellement sur le sol joue encore un grand rôle, mais les conditions d'écoulement dans le réseau hydrographique commencent à avoir une influence très notable. D'autre part, les superficies restent suffisamment petites pour que la crue résulte d'une seule averse bien individualisée, qui couvre à peu près tout le bassin.

La partie essentielle de l'équipement comporte : un réseau de pluviomètres et de pluviographes, d'une part, un ensemble d'échelles limnimétriques, de limnigraphes et de stations de jaugeages, d'autre part.

L'équipement est léger et assez peu coûteux. Les passerelles de jaugeages sont en tubes métalliques démontables. Les sections de mesures sont aménagées avec des gabions ou stabilisées par des bandes de béton. Des déversoirs ne sont installés que s'il existe des affleurements rocheux permettant de réduire les travaux de maçonnerie à un volume insignifiant. Des venturi ne sont réalisés que si les conditions locales s'y prêtent (présence de bambous, par exemple) ou si la faible valeur des débits à mesurer les rendent très peu coûteux.

Il est très facile, en général, de transporter la majeure partie des installations d'un bassin à un autre, ce qui est avantageux, car pour la plupart des bassins, les études sur le terrain ne durent pas plus de trois ans.

Dans la plupart des cas, notre but est essentiellement de rechercher des relations entre ruissellement et précipitations, ou plus particulièrement d'étudier systématiquement les débits maxima de crues. Notre objectif est donc assez différent du but principal poursuivi par les agronomes.

Mais, chaque fois que cela est possible, les observations sont effectuées également en vue de l'établissement du bilan hydrologique ; dans ce dernier cas, aux mesures de précipitations et d'écoulement viennent s'ajouter des mesures d'évaporation (au moyen de bacs enterrés) et d'infiltration (par les méthodes MUNTZ ou PORCHER).

Enfin, si les crédits le permettent, des mesures de transports solides et d'érosion seront également entreprises. Elles supposent la détermination de la concentration des matières en suspension à la station principale, la réalisation de fosses à sédiments sur de très petits sous-affluents et enfin l'aménagement de parcelles d'érosion.

Les bassins étudiés présentent donc toute une gamme d'aménagements, depuis des réalisations très sommaires destinées uniquement à l'étude des crues en liaison avec les précipitations, jusqu'à des installations beaucoup plus complètes, permettant l'étude du cycle de l'eau. Dans ce dernier cas, il est fréquent que les observations portent sur beaucoup plus de trois ans.

Actuellement, les perspectives sont favorables pour ce genre d'études, car les Services techniques en ont compris tout l'intérêt. Pour la mise au point d'un projet hydraulique de quelque importance, ces études d'hydrologie analytique apportent aux observations des stations de jaugeages classiques, des compléments précieux facilitant l'extrapolation au-delà de la période d'observations toujours trop courte dans nos régions. Les données fournies par ces nouveaux bassins viennent grossir la masse des données anciennes, ce qui est bien nécessaire, car même dans le domaine des bassins expérimentaux, l'hydrologie conserve toujours un peu de son caractère statistique.

Le dépouillement de ces observations est loin d'être achevé et l'interprétation en est à peine commencée ; elle a porté surtout sur la détermination des crues décennales de chaque bassin.

Le maximum de crue décennale correspond à une caractéristique qu'il est assez facile d'atteindre avec une certaine précision. Sa détermination ne semble pas chimérique aux hydrologues, contrairement au maximum de la crue centenaire et à plus forte raison de la crue millénaire.

Pour le moment, il a été établi un catalogue de ces débits de crues décennales mentionnant les caractéristiques des bassins correspondants. Il semble prématuré d'établir des relations entre ces débits de crues et les diverses grandeurs caractérisant les bassins. Néanmoins, dans son état actuel, notre liste de crues décennales, dont une première édition a été présentée à BUKAVU, peut rendre les plus grands services en permettant des extrapolations à d'autres bassins de régimes analogues.

Pour les régions sahélicennes et désertiques, les bassins expérimentaux ont permis de déterminer les débits moyens annuels. Ils permettraient de le faire également pour des régions plus arrosées, mais, dans ce cas, les stations de jaugeages usuelles donnent des valeurs probablement plus précises.

Par contre, les bassins expérimentaux fournissent des indications précieuses sur l'irrégularité interannuelle ou sur le coefficient de variation.

La majeure partie des bacs évaporatoires situés sur ces bassins et leurs données ont été utilisées dans le Rapport de ROCHE à BUKAVU.

Enfin, ils ont permis de recueillir quelques-unes de nos rares données sur les transports solides.

On a jugé utile de présenter quelques précisions sur les procédés utilisés pour le dépouillement et l'interprétation car ils ont contribué dans ces territoires à faire progresser dans une notable mesure la recherche hydrologique.

II - METHODE de DEPOUILLEMENT et d'INTERPRETATION -

La plupart des études effectuées sur bassins expérimentaux demandent que l'on dégage l'ensemble de relations complexes qui lient les précipitations au ruissellement ; or, actuellement, le moyen le plus simple d'y parvenir est d'utiliser le principe des hydrogrammes unitaires.

Nous rappelons les bases essentielles de cette théorie. Supposons un bassin homogène recevant une averse distribuée de façon uniforme dans l'espace et éliminons de

l'écoulement, tel qu'il peut être observé à la station de jaugeage, l'écoulement hypodermique (subsurface flow) et l'écoulement provenant des nappes souterraines. Il subsiste pour chaque crue un hydrogramme de ruissellement (surface run off).

1°) Si tous les hydrogrammes sont rapportés à la même origine, ils constituent tous des courbes affines, par rapport à l'axe des temps, pour toute averse de durée inférieure à une limite donnée. Le temps de ruissellement est constant.

2°) Le rapport d'affinité pour deux hydrogrammes est égal au rapport des volumes de ruissellement.

3°) Les ordonnées de l'hydrogramme de ruissellement résultant de deux averses unitaires successives sont égales à la somme des ordonnées des deux hydrogrammes correspondant, convenablement décalés dans le temps.

En fait, les conditions d'application de cette méthode sont rarement réalisées en toute rigueur : le bassin n'est presque jamais homogène, l'averse n'est pas répartie de façon uniforme.

La forme des hydrogrammes varie légèrement avec la hauteur de précipitation et avec la position de l'épicentre de l'averse si celle-ci n'est pas homogène ; le temps de ruissellement est loin d'être rigoureusement constant ; de deux averses consécutives, par exemple, la seconde aura une vitesse de ruissellement plus rapide que la première.

Pour ces différentes raisons, on doit simplement considérer la méthode des hydrogrammes unitaires comme un fil conducteur ; il faut y apporter les corrections nécessaires et, éventuellement, l'abandonner si les conditions naturelles s'écartent vraiment trop des hypothèses de base.

L'adaptation de la méthode varie souvent d'un climat à un autre ou d'un type de bassin à un autre.

On peut déduire de ce qui précède que, dans le cas général, l'étude devra comprendre trois parties :

- étude des précipitations
- étude de l'hydrogramme
- détermination du volume de ruissellement correspondant à une averse donnée.

Par exemple, le calcul de la crue décennale nécessitera les étapes suivantes :

- a) Détermination de toutes les caractéristiques de l'averse décennale,
- b) Détermination de l'hydrogramme unitaire correspondant à une averse de cette importance,
- c) Détermination du volume de ruissellement correspondant à l'averse décennale.
- d) Vérification par comparaison avec des résultats déjà obtenus sur des bassins de caractéristiques aussi proches que possible de celles du bassin étudié.

A - ETUDE de l'AVERSE DECENNALE -

On peut admettre qu'une averse est bien définie lorsqu'elle est déterminée par :

- sa hauteur à l'épicentre,
- la répartition des hauteurs dans l'espace,
- la répartition des intensités dans le temps,
- les conditions initiales du sol : état de la végétation et saturation préalable (ou l'intervalle qui sépare l'averse considérée de la précédente).

Nous considérerons comme averse décennale, l'averse dont la hauteur à l'épicentre admet une période de retour de dix ans et dont toutes les autres caractéristiques correspondent aux valeurs les plus fréquentes pour les très fortes averses.

Cette définition est loin d'être sans reproche pour la détermination de la crue décennale, mais elle présente, pour les applications pratiques l'avantage de la simplicité. Il est d'ailleurs certains cas particuliers pour lesquels nous nous écartons résolument de cette définition.

1°) L'estimation de la hauteur décennale ponctuelle est assez facile. Dans la plupart des régions comprises entre le SAHARA, le NIL, l'OUBANGUI et le CONGO, les averses durent nettement moins de 24 heures mais sont, généralement, espacées de plus de 24 heures, de sorte que l'étude de la hauteur de l'averse décennale est sensiblement la même que

l'étude de la hauteur de précipitation journalière décennale. Il suffit d'appliquer la méthode des "stations-années" aux relevés des pluviomètres ordinaires.

Il n'est souvent pas nécessaire que toutes les stations retenues aient la même hauteur de précipitation annuelle, car la hauteur des averses de fréquence rare varie assez peu avec la pluviométrie annuelle, sauf en régions désertiques. On peut admettre un écart de 100 mm et même plus pour certains climats. Certains sites particuliers ne reçoivent pas de très fortes averses, d'autres, au contraire, sont favorisés; on veillera à ne pas se laisser influencer dans le classement des averses, si les premières proviennent toutes de la même station. On peut vérifier facilement l'identité du régime, par l'examen des courbes de fréquence.

La partie la plus importante et la plus longue de cette étude consiste dans l'examen critique des averses sur les relevés originaux, en vue d'éliminer dans toute la mesure du possible, les erreurs de virgules et les lectures fantaisistes.

Il faut toujours laisser le bénéfice du doute à une donnée que l'on ne peut pas considérer de façon certaine comme inexacte.

Cent "stations-années" suffisent pour déterminer l'averse décennale des climats que nous étudions.

La variation des hauteurs de précipitations, dans le tableau de classement, doit être déjà bien régulière au voisinage de la valeur de l'averse décennale, pour que la détermination de celle-ci soit acceptable.

2°) Répartition des hauteurs dans l'espace : le problème serait simple si le bassin était circulaire et que l'épicentre de l'averse était toujours au centre de ce bassin.

On se ramène souvent à cette hypothèse simplificatrice en y apportant des corrections. La base de l'étude est constituée bien entendu par l'ensemble des réseaux d'isohyètes qui ont été dessinés pour chaque averse sur le bassin expérimental.

Yves BRUNET a mis au point, en MAURITANIE, la méthode suivante qui est plus rigoureuse :

On étudie tout d'abord le coefficient de réduction moyen entre les hauteurs de précipitation de deux points recevant la même averse (coefficient de réduction ponctuel), sans se soucier de la position de ces points par rapport à l'épicentre.

Cette étude est effectuée pour des tranches de hauteur de précipitation bien définies : par exemple, 20 à 30 mm, 30 à 40 mm etc.... On reporte sur un graphique les résultats obtenus pour tous les couples de pluviomètres disponibles, en prenant comme abscisse la distance entre les points de chaque couple et, en ordonnée, le coefficient de réduction obtenu. Si le nombre d'averses n'est pas très grand, on répètera pour chaque couple cette opération pour toutes les averses de chaque tranche. Et, pour chaque tranche, on obtiendra un nuage de points, au milieu duquel passera la courbe de réduction ponctuelle en fonction de la distance.

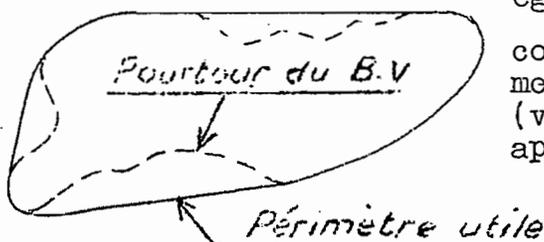
Si le nombre d'averses est suffisant, on ne prendra pour chaque couple que la valeur moyenne des coefficients de réduction.

On constate, en général, que pour des averses supérieures à une hauteur donnée, la courbe reste à peu près la même pour toutes les tranches ; elle tend à s'éloigner légèrement de la ligne des abscisses.

En pratique, on trace donc la courbe pour toutes les averses dont la hauteur dépasse une limite donnée, en plaçant cette courbe plutôt vers le bord supérieur du nuage de points.

Pour passer de ce coefficient de réduction ponctuel à la valeur du coefficient de réduction pour une surface donnée, on part des considérations suivantes :

Soit un bassin de forme quelconque : on peut définir pour ce bassin un encombrement moyen égal à la distance moyenne entre deux droites parallèles tangentes au contour extérieur du bassin, situées de part et d'autre et ne le recoupant pas. On démontre que cet encombrement moyen est égal à $\frac{1}{\pi}$ fois la longueur de la



courbe la plus courte continuellement convexe qui entoure le bassin (voir croquis). Cette courbe est appelée "périmètre utile".

Si on considère un ensemble de réseau d'isohyètes couvrant une superficie donnée et si on place successivement sur ce réseau deux bassins versants différents dans toutes les positions, on voit que le nombre moyen d'isohyètes recoupées par ces bassins est proportionnel à l'encombrement moyen de chacun des bassins versants. On conçoit qu'il soit assez facile de lier le coefficient de réduction de la surface du bassin à l'encombrement moyen.

En admettant pour simplifier que le bassin ait la forme d'un rectangle, connaissant la fonction $\gamma(x)$ donnant le coefficient de réduction ponctuel en fonction de la distance, on voit que le coefficient de réduction linéaire sur une bande longitudinale du rectangle est égal à $\frac{\int_0^L \gamma(x) dx}{L}$ avec L = longueur de la bande.

Pour la surface du rectangle, le coefficient de réduction est donné par la même expression avec :

L = encombrement moyen.

En portant en abscisses les distances, et en ordonnées les valeurs moyennes, suivant les distances, de l'intégrale de la courbe des coefficients de réduction ponctuels, on obtient le coefficient de réduction global cherché, en fonction de l'encombrement moyen.

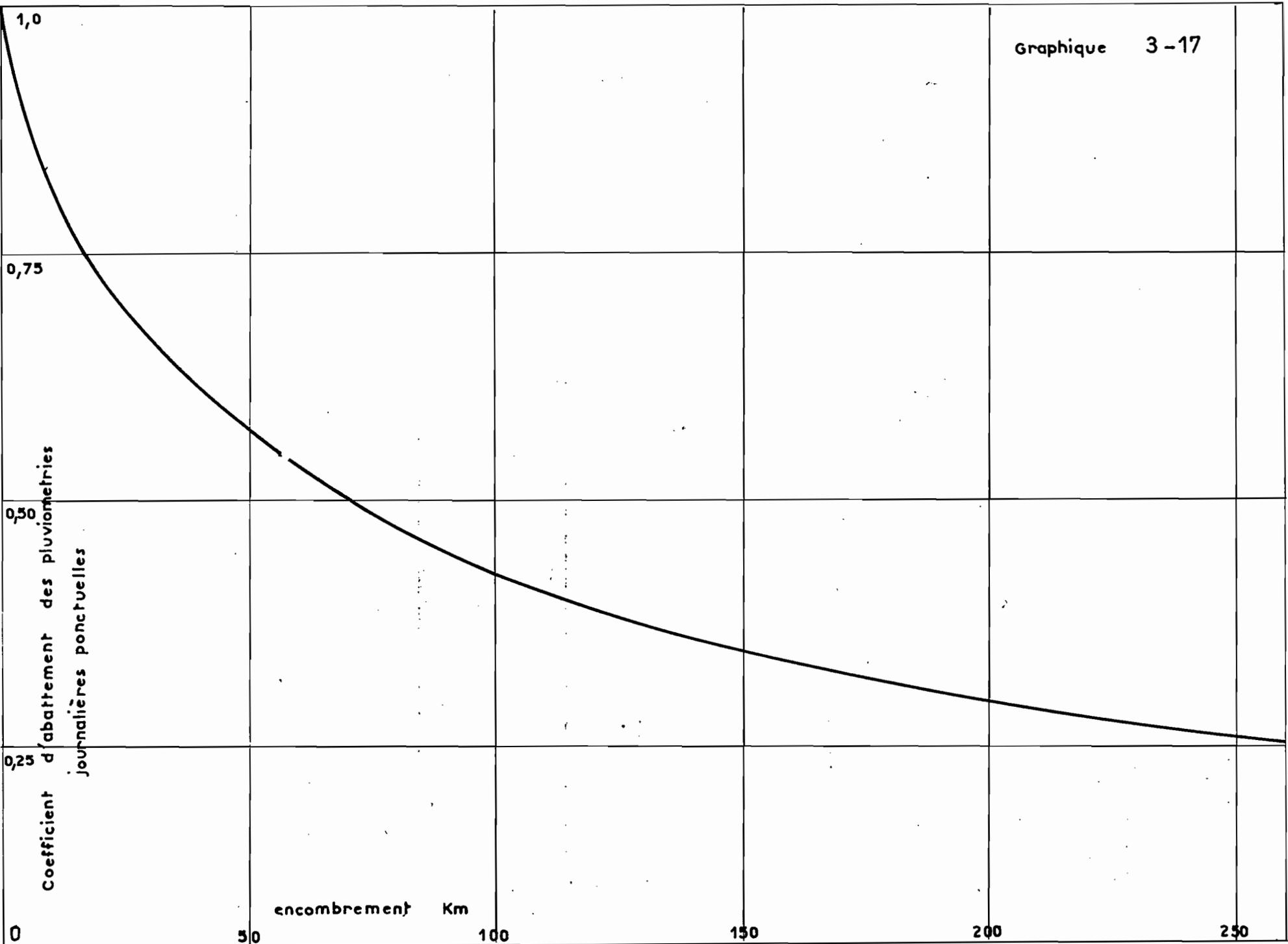
On verra, ci-contre, une telle courbe (BRAKNA 3 - 17). établie pour le Sud de la MAURITANIE.

3°) Répartition des intensités dans le temps :

L'étude est effectuée à partir des diagrammes des pluviographes.

Pour les tornades, une méthode simple permet de déterminer la forme moyenne chaque fois que le cas général est caractérisé par une seule pointe d'intensité. On répartit une fois de plus, les hyétogrammes par tranches, suivant les hauteurs : 18,5 - 22,5 mm (20 mm), 22,5 - 27,5 mm (25 mm) etc..

Graphique 3-17



1,0

0,75

0,50

0,25

0

50

100

150

200

250

Coefficient d'abattement des pluviométries journalières ponctuelles

encombrement Km

Pour les diagrammes de chaque tranche on fait coïncider les intervalles de 5 minutes ayant donné les intensités maximales et on détermine les intensités moyennes pour des intervalles de 5 minutes de part et d'autre du maximum. On détermine ainsi, pour chaque tranche, un diagramme moyen. Yves BRUNET a ainsi obtenu, en MAURITANIE, une série de diagrammes types, dont les formes sont presque rigoureusement semblables : (diagrammes 3-19 et 3-20).

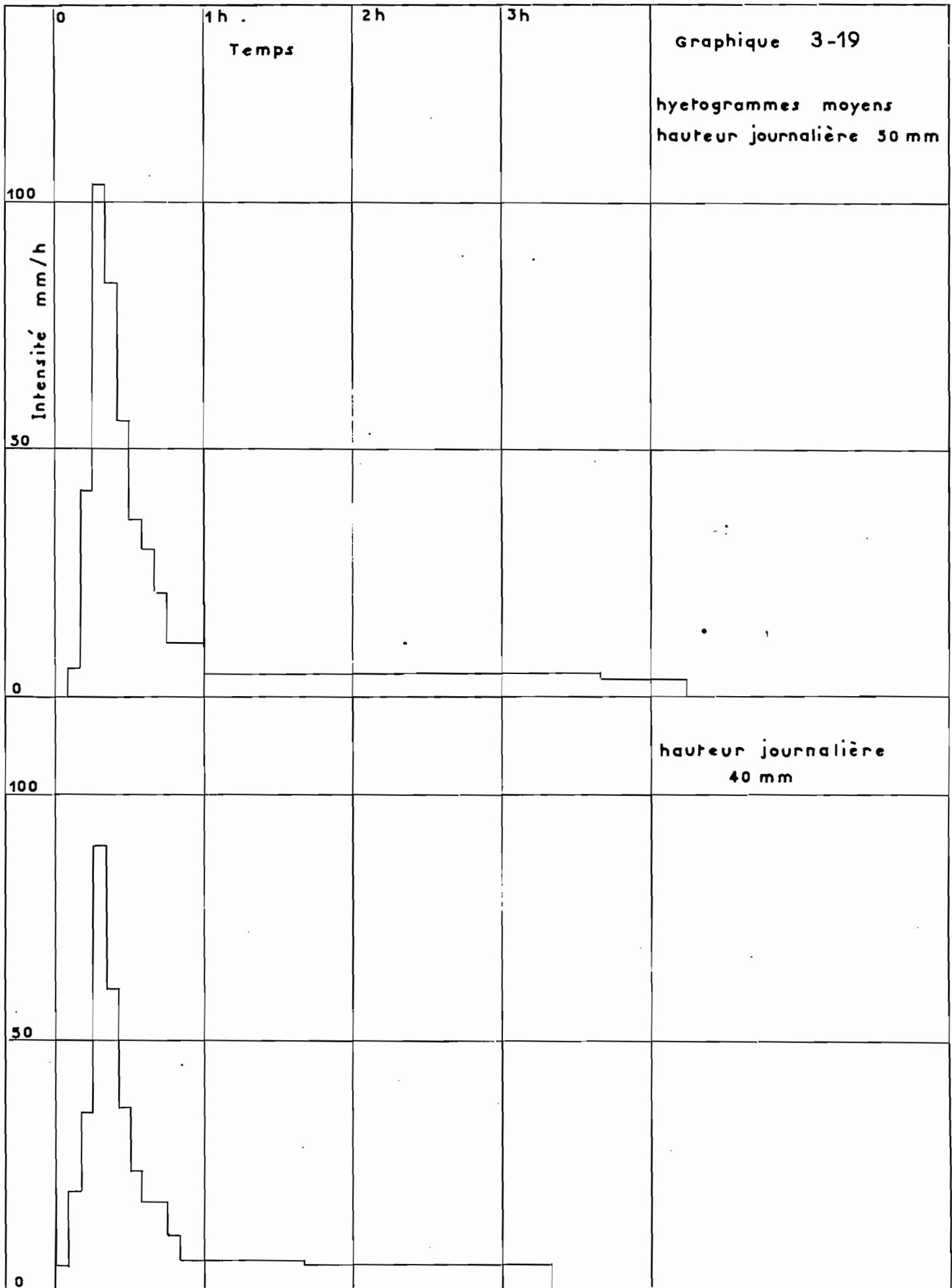
On conçoit, qu'il est facile d'extrapoler les principaux éléments de ces diagrammes pour des fréquences rares où le faible nombre d'observations ne permet pas de calculer directement des moyennes. On peut distinguer 4 caractéristiques :

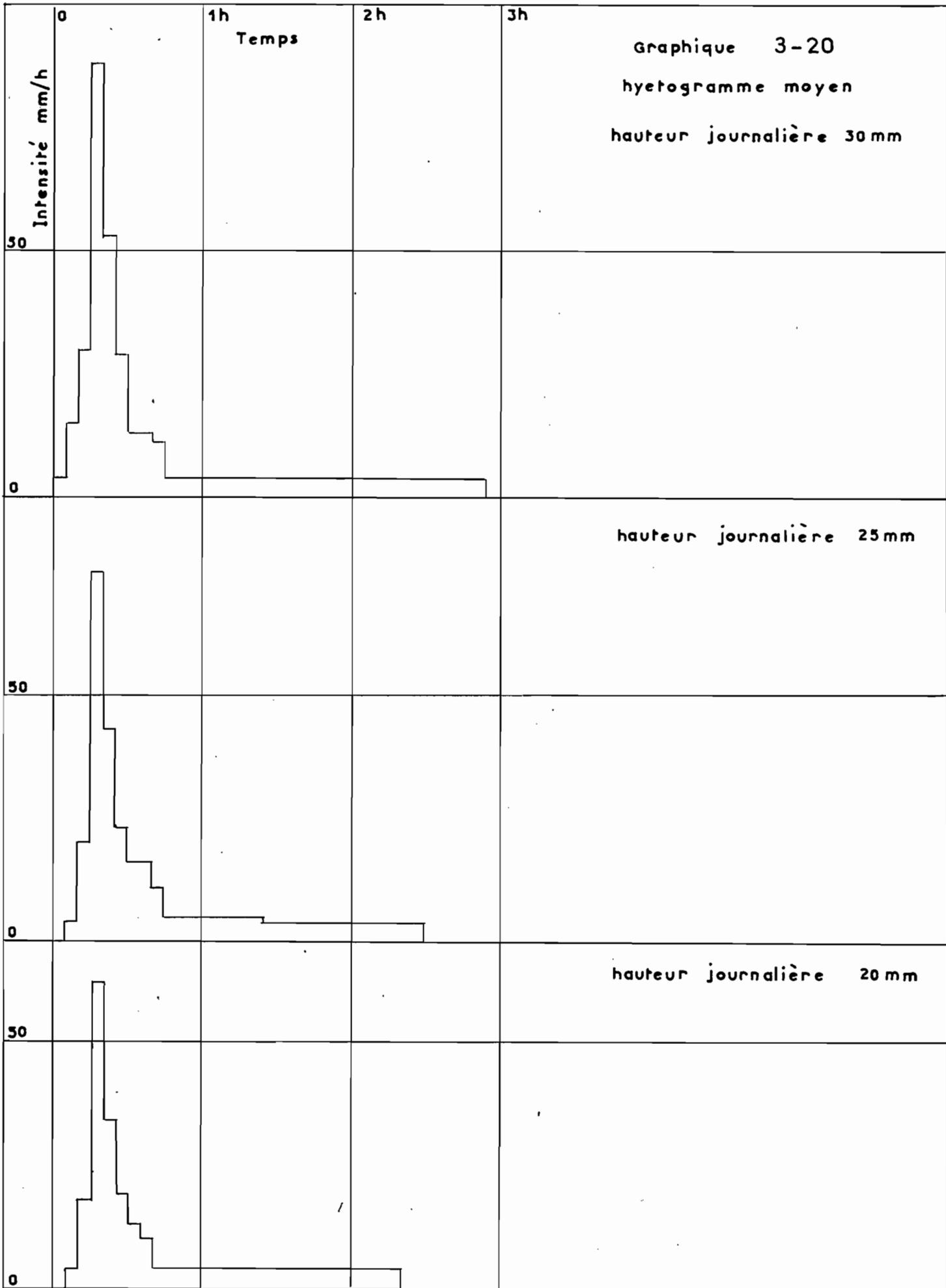
- l'intensité maximale,
- la durée du corps, ou pluie utile, correspondant à des intensités supérieures à une limite donnée : (10 mm/heure par exemple en MAURITANIE),
- la hauteur de la pluie utile, nous reviendrons plus loin sur cette notion,
- la durée totale de l'averse.

On trouvera ci-contre un diagramme montrant comment varient ces données (3-21). A l'aide de ce diagramme, il est facile d'obtenir tous les éléments du hyétogramme décennal.

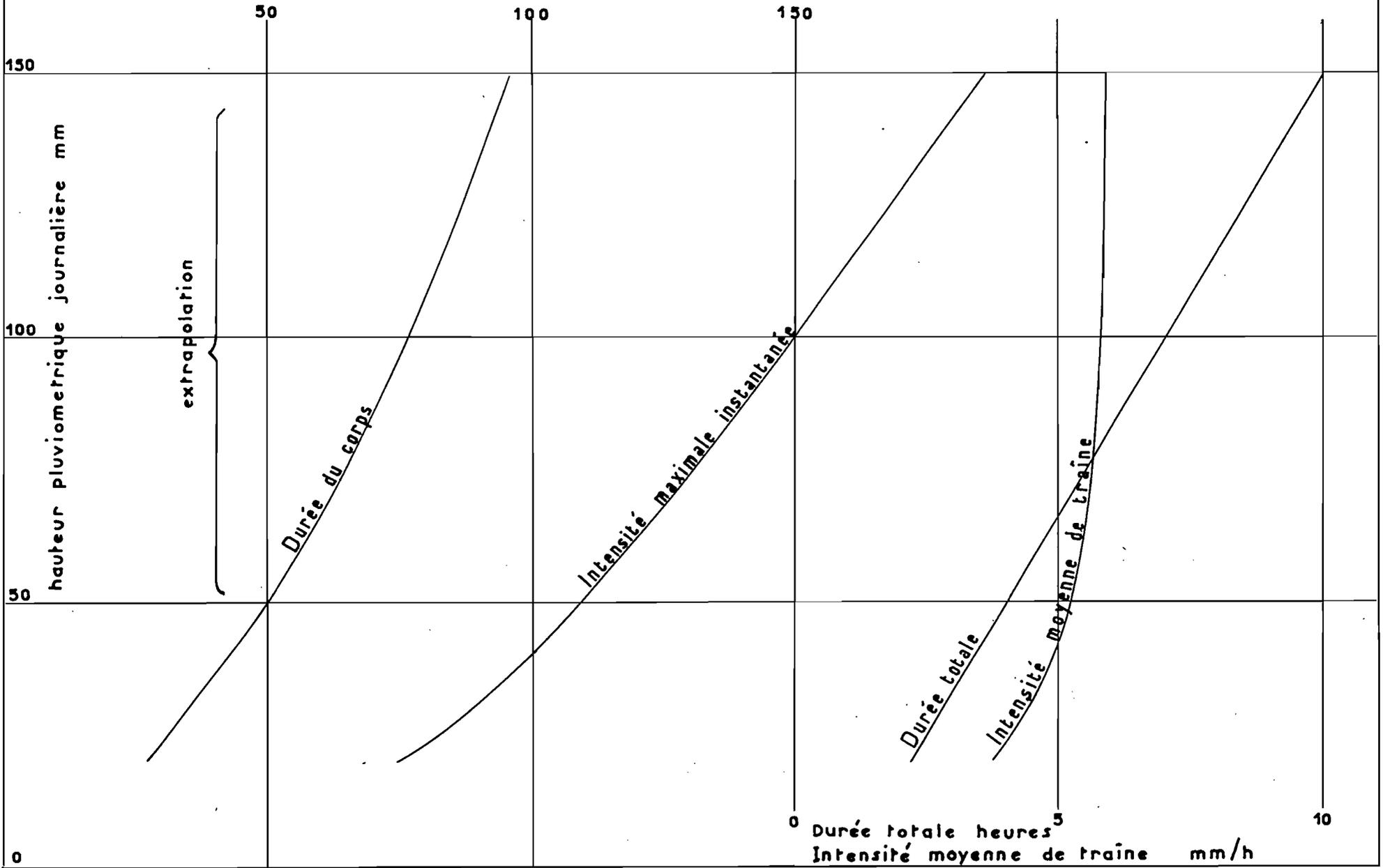
Malheureusement, cette méthode peut être en défaut pour de plus basses latitudes où les averses décennales sont de types différents des fortes averses courantes. A la limite, il s'agit de véritables pluies de mousson, alors que l'averse type est une tornade (mis en évidence par André BOUCHARDEAU).

Dans ce cas, on peut employer le procédé primitif suivant : un catalogue est établi pour toutes les très fortes averses connues. Une ébauche d'un tel catalogue est donnée ci-contre avec un nombre insuffisant d'averses. Le choix est plus large qu'on pourrait le penser car, entre les latitudes 12° et 20° Nord, les formes des diagrammes sont sensiblement les mêmes sur un même parallèle et ne varient que lentement du Nord au Sud. Par exemple, elles sont les mêmes entre les isohyètes 450 et 300 mm. Sur le tableau, les diagrammes observés sont situés d'autant plus à droite que l'averse





Durée du corps minute
Intensité maximale instantanée mm/h



est plus concentrée, donc plus proche de la tornade type. Parmi les averses figurant sur ce tableau, un certain nombre sont d'authentiques averses décennales. On constate sur ce tableau que la méthode que nous avons présentée plus haut ne peut plus s'appliquer rigoureusement pour des précipitations annuelles supérieures à 600 mm.

On a également utilisé la méthode du catalogue pour MADAGASCAR.

Pour les zones forestières, on emploie des procédés beaucoup plus simples ; par suite de l'effet d'amortissement du feuillage, la forme du hyétogramme a une influence beaucoup moins nette qu'en savane, sur l'hydrogramme de ruissellement.

A noter que pour les savanes du MOYEN-CONGO, il doit être possible d'utiliser la même méthode qu'en MAURITANIE.

4°) Conditions initiales :

Pour toutes les averses de hauteur voisine de l'averse décennale, les intervalles à la pluie précédente et la hauteur de la pluie précédente sont notées en faisant abstraction des très faibles averses, inférieures par exemple à 3 ou 5 mm.

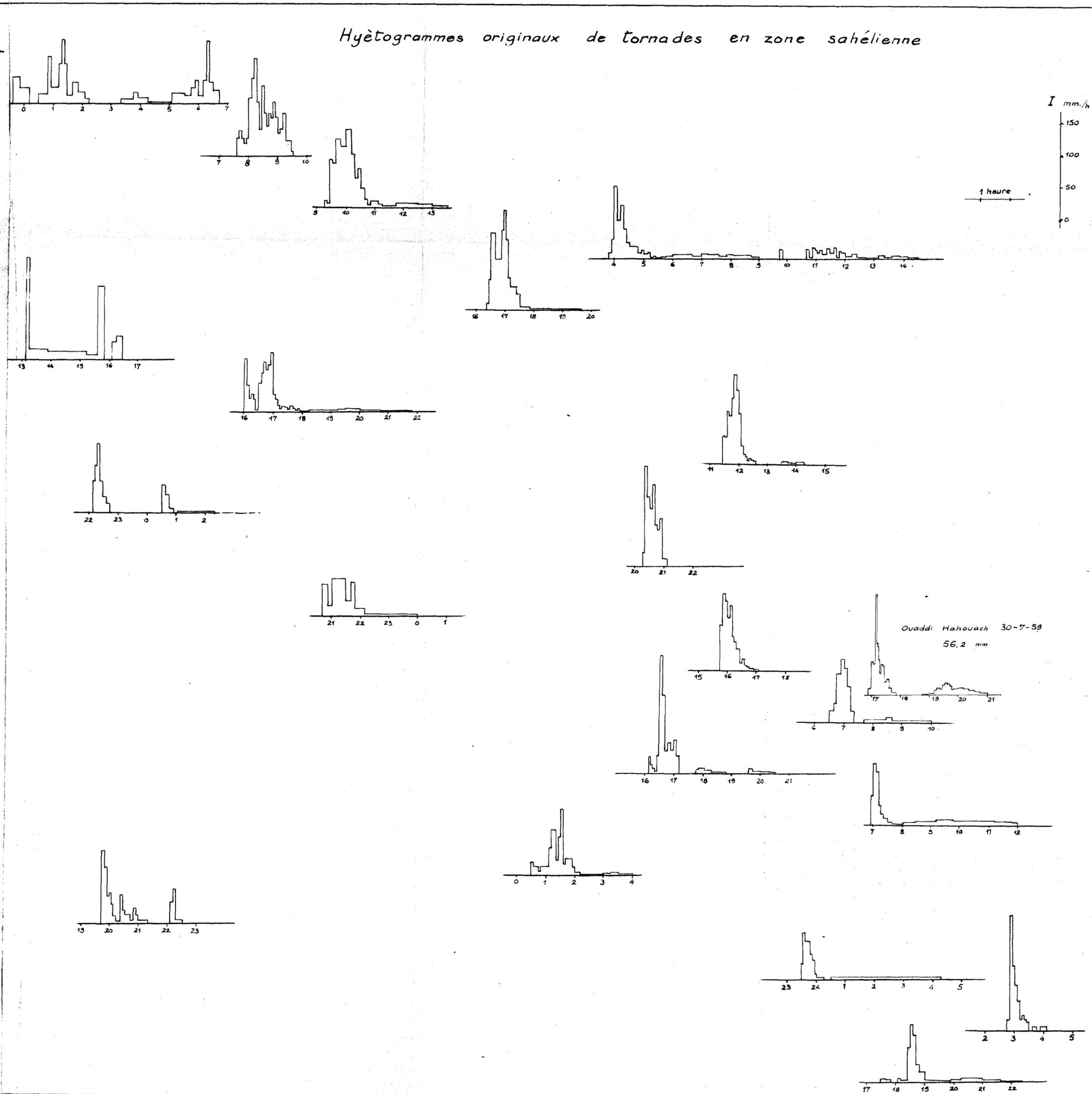
Il est facile de déterminer l'intervalle le plus fréquent et la valeur la plus fréquente de l'averse précédente. Pour cette dernière caractéristique, il suffit d'un ordre de grandeur.

Pour le choix des saisons, il est prudent de s'écarter du principe général et de prendre la saison la plus favorable au ruissellement.

Par exemple, la première partie de la saison des pluies pour le bassin sahélien peu perméable, car, dans la seconde moitié de la saison des pluies, la végétation est devenue assez dense et freine très sérieusement l'écoulement. Inversement, pour un terrain particulièrement perméable, il est préférable de supposer que l'averse décennale survient un peu avant la fin de la saison des pluies, alors que le sol a atteint un état de saturation suffisant.

Hyétogrammes originaux de tornades en zone sahélienne

Date	Lieu	Hauteur m Averse	Precipit. mensuelle annuelle
1-9-56	Gagara	116	450
18-8-56	Koumbaka	110	
12-8-56	Tin-Adjar	109	300
29-7-57	Koumbaka	88	500
31-7-56	Gagara	84	450
22-8-56	Maggia	79	500
5-9-56	Koumbaka	69	500
23-7-56	Koumbaka	65	500
20-8-56	Gagara	60	450
14-7-57	Koumbaka	60	500
5-7-57	Maggia	58	500
6-7-57	Koumbaka	58	500
31-8-56	Maggia	56	500
9-9-57	Koumbaka	55	500
31-7-58	Dionaba	54	300
16-7-56	Tin-Adjar	51	300
19-8-57	Koumbaka	49	500
27-7-57	Gagara	48	450
20-7-56	Tin-Adjar	47	300
10-9-55	Koumbaka	40	500



B - DETERMINATION de l'HYDROGRAMME UNITAIRE -

C'est là une opération classique décrite dans tous les manuels. Précisons un certain nombre de détails pratiques :

1°) Il s'agit d'abord de déterminer les averses unitaires : il faut donc que la durée de la pluie utile soit inférieure à une limite que l'on peut prendre égale au $\frac{1}{3}$ du temps de montée (rise). Mais si les averses observées sont peu nombreuses, on peut porter la limite à la moitié et, dans certains cas, jusqu'à la valeur du temps de montée. La comparaison des hydrogrammes montrera si le choix de la durée limite est justifié.

Premier point délicat : la séparation du ruissellement des écoulements hypodermiques et souterrains. En principe, l'arrêt du ruissellement est marqué par une cassure de la courbe de récession. En fait, la cassure est rarement très nette. Si l'on confie à plusieurs opérateurs la détermination de l'abscisse de cette cassure, ou même si on utilise des échelles dédifférentes, les résultats ne sont pas identiques.

Il faut alors tracer la courbe de séparation ; aux Etats Unis, on joint souvent l'origine de l'hydrogramme à la cassure de la courbe de récession par une droite, ce qui indique que, dès le départ, l'ingénieur n'a aucune illusion sur la précision des opérations.

A tort ou à raison, ceci choque l'esprit cartésien des Français qui remplacent la droite par un bel hydrogramme d'écoulement hypodermique avec un maximum. Dans de nombreux cas, le temps de réponse (lag) correspondant à ce maximum est à peu près constant. Il est assez facile à déterminer pour les averses qui n'ont pas ruisselé (à ne pas confondre avec les cas de ruissellement très partiel) ; on obtient ainsi une indication supplémentaire qui permet de pallier quelquefois le manque de précision qui affecte la fin du ruissellement. Il est heureux d'ailleurs que les hydrogrammes les plus intéressants soient ceux des averses intenses pour lesquelles, manifestement, le ruissellement est beaucoup plus important que les autres formes de l'écoulement, de sorte que même une erreur notable sur cette courbe de séparation est sans importance.

Une autre difficulté beaucoup plus grave est la suivante : à quoi correspond exactement ce que nous appelons ruissellement (surface run off) ? La définition la plus simple résulterait de sa représentation graphique, mais elle ne satisfait guère l'esprit.

Dans les régions peu perméables, soumises à des averses intenses, avec une végétation clairsemée, le ruissellement superficiel pour les fortes averses est bien tel qu'on se le représente : une nappe d'eau à peu près continue, d'épaisseur non négligeable se déplaçant à une vitesse notable pour s'entonner dans le réseau hydrographique qui souvent, dans ce cas, fait ce qu'il peut pour évacuer le déluge.

En AFRIQUE, nous connaissons presque tous ce phénomène qui correspond au cas d'emploi le plus classique des hydrogrammes unitaires.

Mais, si les conditions sont beaucoup moins favorables au ruissellement, il peut se produire les cas suivants :

- une partie seulement du bassin ruisselle : les pistes, les zones dénudées, les pentes les plus raides, les zones les plus imperméables ; nous reviendrons plus loin sur ce point.
- il se produit à la surface un film d'eau qui chemine lentement vers le réseau hydrographique, filtrant plus ou moins à travers feuilles mortes, racines et bases des touffes d'herbes,
- souvent, ces deux phénomènes se produisent à la fois.

L'hydrogramme est alors plus mou mais il n'est pas choquant d'utiliser la méthode des hydrogrammes unitaires. Il est cependant prudent de ne jamais perdre de vue ce que ces hydrogrammes représentent.

Enfin, si le sol est très perméable (terrains volcaniques), il n'y a que du ruissellement hypodermique ; l'expérience montre que l'on peut utiliser pour les fortes averses les hydrogrammes unitaires.

Nous rejoignons ce qui a été dit plus haut concernant la détermination de la courbe d'écoulement hypodermique.

Par ailleurs, si le bassin n'est pas très petit, l'hydrogramme peut ne pas être simple et présente, par exemple, une première pointe parasite (cas d'un petit affluent se jetant immédiatement à l'amont de la station de jaugeage).

Si cette pointe n'est pas très importante, on simplifie les hydrogrammes en conservant le même volume de ruissellement.

Si cette pointe est bien détachée, on peut la séparer et n'étudier que le bassin à l'amont du confluent de ce petit affluent. On peut également isoler une partie du bassin très éloignée et considérer un bassin réduit, si la pointe parasite se produit au contraire après la pointe principale.

Mais la première opération à effectuer consiste à vérifier s'il s'agit bien d'un phénomène systématique et non d'un hydrogramme particulier résultant d'une averse très hétérogène.

Mais, dans bien des cas, la solution la plus simple consistera, si on le peut, à déplacer la station de jaugeage.

Dans un même ordre d'idée, il est possible de supprimer de l'hydrogramme brut certaines pointes de ruissellement secondaires correspondant à une averse précédant ou suivant de peu l'averse principale, mais ceci n'est possible que si le bassin est bien pourvu en pluviographes.

Les hydrogrammes de ruissellement étant déterminés, on les ramène tous à un volume de ruissellement unitaire : 10.000 ou 100.000 m³, par exemple.

L'hydrogramme moyen de tous ces hydrogrammes est le diagramme de distribution.

Il est possible que l'étude mette en évidence deux diagrammes de distribution, l'un pour les faibles averses, l'autre pour les fortes averses ; c'est le second qui doit être pris en considération. Pour les bassins de forêts de plus de 5 ou 6 km², la forme de l'hydrogramme est assez sensible à la position de l'épicentre de l'averse.

Comment représenter le diagramme de distribution ? A notre avis, la méthode qui consiste à partager en 10 intervalles le temps de ruissellement ne définit pas de façon assez précise la valeur du maximum, qui est important pour la prévision des crues.

Nous préférons, pour un volume de ruissellement donné, indiquer l'ordonnée du maximum en m^3/s , et les ordonnées à des intervalles de temps bien déterminés, par exemple : 15 minutes, 10 minutes, 5 minutes avant le maximum, puis 5 minutes, 10 minutes, 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures etc..... après le maximum.

Cette opération peut être effectuée lorsqu'on détermine le diagramme moyen ; on veillera dans ce cas à bien mettre en coïncidence les maxima et non les débuts du ruissellement car, en pratique, le temps de montée est rarement absolument constant.

C - DETERMINATION du VOLUME de RUISSÈLEMENT pour une AVERSE DONNÉE -

C'est là la partie la plus délicate et la moins précise du dépouillement. Il s'agit en effet de dégager la part du ruissellement parmi les apports des précipitations, déduction faite de l'évaporation immédiate (négligeable pour les fortes averses et en pleine saison des pluies) de l'interception, du stockage à la surface du sol et de l'infiltration, une partie de ces pertes donnant lieu à de l'évaporation différée. On peut effectuer cette opération :

- soit en chiffrant l'ensemble des pertes par unité de temps ; sous son sens le plus général, on obtient ainsi la capacité d'absorption, qu'il est plus honnête d'appeler capacité d'absorption apparente, car la capacité d'absorption instantanée est pratiquement inaccessible pour un bassin expérimental.
- soit en déterminant le rapport du volume de ruissellement au volume de l'averse, c'est-à-dire le coefficient de ruissellement.

Cette donnée, plus facile à atteindre, a moins de prétention que la capacité d'absorption et, a priori, son emploi semblerait préférable ; mais, dans la pratique, la capacité d'absorption s'impose dans certains cas et nous en verrons un exemple plus loin.

On conçoit que si l'on veut étudier les corrélations entre coefficient de ruissellement et les diverses caractéristiques des averses, il est nécessaire de débarrasser celles-ci de toutes les parties parasites : traînes ou ondées préliminaires, d'où la notion de la "pluie utile" et du coefficient de ruissellement correspondant ($K_{ru} = \frac{V_r}{V_{P_{12}}}$)

On peut être amené aussi à utiliser dans certains cas, la "pluie efficace" qui correspond à une hauteur inférieure à celle de la pluie utile : il s'agit de la pluie qui tombe uniquement pendant la période où il y a ruissellement.

Sa détermination est moins arbitraire que celle de la pluie utile car sa durée est la même que celle de la pluie excédentaire (rain-fall-excess). Il est certain cependant que dans la plupart des cas, si l'on pouvait remplacer la pluie réelle par la pluie efficace, on obtiendrait un volume de ruissellement inférieur au volume observé. On définit un coefficient de ruissellement efficace ($K_{re} = \frac{V_r}{V_{P_e}}$)

La détermination de ces données pour les averses observées bute sur le manque d'homogénéité de la pluie.

On peut évidemment employer la méthode de HORTON qui consiste à découper le bassin, supposé de perméabilité homogène, en diverses parcelles recevant chacune une averse de hauteur homogène. On fait varier la capacité d'absorption pour l'ensemble des parcelles jusqu'à ce que la somme des volumes de ruissellement élémentaires soit égale au volume de ruissellement observé. Cette méthode, dans certains cas, peut rendre de grands services ; elle a été utilisée par R. BRAQUAVAL, par exemple, pour le bassin du KONKOURE, mais elle est longue et suppose l'homogénéité du bassin, ce qui est une hypothèse généralement peu rigoureuse.

On conçoit qu'il soit possible d'utiliser la méthode de HORTON avec des perméabilités différentes, mais les opérations deviennent très complexes et on sait qu'en hydrologie ce défaut conduit en définitive à des résultats incertains.

Lorsque le contour dans l'espace de l'averse est assez bien délimité et qu'elle est entourée d'une vaste zone à très faible précipitation, on peut éliminer les superficies peu arrosées et considérer un bassin réduit. C'est ce qui a été fait dans le désert du GOURMA où, pour certains types d'averses, seule une partie du bassin était arrosée d'une façon appréciable.

Si cela ne conduit pas à une simplification abusive, la méthode la plus facile consiste à remplacer la pluie réelle par une pluie homogène admettant un seul hyéto-gramme pour tout le bassin. Si l'averse est trop hétérogène, on ne l'utilise pas pour déterminer la capacité moyenne d'absorption, mais elle peut rendre des services pour l'examen de la perméabilité des diverses parties du bassin. "Il ne faut jamais rien rejeter" au moment du dépouillement, tout peut être utile.

Le remplacement de divers hyéto-grammes par un seul pose un problème. Le hyéto-gramme résultant doit évidemment donner la même hauteur que la moyenne des précipitations relevées sur l'ensemble des pluviomètres et pluviographes du bassin. On emploie plusieurs méthodes suivant les cas :

- Si les hyéto-grammes sont de formes analogues et qu'ils dépassent tous, nettement, la capacité d'absorption, on amène les maxima en coïncidence (sous réserve que ces maxima se produisent à quelques minutes d'intervalle pour un bassin de 10 à 25 km² de savane ; on peut aller jusqu'à 20 minutes pour un bassin de forêt). Le hyéto-gramme résultant est déterminé par la moyenne des ordonnées des hyéto-grammes composants.
- On prend quelquefois la moyenne des hyéto-grammes composants, après les avoir classés par intensité décroissante, mais ce procédé peut masquer la forme réelle de l'averse et conduire à des erreurs.
- Si les intensités maximales sont assez différentes, on peut utiliser la méthode employée par MM. ROCHETTE et BRAQUAVAL. Elle consiste à découper l'échelle des temps des hyéto-grammes composants en un certain nombre d'intervalles. A l'intérieur de chaque intervalle, les ordonnées des différents hyéto-grammes sont laissées intactes, mais les abscisses sont réduites dans un rapport qui est fonction du "poids" affecté à chaque hyéto-gramme. La juxtaposition des intervalles réduits constitue l'intervalle correspondant du hyéto-gramme résultant. On construit ainsi,

intervalle par intervalle, un hyétogramme beaucoup plus dentelé que tous ceux dont il est issu et qui respecte les pointes individuelles. N'oublions pas en effet qu'une précipitation excédentaire localisée peut ruisseller, entrer dans le réseau hydrographique et parvenir à la station de jaugeage, même après avoir traversé, sur la majeure partie de son cours, des zones n'ayant pas ruisselé.

- Enfin, dans certains cas, il est absolument impossible de composer les hyétogrammes, même si la hauteur de précipitation est homogène.

Ayant procédé à ces diverses opérations, nous disposons, pour chaque averse, d'un volume de ruissellement et d'un hyétogramme bien déterminé.

La théorie veut alors qu'on ramène le volume de ruissellement à une pluie dite "excédentaire" (rain-fall excess), en divisant le volume de ruissellement par la superficie du bassin versant. Cette pluie excédentaire est portée au sommet du hyétogramme. Elle est limitée vers le bas par une horizontale dont l'ordonnée est la capacité d'absorption moyenne pendant la durée de la pluie excédentaire.

Les hydrologues plus raffinés remplacent cette horizontale par un élément de courbe incliné de gauche à droite, pour tenir compte de l'augmentation de la saturation du terrain avec la durée de l'averse. Et, effectivement, dans le cas général, la capacité d'absorption instantanée s'abaisse jusqu'à 4 à 6 mm/h pour des averses très fortes et très longues. Le cas le plus caractéristique est celui des cyclones du Pacifique qui provoquent des averses de plusieurs centaines de mm en plus de 24 heures.

Ce chiffre de 4 à 6 mm/h correspond à la saturation absolue. Il ne s'agit pas, d'ailleurs, d'une perte pour l'écoulement ; la majeure partie et même presque la totalité de ces 4 à 6 mm/h réapparaît sous forme d'écoulement hypodermique ou souterrain.

Il est possible de déterminer la capacité moyenne d'absorption suivant la méthode classique dans le cas de bassins peu perméables, à faible couverture végétale recevant de fortes averses ; c'est d'ailleurs dans ce cas que sont observées les plus fortes crues. Mais, si l'on s'écarte de ces conditions, les phénomènes sont beaucoup moins simples.

Tout d'abord, si le bassin n'est pas relativement imperméable, il ne ruisselle pas de façon homogène en général, comme l'a vu H. PELLERAY en 1955 et comme l'a démontré récemment A. BOUCHARDEAU. Le chiffre trouvé pour la capacité d'absorption moyenne non seulement n'est pas constant, mais encore augmente avec la hauteur ou l'intensité de l'averse, au lieu de décroître sous l'effet d'une meilleure saturation du sol, comme on pourrait s'y attendre.

L'explication de cette augmentation est facile. Divisons le bassin en parcelles de superficie S_i , classées par perméabilité croissante P_i . Nous supposons, pour simplifier, que seule intervient l'infiltration, l'évaporation et l'interception étant négligeables. La capacité d'absorption C_a devient la capacité d'infiltration C_i .

Soit Q_R le débit de ruissellement et I l'intensité de la pluie supposée constante pendant une longue durée.

Lorsque le ruissellement a atteint un régime d'équilibre :

$$Q_R = \sum_1^p (I - P_i) S_i$$

Seules figurent dans cette relation les parcelles pour lesquelles $P_i < I$.

Soit I_{exc} : l'intensité excédentaire

et S : la superficie totale du bassin

$$I_{exc} = \frac{Q_R}{S} = \sum_1^p (I - P_i) \frac{S_i}{S}$$

La capacité d'~~absorption apparente~~^{infiltration} de l'ensemble est :

$$C_i = I - I_{exc} = I - \sum_1^p (I - P_i) \frac{S_i}{S}$$

$$C_i = I \left(1 - \sum_1^p \frac{S_i}{S} \right) + \sum_1^p \frac{P_i S_i}{S}$$

- Pour des valeurs de I inférieures à la plus faible perméabilité P_1

$$C_i = I$$

- Pour $I \neq P_1, \sum_1^p (I - P_i) \frac{S_i}{S} \neq 0$

$$C_i \neq P_1$$

- Pour $I \geq P_u$ correspondant à la perméabilité maximum :

$$\sum_1^p \frac{S_i}{S} = 1$$

$$C_i = \sum_1^p \frac{P_i S_i}{S}$$

moyenne pondérée des perméabilités indépendante de I

$$\sum_1^p \frac{P_i S_i}{S} > P_1$$

Donc C_i croît de P_1 à $\sum_1^p \frac{P_i S_i}{S}$,

Quand I croît de P_1 à P_u

Au delà, C_i reste constant et on retrouve le cas précédent mais, pour des bassins perméables ou très perméables, jamais I n'atteint P_u . On peut même dire que si I est faible, ou si le bassin est très perméable, on retrouve simplement I quand on calcule C_a , et l'opération n'a pas grande signification. Ceci est d'ailleurs valable pour les denses couvertures forestières pour lesquelles la connaissance de l'intensité maximum est sans grand intérêt.

Dans la pratique, pour ces terrains perméables, l'écoulement ne commence pas avant qu'il ne soit tombé une quantité d'eau donnée (précipitation limite) qui est interceptée par la végétation, remplit les "micro-mares" puis imbibe la surface du sol. C'est ensuite seulement que la capacité d'infiltration correspond suivant l'exposé précédent, à la perméabilité telle qu'elle résulte des essais PORCHER, par exemple.

Cette hauteur de précipitation limite, comme l'a montré A. BOUCHARDEAU, varie légèrement avec l'intervalle séparant l'averse étudiée de l'averse précédente.

La courbe des précipitations limites P_0 en fonction de cet intervalle est généralement bien nette, sauf pour les très grands intervalles. Sur ce dernier point, P. DUBREUIL et P. JARRE ont obtenu une vérification intéressante sur un bassin du DAHOMEY très perméable : une première année très déficitaire, 1956, à averses très espacées, a donné des valeurs incohérentes de P_0 . La seconde année, 1957, a été excédentaire. Au début, les valeurs de P_0 ont encore été incohérente, puis très vite, on a retrouvé une courbe de P_0 en fonction de l'intervalle, très analogue à celles trouvées au TCHAD en terrain de même nature. Mais, au TCHAD, les pluies pendant le court hivernage sont toujours relativement rapprochées, de sorte que l'on ne retrouvera probablement jamais les phénomènes rencontrés au DAHOMEY en 1956.

Notons que P_0 est absolument indépendant de l'intensité (sauf intensité très faible naturellement). On voit donc que le schéma classique de détermination de la capacité d'absorption apparente se modifie singulièrement dans ce cas : on doit d'abord amputer le hyétogramme (celui de la pluie utile de préférence) de P_0 sans se soucier de l'intensité. C'est ensuite seulement que l'on peut déterminer la capacité d'absorption (ici capacité d'infiltration) à partir de la pluie excédentaire, comme par le procédé classique ; mais la capacité d'infiltration trouvée va croître avec l'intensité de la précipitation de la pluie réduite (pluie utile moins précipitation limite).

Le bilan de l'averse est alors le suivant :

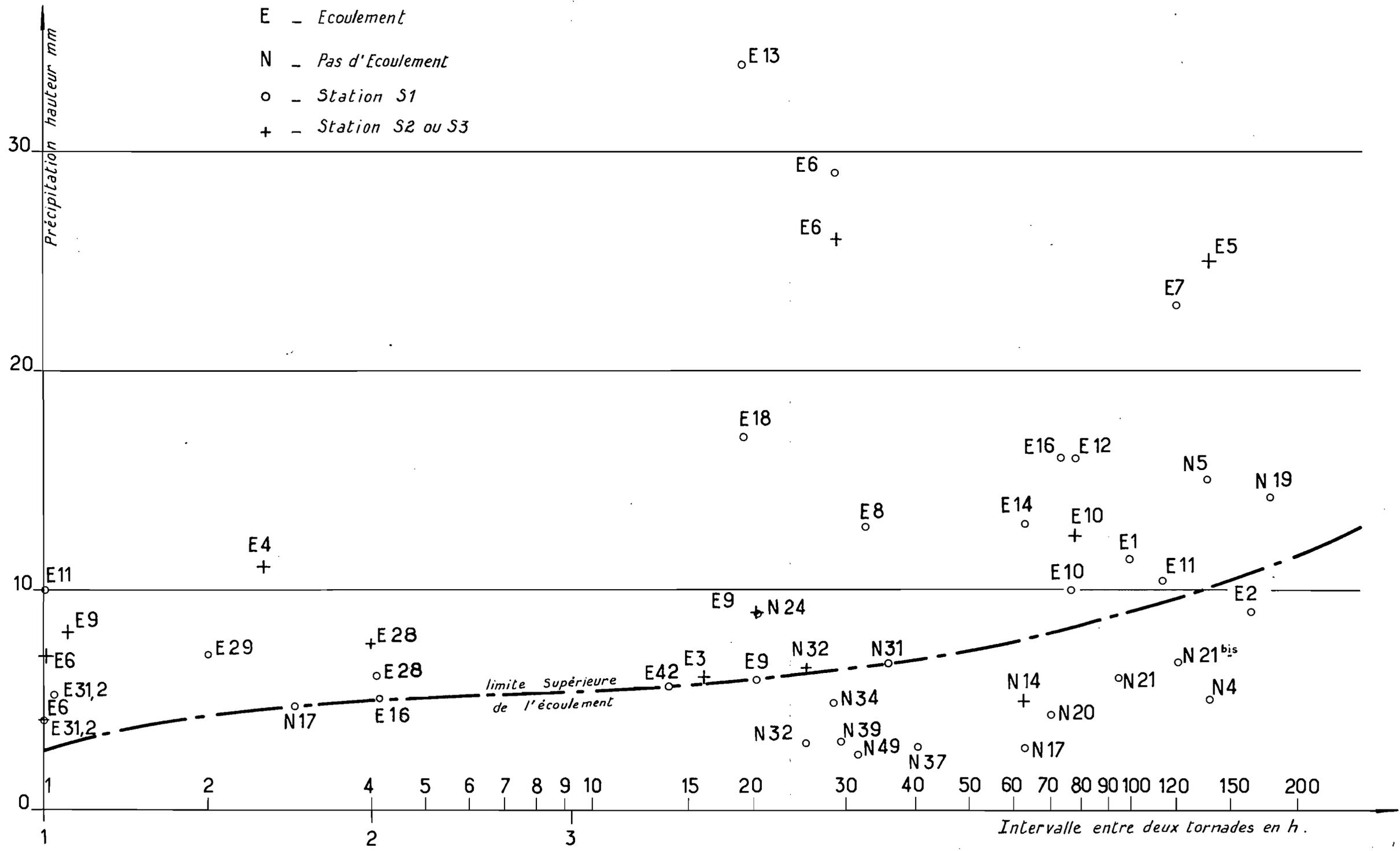
RECHERCHE DE LA PRÉCIPITATION LIMITE DE RUISSELLEMENT

COURBE HAUTEUR - INTERVALLE

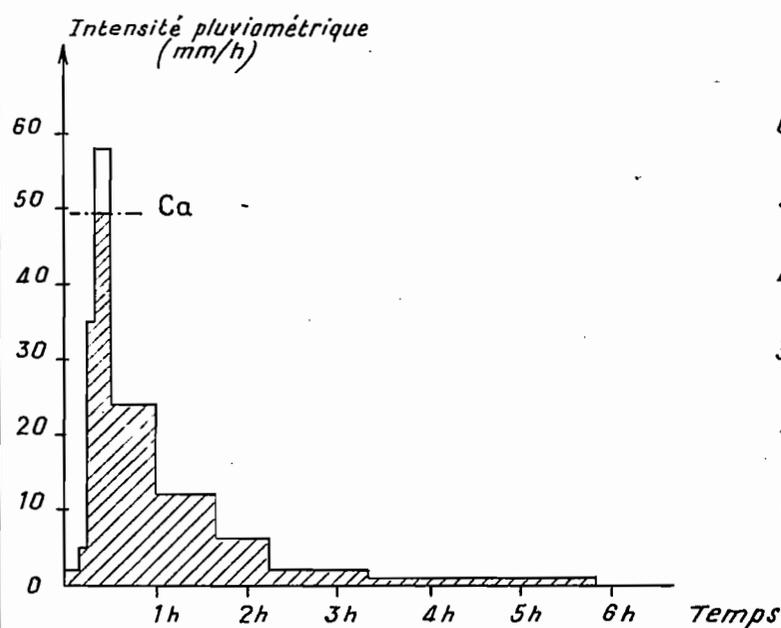
CAMPAGNES 1956-1957 (OUADI KAOUN-TCHAD)

o E15

- E - Ecoulement
- N - Pas d'écoulement
- o - Station S1
- + - Station S2 ou S3

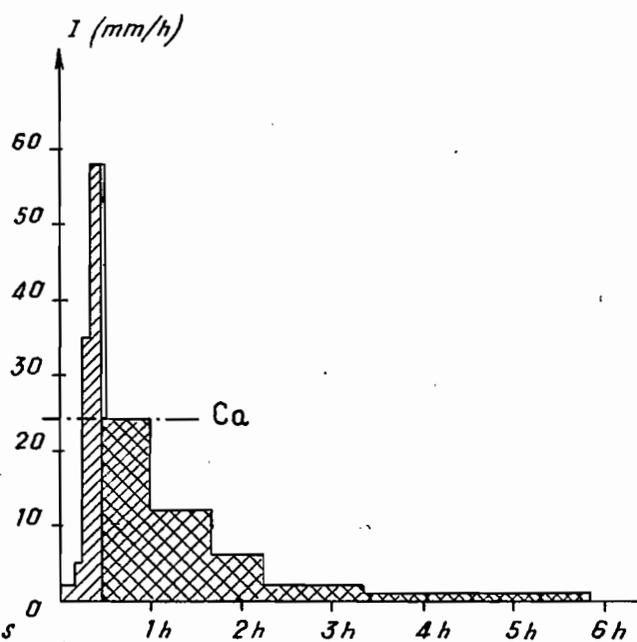


DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'ABSORPTION APPARENTE



Méthode classique

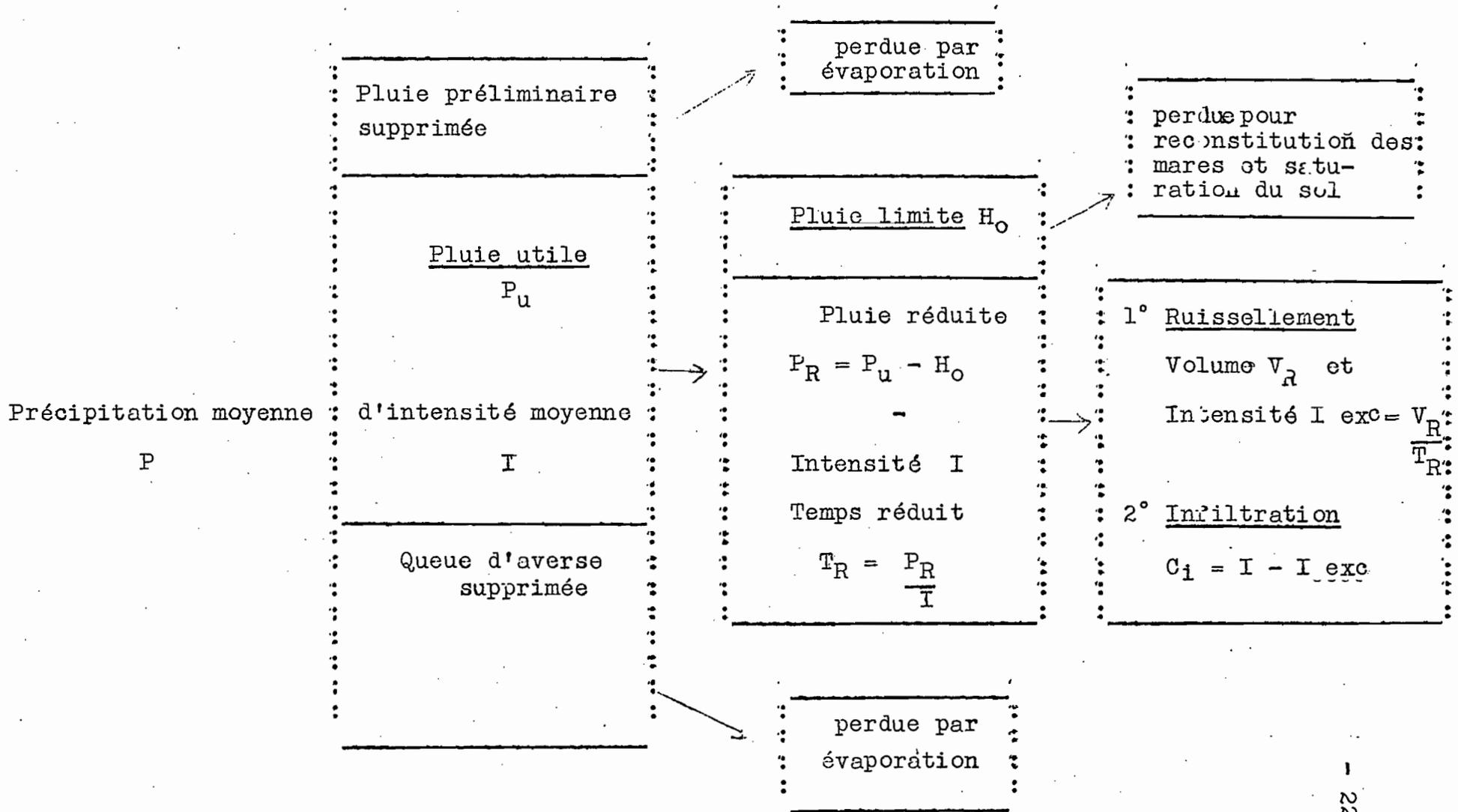
P_{exc} : 1,4 mm
 Ca : 49,5 mm/h



Méthode de la "pluie - limite" (A. BOUCHARDEAU)

Pluie limite P_o : 11 mm
 Pluie excédentaire P_{exc} : 1,4 mm
 Capacité d'absorption Ca : 24 mm/h

SCHEMA des DIFFERENTES OPERATIONS
pour le CALCUL de la CAPACITE d'ABSORPTION



Il est facile de définir non seulement C_i mais K_{re} par cette méthode. Il a été démontré, tout au moins au TCHAD, que les valeurs de C_i sont bien en accord avec les résultats des mesures effectuées par la méthode PORCHER.

Le coefficient de ruissellement ou la capacité d'absorption ayant ainsi été obtenus pour chaque averse, il s'agit de les extrapoler pour l'averse décennale, ce qui suppose l'étude des corrélations entre ces données et les divers facteurs dont elles dépendent : hauteur de l'averse, intensité pluviométrique maximum, intervalle à la pluie précédente, saison, répartition dans l'espace.

Dans le cas général, le nombre d'averses est insuffisant pour une étude régulière des corrélations ; aussi, employons-nous le procédé simplifié suivant : un tableau général est dressé sur lequel sont portés toutes les caractéristiques des averses et les résultats du ruissellement C_a ou C_i ; K_r ; K_{ru} ; K_{re} .

La représentation de la saturation du sol pose un problème ; on peut prendre en considération l'intervalle à la pluie précédente et la hauteur de l'averse précédente ou un indice de saturation combinant les deux ; le débit de base juste avant la crue représente bien, dans certains cas, la saturation. On peut réduire les facteurs de dispersion, en remplaçant l'averse réelle par la pluie utile.

Il y aurait d'ailleurs intérêt à généraliser la notion de pluie réduite dont nous avons parlé plus haut.

Au besoin, pour limiter les dimensions du tableau, on élimine les averses les plus faibles.

Une fois le tableau dressé, l'examen simultané du coefficient de ruissellement et des facteurs qui le conditionnent permet de dégager des tendances qui facilitent le choix du coefficient de ruissellement et de la capacité d'absorption correspondant à l'averse décennale.

Deux précautions sont à prendre :

a) Il faut examiner soigneusement toutes les averses dont les résultats s'écartent des tendances générales ; cet examen ne doit pas avoir pour objet de chercher à mettre en accord à tout prix les points aberrants avec la tendance générale, mais, au contraire, de rechercher un indice éventuel d'une tendance particulière, pouvant devenir prépondérante dans le cas de la crue décennale.

b) On doit comparer les séries de valeurs obtenues à celles qui ont été trouvées sur d'autres bassins expérimentaux pour des averses analogues. La comparaison permet de mieux dégager les tendances.

Il arrive que le nombre d'averses soit suffisant pour que l'on puisse chercher des corrélations, par exemple, entre le coefficient de ruissellement utile K_{ru} et la hauteur de pluie utile. La notion de pluie utile réduit la dispersion dans le cas présent ; le fait que les hyétogrammes soient tous de forme semblable agit dans le même sens.

Mais ceci n'empêche pas la corrélation d'être assez lâche. Trop de facteurs interviennent dont certains peuvent être imprévus. Il suffit, par exemple, que le nombre de pluviographes soit trop faible pour que la hauteur de la pluie utile soit mal connue. Encore est-il heureux que, dans nos régions, la neige ou la grêle ne viennent pas introduire d'autres facteurs de dispersion.

Par ailleurs, l'étude directe des perméabilités avec l'aide des pédologues peut donner une certaine sûreté à l'extrapolation en terrain perméable ou très perméable.

En supposant pour chaque averse que la pluie réduite est d'intensité constante, on peut tracer la courbe des intensités excédentaires (ou de la capacité d'infiltration) à partir des mesures de perméabilité et reporter sur le même graphique les capacités d'absorption calculées comme il a été indiqué précédemment, c'est-à-dire en tenant compte de la "précipitation limite" de A. BOUCHARDEAU.

L'ensemble des points expérimentaux obtenus peut permettre de retoucher la courbe, mais la forme générale de celle-ci étant connue, l'extrapolation est plus sûre. Là aussi, il y a des points aberrants qu'il faudra examiner de très près.

Ayant ainsi tous les éléments, on peut calculer la crue exceptionnelle. Mais, on peut déduire de cet ensemble, que le jugement de l'ingénieur est constamment mis à rude épreuve et que le jour où cette interprétation pourra être automatique n'est pas encore venu, tout au moins en AFRIQUE.

Une dernière précaution qui s'impose est de comparer les résultats obtenus aux crues décennales de bassins expérimentaux bien connus, en ne faisant abstraction d'aucune différence de constitution physique du bassin. Ceci montre bien qu'à côté des études occasionnelles sur bassins expérimentaux, dont la durée est assez limitée, il faut conserver des bassins expérimentaux de base dotés d'un équipement assez complet et suivis pendant une durée assez longue pour que les résultats obtenus présentent des garanties d'exactitude et de précision suffisantes.