

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
Service hydrologique

NORMES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES

pour projets d'aménagements hydrauliques

(Bassin du Jaguaribe - CEARA - BRÉSIL)

par Pierre DUBREUIL

avec la collaboration de M^r Sylvio CAMPELLO

D8
DUB

PARIS - décembre 1966

7289

LB 772

O.R.S.T.O.M.

Service hydrologique

NORMES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES
pour projets d'aménagements hydrauliques

(Bassin du Jaguaribe - CEARA - BRESIL)

par Pierre DUBREUIL

Chef du département de la recherche appliquée
avec la collaboration de M. Sylvio CAMPELLO
ingénieur hydrologue à la SUDENE

PARIS, Décembre 1966

D 8
DUB

7289

Ce recueil de normes puise son information dans les études entreprises, dans le cadre de la coopération franco-brésilienne, par l'Association pour l'organisation des missions de coopération technique - ASMIC - et la Surintendance du développement du Nord-Est - SUDENE, études réalisées par le groupe d'étude du Val du JAGUARIBE - GEVJ (SCET-Coopération avec la collaboration de l'ORSTOM et GEOTECHNIP d'une part et SUDENE d'autre part) et ayant fait l'objet des 4 publications suivantes :

- 1°) Mise en valeur du bassin du JAGUARIBE. Etudes générales de base (1962-64) :
 - a) tome IV "Les Eaux de Surface" rapport établi par la section hydrologique du GEVJ sous la direction technique de l'ORSTOM, comprenant 3 volumes et 2 volumes complémentaires relatifs à 1965.
 - b) tome VIII "Possibilités et orientations hydroagricoles" rapport établi par la direction de la mise en valeur agricole de la SCET-Coopération, comprenant 4 volumes.
- 2°) "Monographie hydrologique du bassin du JAGUARIBE" rapport établi par P. DUBREUIL, G. GIRARD et J. HERBAUD du Service hydrologique de l'ORSTOM, comprenant 3 volumes.
- 3°) "Etude des précipitations appliquées à la mise en valeur hydro-agricole" par P. DUBREUIL.

L'établissement des données de base climatiques et hydrologiques nécessaires à un projet d'aménagement hydraulique déterminé, situé dans le bassin du JAGUARIBE, est un travail que peut réaliser sans difficulté un hydrologue averti à partir de l'information contenue dans ces 4 groupes d'ouvrages.

Mais pour les ingénieurs chargés d'aménagement hydraulique au stade des programmes et des avant-projets, la consultation de ces ouvrages, dépassant 1 000 pages, est impensable. C'est pour eux que ces normes de calcul ont été établies.

Elles doivent permettre de répondre aux principales questions techniques que pose un aménagement hydraulique aux stades préliminaires à celui du projet définitif, dans les domaines climatiques et hydrologiques.

Etablies à partir d'une information prise dans le bassin du JAGUARIBE, sauf indication contraire, ces normes de calcul peuvent être utilisées dans tout le Nord-Est du BRESIL dans la mesure où les conditions du milieu se situent dans la gamme explorée ici ; aucune extrapolation hors des limites n'est recommandée.

Ces normes ne peuvent prétendre conduire à des résultats aussi précis que ceux d'une étude spécifique. Une estimation de la précision est faite pour chaque norme, et si possible par référence à un intervalle de confiance à l'intérieur duquel le résultat peut se situer avec un certain pourcentage (80 ou 95 %) de chance.

Ces normes se veulent simples et faciles d'emploi, au détriment peut-être de la véracité scientifique, aussi l'hydrologue ne doit-il attacher aucun "sens" physique ou autre aux "formes" des liaisons choisies, leur but étant essentiellement pratique.

CHAPITRE I

NORMES CLIMATIQUES

Pour utiliser les normes climatiques, il suffit de connaître l'emplacement du lieu à étudier, s'il est dans le bassin du JAGUARIBE. Sinon, il faut disposer, en outre :

- a) de la hauteur annuelle de précipitation pour chaque année observée au lieu à étudier ou à proximité, ce qui permet le calcul de \bar{P} sur la période de référence R 1918-58 et de G_v (voir détails explicatifs paragraphe 1.1.4).
- b) le cas échéant de la hauteur annuelle de précipitation, en 2 postes de la région du lieu d'études, sur toute la période 1918-58, si l'information a) n'est pas complète.
- c) de la répartition mensuelle moyenne des pluies soit au lieu étudié soit aux postes régionaux évoqués au b).

Dans tous les cas s'il s'agit d'un projet d'irrigation, la connaissance des types de sol à irriguer est souhaitable (ordre de grandeur de la réserve en eau de ceux-ci) pour le calcul des besoins en eau (paragraphe 1.3.2).

1.1. HAUTEUR ANNUELLE de PRECIPITATION P

1.1.1 - Valeur moyenne \bar{P}

C'est la caractéristique principale qui sert de clef de départ pour la plupart des normes.

Le graphique n° 1 donne la carte des isohyètes moyennes pour la période 1918-58 sur le bassin du JAGUARIBE ; on peut y déterminer \bar{P} pour un lieu quelconque par interpolation entre isohyètes en tenant compte également de l'exposition du relief (vent dominant soufflant du Nord-Est) et de la distance aux postes d'observations.

1.1.2 - Variabilité et précision de \bar{P}

L'abaque n° 2 permet à partir de la valeur moyenne \bar{P} :

- a) de calculer la hauteur annuelle de précipitation de récurrence 5, 10 ou 20 ans, abondante ou sèche.
- b) d'estimer la précision avec laquelle est connue \bar{P} dans un intervalle de confiance IC à 95 %.

Pour employer cet abaque, il faut connaître le coefficient de variation $C'v$ de la racine carrée de hauteur annuelle de précipitation \sqrt{P} (rapport de l'écart-type s à la moyenne \sqrt{P} pris sur la période 1918-58).

$C'v$ prend une valeur différente avec la zone à pluviométrie homogène contenant le lieu étudié (voir graphique n° 3 pour les limites des zones) :

- Zone Sud-Est	$C'v = 0,17$
- " Sud-Ouest	"
- " Centre	"
- " Ouest	$C'v = 0,19$
- " Est V'	"
- " Est	$C'v = 0,21$
- " Nord-Ouest	"
- " Nord	$C'v = 0,25$

Dans tous les abaques dont la base d'entrée est \bar{P} , l'emploi des limites de \bar{P} (pour IC 95 %) permet d'apprécier la précision maximale de l'abaque (erreur minimale sur la détermination d'une norme N car la relation N (\bar{P}) apporte une dispersion supplémentaire).

1.1.3 - Zones à pluviosité homogène

Le graphique 3 en donne la représentation pour le bassin du JAGUARIBE.

Pour chaque zone, on y trouve :

- un diagramme de la répartition mensuelle moyenne de la hauteur annuelle \bar{P} en %, avec indication de la durée moyenne de la saison des pluies efficace SP (définition au paragraphe 1.3).
- les limites de variation à l'intérieur de chaque zone de \bar{P} , de $C_v(\bar{P})$, et des hauteurs h 1 et h 10 de précipitation journalière de récurrence 1 et 10 ans (paragraphe 1.2 pour détails).

1.1.4 - Extension hors du bassin du JAGUARIBE

La valeur moyenne \bar{P} à utiliser doit être calculée sur 1918-58 si l'on désire obtenir la précision définie sur l'abaque n° 2. Il y a toujours à proximité du lieu étudié ou dans la région, un poste pluviométrique observé sur 1918-58 (période de référence R) ; par simple règle de trois, on peut estimer la valeur de \bar{P} pour cette période à partir des données disponibles quand elles sont de plus courte durée ; il vaut mieux procéder par comparaison avec plusieurs postes, afin de déterminer un coefficient de correction moyen C.

Exemple : soit L le lieu étudié où la pluviosité est connu sur N années, telles que $N < R$. On connaît la pluviosité sur la période R en 2 postes A et B.

On calcule la valeur moyenne de \bar{P} en ces 2 postes sur les 2 périodes N et R, et l'on détermine :

$$C_A = \frac{R \bar{P}_A}{N \bar{P}_A} \quad , \quad C_B = \frac{R \bar{P}_B}{N \bar{P}_B}$$

On prend $C = \frac{1}{2} (C_A + C_B)$

et $R^{\bar{P}}_L = C \cdot N^{\bar{P}}_L$

$R^{\bar{P}}_L$ est la valeur moyenne estimée au lieu L en R années, valeur à utiliser dans les normes.

La connaissance de C_v (\bar{P}) et de la répartition mensuelle moyenne des pluies au lieu étudié, permet de se rattacher par analogie à une zone de pluviosité homogène (graphique n° 3). Si cela est possible, on peut alors utiliser sans crainte d'erreur grossière la suite des normes.

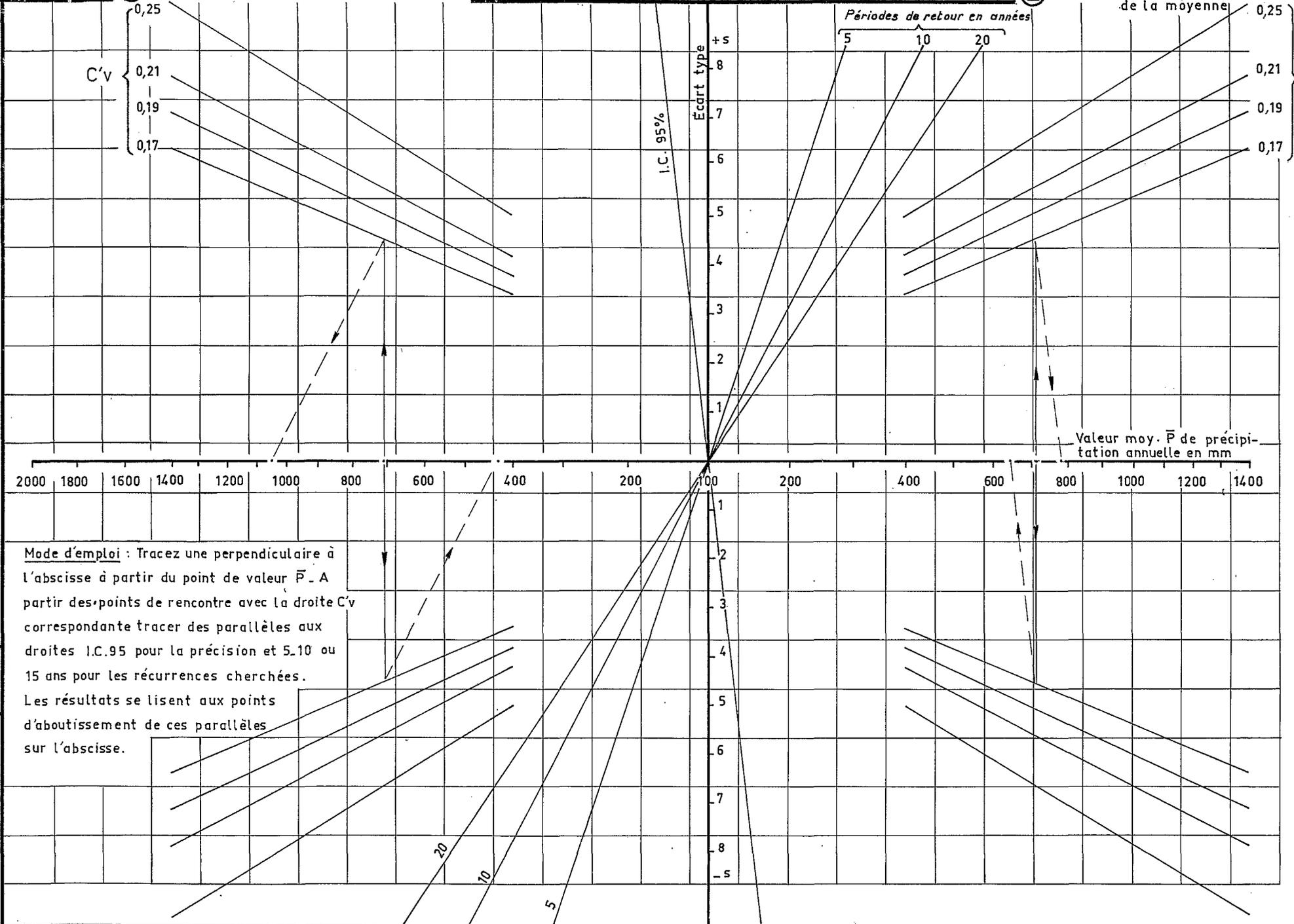
1.1.5 - Sécheresse pluriannuelle

Pour un aménagement avec réserve interannuelle, la variabilité de \bar{P} définie à l'abaque n° 2 ne suffit pas. On doit également pouvoir se protéger contre une séquence sèche pluriannuelle. Les normes suivantes ont une récurrence moyenne d'apparition comprise entre 50 et 100 ans :

- a) pendant 3 ans successifs, la hauteur moyenne annuelle de précipitation peut être seulement égale à 60 % de \bar{P} :
 - pendant 5 ans consécutifs, à 65 % de \bar{P}
 - pendant 8 ans consécutifs, à 75 % de \bar{P}
- b) exemple de modèle de séquence sur 8 ans en % de \bar{P} par années successives : 76 - 81 - 47 - 47 - 94 - 96 - 100 - 50 (modèle observé à QUIKERAMOBIM de 1951 à 1958).

Ⓘ Pour une période de retour de 5-10 ou 20 ans

Ⓜ Intervalle de confiance pour l'estimation de la moyenne



Mode d'emploi : Tracez une perpendiculaire à l'abscisse à partir du point de valeur \bar{P} . A partir des points de rencontre avec la droite C_v correspondante tracer des parallèles aux droites I.C.95 pour la précision et 5-10 ou 15 ans pour les récurrences cherchées. Les résultats se lisent aux points d'aboutissement de ces parallèles sur l'abscisse.

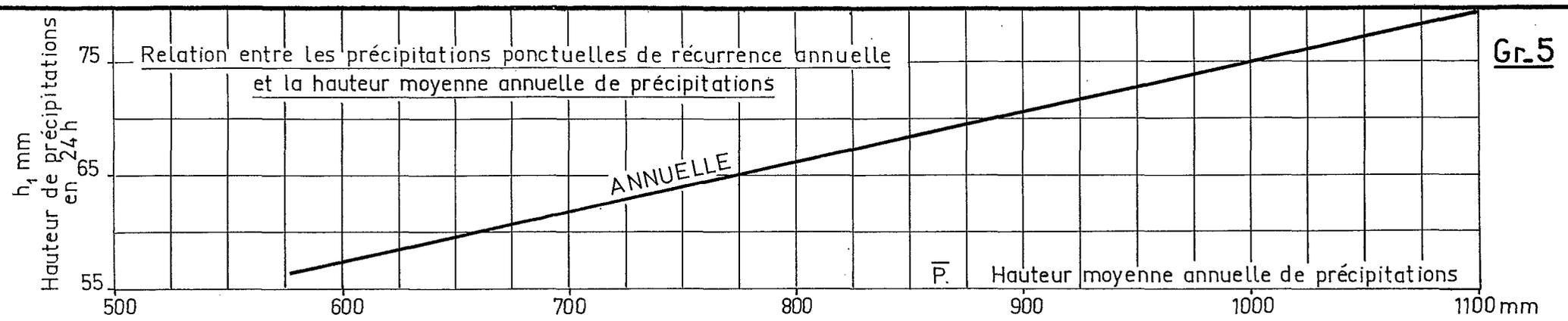
1.2. PRECIPITATIONS JOURNALIERES

3 abaques fournissent tous renseignements en fonction de \bar{P} :

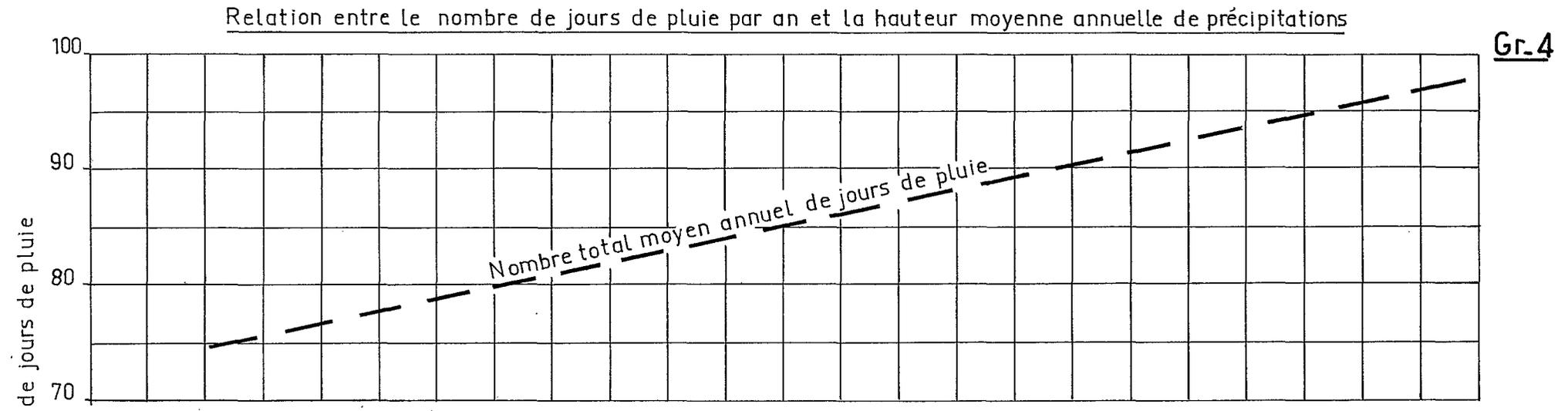
- a) l'abaque n° 4 donne le nombre moyen annuel total de jours de pluie et de jours de pluie supérieure à 10 mm, ainsi que la variabilité de ce N_{10} pour des récurrences de 5 et 10 ans,
- b) l'abaque n° 5 donne la hauteur de précipitation journalière de récurrence annuelle (celle qui a environ 100 chances de survenir en 100 ans),
- c) l'abaque n° 6 donne le rapport à h_1 des hauteurs de précipitation journalière de récurrence 5, 10, 20, 50 et 100 ans, permettant le calcul de ces dernières à partir de h_1 .

Le graphique n° 7 donne la répartition des intensités de chute de pluie en fonction du temps pour des précipitations de récurrence 10 et 100 ans de hauteurs totales égales à 105 et 140 mm. Les intensités de précipitations de hauteurs différentes s'en déduisent par simple règle de trois.

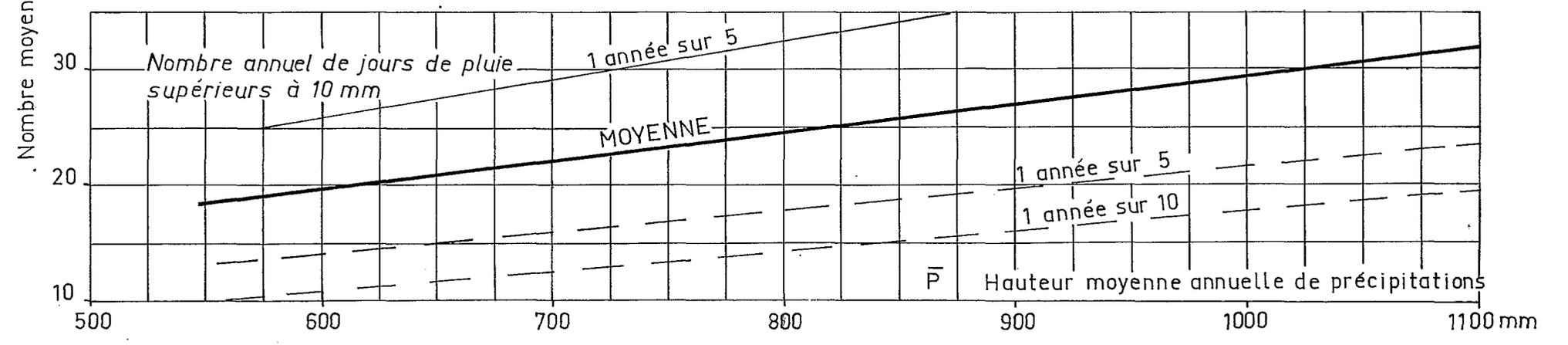
Les tracés de ces abaques ne tiennent pas compte des micro-climats locaux (lieu plus ou moins favorisé pour les chutes de fortes précipitations) aussi introduisent-ils une erreur supplémentaire de 5 % au maximum s'ajoutant à celle correspondant à l'imprécision de la connaissance de \bar{P} (fournie par l'abaque n° 2).



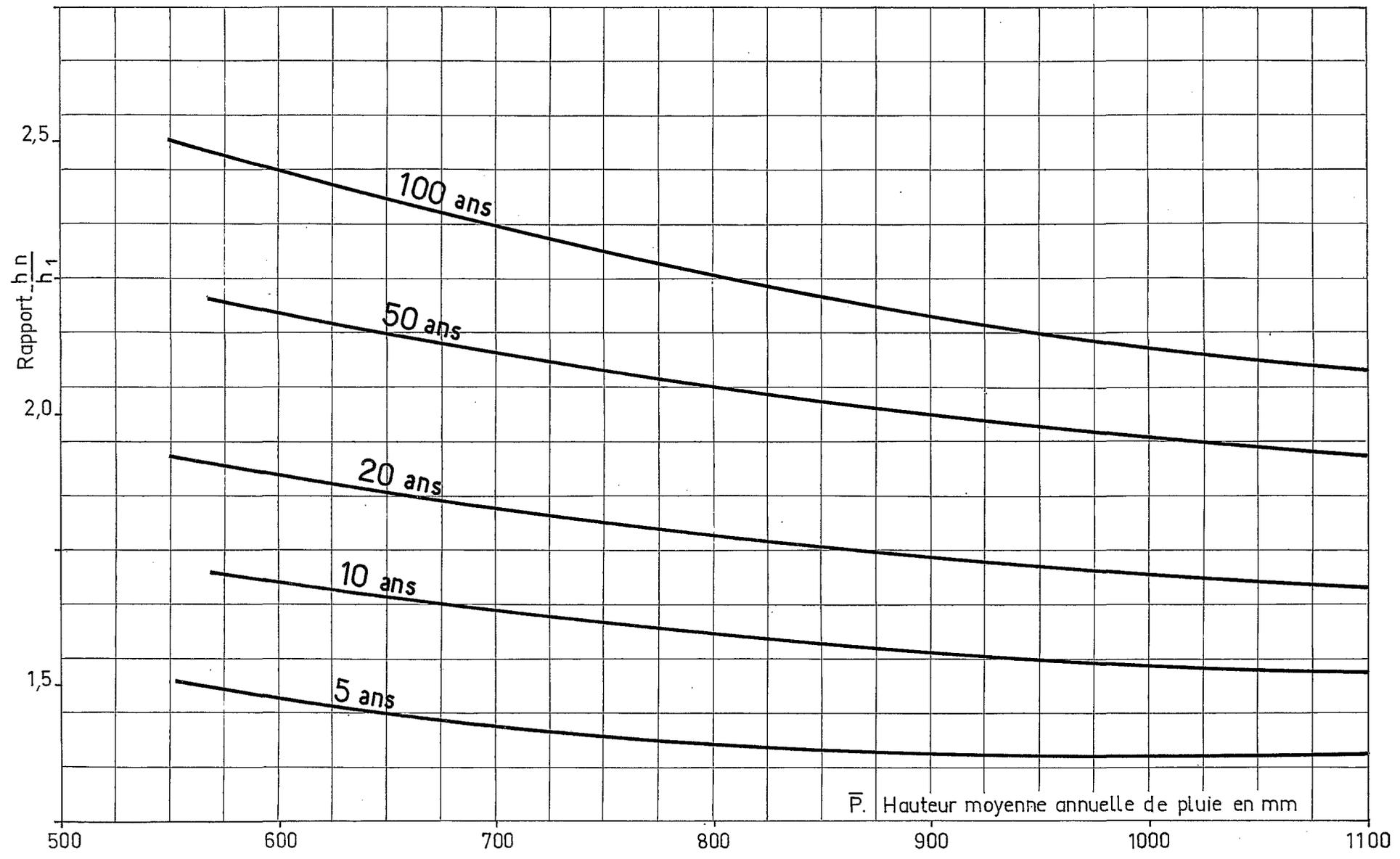
Gr.5



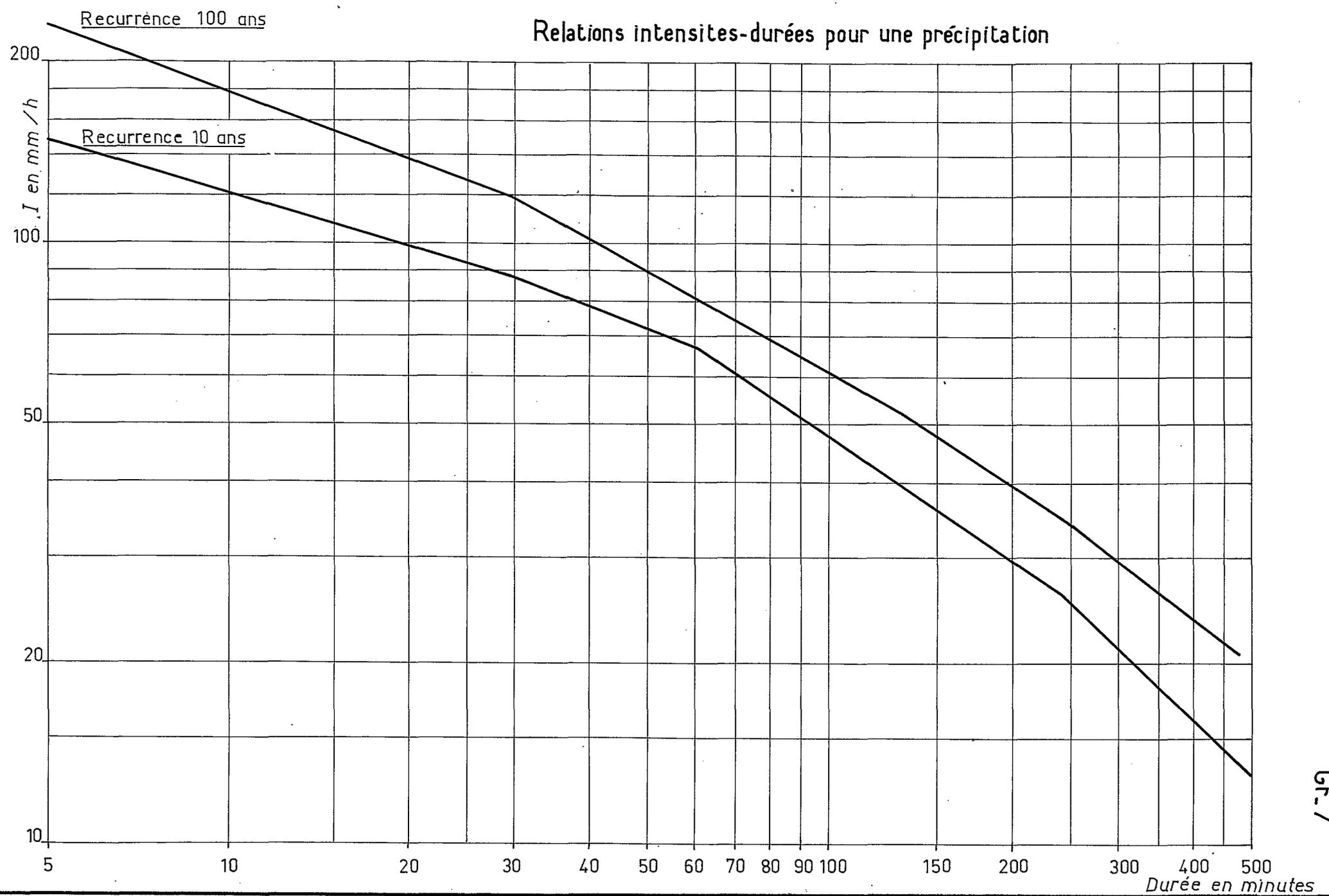
Gr.4



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



Relations intensités-durées pour une précipitation



1.3. SAISON des PLUIES EFFICACE et BESOINS en EAU des CULTURES

Les normes de ce programme concernent la réponse climatique aux questions des agronomes : adaptabilité d'une plante de cycle végétal donné au régime des pluies d'une région ; possibilité de culture sèche et choix de la période culturale ; besoins en eau des cultures irriguées en saison des pluies ou à contre-saison ... etc ...

On donne ici quelques normes simples utilisables au stade des programmes et avant-projets d'hydraulique agricole.

1.3.1 - La saison des pluies efficace

Cette saison des pluies est efficace en ce sens que sa définition fait abstraction des précipitations accidentelles et isolées qui précèdent et achèvent la période pluvieuse. La saison des pluies efficace commence le jour où sont tombés, après le 1er Octobre, les 50 premiers millimètres de pluie non isolés du coeur de la saison par une sécheresse totale excédant 20 jours ; elle finit le jour où s'achève la dernière décade ayant reçu plus de 25 mm et non isolée du coeur de la saison par plus de 30 jours secs.

Date de début De, date de fin Fe et longueur Le de la saison des pluies efficace varient avec la localisation géographique. L'abaque n° 8 en donne les valeurs médianes ou de récurrence 5-10 ans pour les diverses zones à pluviosité homogène (graphique n° 3). Ces 3 paramètres étant indépendants, aucune liaison en probabilité ne réunit De à Fe, c'est-à-dire que pour une année donnée, la récurrence de De est indépendante de celle de Fe.

La détermination de Le, indépendante évidemment de celles de De et de Fe doit se faire en entrant dans les 2 parties de l'abaque avec la même récurrence (Cf. exemple en pointillé fléché) prise de part et d'autre de la médiane : occurrence tardive pour De et précoce pour Fe si l'on cherche les valeurs faibles de Le, l'inverse pour les valeurs fortes.

Pour un lieu d'étude extérieur au bassin du JAGUARIBE, l'assimilation à une zone de pluviosité homogène (ZPH) est un impératif préalable à l'emploi de l'abaque n° 8. Même dans ce cas, les conclusions peuvent être erronées si le site de projet occupe des positions en latitude et par rapport au littoral par trop différentes de celles du bassin du JAGUARIBE.

Les positions moyennes des ZPH du JAGUARIBE sont les suivantes :

ZPH	Latitude Sud	Distance au littoral en km
Sud-Est SE	7° 30'	400
Sud-Ouest SW	7°	500
Centre G	6° 30'	300 - 350
Ouest W	6°	300 - 350
Est E	5° 30' - 6°	100 - 200
Nord-Ouest NW	5° - 6°	150 - 250
Nord N	5°	50

Trois cas peuvent se présenter :

- a) Le site a une ZPH assimilée et des positions concordantes avec cette ZPH du JAGUARIBE ; on utilise l'abaque n° 8 sans restriction.
- b) La ZPH assimilée ne concorde pas avec les positions du site ; on utilise l'abaque n° 8 avec la ZPH assimilée et avec celle en concordance avec les positions du site, puis l'on prend une valeur intermédiaire aux 2 résultats ; la précision est faible.
- c) Les positions du site ne correspondent à aucune ZPH ; on ne peut pas utiliser l'abaque n° 8 pour déterminer De et Fe ; pour Le, on peut l'utiliser mais avec circonspection.

1.3.2 - Les besoins en eau des cultures

On considère les besoins maximaux, c'est-à-dire ceux qui compensent totalement les pertes par l'évapotranspiration potentielle ETP, étant entendu que seule l'expérimentation au champ localement peut permettre de choisir quel pourcentage de ces besoins maximaux il suffit de fournir aux cultures pour leur assurer une production satisfaisante (compensation de l'évapotranspiration réelle).

Les besoins sont calculés en tenant compte de la réserve en eau facilement utilisable des sols RFU, qui varie entre 100 et 220 mm dans le bassin du JAGUARIBE, (gamme assez large pour englober la majeure partie des sols cultivables du Nord-Est) par application de la formule :

$$(ETP - P)_m - (k.RFU)_{m-1}$$

appliquée pour un mois m avec prise en compte de la réserve en eau du sol du mois précédent (m - 1), P étant la pluie du mois m.

ETP est calculée par la formule de TURC, à l'aide de la carte de BLACK pour la radiation solaire globale (Cf. "Possibilités et orientations hydro-agricoles", vol. 2, déjà cité). On a admis des valeurs uniques de ETP pour le bassin du JAGUARIBE (en mm) :

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
125	115	126	113	112	114	124	130	146	155	145	146	1 551

L'abaque n° 9 donne en fonction de la hauteur annuelle moyenne de précipitation \bar{P} :

- a) les besoins en eau maximaux annuels des cultures pour des récurrences médiane, quinquennale et décennale.
- b) les besoins en eaux maximaux pour la période de 5 mois la plus humide (coeur de la saison des pluies, Janvier-Mai ou Février-Juin) et pour les mêmes récurrences.

Les renseignements du point a) concernent les cultures pérennes ou couvrant plusieurs cycles végétatifs, ceux du point b) les cultures de saison des pluies (irrigation de complément).

Pour les besoins en eau de cultures à contre-saison, c'est-à-dire sur la saison sèche, on peut adopter les valeurs de ETP (RFU et pluie négligeables) à savoir au maximum sur 5 mois (Août-Décembre) 720 mm.

Selon la valeur de RFU des sols du projet, on interpole entre les courbes RFU = 100 et RFU = 220 mm.

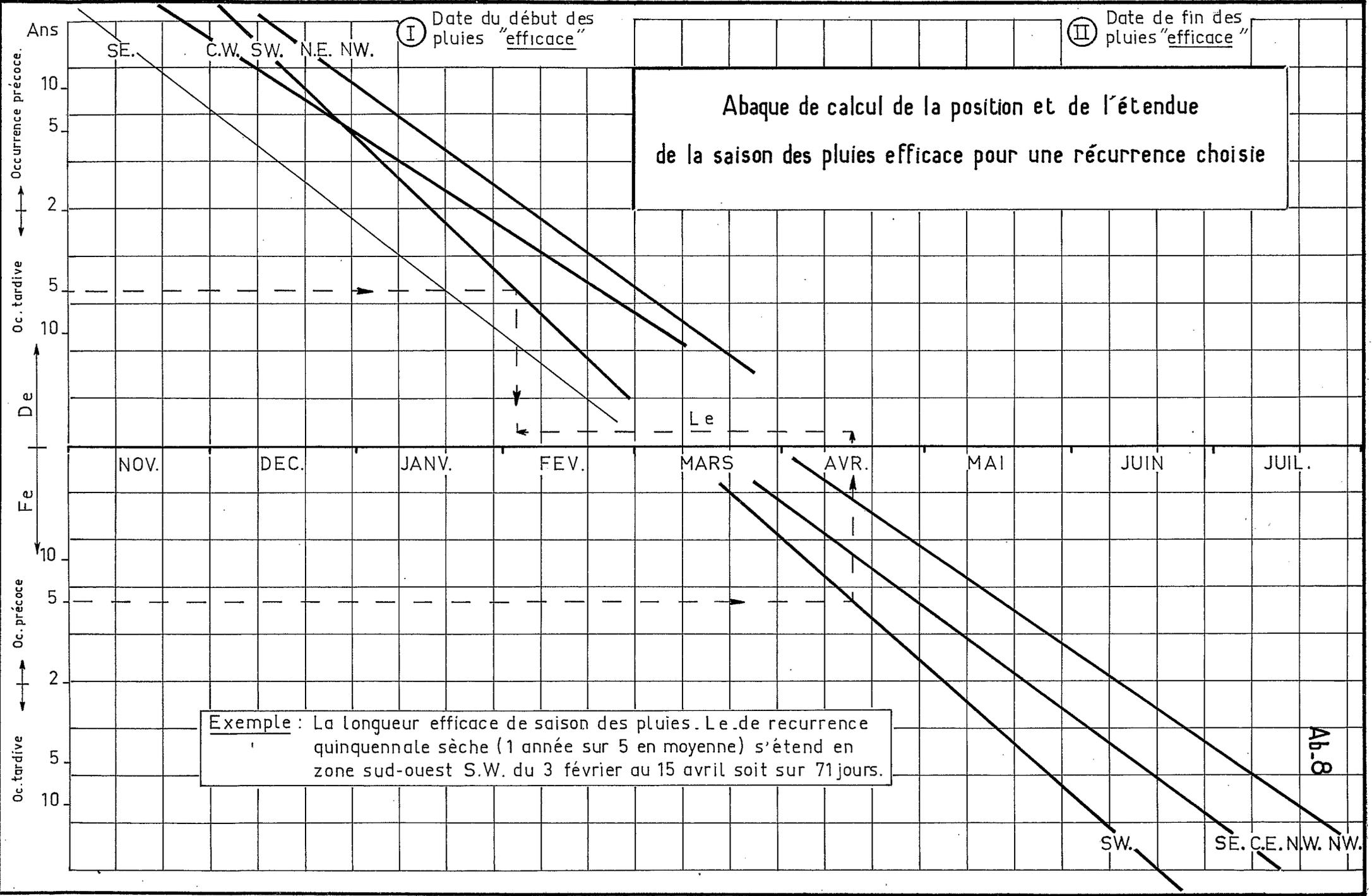
On rappelle ici que : $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$

Cas particulier de la zone littorale (moins de 30 km de la mer, ZPH Nord VII).

Pour les besoins annuels, il faut augmenter de 7 % les résultats de l'abaque n° 9 pour les récurrences médiane et quinquennale et de 14 % pour la récurrence décennale.

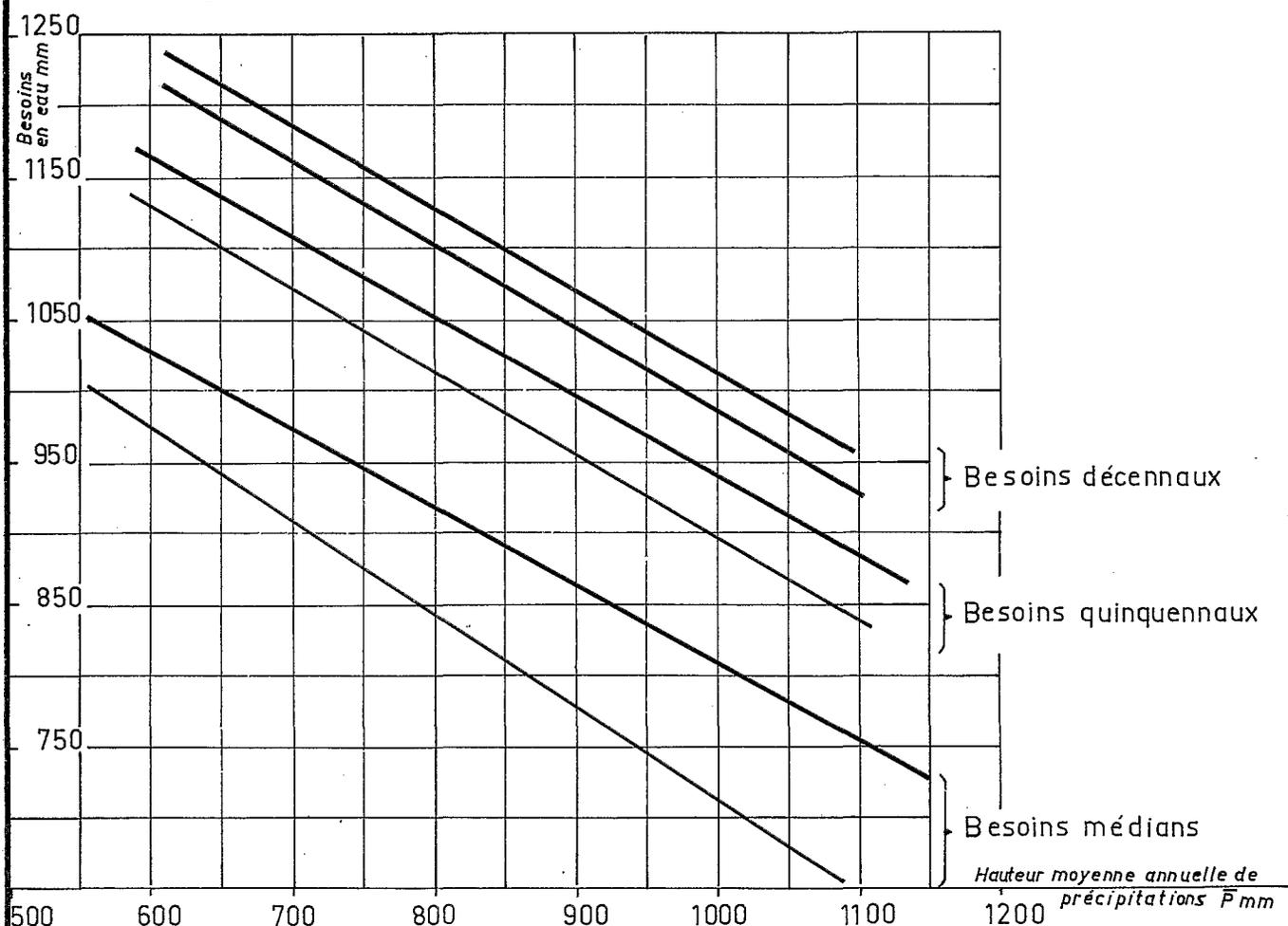
Pour un site extérieur au JAGUARIBE l'abaque n° 9 peut s'appliquer. On tiendra compte dans la mesure du possible de la concordance entre ZPH assimilée et positions (Cf. 1.3.1) sans qu'il s'agisse ici d'une obligation mais simplement d'une sécurité quant à la précision des résultats.

De toute manière, l'erreur sur \bar{P} est à augmenter de 5 % pour estimer la précision atteinte sur la valeur des besoins en eau donnée par l'abaque n° 9.

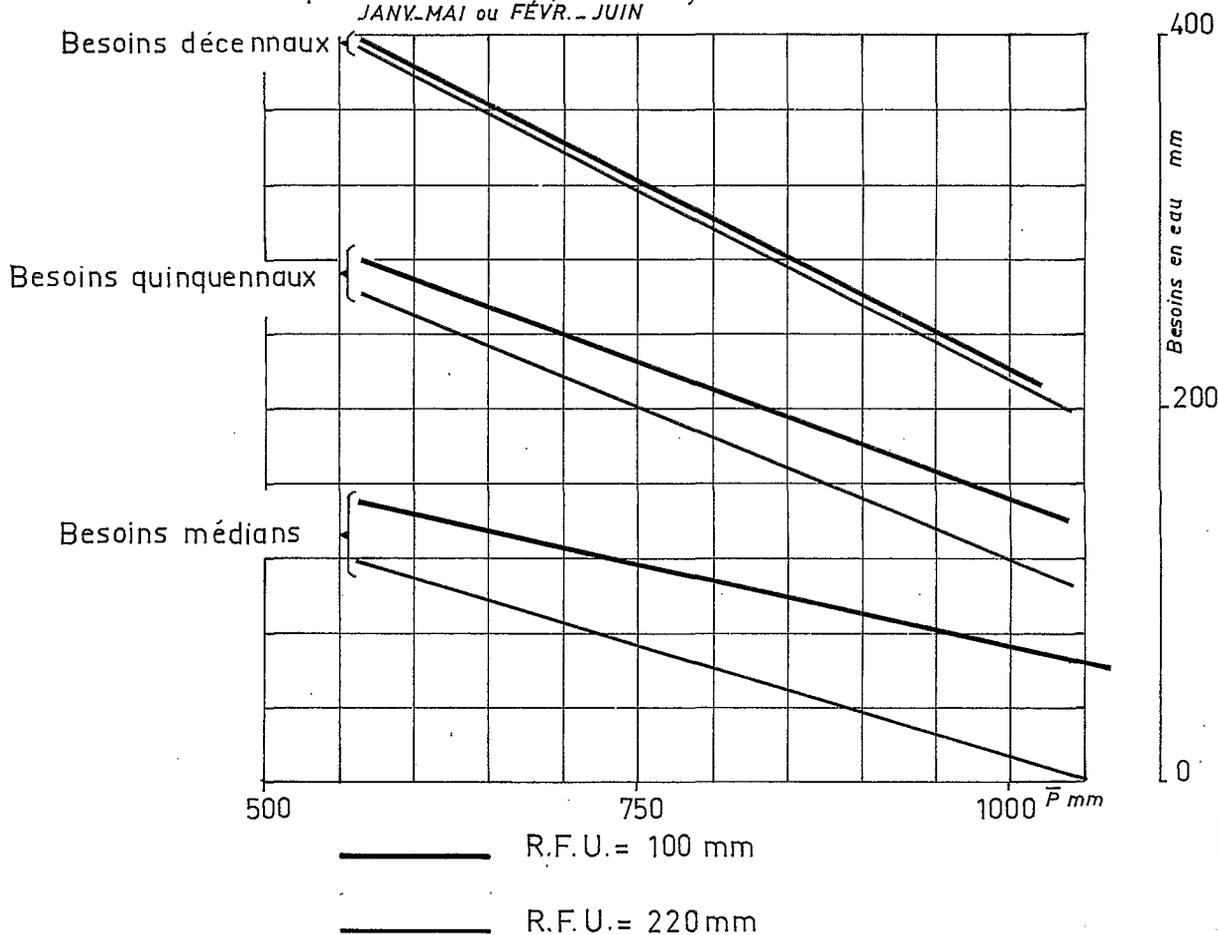


Abaque d'estimation des besoins en eau des cultures

① Besoins en eau maximaux annuels des cultures



② Besoins en eau maximaux des cultures irriguées
(Période de 5 mois la plus humide)
JANV.-MAI ou FÉVR.-JUIN



C H A P I T R E I I

NORMES HYDROLOGIQUES

Pour utiliser les normes hydrologiques, il faut évidemment connaître l'emplacement du projet et la hauteur annuelle moyenne de précipitation \bar{P} déterminée au 1er chapitre.

Des renseignements complémentaires sont également nécessaires :

- a) la carte géologique du bassin versant en amont du site de projet pour appréciation des divers types de terrains drainés
- b) la couverture végétale dudit bassin versant et l'importance des défrichements pour la mise en cultures (détermination recommandée sur photographies aériennes)
- c) la carte du réseau hydrographique du bassin
- d) une estimation de la superficie irrigable, du nombre de consommateurs d'eau (humains et bétail), et de la profondeur du barrage de retenue, pour le dimensionnement des retenues.

L'extrapolation des normes à l'intérieur et en dehors du bassin du JAGUARIBE est possible à condition de ne jamais sortir des limites de superficies drainées par les bassins versants, prises en compte pour l'établissement de ces normes.

Ces limites variables avec les normes restent toujours dans l'intervalle 100 à 15 000 km². Les grands fleuves ne peuvent faire l'objet que d'études spécifiques, étant donné la complexité de leur régime.

2.1. Le REGIME d'ÉCOULEMENT des COURS d'EAU

2.1.1 - Période sans écoulement

Dans le bassin du JAGUARIBE, comme dans la majeure partie du Nord-Est, les cours d'eau s'assèchent tous les ans et la durée de cette période sans écoulement est importante à connaître pour les projets de prélèvements au fil de l'eau comme pour l'étude de la gestion des réservoirs.

Voici quelques normes simples pour le bassin du JAGUARIBE concernant : date d'assèchement, date de remise en eau et durée de la période sans écoulement.

Ces normes sont indiquées soit par leur valeur moyenne soit par celles de l'intervalle interquartile IQ (l'évènement à 50 % de chance de s'y trouver), soit par les deux.

Les bassins sont divisés en 3 groupes :

- A contenant plus de 25 % de terrains sédimentaires TS et recevant plus de 800 mm de pluie moyenne \bar{P} .
- B contenant moins de 25 % de TS et de superficie supérieure à 3 000 km².
- C contenant moins de 25 % de TS et de superficie inférieure à 3 000 km².

Le tableau suivant rassemble les normes proposées :

	Groupe	A	B	C
Date d'assèchement	IQ	1/8 -15/9	15/6-15/8	15/6-15/8
Date de remise en eau	IQ	15/12-15/2	15/1-15/3	15/1-15/3
Durée de la période sans écoulement (jours)	moyenne	150	200	230
	IQ	120-180	170-230	190-270

La précision de ces normes est de \pm 10 jours.

Pour un bassin des groupes B et C, il y a en outre 10 % de risque pour qu'une année donnée soit sans écoulement (réurrence du phénomène 1 année sur 20 en moyenne, mais il porte sur 2 ans successifs).

Pour application en dehors du bassin du JAGUARIBE, il faut tenir compte des restrictions relatives aux ZPH et aux positions géographiques du site telles qu'elles sont données au paragraphe 1.3.1 (saison des pluies efficace)

2.1.2 - L'apport annuel moyen

Par référence à la hauteur de précipitation \bar{P} , on exprime l'apport annuel moyen en millimètres de lame écoulée \bar{L} . On peut aisément en déduire soit le module \bar{Q} exprimé en m^3/s , soit le volume \bar{V} en millions de m^3 , sachant la superficie S du bassin en km^2 :

$$\bar{Q} = \frac{\bar{L} \cdot S}{31\,600} \quad \text{et} \quad \bar{V} = \bar{L} \cdot S \cdot 10^{-3}$$

L'apport annuel varie avec la superficie ; dans la gamme des superficies explorées par ces normes (100 à 10 000 km^2), on a admis que cette variabilité était de la forme :

$$\bar{L} = A \cdot S^{-0,10}$$

pour les cours d'eau du bassin du JAGUARIBE.

Le paramètre A dépend des conditions physiques et climatiques ; on peut le déterminer correctement (précision de $\pm 10\%$) à l'aide de trois facteurs : la hauteur annuelle de précipitation \bar{P} , la nature géologique des terrains du bassin et le degré de défrichement de la couverture végétale.

Pour les 2 derniers facteurs, qui sont simplement correctifs du facteur principal \bar{P} , on les obtient de la manière suivante :

- a) Sur la carte géologique du bassin à une échelle suffisante, on mesure :
 - le pourcentage TS de terrains sédimentaires
 - le pourcentage MG de terrains cristallins de types migmatites, granites et roches vertes (c'est-à-dire à l'exclusion du groupe des ectinites, schistes, micaschistes, quartzites ...)
- b) Sur une carte de végétation ou sur photographies aériennes, on fait la part du couvert végétal en trois groupes : végétation naturelle, végétation naturelle avec îlots de défrichement et cultures occupant moins de 50 % du terrain ;

zones défrichées et cultures couvrant plus de 50 % du terrain ; le degré de défrichement DD est le rapport, en % de surface, du 3ème groupe à la somme des 2 premiers.

La correction de A en fonction du degré de défrichement est assez faible, aussi l'absence de documentation sur ce point n'est pas catastrophique. Si le bassin étudié n'est ni complètement défriché (DD supérieur à 1,50) ni entièrement couvert de sa végétation naturelle (DD inférieur à 0,75), la précision sur la mesure de A est peu altérée (elle passe de 10 à 15 % au plus). Et dans ces cas extrêmes, c'est-à-dire d'un bassin sur forêt protégée ou d'un bassin entièrement cultivé.

La marche à suivre pour le calcul de l'apport annuel moyen \bar{L} s'exécute suivant 2 voies parallèles selon que le pourcentage de terrains sédimentaires excède ou non 25 %, les bassins étant appelés par mesure de simplification bassins sédimentaires ou cristallins.

- a) L'abaque n° 10 donne une première estimation de A dite A' en fonction de \bar{P} , hauteur annuelle moyenne de précipitations (une courbe A' (\bar{P}) par type de bassin).
- b) L'abaque n° 11 fournit une première correction d.A'1 de A', positive ou négative, en fonction du taux MG de migmatites, granites, roches vertes ..., pour les bassins cristallins.

L'abaque n° 11 bis fournit d.A'1 pour les bassins sédimentaires en fonction du taux TS des terrains sédimentaires.

- c) L'abaque n° 12 fournit la seconde correction d.A'2 en fonction du degré de défrichement (une courbe d.A'2 (DD) par type de bassin).

On calcule ensuite : $A = A' + d.A'1 + d.A'2$

- d) L'abaque n° 13, sur papier logarithmique, permet la détermination de \bar{L} connaissant A et S sans calcul par simple interpolation graphique entre les droites d'égales valeur de A.

Exemple d'application : cas d'un bassin X de caractéristiques suivantes :

- Superficie : 1 800 km²

- Taux de terrain sédimentaires : 8 %
- Taux de migmatites + granites + roches vertes : 71%
- Degré de défrichement : 0,82
- Hauteur annuelle moyenne de précipitation : 740 mm

Suivre les lignes pointillées sur les abaques.

$$\text{On a : } A' = 128, d.A'1 = 4, d.A'2 = - 10$$

$$\text{d'où } A = 122$$

$$\text{et enfin } \bar{L} = 57 \text{ mm}$$

La précision sur la détermination de \bar{L} est égale à celle affectant A soit $\pm 10 \%$, mais compte tenu des conditions d'établissement des abaques, il faut admettre seulement une précision de $\pm 20 \%$ sur la valeur de l'apport moyen annuel (intervalle de confiance à 80 %).

Dans les limites de validité des courbes de chaque abaque, l'application de cette norme de calcul est possible sur un bassin hors du JAGUARIBE avec la même précision sur la valeur de l'apport moyen annuel si ce bassin jouit de caractères climatiques en concordance avec ceux d'une ZPH (Cf. chapitre I, paragraphe 3.1) ; la précision peut être altérée (modérément) si cette condition n'est pas remplie.

2.1.3 - Variabilité de l'apport annuel

L'apport annuel est très variable d'une année sur l'autre. L'apport annuel moyen est un événement dont la probabilité est bien plus faible que celle de l'apport médian - qui est, elle, de 0,50 - c'est-à-dire qu'il y a moins de chance que cet apport moyen soit dépassé qu'il ne le soit pas.

Les apports déficitaires, par rapport à l'apport moyen, le sont d'autant plus que cet apport moyen est faible et que la superficie drainée est réduite.

L'abaque n° 14 permet le calcul des coefficients de correction de l'apport moyen annuel \bar{L} , en fonction de la superficie, pour les apports de récurrence médiane C_{me} , quinquennale C_{qd} et décennale C_{dd} ; on obtient ces apports déficitaires en multipliant ensuite \bar{L} par ces coefficients de correction.

Une certaine imprécision affecte les conditions de tracé de cet abaque, aussi doit-on considérer que les valeurs d'apports qu'il fournit sont entachés d'une erreur maximale probable de :

- \pm 40 % pour l'apport médian
- \pm 50 % pour l'apport quinquennal
- supérieure à \pm 50 % pour l'apport décennal

Les résultats concernant les apports décennaux et quinquennaux ne sont que des ordres de grandeur. Il y a lieu de tenir compte à ce sujet des 2 correctifs suivants :

- a) l'obtention d'une valeur nulle pour Cdd ou Cqd n'implique pas nécessairement une valeur nulle de l'apport correspondant mais simplement une valeur proche de zéro (+ 2 mm au maximum)
- b) pour les bassins sédimentaires ($TS > 25$ %) bien arrosés ($P > 800$ mm) c'est-à-dire ceux du groupe A (paragraphe 2.1.1) les coefficients fournis par l'abaque sont à majorer de 0,03.

Les causes de variation des apports s'inversent quand on envisage les apports excédentaires :

- l'apport décennal excédentaire est égal à 2,30 fois l'apport moyen \bar{L} sans variation ni avec \bar{L} , ni avec S.
- l'apport cinquantenaire excédentaire l'est d'autant plus, par rapport à \bar{L} , que cet apport moyen est faible, mais la superficie n'a pas d'influence. Le coefficient Cce est donné par l'abaque 14.

Ces 2 apports sont connus avec une précision de \pm 25 %.

2.1.4 - Sécheresse pluriannuelle

Pour l'étude d'aménagements avec réservoir de régularisation interannuelle, on ne peut se contenter des apports déficitaires annuels de faible fréquence, la prise en compte d'une série chronologique sèche est nécessaire.

On propose d'une part des normes de calcul de la valeur moyenne de l'apport sur 3,5 et 8 ans en fonction de

l'apport moyen annuel \bar{L} , et d'autre part des modèles chronologiques de même durée. La récurrence de ces normes et modèles est comprise entre 50 et 100 ans.

a) Coefficients de réduction (en %) de l'apport annuel moyen \bar{L} pour estimer les apports sur une certaine période :

Type de bassins	Période de 3 ans 3 $k\bar{L}$	Période de 5 ans 5 $k\bar{L}$	Période de 8 ans 8 $k\bar{L}$
Bassins cristallins de moins de 500 km ²	0,03	0,15	0,35
Bassins cristallins de plus de 500 km ²	0,13	0,25	0,35
Bassins sédimentaires bien arrosés	0,17	0,28	0,42

A part la limite de superficie, les types de bassins se définissent comme les groupes C, B et A respectivement du paragraphe 2.1.1.

Par exemple, un coefficient 0,25 signifie que pendant 5 ans l'apport moyen sur un bassin cristallin de plus de 500 km² est seulement égal au quart de l'apport annuel moyen \bar{L} .

b) Modèles de sécheresses pluriannuelles donnant les apports annuels successifs, en % de l'apport moyen annuel \bar{L} .

- Bassins cristallins de moins de 500 km²

modèle de 3 ans : 5,5 - 3,5 - 0

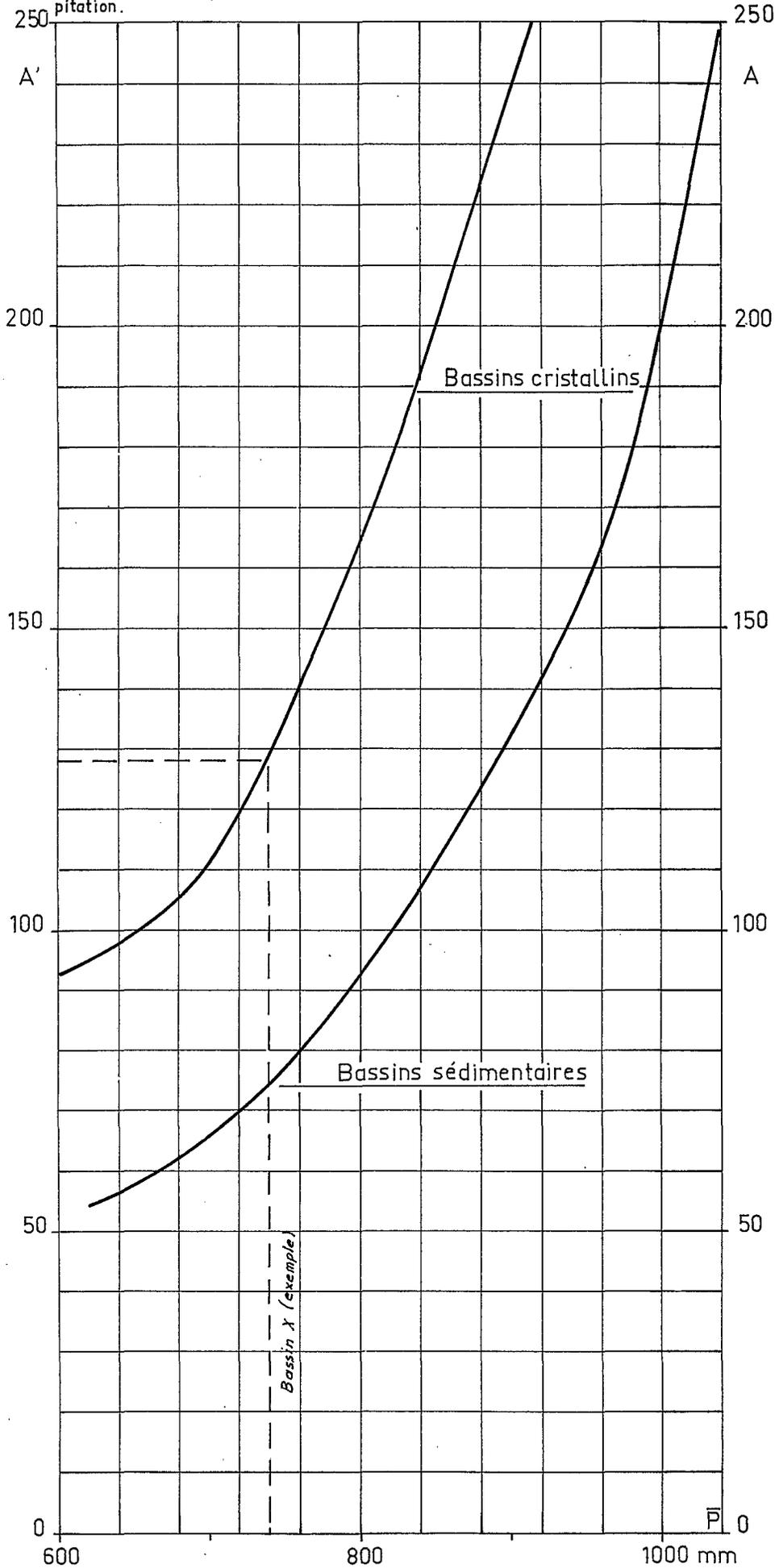
modèle de 5 ans : 25 - 17 - 6 -
2 - 25

- Bassins cristallins modèle de 8 ans : 8 - 2 - 27 - 44 -
90 - 0 - 7 - 74

- Bassins sédimentaires " : 42 - 67 - 64 - 36 -
5 - 52 - 3 - 67

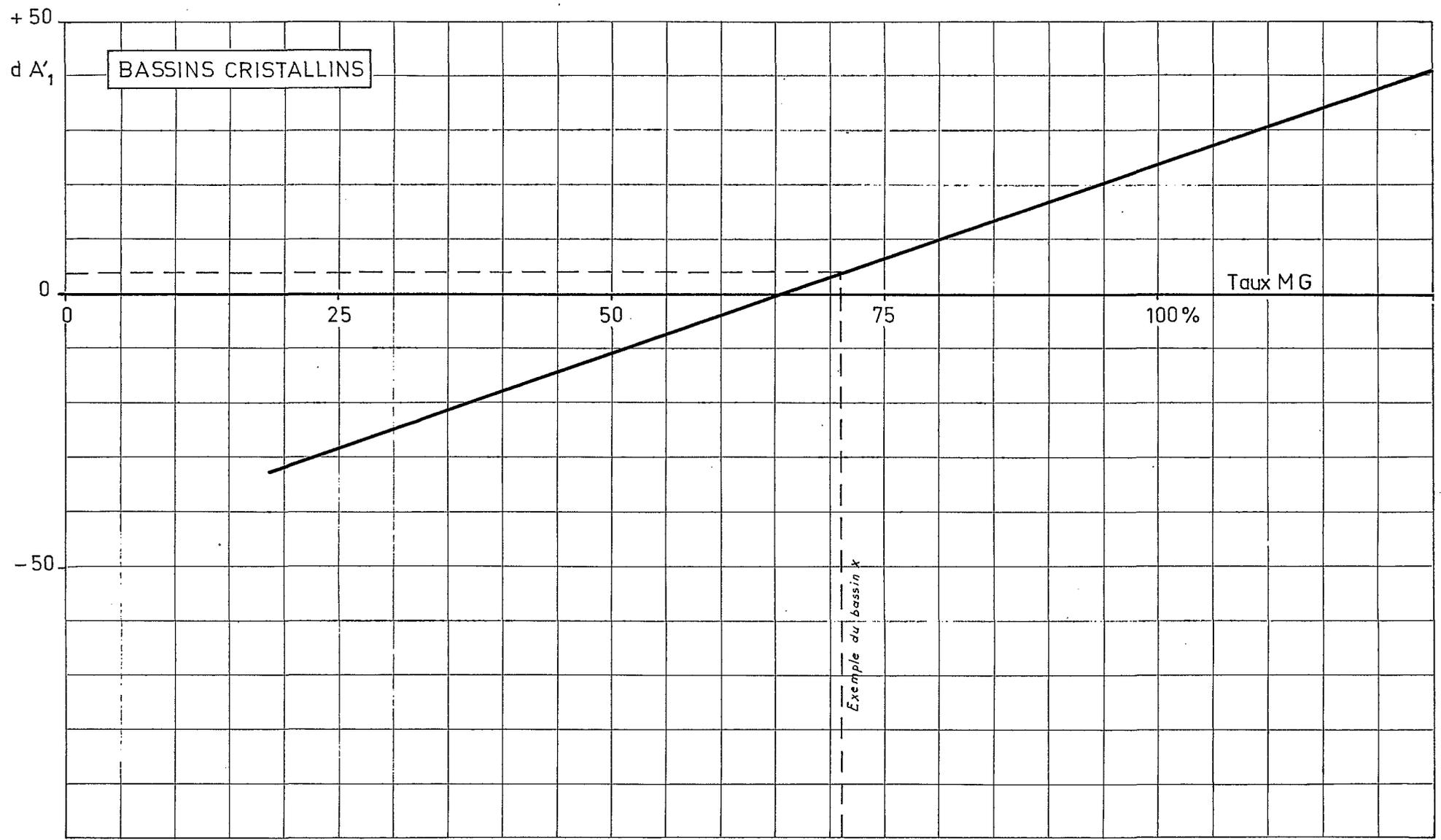
DÉTERMINATION DE L'APPORT ANNUEL MOYEN

Première estimation A' en fonction de la hauteur annuelle moyenne de précipitation.



DÉTERMINATION DE L'APPORT ANNUEL MOYEN

Première correction d'A', en fonction du taux de terrains migmatiques et granitiques

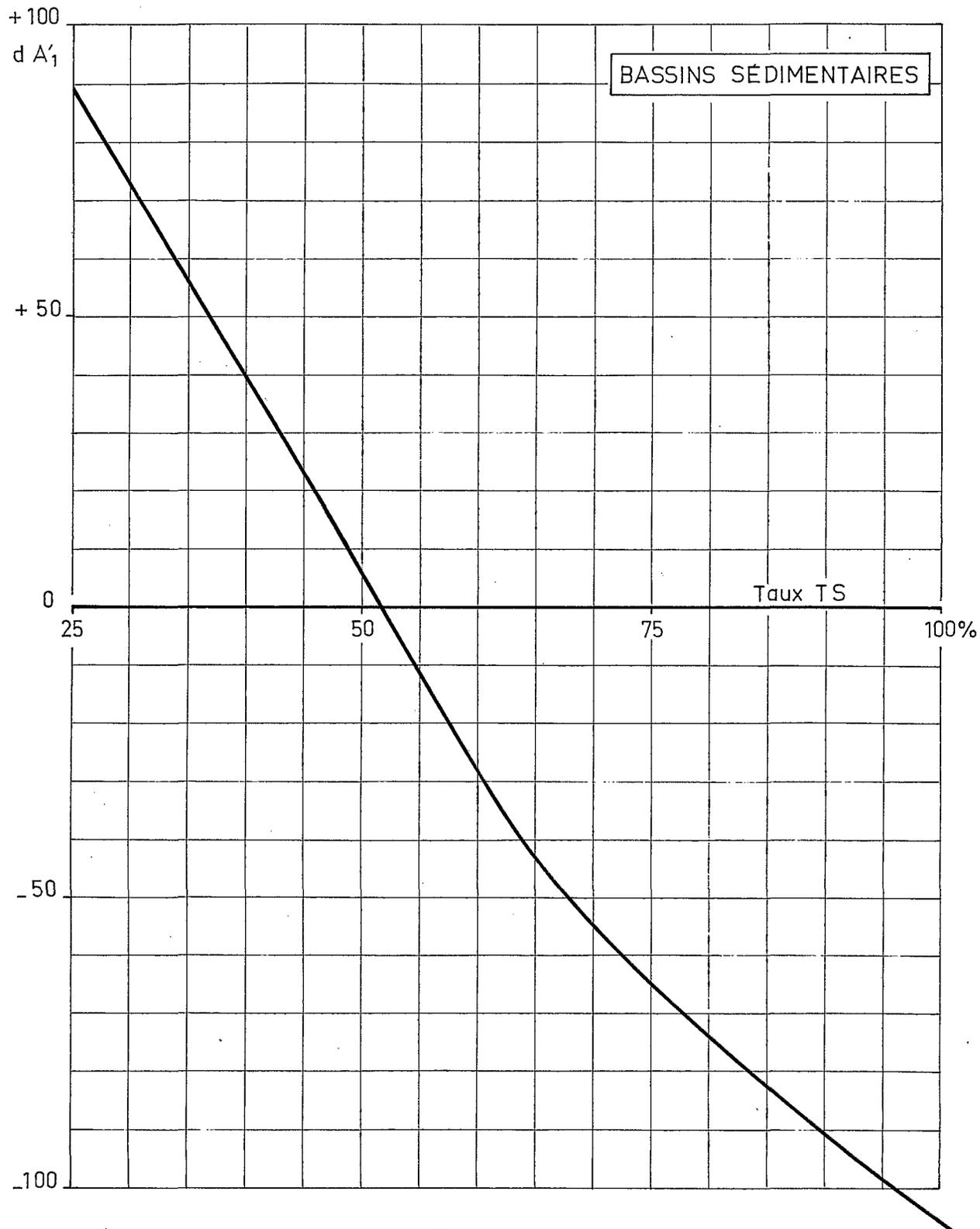


26.10.64
J.G.

ÉTR.291 445

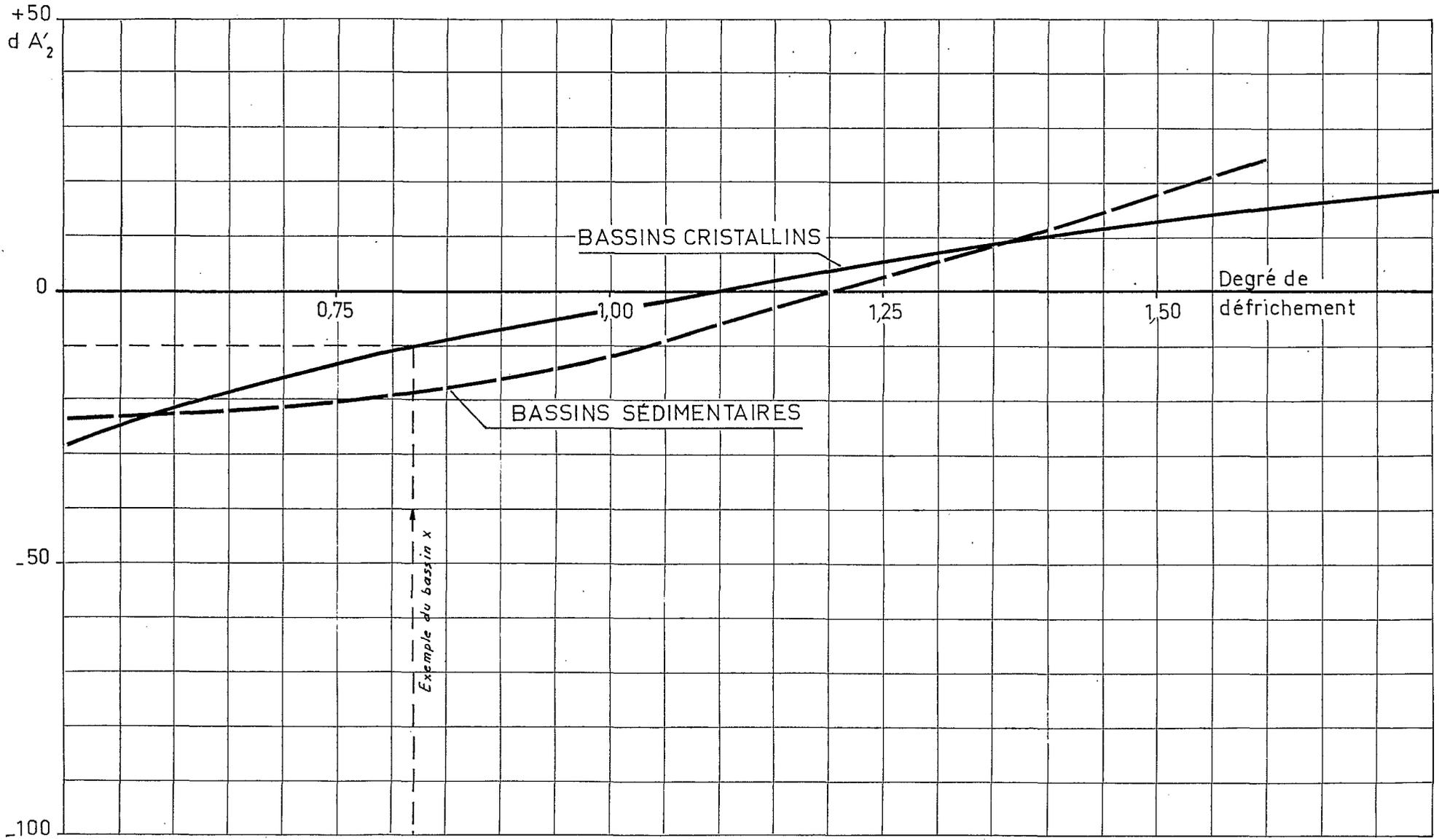
DÉTERMINATION DE L'APPORT ANNUEL MOYEN

Première correction d A'_1 en fonction du taux de terrains sédimentaires



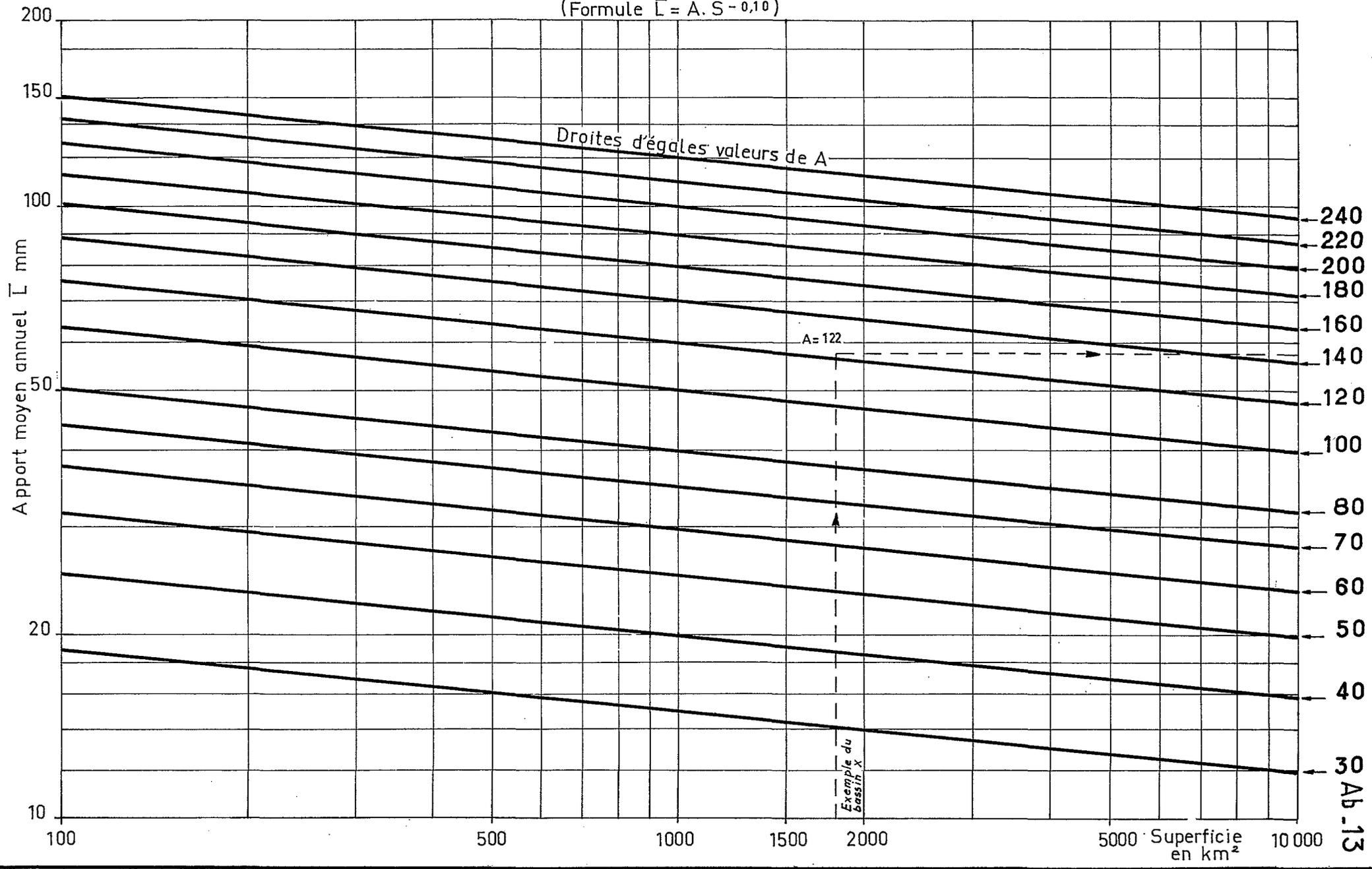
DÉTERMINATION DE L'APPORT ANNUEL MOYEN

Seconde correction d'A₂' en fonction du degré de défrichement

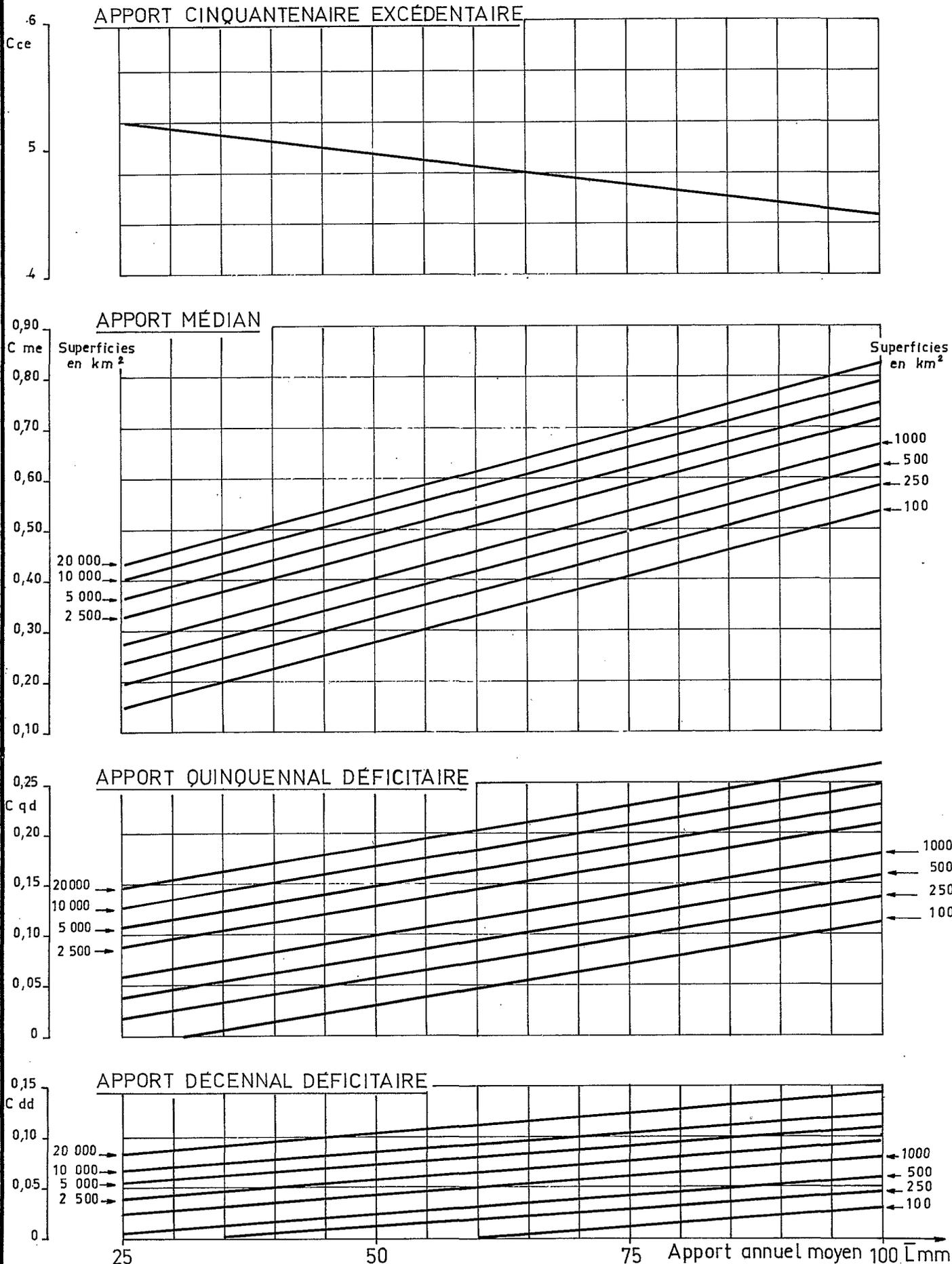


DÉTERMINATION DE L'APPORT ANNUEL MOYEN \bar{L}

(Formule $\bar{L} = A \cdot S^{-0,10}$)



Coefficients de correction de l'apport moyen annuel en fonction de la superficie pour le calcul d'apports de diverses fréquences



2.1.5 - Répartition mensuelle de l'apport annuel

On donne simplement la répartition moyenne de l'apport moyen, car la variabilité de cette répartition avec celle de l'apport annuel qui est très grande, ne peut être prise en considération que pour des projets définitifs bien précis.

La répartition mensuelle dépend de la localisation géographique du bassin, aussi les valeurs proposées ne peuvent-elles être appliquées en dehors du bassin du JAGUARIBE que si les conditions de ZPH (zone à pluviosité homogène) et de latitude sont respectées (Cf. paragraphe 1.3.1).

Tableau des apports mensuels moyens en %
de l'apport annuel moyen

ZPH contenant le bassin	J	F	M	A	M	J	Total des 5 mois
I, II	3	18	39	33	5		98
III, IV	2	18	29	38	10		98
V		5	21	53	16	3	98
VI		6	20	45	22	6	99

2.2. DIMENSIONNEMENT des RESERVOIRS *

On considère 2 types de réservoirs selon qu'ils assurent une régularisation annuelle ou interannuelle. Des normes de calcul permettent d'estimer la superficie minimale du bassin versant alimentaire d'un réservoir annuel. Des indications sont fournies pour la simulation de gestion des réservoirs interannuels.

2.2.1 - Superficie minimale du bassin versant d'un réservoir annuel

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- a) le réservoir couvre, en moyenne 4 années sur 5, les besoins en eau des populations et du bétail durant 8 mois de saison sèche et ceux des cultures irriguées le cas échéant.
- b) la consommation annuelle moyenne d'un homme est estimée à 40 m³ en habitat rural dispersé ; celle d'une unité de gros bétail à 20 m³.
- c) le rapport du volume utile d'un réservoir au volume total accumulé, appelé encore rendement du réservoir, est égal à 0,10 si l'ouvrage assure exclusivement la consommation des populations et du bétail et à 0,75 si l'ouvrage permet en outre une irrigation en aval (cultures d'auto-consommation);

Les relations entre besoins en eau réels à satisfaire et superficie du bassin versant sont les suivantes :

$$S = \frac{4}{30} \cdot \frac{(2 H + GB)}{Lq_d} \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{1\ 000} \frac{1}{Lq_d} \left[\frac{160}{9} (2 H + GB) + V_i \right] \quad (2)$$

L'équation (1) concerne le réservoir de pure consommation, l'équation (2) celui fournissant une irrigation.

* On s'est étroitement inspiré de la politique des réservoirs développée dans "Possibilités et orientations hydroagricoles" (op. citus).

On a dans (1) et (2) :

- S : surface du bassin versant en km²
- Lqd : apport annuel quinquennal déficitaire en mm, extrait de l'abaque 14
- H : nombre d'habitants consommateurs
- GB : nombre d'unités de gros bétail consommatrices
- Vi : volume affecté aux irrigations en m³

La capacité maximale d'emmagasinement du réservoir est évidemment égale à 10 fois la consommation des populations et du bétail dans le 1er cas et à 1,33 fois la somme des besoins dans le second cas, à savoir :

$$CM_1 = 10 \times \frac{2}{3} (40 H + 20 GB)$$

$$CM_2 = 1,33 \left[\frac{2}{3} (40 H + 20 GB) + Vi \right]$$

la fraction $\frac{2}{3}$ représentant 8 mois sur 12 de consommation d'eau.

On notera que le volume affecté aux irrigations Vi peut être estimé par :

$$Vi = 16,5 \cdot BE_R \times Si \quad (3)$$

équation dans laquelle BE_R représente les besoins en eau réels des cultures en mm, besoins différents des besoins maximaux calculés au paragraphe 1.3.2. dont une première approximation pourrait être 1 000 mm (plus précisément à déterminer par l'agronome après prise en compte du type de culture, de l'assolement ... etc ...), Si la superficie effectivement irriguée en hectares et 1,65 le coefficient de rendement de l'irrigation (de la sortie du barrage à la parcelle).

Les conditions topographiques de site limitent la gamme de variation de CM et de S ; c'est à partir des valeurs de ces variables que l'on peut contrôler la possibilité d'utilisation du réservoir : importance du cheptel, périmètre irrigué.

Les restrictions d'emploi des normes de ce paragraphe, hors du bassin du JAGUARIBÉ, sont celles qui affectent le calcul de Lqd (abaque 14, paragraphe 2.1.3).

2.2.2 - Eléments pour la simulation de gestion des réservoirs interannuels

De tels ouvrages sont généralement assez importants pour nécessiter une étude spécifique détaillée, c'est pourquoi aucune norme générale d'application ne peut être proposée. Deux types de réservoirs interannuels sont à considérer :

- a) celui du grand réservoir destiné à fournir un débit garanti pour irrigation ou production d'énergie, dans lequel la consommation des populations et du bétail est négligeable.
- b) celui du réservoir moyen à vocation comparable au réservoir annuel mixte consommation-irrigation qui doit en outre l'année sur 5 en moyenne, lors de l'assèchement des réservoirs annuels du voisinage, assurer la consommation des populations et du bétail de ceux-ci, repliés sur le réservoir moyen, ainsi que la production de leur nourriture. Les besoins en eau dépendent du nombre d'habitants et de bétail qui se replient en cas de sécheresse sur le réservoir de secours.

Dans les 2 cas, le débit à garantir étant choisi (variable dont on cherche le maximum dans le 1er cas, variable dont le minimum est fixé dans le second cas), on procède à une simulation de gestion à partir d'une séquence sèche pluriannuelle pour évaluer la capacité minimale nécessaire au réservoir afin de franchir sans assèchement la période critique.

A cet effet, on utilise les normes fournies au paragraphe 2.1.4 sur les écoulements en périodes sèches de 3, 5 ou 8 ans de récurrence 50-100 ans.

La dernière inconnue de la gestion simulée est le poste "évaporation, pertes incluses".

Le tableau suivant en donne les valeurs moyennes pour la saison sèche, juin à Décembre, et pour l'année complète :

Profondeur maximale du réservoir (mètres)	Evaporation en millimètres	
	Juin-Décembre	Année
plus de 10 m	1 340	2 100
de 5 à 10 m	1 500	2 350
moins de 5 m	1 650	2 600

La simulation de gestion à l'échelle annuelle est grossière. Pour tout projet détaillé, il est nécessaire de procéder à une simulation à l'échelle mensuelle. Les éléments de débits d'apports sont spécifiques au projet et sortent du domaine des normes générales de calcul.

2.3. Les CRUES EXCEPTIONNELLES

Pour le calcul d'évacuateurs de crue de barrages réservoirs, comme pour le dimensionnement d'ouvrages de franchissement routier ou ferroviaire, on procède à partir du débit maximal de crue d'une certaine fréquence ; celle-ci est choisi en fonction de l'importance de l'ouvrage, de la protection qu'il assure selon des critères économiques et sociaux.

Les normes de calcul des crues exceptionnelles permettent la détermination du débit maximal de pointe horaire (peu différent du maximum journalier sur un grand fleuve) de la crue annuelle (celle qui se produit en moyenne 100 fois en 100 ans), puis par le jeu de coefficients multiplicateurs elles permettent également d'estimer le débit maximal de la crue décennale, centenaire (10 et 1 fois en moyenne tous les 100 ans) et maximale probable (plafond théoriquement inaccessible, assimilable à une récurrence dix-millénaire au strict point de vue probabilistique).

Les normes donnent les débits spécifiques, en $l/s.km^2$, rapportées à la superficie active des bassins versants.

2.3.1 - Débit maximal de pointe q_1 de la crue annuelle

Le cheminement d'exécution de cette détermination est assez voisin de celui employé pour l'apport moyen annuel (paragraphe 2.1.2) aussi est-il procédé ici à une présentation concise.

Le débit maximal spécifique q_1 décroît régulièrement quand la superficie S (en km^2) du bassin versant croît, selon une fonction que l'on a admis être pour le bassin du JAGUARIBE:

$$q_1 = B \cdot S^{-0,484}$$

Le paramètre B dépend des conditions du milieu physique et climatique du bassin. Le facteur principal de sa variation est la hauteur moyenne annuelle de précipitation \bar{P} . Les facteurs secondaires sont le taux de terrains sédimentaires TS du bassin et la forme du réseau hydrographique.

Le taux de terrains sédimentaires TS exprimé en % de la superficie S s'obtient à partir de la carte géologique, comme pour l'apport moyen \bar{L} (Cf. paragraphe 2.1.2).

Après dessin aussi complet que possible du réseau hydrologique du bassin, on estime par comparaison avec le graphique 15 dans quelle catégorie peut se ranger ce réseau : RADIALE, en ARÊTE ou quelconque. L'affectation en catégorie "quelconque" est faite pour tout réseau ne présentant pas très nettement les caractères de l'une ou l'autre des 2 autres catégories.

Le calcul se mène de la façon suivante :

- a) l'abaque n° 16 donne une première estimation de B, appelée B', en fonction de la hauteur annuelle moyenne de précipitation \bar{P} .
- b) l'abaque n° 17 donne une première correction d_1B' de la valeur de B' en fonction de la teneur en terrains sédimentaires TS % ; cette correction nulle pour $TS \leq 10$ %, est négative pour $TS > 10$ %.
- c) la valeur corrigée $B' + d_1B'$ est, soit :
 - augmentée de 10 % si le réseau hydrographique est RADIAL
 - diminuée de 10 % si le réseau hydrographique est en ARÊTEcette 2ème correction d_2B' est nulle si le réseau est de forme quelconque.
- d) la valeur définitive estimée de B soit $B' + d_1B' + d_2B'$ permet la détermination directe de q_1 , en utilisant l'abaque n° 18, sur papier logarithmique, à partir de la superficie S du bassin et par interpolation graphique entre les lignes d'égale valeur de B.

Exemple d'un bassin Y de 2 900 km², ayant 28 % de terrains sédimentaires, un réseau hydrographique radial et recevant une hauteur annuelle moyenne de précipitations de 780 mm. En suivant les lignes pointillées sur les abaques, on obtient :

$$B' = 4\ 400 ; d_1B' = - 1\ 100 ; B' + d_1B' = 3\ 300 ; \\ d_2B' = 330 ; B = 3\ 630 \text{ et } q_1 = 76 \text{ l/s.km}^2.$$

L'erreur maximale probable sur la détermination de q_1 est égale à ± 25 %.

2.3.2 - Passage aux crues décennale, centenaire et maximale probable

Les débits maximaux spécifiques de ces diverses crues se calculent en multipliant le débit q_1 par des coefficients de passage $1k_{10}$ pour la crue décennale, $1k_{100}$ pour la centenaire et $1k_M$ pour la maximale probable.

Ces coefficients croissent avec la superficie S du bassin versant. On a déterminé $1k_{10}$ directement, les autres en passant par des coefficients intermédiaires qui ont l'avantage d'être pratiquement invariants avec S :

$$10k_{100} = 1,6 \quad \text{et} \quad 100k_M = 1,8$$

Le tableau suivant donne les 3 coefficients de passage sous la forme de leur valeur moyenne pour les 2 premières et de leur valeur supérieure pour $1k_M$, ce qui est compréhensible :

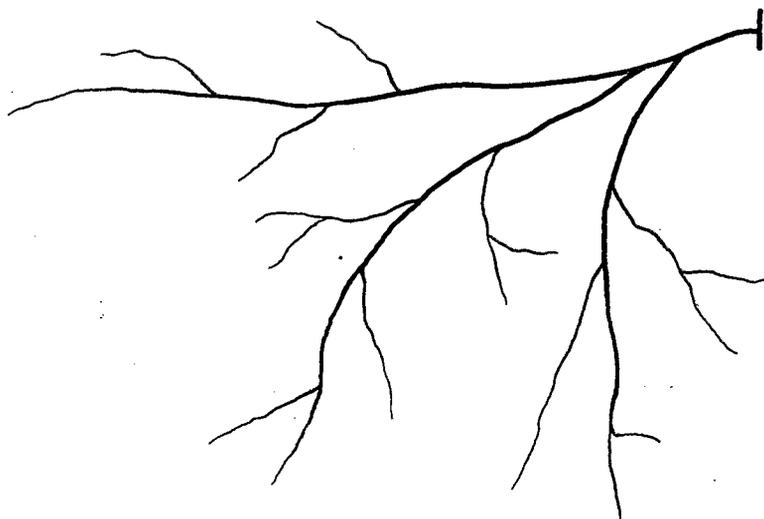
Superficie S en km ²	Coefficients		
	$1k_{10}$	$1k_{100}$	$1k_M$
10 à 100	2	3,2	5,8
100 à 300	2,1	3,35	6,1
300 à 1 000	2,25	3,6	6,5
1 000 à 2 500	2,5	4,0	7,2
2 500 à 7 500	2,7	4,3	7,7
7 500 à 12 000	2,9	4,65	8,4

L'erreur maximale probable sur la détermination des crues décennale et centenaire est de $\pm 30\%$; elle atteint $\pm 40\%$ pour la crue maximale probable qui ne peut être qu'une indication à partir de telles normes.

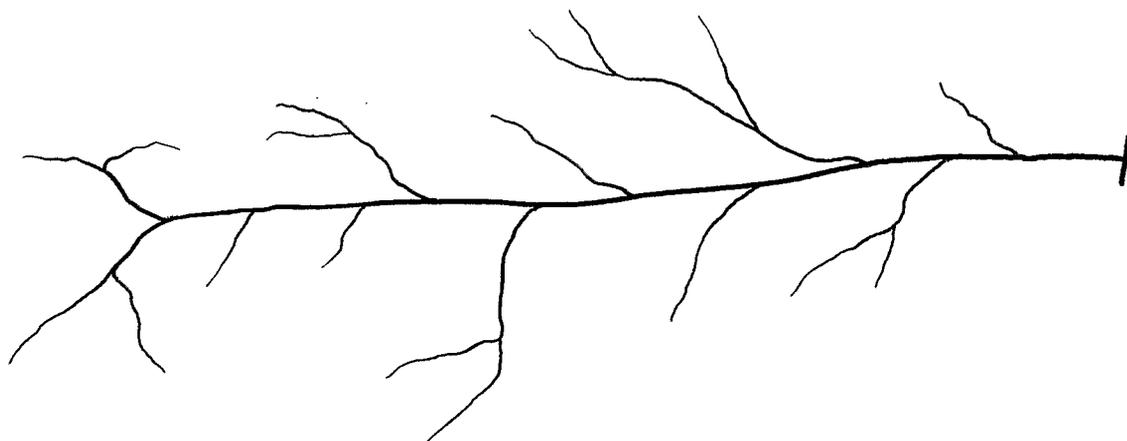
Une telle crue n'est d'ailleurs utilisée que pour les grands projets d'aménagements complexes nécessitant tous une étude détaillée spécifique de laquelle on doit tirer une meilleure estimation de ce phénomène (emploi d'un hyétogramme enveloppe d'épisode pluvieux et d'un opérateur de transformations pluies-débits).

FORMES TYPES DE RÉSEAUX HYDROGRAPHIQUES

- ① **RADIALE** : Deux ou plusieurs formateurs d'égale importance confluent juste en amont du site étudié.

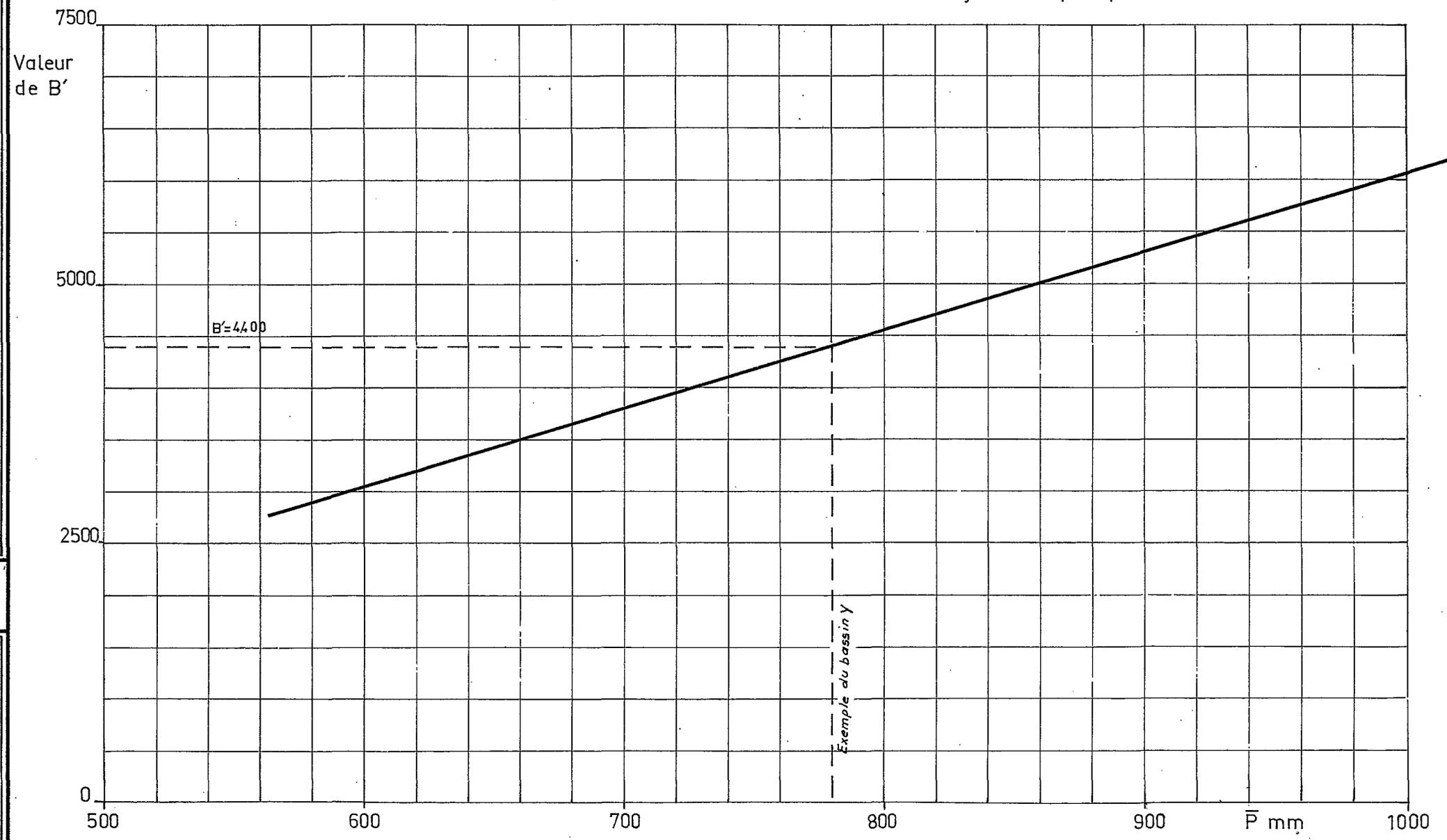


- ② **EN ARÊTE** : Un thalweg principal ne reçoit que des affluents d'importance secondaire.



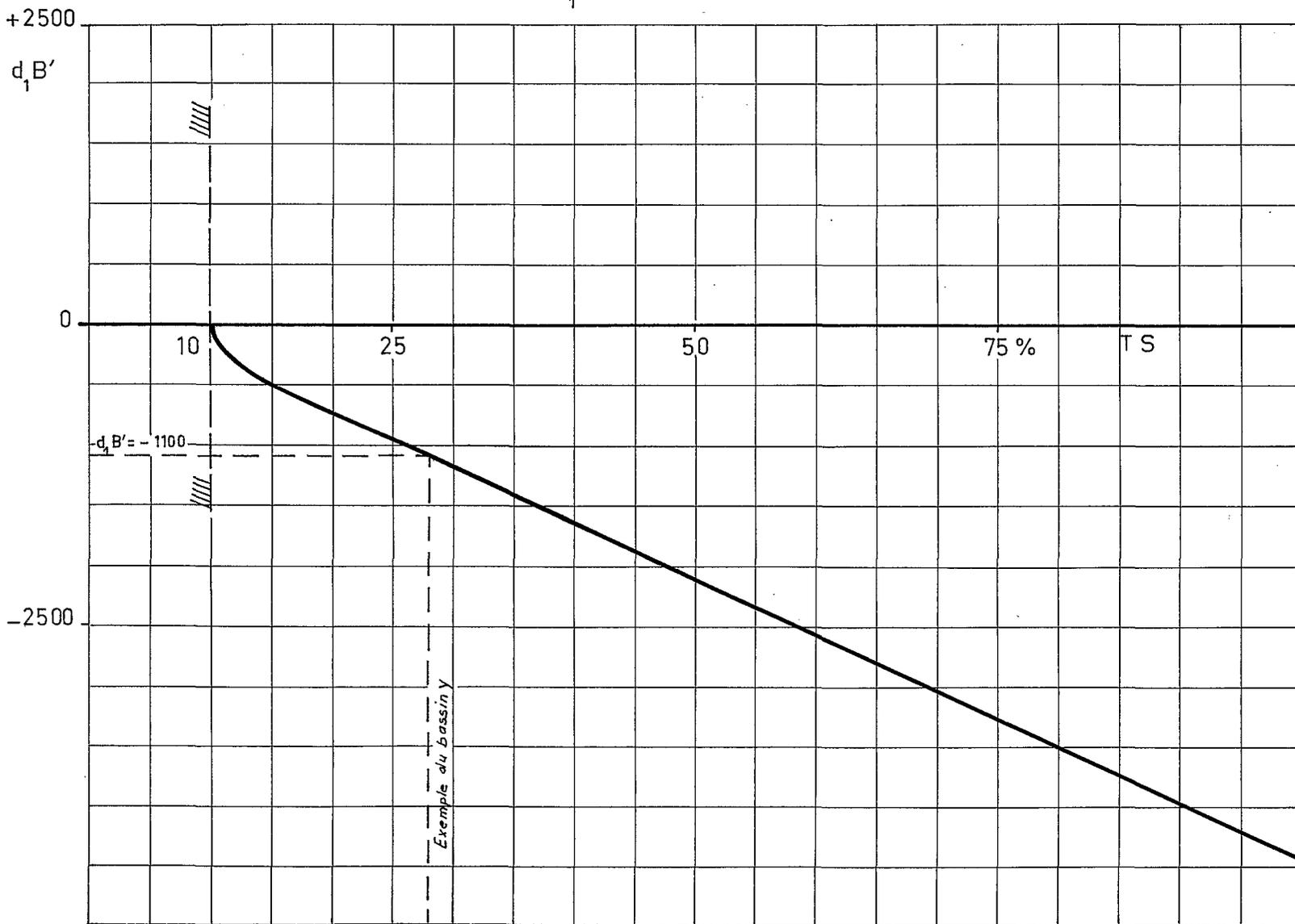
Détermination du débit maximal spécifique de crue annuelle

Première estimation B' en fonction de la hauteur annuelle moyenne de précipitation



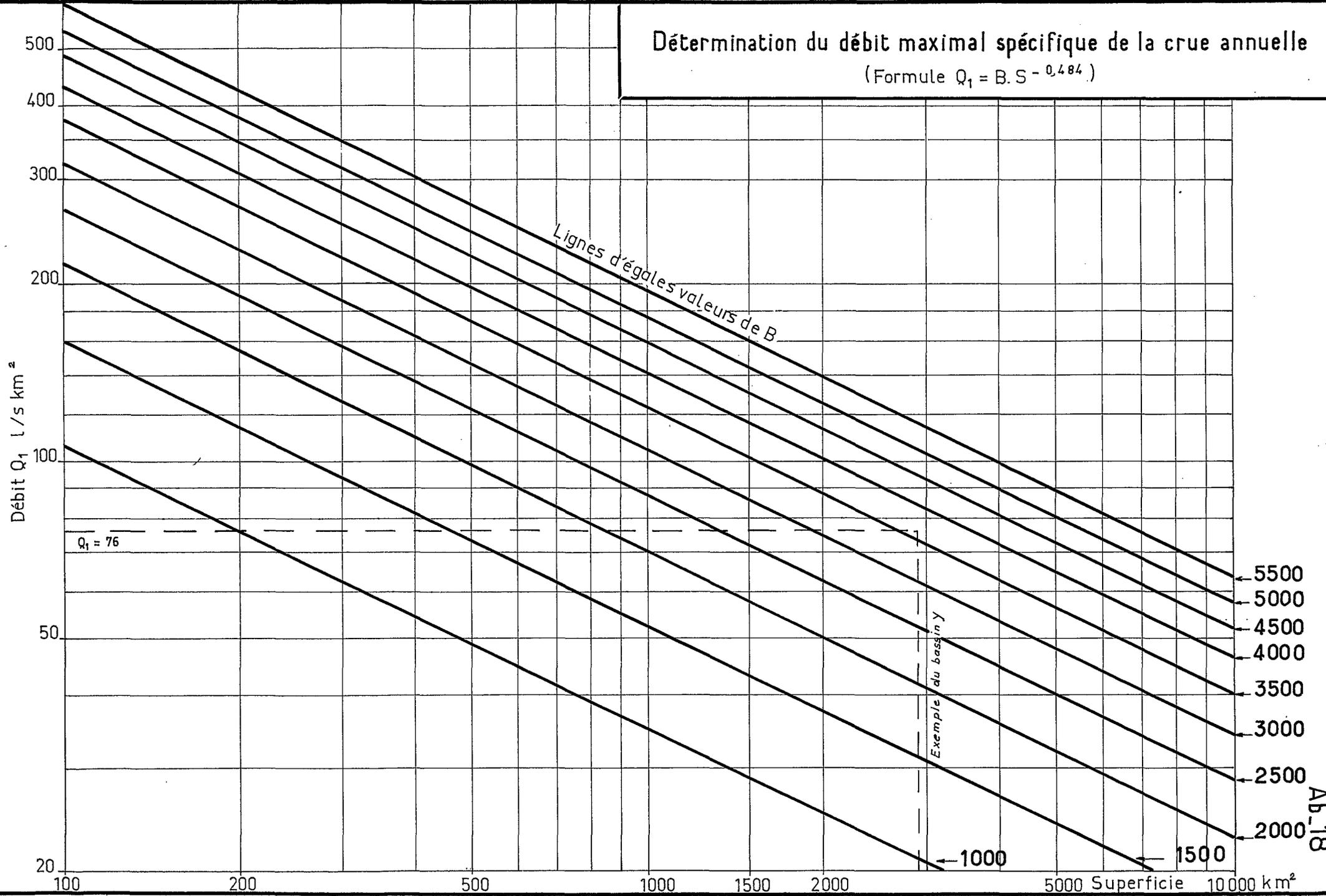
Détermination du débit maximal spécifique de crue annuelle

Première correction d B'_1 en fonction du taux de terrains sédimentaires



Détermination du débit maximal spécifique de la crue annuelle

(Formule $Q_1 = B \cdot S^{-0,484}$)



2.3.3 - Extension des normes hors du JAGUARIBE

Les restrictions d'emploi des normes relatives aux crues exceptionnelles comportent d'une part celles déjà formulées à plusieurs reprises quant à la situation géographique du site en latitude et à la concordance de son climat avec celui d'une ZPH du JAGUARIBE ; ces restrictions comportent d'autre part une prise en considération du relief du bassin, négligé ici car ce paramètre, qui varie peu dans le bassin du JAGUARIBE, ne le fait d'ailleurs qu'en liaison avec la géologie du bassin (le taux TS masque partiellement son influence dans le calcul de q_1).

De manière simple, on représente le relief du bassin par la pente longitudinale moyenne du cours d'eau (mesurée sur une carte au 1/250 000° avec des courbes de niveau tous les 100 mètres). Cette pente pour l'ensemble des cours d'eau du bassin du JAGUARIBE, s'inscrit dans une certaine gamme de variation.

Le tableau suivant donne cette gamme de variation pour des superficies drainées croissantes prises égales aux limites déjà considérées dans l'évolution des coefficients multiplicateurs de q_1 (paragraphe 2.3.2).

L'application des normes de calcul de crues est possible hors du JAGUARIBE si le bassin versant considéré a une pente longitudinale de son thalweg principal inscrite dans la gamme de variation admise.

Sinon l'emploi des normes est toujours permis, mais l'erreur maximale probable sur le résultat risque d'augmenter dans des proportions non définissables.

Gamme de variation admise pour la pente longitudinale
des cours d'eau

Superficie du bassin en km ²	Pente en m/km
100	6 - 14
300	3,5 - 9,5
1 000	2 - 6,5
2 500	1,5 - 4
7 500	1,2 - 2,8
12 000	1 - 2,5

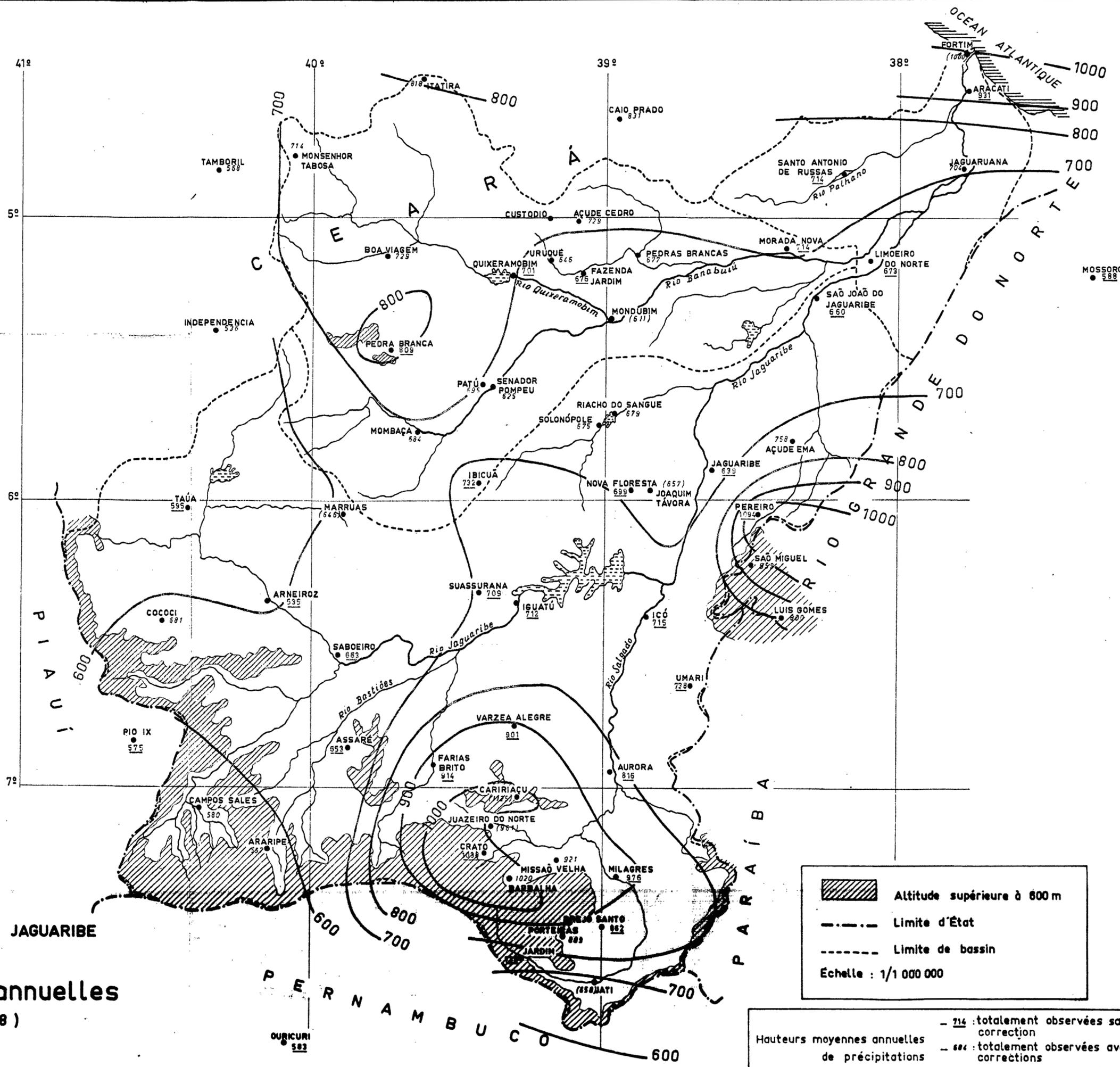
C O N C L U S I O N

Les normes et abaques de calcul proposées dans ce recueil ont été établies à partir d'une information limitée contenue dans les ouvrages cités en introduction. Leurs formes, leurs variations comme leurs précisions dépendent de cette information limitée. Une extension d'information peut permettre une amélioration de ces formes, de leurs variations et de leurs précisions.

En d'autres termes, dans 10 années peut-être, les nouvelles observations des réseaux climatologique et hydrométrique fourniront un accroissement tel de l'information actuelle que la révision des normes et abaques présentes sera possible et utile.

GAM-1-12
JMD E40 09, N
69 00 DM

Cette mire doit être lisible dans son intégralité
Pour A0 et A1: ABERPFTHLJDGQVVMNSZXY
zsaeocmuvvwxrfrkhdppggjkt 7142385690
Pour A2A3A4: ABERPFTHLJDGQVVMNSZXY
zsaeocmuvvwxrfrkhdppggjkt 7142385690



Gr.1

SUDENE-SCT

GRUPE D'ETUDE DU VAL DU JAGUARIBE

Isohyètes moyennes annuelles
(PÉRIODE 1918-1958)

Altitude supérieure à 600 m

Limite d'État

Limite de bassin

Echelle : 1/1 000 000

Hauteurs moyennes annuelles de précipitations

- 714 : totalement observées sans correction
- 684 : totalement observées avec corrections
- (801) : partiellement observées et estimées

Cette mire doit être lisible dans son intégralité
Pour A0 et A1: ABERPFTLJDOC GOUV MNSZXY
zsabocmvnwrxirfkbbpqqjft 7142385690
Pour A2, A3, A4: ABERPFTLJDOC GOUV MNSZXY
zsabocmvnwrxirfkbbpqqjft 7142385690

Gr.3

SUDENE-SCT

GRUPE D'ÉTUDE DU VAL DU JAGUARIBE

Zones à pluviosité homogène

41°E

40°E

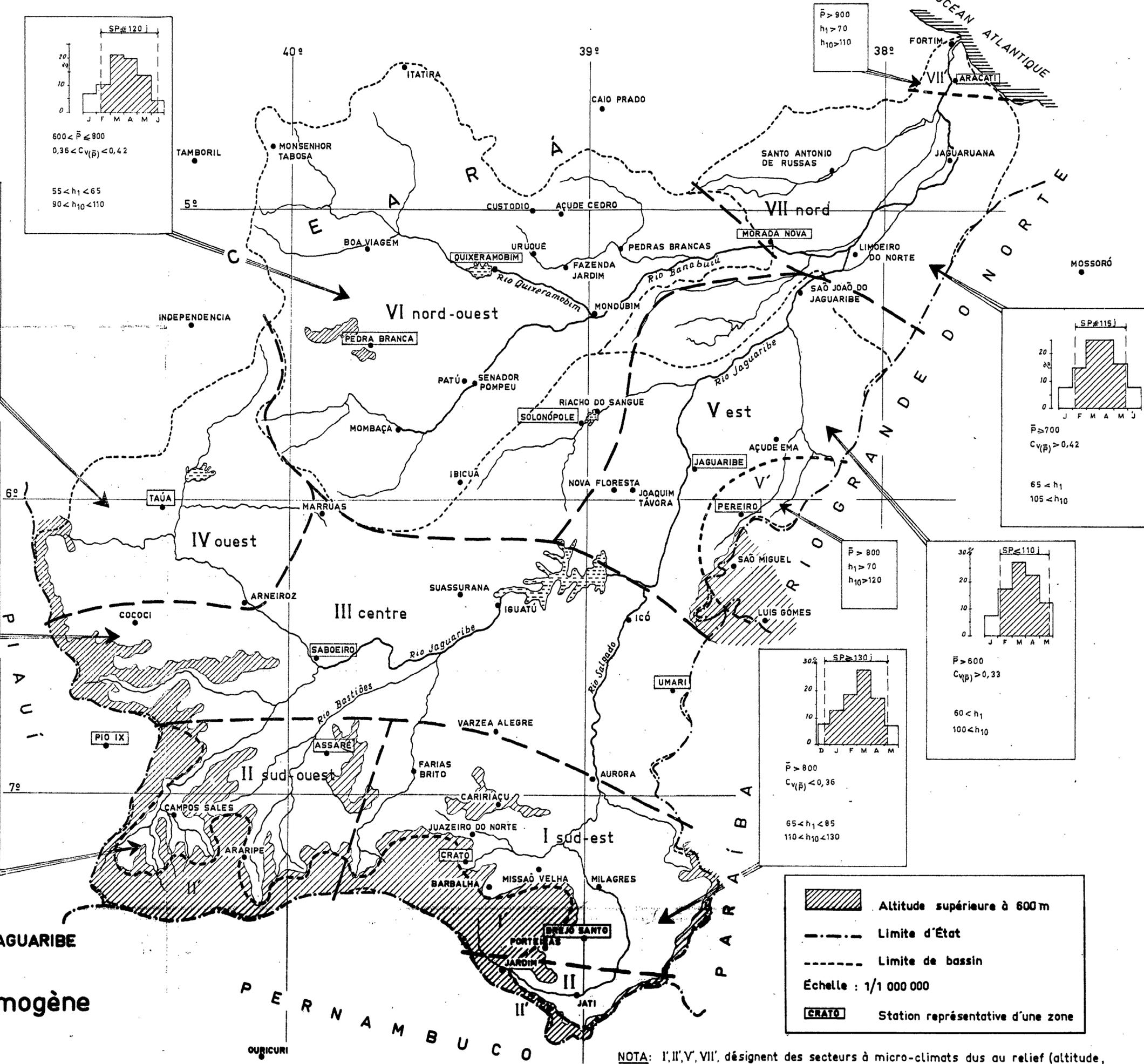
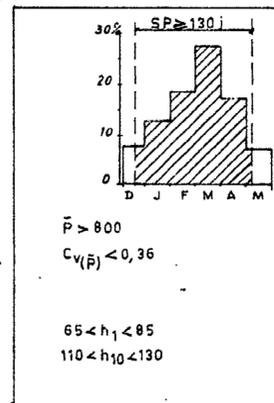
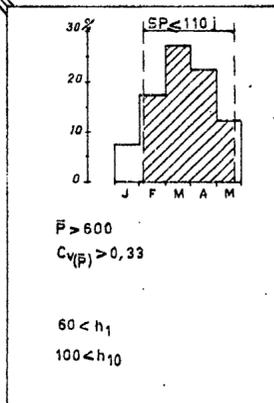
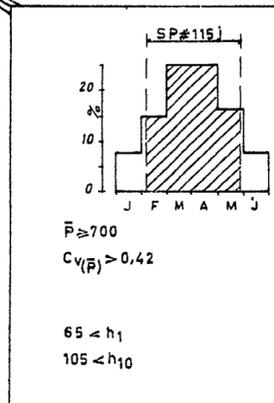
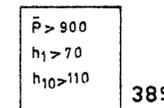
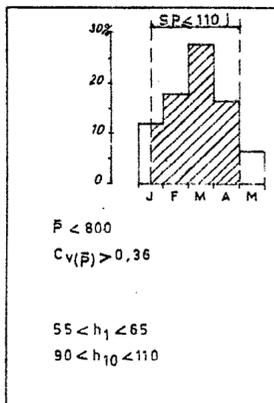
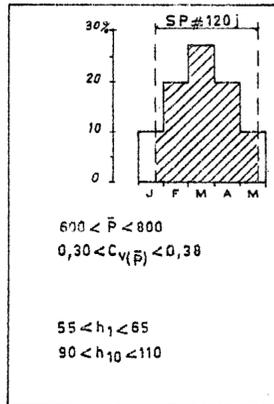
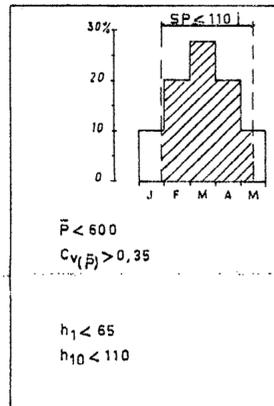
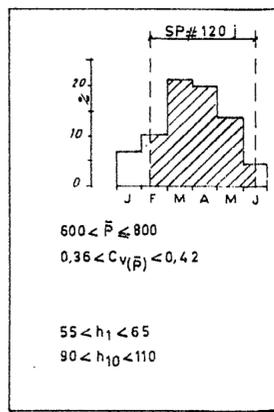
39°E

38°E

5°S

6°S

7°S



Altitude supérieure à 600 m
 Limite d'État
 Limite de bassin
 Échelle : 1/1 000 000
 Station représentative d'une zone

NOTA: I, II, V, VII, désignent des secteurs à micro-climats dus au relief (altitude, exposition aux vents dominants) ou à la proximité du littoral. Les limites de ces secteurs sont assez imprécises.