

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE-MER

UNIVERSITE DE PARIS-SUD
ORSAY

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE ET
DE GEOCHIMIE ISOTOPIQUE

REPRESENTATIONS CARTOGRAPHIQUES

DES REGIMES HYDROLOGIQUES

ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

par

THIAGBA M'BOUGUI Laurent

MEMOIRE DE D.E.A.
GEOLOGIE APPLIQUEE
Option : RESSOURCES EN EAUX

ORSTOM - Bondy
Septembre 1984

S O M M A I R E

I - AVANT-PROPOS

II - INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

GENERALITES SUR LA CARTOGRAPHIE

I - 1. Définition de la cartographie - Son domaine

I - 2. Caractéristiques spécifiques d'une carte

DEUXIEME PARTIE

LES REGIMES HYDROLOGIQUES

II - 1. Définition d'un régime hydrologique

II - 2. Caractéristiques d'un régime hydrologique

II - 3. Données de bases

TROISIEME PARTIE

PRESENTATION DES DOCUMENTS TRAITANT LA CARTOGRAPHIE
HYDROLOGIQUE

III - 1. A l'échelle territoriale (Pays)

III - 2. A l'échelle régionale (Bassin versant)

QUATRIEME PARTIE

ANALYSE DES DOCUMENTS TRAITANT LA CARTOGRAPHIE
HYDROLOGIQUE

IV - 1. Travaux préparatoires à toute cartographie

IV - 2. Choix de l'échelle

IV - 3. Choix des couleurs et des symboles

CINQUIEME PARTIE

EVALUATION DE LA CARTOGRAPHIE HYDROLOGIQUE ACTUELLE

- V - 1. Critiques de la cartographie et amélioration à apporter
- V - 2. Extensions possibles des cartes hydrologiques

CONCLUSION

Références bibliographiques

ANNEXE

- Planche n° I-1. Atlas du Togo (carte de l'écoulement annuel)
- n° I-2. Atlas du Togo (carte des étiages)
- n° I-3. Atlas du Togo (carte de répartition géographique et statistique des débits de crue)

- Planche n°II Atlas de la Guyane (cartographie hydrologique)

Planche n°III	Atlas de la Côte d'Ivoire (cartographie hydrologique)
Planche n°IV	Atlas de la Nouvelle-Calédonie (cartographie hydrologique)
Planche n°V	Bassin Rhin-Meuse (carte des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1979)
Planche n°VI	Région de la Bretagne (carte régionale des débits moyens annuels de fréquence biennale)
Planche n°VII.1	Bassin de l'Allier (carte de surplus d'eau)
n°VII.2	Bassin de l'Allier (carte de déficit)
n°VII.3	Bassin de l'Allier (carte des débits médians mensuels - moyenne géométrique)
n°VII.4	Bassin de l'Allier (carte des débits médians mensuels - variation saisonnière)
n°VII.5	Bassin de l'Allier (carte des écarts types mensuels des débits. Moyenne annuelle des 12 écarts types des débits mensuels)
n°VII.6	Bassin de l'Allier (carte des écarts types mensuels des débits - variation saisonnière)

- Planche n°VII.7 Bassin de l'Allier (carte de l'estimation d'un débit d'étiage de probabilité donnée)
- n°VII.8 Bassin de l'Allier (carte des données de base pour l'étude des crues)
- n°VII.9 Bassin de l'Allier (carte de l'étiage en 1966)
- Planche n°VIII Maquette d'essai de Huguette Vivian.

A V A N T - P R O P O S

Ce mémoire est le premier du genre que j'aurai eu à fournir après ma première année de troisième cycle d'hydrologie (D.E.A.) organisé conjointement par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM et le laboratoire d'hydrologie de géochimie isotopique de l'Université de Paris Sud.

Ce travail est assez particulier à mon avis parce qu'il est le résultat d'une recherche bibliographique et d'une synthèse. Il fait suite, non seulement à une période durant laquelle nous avons reçu des cours spécialisés, conçus pour nous communiquer les bases des méthodes d'évaluation et de gestion des ressources en eaux continentales, de surface et souterraines; mais, à un stage de terrain d'environ deux semaines au Centre de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains.

Pour tous les travaux que j'ai pu effectuer à l'ORSTOM pour la réalisation de ce document, il m'a fallu des guides, des personnes auparavant accoutumées à ces tâches là.

C'est ainsi que pour les problèmes qui ont pu se présenter à moi pendant ce travail, mes responsables de mémoire (MM. Y. L'HÔTE et P. RIBSTEIN) m'ont gratifié de toutes leurs attentions, de leurs conseils et explications à l'occasion de mes questions qui n'ont pas manqué d'être nombreuses en raison de l'importance du sujet traité. Je tiens vivement à les remercier au travers de ces lignes.

Enfin, je voudrais aussi remercier Monsieur PIEYNS (Responsable de la formation à l'ORSTOM) pour tous les efforts administratifs et techniques qu'il n'a cessé de faire pour nous assurer une bonne formation en hydrologie dans le cadre de ce troisième cycle.

I N T R O D U C T I O N

La maîtrise des "ressources en eau" est la condition fondamentale du développement agricole, industriel et socio-culturel (Conférence générale de l'UNESCO, MAR DEL PLATA, 1977).

La cartographie hydrologique est un moyen non moins important dans la maîtrise de ces ressources en eau. C'est pourquoi, différents essais de cartographie des paramètres hydrologiques ont été réalisés et adaptés, ces dernières années, à deux niveaux de gestion : le niveau territorial et le niveau régional.

Ce dossier documentaire a pour but de rassembler, de décrire et d'analyser les principaux travaux disponibles (du moins ceux que nous avons pu avoir à disposition) afin de pouvoir faire une critique de la méthodologie générale et suggérer une amélioration et une extension possible dans ce domaine.

Outre le but qu'il a de rassembler, de décrire et d'analyser afin d'en tirer les conclusions qui s'imposent, ce mémoire a aussi le but de proposer une synthèse, voire une définition concernant des thèmes aussi généraux que la cartographie et les régimes hydrologiques.

PREMIERE PARTIE

GENERALITES SUR LA CARTOGRAPHIE

I - 1. DEFINITION DE LA CARTOGRAPHIE - SON DOMAINE

Vu qu'au niveau même de la notion de cartographie il y a depuis des années, voire des décennies de terribles confusions introduites par l'existence de plusieurs définitions, nous préférons dans le cadre de notre travail, nous référer à celle élaborée par la Commission de l'Association Cartographique Internationale (A.C.I.) (in Cuenin, 1972).

Cette définition présentée à la conférence technique à Amsterdam en 1966 a été depuis ratifiée par la commission de terminologie de l'A.C.I. et reprise par l'UNESCO. Cette définition, en effet signifie que la cartographie est un ensemble d'études et d'opérations scientifiques, artistiques et techniques intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation en vue de l'élaboration de cartes, plans et autres modes d'expression ainsi que dans leurs utilisations.

Néanmoins, dans cette définition il faut distinguer trois stades qui se succèdent chronologiquement et qui

sont la conception, la production et l'utilisation.

La conception, en matière de cartographie, se rencontre sous des formes multiples : étude théorique des lois et des principes qui régissent le langage graphique, analyse des composants de l'information et recherche des moyens les plus efficaces pour leur transcription et leur perception, synthèse et optimisation de ces moyens dans la conception d'une carte destinée à communiquer les renseignements déterminés, dans un cadre géographique donné et pour des besoins bien définis.

La production comporte tout d'abord une phase de préparation qui comprend la collecte et la sélection des données de base, le choix éventuel de l'échelle, du format, de la mise en page et de l'habillage. Elle se poursuit ensuite par la rédaction et la reproduction.

L'aboutissement de la production dans ce cas étant soit des cartes ou des plans, leurs utilisations doivent être perçues comme un moyen de communiquer des informations à tous les lecteurs quels que soient leur langue maternelle et leur degré de connaissance.

Toutefois, "la conception scientifique de la cartographie s'est affirmée et tout laisse à penser que les considérations d'efficacité prendront de plus en plus le pas sur les notions d'esthétique . De deux objets identiquement fonctionnels, le plus agréable sera toujours préféré car c'est l'oeil qui réagit en définitive et qui juge de l'aspect avant d'analyser le contenu" (Cuenin R., 1972).

I - 2. CARACTERES SPECIFIQUES D'UNE CARTE

"La carte est plus qu'une simple image visuelle ou photographique d'une région donnée, elle constitue le moyen le plus efficace pour enregistrer, calculer, révéler, analyser et comprendre les relations spatiales qui existent entre les différents phénomènes concrets ou abstraits dont la localisation est géographique" (Cuenin R., 1972).

On peut analyser ses caractères spécifiques en comparant photographie aérienne et carte de la même zone. Mais on se contentera ici de les signifier simplement pour éviter de rentrer dans trop de détails. En effet, plusieurs paramètres sont fondamentaux dans la réalisation d'une carte :

L'échelle ; "c'est une identification en dimension qui permet d'apprécier l'étendue de l'espace représenté par la carte. Toutefois, face au champ infini des représentations possibles, la feuille de papier, liée à l'angle de vision, est pratiquement de dimension constante. On en déduit que l'échelle exprime le rapport entre les dimensions linéaires

de la feuille de papier et les dimensions de l'espace représenté". (Bertin.J., 1967).

Les variables usuelles ; elles ont pour but de différencier les phénomènes selon leur nature et l'importance relative qu'on veut leur attribuer; elles sont caractérisées par des variations de forme (un rectangle, cercle, carré, triangle, etc), de dimension, de valeur d'orientation (un rectangle noir, gris, blanc incliné, horizontal) et de couleur.

Les symboles et les signes conventionnels

Les nécessités de la schématisation et de l'identification conduisent à l'élaboration de graphismes conventionnels de symboles dans leur acceptation la plus générale; ils constituent un moyen d'identification graphique qui facilite la perception d'un phénomène en suggérant l'aire qu'il occupe ou d'un objet en le figurant sous une forme aussi évocatrice que possible mais simplifiée.

"Dans la traduction graphique des phénomènes et de leurs relations, la cartographie ne peut être vraiment efficace que si elle tient compte des lois de l'optique physiologique; ces lois déterminent les réactions de l'utilisateur aux différents stimuli visuels et conditionnent par conséquent, le choix, la sélection et l'utilisation des éléments graphiques les mieux adaptés et les plus efficaces" (Cuenin, 1972).

C'est en ces termes qu'on aboutit à l'analyse des fonctions de la représentation graphique (caractères

spécifiques) qui, comme la parole et l'écriture, sont des langages, c'est-à-dire des moyens de communication et d'expression rendus vivants grâce à l'utilisation de la couleur.

En effet, "les couleurs servent à ordonner, accentuer, distinguer, classer, à faire ressortir les contrastes, à amplifier les effets, à représenter les évolutions, à améliorer la lisibilité de la carte, à clarifier son contenu, à caractériser, à normaliser, à étendre la carte de l'espace, enfin à obtenir et parfaire le rendu esthétique global" (Schiede H. Die Farbe in Kartenkumt, in Cuenin 1972).

DEUXIEME PARTIE

LES REGIMES HYDROLOGIQUES

II - 1. DEFINITION D'UN REGIME HYDROLOGIQUE

Le régime d'un cours d'eau est caractérisé par l'ensemble de ses variations de débits, tant les variations à l'échelle inter-annuelle et saisonnière que celles des valeurs des débits extrêmes : étiages et crues. Il est déterminé par :

- "les apports en eau de l'atmosphère, constitués essentiellement de précipitations,
- les caractéristiques physiques du bassin de réception : constitution du sol, couverture végétale, relief et réseau hydrographique,
- les facteurs climatologiques intervenant dans le processus d'évaporation" (Rodier J., 1964).

Ainsi, pour une définition des régimes hydrologiques rencontrés à l'échelle mondiale, (Guilcher A., 1965) propose :

- "l'hydrologie des cours d'eau des zones méditerranéennes, subdésertiques et désertiques,
- l'hydrologie des cours d'eau des pays équatoriaux et tropicaux,
- enfin, l'hydrologie des cours d'eau des zones tempérées et froides au niveau de laquelle nous avons :
 - . les régimes pluviaux tempérés,
 - . les régimes montagnards,
 - . les régimes nivaux et pluvio-nivaux des plaines continentales."

II - 2. CARACTERISTIQUES D'UN REGIME HYDROLOGIQUE

Nous avons vu que dans le cadre de la définition du régime hydrologique, apparaissait aussi bien des notions de climatologie que celles des caractéristiques physiques. En fait, le débit des cours d'eau dépend de nombreux facteurs, tels que le relief, la végétation, la nature du sol, la structure du réseau hydrographique, l'évaporation, etc. mais, l'influence des précipitations est nettement prépondérante. C'est d'ailleurs pourquoi, un régime hydrologique est caractérisé à partir des éléments climatologiques, plutôt qu'en fonction des paramètres du bassin. La pluie étant un élément climatologique ayant forcément une relation avec le débit, nous disons que les éléments à prendre en compte pour caractériser un régime hydrologique sont :

- l'abondance annuelle au niveau de laquelle on peut distinguer :

les modules annuels,
les modules spécifiques et les lames écoulées
les irrégularités inter-annuelles
les déficits d'écoulement.

- les variations saisonnières de débits,

- les débits de crues et d'étiages

Toutefois, pour mieux comprendre le rôle essentiel de ces éléments dans l'existence d'un régime, et même de comprendre ultérieurement la nécessité de leur représentation, nous pensons qu'il faut esquisser une définition de chacun de ces termes, du moins ceux couramment cartographiés dans les documents exploités (débits moyens mensuels, module annuel, lame écoulee, variation saisonnière, déficit d'écoulement, les étiages, les crues et les débits caractéristiques).

II - 3. DONNEES DE BASES

On rassemble sous cette dénomination un certain nombre de renseignements hydrologiques, constituant les éléments essentiels du régime d'une rivière que nous nous sommes proposés de définir en fin de paragraphe II.2.

- Débits moyens mensuels

Ces débits sont obtenus, pour chaque année en faisant la moyenne arithmétique des débits journaliers de chaque mois. La moyenne, sur la période d'observation des débits en un mois déterminé donne le débit moyen interannuel de ce mois.

- Module annuel

C'est le débit moyen de l'année, il est calculé en additionnant les débits moyens journaliers et en divisant le total par le nombre de jours de l'année. Les résultats sont donc légèrement différents de ceux que l'on obtiendrait en faisant la moyenne des débits mensuels.

- Lame d'eau écoulée

La définition et le calcul de la lame d'eau écoulée font intervenir deux paramètres : le module annuel et la surface du bassin versant. Elle est en fait le rapport de ces deux paramètres. Généralement on l'obtient dans les études en utilisant l'expression (I)

$$(I) \quad H_{\text{mm}} = \frac{\begin{array}{c} \text{module annuel en m}^3/\text{s.} \\ \downarrow \\ Q \end{array}}{\begin{array}{c} S \\ \uparrow \\ \text{Surface du bassin versant en km}^2 \end{array}} \cdot 3.15.10^4$$

- La variation saisonnière de débit

A partir d'une série de débits moyens annuels Q (Y) fournie par un service hydrologique, supposons que MQ (Y) soit la moyenne des débits annuels. C'est-à-dire la moyenne à long terme de plusieurs débits moyens annuels, on peut, pour chaque année, calculer un coefficient K_i à partir de l'équation :

$$K_i = Q(y)_i / MQ(y)$$

K_i est la variation de l'écoulement annuel moyen d'une année à une autre. C'est une variation saisonnière de débit à l'échelle considérée. Cette variation indique si la quantité d'eau de l'année a été supérieure ou inférieure à la moyenne à long terme.

- Le déficit d'écoulement

On appelle déficit d'écoulement, que l'on désigne par la lettre D , la différence, pour une période donnée, entre la précipitation moyenne sur le bassin et la lame d'eau écoulée à la station. En fait son établissement revient à faire un bilan hydrologique d'un bassin versant.

$$\begin{array}{ccc} \leftarrow D = P - Q \rightarrow & & \\ \text{Déficit d'écoulement} & & \text{Lame d'eau écoulée en mm} \\ \text{en mm} & & \\ & \uparrow & \\ & \text{Pluviométrie} & \\ & \text{moyenne annuelle en mm} & \end{array}$$

- Débits de crue, d'étiage et débits caractéristiques

Le débit de crue peut être défini comme étant la valeur instantanée de débit le plus fort atteint dans l'année. Cette valeur instantanée définissant la crue jointe aux caractéristiques d'une crue sont des données hydrologiques des plus importantes, car leur connaissance est nécessaire pour prévenir les catastrophes et les pertes en vies humaines. Cependant, je crois qu'on ne se rend pas souvent compte qu'un débit de crue est une valeur très relative et qu'elle est étroitement liée au problème de la mise au point de critères technologiques concernant les projets de ressources en eau. Les critères s'appliquent à la conception des évacuateurs et la détermination de la capacité des réservoirs, des dimensions des canaux des rivières, des ponts, des digues, des réseaux d'égouts, etc... La plupart des projets étant envisagés sous l'aspect coût/bénéfice, les critères de conception et les débits et les hauteurs de crues correspondants doivent comporter des paramètres permettant de telles considérations coût/bénéfice. Donc, en général, la définition d'un débit de crue n'a de valeur que si elle est accompagnée d'une indication du temps de retour (probabilité) de son occurrence, donc d'une notion de sa valeur économique. Cependant, dans certains cas, la prévention de tout risque de bris de l'ouvrage prévaut sur les considérations économiques. C'est en particulier le cas si un grand nombre de vies humaines sont mises en danger par les crues. Dans de tels cas, on recherche la valeur physique maximale du phénomène.

"Alors que l'étude des crues préoccupe l'homme depuis très longtemps, il n'en va pas de même pour la prévision des faibles débits. Si l'on excepte certaines régions sèches

dans lesquelles les problèmes de ressources en eaux ont été étudiés corrélativement à ceux d'irrigation, ce n'est que très récemment que l'on a été amené à se préoccuper des carences d'eau." (Jaton J., 1979). On définit alors l'étiage comme étant le plus bas niveau des eaux d'un cours d'eau; le débit d'étiage est le débit correspondant à ce niveau.

Pour donner plus de précisions à la définition de l'étiage, nous considérons une série de débits dits caractéristiques :

- débit annuel d'étiage : débit journalier le plus faible observé au cours de l'année (hydrologique ou calendaire)
- débit absolu d'étiage : débit journalier le plus faible survenu au cours de la période d'observation
- débit caractéristique : débit dépassé 355 jours par an d'étiage (DCE) (hydrologique ou calendaire)
- débit caractéristique : débit dépassé en moyenne 355 jours d'étiage moyen par an au cours d'un certain nombre d'années
- débit caractéristique : débit dépassé en moyenne 10, de 10 ou 11 mois respectivement 11 mois par an (DC10, DC11) au cours d'un certain nombre d'années

Remarque : "on considère aussi parfois l'étiage comme la plus faible valeur de la moyenne mobile des niveaux observés au cours d'une période de jours consécutifs d'une année" (Jaton J., 1979)

TROISIEME PARTIE

PRESENTATION DES DOCUMENTS TRAITANT LA CARTOGRAPHIE
HYDROLOGIQUE

Cette partie est un inventaire qui a pour but de rassembler en un même dossier tous les documents qui, à notre connaissance, ont présenté une cartographie des régimes hydrologiques d'un cours d'eau. De tous les documents consultés, quatre ont traité l'ensemble d'un territoire. Quelques autres sont consacrés seulement à une région ou bassin versant. Un examen plus ou moins détaillé de ces documents nous permettra d'en faire la description aussi bien à l'échelle territoriale que régionale.

III - 1. A L'ECHELLE TERRITORIALE (Pays)

Comme précédemment annoncé, au niveau de cette échelle, nous n'avons pu consulter que quatre documents :

- l'Atlas du Togo
- l'Atlas de la Côte d'Ivoire
- l'Atlas de la Nouvelle-Calédonie
- l'Atlas de la Guyane

III - 1.1. ATLAS DU TOGO

Sur les onze cartes que comprend l'ouvrage, qui en fait est un Atlas de ressources et de besoins en eau du Togo, huit traitent des ressources en eau et parmi celles-ci trois planches sont consacrées aux régimes hydrologiques des cours d'eau, à savoir :

- une carte de l'écoulement annuel (cf. planche n° I.1)
- une carte des débits d'étiages (cf. planche n° I.2)
- une carte des crues (cf. planche n° I.3)

Ces cartes au 1/1.000.000 réalisées par Y.L'Hôte et publiées en 1982 en de différentes couleurs sont accompagnées de notes explicatives. Elles faisaient partie d'une étude qui constituait un des objectifs de la phase préparatoire à l'élaboration d'un plan d'aménagement des eaux à l'échelle nationale. Selon les paramètres à représenter et suivant l'échelle de temps, chacune de ces cartes a son niveau propre, conjugue la variation spatiale des phénomènes avec une variation temporelle. Nous ne décrivons pas ces planches ainsi que les suivantes, pensant que leurs seules reproductions sont suffisamment explicites.

III - 1.2. ATLAS DE LA COTE D'IVOIRE
 ATLAS DE LA NOUVELLE-CALEDONIE
ATLAS DE LA GUYANE.

Dans ces trois Atlas, la représentation des paramètres hydrologiques est faite suivant une même méthodologie; celle qui consiste à cartographier les paramètres sur une seule carte accompagnée de notes explicatives. Ces cartes, réalisées toutes au 1/1.000.000 sauf dans le cas de la Côte d'Ivoire (1/2.000.000) ont les mêmes fonctions :

- donner aux aménagistes et aux services intéressés les
- indications quantitatives sur les disponibilités en eau des différents pays,
- surtout d'avoir à disposition dans un document unique toute l'information concernant l'hydrologie.

Comparativement à l'Atlas du Togo, ces différentes cartes conjuguent, selon les paramètres à représenter et suivant l'échelle de temps, une représentation du paramètre

avec une adaptation simplifiée de la carte de variation de ce même paramètre. A la différence que dans ce cas l'information est condensée. Ces cartes, concernant l'information hydrologique et extraites des différents Atlas sont consignées en annexe selon la présentation suivante :

- Atlas de la Guyane - planche N° II
- Atlas de la Côte d'Ivoire - planche N° III
- Atlas de la Nouvelle-Calédonie - planche N° IV

A l'échelle territoriale, l'Atlas du Togo nous est apparu le document le plus complet traitant de la cartographie hydrologique à cause du nombre de planches consacrées à l'hydrologie et surtout à cause du caractère spécifique des travaux réalisés.

III - 2. A L'ECHELLE REGIONALE OU D'UN BASSIN VERSANT

Pour ce qui concerne la cartographie des régions ou des bassins versants, nous avons consulté une série de quatre documents; à savoir :

- la carte des étiages mensuels du bassin de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973. Planche n° V.
- Le document sur l'inventaire et la détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables en Equateur.

- Le document sur l'étude statistique des débits des cours d'eau en Bretagne (1978).
- Le document sur le bassin de l'Allier traitant des méthodes d'études régionales des ressources en eau.

Nous avons voulu traiter en un seul paragraphe les documents concernant la cartographie des régions et celle des bassins versants parce que, pour nous, bien que la région soit une entité administrative et le bassin versant une entité hydrologique, trop souvent bassin versant et région représentent la même chose quand la limite du bassin est confondue avec celle de la région. Même quand ce n'est pas le cas, la cartographie d'une région reste fortement dépendante de celle de bassins versants, quelquefois, d'un seul bassin versant.

III - 2.1. CARTE DES ETIAGES MENSUELS DU BASSIN DE LA MEUSE ET DE LA MOSELLE DE 1969 A 1973. PLANCHE N°V

Cette carte est extraite d'un document représentant un travail d'élaboration de cartes de débits spécifiques de bassin versant. Ces cartes contribuent à répondre aux problèmes d'aménagement des eaux et de leurs pollutions. C'est pourquoi tout le long des études on a voulu qu'elles satisfassent à deux soucis :

- l'obtention au moyen d'une représentation linéaire des débits transités par les drains,
- l'obtention des écoulements émis par les surfaces drainées.

Dans le cadre de l'établissement de la carte des étiages mensuels, J.F. Zumstein a considéré que l'étiage mensuel était le débit minimum observé pendant un mois au cours d'une année calendaire. Mais, puisque l'étude s'étend sur une période de 4 ans (1969 - 1973) pour chaque année, le débit d'étiage mensuel est obtenu en faisant la moyenne arithmétique des 12 débits minimums observés. Ensuite, ce débit est rapporté à une surface pour obtenir un débit spécifique. C'est enfin cette valeur qui est cartographiée suivant le principe de la représentation spatiale.

III - 2.2. INVENTAIRE ET DETERMINATION DES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION RATIONNELLE DES RESSOURCES EN EAU

Ce document a été mis au point par Cadier et Pourrut (ORSTOM 1979) dans le cadre d'une étude concernant l'utilisation optimale des ressources naturelles renouvelables et, plus précisément de la planification nationale de cette utilisation en Equateur. Devant une multitude de problèmes qu'ils ont pu avoir, la méthodologie hydrologique élaborée se singularise par les aspects suivants :

- un inventaire des données existantes, puis critique par sondage de celles-ci;
- une généralisation spatiale de l'information s'appuyant sur la notion cartographiée de zone hydrologique homogène à partir des critères physico-géoclimatiques judicieusement choisis;

- description de la ressource en eau par quelques paramètres simples d'accès et généralement présentables par moyen cartographique (module, débits caractéristiques d'étiages, irrégularités annuelles...). Le document n'a pas présenté de manière exhaustive la totalité des résultats acquis. Mais il s'est limité à un bref commentaire relatif aux extraits des cartes et aux graphiques qui accompagnent l'étude. Pour ce qui nous concerne, nous avons pu trouver dans ce document une carte de modules spécifiques annuels et celle concernant les débits spécifiques d'étiages. Dans cette étude, les débits spécifiques d'étiages sont représentés par les débits caractéristiques moyens annuels non dépassés pendant trente jours consécutifs; ils ont servi à l'évaluation des risques de défaillance pour le projet.

III - 2.3. DOCUMENT SUR L'ETUDE STATISTIQUE DES DEBITS DES COURS D'EAU DE LA BRETAGNE

L'étude qui a débuté le 27 Avril 1978 avait pour objectif :

- d'améliorer la connaissance hydrologique en Bretagne,
- de faciliter la mise en oeuvre d'une politique d'objectifs de qualité et en particulier l'élaboration des cartes départementales,
- de définir les "débits de références" pour la détermination des flux polluants admissibles et la définition correspondante des normes de rejets à appliquer.

Pour élaborer les cartes de régionalisation, il a fallu :

- "moduler les débits sur l'ensemble du bassin versant,
- étendre les valeurs à des rivières non jaugées.

Cette modulation tient compte des observations faites par le Service Régional de l'Aménagement des Eaux de la Bretagne (S.R.A.E.B.) depuis 1972, à savoir :

- "que la variation spatiale des modules spécifiques des cours d'eau est très liée à la distribution des précipitations,
- que les étiages sur bassins granitiques superficiellement perméables sont plus soutenus que ceux des bassins à dominante schisteuse imperméable dans leur masse" (Rapport du S.R.A.E.B. 1978).

Ce document présente six cartes dont quatre représentent des classes d'équivalence et mentionnent les débits calculés à chaque station. Le nombre de stations âgées d'au moins dix ans étant assez faible, il a été nécessaire avant de procéder à une régionalisation des différentes classes d'écoulements, d'estimer le débit moyen inter-annuel sur les rivières voisines par corrélation graphique. Ce coefficient de corrélation a d'ailleurs été conservé pour estimer le débit moyen de fréquence biennale, quinquennale et décennale.

Les cartes de débits moyens annuels traduisent la plus ou moins grande richesse de l'écoulement des rivières

bretonnes, en opérant dans l'ensemble des éléments du réseau hydrographique, une partition en deux grandes classes :

- les rivières ayant un débit moyen annuel inférieur ou égal à 10 l/s/Km²,
- les rivières ayant un débit supérieur à 10 l/s/km².

Pour l'illustration de nos propos nous avons choisi de présenter celle concernant les débits moyens annuels de fréquence biennale - planche n° VI.

III - 2.4. DOCUMENT SUR LE BASSIN DE L'ALLIER TRAITANT DES METHODES D'ETUDES REGIONALES DES RESSOURCES EN EAUX

Ce document a pour but :

- l'obtention de l'information hydrologique secteur par secteur, dans la région étudiée, avec les données disponibles,
- la détermination des zones où de nouvelles mesures hydrologiques seraient nécessaires pour compléter utilement cette information,
- la localisation des zones où tel ou tel facteur physique semble prédominant dans le cycle de l'eau et où la création d'un dispositif d'étude expérimentale serait intéressante.

Les méthodes utilisées correspondent schématiquement à deux approches :

- l'étude du cycle de l'eau par les méthodes de l'hydrologie descriptive. Cette attitude conduit à la description de la distribution des ressources qui relève des méthodes de l'hydrologie statistique;
- l'étude du cycle de l'eau par les méthodes de l'hydrologie analytique. Elle consiste non pas à décrire seulement les phénomènes et leur chronologie, mais à en expliquer la genèse dans un but scientifique de compréhension de leur dynamique et avec des objectifs pratiques.

Le choix des méthodes est fonction des motivations de l'étude à deux échelles d'espaces assez arbitraires, correspondant, l'une aux bassins versants inférieurs à 100Km², l'autre aux bassins supérieurs à 100 Km².

Dans la première classe constituée de petits bassins, l'agriculture avec le développement de l'irrigation (construction de retenues collinéaires qui contrôlent des bassins de 0,5 à 10 km²) et l'hydroélectricité (prises d'eau en montagne) sont les principaux utilisateurs des eaux superficielles de ces petits bassins. La connaissance des ressources en eau, au droit de chaque ouvrage, serait donc nécessaire pour son dimensionnement et son exploitation, mais des données hydrologiques plus précises, concernant notamment les crues à craindre, sont également indispensables pour la détermination des organes de protection. A ce dernier aspect, il faut rattacher les questions d'hydrologie qui intéressent au premier chef les Travaux publics, pour le dimensionnement des ouvrages secondaires (ponceaux, buses, etc...), des réseaux de voies de communication et le calcul des ouvrages de drainage des eaux fluviales de zones urbaines ou industrielles ou même

agricoles. Car le surdimensionnement préventif de tels ouvrages reproduits à des milliers d'exemplaires, coûte cher.

A plus grande échelle (bassins versants dont la superficie dépasse 100 km²) l'importance et l'urgence reviennent aux ressources en eaux souterraines dont l'inventaire est rendu plus délicat par les perturbations causées par l'exploitation des nappes. Les questions majeures sont ici les problèmes de chronologie des relations pluie - nappe pour l'étude de l'alimentation et de la réalimentation artificielle des aquifères souterrains et ceux de la pollution.

C'est donc dans ce contexte que ce document produit, dans le cadre de la représentation des paramètres hydrologiques et celui de la publication des résultats, 9 types de cartes. Ce sont :

- la carte de surplus d'eau, Bassin de l'Allier, planche n°VII.1,
- la carte de déficit, planche n°VII.2,
- la carte des débits médians mensuels, moyenne géométrique, planche n°VII.3,
- la carte des débits médians mensuels, variation saisonnière, planche n°VII.4,
- la carte des écarts types mensuels des débits, moyenne annuelle des 12 écarts types des débits mensuels, planche n°VII.5,

- la carte des écarts types mensuels de débits. Variation saisonnière, planche n°VII.6,
- la carte de l'estimation d'un débit d'étiage de probabilité donnée, planche n°VII.7,
- la carte des données de base pour l'étude des crues, planche n°VII.8,
- la carte de l'étiage sur le Bassin de l'Allier en 1966, planche n°VII.9.

Pour une meilleure compréhension du document, nous avons essayé d'expliquer certaines planches dont la seule reproduction est insuffisamment explicite. Ce sont :

- les cartes de surplus et de déficit - planches n° VII.1. et 2. Ces deux cartes représentent les paramètres (excès et déficit) du bilan de l'eau à différentes stations météorologiques après un bilan classique tenant compte de l'évapotranspiration de Thornhwaite et de l'état du stock d'eau dans le sol au mois précédent;
- les cartes des débits médians mensuels (moyenne géométrique et variation saisonnière) (planches VII.3 et 4)

Le débit médian mensuel est la valeur du débit correspondant à 50 % de fréquence sur la courbe de répartition des débits journaliers au droit d'une station.

La moyenne géométrique de ces débits médians mensuels pouvait être obtenue par la formule :

$$\bar{G} = \sqrt[N]{x_{1j_1} \times x_{2j_2} \times \dots \times x_{ij_i} \times \dots \times x_{NN'}}$$

avec $N =$ période d'observation
 $N' = 12$
 x_{ij} = débit médian mensuel correspondant au $j^{\text{ème}}$ mois
de la $i^{\text{ème}}$ année de la période d'observation.
 $(1 \leq i \leq N \quad 1 \leq j_i \leq N')$

Dans ce cas la valeur cartographiée serait directement la moyenne arithmétique des 12 valeurs géométriques obtenues. Mais, dans le cadre de cette étude une autre méthode a été utilisée. Elle consiste à employer le logarithme pour obtenir la moyenne géométrique des débits médians mensuels. C'est-à-dire que la valeur cartographiée est alors l'exponentielle de la moyenne arithmétique des 12 valeurs partielles de logarithmes obtenues.

La variation saisonnière est caractérisée par deux indices. C_e et C_h définis comme les rapports respectifs des moyennes M_e et M_h des paramètres des mois d'été et d'hiver rapportées à la moyenne générale.

$$C_e = M_e/M \quad (\text{indice estival}); \quad C_h = M_h/M \quad (\text{indice hivernal})$$

- les cartes des écarts types mensuels des débits, moyenne des 12 écarts types des débits mensuels et variation saisonnière (planches VII.5 et 6)

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude est la même que celle utilisée au niveau de la représentation des

débits médians mensuels. La seule différence est que l'information cartographiée est l'exponentielle de la moyenne arithmétique des 12 écarts types partiels obtenus lors de l'affectation du logarithme aux débits médians mensuels. La variation saisonnière de ces paramètres est aussi caractérisée par les mêmes indices. Toutefois, ici ils seront définis comme suit :

$$C_e = V_e/V \text{ (indice estival)} \quad C_h = V_h/V \text{ (indice hivernal)}$$

V_e et V_h sont les moyennes respectives des paramètres des mois d'été et d'hiver. V par contre est la moyenne générale.

- Carte de l'estimation d'un débit d'étiage de probabilité donnée (planche n°VII.7.)

L'étiage est caractérisé ici par le débit moyen minimum des 30 jours consécutifs (Q_{30}). La loi de probabilité du Q_{30} est une loi de Galton à deux paramètres:

$$m = \text{moyenne de } \log Q_{30}$$

$$\sigma = \text{écart-type de } \log Q_{30}$$

La carte permet de connaître en n'importe quelle station du Bassin de l'Allier le débit médian ($QM=10^m$) et l'écart géométrique ($EG = 10^\sigma$), ces deux grandeurs ayant la dimension d'un débit. La valeur de σ / \sqrt{n} permet, connaissant QM et EG , d'estimer le quantile de probabilité donnée et de déterminer la demi-amplitude de l'intervalle de confiance à partir des abaques mis au point dans le cadre de l'étude.

QUATRIEME PARTIE

ANALYSE DES DOCUMENTS TRAITANT LA CARTOGRAPHIE HYDROLOGIQUE

La mise en oeuvre de cartes hydrologiques aussi bien à l'échelle territoriale qu'à l'échelle d'une région ou d'un bassin versant a pour origine une double préoccupation :

- présenter sous forme synthétique toute l'information disponible concernant des débits et contribuer à l'estimation quantitative sur l'ensemble de ces bassins ou territoires des ressources en eaux superficielles liées en étiage comme en crue, à la pluviométrie et dans certains cas aux nappes souterraines,
- se doter d'un outil capable de nous informer de manière ponctuelle.

Je voudrais faire remarquer globalement que, dans le cadre de cette mise en oeuvre il faut distinguer trois stades qui se suivent chronologiquement et qui sont :

- les travaux préparatoires à toute cartographie,
- le choix d'une échelle,
- le choix des couleurs et des symboles.

IV - 1. TRAVAUX PREPARATOIRES A TOUTE CARTOGRAPHIE

Dans le cadre de la représentation cartographique des paramètres hydrologiques, tous les résultats qui apparaissent sur les documents sont des éléments émanant d'études préalables.

D'une manière générale, supposons qu'on veuille représenter des débits de fréquence décennale au droit d'une série de stations d'un bassin versant. Pour atteindre notre but, il nous faudra passer par une série d'étapes qui sont :

- la collecte des données de base (débits, hauteurs d'eau) au droit de chacune de ces stations,
- traitement et critique de ces données,
- étude statistique de ces données afin de choisir la loi qui s'ajuste le mieux à leur distribution,
- détermination du débit de fréquence décennale à partir de la loi retenue et représentation.

Pour illustrer nos propos nous avons choisi de présenter en exemple le cas de l'étude statistique des débits des cours d'eau de la Bretagne qui cadre assez bien avec cette "méthodologie" générale.

En effet, avant d'aboutir à la représentation des paramètres, l'étude a utilisé des données issues des observations hydrologiques faites par :

- le Service Régional de l'Aménagement des Eaux de la Bretagne,
- le Service de l'Industrie et des Mines,
- l'Electricité de France

en vue d'une analyse fréquentielle.

"L'étude se propose de produire une information hydrologique homogène à travers toute la Bretagne. Or, le réseau hydrométrique de la Bretagne est relativement jeune et la longueur des séries disponibles est variable d'une

station à l'autre. Le principe adopté consiste donc à utiliser dans chaque station, pour les ajustements statistiques les données recueillies au cours de la dernière décennie 1968 - 1977" (Rapport du S.R.A.E.B. 1978).

Ainsi, ont été établis des tableaux donnant pour chaque paramètre hydrologique et pour chaque station :

- la loi retenue,
- les paramètres estimés (écart-type, moyenne),
- les quantiles.

Pour permettre de comparer la plus ou moins bonne adéquation des ajustements, les valeurs expérimentales ainsi que les quantiles des différentes lois ont été reportés sur graphique.

Il existe des cas où les travaux préparatoires sont assez laborieux et éprouvants surtout quand ils posent le problème de la délimitation des zones hydrologiques, théoriquement homogènes. Ce principe permet de sélectionner à la fois les stations de jaugeages à conserver et les zones dans lesquelles les facteurs conditionnels du régime hydrologique varient peu. C'est le cas de l'Equateur où Cadier et Pourrut (ORSTOM 1979) proposent la solution suivante :

- " diviser tous les grands bassins hydrologiques en bassins unitaires (un bassin unitaire est un bassin dont la superficie est en général comprise entre 25 et 150 km² et où l'on devrait pouvoir considérer que les

caractéristiques hydrologiques sont, approximativement du moins, globalement homogènes).

- Pour chacun des bassins unitaires, déterminer un ordre de grandeur ou une classe des paramètres hydrologiques,
- chercher à quantifier chaque paramètre de façon à ce que la classe à laquelle il appartient représente un certain % du bassin total."

En pratique pour réaliser tout ce travail, il faut une série de documents de base qui sont :

- les catalogues de tous les débits aux stations du réseau hydrométrique des bassins considérés,
- les cartes hydrographiques,
- les cartes schématiques des isohyètes annuelles et saisonnières de la période considérée.

IV - 2. LE CHOIX D'UNE ECHELLE

Dans l'analyse de tous les documents et de leur fonctionnement, nous nous sommes situés à deux niveaux de perception :

- celui des ensembles fonctionnels (territoire, région, etc...)
- et celui des sous-ensembles fonctionnels (bassin versant).

Bien que ces deux niveaux de perception dans ce cas restent à peu de chose près identiques, du moins au niveau des éléments les composant, ils ont tout de même été choisis afin de transmettre des informations adaptées à deux niveaux de gestion : le niveau territorial, régional et le niveau du bassin versant. Et, pour chaque niveau de gestion nous avons constaté qu'il était toujours question d'une échelle permettant de représenter cartographiquement les informations. Il ressort de notre analyse que pour les cartes des ensembles fonctionnels destinées plus spécialement à une connaissance plus globalisée et à une gestion de type territorial et régional on prend une échelle plus *petite* (à titre indicatif on citera 1/1.000.000), tandis que pour les cartes des unités fonctionnelles destinées à une connaissance plus fine et à une gestion locale (bassin versant) on prend une échelle plus *grande* (1/500.000). Mais, il faut dire que ces choix sont vraiment fonction des fonds de cartes disponibles, de la nature de l'information requise par l'aménagiste, de la superficie du territoire ou de bassin versant.

IV - 3. CHOIX DES COULEURS ET DES SYMBOLES

Les documents cartographiques dépouillés peuvent, d'une manière générale, être séparés en trois catégories :

- ceux qui fournissent seulement des renseignements ponctuels au niveau des différentes stations de jaugeage. C'est cette méthode de représentation que nous appellerons ponctuelle. Elle symbolise une méthode de représentation de base, car elle se retrouve sur tous les documents dépouillés. Selon les documents et suivant les paramètres elle utilise différents types de symboles (des cercles, des rectangles, des carrés et même des courbes).

Exemple, dans l'Atlas de la Guyane et au niveau de la planche n° II toute l'information de débit (module médian, module décennale humide, la crue décennale et le débit caractéristique d'étiage) est consignée dans un grand rectangle.

- Une autre catégorie de document fournit par interpolation une représentation continue des débits (ou par classe) tout au long du cours d'eau. C'est la représentation qu'on dira linéaire. Nous avons un exemple aussi bien dans l'Atlas de la Côte d'Ivoire (planche n° III) que dans l'Atlas du Togo au niveau de la planche n° I.1. C'est-à-dire que pour chaque section du cours d'eau, entre deux stations de jaugeage la valeur des débits est estimée et représentée par une bande dont l'épaisseur croît avec le débit.

- Enfin, d'autres documents essaient de donner une idée de la valeur de l'écoulement sur l'ensemble du territoire ou du bassin. C'est un mode de représentation que nous qualifions de spatiale. Il a été utilisé dans l'étude statistique des débits des cours d'eau de la Bretagne, dans l'étude des étiages sur le Bassin de la Meuse et de la Moselle et dans le document traitant de l'inventaire et de la détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau en Equateur. Pour les deux premiers exemples on pourra faire une consultation des planches V et VI.

Le choix des couleurs retenues par les auteurs des documents analysés correspondent à mon avis aux principes proposés par Gaussen pour les cartes de végétation (in Etude et cartographie intégrées du milieu naturel pour la planification et l'aménagement du territoire, 1975).

Les couleurs chaudes; le jaune, l'orangé et le rouge indiquent les milieux de plus en plus sec;

Les couleurs froides; le bleu et l'indigo indiquent les milieux de plus en plus humides. Dans certains documents spécifiques, les bleus et verts sont affectés aux eaux permanentes à renouvellement beaucoup plus lent, voire aux eaux stagnantes. Tandis que le noir, la couleur lie-de-vin et le violet sont réservés aux milieux fluviaux proprement dits, qui se caractérisent par le renouvellement rapide d'une grande quantité d'eau. Dans l'ensemble, tous les documents dépouillés ont plus ou moins utilisé les principes de Gaussen avec quelques petits changements pour des questions de finitions.

R e m a r q u e s

- "Une conséquence favorable de la propriété de zonalité, c'est-à-dire de la représentation spatiale, est de permettre de détecter les anomalies d'observations. Il en résulte que ces cartes pourraient servir de base à une critique des données d'observations des réseaux hydrométriques. En pratique, les classes devront permettre une estimation correcte des débits des zones considérées et être définies à partir d'une valeur moyenne fixée." (Zumstein J.F., 1976).
- La représentation linéaire comme définie plus haut, bien que ne rendant pas compte souvent des écoulements transités par les cours d'eau qui traversent plusieurs zones hydrologiques, tient compte par contre des pertes totales affectant certains cours d'eau et des écoulements influencés par les prises ou les rejets. Donc, les cartes de paramètres suivant ce mode de représentation exigent, pour être utilisables en pratique, la connaissance en tout point du bassin, des surfaces drainées.

CINQUIEME PARTIE

EVALUATION DE LA CARTOGRAPHIE HYDROLOGIQUE ACTUELLE

Nous ferons simplement remarquer ici la difficulté de comparer ces divers documents entre eux étant donné la grande hétérogénéité des normes utilisées pour définir les paramètres cartographiés.

De toutes les manières, on remarque qu'aujourd'hui ce type de recherche sur la cartographie hydrologique ne semble pas être une priorité en France tout au moins. Ce qui explique le peu de documents sur ce sujet émanant des géographes.

V - 1. CRITIQUES DE LA CARTOGRAPHIE ET AMELIORATIONS A APPORTER

Dans le cadre du dépouillement des documents, nous avons vu aussi bien à l'échelle régionale que locale, que les essais de représentation spatiale permettaient d'estimer des débits des bassins versants non contrôlés à partir du réseau d'observations. Cela suggère des réflexions :

- d'une part, les débits spécifiques affectés à un bassin donné sont d'autant plus synthétiques que le point de mesure est situé plus en aval, ce qui entraîne un risque de recouvrement de plusieurs zones hydrologiques homogènes.
- D'autre part, à l'échelle d'un bassin, les débits sont d'autant moins représentatifs que leur variabilité est plus grande. C'est le cas des bassins des régions montagneuses où les débits sont très liés à la pluviométrie.

Au terme de ces deux premières critiques, nous disons

que les cartes de régionalisation ne donnent qu'une image approximative de la variation des écoulements. Elles doivent donc être utilisées avec beaucoup de discernement. Toutefois, dans le cadre de leur établissement et pour plus de précision, il faut la présence d'un réseau hydrométrique qui couvre un large éventail des surfaces contrôlées. Ce qui n'est pas forcément le cas, à mon avis, de tous les documents dépouillés.

Nous voulons aussi faire remarquer que, si dans la représentation le relief est fort ou au contraire inexistant ou encore si la perméabilité est peu différenciée, les limites affectées à deux zones hydrologiques sont tracées avec beaucoup d'imprécisions. D'autre part les zones influencées artificiellement par les prises ou les rejets devraient clairement être figurées sur les cartes.

On a souvent reproché, dans le cadre d'études et de cartographie intégrées du milieu naturel, avec raison, aux écologistes et aux pédologues de produire des documents qu'ils appellent pompeusement "document biophysique de base de l'aménagement". Sans mettre en doute la valeur intrinsèque de ces documents, il faut reconnaître qu'ils ont souvent le défaut commun à bien des études scientifiques, d'être conçus pour d'autres scientifiques; avec, pour résultat qu'ils ne sont pas réellement utilisés par les planificateurs et les aménagistes.

Cette même remarque peut être réitérée pour les hydrologues, du moins les auteurs de la plupart des documents dépouillés. En effet, il apparaît dans le cadre de notre travail, que les documents consultés sont assez difficiles à comprendre pour un aménagiste, quand il s'agit

de les interpréter, de les analyser afin d'en retirer les informations nécessaires pour la construction de son mode de travail. Pourtant, les résultats des études sur la cartographie hydrologique lui sont destinés en partie.

De plus, les paramètres cartographiés n'ont pas tellement de significations physiques, même quand c'est le cas; cette signification n'apparaît pas clairement. Nous citons en exemple les planches n° VII sur le bassin de l'Allier traitant des méthodes d'étude régionale des ressources en eaux.

Au niveau de la symbolisation et de l'utilisation de la couleur, nous constatons que les auteurs font un peu ce qu'il veulent, du moins ce qu'ils croient être le mieux adapté à leurs études. Cette attitude, à mon avis, contribue à rendre encore plus complexe l'interprétation et l'analyse des documents aussi bien par le scientifique que l'aménagiste ou le planificateur (plusieurs codes à déchiffrer par carte, un même symbole représente plusieurs types de paramètres en fonction des cartes et des auteurs).

C'est pourquoi je penche pour la thèse qui propose une normalisation dans la symbolisation des paramètres et l'utilisation des couleurs; bien que nombre de géographes dénoncent cette idée.

Si un effort pouvait être fait pour aider la publication de la maquette de Huguette Vivian (Planche n°VIII) nous apporterons certainement une amélioration on ne peut plus estimable à la cartographie hydrologique. En effet dans le cadre des travaux de l'E.R.. 30, Huguette Vivian qui a, par ailleurs, déjà présenté une maquette d'essai d'une

carte des écoulements moyens en France (1/500.000), suite à des travaux en collaboration avec l'équipe de cartographie strasbourgeoise a réalisé une nouvelle maquette (planche n°VIII).

Cette dernière est différente de la première non pas dans le choix des phénomènes représentés mais dans les couleurs et les signes :

- les lames d'eau bénéficient d'une gamme de couleurs nouvelles du brun au jaune très pâle, ce choix ne prêtant plus à aucune confusion avec la cartographie traditionnelle, en bleu, des précipitations tombées. Ces tons ont l'avantage de pouvoir se dégrader de façon sensible à l'oeil en huit nuances, à partir seulement de trois couleurs de base.
- Les schémas stationnels sont plus détaillés que les précédents puisqu'on peut y lire :
 - . le module annuel,
 - . la répartition dans l'année des mois de débit supérieur au module et des mois de débit inférieur au module,
 - . la place exacte et le débit des mois des maximums et des minimums.

Pour régler le problème de couverture des schémas lorsqu'ils atteignent une certaine taille sur la maquette, Huguette Vivian propose un essai où on leur donnera une certaine transparence, c'est-à-dire qu'on utiliserait des couronnes au lieu de cercles pleins pour des valeurs de débits supérieures à un certain seuil.

Toujours dans le cadre de l'amélioration, on pourra dorénavant, veiller à ce que tous les documents finaux établis par les hydrologues soient simples, compréhensibles des planificateurs, des aménagistes, mais aussi des hommes politiques.

Enfin, la cartographie hydrologique est jusqu'alors réalisée par la méthode de "superposition manuelle" des cartes. Celle-ci connaît un certain nombre de limites techniques dans la mesure où le nombre de critères pris en compte devient important.

En effet, ce procédé de superposition implique que l'on s'en tienne aux paramètres principaux, car la multiplication des cartes d'inventaires multiplie les difficultés, risque de supprimer l'étroite imbrication des variables possédant entre elles des liens physiques et bien entendu une dynamique intrinsèque. Une telle méthodologie ne peut être qu'une approche grossière puisqu'elle élimine d'emblée la compréhension de ces interactions.

Aussi, avons-nous pensé, dans le cadre de l'amélioration des cartes hydrologiques, faire appel aux outils informatiques de calcul et de cartographie comme cela se fait déjà dans nombre de disciplines.

V - 2. EXTENSIONS POSSIBLES DES CARTES HYDROLOGIQUES

"Les débits moyens mensuels et annuels sont représentés par des variables dont l'examen statistique suffit à en analyser complètement les caractères.

Au contraire, les débits extrêmes que sont les phénomènes de crue et d'étiage ne peuvent être complètement analysés et caractérisés que s'ils sont examinés dans leur ensemble et dans leur succession chronologique. Une crue ou un étiage c'est en effet une chronique de débits instantanés ou journaliers d'une durée de plusieurs heures à plusieurs jours mais qui atteint rarement le mois. Enfin, les débits constituant cette chronique sont étroitement dépendants de ceux qui les précèdent". (Dubreuil P., 1974).

Les phénomènes de crue et d'étiage sont donc bien différents des débits mensuels et annuels. Leur étude complète requiert des méthodes d'analyses diverses et complexes. Toutefois, l'expérience nous a montré que des efforts considérables ont été faits dans le cadre de la maîtrise et de la publication des résultats du phénomène de crue au moyen de la cartographie. Nous citons en exemple : la carte des données de base pour l'étude d'une crue (planche n°VII.5), la carte de répartition géographique et statistique des débits de crue (planche n°I.3). C'est pourquoi nous pensons que, si d'aventure des moyens nous permettaient d'étendre les limites de la cartographie hydrologique, il serait souhaitable qu'elles touchent des domaines jusqu'alors très peu fouillés. On pourrait prévoir, en ce qui concerne cette éventuelle extension :

- d'une part, l'établissement annuel de cartes des étiages mensuels pour obtenir une chronique des étiages, c'est-à-dire qu'en supposant le débit d'étiage mensuel égal au débit minimum observé pendant un mois au cours d'une année calendaire, année par année, avec une symbolisation appropriée, on représenterait le paramètre. Ainsi, sur une période de N années d'observations on pourrait obtenir une chronique d'étiages;

- l'établissement de cartes d'étiages mensuels aux fréquences couramment utilisées en matière de ressource en eau et de lutte contre leur pollution. Zumstein propose à cet effet les fréquences de 1/5 et de 1/10;
- "si l'on dispose d'un réseau de durée suffisante ou permettant sans trop de risque d'erreur grossière des allongements de séries, il est possible d'établir des cartes donnant la répartition fréquentielle des étiages. Ceci dans le but de démontrer qu'un étiage n'a pas la même fréquence en tout point d'un bassin même d'étendue relativement faible". (Zumstein J.F., 1976).
- D'autre part, la mise au point d'une carte qui pourrait nous indiquer une méthodologie de critique systématique des données d'observations des réseaux hydrométriques;
- enfin, une représentation des différentes corrélations entre débits de ruissellement et débits de base.

C O N C L U S I O N

Ces quelques pages ont présenté, après avoir fait de brefs rappels sur des notions vraiment générales tels que la cartographie et les régimes hydrologiques, divers documents reproduits ou adaptés en annexe, consacrés à la cartographie des paramètres caractéristiques d'un régime hydrologique aussi bien à l'échelle d'un territoire que d'une région ou d'un bassin versant.

Cet inventaire ne prétend cependant pas être exhaustif et il n'est pas exclu que des recherches ultérieures permettent de compléter ce dernier par d'autres documents.

Toutefois, à l'issue de cet inventaire, il nous est apparu que l'élaboration de cartes des paramètres hydrologiques (débits spécifiques, modules moyens annuels, débits d'étiages, de crues et variations saisonnières) présentait un intérêt indéniable dans la mesure où elle éclairait certains aspects de l'extension dans l'espace des écoulements superficiels. Cependant, cette cartographie n'est admissible que si un réseau hydrométrique fonctionnel est en place et d'une ancienneté suffisante.

Par ailleurs, permettant d'estimer en tout point d'un bassin versant les paramètres hydrologiques (débits de crues) des cours d'eau du réseau hydrographique, elles peuvent être un outil efficace pour les prestataires de service en hydrologie. C'est une raison pour que les documents finaux établis par ces services soient compréhensibles de tous.

Ce type de cartographie hydrologique peut, en fait, être étendu à d'autres écoulements que les modules moyens annuels et les débits d'étiages et constituer un élément de la connaissance des ressources en eau au même titre que les cartes pluviométriques ou hydrogéologiques dont elles pourraient être un complément indispensable.

"Ces cartes peuvent aussi présenter un grand intérêt pour la critique des données hydrologiques, dont la méthodologie reste par ailleurs à développer". (Zumstein J.F., 1976).

Enfin, avec les bienfaits de l'informatique, nous pensons que dans un proche avenir, elle pourra être étudiée et adaptée à la cartographie hydrologique, une méthodologie simple de calcul et de représentation paramétrique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - BERTIN J. (1967) - Sémiologie graphique. Gauthier-Villiers, Paris, 42-164, 285-408.
- 2 - CADIER E., POURRUT P. (1979) - Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources, l'expérience de l'Equateur. Cahier ORSTOM, série hydrologie, Vol. XVI N° 3 et 4, 171-206.
- 3 - CUENIN R. (1972) - Cartographie générale. Notions générales et principes d'élaborations. Collection scientifique de l'Institut Géographique National. Eyrolles Paris, Tome I, 317p.
- 4 - DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique. Masson et Cie, ORSTOM Paris, 216p.
- 5 - ELDIN M., DAUDET A. (1971) - Cartes des déficits hydriques. In Atlas de la Côte d'Ivoire. Ministère du Plan, ORSTOM, Université d'Abidjan, Planche A₃
- 6 - GUILCHER A. (1965) - Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson et Cie Paris, 267-377.
- 7 - GIRARD G., SIRCOULON J., TOUCHEBOEUF P. (1971) Aperçu sur les régimes hydrologiques de la Côte d'Ivoire. In mémoire de l'ORSTOM sur le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. ORSTOM-PARIS, 113-152.

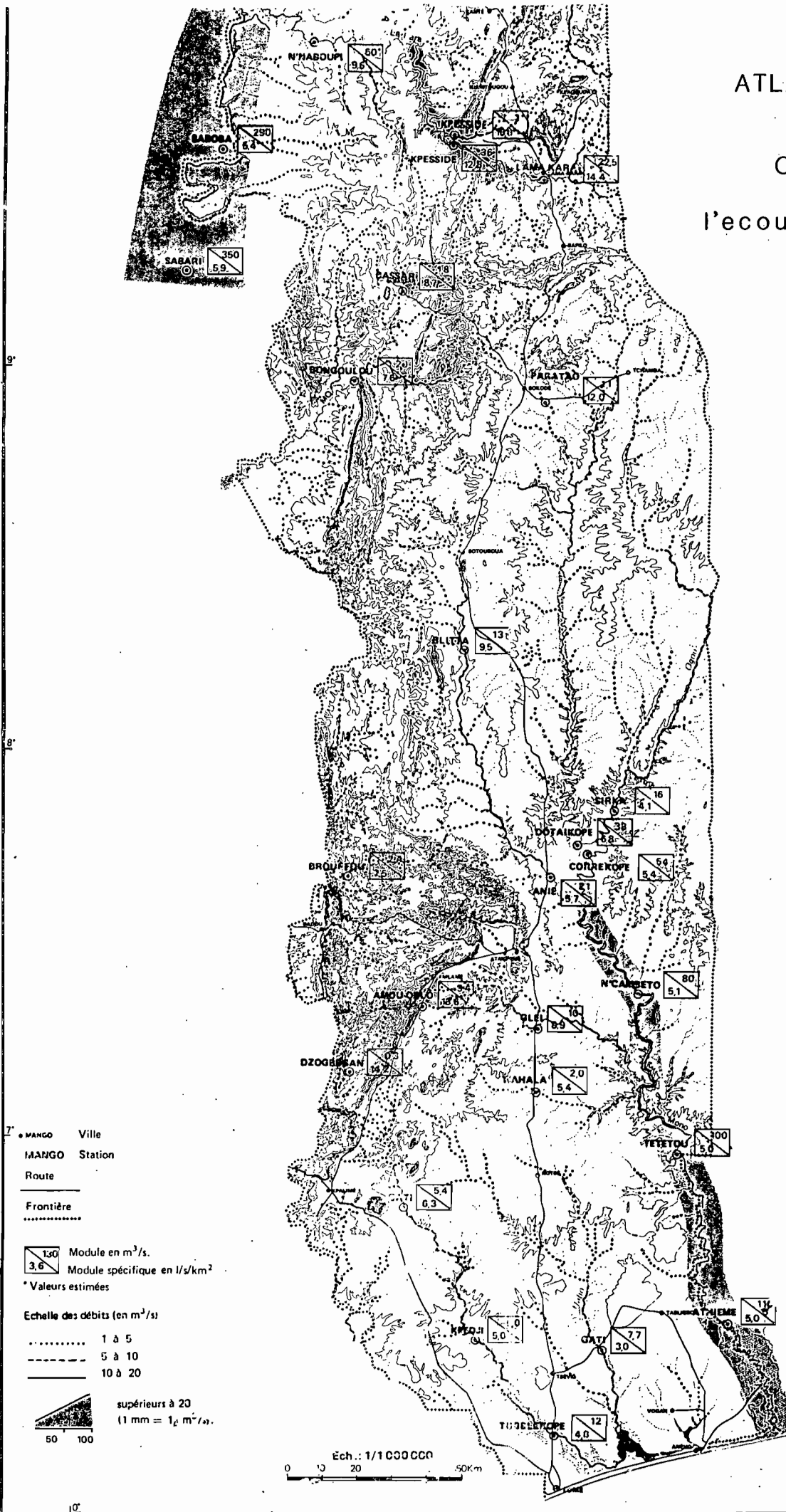
- 8 - JATON J.F. (1979) - Hydrologie de surface - Etiages et débits de basses eaux. Institut de Génie Rural, Lausanne, deuxième partie.
- 9 - NEMEC J. (1974) - Hydrologie opérationnelle. Institut de Génie Rural, Lausanne.
- 10 - RODIER J. (1964) - Les régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo - ORSTOM-PARIS, 39-137.
- 11 - ROCHE M. (1963) - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars Paris, 245-252.
- 12 - RAMBERT B. (1971) - Evaluation des ressources hydrauliques. Cartographie du débit d'étiage des cours d'eau du territoire français. Rapport B.R.G.M., 71 SGN 193 HYD.
- 13 - VIVIAN H. (1981) - Carte des écoulements moyens en France (Hydrologie de surface). Essai de l'E.R 30, C.N.R.S.
- 14 - ZUMSTEIN J.F. (1976) - Contribution à l'élaboration des cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de Moselle de 1969-1973. Rapport de l'agence financière du Bassin Rhin-Meuse.
- 15 - Annuaire International de la Cartographie (1971), 222, 238, 243, 304, 308.
- 16 - Centres d'Etudes de Géographie Tropicale du C.N.R.S. Bordeaux-Talence (1978)-Atlas de la Guyane, planche d'hydrologie.

- 17 - Comité National Français de Géographie, Commission d'hydrologie continentale (1980). Compte-rendu des journées d'hydrologie de Strasbourg. Strasbourg, 4pp.
- 18 - Faculté des Sciences de Montpellier (1966-1970) - Méthodes d'études régionales des ressources en eaux, Application au bassin de l'Allier. Fac. sc. Montpellier, 133 pp.
- 19 - Institut Géographique de Côte d'Ivoire (1979) - Atlas de Côte d'Ivoire, planche d'hydrologie, ORSTOM, Paris.
- 20 - Institut National Agronomique Paris-Grignon, Informatique et Biosphère (1975) - Etude et cartographie intégrées du milieu naturel pour la planification et l'aménagement du territoire. Compte-rendu d'une série de conférences. PARIS, 140 pp.
- 21 - Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (1981) - Atlas de la Nouvelle-Calédonie et dépendance, planche d'hydrologie N°12, ORSTOM Paris.
- 22 - Programme des Nations-Unies pour le Développement (1982) - Atlas des ressources et besoins en eau du Togo. ORSTOM, Paris.
- 23 - Service Régional de l'Aménagement des Eaux de la Bretagne (1978). Etude statistique sur les débits des cours d'eau de la Bretagne. Rapport de la section Aménagement des Eaux et Informatique, 25pp.

A N N E X E

ATLAS DU TOGO

Carte de l'écoulement annuel



ATLAS DU TOGO

Carte des etiages

--- zones inondables

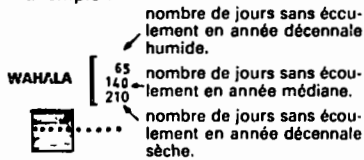
LAMA-KARA ● Station
LAMA-KARA ○ Ville
Route
Frontière

Rivière présentant un arrêt d'écoulement au moins une année sur deux.

Rivière ne présentant pas ce caractère (en général, rivière pérenne).

Les surfaces des carrés sont proportionnelles aux nombres de jours médians à débit nul.

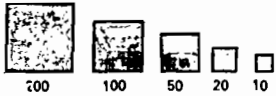
Exemple :



Du 20 Déc. au 10 Mai dates médianes d'arrêt et de reprise d'écoulement.

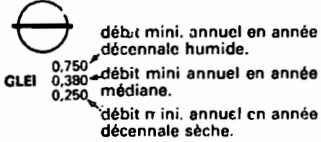
NANO 180° valeur médiane estimée.

Echelle (nombre de jours) :



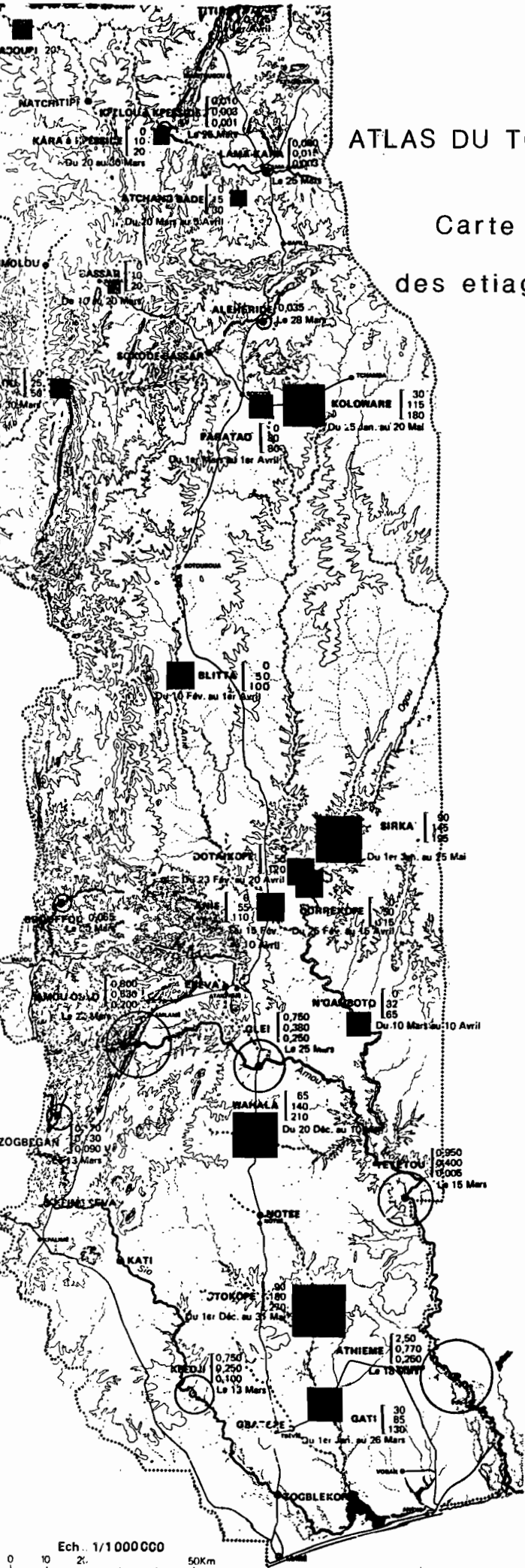
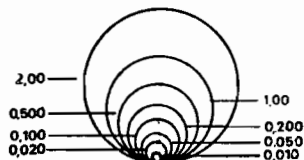
Les surfaces des cercles sont proportionnelles aux valeurs médianes des débits minimums annuels (en m³/s).

Exemple :



Le 25 Mars date médiane des plus basses eaux.

Echelle (m³/s) :



Ech. 1/1 000 000

0 10 20 50Km

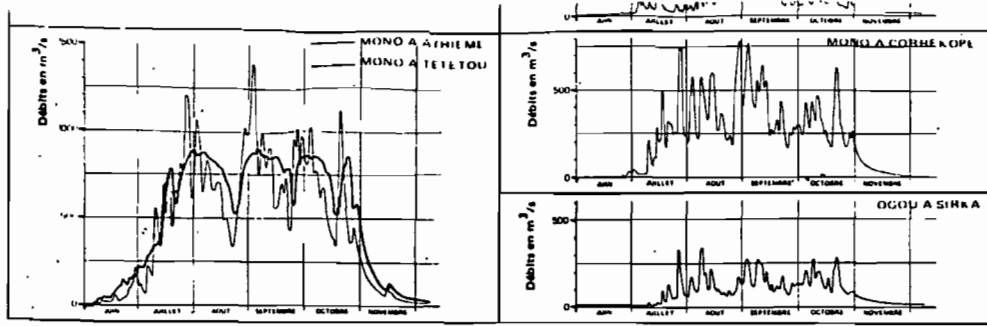
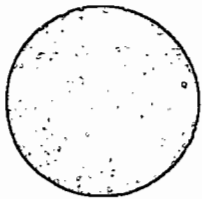


PLANCHE N°I-3

CARTE DE REPARTITION GEOGRAPHIQUE ET STATISTIQUE DES DEBITS DES CRUES

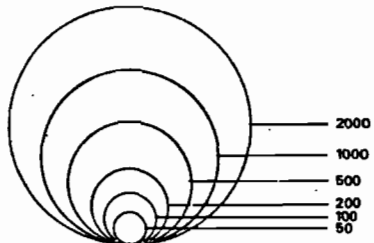
- KOUMANGOU station hydrologique
- Mango ville
- routes
- frontières

DEBITS JOURNALIERS MAXIMAUX



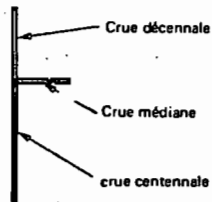
Q2 = 715 crue médiane en m³/s
 Q10 = 1000 crue décennale en m³/s
 Q100 = 1250 crue centennale en m³/s
 (3800) valeur estimée

ECHELLE DES DEBITS (m³/s)

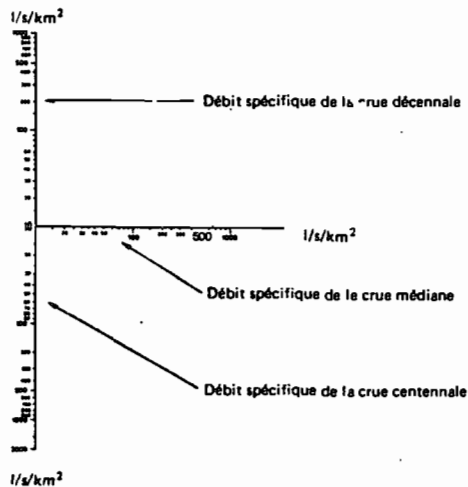


La surface du cercle est proportionnelle au débit en m³/s de fréquence 0,500 (temps de récurrence : 2 ans, c'est-à-dire apparition 1 année sur 2, en moyenne).

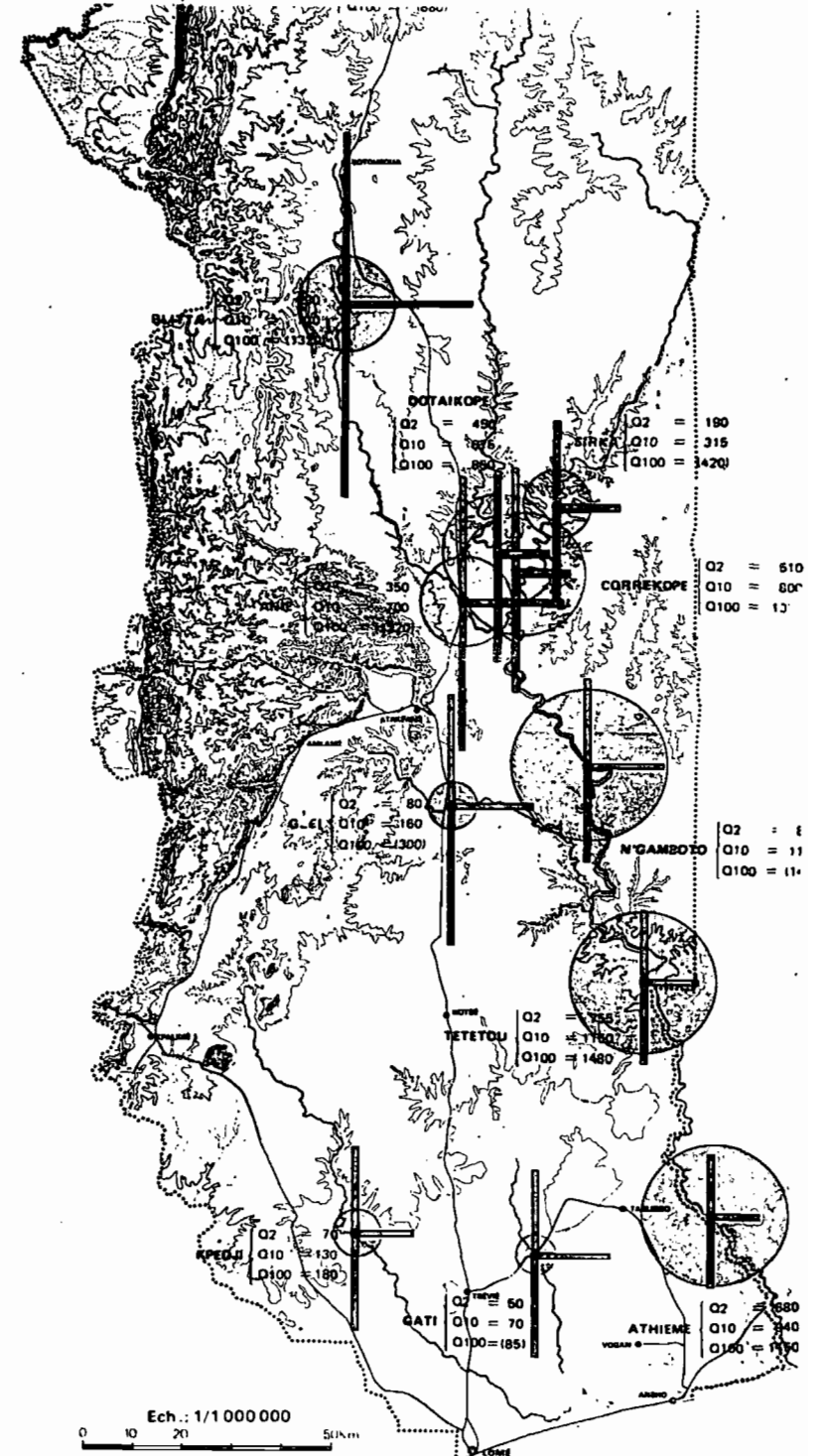
DEBITS SPECIFIQUES



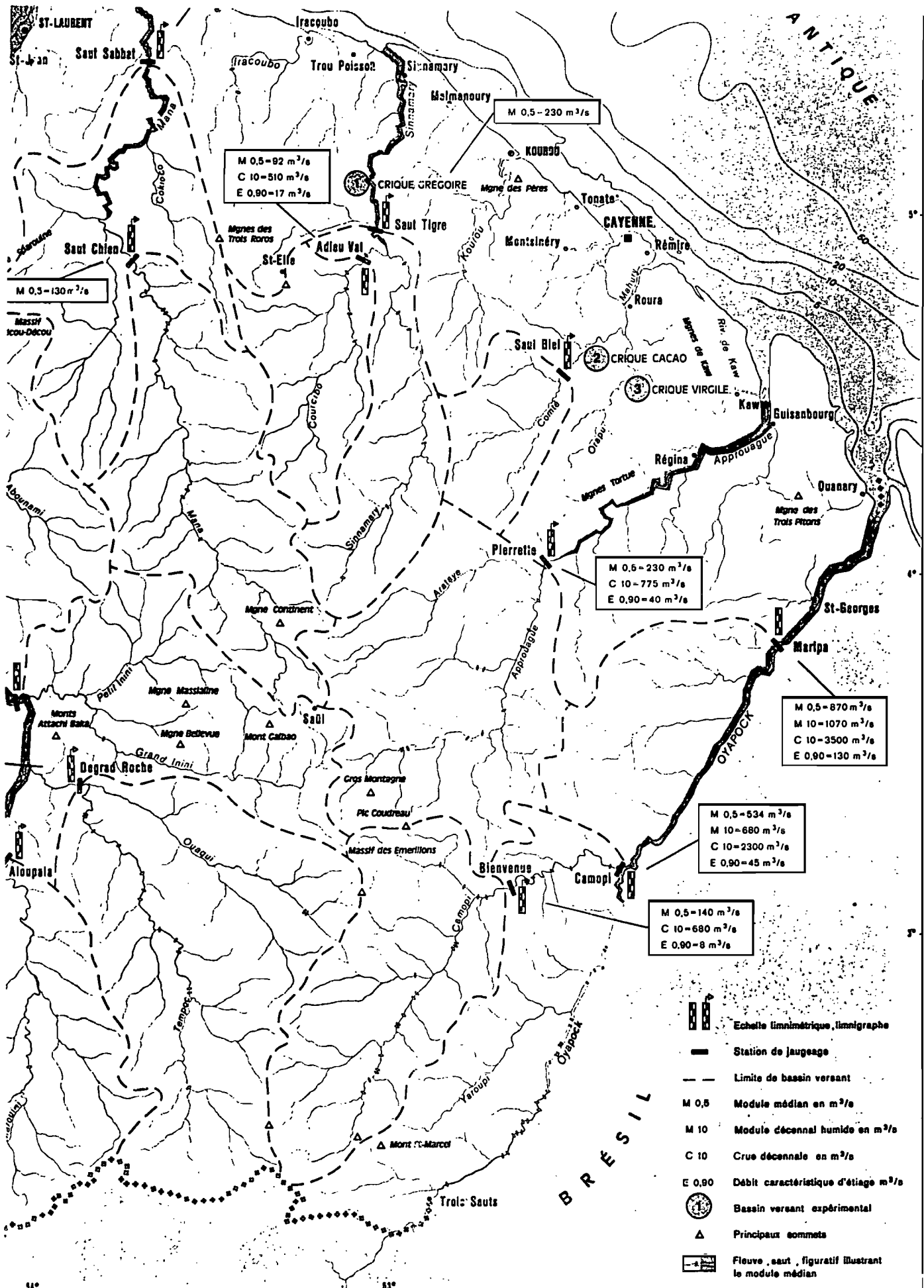
ECHELLE DES DEBITS



ATLAS DU TOGO



Ech.: 1/1 000 000

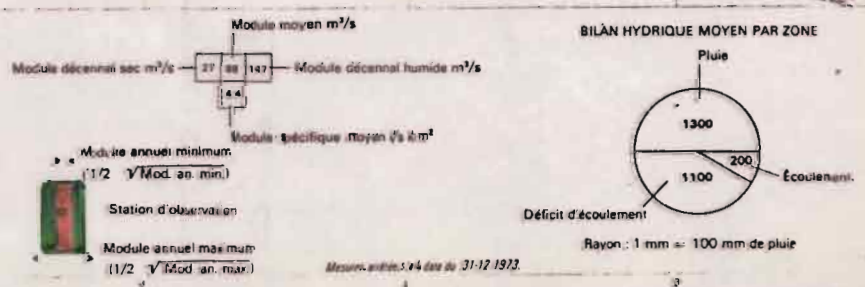
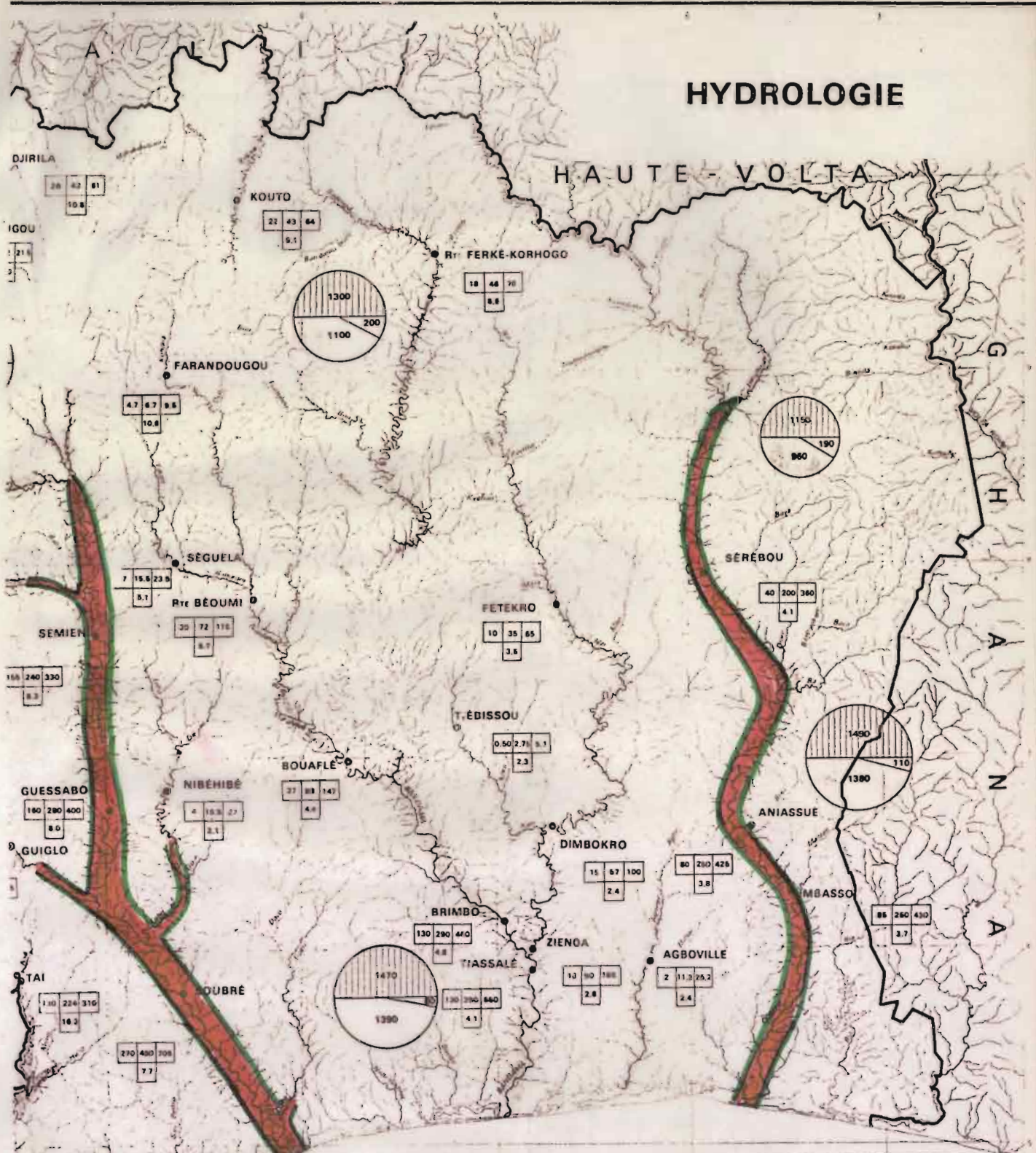


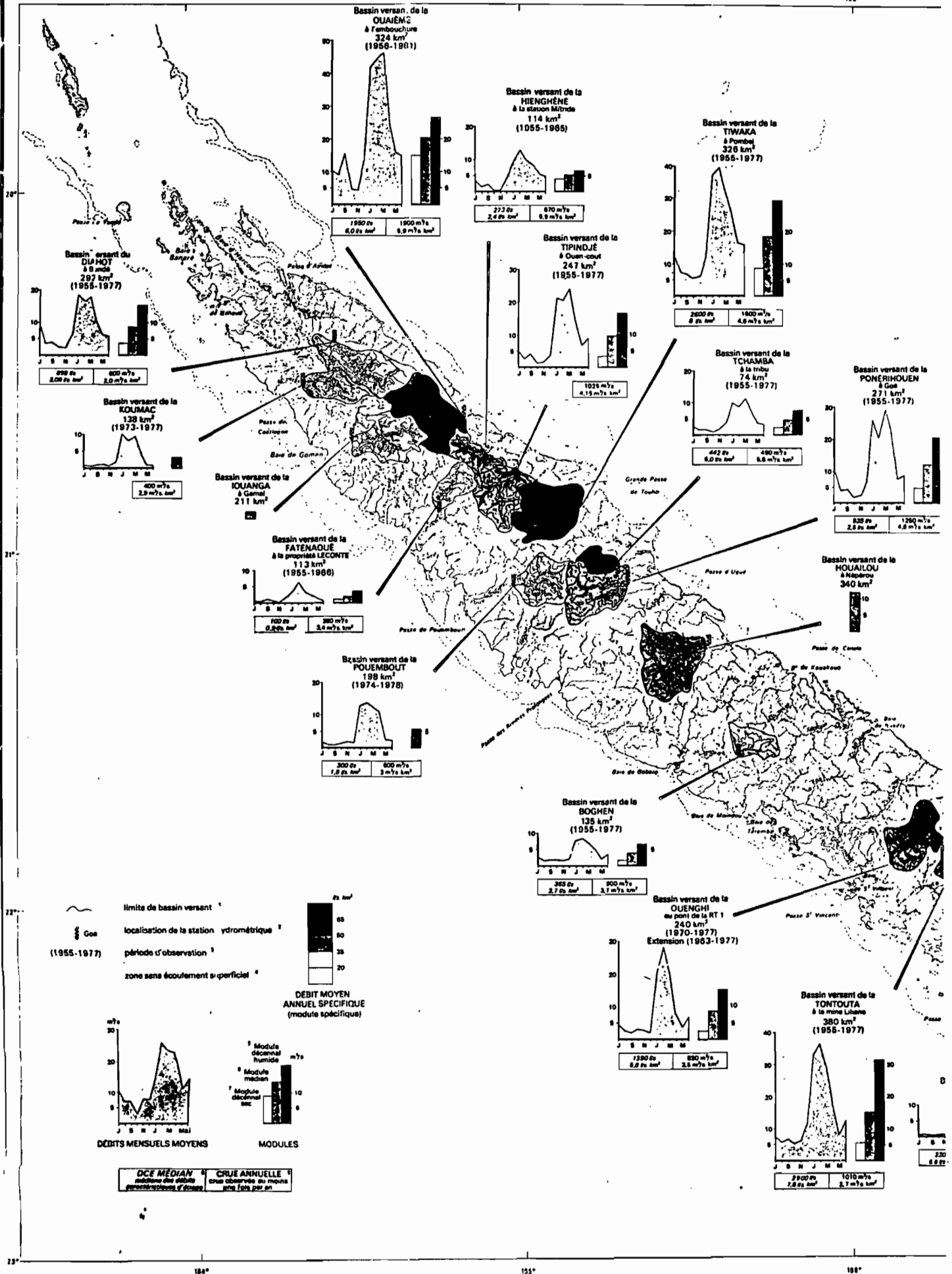
- Echelle limnimétrique, limnigraphe
- Station de jaugeage
- Limite de bassin versant
- M 0,5** Module médian en m³/s
- M 10** Module décennal humide en m³/s
- C 10** Crue décennale en m³/s
- E 0,90** Débit caractéristique d'étiage m³/s
- Bassin versant expérimental
- Principaux sommets
- Fleuve, saut, figuratif illustrant le module médian

HYDROLOGIE

HYDROLOGIE

HAUTE-VOLTA





Carte des etriages mensuels 1969-73

DEBIT SPECIFIQUE EN L/S/KM²

DES SURFACES DRAINEES

8-10 [stippled pattern]

6-8 [solid black]

5-6 [solid dark brown]

4 [stippled pattern]

3-4 [horizontal lines]

2-2,5 [vertical lines]

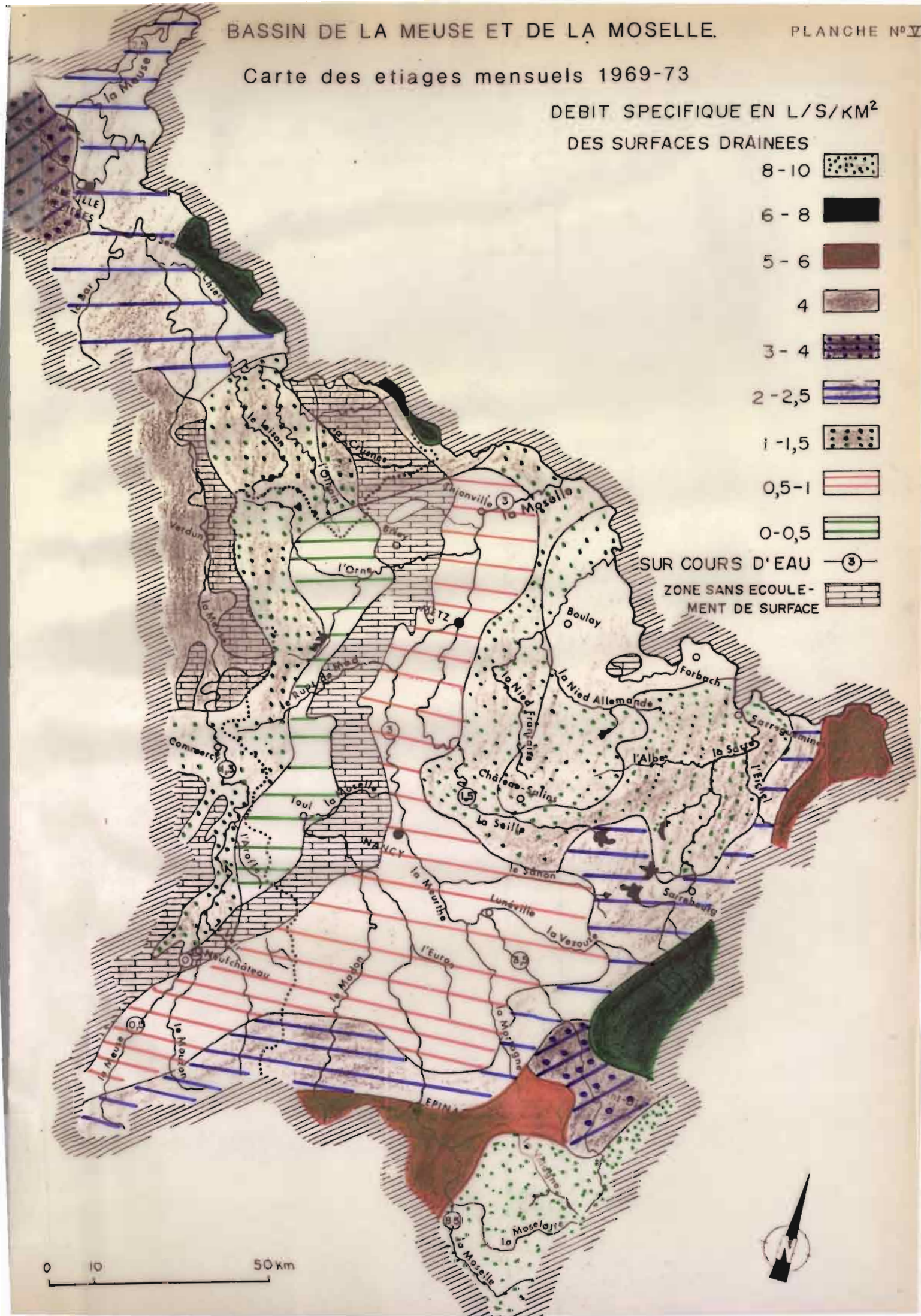
1-1,5 [dotted pattern]

0,5-1 [horizontal lines]

0-0,5 [vertical lines]

SUR COURS D'EAU [circle with 3]

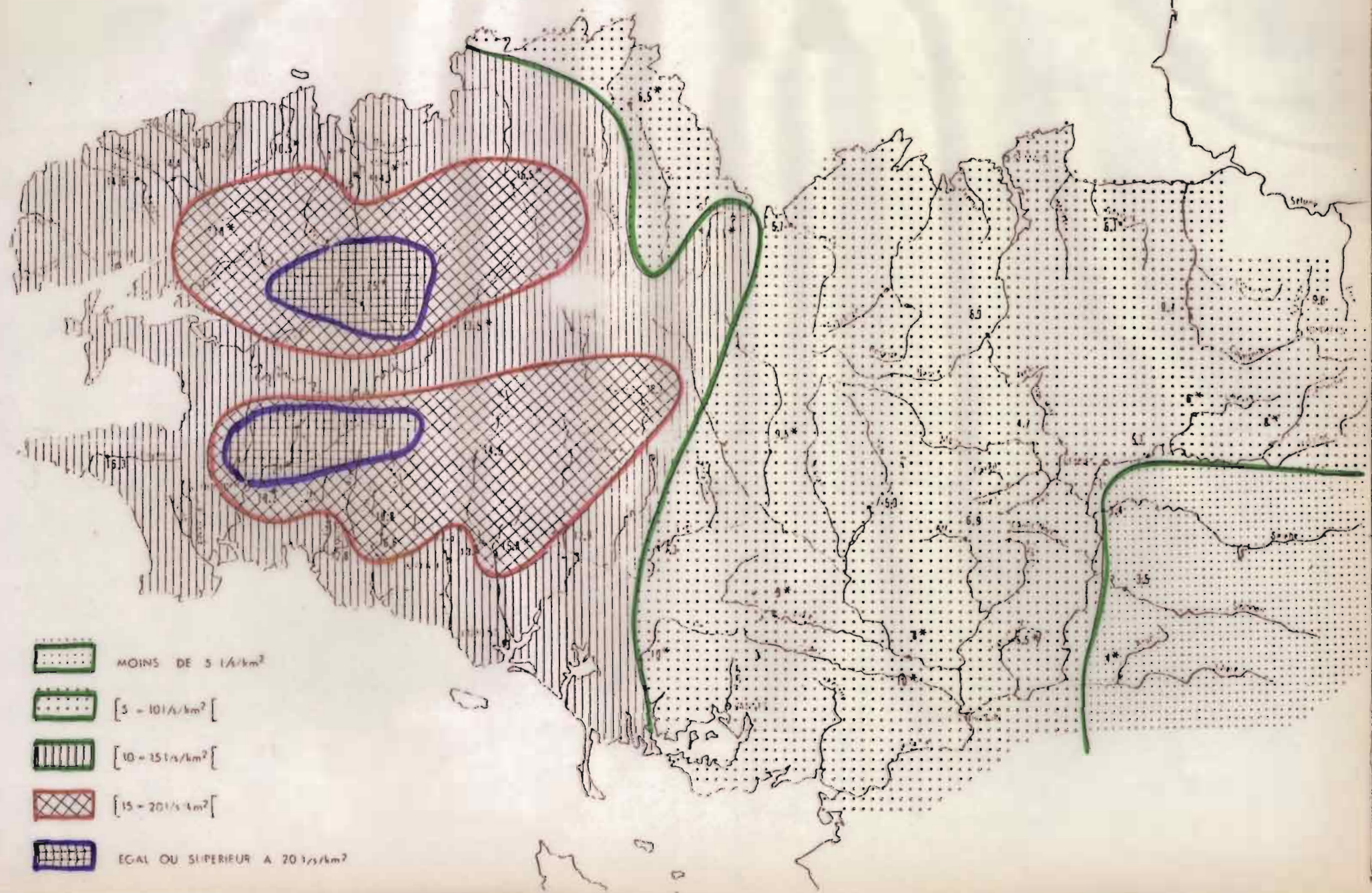
ZONE SANS ECOULEMENT DE SURFACE [cross-hatched pattern]



0 10 50km

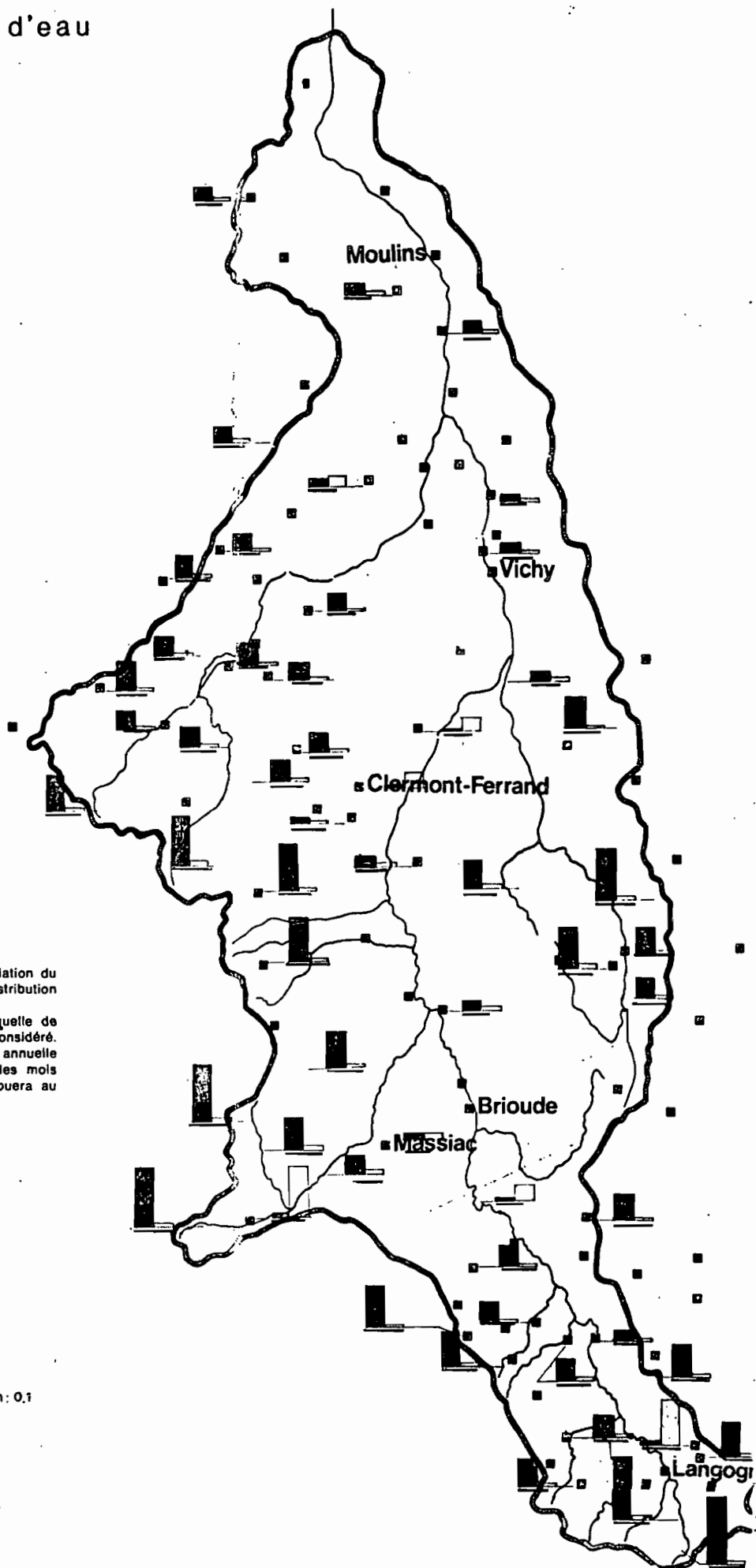


Carte regionale des debits moyens annuels de frequence biennale



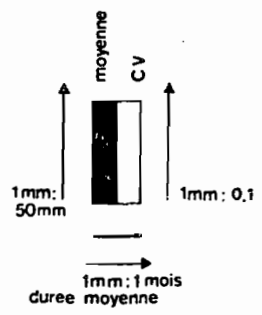
BASSIN DE L'ALLIER

Carte de surplus d'eau



Les paramètres cartographiés sont :

- la moyenne (en mm) et le coefficient de variation du surplus annuel (en gros d'octobre à mai), les lois de distribution étant approximativement normales.
- la durée moyenne T1 (en mois) pendant laquelle de l'eau a été disponible pour l'écoulement au point considéré. Le surplus représente en quelque sorte la production annuelle d'eau au point considéré qui, modulée au cours des mois suivants et propagée à l'exutoire du bassin, contribuera au débit effectivement mesuré.



BASSIN DE L'ALLIER

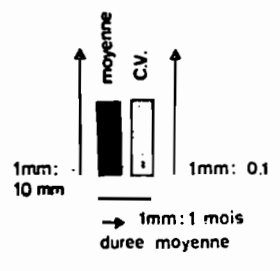
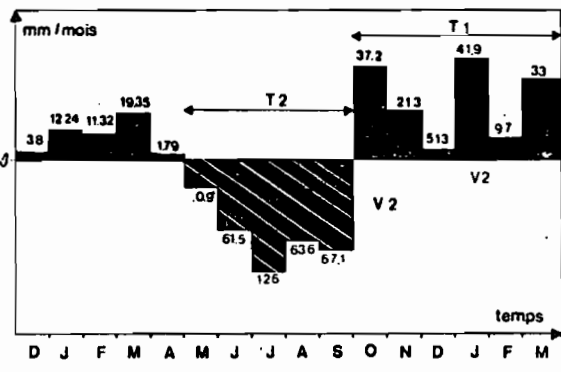
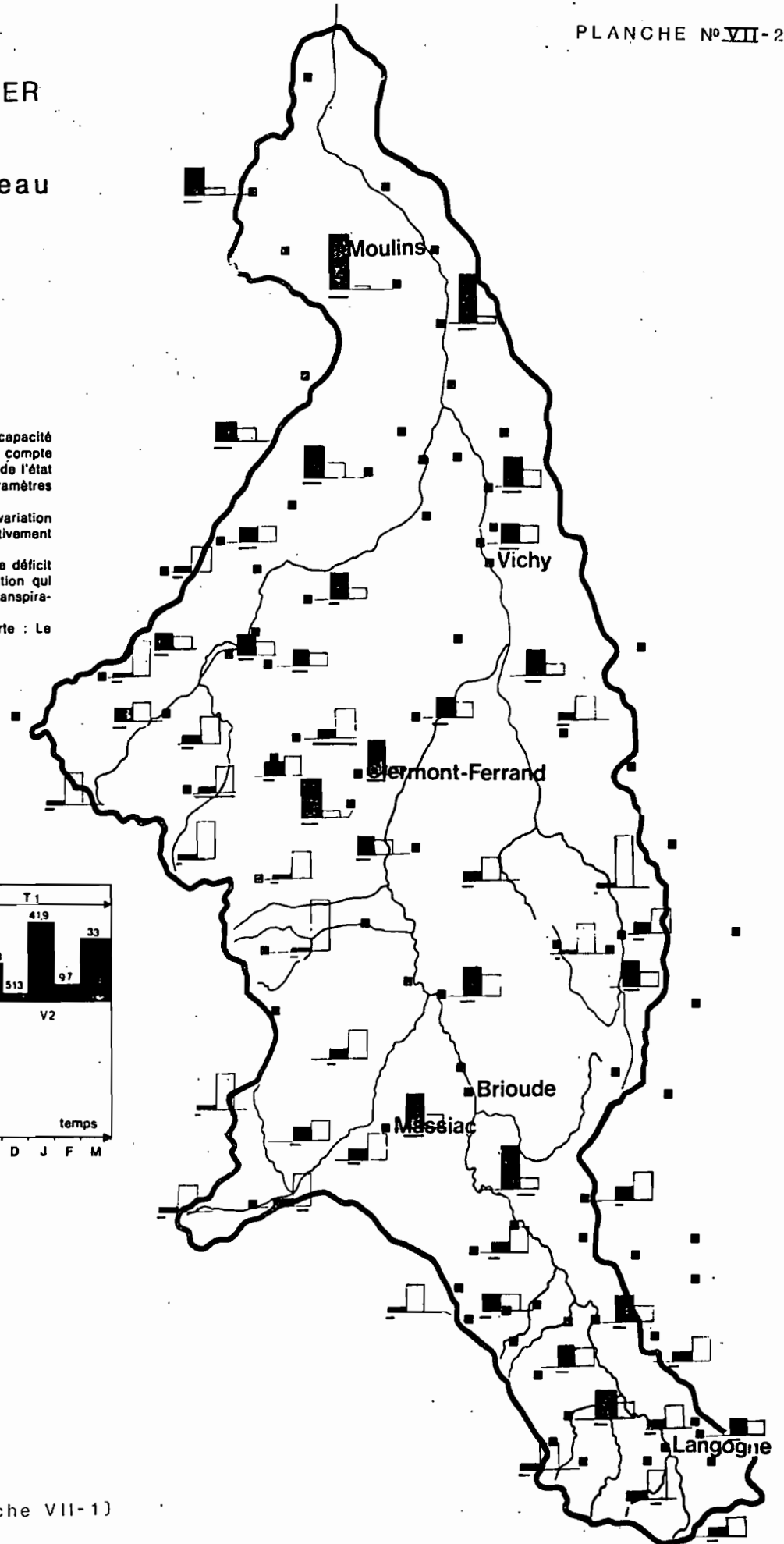
Carte de deficit d'eau

Chaque mois, un bilan du deficit du sol (dont la capacite de stockage est celle cartographiée page 76) est établi compte tenu de l'évapotranspiration potentielle Thornthwaite et de l'état du stock d'eau dans le sol au mois précédent. Les paramètres cartographiés sont :

— La moyenne en mm et le coefficient de variation du deficit (les lois de distribution sont approximativement normales).

— La durée moyenne de ce deficit (en mois). Le deficit représente la valeur en un point des besoins d'irrigation qui seraient nécessaires pour maintenir la plante à évapotranspiration potentielle.

Les valeurs de RFU pures sont celles de la carte : Le sol et l'eau.



(cf explication sur planche VII-1)

BASSIN DE L'ALLIER

Carte des débits médians mensuels

moyenne géométrique (m^3/s)
(m)

valeurs annuelles

Des trente-deux stations de jaugeage existantes sur l'Allier, on a été conduit à n'utiliser que les stations possédant plus de dix années de mesures, soient vingt-sept stations. Parmi celles-ci neuf d'entre elles ont pu être considérées comme stations longues (plus de trente années de mesures) et, enfin, les quatre stations de base (Vieille Brioude, Pont du Bouchet, Giroux, Pouzas) possédant quarante-sept années communes ont servi à l'amélioration des paramètres obtenus sur les séries courtes (moins de trente ans).

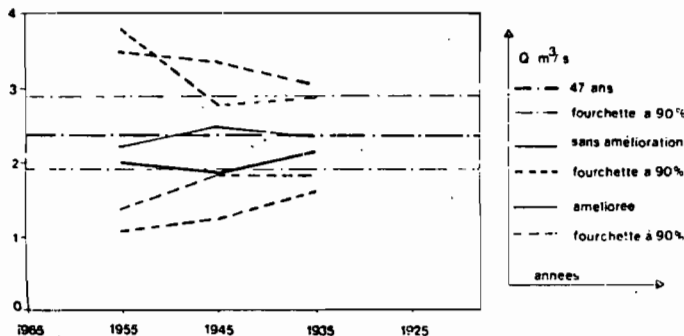
La méthode d'amélioration consiste à raccorder statistiquement les moyennes et écarts types calculés sur les logarithmes des débits des stations courtes à l'aide des stations de base :

— On estime la moyenne m de la série courte à partir de la régression des logarithmes des débits sur les années communes des stations

— Dans le cas de l'utilisation d'une seule station de base pour laquelle on observerait un rapport relatif de $k\%$ entre les variances empiriques calculées respectivement sur la période longue et courte, pour la station courte ce rapport est égal à $r^2 k\%$ (r , coefficient de corrélation).

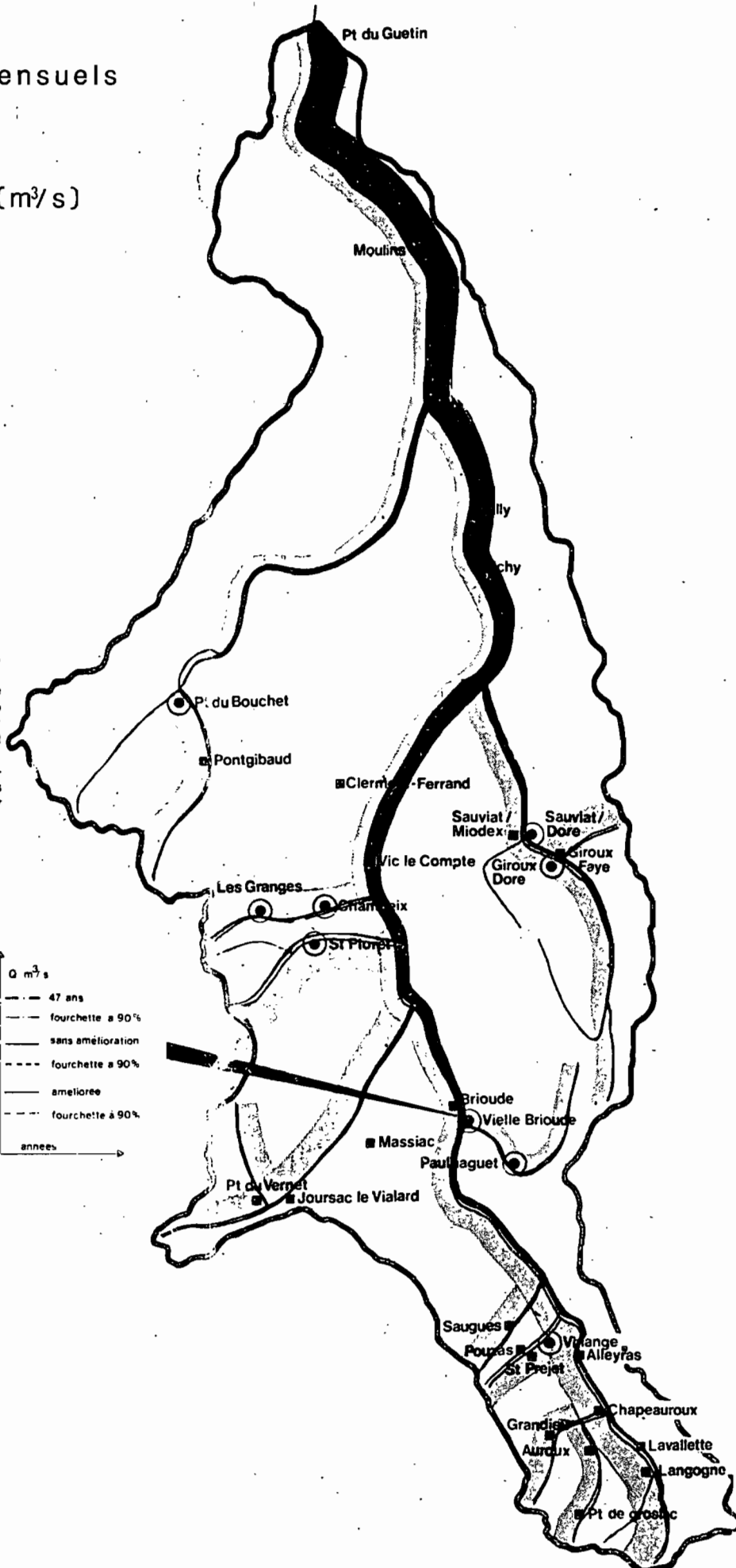
Nous avons pu ainsi obtenir un réseau homogène de stations courtes équivalent à celui d'un ensemble de stations à relevé long (plus de trente années fictives pour estimer les moyennes et variances

debit décennal du mois de Septembre
stabilité des résultats



Débits réels
1mm = $10 m^3/s$

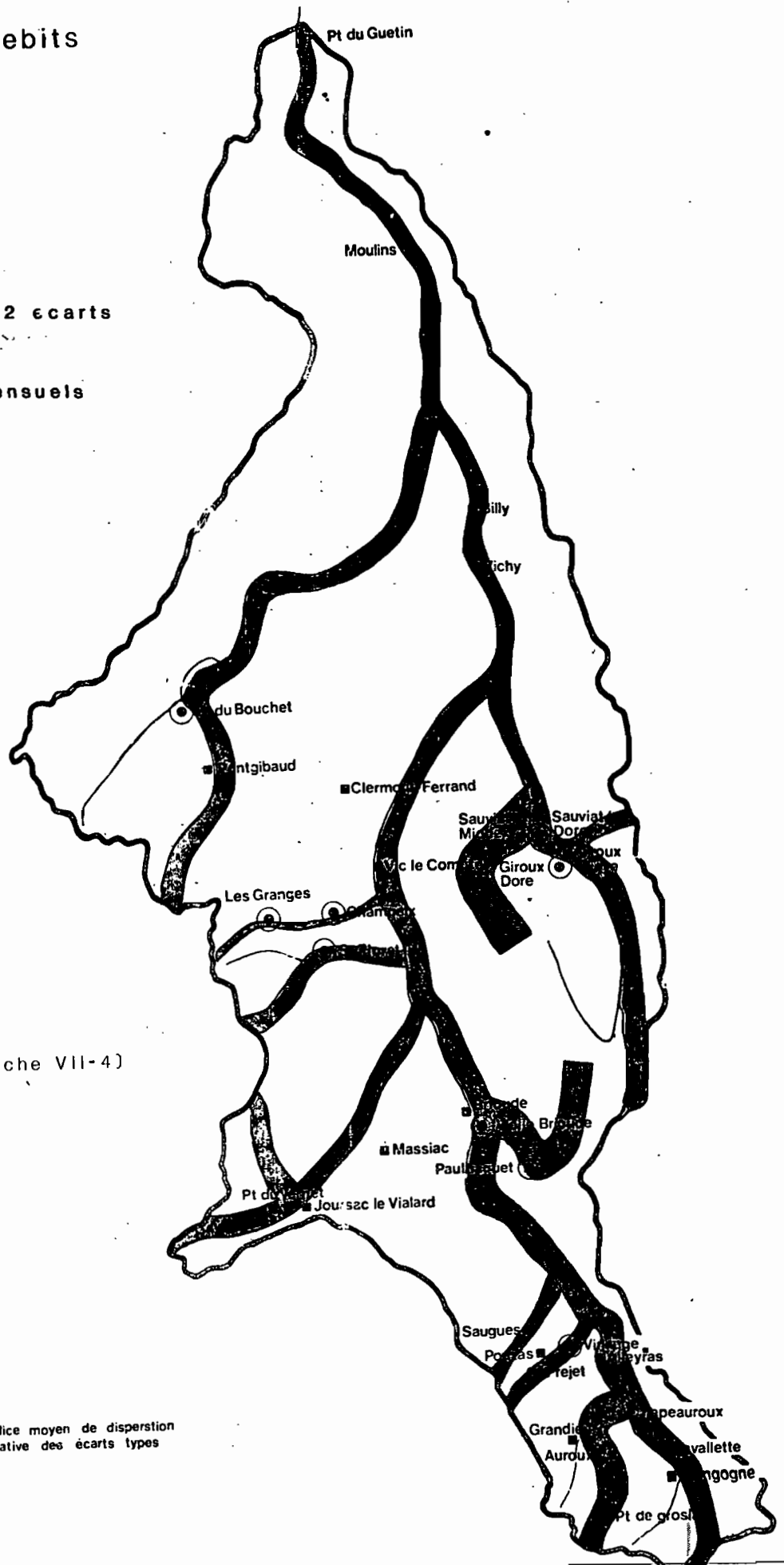
Débits spécifiques
1mm = $2 l/s/km^2$



BASSIN DE L'ALLIER

Carte des écarts type mensuels des débits

moyenne annuelle des 12 écarts types des débits mensuels



(cf explication sur planche VII-4)

largeur du trait



indice moyen de dispersion relative des écarts types

Grandjean
Auroux
Pt de Grosbois
Saugues
Ponsas
Verges
Veyras
Peauroux
Vallette
Angogne

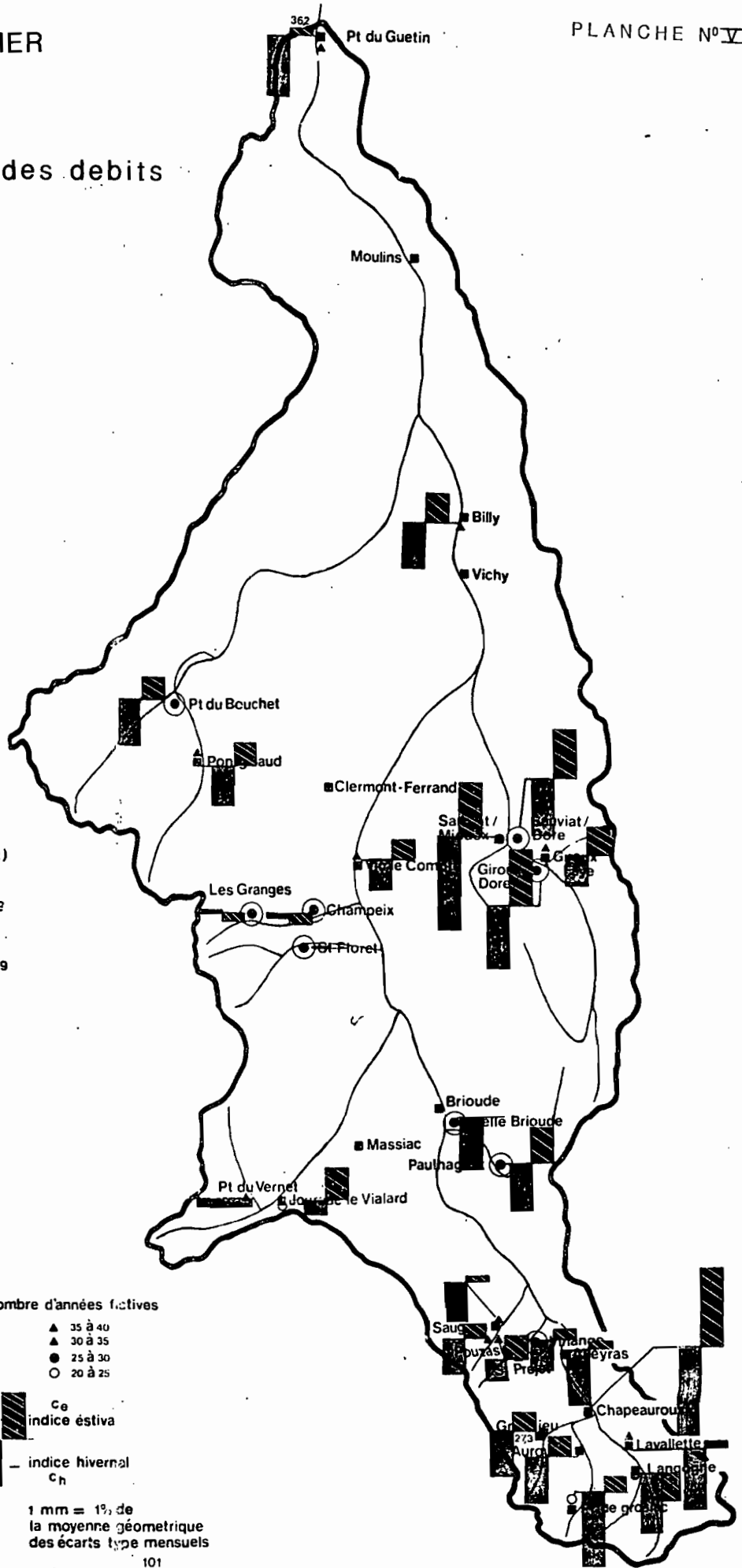
BASSIN DE L'ALLIER

PLANCHE N° VII-6

Carte des

écarts types mensuels des débits

variation saisonnière



exemple :
 - lit à la station de Vieille Brioude
 Moyenne $m = 2,05 \text{ m}^3/\text{s}$
 Indice estival $c_e = 1\%$
 Indice hivernal $c_h = 13\%$
 sur le mois t .

$$Q_t = \bar{X}_2 + \sum_{k=1}^4 A_k \cos \frac{2k\pi}{12} t + B_k \sin \frac{2k\pi}{12} t \quad (2)$$

$$= \frac{1}{1.73} [3 \log(1 - \frac{c_h}{100}) - 3 \log(1 - \frac{c_e}{100})] + 0.19$$

$$= \frac{1}{2} [3 \log(1 - \frac{c_h}{100}) \cdot (1 + \frac{c_e}{100}) - 6 \log m] + 1.69$$

$A_1 = -0.007$; $A_4 = -0.007$
 $B_1 = -0.042$; $B_2 = -0.052$
 $B_3 = -0.004$; $B_4 = -0.006$
 débit moyen $X_9 = 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$; ...

Nombre d'années fictives

- ▲ 35 à 40
- ▲ 30 à 35
- 25 à 30
- 20 à 25

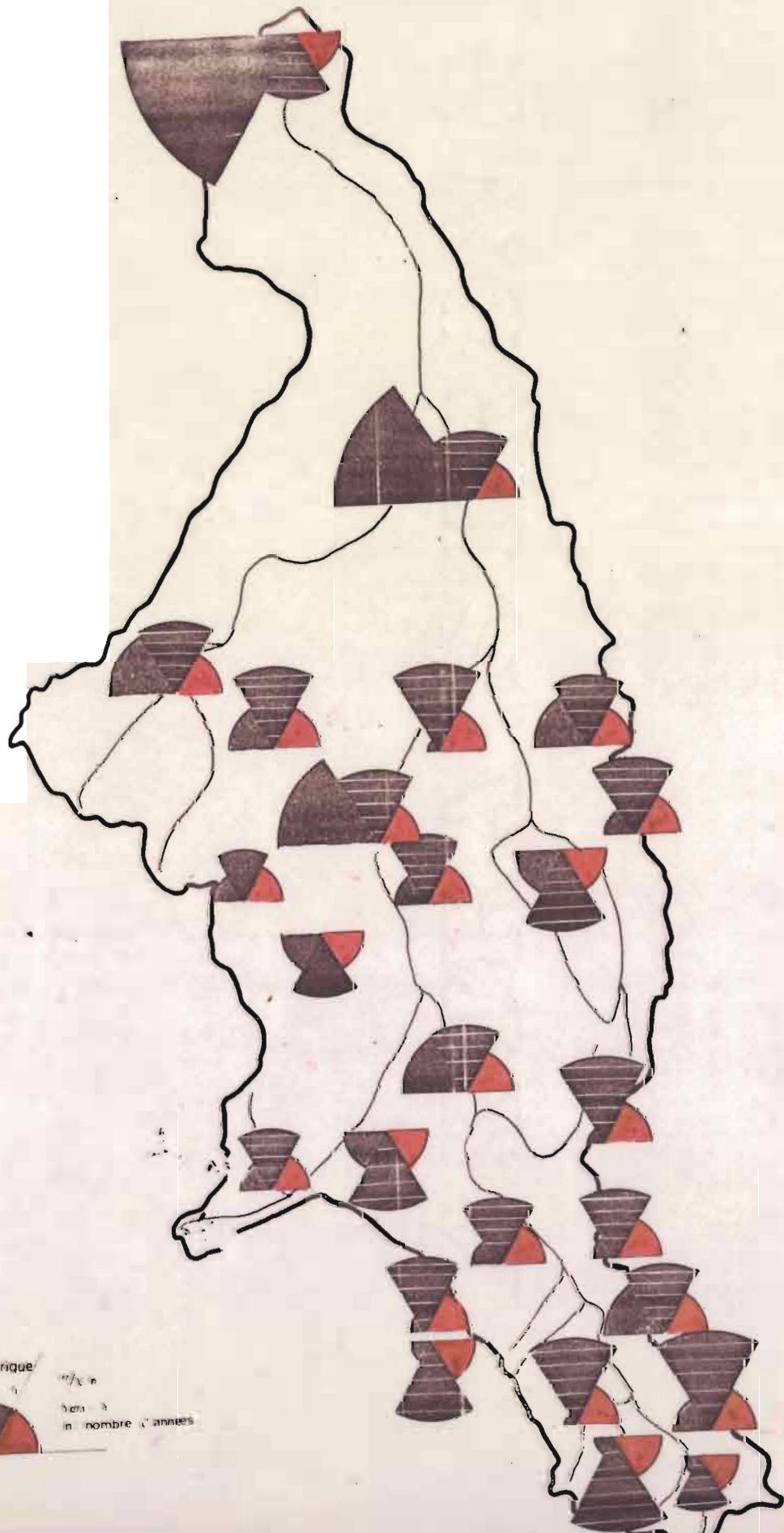
C_e indice estiva

C_h indice hivernal

1 mm = 1% de la moyenne géométrique des écarts type mensuels

BASSIN DE L'ALLIER

Carte de l'estimation d'un débit
d'étiage de probabilité donnée



E.G.
écart
géométrique

$\frac{1}{n}$

sur n

in nombre d'années

débit
médian.



BASSIN DE L'ALLIER

Donnees de base pour l'etude des crues

— Les dépassements au-dessus du seuil sont caractérisés par une base (en jours) et une hauteur maximum (en l/s/km²) ce qui permet une représentation triangulaire de leur valeur moyenne annuelle.

— Le nombre moyen annuel de dépassements est indiqué par le nombre dans le triangle.

— Le nombre de traits sous le triangle indique la valeur du seuil par rapport au module moyen annuel.

Le volume moyen des crues peut être obtenu par l'équation de régression : Volume : 0,616 (H × Durée) — 1,833

Volume en 10⁵m³

H en m³/s au-dessus du seuil

Durée en jour

Coefficient de corrélation = 0,99

Surface page 78 morphologie

q₀ = seuil : nombre de traits sous le triangle : n. de fois le module annuel

λ = nombre de crue par an : nombre sur le triangle

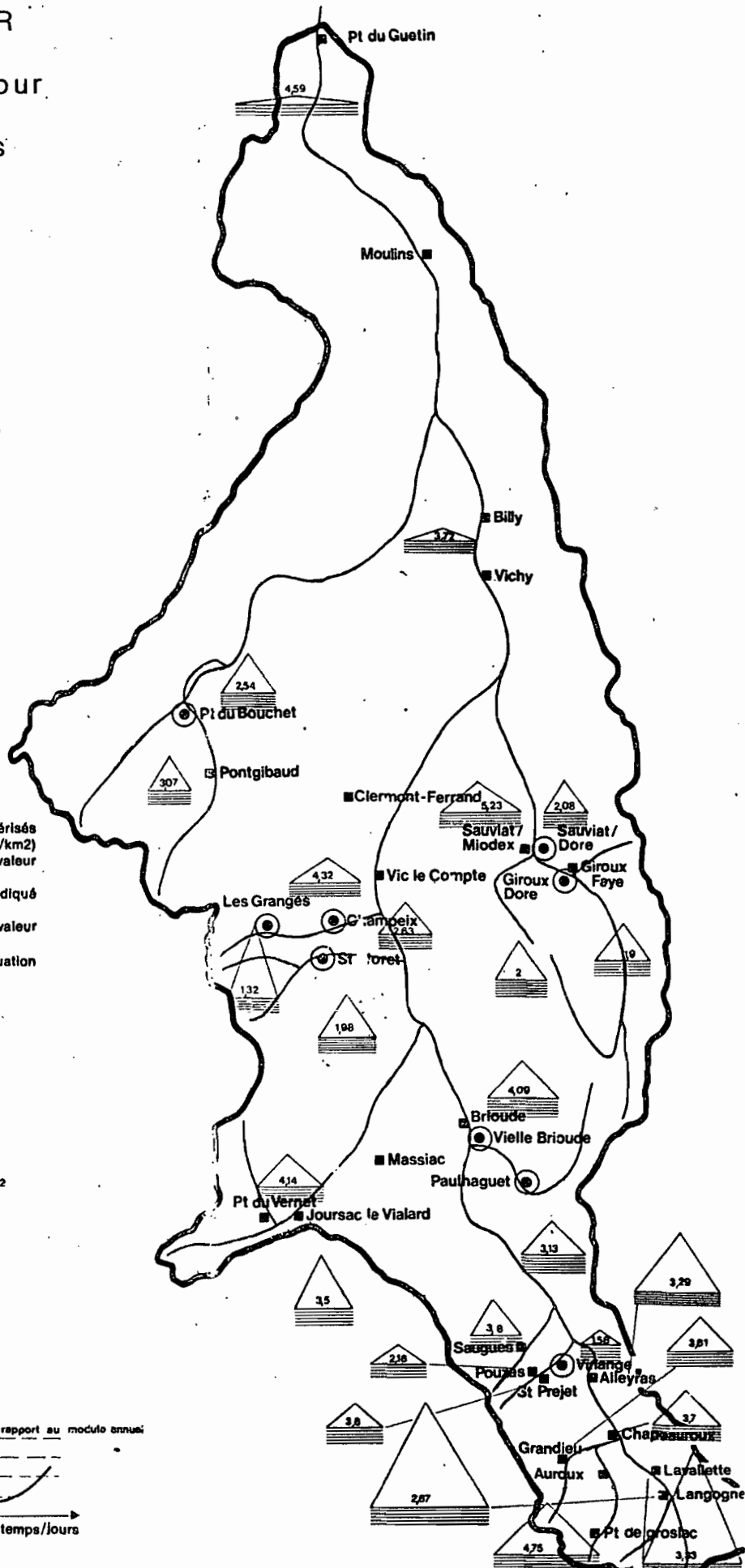
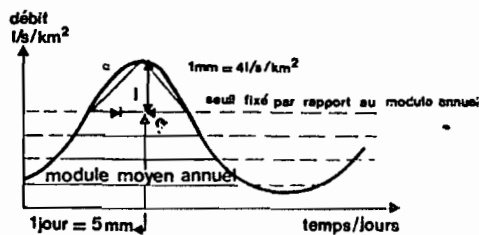
I = intensité moyenne des crues : h. du triangle : 41 l/s/km²

Θ = durée des crues : base du triangle : 5mm = 1 jour

V = volume moyen des crues estimé par la relation

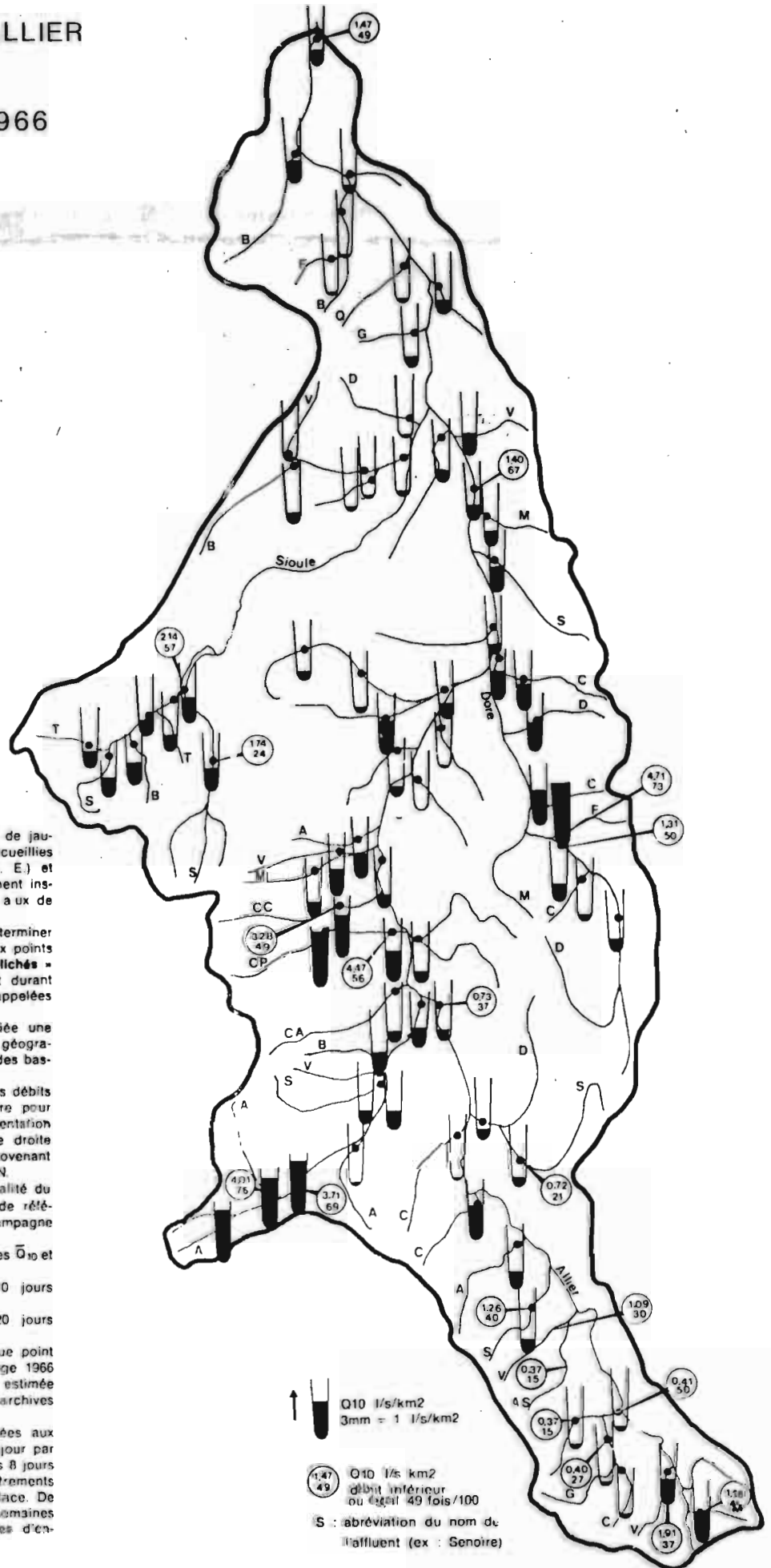
$$V = 0,616 \left(\frac{S \times I}{1000} \right) \times \Theta - 1,833$$

105 m³/s
m²/s
jours



BASSIN DE L'ALLIER

Etiage de 1966



Les résultats obtenus au cours de la campagne de jaugeages 1966 ont constitué un appoint aux données recueillies sur les stations permanentes (stations de la 4^e C. E.) et sur les stations équipées de limnigraphes provisoirement installées par le Centre des Bassins Expérimentaux de BORT-LES-ORGUES.

L'interprétation de ces résultats a consisté à déterminer la signification des mesures instantanées obtenues aux points jaugeés au cours de la campagne et appelés « stations clichés » à partir de l'étude de la variabilité de l'écoulement durant cette période aux stations pourvues d'enregistreurs et appelées « stations de référence ».

Ainsi à chaque « station cliché » a été associée une « station de référence » selon des critères de proximité géographique et d'analogie structurale et géomorphologique des bassins versants correspondants.

Cette association a permis d'estimer l'évolution des débits sur chaque « station cliché » faisant ainsi apparaître pour cette période l'importance de certains niveaux d'alimentation constitués en particulier par les affluents de la rive droite de la DORE et par contre la faiblesse des apports provenant des affluents situés entre BILLY et le Pont-du-GUETIN.

Enfin la représentation de l'étiage 1966 sur la totalité du bassin a été obtenue en situant sur les « stations de référence » le débit moyen écoulé au cours de la campagne par rapport au débit de l'étiage qui lui a succédé.

Ces débits ont été caractérisés par deux indices \bar{Q}_{10} et \bar{Q}_{20} dont la signification est la suivante :

\bar{Q}_{10} : valeur minimale du débit moyen de 10 jours consécutifs

\bar{Q}_{20} : valeur minimale du débit moyen de 20 jours consécutifs.

Ces indices ont donc pu être calculés en chaque point du bassin donnant ainsi une image globale de l'étiage 1966 dont la probabilité d'occurrence a pu être par ailleurs estimée à 0.50 à partir d'une étude préalable portant sur les archives des stations anciennes. (22)

Pour cela des corrections ont dû être appliquées aux débits mesurés. A cette fin, l'hydraulicité de chaque jour par rapport à la moyenne des débits pendant les deux fois 8 jours de campagne, a été déterminée grâce aux enregistrements ou aux lectures d'échelle, mis temporairement en place. De même l'hydraulicité relative de la période de 6 semaines de campagne a été, grâce aux 31 stations équipées d'enregistreurs.

↑ \bar{Q}_{10} l/s/km²
3mm = 1 l/s/km²

○ \bar{Q}_{10} l/s/km²
débit inférieur ou égal 49 fois/100

S : abréviation du nom de l'affluent (ex : Sèvre)

(Maquette d'essai H. VIVIAN au 1/500 000)



- Écoulement souterrain : abondance moyenne annuelle des réservoirs aquifères (évaluation du B.R.G.M. - Carte de France au 1/1 000 000)

- Débits bruts : schéma stationnel (en couleurs vives pour les longues stations - en couleurs claires pour la décennie 1966-1975), R(mm)

Réservoirs aquifères non alluviaux

Nappes alluviales

	150-300 mm (5-10 l/s/km ²)	
	300-500 mm (10-15 l/s/km ²)	
	500-600 mm (15-20 l/s/km ²)	
	600-950 mm (20-30 l/s/km ²)	
	950 mm et plus (30 l/s/km ² et plus)	

Ex : grande exsurgence jaugée (station hydrométrique à l'aval).

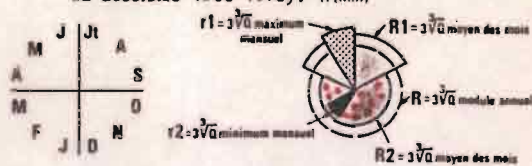
Re : grande résurgence jaugée.

--- limite de bassin hydrogéologique connu.

..... limite des bassins hydrologiques des surfaces (pour toute superficie > 500 km²) doit être ajoutée lors d'un essai prochain...

Maquette d'essai - réalisée à l'E.R. 30 par R. ZANELLA

- Responsable : H. VIVIAN - C.N.R.S.



- mois dont le débit moyen est > au module annuel
- mois dont le débit moyen est < au module annuel
- débit mensuel maximum
- débit mensuel minimum

- Stations hydrométriques où sont mesurées :

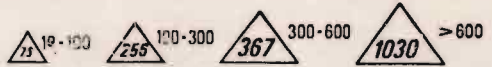
- des débits réels = débits naturels : **BRIANÇON**
- des débits réels = débits influencés : **GRENOBLE**

- Stations hydrométriques n'ayant pas 10 ans de mesure :

- des débits naturels = VEYNES
- des débits influencés = **PIERRE**

- Influence des aménagements :

- grande dérivation vers un barrage réservoir, une ligne électrique ou un canal d'irrigation.
 $R(mm) = 3\sqrt{Q}$ (volume dérivé) en m³/s
- Grands réservoirs (capacité utile en millions de m³).



Venus : Usine d'arrivée de la dérivation et retour au réseau hydrologique.