



## UN EXEMPLE D'ÉTUDES HYDROLOGIQUES RÉCENTES : LE BASSIN DE L'AUTHION

par **J. NITARD**

Ingénieur  
à la SADRAL

et

**H. DOSSEUR**

Ingénieur au Groupe Hydrologie  
EDF - LNH

### Avant-propos

Le bassin de l'Authion constitue un bon exemple des problèmes qui se posent à l'ingénieur chargé d'élaborer un schéma d'aménagement hydraulique d'ensemble, et un programme d'investissements fondé sur des données aussi solides que possible : données d'ordre économique bien sûr, en premier lieu; or, dans le domaine de l'hydraulique, on bute souvent à ce stade de l'analyse sur le manque qualitatif et quantitatif d'informations de base hydrologiques (cf : protections contre les crues, assainissement des terres, gestion des réservoirs, etc.). Le choix économique doit résulter de la comparaison de diverses solutions.

Le bassin de l'Authion n'échappe pas à cette règle. C'est pourquoi entre octobre 1966 et octobre 1969 ont été mis en place les moyens nécessaires aux mesures, et élaboré un modèle permettant de générer les débits de l'Authion et de ses affluents.

L'ensemble du travail effectué qui a ensuite été utilisé dans un modèle économique par les bureaux d'études de l'O.T.A.M. - S.E.M.A. paraît justifier l'intérêt de ceux qui s'attachent à ces problèmes. C'est pourquoi une description du travail effectué et des résultats obtenus ont été ras-

semblés dans un article rédigé par M. Nitard, ingénieur à la Société d'Aménagement et de Développement de la région Authion-Loire, et M. Dosseur, ingénieur à E.D.F.

S'il appartient, à l'avenir, de nous éclairer sur la valeur des résultats obtenus, il est juste de souligner, aujourd'hui, qu'un tel effort et un tel travail dans le domaine de l'hydrologie n'ont été rendus possibles que grâce au concours financier très important du ministère de l'Agriculture et au concours actif du groupe hydrologie de l'E.D.F. rattaché au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou; et je voudrais citer, tout particulièrement, l'aide qui nous a été apportée à différents niveaux :

- par M. Jacquet, aujourd'hui chef de la Division des Echanges Atmosphériques;
- par M. Chabert, directeur du Département de l'Hydraulique, décédé en 1969, et remplacé par M. Lebreton;
- et enfin et tout particulièrement par MM. Cormary et Dosseur qui ont été les principaux artisans de l'étude, en liaison étroite avec l'équipe de terrain constituée dès le départ sous l'égide de l'Association, puis de la Société de l'Authion.

H. ADAM,  
I.C.G.R.E.F.  
Directeur de la SADRAL

## 1. — Le cadre de l'étude

L'Authion est un affluent rive droite de la Loire dont le bassin versant s'étend sur les départements du Maine-et-Loire et de l'Indre-et-Loire (voir carte de situation : fig. 1).

Il s'écoule sur environ 80 km parallèlement à la Loire dont il occupe l'ancien lit majeur entre Bourgueil et Angers, en drainant un bassin de 1 500 km<sup>2</sup>, principalement en rive droite, par l'intermédiaire du Lathan et du Couasnon descendus des coteaux du Baugeois, ainsi que du Changeon en Indre-et-Loire, ses principaux affluents.

Cet écoulement qui se fait avec une pente particulièrement faible : 8 à 20 cm/km, est fréquemment perturbé en aval par celui de la Loire qui, en période de hautes eaux, refoule dans la basse vallée de l'Authion entraînant d'importantes inondations.

Depuis le Moyen-Age, les efforts déployés dans cette zone ont permis de limiter ces inondations (digue entre Loire et Authion, portes de garde sur l'Authion au Pont Bourguignon empêchant le déversement des hautes eaux de la Loire dans le Val).

De même des travaux plus récents ont apporté une amélioration à l'écoulement des eaux de l'Authion vers la Loire (recalibrage de l'Authion et remise en état des émissaires secondaires du val).

Cependant, malgré ces aménagements successifs les problèmes de la lutte contre les inondations et de l'assainissement des terres exploitables ne sont pas résolus, puisque la cause essentielle du phénomène, à savoir la dénivelée entre la Loire et l'Authion, demeure.

Ainsi au cours de périodes de fermeture des portes du Pont Bourguignon le débit de l'Authion ne peut s'écouler et le stockage des eaux en « amont » s'accompagne de débordements fréquents dans la vallée (\*).

Il ne s'agit donc pas de débordement dû à une crue naturelle, mais d'une modification d'écoulement qui peut durer plusieurs semaines (ou mois) suivant les cotes atteintes par la Loire.

A l'inverse, les problèmes d'irrigation sont également préoccupants (\*\*) en raison de l'importance de la super-

ficie irriguée (7 400 ha), de son développement régulier (6 % par an) et du caractère filtrant des sols.

Ainsi, une modification de cette situation ne peut être obtenue que par la réalisation d'ouvrages complémentaires assurant la maîtrise des eaux et, avant tout, le refoulement des eaux de l'Authion dans la Loire quand celle-ci empêche l'écoulement normal de l'Authion.

Il est vraisemblable, compte tenu de l'importance des investissements à réaliser et des améliorations à attendre de cet aménagement, que ce problème n'aurait guère évolué si un élément nouveau par les perspectives qu'il offre pour la survie et le développement de l'horticulture angevine, ne lui avait donné une dimension nouvelle. En effet, le problème du transfert (dû à l'urbanisation), de l'extension et de la restructuration de l'horticulture angevine (motivées par les perspectives de développement du marché horticole) pose celui de l'aménagement hydro-agricole de la vallée de l'Authion et donne à ce dernier une dimension plus importante tant sur le plan local que sur le plan national.

C'est dans le cadre des études entreprises dès 1966 par l'Association d'Etudes (devenue en 1968 la Société d'Aménagement et de Développement de la région Authion-Loire) pour l'établissement d'un programme d'ensemble que se situe l'étude hydrologique faisant l'objet de la présente note.

Sa réalisation a été effectuée par le Laboratoire National d'Hydraulique des Etudes et Recherches E.D.F. à la demande de la Société d'Etudes de l'Authion.

## 2. — Les objectifs poursuivis

Cette étude a pour objectif principal de fournir les éléments nécessaires à la détermination des possibilités d'évacuation ou de stockage des eaux de l'Authion et de leur utilisation à des fins agricoles.

En particulier, la réalisation technique des ouvrages hydrauliques projetés (stations de pompage, retenues collinaires sur le haut bassin...) dans des conditions économiquement valables, exige la prise en compte d'une information hydrologique de longue durée, tant sur l'Authion lui-même que sur ses principaux affluents.

Il convenait donc de rassembler et d'exploiter l'information disponible et d'effectuer au plus tôt le minimum de mesures complémentaires indispensables.

Or, en 1966, l'information hydrométrique concernant le bassin de l'Authion était inexistante. On disposait, par contre, d'une information climatologique relativement abondante, bien que souvent incomplète et ponctuelle; un groupe de mesures a donc été implanté dès cette date à Angers.

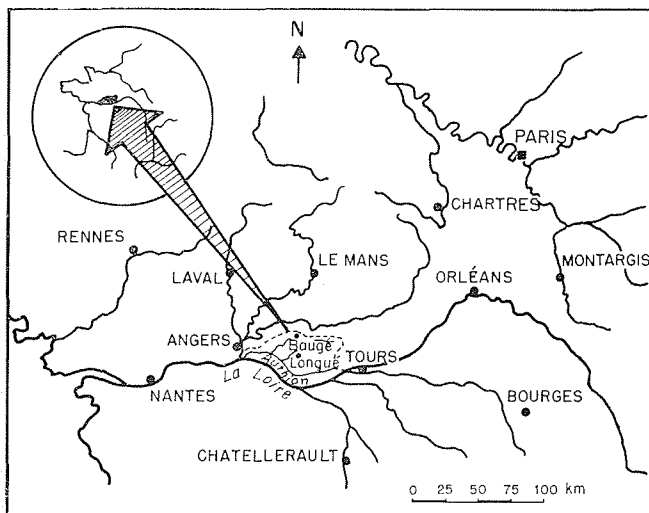
Il s'agissait ensuite d'harmoniser et compléter les données climatologiques anciennes puis, compte tenu de l'analyse des résultats acquis en 1967 et 1968, en hydrométrie principalement, sur le réseau de mesure complémentaires, de reconstituer des séries chronologiques de débits explicitant suffisamment la variabilité du régime hydrologique des cours d'eau.

Ce programme impliquait donc trois étapes sur le plan méthodologique :

- exploitation des archives;
- élaboration de données complémentaires;
- analyse des données récentes permettant la valorisation des archives pluviométriques et l'obtention de séries de débits moyens journaliers.

Il faut souligner que ces étapes n'ont pas été entrepri-

(\*) 20 000 ha inondés avec une fréquence quinquennale.  
 (\*\*) 60 % des prélèvements pour l'irrigation se font à partir de la nappe, 40 % à partir des eaux superficielles (réserves et prélèvements en rivière).



1/ Vallée et Bassin de l'Authion. Carte de situation.

ses chronologiquement mais de façon simultanée dans la mesure du possible.

Il ne nous a pas semblé utile de rappeler l'ensemble des démarches. Nous avons retenu dans chacune de ces étapes les points importants ou originaux permettant de faire apparaître l'intérêt méthodologique d'une telle étude, l'importance des moyens mis en œuvre sans oublier l'intérêt pratique des résultats.

Ces phases principales sont :

- l'étude probabiliste des phénomènes climatologiques, pour préciser en particulier l'importance des besoins en eau et la distribution temporelle des températures (problèmes des gelées);
- La génération et harmonisation des données pluviométriques, à différentes échelles de temps, afin de disposer de séries longues et homogènes, et simultanées sur l'ensemble du bassin;
- la reconstitution des séries chronologiques de débits sur l'Authion et ses affluents à l'aide des relations pluies-débits. Nous verrons qu'il a fallu ici, compte tenu des difficultés de contrôle des débits naturels à l'exutoire, reconstituer tout d'abord des débits « amont » sur les principaux affluents à partir de modèles physiques déterministes, puis propager ces débits de façon à obtenir une série chronologique sur l'Authion à Pont Bourguignon.

Dans chacune de ces phases, certaines méthodes utilisées sont très classiques (méthode de l'hydrogramme unitaire, ajustement des lois de distribution théoriques sur les séries d'observations, corrélations par exemple) tandis que d'autres sont beaucoup plus originales (processus de renouvellement, modèle journalier de transfert pluie-débit).

Nous ne reviendrons pas en détail sur les premières dont les mécanismes sont maintenant bien connus. Il semble intéressant de s'attarder plus particulièrement sur les aspects originaux de cette étude, à savoir : le modèle probabiliste des pluies de 24 h dont l'application peut avoir un intérêt plus général adapté aux crues et la génération des débits de l'Authion qui était l'objectif principal de l'étude.

### 3. — L'exploitation des archives

#### 3.1 Critique et mise en forme des données.

L'ensemble de l'information disponible a été critiqué cas par cas, de façon méthodique aux différents stades de sa mise en forme (dépouillement et mise sur cartes perforées en particulier). Cette critique de base, sans éclat et ingrate, conditionne à notre avis toute la suite de l'analyse.

Ensuite, les données utilisées ont fait l'objet de tests d'homogénéité car, sur de longues périodes, de multiples événements peuvent influencer la qualité et la continuité des mesures (détarages des stations, déplacement de pluviomètre ou transformation de son environnement,...) et interrompre l'homogénéité d'une série. Les méthodes utilisées sont celles de la « double masse » et des « écarts cumulés », méthodes basées sur la comparaison d'une série de référence « réputée » homogène, avec la série testée. La série de référence étant constituée par l'ensemble des postes pluviométriques ou, dans certains cas exceptionnels et très sûrs, d'un seul poste.

Les résultats de ces tests nous ont permis de conclure à la bonne homogénéité des séries pluviométriques utilisées (période 1950-1966).

#### 3.2 Application du processus de renouvellement aux pluies.

La particularité du problème de l'Authion réside donc dans l'absence totale de longues séries hydrométriques ne permettant pas l'utilisation directe de méthodes statistiques pour atteindre les objectifs fixés.

Les données pluviométriques constituent donc l'information de base du modèle déterministe continu, choisi pour obtenir les séries chronologiques de débit; aussi il a fallu :

- estimer la probabilité d'occurrence d'une pluie déterminée;
- générer des séries ponctuelles complètes et des séries de lames d'eau moyennes propres à chaque bassin. Cette dernière étude a été faite à une échelle de temps variable (journalière et mensuelle). Nous y reviendrons ultérieurement (cf. paragraphe 5.1).

#### LOIS DE DISTRIBUTION DES ÉPISODES PLUVIEUX.

Pour utiliser toute l'information contenue dans les données de pluies de 24 h, l'utilisateur habituel traite généralement le phénomène (pluie, maximum en 24 h, durée maximum des averses, hauteur de pluie pendant une durée nouvelle ou quelconque, ...) à l'aide d'une loi de probabilité existante.

Ainsi, chaque fois les problèmes sont des cas d'espèces que l'on traite par des ajustements empiriques sans liens entre eux.

L'intérêt de construire à partir d'hypothèses de base simples un modèle probabiliste, réside essentiellement dans le fait qu'on peut ainsi, à partir de quatre paramètres estimés à partir des données de 24 h, calculer et relier entre elles les lois de probabilités de tous les phénomènes hydropluviométriques :

- durée des sécheresses et épisodes pluvieux;
- hauteur des épisodes de pluie de 24 h, des pluies totales d'une période de durée quelconque;
- nombre de jours secs et pluvieux;
- risque d'une pluie faible pendant une période;
- lois des valeurs extrêmes de tous ces phénomènes, c'est-à-dire sélection d'événements aléatoires, supérieurs à un seuil, et même sélection de la valeur maximale d'une variable pour une durée donnée.

Toutes ces lois sont utiles au niveau de la gestion de réserves à la réalisation d'un projet (prévisions de besoins en eau, ruissellement et crues).

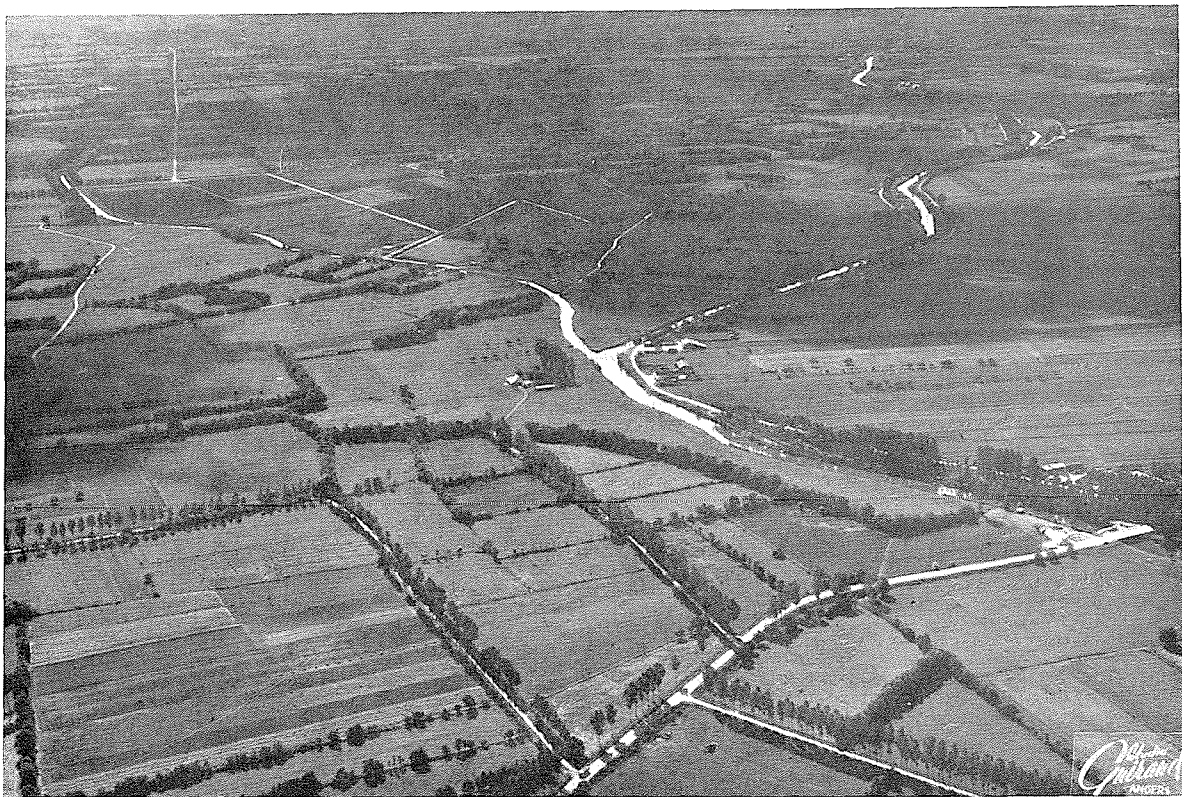
Le phénomène pluie se décompose dans le temps en deux états : pluie ou non pluie. En conséquence, il est possible de distinguer deux groupes de variables relatives, soit à la hauteur de pluie ( $y$ ), soit à la durée (durée des épisodes secs  $T_2$ , épisodes pluvieux  $T_1$ ).

A chacun de ces deux groupes de variables correspondent des hypothèses simples.

Ainsi l'hypothèse la plus simple est de supposer que la probabilité  $P_j$  qu'il pleuve (ou non) le jour  $J$  dépend uniquement du fait qu'il a plu (ou non) le jour  $J - 1$ .

Alors, on démontre que d'une part les durées des épisodes secs et pluvieux  $T_1$  et  $T_2$  sont des variables indépendantes et d'autre part que les lois des durées des épisodes sont des lois exponentielles. En appelant  $P$  ( $0/1$ ) la probabilité qu'il ne pleuve pas le jour  $J$  s'il a plu le jour  $J - 1$ , ( $P$   $1/1$ ) la probabilité qu'il pleuve le jour  $J$  s'il a plu le jour  $J - 1$ , la probabilité  $P_k$  que l'épisode pluvieux dure  $k$  jours est :

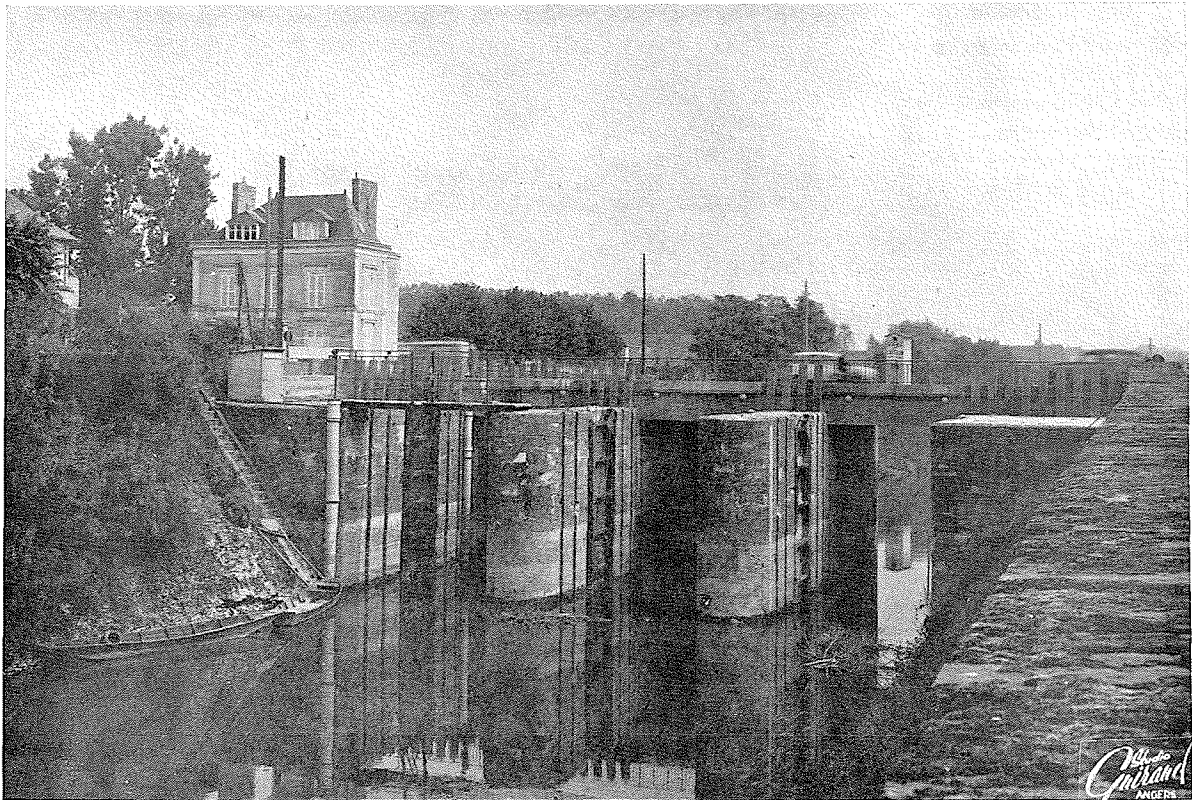
$$\begin{aligned} P_k &= \text{Prob. } [T_2 = K] \\ &= P(0/1) [P(1/1)]^{K-1} \\ &= (1 - a) a^{K-1} \end{aligned}$$



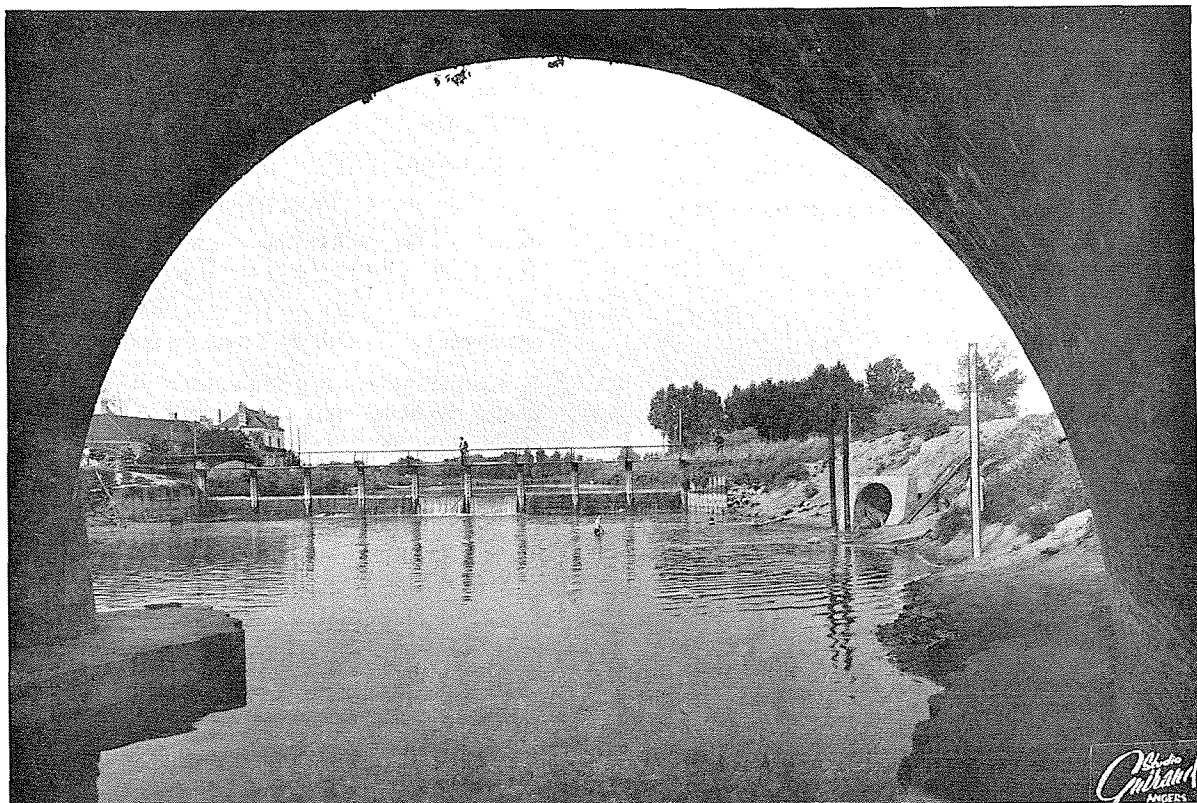
2/ Longué. Le confluent de l'Authion avec le Lathan (à gauche).



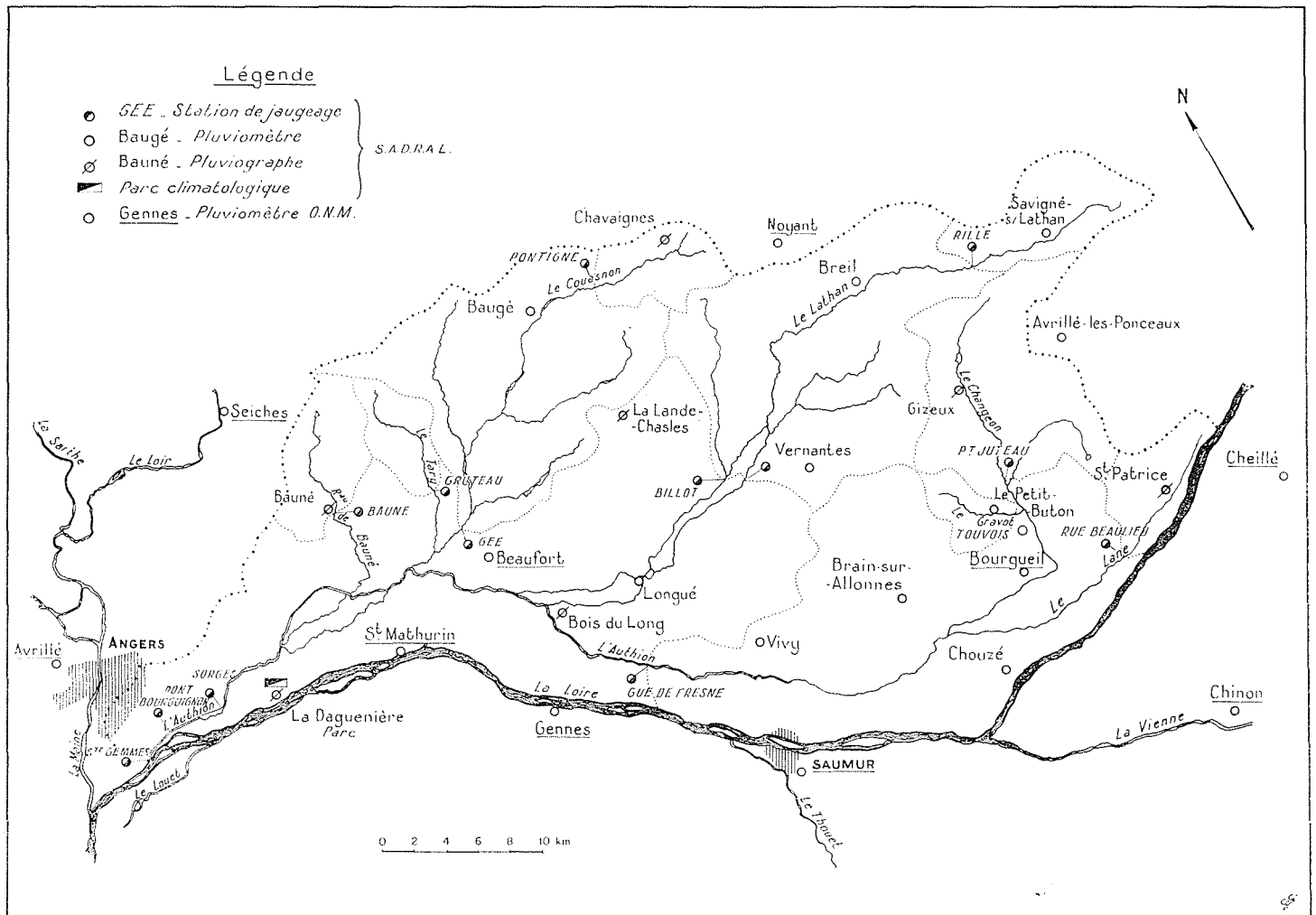
3/ La vallée de l'Authion. Le morcellement des terres cultivées.



4/ Pont Bourguignon. Les portes à flot ouvertes. Vue d'aval.



5/ Brain sur l'Authion. L'Authion recalibré : un barrage mobile.



6/

De même pour les épisodes secs :

$$P_j = \text{Prob. } [T_1 = j] \\ = P(1/0) [P(0/0)]^{j-1} \\ = (1 - b) b^{j-1}$$

Il est possible de passer aux lois continues exponentielles :

$$\text{Prob. } [T_1 > t] = e^{-t\mu_1}$$

ou :

$$1/\mu_1 = a$$

ou :

$$\text{Prob. } [T_2 > t] = e^{-t\mu_2}$$

$$\frac{1}{\mu_2} = b$$

où  $\mu_1$  et  $\mu_2$  représentent respectivement les durées moyennes des épisodes secs et pluvieux.

Par ailleurs, en faisant d'abord les hypothèses qu'un épisode pluvieux de durée  $t$  est une somme aléatoire de  $K$  averses élémentaires, et que d'une part les hauteurs de pluie  $Y$  de ces averses sont indépendantes et suivent toutes la même loi exponentielle :

$$\text{Prob. } [Y < y] = 1 - e^{-\rho y}$$

et que d'autre part la durée qui sépare deux averses élémentaires suit une loi exponentielle :

$$\text{Prob. } [T > t] = e^{-t\mu}$$

On démontre que la loi de la somme de telles averses

(par exemple par 24 h) est une loi d'un type particulier (loi des fuites) et on vérifie expérimentalement l'adéquation d'une telle loi.

Sa densité s'écrit :

$$\text{Prob. } [H_t = 0] = e^{-t\mu}$$

$$\text{Prob. } [h < H_t < h + dh]$$

$$= e^{-t\mu - \rho h} \sqrt{\frac{\rho t}{\mu h}} I_1 \left( 2\sqrt{\frac{\rho t h}{\mu}} \right) dh$$

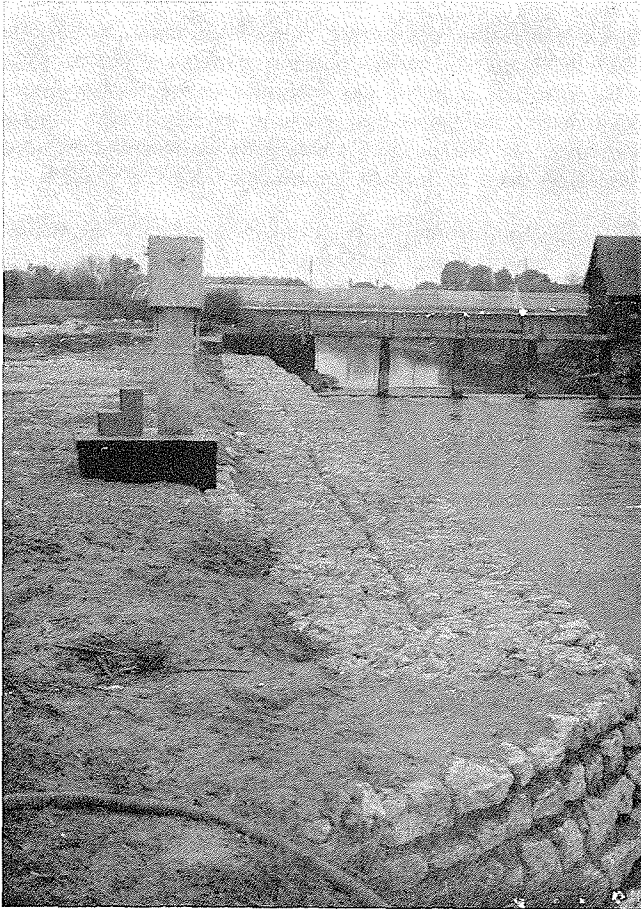
où  $I_1$  est la fonction de Bessel de première espèce.

Les paramètres  $1/\mu$  (paramètre de dispersion) et  $\rho$  (paramètre d'échelle) sont estimés en fonction de la variance et de la moyenne des pluies non nulles de 24 h.

Soit en résumé :

- quatre paramètres fondamentaux  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\rho$  et  $1/\mu$  correspondant aux quatre lois exponentielles de base dont on peut tirer en particulier :
  - deux paramètres liés  $m$  (hauteur moyenne des épisodes pluvieux de durée quelconque) et  $m'$  (durée moyenne des épisodes mixtes).

L'adéquation du modèle de base vérifiée, une deuxième étape permet la construction des lois de nouvelles variables associées aux pluies de 24 h. Nous avons vu que l'éventail des lois possibles était important, d'autant plus que les lois à deux variables ne sont pas exclues. Toutefois, on se limite en pratique à des lois conditionnelles où l'une des deux variables est fixée, en général le temps, par exemple la loi de la hauteur d'un épisode de durée  $t$ .



7/ L'Authion. La station du gué du Fresne.

#### 4. — Elaboration des données complémentaires

Elles étaient indispensables pour la réalisation du programme d'étude, compte tenu de l'état des connaissances en matière de climatologie et d'hydrologie au seuil de cette étude :

- d'une part, des séries de relevés pluviométriques plus ou moins longues et plus ou moins complètes en quelques points du bassin (10 postes des services de la météorologie nationale depuis 1952);
- d'autre part, des relevés journaliers de hauteur d'eau de l'Authion au Pont Bourguignon et à La Daguenière pour les périodes de fermeture des portes, avec l'absence de données concernant les débits.

Les objectifs initiaux qui consistaient essentiellement à pallier au manque d'information ont été élargis dans le sens de la mise en place d'un réseau à caractère plus définitif susceptible de fournir les données nécessaires à la gestion future des aménagements.

##### 4.1 Les mesures climatologiques.

Le réseau pluviométrique est composé de 24 postes (fig. 6) dont 10 postes appartenant au réseau de la Météorologie Nationale, en service depuis 1950-1951, 13 postes gérés par la Société d'Aménagement et de Développement de la Région Authion-Loire depuis 1966, et le poste de

Baugé qui comporte seul une longue série d'observations (1917-1964 et 1966-1970).

Les températures sont observées aux stations de la Météorologie Nationale d'Avrillé et Saumur (depuis 1950). La série de Baugé (1929-1964) a été malheureusement interrompue.

Ces données sont complétées par le parc climatologique de La Daguenière dans la vallée, où sont effectuées depuis 1968 les observations des paramètres classiques, à savoir : pluviométrie, température, insolation, humidité, évaporation, vitesse du vent.

##### 4.2 Le réseau hydrométrique.

Onze stations (fig. 6) font l'objet de publication des débits moyens journaliers; en particulier les débits de l'Authion sont mesurés à proximité de son exutoire, en amont des portes de Pont Bourguignon. Ce contrôle s'avère particulièrement difficile en raison de la variabilité constante des conditions d'écoulement aval (Loire), de la faiblesse de la pente, des travaux de recalibrage ou des manipulations de barrage en amont.

Les données fournies par ces deux réseaux relativement denses, constituent des séries de courte durée mais complètes et, malgré toutes les influences existantes, elles sont de bonne qualité.

##### 4.3 Les difficultés d'exploitation.

En plus des problèmes classiques inhérents à l'évaluation des débits d'étiage et de crue en particulier, les difficultés majeures concernant la mesure des débits proviennent des conditions particulières suivantes :

- instabilité naturelle des cours d'eau entraînant de fréquents détarages des stations de jaugeages (végétation, charriage, dépôts,...);
- caractéristiques du réseau hydrographique (pentes très faibles);
- influences « amont » : modifications artificielles de l'écoulement (barrages mobiles, vannages, recalibrages,...);
- influence « aval » de la Loire rendant très délicat le contrôle de l'Authion au Pont Bourguignon.

Tous ces faits entraînent une imprécision sur la connaissance des débits mesurés et parfois une incertitude sur la signification exacte des mesures.

#### 5. — Analyse des données récentes

##### 5.1 Utilisation des méthodes classiques.

La seule série disponible de débits sur les stations existantes était trop courte pour ajuster un modèle statistique explicitant les lois de probabilités. Il a donc fallu utiliser un modèle continu de transformation pluie-débit à partir de la série de pluie existante ou générée, et des débits mesurés depuis 1967.

##### 5.1.1 LES RELATIONS PLUIES-DÉBITS.

###### a) L'hydrogramme unitaire :

Nous ne reviendrons pas sur les principales propriétés de la méthode reposant sur la linéarité et la constance de la réponse, ce qui en fait ne correspond pas à la réalité.

Dans le cas de l'Authion, l'intervalle de temps minimum pouvant être pris comme unité a été imposé par les enregistrements (2 h).

L'hydrogramme unitaire a été étudié pour chacun des neuf sous-bassins, mais du fait du nombre restreint de crues retenues, les critères de sélection ont été moins rigoureux. Malgré tout l'inégalité reste flagrante (1 à 17 crues selon les bassins).

Du fait de la présence de sept pluviographes sur le bassin seulement dont cinq postes pour les affluents, la détermination de la lame d'eau tombée sur le bassin a nécessité la pondération du pluviographe de référence du bassin étudié.

Afin de comparer les hydrogrammes entre eux, nous les avons caractérisés :

- par des grandeurs caractéristiques (temps de base, de montée, débit de pointe);
- par des moments si on assimile l'hydrogramme à une distribution statistique (les moments étant les paramètres de centrage, de dispersion, asymétrie, aplatissement);
- par les paramètres de courbes mathématiques d'expressions connues (distribution gamma, exponentielle, produit d'une fonction linéaire par une fonction de type gaussien).

D'une façon générale, l'on note une dispersion des caractéristiques des hydrogrammes sur un même bassin pour différentes crues, et, pour une même crue sur les différents bassins. Le meilleur ajustement mathématique est la distribution gamma.

Comme les seules données de pluies disponibles sur les stations anciennes sont journalières, l'on est passé de l'hydrogramme de 2 h à celui de 24 h.

#### b) Analyse des décrues :

Elle a consisté en la sélection de périodes de décrues et le choix d'un modèle c'est-à-dire la représentation des hydrogrammes sous une forme analytique simple.

L'assimilation du bassin à un réservoir qui se vidangeait par l'intermédiaire de la section de jaugeage conduit aux expressions générales suivantes :

$$Q = Q_0 (1 + \beta t)^{-2n}$$

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

$n$  variant suivant la forme du bassin et de l'exutoire et les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  étant fonction des conditions momentanées d'écoulement.

Pour chaque décrue, il existe pour une expression analytique donnée une seule valeur du paramètre de décrue telle que l'ajustement soit optimum, c'est-à-dire  $F_j [Q_j \text{ réel} - Q_j \text{ calculé}]^2 = \Delta$  sera minimum.

Le choix de cette valeur a été fait par la méthode de Newton.

Comme pour chaque décrue, le paramètre de décrue varie, on a essayé dans un but de précision de le lier à des caractéristiques connues à l'instant initial c'est-à-dire débit initial ( $Q_0$ ) et antécédents pluviométriques (Pant.). La relation obtenue est de la forme :

$$A = a Q_0 + b \text{ Pant} + C$$

Les étapes précédentes effectuées, il était facile de reconstituer les débits d'une décrue caractérisée par son débit initial et par l'épisode pluvieux qui a provoqué cette décrue, à l'aide des deux formules ci-dessus.

#### 5.1.2 LA GÉNÉRATION DES SÉRIES MENSUELLES ET LAMES D'EAU JOURNALIÈRES.

● La génération des séries mensuelles pour la période 1917-1950 aux dix postes pourvus d'archives par la suite a été effectuée à partir des formules de régression issues des corrélations entre ces stations et la station longue homogène de Baugé. Les coefficients de corrélation sont très élevés pour la période commune :  $0,85 < r < 0,95$ .

- La génération des lames d'eau mensuelles a nécessité :
  - le choix d'une méthode correcte d'estimation des lames d'eau à partir du réseau actuel. Des méthodes classiques utilisées, la méthode de Thiessen a finalement été retenue au niveau des sous-bassins;
  - le calcul des lames d'eau à partir du réseau O.N.M. On a sélectionné, pour chaque sous-bassin, deux postes, en fonction de leur situation géographique. La valeur de la lame d'eau étant obtenue par corrélation double avec la lame d'eau moyenne calculée d'après la méthode de Thiessen. Ici encore les coefficients de corrélation sont élevés (0,90 à 0,99);
  - l'application des corrélations précédentes aux séries longues mensuelles de façon à obtenir les lames d'eau précipitées à partir des seules stations anciennes.

● Lames d'eau moyennes journalières sur chaque bassin.

La génération des lames d'eau moyennes journalières a nécessité, tout d'abord, le choix d'une méthode correcte d'estimation à partir du réseau actuel, puis l'établissement de corrélations doubles entre ces lames d'eau et les données de deux postes correspondants pourvus d'archives.

En fait, l'étude n'a pu être effectuée qu'à l'échelle de l'épisode pluvieux en raison de la variabilité des heures de relevés susceptibles d'exister au cours de la journée et entre les différents postes.

● Le passage aux lames d'eau journalières a été effectué par le produit du rapport de lame d'eau moyenne à la somme des précipitations aux deux postes pour l'épisode pluvieux par la somme des précipitations aux deux postes pour le jour considéré ( $P_{1j}$  et  $P_{2j}$ ) :

$$H_j = (P_{1j} + P_{2j}) \frac{H_e}{(P_{1e} + P_{2e})}$$

#### 5.2 Utilisation de modèles originaux.

##### 5.2.1 LA GÉNÉRATION DES SÉRIES CHRONOLOGIQUES DES DÉBITS AMONT.

Les difficultés déjà énoncées à propos du contrôle des débits à l'exutoire du bassin nous ont conduit à distinguer :

- une première phase de reconstitution des débits amont;
- une deuxième étape de propagation des débits générés pour reconstituer une série chronologique sur l'Authion.

##### a) Les débits mensuels.

Cette reconstitution a été effectuée à l'aide d'un modèle basé sur l'équation du bilan mois par mois. Les données climatiques lame d'eau, E.T.P. et températures constituent le point de départ (méthode de Tornthwaite) pour obtenir la pluie efficace dont une partie sert à la recharge des réserves, l'autre étant disponible pour alimenter les débits de surface. L'estimation de la réserve facilement utilisable et une fonction d'étalement assurent alors le partage entre ces deux parties et le passage eau disponible-débit.

Une des difficultés majeures de cet organigramme classique et simple réside dans la détermination des condi-

tions initiales. Cet obstacle a été contourné en faisant l'hypothèse vraisemblable qu'au mois de janvier le stock est équivalent à la R.F.U.

La fonction d'étalement de l'eau disponible est faite selon les modèles à effets retardés, à savoir la participation au débit du mois considéré ( $t$ ) de fractions inégales de l'eau disponible des mois antérieurs.

$$Y_t = a_0 x_{t-1} + \dots + a_n x_{t-n} + b$$

$Y_t$  étant le débit du mois  $t$  et  $x_t$  l'eau disponible au mois  $t$ .

La modulation des débits mensuels s'est avérée très difficile, mais les débits annuels sont en tout cas très satisfaisants.

b) Les débits journaliers.

La série de débits disponibles ne permettant pas d'ajuster un modèle statistique explicitant les lois de probabilités ou un processus tel que le renouvellement à deux dimensions qui permettrait de faire intervenir l'information obtenue par les pluies associées aux crues, on a donc calé sur ces deux années un modèle déterministe de relation pluie-débit.

— Les modèles déterministes :

Le comportement du bassin versant (sol, nappe, bief) est simulé par un ajustement logique mais subjectif de réservoirs diaphragmés percolant en parallèle ou en série. Chaque débit est asservi au moyen de paramètres à un niveau ou à un débit connu au moment où se fait le calcul. Celui-ci se fait par étapes à un pas de temps choisi en partant des conditions initiales et en prenant en compte la suite des pluviométries et des évapotranspirations potentielles au cours des années successives pour un jeu de paramètres déterminé.

En se donnant une fonction d'adéquation  $F_0$  (par exemple la somme des carrés des écarts entre débits calculés et débits réels) et en supposant qu'il existe une surface sans discontinuité liant  $F_0$  aux  $P$  paramètres, diverses techniques d'optimisation permettent d'obtenir un minimum en effectuant un calcul pour toute la série à chaque modification des paramètres; ce qui représente, quelle que soit la technique de détermination des modifications, un lourd calcul.

La plupart des modèles susceptibles de représenter les relations pluie-débit sont artificiellement et schématiquement représentés par une suite de transformations juxtaposées et indépendantes.

- calcul de la lame d'eau;
- transformation de cette pluie en eau disponible pour l'écoulement (absorption, évaporation,...);
- restitution de cette eau après un stockage plus ou moins prolongé dans divers réservoirs indépendants ou non;
- transfert de cette eau de son lieu de production à l'exutoire, effet retardateur du ruissellement dans les ruisseaux et propagation dans la rivière.

Certains modèles dits globaux comportent l'ensemble des opérations, alors que les modèles partiels n'en comportent qu'une ou deux : suivant les cas (but, auteur) l'accent porte sur tel ou tel poste, les autres aspects du cycle hydrologique étant simplifiés et grossièrement définis.

La comparaison de structure des modèles permet de constater que les modèles ayant un but de prévision limitée dans le temps, et donc faisant intervenir un recalage extérieur à chaque prévision, utilisent une seule fonction de rendement et une seule fonction de transfert. Dans ce cas

seulement la précision relative sur la première permet et justifie des raffinements sur la seconde.

Par contre, les modèles continus qui ne bénéficient pas de ce recalage, aux réalités, mettent l'accent sur les fonctions de rendement, niveau de l'évapotranspiration réelle, modulation au niveau du terrain lui-même, de la ressource de l'eau disponible pour l'écoulement : existence de plusieurs circuits interdépendants, fonction d'infiltration, fonction de percolation.

Le modèle utilisé comprend trois réservoirs : S, H, G.

1° Un réservoir S, en cul de sac, non limité en capacité.

Il est alimenté par une fraction de la quantité de pluie absorbée selon l'équation :

$$\Delta S = \frac{P_r}{1 + X_3 e^{X_4 S}} = \text{Variation du volume}$$

stocké dans le réservoir S

$X_3$  et  $X_4$  sont des paramètres et S le volume stocké au préalable dans le réservoir.

$P_r$  étant la quantité de pluie absorbée fonction des possibilités maxima d'absorption du sol.

Si la pluie est supérieure à  $\Pi$ , la partie excédentaire est considérée comme un ruissellement superficiel.

Son volume est réduit d'une quantité égale à l'évapotranspiration réelle.

2° Un réservoir H.

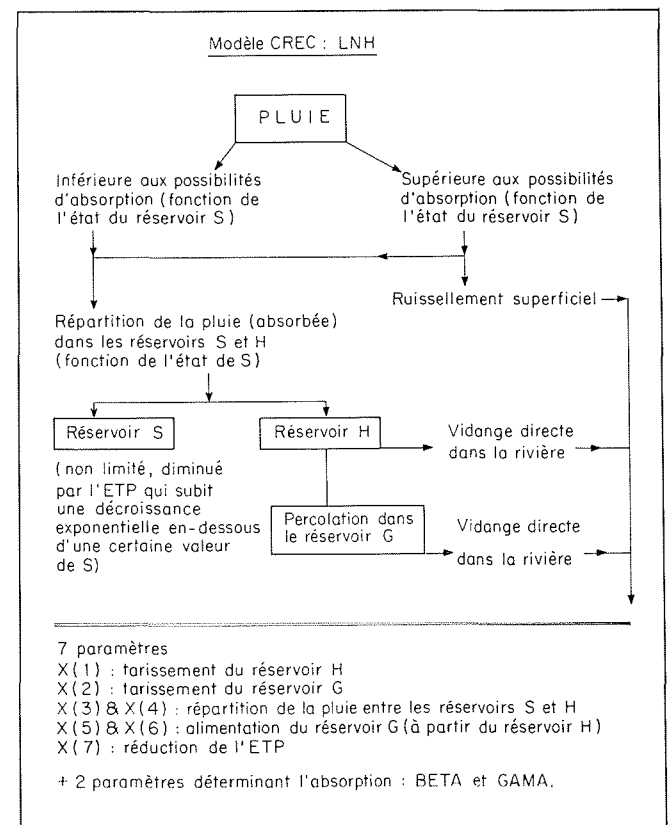
Il est alimenté par la quantité d'eau restante après alimentation du réservoir S :

$$\Delta H = P_r - \Delta S$$

Ce réservoir se vidange directement dans la rivière en fonction de son niveau :

$$dH = (X_1 - H)^2$$

Ce réservoir percole de façon linéaire dans un troisième réservoir G.



3° Un réservoir G dont le niveau est déterminé par l'équation :

$$G = \frac{H - X_5}{X_6}$$

( $X_5$  et  $X_6$  sont des paramètres)

Il se vidange dans la rivière de façon linéaire en fonction de la vidange de la veille et de son niveau; cette vidange représente le débit de base.

Le débit à l'exutoire sera la somme des vidanges des réservoirs H et G et du ruissellement superficiel s'il y a lieu.

Ce modèle nécessite le calage simultané de sept paramètres. Le test sur l'adéquation du schéma et du jeu de paramètres se fait en comparant la série des débits calculés aux débits réels, en se donnant une fonction critère, par exemple la somme des carrés des écarts entre débits calculés et débits réels.

Le choix des paramètres a été effectué sur la période 1967-1968, en tenant compte des caractéristiques physiques des bassins et également des résultats obtenus au cours des analyses précédentes : hydrogramme unitaire, décrue, paramètre de stockage du modèle mensuel.

### 5.2.2 LA PROPAGATION DES DÉBITS « AMONT » POUR RECONSTITUER LES DÉBITS « AVAL ».

La propagation des débits journaliers a nécessité le calage antérieur d'un modèle de propagation des crues.

Compte tenu des connaissances acquises et du but recherché, seule une méthode globale pouvait être raisonnablement appliquée (il aurait été en effet illusoire d'avoir recours à un modèle dynamique de propagation basé sur les différences finies). Parmi celles-ci, la méthode de Hayami obtenue à partir des équations de Saint-Venant en négligeant les termes d'inertie, termes qui sont négligeables pour les crues lentes de l'Authion ( $F \leq 1$ ) permet de tenir compte de la physique du phénomène, d'apports latéraux ponctuels et d'apports linéaires le long du bief principal.

Elle provient de la résolution de l'équation de diffusion :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \left( \frac{\partial Q}{\partial t} - qr \right) = \sigma \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} - \frac{\partial qr}{\partial x} \right)$$

où les paramètres C et  $\sigma$  sont supposés constants;  $qr$  représentant les apports intermédiaires, C la célérité de l'onde de crue et  $\sigma$  le coefficient de diffusion.

En faisant l'hypothèse de conditions aval à l'infini, l'hydrogramme de sortie aval  $Q(t)$  s'exprime à partir des hydrogrammes injectés en amont  $q_i$  au moyen d'une équation intégrale dont le noyau de convolution est fonction de C et  $\sigma$ .

Si nous appelons  $q_i(t)$  les apports ponctuels situés aux distances  $l_i$  du point aval, le modèle linéaire utilisé s'écrit :

$$Q(t) = \sum_{i=1}^r [Q_i(0) e^{\mu t}] + \int_0^t [q_i(t-\tau) - q_i(0) e^{\mu(t-\tau)}] K_i(\tau) d\tau$$

avec :

$$K_i(\tau) = \frac{\sqrt{\theta_i Z_i}}{\sqrt{\pi}} e^{2Z_i} e^{-(Z_i l_i \theta_i - \mu) \tau - Z_i \theta_i l_i Z} \frac{1}{\tau^{3/2}}$$

$\mu$  traduit le fait qu'il y a proportionnalité entre les apports latéraux et le débit qui passe dans le bief central.

$\theta_i$  et  $Z_i$  sont relatifs à l'entrée  $q_i$  mais s'expriment simplement en fonction de  $\theta$  et Z relatifs à l'entrée l :

$$\theta_i = \theta \frac{l_i}{l} \quad Z_i = Z \frac{l_i}{l}$$

$\theta$  et Z sont liés à C et  $\sigma$

$\theta = l/c$  représente le temps de propagation de l'onde entre les sections amont et aval;

$Z = lc/4\sigma$  est responsable de l'aplatissement du noyau donc de l'étalement de l'hydrogramme aval.

Le réglage du modèle consiste à définir les paramètres  $\mu$ , Z et  $\theta$  pour une crue donnée, par la méthode des moindres carrés.

On constatera le bon accord obtenu par le modèle pour la crue de novembre 1967 (fig. 8).

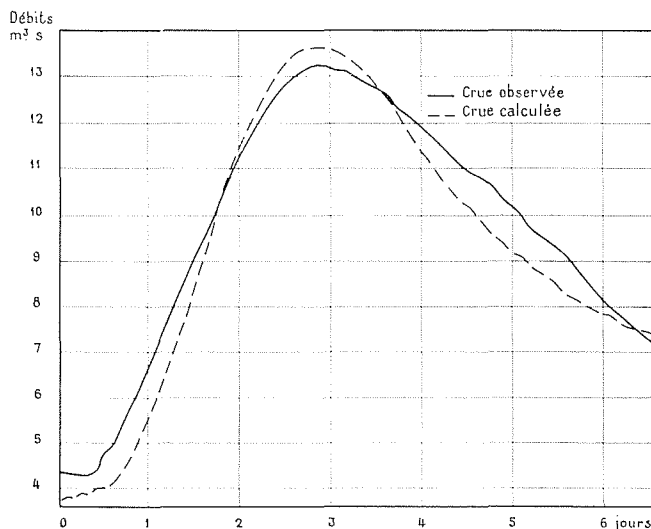
#### ● La propagation des débits journaliers.

L'application de cette méthode à l'Authion étant satisfaisante malgré l'absence d'un nombre important de crues observées pour caler le modèle, et une méthode pas à pas aux différences finies tenant compte des conditions aval (Loire) du lit majeur et des zones inondées, ne pouvant être envisagée, l'on a appliqué une méthode dérivée pour la propagation des débits journaliers.

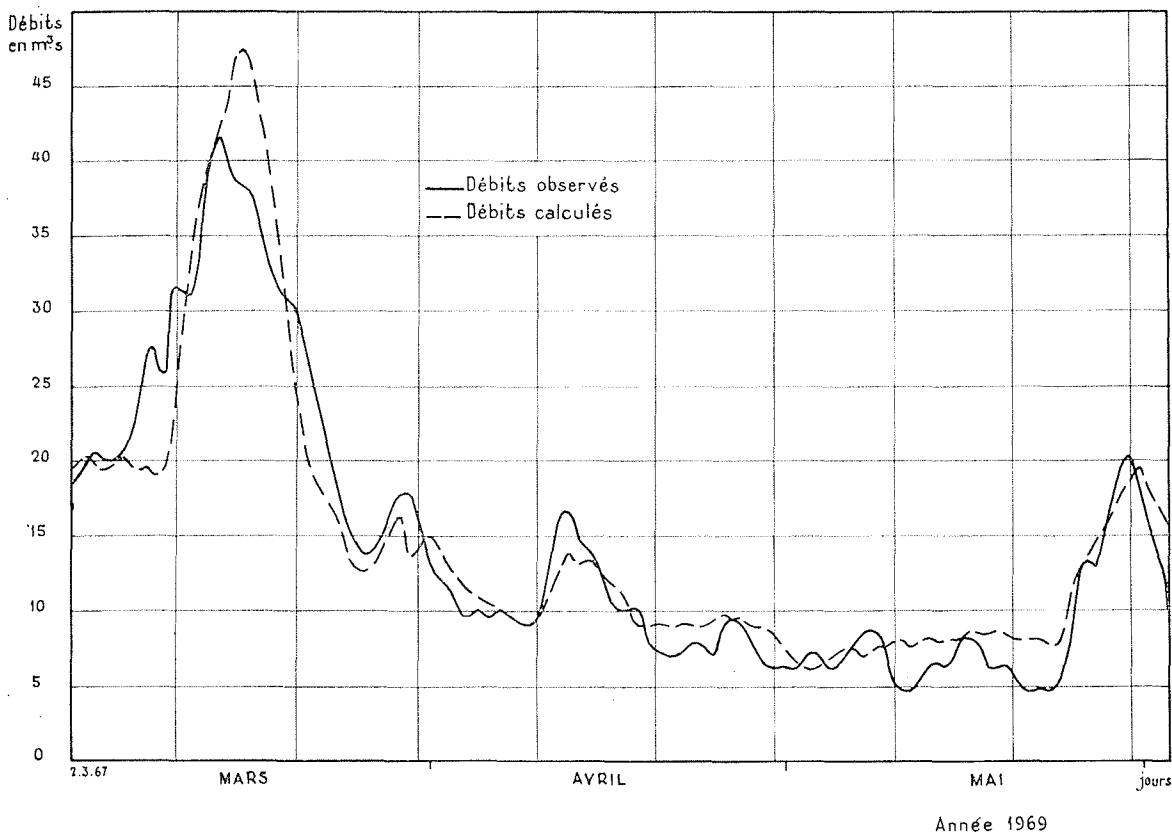
Nous avons fait deux hypothèses :

— Aucun modèle de propagation globale ne pouvant tenir compte des conditions aval qui déterminent la fermeture des portes, l'on s'est fixé des conditions aval fictives (conditions permettant un écoulement normal de l'Authion) et les débits obtenus pendant la fermeture des portes ne sont donc pas naturels. Cette hypothèse permet d'assurer la continuité des débits et donne des valeurs proches des débits naturels avant et après fermeture des portes. Il s'agit en quelque sorte de débits fictifs correspondant aux apports de l'Authion et ses affluents vers la basse vallée, qui s'évacueraient si les cotes de Loire le permettaient (en quelque sorte les débits qu'il faudra évacuer lorsque la station de pompage fonctionnera).

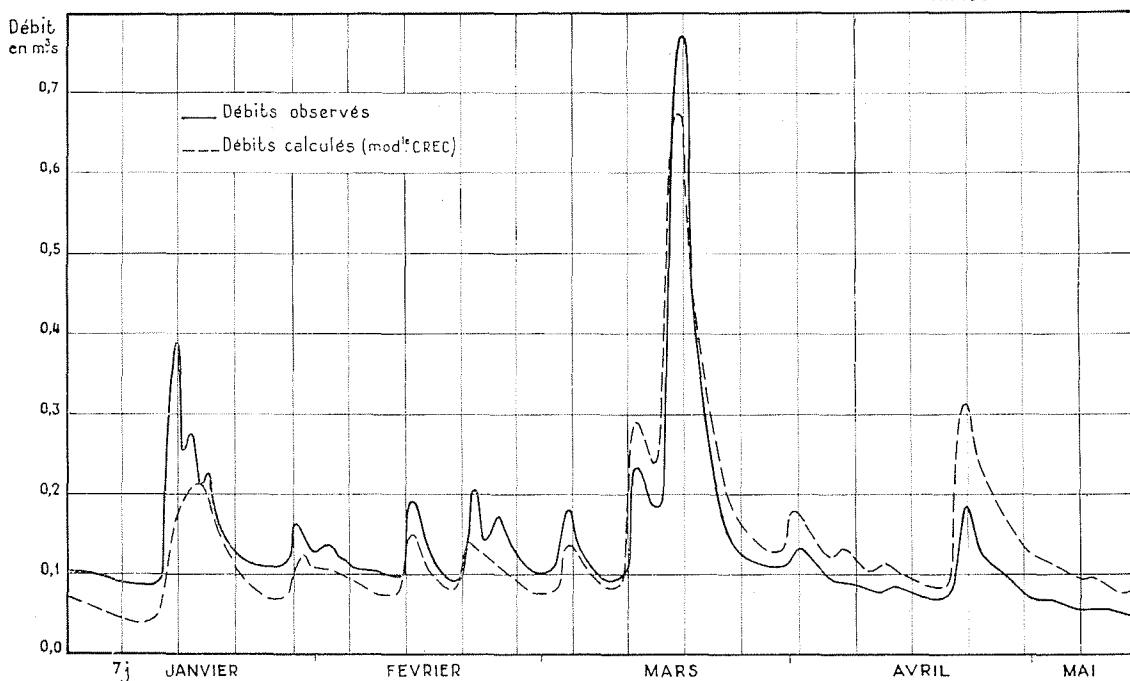
— Etant donné l'amplitude de variation de la Loire à Ste-Gemmes (4 m), il n'était pas possible de concevoir un



8/ L'Authion. Crue du 15 novembre 1967. Hydrogrammes au Pont Bourguignon.



9/ Reconstitution des débits journaliers de l'Authion à Pont Bourguignon.



10/ Reconstitution des débits journaliers sur le Tary à Gruteau.

modèle basé sur un noyau de convolution unique (conditions aval trop différentes).

Au produit de convolution :

$$Q(t) = \int_0^t E(t - \tau) K(\tau) d\tau$$

ou E était le débit d'entrée et K la fonction de Kernel en général indépendante de E, l'on a substitué un modèle par seuils de débits successifs où K et E ne sont pas indépendants.

Cette notion évite de considérer autant de fonctions de Kernel qu'il y a d'entrées E. En effet pour un débit compris entre deux valeurs  $E_m$  et  $E_M$ , l'on peut considérer qu'un seul et même noyau  $K_{Ei}$  s'applique.

L'application de cette méthode utilise un test sur les conditions limites à l'amont alors que le facteur qui semble le plus influencer la propagation est la variabilité des conditions aval; cela revient donc à faire la supposition qu'il existe une bonne corrélation entre les débits amont de l'Authion et les conditions aval d'écoulement; le modèle qui utilise cette hypothèse fournit donc les débits de l'Au-

thion réellement écoulés quand il n'y a pas fermeture des portes et des débits fictifs pendant la fermeture des portes.

L'examen comparé des courbes de débits spécifiques et l'hypothèse selon laquelle les temps de propagation sont proportionnels à la distance parcourue, ont permis de déterminer les plages d'application des différents noyaux (quatre plages avec trois seuils correspondant à des seuils de base, de crue et de débordement) et les temps de propagation.

Il a fallu, en outre, compte tenu du bassin versant non contrôlé, affecter les différentes fonctions de transfert d'un coefficient multiplicatif (coefficient 2 du modèle précédent).

Les résultats de cette étude sont résumés par les hydrogrammes de l'Authion à Pont-Bourguignon. Les écarts entre les valeurs observées et calculées en 1967 et 1968 montrent la précision obtenue (cf. fig. 9 pour début 1969).

## 6. — La qualité des résultats

En plus des difficultés de mesures déjà signalées, les difficultés rencontrées lors de la phase d'analyse des données récentes proviennent de la faiblesse de l'échantillon analysé. Il ne faut pas oublier que les périodes de crues et tarissement sont directement liées au régime des pluies, c'est-à-dire à l'échelle de quelques mois d'une année et que toutes les courbes ne sont pas exploitables; d'autant plus que les deux années d'observations utilisées pour bâtir les modèles n'ont pas été particulièrement favorables à l'analyse du mécanisme de formation et de propagation de l'écoulement sur l'Authion.

Ainsi le nombre de crues et de périodes de tarissement exploitables a été inférieur au nombre souhaitable qui varie d'ailleurs d'une façon importante d'un bassin à l'autre du fait des difficultés de contrôle permanent au niveau des stations de jaugeage et des caractéristiques du réseau hydrographique particulièrement défavorable à cause des perturbations artificielles fréquentes (Loire, moulins, barrages mobiles, prélèvements de débits pour irrigation, déviations, agitation) et des pentes d'écoulement très faibles.

Ces difficultés ont été surmontées par le groupement des bassins et la détermination de relations moyennes lorsque cela était possible du fait de l'homogénéité physique des différents sous-bassins (pente, géologie, végétation...), mais elles influencent de façon certaine la qualité des résultats obtenus.

A ce sujet, l'application des modèles aux données recueillies ultérieurement à 1969 permet la confrontation partielle entre l'information reconstituée et observée.

Dans les conditions de réalisation et de calage des modèles de débits, les résultats obtenus pour les débits moyens journaliers peuvent être considérés comme satisfaisants et largement suffisants pour répondre aux problèmes immédiats qui se présentent.

Nous avons représenté à titre d'exemple les hydrogrammes des séries reconstituées d'un affluent de l'Authion, le Tary (fig. 10). Cependant, il est évident que la validité d'un modèle est due non seulement à l'adéquation des débits calculés aux débits réels, mais aussi à l'ampleur de l'échantillon ayant servi au calage et à celle de l'échantillon ayant servi au test.

A ce sujet, l'on peut penser que les débits obtenus à Pont-Bourguignon peuvent être améliorés de façon sensi-

ble, en particulier grâce à l'emploi d'un modèle de propagation des débits journaliers mieux adapté ou même d'un modèle déterministe comme cela a déjà été tenté qui permet de déterminer à chaque instant chacune des deux composantes de l'écoulement (ruissellement et écoulement souterrain) à partir de relations obtenues au préalable par l'analyse des hydrogrammes de crues et de décrues.

Les débits mensuels ont pu être reconstitués avec une erreur de l'ordre de 5 % en moyenne.

Les débits annuels sont obtenus avec une précision moyenne de l'ordre de 3 % et dans 80 % des cas avec une erreur inférieure à 20 %.

Enfin, la précision des modèles de décrues est acceptable puisque l'erreur commise sur l'estimation des débits reste inférieure à 20 %, 9 fois sur 10 et à 30 % 99 fois sur 1 000.

Cependant, des périodes de décrues beaucoup plus longues nous permettront de tester plus sérieusement et ultérieurement la validité de ces résultats, car si les débits reconstitués sont sous-estimés en début de décrue, ils ont tendance à être surestimés quand elle se prolonge.

## 7. — Conclusion

Conformément aux objectifs initiaux, cette étude a donc permis, dans les délais impartis, l'obtention d'une information hydrologique complémentaire indispensable à l'établissement des projets ou avant-projets des ouvrages qui permettront d'assurer le contrôle et la maîtrise de l'eau sur le bassin.

Cependant, si ces résultats suffisent pour répondre dans un premier temps aux problèmes immédiats, ils ne permettent pas encore la définition précise des crues théoriques à longue période de retour et sont encore insuffisants pour résoudre tous autres problèmes hydrologiques qui se poseront à une échéance plus lointaine, en particulier les problèmes de gestion des ouvrages réalisés.

De plus, il est évident que la validité des données reconstituées comporte une certaine marge d'incertitude à cause de la difficulté de calage des différents modèles due à la taille de l'échantillon utilisé à cet effet et au caractère subjectif du modèle choisi.

Néanmoins, l'intérêt que représentent ces dix-huit années de débit moyen journalier est certain, en tant qu'outil de travail indispensable et complément souhaitable des autres études réalisées ou en cours (pédologie, étude des ressources d'eau souterraine). D'autant plus qu'on ne saurait attendre pour se protéger contre les inondations et projeter des plans d'aménagement valables que les connaissances hydrologiques soient suffisantes pour constituer les ouvrages idéaux.

En plus, cette série représente une source de renseignements importants destinée à être complétée par la poursuite des mesures complémentaires actuelles et par d'éventuelles études permettant de recalibrer les modèles utilisés sur une plus longue série de débits de référence.

D'autre part, cet intérêt pratique se double d'un intérêt méthodologique non moins intéressant, à savoir d'une façon générale l'obtention de renseignements indispensables concernant le régime des cours d'eau, malgré l'absence de toute série de longue durée, par caractérisation du style de relations pluie-débit et du type de mécanismes mis en jeu.