



LES MODÈLES DÉTERMINISTES DE TRANSFORMATION PRÉCIPITATION-DÉBIT

par G. MOUGIN et
J.-M. DUJARDIN

SOGREAH, Service Hydrologie.

Introduction à l'hydrologie de systèmes régionaux

Les aménagements hydrauliques assurent des fonctions économiques et sociales, de production énergétique, agricole, industrielle, de transport, de développement urbain et touristique, de mieux en mieux coordonnées sur un territoire de plus en plus étendu. Les techniques d'études hydrauliques connaissent un développement et une évolution, sinon une mutation dans leur nature, commandées par le caractère régional et intégré ainsi conféré à l'action de l'homme sur l'eau.

A l'hydrologue revient la tâche première de recenser et de localiser les ressources en eau, richesse déterminante de la région. Puis celle de renseigner sur le comportement, au fil du temps, des cours d'eau, des lacs ou des marais dont l'aménagement à des fins globales déterminées peut se concevoir, *a priori*, selon diverses alternatives d'action sur le milieu naturel.

Pour cela, l'hydrologue brasse de grandes masses d'informations de nature la plus diverse. Avec les informations bien imparfaites dont il dispose ordinairement, l'hydrologue bâtit une image du complexe hydraulique naturel de la région. Une image qui doit être malléable, puisque destinée à des retouches, à des essais de modification du milieu naturel, c'est-à-dire à des essais de préfiguration d'avenirs possibles.

L'ordinateur apporte la puissance, la souplesse et la rapidité de calcul nécessaire à l'entreprise de l'hydrologue. Ce dernier va formuler commodément l'image hydraulique

de la région par des équations numériques dont le système constitue ce qu'il est convenu d'appeler un modèle mathématique.

L'évolution de la méthode hydrologique, entraînée par les développements récents des études d'aménagement et par l'apparition de moyens de calcul nouveaux, mérite d'être retracée dans ses grandes lignes.

L'hydrologie, entendue comme l'étude des eaux de surface dans leur cycle naturel, évolue à la mesure de son champ d'application. Technique physique, elle apporte des méthodes de traitement et d'interprétation de masses d'observations portant sur des phénomènes naturels.

La forme la plus élémentaire de l'outil hydrologique est la statistique, dans la pleine acception du terme, c'est-à-dire la collection organisée de nombreuses données d'observation. L'annuaire est la forme originelle de l'hydrologie.

Mais sous cette forme, l'outil hydrologique n'est guère maniable, et il se borne à décrire ce qui est déjà connu.

Tout naturellement, la condensation de la statistique hydrologique, par la méthode du calcul des probabilités, a été utilisée pour définir la collection complète des observations par quelques valeurs synthétiques qui résument et caractérisent cette collection. La méthode hydrologique s'est alors identifiée à la Méthode Statistique purement et simplement appliquée aux faits d'observation hydrologique.

L'introduction de la Méthode Statistique en hydrologie est un progrès sur le simple annuaire, non seulement parce que cette méthode permet de condenser et de synthétiser

la masse des informations, mais aussi parce qu'elle apporte à l'hydrologue :

- un moyen de projection hors du cercle des cas observés : l'extrapolation;
- et un moyen de rattachement entre elles d'informations discontinues dans le temps ou dans l'espace : la corrélation.

L'exploitation d'annuaires par la méthode statistique garde encore toute sa valeur pour la résolution des problèmes hydrologiques qui ont trait aux aménagements ponctuels ou spécifiques, y compris les aménagements de périmètres agricoles ou urbains, considérés isolément.

Mais entrons dans le domaine des aménagements intégrés qui intéressent tout un bassin, ou toute une région. Le thème des études n'est plus l'ouvrage ou l'unité d'aménagement, mais le territoire en tant qu'entité géographique où ressources de toute nature et systèmes de mise en valeur sont en interaction complexe. En hydrologie notamment, cela se traduit par :

- une augmentation et une diversification considérables de la masse des informations à manipuler, nécessaires pour acquérir une vue d'ensemble, synoptique, des phénomènes multiples qui déterminent le comportement hydraulique de la région;
- des études d'exploitation des différents systèmes possibles d'aménagement, qui peuvent se multiplier grandement.

En somme, l'hydrologie de l'aménagement de bassin régional ou plus généralement du territoire, se trouve marquée de façon déterminante par la triple nécessité :

- du traitement de grandes masses de données;
- d'opérer des synthèses synoptiques;
- de procéder à l'étude du fonctionnement de systèmes, au prix de jeux d'essais multiples.

L'ordinateur est l'instrument de calcul qui permet à l'hydrologue d'accéder véritablement à la dimension régionale. Non seulement parce qu'il met une très grande puissance et souplesse de calcul au service des méthodes déjà acquises, mais parce qu'il ouvre le champ à de nouvelles conceptions du traitement de l'information. Ainsi :

- le Centre de Documentation et la Banque de Données viennent prendre le relais de l'annuaire traditionnel;
- la simulation par le calcul, qui opère la transformation de tout un système de données en des suites chronologiques (réelles ou synthétiques) de valeurs-résultats aussi variées que nécessaires, va pouvoir se substituer à la production de résultats « raccourcis », ou valeurs-types (quelques valeurs fréquentielles, ou bien hydrogrammes-types, par exemple) dont il fallait bien se contenter auparavant.

Au développement de la méthode statistique appliquée à l'hydrologie des systèmes régionaux, l'ordinateur ajoute la possibilité nouvelle de s'exercer à la compréhension, par une approche conceptuelle, des mécanismes physiques essentiels qui régissent la genèse et la circulation des eaux de surface. La simulation par le calcul accède à un niveau de développement qui permet à l'hydrologue de traduire la diversité et l'évolutivité essentielles des phénomènes naturels, en filmant en quelque sorte la vie de ces phénomènes.

Ceci est un progrès considérable sur la méthode « photographique » de la valeur-type, qui figeait nécessairement le phénomène naturel dans un état, et ce progrès devait être réalisé en hydrologie pour que cette technique soit en mesure d'intervenir fructueusement dans les opérations d'aménagement du territoire.

Composantes d'un modèle mathématique hydrologique Les simulateurs de transformation globale Précipitation — Ecoulement

SOGREAH a choisi d'accorder la priorité au développement de modèles mathématiques hydrologiques d'essence conceptuelle :

- parce que ce genre de modèle est réalisable et exploitable sans exiger une quantité et une qualité extraordinaires de données d'observation;
- et parce que l'intérêt pratique d'un modèle réside finalement dans son aptitude à préfigurer l'avenir, grâce à la malléabilité conférée par la méthode déterministe à la simulation du milieu naturel.

Nous considérons qu'un modèle mathématique hydrologique peut avoir à remplir jusqu'à quatre fonctions bien distinctes; chacune d'elles marquant en quelque sorte un « étage » du modèle :

1. — Une fonction de transformation des précipitations solides (neige) en eau disponible au sol pour l'écoulement, qui simule le comportement de la réserve nivale.

2. — Une fonction de transformation globale de l'eau pluviale disponible à la surface d'une aire élémentaire du bassin, en écoulement à la sortie de cette aire élémentaire.

3. — Une fonction de propagation et de composition dans le réseau hydrographique des écoulements fournis par les aires élémentaires.

4. — Une simulation du fonctionnement des ouvrages hydrauliques et de leur action sur les écoulements naturels (pompages, dérivations, retenues, endiguements, etc.).

La fonction de type 1 intervient dans les modèles de fusion nivale. Il en existe déjà diverses expressions déterministes, satisfaisantes dans leur principe et pour des études régionales. Nous n'avons pas ressenti l'intérêt de développer des méthodes originales dans ce domaine, les difficultés de réalisation de modèles pratiques de fusion nivale venant bien davantage du manque fréquent de données d'observation sur les chutes de neige et sur la réserve nivale, que de la formulation des processus de formation et de fusion de la réserve neigeuse.

Les fonctions de type 3 et 4 interviennent dans les modèles hydrauliques, et nous les utilisons en hydrologie, entre autres applications. SOGREAH a adopté la méthode implicite pour la résolution des équations de Barré de Saint-Venant, et a développé des programmes de calcul pour la constitution de modèles hydrodynamiques unidimensionnels ou bidimensionnels. En hydrologie, nous faisons volontiers appel à la méthode simplifiée, bien connue sous le nom de Muskingum, pour calculer la déformation de l'onde de crue qui se propage, par simple analyse des volumes qui transitent dans un tronçon du cours d'eau, en tenant compte au besoin des pertes d'eau par infiltration dans les lits.

La fonction du type 2 de la transformation de l'eau pluviale disponible (*) en débit par des méthodes déterministes a été depuis assez longtemps une des principales préoccupations des hydrologues, mais ce n'est que vers les

(*) NOTE : Nous appelons ainsi la quantité d'eau rendu disponible pour la phase terrestre du cycle hydrologique. S'il s'agit de pluie, c'est la quantité d'eau tombée; s'il s'agit de couche neigeuse, c'est la quantité d'eau libérée par fusion.

années 60 que l'on vit nettement deux corps de doctrine s'élaborer, qui conduisent soit aux modèles complets de balance hydraulique, soit aux modèles partiels limités au ruissellement. Les premiers s'attachent à une analyse du phénomène, avec le souci de réaliser un bilan des eaux et un transfert de ces eaux d'un poste à l'autre du bilan, en schématisant de façon orthodoxe le cheminement des eaux. Les seconds ne s'attachent qu'à la phase de ruissellement du mouvement des eaux météoriques pour mettre en pratique une équation rationnelle du transfert averse-crue, mais cette rationalité n'est pas nécessairement garante d'une reproduction fidèle des mécanismes naturels.

Le même schéma général du cycle des eaux météoriques vaut pour les deux genres de modèle : une partie de l'eau disponible s'écoule en surface, pour constituer le ruissellement; une autre partie est interceptée par la végétation ou stagne sur le sol, pour s'évaporer par la suite; le reste s'infiltré dans le sol. C'est à ce dernier point du schéma que les deux genres de modèles se séparent quant à leur principe et quant à leur domaine d'application.

D'un auteur à l'autre, la représentation de la transformation hydropluviométrique globale de même genre — complet de bilan ou partiel de ruissellement — diffère principalement par le choix des paramètres de réglage du modèle.

La tendance générale est à l'élaboration de modèles compliqués, à nombreux paramètres de réglage, pour tenter de représenter le plus fidèlement possible la réalité complexe des écoulements dans les cas les plus variés. Misant sur la méthode conceptuelle, le physicien est en effet grandement tenté de chercher à comprendre et à expliquer le plus possible des phénomènes naturels en jeu dans le bassin. Mais alors est-il entraîné par son ambition à des constructions de modèles de recherche, certes très souples, basés sur une connaissance expérimentale appropriée des facteurs naturels des écoulements.

Malheureusement, l'Ingénieur ne dispose généralement pas de données d'observation très sophistiquées, pour établir les bases hydrologiques de son projet d'aménagement du territoire. Il doit se contenter la plupart du temps d'exploiter les résultats d'observations classiques, de consistance très inégale, qu'il trouve dans les annuaires ou dans les archives, et qu'il ne peut compléter que par des observations de terrain, assez simples pour être réalisables avec les moyens locaux dont il dispose.

Ceci est le lot habituel du Bureau d'Etudes qui attend d'abord du modèle hydrologique de bassin une représentation des mécanismes essentiels de formation des ressources en eau et des écoulements, suffisante pour prévoir l'effet des aménagements possibles et pour guider le choix du meilleur parti d'aménagement.

Pour ces raisons, SOGREAH a trouvé intérêt à développer des modèles de transformation globale pluie-débit qui répondent bien aux exigences pratiques des études d'aménagement du territoire. Ces modèles, de principe déterministe, ont pour traits caractéristiques le petit nombre des paramètres de réglage, qui confèrent toutefois une souplesse suffisante aux ajustements, et le seul emploi des données courantes d'observation, pour l'établissement et l'exploitation des modèles.

Les modèles de ruissellement

Dans les modèles de ruissellement, on considère comme pertes, au moins provisoirement, aussi bien l'infiltration que l'évaporation. On cherche à tenir compte de ces pertes de façon globale, soit par un paramètre soustractif (mé-

thode de la capacité d'absorption), soit par un coefficient (méthode du coefficient de ruissellement). Ce point de vue tient compte du fait que la plus grande partie de l'évaporation est produite en dehors de la période de précipitation par reprise de l'eau retenue sur le terrain ou contenue dans le sol et par l'évapotranspiration des végétaux. Le devenir de l'eau infiltrée n'est pas explicité; à part les reprises par évaporation, on la retrouve dans le débit de base des cours d'eau. L'eau rendue disponible pour le ruissellement est mise en forme par une fonction d'étalement et transmise à l'exutoire par le réseau qui fait subir à l'hydrogramme une nouvelle déformation.

Cette représentation simplifiée de la transformation pluie-débit et limitée à l'étude du ruissellement n'est valide que pendant la période des précipitations. Ce type de modèle est utilisable uniquement pour l'étude et pour la prévision des crues. Il implique un pas de temps de calcul assez court, compatible avec le temps de réponse du bassin étudié, et généralement au plus égal à 24 h.

Modèle Prévik.

C'est à ce type de modèles « de ruissellement » que correspond le modèle de prévision des crues, dit « Prévik » mis au point par SOGREAH en 1966. Dans notre schéma, la transformation pluie-débit s'effectue en deux opérations :

- la transformation de la précipitation en pluie nette, disponible pour le ruissellement (fonction production);
- la déformation de la pluie nette par une fonction d'étalement dans le temps pour trouver l'hydrogramme à l'exutoire du bassin (fonction modulation).

a) FONCTION PRODUCTION - CALCUL DE LA PLUIE NETTE.

La pluie nette R_j associée à chaque pas de temps à la précipitation P_j est calculée par l'intermédiaire du coefficient de ruissellement C_j :

$$R_j = C_j P_j$$

Le coefficient de ruissellement à appliquer à la précipitation dépend fondamentalement de la saturation du sol I_j résultant de la saturation initiale et des pluies reçues par le bassin au cours de la phase antérieure de la perturbation. La saturation initiale est généralement calculée à partir du débit de la rivière au début de la perturbation :

$$I_0 = f(Q_0)$$

On peut suivre l'évolution de l'indice I_j à chaque pas de temps par la formule de récurrence :

$$I_j = k (I_{j-1} + P_j)$$

L'étude d'un certain nombre de crues du passé montre que pour une valeur du paramètre k correctement choisie, la corrélation est forte entre C et I . On peut exprimer le coefficient de ruissellement par la formule :

$$C_j = a I_{j-1} + b I_j$$

Si le pas de temps du calcul est court, on peut même prendre $b = 0$. Il faut cependant limiter le coefficient de saturation par une valeur maximale I_{\max} pour lequel le sol est saturé et auquel correspondra un coefficient de ruissellement maximal.

b) FONCTION DE MODULATION - CALCUL DU DÉBIT.

Pour déterminer, à partir de la pluie nette, l'hydrogramme de la crue à l'exutoire du bassin, nous admettons que la pluie nette R_j se répartit au cours des pas de temps successifs en :

- montée de crue :
 - $x R_j$ pendant la pluie elle-même (pas de temps J);
 - $y R_j$ pendant le pas de temps $J + 1$;
 - décrue :
 - $ay R_j$ pendant le pas de temps $J + 2$;
 - $a^2 y R_j$ pendant le pas de temps $J + 3$;
- et de sorte que $x + y(1 + a + a^2 + \dots) = 1$.

La lame d'eau écoulée pendant chaque pas de temps est obtenue en sommant les écoulements dus aux différentes pluies élémentaires précédentes. Ceci conduit à l'équation :

$$Q_{j+1} = a Q_j + x R_{j+1} + (1 - a - x) R_j$$

Nous avons, jusqu'à présent, admis dans nos modèles que la grandeur x est une constante déterminée sur les averses de durée totale égale au pas de temps et que la grandeur a est une constante caractérisant le tarissement du ruissellement rapide, déterminée sur les hydrogrammes de décrue.

Dans le principe toutefois, rien n'empêche de sophistication le réglage en considérant x et a comme des paramètres variables à chaque pas de temps en fonction de la pluie ou du débit antérieurs.

c) ETUDE DU BASSIN VERSANT.

Le bassin versant à étudier peut être assez grand et nécessiter un découpage en plusieurs bassins élémentaires auxquels on applique la méthode de transformation pluie-débit précédente. Dans ce cas, les débits calculés sur chacun des bassins élémentaires sont repris par un modèle de propagation qui calcule le débit résultant à l'exutoire général du bassin.

d) PRÉVISION DES CRUES.

Pour la prévision de crues en temps réel, si nous nous plaçons à la fin du pas de temps J , nous ne connaissons pas R_{j+1} , ni par conséquent la partie $x R_{j+1}$ du débit qui correspond à la pluie qui s'écoule dans le pas de temps même où elle se produit (à moins de faire appel à une prévision météorologique ou à un examen probabiliste de la pluie à venir). La valeur trouvée pour x indique le poids des éléments inconnus au moment où se fait la précision.

Finalement la transformation pluie-débit se ramène au calcul, pour chaque pas de temps, des trois équations suivantes :

$$I_j = k (I_{j-1} + P_j) \leq I_{\max}$$

$$R_j = (a I_{j-1} + b I_j) P_j$$

$$Q_{j+1} = a Q_j + (1 - a - x) R_j + x R_{j+1}$$

qui sont suffisamment simples pour permettre à un service d'annonce des crues de faire ses prévisions, une fois les différents paramètres réglés sur les crues du passé, sans le secours d'un ordinateur.

Deux exemples d'études entreprises par SOGREAH illustrent le domaine d'application de notre modèle Prévik.

Les modèles de balance hydraulique

Dans les modèles de balance hydraulique, on cherche à suivre de plus près la réalité physique de l'équilibre des échanges hydrauliques et le cheminement de l'eau dans le sol.

Au premier niveau (la surface du sol), on distingue les pertes par évaporation des infiltrations se dirigeant vers le second niveau (la subsurface), le reste de l'apport météorique constituant le ruissellement rapide. Le second niveau se rapporte à la zone d'alimentation d'un écoulement retardé, dit de subsurface ou hypodermique, se produisant dans des conditions différentes de celles du ruissellement rapide. C'est à ce niveau que débute l'infiltration proprement dite de l'eau dans le sol et son cheminement à travers les différentes couches perméables.

Durant une averse, la progression de l'eau infiltrée se fait d'abord à travers une tranche de sol non saturée que l'on appelle zone aérée, et qui constitue le troisième niveau du modèle.

Les excédents de la zone aérée peuvent, soit remonter vers la surface et participer à l'écoulement retardé, soit remplir le quatrième niveau que constituent les nappes souterraines. Ce réservoir alimente le débit de base de la rivière. On peut tenir compte éventuellement d'apports ou de fuites en relation avec la nappe souterraine, point de jonction avec les modèles hydrogéologiques des nappes profondes.

Construire un modèle de transformation pluie-débit, c'est traduire par des expressions mathématiques les relations entre les différents éléments du schéma précédent. Il s'agit de représenter à chaque pas de temps du calcul l'équilibre qui tend à s'établir entre chacun des niveaux, l'effet du déséquilibre constaté à un moment donné pouvant se répercuter sur les pas de temps successifs. Ce genre de modèles est apte à reproduire le régime de la rivière tout au long du cycle hydrologique, qu'il y ait ou non précipitation, et convient particulièrement à l'étude des régimes saisonniers. Mais il convient d'adopter un pas de temps de calcul assez long pour permettre au bilan de l'eau de s'équilibrer à chaque niveau du schéma, pas de temps qui peut aller de quelques jours à un mois.

Modèle Bilik

C'est à ce type de modèle de balance hydraulique que correspond le modèle « Bilik » mis au point par SOGREAH en 1969.

Les processus physiques en jeu dans la nature sont extrêmement complexes. La méthode qui ambitionnerait la représentation du cycle de l'eau, avec beaucoup de détails, s'exprimerait par une série d'équations théoriquement acceptables mais pratiquement inutilisables car faisant appel à un grand nombre de paramètres le plus souvent indéterminables. Nous pensons qu'un modèle conceptuel n'est exploitable que s'il n'explicite schématiquement que les phénomènes essentiels de la réalité qui ont un effet prépondérant sur le résultat. Il ne faut pas expliciter, dans le schéma, certains des phénomènes physiques dont on sait pourtant qu'ils existent mais dont on sait aussi que leur effet est négligeable ou que l'effet de plusieurs de ces phénomènes, agissant dans le même sens, peut être représenté par un seul paramètre.

Une méthode simple, ne faisant intervenir que les principaux termes du bilan, ne peut évidemment pas prétendre à une représentation détaillée et complète du mouvement des eaux dans un bassin. C'est cependant la voie de recherche qui permet le plus rapidement d'aboutir à des résultats concrets.

C'est aussi la seule qui permette d'exploiter les données de base classiques (pluies, températures, débits) dont on dispose généralement, sans nécessiter une lourde campagne de mesures complémentaires.

C'est pourquoi notre modèle est basé sur une schématisation assez simple, un nombre d'équations réduit et surtout un nombre de paramètres raisonnable, chacun d'eux ayant un rôle précis et un effet réel sur le résultat. Si le modèle est bien conçu, il donne des résultats aussi précis qu'un modèle beaucoup plus sophistiqué. Le réglage devient beaucoup plus facile avec un petit nombre de paramètres et peut se faire par des corrélations ou des méthodes statistiques.

a) EQUATIONS DU MODÈLE.

Les données nécessaires au modèle sont les précipitations P et l'évapotranspiration potentielle ETP . Celle-ci peut être calculée par l'application de formules classiques faisant intervenir la température moyenne de l'air, l'humidité relative, les durées d'ensoleillement. Il vaut toujours mieux avoir certaines valeurs expérimentales de l' ETP (piche, bac) pour faciliter le choix de la formule théorique qui convient à la région étudiée, c'est-à-dire qui donne la meilleure estimation de la modulation mensuelle de l' ETP annuelle. L'estimation de cette dernière varie assez peu d'une formule à l'autre.

Au niveau de la surface, on prélève l'eau disponible pour le ruissellement rapide qui rejoint directement l'exutoire :

$$RI = CP$$

Le coefficient de ruissellement est variable et lié à l'état de la réserve aérée au moment où la précipitation se produit. Cette variation est linéaire entre deux valeurs extrêmes :

$$C = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \frac{R}{R_{\max}}$$

Le reste de la précipitation, comparée à l'évapotranspiration potentielle, permet de déterminer l'excès ou le déficit d'humidité :

$$DPE = P(1 - C) - ETP$$

Si $DPE > 0$, au niveau de la subsurface, l'excès d'humidité est réparti en eau disponible pour le ruissellement retardé $SS = D DPE$ et en infiltration vers la zone aérée $DR = (1 - D) DPE$.

Si $DPE < 0$, au niveau de la subsurface, le déficit d'humidité est compensé en partie par une remontée de la zone aérée vers la surface pour participer à l'évaporation. Cette remontée est fonction du déficit et de l'état de la réserve $DR = |DPE| R/R_{\max}$.

C'est au niveau de la zone aérée que s'effectuent le bilan et l'équilibre de la réserve dont on a défini la capacité maximale de rétention R_{\max} et dont on peut calculer la variation à chaque pas de temps :

$$R_{j+1} = R_j + DR \leq R_{\max}$$

Si la réserve est entièrement reconstituée, il se produit un excédent d'apport EC . Une partie de celui-ci remonte vers le niveau supérieur (ou en réalité n'a pu s'infiltrer jusqu'à la zone aérée déjà saturée) et va participer au ruissellement retardé :

$$SE = X EC$$

L'autre partie va s'infiltrer jusqu'à la nappe souterraine et participer au débit de base :

$$AP = (1 - X) EC$$

b) FONCTION D'ÉTALEMENT.

La somme des écoulements retardés subit une fonction d'étalement qui répartit l'écoulement entre les pas de temps successifs selon une loi à deux paramètres a et β , où a est un paramètre caractérisant le tarissement du débit retardé et où β est un paramètre assimilable à un temps de montée.

Soit $E = SS + SE$.

Les écoulements successifs par pas de temps sont :

$$QR_1 = \beta (1 - a) E;$$

$$QR_2 = (1 - \beta) (1 - a) E + a QR_1;$$

$$QR_3 = a QR_2, \text{ etc.}$$

ce qui conduit à l'équation de l'écoulement total dû aux E antérieurs :

$$QR_{j+1} = a QR_j + (1 - a) \beta E_{j+1} + (1 - a) (1 - \beta) E_j$$

Sous une écriture légèrement différente, c'est la même formule de modulation que celle que nous avons utilisée dans notre modèle de ruissellement « Prévik ».

Il s'agit là d'une équation du type de la formule Muskingum qui représente la propagation d'un débit à travers un tronçon fluvial où E serait le débit entrant et QR le débit sortant.

En reliant les valeurs a et β aux paramètres de la méthode Muskingum, K , temps de propagation et x coefficient d'amortissement, on peut assimiler la transformation de l'écoulement retardé E en débit QR à la propagation de cet écoulement à travers un tronçon fluvial fictif équivalent. Pour que la correspondance, avec la méthode Muskingum, soit complète, il faudrait que nous puissions moduler les valeurs de a et β en fonction de E . Jusqu'à présent, nous avons utilisé des valeurs a et β constantes, mais on peut penser qu'une modulation des paramètres obtenue au cours du réglage est possible et qu'elle donnera des résultats intéressants.

Le débit total, à l'exutoire du bassin, est à chaque pas de temps la somme du débit de ruissellement rapide, du débit retardé et du débit de base :

$$Q = RI + QR + QB$$

c) RÉGLAGE DU MODÈLE.

Le schéma de calcul comporte donc sept paramètres.

Trois d'entre eux ont un effet déterminant sur le volume de l'écoulement résultant du bilan :

— R_{\max} la capacité de la réserve aérée;

— C_{\max} , C_{\min} les limites du coefficient de ruissellement rapide.

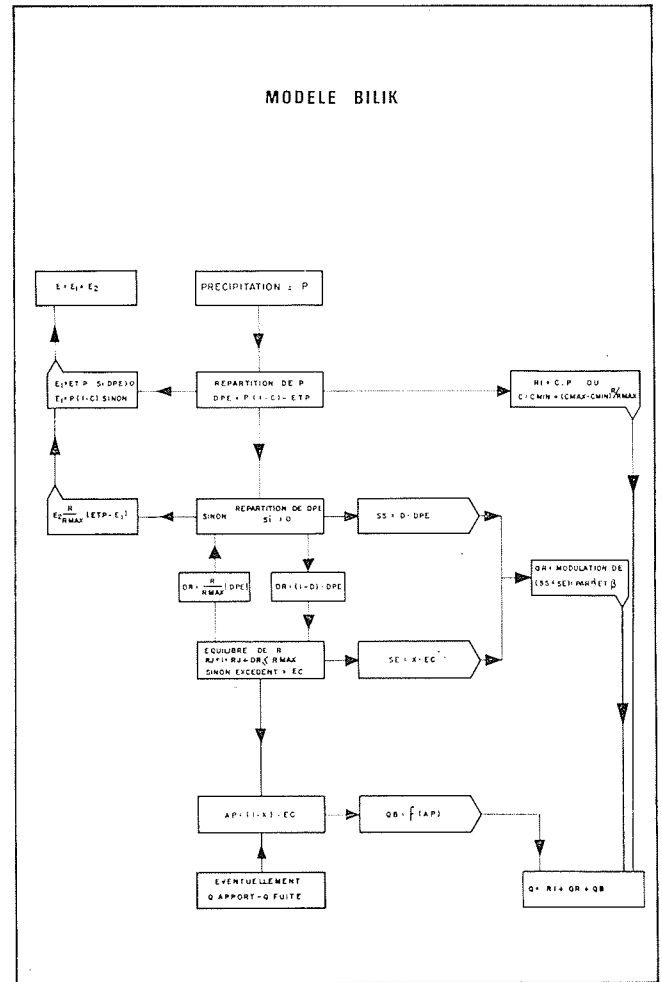
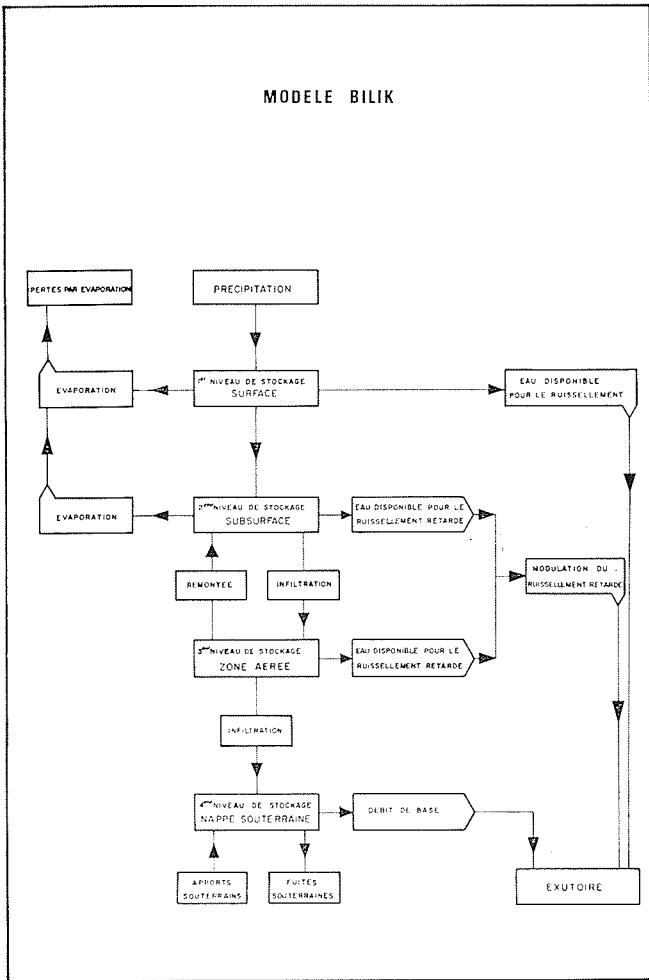
Le quatrième, D , le coefficient de ruissellement retardé, a un effet sur le volume de l'écoulement pratiquement négligeable en regard de celui des trois précédents et il s'agit beaucoup plus d'un paramètre de forme.

Les trois autres paramètres n'ont aucun effet sur le volume total écoulé sur une longue période mais déterminent la répartition dans le temps de cet écoulement :

— x coefficient de répartition entre débit retardé et débit de base;

— a et β coefficients de modulation du débit retardé.

Le réglage du modèle se fait en deux temps : étude de la fonction production et étude de la modulation dans le temps. Les critères de qualité du réglage sont d'une part la différence entre les volumes totaux calculés et observés sur la période de réglage, d'autre part un critère de forme qui peut être l'écart type des différences entre débit calculé et débit observé.



FONCTION PRODUCTION.

Les effets des trois paramètres qui influent sur le volume écoulé ne sont pas indépendants et il existe plusieurs valeurs associées des trois paramètres R_{max} , C_{max} , C_{min} qui donnent le même volume d'écoulement, avec une répartition différente dans le temps.

Un programme de réglage permet, pour des valeurs de x , a et β estimées au départ, de construire la fonction $f(R_{max}, C_{max}, C_{min}) = 0$ qui donnera un volume d'écoulement égal au volume observé.

FONCTION MODULATION.

Ce programme donne en même temps la valeur qu'il faut donner au paramètre D en chaque point de la fonction précédente pour minimiser l'écart type des différences et la valeur correspondante de cet écart type.

Ceci doit permettre de choisir la zone qui donne la meilleure reproduction de la forme de l'hydrogramme. On peut répéter l'opération pour diverses valeurs de x , a et β jusqu'à obtenir un réglage optimal.

Dans la pratique, le réglage ne peut cependant pas être confié entièrement à l'automatisme d'un programme et l'examen par un hydrologue averti, capable de comprendre le sens physique de chaque paramètre et d'interpréter les résultats, permet seul de conduire à un réglage assez rapide et cohérent. La sortie graphique des résultats sur la table traçante couplée à l'ordinateur, qui permet de visualiser l'effet de la variation d'un paramètre, constitue une aide précieuse au moment du réglage.

Exemples d'application du programme Prévik

Modèle mathématique hydrologique de prévision et d'annonce des crues du Rio Guadalquivir (Espagne).

L'aménagement hydraulique du bassin du Rio Guadalquivir a été défini par l'Administration Espagnole (Centro de Estudios Hidrograficos et Confederacion Hidrografica del Guadalquivir) dans les termes suivants :

- lutte contre les crues dans la zone inondable qui s'étend entre Cordoue et Séville, en utilisant au mieux :
 - la prévision et l'annonce des crues;
 - des ouvrages de défense contre les inondations (rescindement des méandres, endiguements du fleuve);
 - les possibilités de contrôle des crues, offertes par les réservoirs existants ou en projet sur le fleuve et ses affluents, tout en satisfaisant les besoins prioritaires de l'irrigation (incluant le contrôle de la langue salée dans la plaine maritime) et de la production d'énergie hydro-électrique;
- nécessitant l'établissement d'un instrument de simulation du comportement hydraulique du bassin (60 000 km²), destiné :
 - à l'étude du système des ouvrages existants, en construction ou projetés, conduisant à un plan cohérent de développement optimal;
 - et ensuite à la conduite de l'exploitation des aménagements intégrés mis en service, c'est-à-dire au « water management ».

CONSTITUTION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE.

Le modèle hydrologique, construit pour répondre au problème défini comme indiqué ci-dessus, est un assemblage de quatre types de systèmes de calcul :

1. — Un modèle hydrodynamique, qui reproduit en débit et niveaux la propagation des crues dans le Rio Guadalquivir, entre les centrales au fil de l'eau de Dona Aldonza et Alcalá del Río, c'est-à-dire sur un parcours de 400 km. Ce modèle représente la dizaine de centrales hydro-électriques qui fonctionnent pratiquement au fil de l'eau dans ce tronçon du fleuve, ainsi que les points d'injection des apports des affluents notables (une vingtaine).

2. — Des systèmes du type Previk, pour la transformation averse-crue dans les bassins des affluents, au nombre d'une quinzaine.

3. — Un modèle simplifié de propagation des crues dans le Rio Guadalquivir entre Dona Aldonza et Alcalá del Río. Ce modèle simplifié du type Muskingum, est employé dans les opérations pratiques d'annonce des crues, à la place du modèle hydrodynamique complet (1).

4. — Des programmes spécifiques de calcul du fonctionnement des retenues sur le fleuve ou sur ses affluents, qui sont intercalés dans les modèles (1) et (2).

SYSTÈME PRATIQUE DE PRÉVISION ET D'ANNONCE DES CRUES.

Le système pratique de prévision et d'annonce des crues a été établi pour le bassin du Rio Guadalquivir dans son état actuel d'aménagement. Mais il est facilement modifiable au fur et à mesure de la mise en service de nouveaux aménagements dans le bassin.

Ce système est constitué par le branchement des programmes Previk (2) de génération des crues dans les bassins des affluents, à partir des averses, sur le modèle simplifié (3) du type Muskingum qui assure la composition et la propagation des crues dans le Rio Guadalquivir. Les programmes (4) relatifs aux réservoirs d'accumulation en service au nombre de huit et exclusivement situés sur les affluents, sont intercalés entre les modèles (2) et (3).

C'est donc un procédé de calcul digital, simplement dérivé des modèles mathématiques constitués pour les besoins de l'aménagement régional, qui a été choisi pour procéder à la prévision et à l'annonce des crues entre Cordoue et Séville. D'autres possibilités, *a priori* offertes également par la technique des modèles analogiques, électriques ou même hydrauliques, avaient été étudiées. La meilleure solution s'est avérée être celle consistant à simplifier le modèle hydrodynamique (1) en un modèle Muskingum (3), et à adapter ce modèle ainsi que les modèles hydropluviométriques (2), mis au point sur notre ordinateur IBM 360-65, à l'ordinateur plus petit IBM 1401 dont la Confederacion Hidrografica del Guadalquivir dispose à Séville.

Les affluents du Guadalquivir sont regroupés en 20 bassins dont les crues sont prévues à partir des pluies journalières observées en 15 stations pluviométriques sélectionnées parmi les 450 stations qui figurent dans le bassin du Guadalquivir. Le modèle hydropluviométrique de type Previk fournit le volume de la crue à prévoir dans les 24 h à venir pour chacun des 20 bassins d'affluent. En fonction de ce volume et du débit réel au moment de la prévision (8 h du matin) le modèle donne la répartition plausible de l'apport de crue dans les 24 h à venir dans les deux hypothèses où la pluie serait nulle ou égale à celle observée dans les dernières 24 h.

Les temps de propagation sont tels dans le Rio Guadalquivir qu'un calcul de prévision, fait une fois par jour, suffit pour donner une estimation valable de l'évolution de la crue, entre Cordoue et Alcalá del Río, dans les 24 h à venir.

Le modèle hydrologique de la Creuse (France).

La Direction Départementale de l'Équipement de l'Indre a voulu se doter d'un modèle hydropluviométrique du Bassin de la Creuse, qui serve à l'étude de l'écrêtement et du retardement possibles des fortes crues, par des lâchures préventives faites au barrage d'Eguzon, dans le respect des contraintes assez strictes de production d'énergie imposées par l'électricité de France.

Les crues de la Creuse menacent d'endommager les villes, notamment Argenton, et des zones agricoles, lorsque leur débit excède 280 m³/s.

Après l'étude de l'écrêtement et du retardement possibles des crues à Eguzon, le modèle hydrologique est destiné à la prévision des crues entrant dans la retenue, à partir de l'observation des intensités d'averses, donc à une exploitation en temps réel.

CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE RÉALISÉ.

Le bassin versant représenté par le modèle hydrologique a une superficie de 2 400 km² à Eguzon. Il a été découpé en cinq bassins élémentaires pour chacun desquels la transformatoïn globale averse-crue est simulée selon la méthode Previk, avec un pas de temps de 6 h.

Les intensités des précipitations sont mesurées en six pluviographes, qui seront remplacés par des pluviophones.

RÉSULTATS OBTENUS.

Le modèle a été réglé pour les crues dépassant 250 m³/s à leur entrée dans la retenue d'Eguzon. Nous disposons de 11 crues de cette importance, soit 137 valeurs de forts débits en 6 h. Le coefficient de corrélation entre débits en 6 h calculés et observés, pour cet échantillon de réglage, est 0,975.

La procédure d'exploitation de la retenue, que le modèle hydrologique a permis d'établir, fait que les crues de moins de 500 m³/s qui arrivent à Eguzon peuvent être relâchées en aval sous débit inférieur à 280 m³/s et que le retardement des crues de toute importance est appréciable.

Exemples d'application
du programme Bilik

Le modèle hydrologique du Rio Parana (Argentine et Brésil).

La Commission Argentine du Bassin de la Plata (Concap) a confié au Bureau d'Études Recursos, Economía e Ingeniería Del Desarrollo (Redes) de Buenos Aires, assisté par les deux Sociétés Françaises BCEOM et SOGREAH, l'importante étude du comportement hydraulique des bassins argentins des rios Parana et Uruguay, sous l'effet des divers grands aménagements projetés dans ces bassins. Ceci afin d'accorder avec les pays riverains (Brésil, Paraguay et Uruguay) les politiques nationales d'utilisation des ressources hydrauliques, pour la navigation, la production d'énergie, l'assainissement et l'irrigation.

Des études de cette envergure nécessitent assurément l'établissement de gros instruments de simulation hydrologiques et hydrauliques, nourris par une masse considérable de données d'observation de toute nature.

Une première phase d'étude, exécutée entre janvier et août 1970, fut réservée au rassemblement et à l'utilisation des documents et données d'observation disponibles tant au Brésil qu'en Argentine, pour la mise au point sur un tronçon du Rio Parana des systèmes de simulation hydraulique et hydrologique applicables par la suite à l'ensemble

des bassins argentins des Rios Parana et Uruguay. Dans cette première phase d'étude furent mis sur pied :

- un centre de documentation et une banque de données au Service des modèles;
- un modèle hydropluviométrique du bassin brésilien du rio Parana (912 000 km²) servant à définir le régime, les crues et les étiages du fleuve à son entrée en Argentine, avec ou sans influence des grandes retenues mises en service, en construction ou en projet au Brésil;
- un modèle hydrodynamique représentant les 300 premiers kilomètres du cours argentin du Parana.

Le modèle hydropluviométrique du bassin brésilien du Parana a été conçu pour :

- la prévision en temps réel des apports du fleuve à son entrée en Argentine;
- l'étude de l'effet des grandes retenues brésiliennes sur les débits naturels délivrés à la frontière, lorsque ces énormes réservoirs (de 20 à plus de 50 milliards de mètres cubes chacun) sont mis en eau, fonctionnent normalement, ou sont vidés brutalement;
- définir les hydrogrammes des crues et les séquences de basses eaux de très faibles fréquences (centennale à millénaire) qui caractérisent le régime naturel du fleuve à son entrée en Argentine, aux fins de comparaison avec les hydrogrammes résultant des manœuvres normales ou catastrophiques des retenues brésiliennes.

CONSTITUTION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE.

Le bassin Brésilien du Rio Parana, d'une superficie de 912 000 km² a été découpé en 19 bassins élémentaires. Pour chacun d'eux, la transformation globale précipitation-écoulement est simulée avec un pas de temps de six jours, selon la méthode Bilik de bilan hydrique.

La composition et la propagation des écoulements, ainsi générés à partir des pluies, sont simulées par un modèle Muskingum, dit « ramifié » parce qu'il représente le Parana et ses cinq affluents majeurs, sur une longueur maximale de 1 600 km.

Les fonctionnements possibles des retenues en service, en construction ou en projet sont simulés grâce à des programmes spécifiques de calcul, intercalables en sept points du Modèle Muskingum.

RÉGLAGE DU MODÈLE - RÉSULTATS OBTENUS.

Les données hydrologiques disponibles pour le réglage des modèles Bilik et Muskingum se limitaient :

- aux pluies mensuelles connues en 52 stations;
- à des valeurs mensuelles de la température de l'air et de l'évaporation Piche, mesurées en 5 stations;
- à des mesures limnimétriques et à des données sur les débits, mensuelles ou journalières, très hétérogènes et discontinues, fournies par 32 stations.

Le réglage des modèles a été fait sur la période 1944-1956, la mieux connue en précipitations et en écoulements avant la mise en service des premières grandes retenues brésiliennes (1961).

La qualité du réglage du modèle général a été appréciée en calculant les débits à partir des pluies, en un point central (Jupia) du modèle et à la frontière argentine (Puerto Libertad) sur la plus longue période possible d'observation des débits naturels non influencés par des aménagements, soit la période 1941-1956. Les écarts relatifs entre valeurs calculées et observées des apports mensuels, des débits de crue ou des débits d'étiage, à Jupia et à Puerto Libertad, sont inférieurs à 15 % dans 60 % des cas, et inférieurs à 30 % dans 90 % des cas.

Le modèle hydrologique du Rio Parana a été construit et réglé à Buenos Aires en moins de deux mois.

Le modèle hydrologique des Wateringues (France).

L'Agence financière de Bassin Artois-Picardie et le Service des Voies Navigables du Nord et du Pas-de-Calais procèdent aux études du réaménagement de l'emploi des eaux dans la région maritime des Wateringues (700 km²) comprise entre Calais et la frontière belge. Ce réaménagement a pour but de dégager le maximum de ressources locales en eau douce, au profit du développement du complexe industriel et urbain du triangle Dunkerque-Calais-Saint-Omer, tout en satisfaisant aux besoins de la navigation intérieure et du secteur rural d'équilibre de la région.

SOGREAH participe à ces études et, dans le domaine de l'hydrologie, a été chargée de procéder à l'inventaire des ressources régionales en eau douce.

Ces ressources sont de diverse nature :

- apports des cours d'eau drainant un bassin total de 950 km² avant d'entrer dans la plaine des Wateringues;
- apports de la « nappe de la Craie » qui s'alimente dans les collines du Boulonnais, et qui est en partie drainée par des rivières débouchant dans les Wateringues;
- précipitations directes sur les Wateringues.

Les apports des cours d'eau aux Wateringues ont été étudiés à l'aide d'un modèle hydrologique du type Bilik à pas de temps mensuel. Ce modèle opère la transformation globale des précipitations sur les bassins versants dominant les Wateringues, d'une superficie totale de 950 km², en apports aux Wateringues.

PARTICULARITÉS DU MODÈLE.

Les hydrogrammes des apports observés de certains cours d'eau de la région comportent une faible part de ruissellement immédiat. L'essentiel des apports est imputable au ruissellement retardé, et les cours d'eau issus des Collines du Boulonnais ont de surcroît un fort débit de base, quasi constant, provenant du drainage partiel de la nappe de la Craie.

En conséquence, le modèle Bilik qui reproduit bien le régime des apports des cours d'eau aux Wateringues, est celui réglé pour donner :

- un ruissellement immédiat pratiquement nul;
- une modulation des apports essentiellement imputable aux variations du ruissellement retardé provenant de la subsurface et de la zone aérée du sol;
- un fort débit de base, pratiquement constant, alimenté par la nappe phréatique, dans les collines du Boulonnais.

Le bassin versant dominant les Wateringues, d'une superficie totale de 950 km² a été découpé en quatre unités hydrologiques, alimentant chacune directement les Wateringues en eaux de surface. Deux des unités hydrologiques, équipées de stations de mesure des écoulements, ont servi au choix des valeurs paramétriques de réglage du modèle, qui expriment les caractères géomorphologiques locaux en termes hydromorphologiques. Les différences géomorphologiques entre les deux unités hydrologiques de réglage et les deux autres, aux écoulements non observés, ont été appréciées afin de guider l'extrapolation des valeurs paramétriques du réglage Bilik à l'ensemble du bassin de 950 km² qui alimente les Wateringues en eau douce de surface.

UTILISATION DU MODÈLE.

Le modèle hydrologique global a servi à générer les apports fluviaux mensuels aux Wateringues, à partir des précipitations observées en neuf stations durant les 23 années de la période 1946-1968.

La sécheresse quinquennale qui affecte les Wateringues a été définie par une étude statistique des apports fluviaux ainsi reconstitués.