ASPECTS GÉNÉRAUX DE LA REPRÉSENTATION MATHÉMATIQUE DES PHÉNOMÈNES EN HYDROLOGIE DE SURFACE

Exposé introductif par

J. JACQUET

Président de la Commission des Eaux de Surface de l'Association Internationale
d'Hydrologie Scientifique

Introduction

Dans cet exposé introductif, je me garderai d'aborder des questions de fond qui constitueront la substance des communications qui vont suivre. Il m'a semblé néanmoins n'être pas inutile de procéder à un survol rapide de quelques lignes de force suivant lesquelles se développe l'ensemble des techniques que l'on convient de désigner sous le vocable d'*hydrologie mathématique* (*) et de rappeler certains faits qui me paraissent être de nature à préciser le sens de nos débats.

L'avènement de l'ordinateur, facteur essentiel du développement de l'hydrologie mathématique.

Au commencement il y a l'ordinateur... et c'est incontestablement l'introduction de l'*informatique* qui a marqué de façon décisive l'évolution de l'hydrologie au cours de la décennie 1961-1970 grâce aux possibilités ainsi offertes par le traitement automatique de l'information. Il est en effet désormais possible de traiter de nouvelles gammes de questions, correspondant soit à une extension des échelles d'espace prises en compte (systèmes complexes de ressources en eau et synthèses hydrologiques régionales) soit à une

analyse plus fine des processus physiques en jeu dans les différentes phases du cycle de l'eau. La machine, loin de supplanter l'effort des chercheurs, a accéléré le développement de nouvelles techniques et la mise au point d'algorithmes de calculs plus puissants permettant de mieux extraire l'information contenue dans les données d'observation qui demeurent, il faut le souligner fortement ici, la seule source d'information hydrologique.

Ainsi dans la plupart des pays, des équipes d'hydrologues « classiques » ont découvert le monde de l'informatique et il s'en est suivi une mutation rapide des méthodes de travail : aux sondages « manuels » dans la masse des données disponibles se sont substituées des procédures d'analyse systématique et exhaustive des observations. Inversement, et dans le même temps, des mathématiciens ont découvert le monde de l'hydrologie et ses problèmes comme un domaine privilégié où de nombreux outils mathématiques pouvaient trouver à s'employer et où, en retour, la spécificité des questions et de l'information hydrologiques s'avère stimulante pour la créativité mathématique. Il résulte de cette conjonction de deux courants de pensée ayant leurs propres modes d'expression une atmosphère de compétition où, dans le feu de l'action du moment, l'on ne sait pas toujours distinguer l'essentiel de l'accessoire dans la prolifération des « modèles » représentatifs d'une même réalité sous des vocables nouveaux.

L'actualité et les objectifs de cette session du Comité technique de la S.H.F.

Il importe donc de faire le point des acquisitions réelles des années récentes en matière de représentation des phé-

(*) On entend ici aussi bien l'application des différentes techniques de la physique mathématique et de l'analyse numérique que celles de la statistique mathématique à la description, à la simulation et à la prévision de séquences temporelles de phénomènes hydrologiques.

nomènes hydrologiques et de cerner les difficultés sur lesquelles on bute. C'est là un premier objectif de cette session. Elle s'inscrit dans la ligne des travaux de la Commission d'étude des débits de la Société Hydrotechnique de France qui, sous la Présidence de M. l'ingénieur général Deymié, a permis aux tenants des diverses tendances de l'hydrologie mathématique en France de confronter leurs points de vue et a été le théâtre de débats passionnés...

Un deuxième objectif assigné à la série des communications présentées est de constituer un document de base français à verser au dossier préparé au niveau international par le très actif Comité des modèles mathématiques en hydrologie de l'Association internationale d'hydrologie scientifique à l'occasion de la prochaine Assemblée de l'Union géodésique et géophysique internationale, qui se tiendra à Moscou en août 1971. Il est en effet de tradition de dresser tous les quatre ans devant cette instance un « état de l'art » dans les principaux secteurs de l'hydrologie.

Mais ici la consultation de la littérature spécialisée peut laisser pantois un lecteur non averti cherchant à se documenter sur les secteurs hydrologiques en développement. Il est en effet couramment question d'hydrologies analytique, déterministe, dynamique, expérimentale, mathématique, opérationnelle, physique, scientifique, statistique, stochastique, etc., et, corrélativement d'élaboration de modèles dits numériques, analogiques, déterministes, probabilistes, paramétriques, conceptuels, physiques etc., et, pour couronner le tout, on parle de systèmes...

On serait tenté de voir là une inflation verbale, aussi est-il nécessaire d'examiner rapidement ce qu'expriment ou ce que cachent les plus usités de ces qualificatifs.

Les divers points de vue actuels de l'hydrologie

L'hydrologie « tout court » recouvre l'ensemble des techniques d'étude du cycle de l'eau dans la nature. Comme telle, l'hydrologie n'est pas une science constituée du fait de la grande diversité des méthodes d'approche de ses objectifs qui relèvent de disciplines variées (et ceci ne va pas sans poser des problèmes pour son enseignement). C'est pour cela sans doute que l'on a éprouvé le besoin d'accoler à l'hydrologie le qualificatif « scientifique » pour ne pas complexer les chercheurs qui consacrent leur activité désintéressée à faire progresser ses méthodes.

Il est question d'*hydrologie de surface* dans le thème des présentes journées : la distinction entre eaux de surface et eaux souterraines fait partie de ces vieux clichés que l'on conserve par habitude bien qu'ils correspondent en fait à une séparation artificielle et quelque peu regrettable. Convenons qu'ici l'hydrologie de surface traite des problèmes de formation et d'évolution des débits transitant dans un réseau hydrographique et par conséquent devra nécessairement prendre en compte les apports en provenance des nappes souterraines et les phénomènes de transfert de l'eau dont les couches non saturées des sols sont le théâtre.

Venons-en à une distinction fameuse entre *hydrologie déterministe* et *hydrologie stochastique* : la première va s'efforcer d'explicitier des relations de cause à effet entre les phénomènes hydrologiques, ou tout au moins considère

les paramètres qui les caractérisent comme des variables de la physique classique et ignore la composante aléatoire des phénomènes que la seconde prend en compte explicitement.

En réalité il s'agit de deux points de vue complémentaires qu'il faut se garder d'opposer. Tout problème d'hydrologie devrait nécessairement être exprimé en univers aléatoire mais une approche déterministe est très souvent indispensable à son traitement.

La notion de modèle en hydrologie

Actuellement il est de bon ton entre hydrologues de parler de « modèles », à défaut d'en réaliser pratiquement. Mais il ne faut pas voir en cela une mode : en hydrologie le *modèle* est une nécessité qui tient à la nature même des phénomènes étudiés et des paramètres qui caractérisent leur complexité, leur variabilité spatiale et temporelle. Il s'agit d'une représentation volontairement simplifiée, pour être commode d'emploi, d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes. Cette représentation pourra être mathématique ou physique, numérique ou analogique. Il est essentiel de noter ici que la finalité première des modèles en hydrologie ne sera pas de serrer au plus près la réalité physique des phénomènes considérés en tant que « processus » mais de constituer un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques d'inventaire et de gestion de *systèmes* de ressources en eau.

Rappelons qu'un *processus hydrologique* est une schématisation d'un phénomène qui subit des variations continues ou périodiques liées notamment au temps, les valeurs observées des paramètres qui le caractérisent ont la forme de séries temporelles ou chronologiques (c'est-à-dire qui respectent la chronologie des événements). Toutes les variables hydrologiques constituent de tels processus.

Deux points de vue sont envisageables pour représenter les phénomènes hydrologiques :

— le point de vue *déterministe* : dans un modèle déterministe on néglige la probabilité d'occurrence des valeurs des variables impliquées dans le processus et l'on considère qu'un tel processus peut être représenté (implicitement ou explicitement) par une loi certaine (au sens de la physique classique) définie. En d'autres termes un modèle mathématique de type déterministe est tel que la variable Y résultante à laquelle on s'intéresse est une fonction de certaines quantités (paramètres) $X_1...X_k$ et l'étude du modèle vise à déterminer cette fonction à partir de séries d'observations du passé;

— le point de vue *probabiliste* au contraire considère que la valeur de Y n'est pas calculable à partir de celles des autres variables $X_1...X_k$ mais qu'elle est déterminée par un mécanisme de hasard dont le fonctionnement dépend de $X_1...X_k$. Autrement dit Y est une variable aléatoire dont la distribution de probabilité dépend des autres variables. On introduit donc le concept de probabilité dans la formulation du modèle (qui peut ou non tenir compte des temps d'occurrence des événements représentés).

Là encore il importe de souligner fortement que ces deux points de vue sont nécessairement complémentaires en pratique.

Objectifs de l'établissement des modèles en hydrologie

Il s'agit ici de rappeler sommairement les deux aspects complémentaires de tout problème de ressources en eau qui, relatif à une zone bien définie (un bassin), est aussi caractérisé par un certain pas ou échelle de temps. Le premier aspect consiste à dresser un *inventaire* des disponibilités à un instant donné sur la zone considérée : cet inventaire doit décrire quantitativement la variabilité spatiale et temporelle des ressources et doit permettre d'associer un niveau de probabilité à chaque état des variables hydrologiques de base considérées comme variables aléatoires. Ce point de vue descriptif demeurerait insuffisant s'il ne débouchait sur une représentation maniable de la *dynamique des transferts d'eau* sur le bassin considéré afin de prévoir l'évolution de l'état des ressources en fonction du temps. Nous sommes ici dans le domaine de l'*hydrologie « opérationnelle »* où les problèmes de gestion de ressources impliquent la disposition de *modèles de prévision* efficaces.

En définitive les objectifs assignés aux modèles en hydrologie correspondent aux trois types d'opérations suivantes :

- *représentation du comportement d'un bassin* (par exemple relation pluie-écoulement) : élaboration de prévisions;
- *transferts d'information* (du fait du caractère toujours partiel de l'information de départ) : simulation de séries chronologiques de paramètres hydrologiques;
- *extrapolation dans le temps et interpolation géographique* des séries d'observations.

Les bases physiques de la représentation mathématique des phénomènes hydrologiques par modèles déterministes

Les principaux transferts d'eau du cycle hydrologique qu'il s'agit de représenter pour simuler le comportement d'un bassin versant sont les suivants :

- relation pluie-écoulement de surface;
- relation pluie-nappe souterraine;
- relation nappe phréatique-écoulement de surface;
- flux d'évaporation exprimé à partir de bilans de masse et d'énergie faisant intervenir les facteurs physiques conditionnels du phénomène.

Ces relations peuvent être plus ou moins explicitées mais on retrouve dans les deux premières, qui nous intéressent plus spécialement ici, les types de fonctions de transfert qui caractérisent la réponse d'un bassin à une précipitation, à savoir :

- des fonctions de « rendement » ou de « réduction » qui, affectées à la pluie, la répartissent en écoulement de surface, eau destinée à l'évaporation et à la recharge des nappes souterraines;
- des fonctions d'« étalement » qui, conservant les volumes, les étalent dans le temps et s'appliquent à la détermination des hydrogrammes des débits transitant dans le réseau hydrographique. Ces fonctions schématisent généralement l'effet d'un système fictif de réservoirs.

L'*hydrologie analytique* (dite encore physique ou expérimentale) étudie les processus de formation des diverses

phases d'écoulement et s'efforce de définir et de classer les paramètres les plus constants, caractéristiques de l'état de « réactivité » d'un bassin, en vue de leur introduction dans un modèle physique représentatif de son comportement. De telles recherches sont effectuées sur des bassins élémentaires, suffisamment petits pour que l'on puisse admettre les hypothèses d'homogénéité nécessaires à la considération d'un comportement global du bassin.

Il importe de préciser que la schématisation mathématique d'un modèle déterministe n'est pas en général une fonction explicative de la dynamique des transferts d'eau, sauf le cas où le phénomène est susceptible d'une expression par des équations de la physique mathématique, telles que celles de Saint-Venant pour la propagation d'une onde de crue.

Dans ces conditions, l'on dispose de nombreux degrés de liberté pour adapter la structure du modèle au type de problème posé, à l'information existante et aux moyens de calcul dont on dispose. En particulier les *modèles dits « paramétriques »* (globaux ou matriciels dans le cas des bassins de grande taille) supposent le minimum d'hypothèses sur la physique des transferts et leur grande souplesse d'utilisation provient du fait que le problème essentiel se réduit alors à l'ajustement d'un certain jeu de paramètres à partir de données d'observation. Il faut prendre garde à ne pas multiplier le nombre de ces paramètres : on risque en effet d'obtenir un modèle « trop nerveux » qui représente convenablement la seule séquence des entrées (pluies) et des réponses (débits) sur laquelle il est ajusté mais dont la capacité de prédiction soit, de ce fait, réduite. Le principe d'économie des paramètres a ici une importance considérable.

L'*hydrologie paramétrique* recouvre les techniques relatives à l'optimisation et à l'estimation des paramètres de ces modèles qui ont connu un développement continu au fur et à mesure de l'introduction de l'informatique en hydrologie.

Une classe intéressante de modèles paramétriques est constituée par les *modèles conceptuels* basés sur des théories ou concepts physiques du comportement du bassin, assimilé par exemple à celui d'un système de réservoirs affectés de divers asservissements.

Dans le cas d'un bassin fluvial complexe, présentant des caractéristiques régionales bien différenciées, on procédera par combinaison de modèles de relations pluie-débit appliquées aux sous bassins correspondant à des zones relativement homogènes avec un modèle de propagation établi indépendamment. Le handicap d'une telle méthode souple de construction de modèles déterministes est son caractère relativement subjectif qui, joint à la disposition de l'outil puissant qu'est l'ordinateur, peut inciter l'hydrologue à compliquer indûment son schéma de transformation pluie-débit : le départ entre paramètres essentiels et secondaires reste délicat dans l'état actuel des connaissances de la physique des transferts d'eau en hydrologie de surface.

L'une des fonctions essentielles assignées aux modèles déterministes est la valorisation de l'information hydrologique, toujours incomplète par nature. Le problème type se pose ainsi : à l'échelle d'une région donnée on dispose de séries longues d'observations pluviométriques et de séries courtes de débits observés, comment valoriser l'information « débit » (qui intéresse directement le gestionnaire des ressources) en utilisant l'information « précipitations » statistiquement plus abondante ? Lorsque les méthodes statistiques classiques (corrélations par exemple) sont inopérantes, des modèles déterministes permettent, à partir des séquences pluviométriques, de calculer les séquences de débits correspondantes et par conséquent d'étudier leur dis-

tribution statistique. Nous allons revenir sur cet aspect important de la simulation du comportement d'un bassin et de la génération d'échantillons de « réponses » hydrologiques d'un « système ».

La notion de système et son utilisation en hydrologie

Rappelons d'abord quelques définitions.

On convient de désigner par *système* toute structure, dispositif ou procédé réel ou abstrait qui relie, avec un pas de temps donné, une entrée, une cause ou une impulsion (de matière, d'énergie ou d'information) à une sortie, un effet ou une réponse (de matière, d'énergie ou d'information).

Un tel système peut représenter aussi bien un bassin versant qu'une centrale thermique ou un individu...

Une autre définition indique qu'un système est un groupement ou un ensemble d'objets liés par une certaine forme d'interactions ou d'interdépendance régulière. Le système est dynamique s'il est le siège d'un processus. Si le processus considéré est stochastique, le système est dit stochastique, sinon il s'agit d'un système déterministe. Un système séquentiel comprend une entrée, un parcours et une sortie. C'est ainsi que le cycle hydrologique est un système dynamique séquentiel.

On conçoit donc que le concept de *système* tel qu'il vient d'être défini trouve son application idéale dans l'expression du comportement d'un bassin versant qui modifie une « entrée » ou « impulsion » (hyétogramme d'averse) pour produire une « réponse » (hydrogramme de débits).

Le problème général du comportement d'un bassin versant peut s'énoncer ainsi en termes de « système » :

Etant donné un *système hydrologique* consistant en un certain complexe physique, caractérisé par des paramètres topographiques, géologiques, pédologiques, de couverture végétale, etc., soumis à des impulsions représentées par des séries chronologiques de variables atmosphériques (précipitations, rayonnement, température et humidité de l'air, vent, etc.), déterminer les réponses du système sous forme des séries chronologiques de débits résultants et des variations des stockages superficiel et souterrain du système.

Le succès de ce point de vue tient au fait que l'on dispose d'un ensemble de techniques, désigné par le vocable *analyse des systèmes*, permettant d'estimer la réponse d'un système caractérisé par un ensemble de propriétés (sa fonction de transfert) lorsque l'impulsion d'entrée est connue. Son application en hydrologie a donné naissance à l'*hydrologie des systèmes* qui connaît un essor extrêmement rapide et met en œuvre tous les outils mathématiques utilisés en recherche opérationnelle pour traiter les problèmes de planification et de gestion.

Ces techniques permettent notamment :

- de contrôler les ressources en eau disponibles sur un bassin grâce à une gestion efficace d'ouvrages hydrauliques basée sur la prévision des apports à venir dans les retenues;
- de déterminer le dimensionnement optimal des ouvrages de protection et de régulation des eaux d'après les caractéristiques des régimes d'écoulement.

L'analyse des systèmes peut être utilisée pour le traitement de ces problèmes hydrologiques soit dans un cadre déterministe soit dans un cadre stochastique. On notera à ce sujet qu'au lieu d'étudier

directement les propriétés stochastiques de la variable hydrologique résultante (débits dans le réseau hydrographique par exemple), il est souvent préférable de considérer cette variable comme la réponse d'un système dont la variable d'entrée a des propriétés statistiques plus simples ou mieux connues. On étudiera alors les propriétés du processus stochastique des entrées et les fonctions de transfert du système lesquelles doivent constituer un modèle représentatif du comportement hydrologique d'un bassin versant.

Les caractéristiques de structure du modèle d'un bassin versant considéré en tant que système hydrologique

Le problème posé ici est celui du choix des hypothèses de base relatives à la structure du modèle, compte tenu de la physique des phénomènes à représenter et des limitations imposées par les outils de traitement disponibles.

Voyons d'abord les choses de haut, à l'échelle planétaire...

Le *cycle hydrologique*, représenté par les modèles des différents transferts d'eau entre l'atmosphère, les continents et les océans, constitue un système dont l'étude est inséparable de celle du système des échanges d'énergie, dont le modèle doit exprimer le bilan radiatif de la planète, en tant qu'élément moteur du cycle hydrologique.

Ces deux systèmes sont dépendants du temps, non linéaires et impliquent des rétroactions (on dit souvent : « feedback »...). En d'autres termes leurs propriétés évoluent dans le temps, la réponse correspondant à une somme d'impulsions n'est pas toujours la somme des réponses aux impulsions individuelles et finalement il y a influence des réponses ou sorties sur les entrées des systèmes.

Si l'on considère maintenant un *bassin versant* quelconque dont on désire représenter le comportement à partir des éléments des bilans de masse et d'énergie du cycle hydrologique, quelles hypothèses réalistes pourront être formulées pour l'élaboration de son modèle ?

L'expérience a montré que la représentativité du modèle peut être assurée dans la majorité des cas en analysant les facteurs suivants :

— on admet la *stationnarité* (ou l'invariance dans le temps) des caractéristiques du complexe physique du bassin : il est à noter cependant qu'il existe des techniques permettant de prendre en compte une certaine évolution de ces caractéristiques;

— par contre la *variabilité spatiale* des paramètres d'état du bassin et des paramètres d'entrée pose un problème qui ne doit pas être éludé car il affecte directement la structure du modèle. On distingue ainsi les modèles globaux pour lesquels l'homogénéité spatiale de l'état du bassin et des impulsions reçues peut être admise et les modèles matriciels conçus pour prendre en compte la distribution spatiale de ces paramètres;

— on constate l'existence de *rétroactions* de réponses sur les entrées suivantes d'un système (à différents degrés, par exemple, entre eaux de surface et eaux souterraines, dans le bilan d'énergie d'un système hydrologique, etc.) : si le degré de cette influence nécessite sa prise en considération, il existe des schémas simples de dépendance pour le faire;

— enfin la question de la *linéarité* du modèle est de première importance. Rappelons qu'un système est dit linéaire si sa réponse est liée à l'impulsion par un opérateur linéaire, c'est-à-dire qui possède des propriétés de proportionnalité et de superposition. Cette relation peut être représentée par l'écriture :

$$Y(t) = \int_{(\tau)} h(t - \tau) (\tau) d\tau$$

le noyau $h(t - \tau)$ est la réponse impulsionnelle du système ou l'hydrogramme unitaire instantané lorsqu'il s'agit d'une relation pluie-écoulement de surface.

Les systèmes non linéaires font les délices de nombreux chercheurs mais en pratique il faut souligner ici que le choix d'une hypothèse de non linéarité ne se justifierait que par une exigence de plus grande représentativité physique du modèle. Or, à ma connaissance et à l'échelle d'un bassin versant en vraie grandeur (et non sur une petite aire élémentaire), on n'a jamais montré de façon décisive que l'hypothèse de linéarité était infirmée.

On est alors amené à conclure que, même dans cette nouvelle optique d'analyse de systèmes, la structure du modèle doit demeurer la plus simple possible et que l'effort de représentativité doit porter notamment sur le choix des paramètres d'entrée et d'état de manière à prendre en compte avec suffisamment de réalisme leur variabilité spatiale et temporelle. La véritable représentativité du modèle est finalement fondée sur la qualité et la quantité d'information qu'il utilise.

Ceci s'applique d'abord aux modèles déterministes, mais nous allons en constater la vérité à propos de l'utilisation opérationnelle de modèles de prévision probabilistes.

L'incidence de l'information incomplète sur les résultats d'exploitation d'un système hydrologique (*)

L'état d'un système hydrologique à un instant donné s'exprime généralement par une équation de bilan qui constitue l'information de base à partir de laquelle sera élaboré le modèle rendant compte de l'évolution du système dans le temps.

Si ce modèle est destiné à une utilisation opérationnelle dans le cadre d'une certaine politique de gestion des ressources en eau, l'utilisateur devra tenir compte des *incertitudes inéluctables* qui affectent la détermination des valeurs du système dès lors qu'interviennent, comme entrées du système, des événements aléatoires dont les probabilités ne peuvent qu'être *estimées* à partir d'une certaine information contenue dans les échantillons d'observations dont on dispose.

Il faut souligner que cette notion d'incertitude inéluctable ne concerne pas ici la variabilité et les fluctuations des différents termes du bilan en fonction de tel ou tel événement dont on connaîtrait avec *certitude* la loi de probabilité. Par cette notion on entend souligner que les lois

de probabilité sont seulement *estimées* avec une certaine *vraisemblance* sur la base d'une *information toujours incomplète*.

Il y a donc, dans toute recherche d'optimum utilisant un tel modèle, un seuil qui, pour un problème donné et dans un état donné de l'information disponible, ne saurait être dépassé. Ce seuil d'incertitude peut se traduire concrètement par une incertitude équivalente sur l'état de la ressource (si par exemple le système en question est un ensemble de réservoirs) pour une situation hydrométéorologique donnée, c'est-à-dire en définitive par une *imprécision* qui induirait sur la décision la même incertitude que celle qui provient du caractère toujours partiel de l'information utilisée.

Ainsi dans le cas fréquent où l'on ne dispose que de petits échantillons d'observations, l'estimation des paramètres des lois de distribution des variables d'entrée du système par les méthodes classiques n'utilise qu'imparfaitement l'information effectivement contenue dans l'échantillon de départ. Il est possible de mieux épuiser cette information en bâtissant, par exemple, un modèle générateur d'échantillons fictifs. Par échantillon fictif, on entend un ensemble d'occurrences d'événements hydrologiques générées de telle façon que leur répartition en probabilité soit conforme à la répartition estimée à partir de l'échantillon des occurrences *réelles* dont on dispose au départ. Le but de cette simulation, pour un échantillon réel donné, est de déterminer la précision des résultats, précision qui dépend uniquement de l'information contenue dans l'unique échantillon de départ.

Ceci montre que tous les calculs d'optimum pour la gestion des ressources en eau en *hydrologie opérationnelle* n'ont de sens — quels que soient les algorithmes ou modèles utilisés pour les définir — que par référence à un *état donné de l'information hydrologique*. Il importe donc de perfectionner sans cesse les techniques permettant d'extraire le maximum de l'information contenue dans les échantillons de données dont on dispose.

Du fait du caractère toujours incomplet de l'information hydrologique, à tous les niveaux du calcul, les « incertitudes inéluctables » sont logiquement antérieures à toutes celles provenant des autres approximations introduites dans la suite des opérations (par exemple celles des hypothèses admises pour le choix de la structure du modèle). C'est par rapport au seuil de précision qui découle de l'état réel de l'information disponible que l'influence des approximations impliquées dans la structure du modèle doit être mesurée. Ce seuil permet de vérifier la *cohérence* de ces hypothèses lors de l'élaboration du modèle de prévision.

Si cette cohérence n'est pas réalisée, on peut craindre que l'exploitation du modèle par les techniques de la programmation dynamique par exemple conduise à une apparente précision de l'optimum *calculé* dépourvu de signification *économique* et que le temps de calcul eût été plus judicieusement investi en calculs statistiques destinés à mieux exploiter l'information disponible et à réduire ainsi le seuil d'« incertitude inéluctable ».

Il importe donc, du point de vue de l'hydrologie opérationnelle, d'acquiescer le maximum d'informations touchant les phénomènes aléatoires si l'on veut donner une signification réellement économique aux calculs d'optimisation. Il est en particulier souhaitable de voir élaborer des modèles hydrologiques intégrant, sous une forme accessible aux calculs, la totalité de l'information actuellement disponible sur une zone : c'est là précisément l'objectif assigné aux essais de *synthèses hydrologiques régionales*.

Ainsi nous retrouvons toujours l'évidence première que

(*) On se reportera, pour cette partie, à l'article de Ph. ROQUEPLO, *Réflexions sur la signification économique des calculs d'optimisation effectués par programmation dynamique en avenir aléatoire*, E.D.F. Bulletin de la Direction des Études et Recherches, Série C, Mathématique-informatique, n° 1, 1970, p. 29-56, où l'auteur introduit et analyse de façon très pénétrante la notion d'incertitude inéluctable.

le modèle mathématique le plus sophistiqué n'ajoute pas une once d'information à celle contenue au départ dans les données d'observations et qu'un modèle plus « rustique » et donc plus « robuste » peut être mieux adapté, du point de vue économique, à l'état réel de l'information disponible.

Conclusion

Une collection de modèles va vous être présentée. La plupart n'ont pu être conçus et mis au point que parce que l'on dispose de moyens de calcul puissants et rapides. Ils montrent la richesse de l'arsenal actuellement disponible et laissent entrevoir de très larges perspectives d'accroissement et de diversification des types de modèles de mieux en mieux adaptés aux problèmes de l'ingénieur.

Néanmoins cette richesse ne doit pas faire illusion, pas plus que la puissance des calculateurs. Une machine reste une « débile mentale » qui ne sait faire que quelques opérations élémentaires mais qui les exécute avec une extraordinaire rapidité : elle est incapable d'intervention non prévue par l'utilisateur et ne saurait créer de l'information là où il n'en existe pas. De même la valeur réelle d'un modèle dépend de la qualité de l'information qu'il mobilise beaucoup plus que de sa structure propre.

Plus que ceux liés au choix des structures de modèles, les véritables problèmes sont ceux relatifs au réglage des modèles et à l'estimation des paramètres d'ajustement qui doit utiliser le maximum de l'information existante. Or cette information de base, dont tout dépend, est contenue dans les données d'observations recueillies sur le terrain.

C'est pourquoi l'hydrologie mathématique n'aurait pas d'objet et ses constructions les plus raffinées ne seraient que des pièces de musée sans la longue patience et le travail obstiné de tous les jours des équipes qui gèrent les réseaux de mesure et sans la continuité de politique de ceux qui en ont la responsabilité. Il convient ici de leur rendre un hommage chaleureux car, en définitive, c'est d'eux que dépendent les progrès futurs de l'hydrologie.

Références bibliographiques générales

- DAWDY (D. R.) et KALININ (G. P.). — Mathematical Modeling in Hydrology. *Bulletin de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique*, XV^e année, n° 1 (mars 1970), p. 144-151.
- DOOGÉ (J.C.I.). — The hydrologic System as a closed System. *Comptes Rendus du Colloque International d'Hydrologie* (6-8 sept. 1964) Fort-Collins, Colorado, U.S.A., volume 2, p. 98-113.
- VEMURI (V.) et (N.). — On the Systems Approach in Hydrology. *Bulletin de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique*, XV^e année, n° 2 (juin 1971), p. 17-38.

Discussion

Président : M. J. RODIER

M. le Président remercie M. JACQUET de son magistral exposé qui a analysé très clairement les principaux concepts qui sont à la base des divers types de modèles hydrologiques et précisé certains points controversés de la terminologie en usage; celle-ci prête encore à confusion ainsi que l'on a pu s'en rendre compte, notamment dans certaines réunions internationales.

Se référant aux nombreuses observations effectuées par l'O.R.S.T.O.M. dans une vingtaine de pays francophones ou non, M. le Président regrette que la qualité des mesures pluviométriques ait tendance à diminuer dans certaines régions. La qualité des observations est d'ailleurs indépendante du stade de développement. Il y a, dit-il, des pays en voie de développement qui font de bonnes

observations pluviométriques et des pays développés qui se contentent de résultats fort médiocres; tout dépend de l'intérêt que chacun attache à une bonne connaissance de la pluviométrie; celle-ci reste pourtant le fondement des études hydrométéorologiques. Il tient, en outre, à souligner l'importance de l'étude de l'hétérogénéité spatiale des divers paramètres dans l'emprise d'un bassin (caractéristiques pédologiques et géologiques en particulier).

En raison des exigences de l'horaire, il semble plus opportun, dit M. le Président, de grouper la discussion du mémoire de M. JACQUET et de celui de M. ROCHE. En conséquence, M. le Président remercie, à nouveau, M. JACQUET et donne la parole à M. ROCHE pour l'exposé de sa communication.