

MODELES DE SIMULATION DANS LES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES  
APPLICATIONS A LA PRODUCTION HYDRO-ELECTRIQUE

par

Marcel F. ROCHE  
Ingénieur en chef à ELECTRICITE DE FRANCE  
Chef du Département de la Recherche Fondamentale du Service  
Hydrologique de l'ORSTOM  
et Hubert M. DOSSEUR  
Ingénieur à ELECTRICITE DE FRANCE

La simulation des aménagements est un outil puissant qui suit d'aussi près qu'on veut la réalité physique. Pour bien comprendre les possibilités et les concepts qui président à son élaboration, il est nécessaire de rappeler clairement les notions diverses mises en jeu par la politique de l'aménagement des eaux.

1. Aménagement des eaux - Problèmes et moyens

a/ - Objectifs -

On peut définir la politique de l'aménagement des eaux comme la mise en oeuvre des moyens permettant de satisfaire des besoins en tenant compte de la double contrainte de la limitation des ressources naturelles et du prix des moyens.

a/(i) - Définition des besoins -

En un point donné du territoire, à un moment donné, on devrait pouvoir disposer de certains volumes d'eau possédant certaines propriétés physicochimiques et biologiques, pour certains usages. Pour la mise en oeuvre de la simulation, cela se traduit par un double point de vue :

- quantité et qualité
- définition de l'usage.

Le premier point de vue est défini, pour la quantité, par un vecteur qui représente la demande (volume V (I) pour chaque usage I) et pour la qualité par un vecteur, s'il n'y a qu'un paramètre de qualité (par exemple la salinité totale de l'eau), ou par une matrice si plusieurs paramètres de qualité doivent être pris en considération (par exemple salinité totale et teneur en chlorures).

La définition de l'usage, outre l'influence qu'elle peut avoir sur l'exigence en qualité, est surtout importante pour distinguer la simple fourniture d'eau (industrie, irrigation, usages urbains, aspect sanitaire, etc.) de la fourniture d'énergie. Cette dernière, en effet, ne saurait provenir d'une demande formulée en m<sup>3</sup> d'eau puisque le potentiel gravimétrique, ou charge, intervient également pour fournir l'énergie.

Les besoins peuvent enfin être hiérarchisés. C'est ainsi que l'aspect sanitaire peut conduire à exiger dans tel cours d'eau un débit minimal qui apparaîtra dans la simulation comme un besoin prioritaire, c'est-à-dire à satisfaire avant d'effectuer un prélèvement pour tout autre usage.

a/(ii) - Variations des besoins -

Dans un contexte socio-économique donné, les demandes n'évoluent pas à longue échéance ("pas de tendance" ou "système stationnaire"), l'ensemble de ces demandes subit une variation spatiale (localisation) et éventuellement temporelle (cyclique). Les variables qui leur correspondent peuvent être considérées comme fixes (schéma entièrement déterministe) ou comme aléatoires (elles sont alors définies par les termes d'un processus).

Enfin, tout le système des demandes peut évoluer et évolue en fait dans le temps. Dans la pratique, on n'est intéressé par l'évolution passée, celle qu'on peut éventuellement connaître, que dans la mesure où elle permet de prévoir l'évolution future, que l'on ne connaît pas mais à laquelle devra s'appliquer l'aménagement des eaux. Cette évolution future s'appelle la prospective et on la considère généralement à court terme, à moyen terme et à long terme. Ces expressions, évocatrices en soi, ne sont pas toujours comprises de la même façon et on ne prend pas toujours la peine d'en préciser le sens.

Lorsque l'économie du pays est, sinon totalement gérée, du moins orientée par un plan, on peut établir que

- le court terme s'applique au plan de préparation (phase d'exécution)
- le moyen terme concerne les trois ou quatre prochains plans (orientation régionale)
- le long terme prépare l'avenir économique de la prochaine génération.

La technique de la simulation s'applique uniquement à un système de demandes non évolutif. Autrement dit, on ne doit considérer, dans chaque essai de simulation, qu'un point de la courbe de prospective. Les résultats concernant l'ensemble de la prospective, si on en a besoin, sont obtenus point par point, avec autant de séries d'essais conduisant chacun à une optimisation, qu'on a choisi de points.

a/(iii) - Orientation de la politique des eaux -

En fait, les besoins et leur évolution ne sont pas une donnée "statique" du problème de l'aménagement des eaux. Autrement dit, leur estimation ne débouche pas sur un a priori indépendant des possibilités, notamment en matière de ressource en eau. Par ailleurs les décisions concernant la mise en oeuvre de cette ressource peuvent avoir un caractère promotionnel, c'est-à-dire aller "au devant du besoin" en suscitant de nouveaux champs d'application.

Il y a donc interaction entre les besoins, la ressource, l'aménagement et l'action dirigiste de l'Etat ou des collectivités qui se solde par ce qu'on appelle le choix politico-économique. Tout le problème du calcul "hydrologique" des aménagements, compris au sens large, consiste à harmoniser ces éléments pour la meilleure (entendre par là la plus efficace et la plus économique) réalisation d'objectifs qui ne peuvent eux-mêmes être définis que par approximations successives.

Il s'agit là, bien sûr, du cas le plus général. Dans la réalité des applications, on n'est pas toujours chargé de fournir des éléments pour une planification à l'échelle nationale ou régionale ; des objectifs plus modestes peuvent alors être définis. Mais dans tous les cas, le rôle du modèle de simulation est de fournir les éléments statistiques élaborés, qu'on pourrait appeler "statistique du produit fini", qui permettent de façon plus ou moins directe d'orienter la décision.

b/ - Moyens d'intervention -

Il convient maintenant d'examiner les divers éléments en présence, plus spécialement ceux qui sont partie intégrante de cette phase de l'étude qu'est le modèle de simulation. On a dit de l'élément "besoins" ce qu'on pouvait en dire sans précision supplémentaire sur la nature de l'aménagement, en soulignant toutefois la différence fondamentale entre une fourniture d'eau dite "simple fourniture" et une fourniture d'énergie. La partie purement politique des choix intervient quant à elle dans la stratégie d'exploitation du modèle de simulation, mais pas dans sa conception ; il n'y a donc pas lieu d'insister.

Parmi les éléments essentiels, figurent ceux qui vont permettre de construire le modèle, c'est-à-dire les moyens d'intervention. Ces moyens sont de deux sortes :

b/ (i) - Moyens structuraux -

On pourrait appeler ainsi la partie "constructible" des moyens d'interventions, celle qui nécessite la mise en oeuvre d'un génie civil généralement important. En désignant ces éléments par leur fonction on peut énumérer :

- les stockages, destinés à régulariser le régime naturel des eaux, les structures correspondantes sont les barrages-réservoirs
- les transferts destinés à transporter l'eau au point d'utilisation ou à améliorer, par un jeu de transfert interne au système des réservoirs, l'utilisation de ceux-ci ; les structures correspondantes sont les conduites et les canaux, avec éventuellement leurs accessoires (siphons, stations de relevage, etc.) ;
- les organes de production hydroélectrique.

D'autres éléments, considérés comme secondaires, peuvent parfois figurer dans le modèle de simulation. C'est ainsi que le drainage d'un périmètre irrigué (par l'intermédiaire ou non d'un réseau spécialisé) peut figurer. On peut également être appelé à représenter très schématiquement le fonctionnement d'une nappe souterraine utilisée dans le projet conjointement avec les eaux de surface.

b/ (ii) - Moyens non structuraux -

Il s'agit essentiellement des consignes, c'est-à-dire des procédures d'exploitation du système d'eau (aménagement + ressource). Ces consignes règlent la répartition, les prélèvements, soit dans le réseau hydrographique naturel, soit dans les réservoirs, les mélan-

ges éventuels d'eaux de provenances diverses (contrôle de salure par exemple), l'application éventuelle de restrictions dans la fourniture d'eau, etc.

On pourrait ajouter les prévisions d'apports et de crues, mais celles-ci sont rarement intégrées aux modèles de simulation tels qu'on les entend ici.

c/ - Inventaire des possibilités naturelles -

C'est surtout l'inventaire des ressources en eau qui est assuré pour les eaux de surface par l'exploitation des réseaux hydrométriques (stations de jaugeage), et des réseaux pluviométriques. Pour des eaux souterraines, on peut disposer de données provenant de réseaux piézométriques, mais l'utilisation n'est pas immédiate et demande souvent la mise au point de modèles hydrogéologiques chargés de reproduire à la fois le comportement des nappes lors des prélèvements et leur réalimentation ; si le modèle de simulation concerne un aménagement basé essentiellement sur l'utilisation des eaux de surface, la partie "eaux souterraines" peut être simplifiée à l'extrême et totalement intégrée au système d'eau par des algorithmes élémentaires, sans que les résultats de la simulation en soient notablement altérés.

L'élaboration des données "ressources en eau", et notamment de celles qui se rapportent aux eaux de surface (apports naturels) est un point essentiel de l'étude hydrologique de l'aménagement. Elle fait appel naturellement à l'information brute fournie par les réseaux hydrométriques, mais aussi à toute une méthodologie visant à :

- homogénéiser les séries de données "apports" aux différentes stations et en étendre les durées au maximum en utilisant au besoin l'information pluviométrique ;
- interpoler ou extrapoler géographiquement ces données "stations" pour obtenir des séries d'apports aux différents "points d'entrée" du modèle.

Quelle que soit l'excellence des méthodes de calcul utilisées, la totalité de l'information, qui conditionne en définitive la précision du calcul hydrologique des aménagements, est tout entière contenue dans les données primaires, hydrométriques et climatologiques, recueillies dans le bassin ou utilisées pour la transposition géographique. Or, cette "collecte de données" est généralement sous la responsabilité de l'Etat, ou de collectivités régionales, ou de leurs services et agences spécialisées. Il y a donc, ici également, un problème de choix politico-économique dont, malheureusement, les responsables ne sont pas toujours conscients.

Une caractéristique des données hydrologiques et pluviométriques est, comme pour toute série chronologique, de ne pas être reproductible, ce qui inclut que toute année d'observation différée ou perdue est une lacune irréparable dans l'information disponible lors de l'étude d'un aménagement. Il n'en est heureusement pas de même pour la collecte d'un autre type d'information, par ailleurs non moins importante, qu'est, par exemple, l'inventaire des sites de barrage. Cet inventaire peut donc être commencé peu de temps avant le début des études détaillées. Il convient toutefois qu'il soit assez avancé lors de la mise en oeuvre du modèle de simulation, car s'il est facile de supprimer d'un tel modèle un élément structural déterminant, il est beaucoup plus ennuyeux de devoir en rajouter.

## 2.- Réalisation des objectifs

### a/ - Généralités et principes de simulation -

Dans la définition des objectifs, on a mis l'accent sur l'interdépendance des besoins, des possibilités en ressource et des options politiques à différents échelons. En fait, cette dépendance se manifeste lors de l'exploitation du modèle de simulation ; elle est externe à sa conception et à son fonctionnement propre. D'autre part elle ne joue vraiment qu'au stade d'une planification, à court, moyen ou long terme, et surtout lorsqu'on cherche à optimiser l'utilisation de la ressource en eau dans un pays dont le développement est déjà relativement avancé. Dans bien des cas, les objectifs sont beaucoup plus modestes et correspondent seulement à la satisfaction la plus économique de besoins immédiats ou facilement envisageables dans un avenir pas trop lointain.

Dans un cas comme dans l'autre, on est finalement amené, pour le fonctionnement disons "unitaire" du modèle, à fixer un besoin ou une série de besoins, modulés ou non dans le temps, qu'on appellera alors "demandes". Le "passage en simulation" permet alors de dire dans quelle mesure les moyens mis en oeuvre, utilisés avec une stratégie de consigne donnée, permettent de satisfaire ces demandes.

Ce contrôle d'efficacité fait appel à deux concepts fondamentaux :

- la défaillance, indique simplement que, au cours d'une exécution de la simulation à l'échelle du pas de temps choisi (par exemple le mois), le "contrat" n'a pu être réalisé, c'est-à-dire qu'une demande  $D_j$  (MOIS) n'a pu être satisfaite. L'analyse statistique de la série de défaillances trouvées pour la demande  $j$  fournit une première base de jugement sur l'efficacité des dispositions envisagées.
- le déficit précise de combien le contrat n'a pas été réalisé ; l'étude de la série statistique des déficits annuels, par exemple pour une demande  $j$  constitue un moyen complémentaire de jugement. Il peut permettre notamment de chiffrer des pertes de production.

Si la défaillance se compte en nombre de coups, le déficit est donc estimé dans l'unité qui sert à exprimer la demande ; par exemple millions de  $m^3$  d'eau pour une fourniture d'irrigation, Mwh pour une fourniture d'énergie.

D'autres critères peuvent être introduits dans un modèle de simulation, par exemple les "pertes d'exploitation", c'est-à-dire les volumes d'eau qui n'ont pu être utilisés et sont rejetés sans profit hors des zones de développement.

Du point de vue qualité des eaux, on exerce, s'il y a lieu, un contrôle du même genre. Par exemple, on peut imaginer différents critères de salure pour les eaux d'irrigation, basés sur l'acceptation d'un certain taux de sel comptable avec la culture et le sol d'un périmètre donné. On sait par exemple que telle culture sur tel sol admet un certain taux instantané (c'est-à-dire pour la durée du pas de temps), à condition que cela ne dure pas trop longtemps, mais que sur une longue durée, le taux moyen ne doit pas dépasser une certaine valeur inférieure au taux instantané ; d'où la mise en oeuvre simultanée, dans le modèle, de deux critères basés l'un sur un seuil de salinité instantanée, l'autre sur un seuil de salinité cumulée.

Il ne faut pas, enfin, négliger le rôle positif que peut en bien des cas jouer la notion de restriction. On a l'habitude d'envisager la restriction comme une déplaisante mesure d'autorité qui ne doit intervenir que pour parer à des catastrophes inattendues. C'est effectivement ce qui se passe souvent dans les faits, quand elle n'est pas simplement le résultat de l'incurie d'une instance responsable. Il en est tout autrement si on considère l'application d'une restriction volontaire, programmée, dont l'application est déclenchée par des critères objectifs, basés généralement sur l'état des réserves à divers stades de l'utilisation, bien avant que se profile l'ombre de la catastrophe. Elle peut alors, et la simulation le montre clairement, améliorer considérablement l'efficacité d'un aménagement. Un exemple simple est la restriction d'irrigation : en réduisant volontairement les doses appliquées par rapport aux doses prévues, on aboutit certes à une baisse de rendement, mais beaucoup moins onéreuse qu'un épuisement total des réserves en eau.

b/ - La conception "physique" d'un modèle de simulation -

Le modèle de simulation est "très physique", il peut reproduire dans le moindre détail toutes les circonstances de l'aménagement. Il est également "très opérationnel" et accepte des modes de fonctionnement et consignes aussi sophistiqués qu'on veut. Mais bien entendu tout ceci n'est pas gratuit et il convient, dans chaque cas particulier, de limiter les ambitions du modèle, notamment

- suivant la qualité de l'information disponible sur la ressource,
- en accord avec la précision avec laquelle on peut évaluer les besoins.

b/ (i) - Conception et dialogue -

Du fait de son caractère très physique et de sa reproduction très fidèle de fonctionnement du système d'eau (apports + aménagement + utilisation), même très complexe dans sa réalisation, le modèle de simulation conserve une simplicité conceptuelle qui permet aux non spécialistes que sont en général les maîtres de l'oeuvre et les responsables de la décision, de suivre aisément les résultats obtenus lors des essais successifs. Par exemple, l'influence de la variation de hauteur d'un barrage réservoir apparaît nettement sur les tableaux de résultats.

Dès la conception du modèle, il doit y avoir dialogue entre le maître de l'oeuvre, l'hydrologue modéliste, le bureau d'études génie civil, le prospecteur éventuellement et l'économiste. La plus grande difficulté, au départ, est de se comprendre, surtout si le maître de l'oeuvre et génie civil n'ont aucune notion de ce qu'est la simulation. Dans la conception de détail du fonctionnement, des transferts, des consignes, des critères, il est presque inévitable, si le système d'eau est complexe, que la première version du modèle ne convienne pas du tout. Ce n'est que par retouches successives qu'on peut arriver à un accord.

Par contre, il est important, dès le début, d'avoir une conception globale de l'aménagement aussi complète que possible ; il s'agit là du cadre dans lequel on va travailler, cadre qu'on appelle schéma topologique et dont la structure détermine en fait la logique des opérations. Une addition ultérieure à ce schéma conduit pratiquement à refaire complètement le modèle.

b/ (ii) - Géographie et topologie -

Tout aménagement des eaux se fait dans le cadre géographique du bassin versant. Dans ce cadre géographique, on doit situer les différents éléments du projet, aussi bien ceux qui participent à la production que ceux qui correspondent aux utilisations de l'eau. De ce point de vue, on doit considérer :

- les bassins versants ou bassins partiels naturels qui fournissent le projet en eaux de surface non régularisées ;
- les nappes souterraines, qui, dans la mesure où leurs eaux ne quittent pas le bassin défini topographiquement, se comporte vis-à-vis de l'aménagement comme des réservoirs naturels ;
- les réservoirs artificiels à créer ;
- les points de prélèvement pour satisfaction des demandes.

Comme on le verra, le fonctionnement du modèle est basé sur la réalisation de bilans d'eau (et éventuellement de sels) dans des fractions du système d'eau. Un point important, dans la réalisation du modèle, est justement la division du bassin total en zones telles que l'on puisse dans chacune effectuer un bilan complet. Cela implique notamment qu'aucun prélèvement effectué dans la zone ne puisse, même partiellement, y retourner. Dans le fonctionnement du modèle, seule compte la position respective des éléments du projet les uns par rapport aux autres et par rapport à ces zones géographiques. C'est cette disposition, assortie des liaisons qui peuvent être raisonnablement envisagées, qui constitue le schéma topologique.

Ce schéma situe le problème dans l'espace. Du point de vue opérationnel, il doit donner la séquence des opérations ; étant admis qu'on procède généralement d'amont en aval. Il faut, même à ce stade, avoir défini le déroulement de ces opérations dans le temps ; ces modèles travaillent obligatoirement par différences finies et faire un bilan d'une zone suppose qu'on a fixé la durée sur laquelle va s'effectuer le bilan. C'est ce qu'on appelle le pas de temps du modèle, généralement pris égal à un mois. Il est bien évident que la séquence des opérations du point le plus amont au point le plus aval du bassin (ou des bassins, suivant des ordres de séquence entre bassins à déterminer) n'est pas instantanée. Un point important est de savoir si on peut "faire comme si", c'est-à-dire si la durée réelle de la propagation des transferts, entrées et sorties des zones élémentaires de calcul, peut au total être négligée par rapport au pas de temps adopté. C'est très souvent le cas, et on supposera cette condition réalisée pour la suite de cette communication, mais il ne faut pas perdre de vue qu'elle peut ne pas l'être, auquel cas, une méthodologie plus compliquée devrait être mise en oeuvre.

b/ (iii) - Eléments structuraux d'un modèle - Autres symboles -

Avant de montrer à quoi ressemble un schéma topologique, il convient de décrire plus précisément les éléments structuraux dont le projet est composé. Bien entendu, on peut imaginer autant de dispositifs qu'on veut. Certains, cependant, se retrouvent assez souvent. On peut ainsi énumérer :

- les barrages réservoirs intégrés au système des unités hydrauliques (voir paragraphe suivant),
- les réservoirs, non intégrés au système des unités hydrauliques,
- les prises d'eau sans accumulation (à l'échelle du pas de temps),
- les stations de pompage,
- les usines hydroélectriques,
- les transferts artificiels.

On trouvera fig. 1 la représentation symbolique de ces éléments. Dans la même figure, on trouvera la symbolisation des différents écoulements et apports, des débits transférés, des nappes, aires d'utilisation, etc.

b/ (iiii) - Schéma topologique -

Il dérive de la division en zones géographiques dont il a été question en b/(ii). Sur le schéma topologique, à chaque zone géographique correspond une "unité hydraulique", ainsi nommée parce que c'est sur chacune d'elles que l'on effectuera les bilans hydrauliques élémentaires, et éventuellement les bilans de sel.

La figure 2 montre un schéma topologique relatif à un plan d'aménagement régional portant sur un bassin important et quatre petits bassins. Le système de numérotation des unités hydrauliques apparaît nettement sur le bassin principal. On commence par l'amont et, chaque fois qu'on rencontre un affluent, qui comporte lui-même des éléments d'aménagement, on saute à la tête de bassin de cet affluent. C'est ainsi que dans le schéma proposé on délimite sans problème les unités 1 à 4 qui participent à l'alimentation de 4 aires d'irrigation. Le tronçon à l'aval de l'unité 4 recevant un affluent sur lequel on projette un barrage réservoir, l'unité 5 correspondra au bassin partiel de cet affluent, y compris le réservoir.

Prenons par exemple l'aire d'utilisation D3 (irrigation). Elle peut être alimentée soit par un pompage dans la rivière appelé Q2 D3 et provenant de l'u.h. 3, soit par un pompage dans la nappe souterraine NAPP3 appelé Q1 D3. La réalimentation QAN3 de la nappe se fait ici aux dépens des apports pluviométriques dans le bassin intermédiaire ; on admet qu'ils se déduisent de la connaissance de AC3, suivant des hypothèses aboutissant à un algorithme décrit dans le programme. Enfin, comme il y a ici des problèmes de salure, on tient compte des colatures du drainage de D3 (CQ D3) qu'on renvoie dans l'unité 4.

c/ - Algorithmes et programmation -

c/ (i) - Principes généraux -

On a déjà exposé quelques principes du fonctionnement d'un modèle de simulation d'aménagement. On commence par faire le bilan de l'unité 1 (la plus amont), qui donne ou non un reliquat envoyé dans l'unité 2, etc. jusqu'à la mer.

Le bilan en eau d'une unité i comporte :

- le calcul des apports à cette unité pendant l'intervalle de temps avant toute intervention ; ces apports peuvent provenir :
  - . du bassin versant partiel ou non (naturels)
  - . du reliquat de la ou des unités situées immédiatement en amont
  - . des colatures provenant de périmètres d'irrigations
  - . de transferts ;
- le calcul des sorties obligatoires :
  - . transferts imposés
  - . réalimentation des nappes ;
- si l'unité comporte un réservoir, le calcul du nouvel état du réservoir, compte-tenu des pertes par évaporation et celui de déversés éventuels ;



- la satisfaction des demandes provenant des zones d'utilisation qui dépendent de cette unité.

On voit donc que l'examen de la satisfaction de la demande, opération fondamentale puisque destinée à contrôler l'efficacité du système d'aménagement, se fait à l'intérieur de l'opération de bilan élémentaire.

Si l'unité doit satisfaire une demande, lors de l'opération de bilan correspondant à un temps donné, il peut se produire :

- que la demande peut être satisfaite par l'eau disponible dans l'unité hydraulique telle qu'elle ressort des trois premières opérations du bilan ; il n'y a plus qu'à déduire la demande satisfaite du reliquat évacué par l'unité à l'issue de l'intervalle de temps<sup>et</sup> si l'unité comporte un réservoir, à recalculer le nouvel état de ce dernier ;
- que la demande ne peut pas être satisfaite par l'unité. On doit alors aller chercher ailleurs, en général dans des réservoirs situés à l'amont ; il est rare en effet que des transferts soient déclenchés par des pénuries locales : ils sont plutôt gouvernés par des cotes d'alertes atteintes dans certains réservoirs. Il faut relancer une opération de bilan, cette fois en remontant vers l'amont ;
  - . si on finit par satisfaire la demande, on passe à l'unité suivante,
  - . si on ne peut la satisfaire, on affiche une défaillance et on calcule le déficit avant de passer à l'unité suivante.

On s'aperçoit d'une manière générale qu'on améliore l'efficacité en assouplissant les consignes, notamment en faisant dépendre les priorités concernant les prélèvements (ou soutirages), de l'état des différents réservoirs, et en multipliant les transferts. On est toutefois limité dans cette seconde voie parce que le modèle devient très vite inextricable, que le gain d'efficacité du procédé décroît très vite quand la complexité croît, et que le prix de la réalisation risquerait d'être rapidement prohibitif.

Lorsqu'il se pose des problèmes de salure, les calculs deviennent beaucoup plus compliqués. En particulier, les soutirages vers l'amont remettent en question les calculs déjà effectués pour les salures sur les biefs et les réservoirs traversés. Une méthode consiste à traiter d'abord toute la satisfaction des demandes en quantité, puis de calculer a posteriori les nouveaux états de salure dans le système d'eau. Le procédé présente l'inconvénient de ne pas pouvoir utiliser les résultats des contrôles de qualité de la fourniture pour améliorer celle-ci par une répartition plus judicieuse des soutirages dans des réservoirs contenant des eaux de salures différentes.

#### c/ (ii) - Les algorithmes -

Dans toute la mesure du possible, le programme principal ne doit contenir que la logique du déroulement des opérations. Des sous-programmes SUBROUTINE ou FONCTION (en FORTRAN) contiennent les algorithmes permettant d'effectuer les opérations elles-mêmes.

On peut, par exemple, créer un sous-programme pour le calcul de la satisfaction d'une demande à partir d'une source, ou de plusieurs sources, en adoptant telle ou telle consigne de répartition ou de

priorité, avec ou sans contrôle de qualité. Mais les sous-programmes les plus courants se rapportent au bilan des réservoirs et au calcul de leur état. La figure 3 montre quels sont les paramètres d'un réservoir. Les sous-programmes qui s'y rapportent sont

FUNCTION V (HP, C, XH, KMAX),

qui représente la courbe de remplissage et calcule le volume pour une cote XH donnée : HP, C, KMAX définissant les éléments de paraboles constituant cette courbe ;

FUNCTION H (VP, C, HP, XV, KMAX).

qui inverse la courbe de remplissage et permet de calculer la cote correspondant à un volume donné,

SUBROUTINE REMBAR (HFIN, EVAP, HO, HP, CX, KMAX, VP, VFIN, SFIN, APPORT, SAPPO, VMAX, QS, SQS)

(SFIN : salure de VFIN, SAPPO : salure des apports, QS : débit de sortie, SQS : salure de QS)

qui calcule l'état de remplissage d'un barrage et ses déversés éventuels, en quantité d'eau et de sel, compte-tenu des apports et de l'évaporation (organigramme présenté figure 4).

Bien entendu, ce dernier sous-programme peut être simplifié s'il ne se pose pas de problème de salure.

c/(iii) - Problèmes particuliers relatifs à l'hydroélectricité -

Ils se traduisent par des algorithmes particuliers, mais peuvent également affecter la logique générale du programme.

c/(iii) a - Cas d'un réservoir -

Lorsqu'on a affaire à une chute suffisamment importante par rapport à sa variation possible dans l'intervalle de temps, ce problème peut être traité pratiquement comme une simple fourniture :

- si la demande en électricité n'a aucune priorité, celle-ci peut être traitée comme un sous-produit des déversements des barrages ; on se contente alors de calculer l'énergie produite par les déversements de débit inférieur au débit des turbines naturellement compte-tenu de la chute moyenne pour le mois et éventuellement de la courbe de rendement ; cela reviendrait, en cours d'exploitation, à envoyer "ce qu'on peut produire" sur un réseau interconnecté.
- si la demande en électricité est totalement prioritaire, il suffira de convertir cette demande en volume d'eau, compte-tenu de la chute au début du mois, et de raisonner comme s'il s'agissait d'une simple fourniture d'eau.

Par contre, si la chute varie beaucoup dans l'intervalle de temps, les choses peuvent se compliquer considérablement. Cette variation a deux composantes :

- une composante amont qui provient du marnage de la retenue
- une composante aval qui peut être provoquée par des facteurs divers :

- variation du débit turbiné qui provoque une variation de la cote de restitution suivant la loi hauteur-débit de la rivière en ce point
- débits provenant de dérivations non turbinées et produisant le même effet
- variations du niveau aval indépendantes du débit (par exemple, confluent avec une très grande rivière qui impose son propre régime de variation des hauteurs)

etc.

La variation du niveau aval provenant de celle du niveau turbiné peut se compliquer encore si par exemple le débit restitué est rejeté à la rivière par un canal dont la propre loi de débit doit alors être prise en considération. Enfin, différentes pertes de charge inhérentes au passage dans la centrale doivent souvent être prises en considération ; elles varient elles-mêmes avec le débit, et quelquefois la charge.

Pour calculer l'énergie produite, on se trouve donc en face de plusieurs paramètres qui varient tous dans l'intervalle de temps pris pour effectuer le calcul, et, de plus, réagissant les uns sur les autres. Il est alors impossible de calculer directement le productible ; on doit utiliser des algorithmes itératifs.

Examinons maintenant le fonctionnement de deux usines hydroélectriques couplées sur la même demande (ou la même série de demandes). Pour fixer les idées, on supposera que la première usine est installée sur la rivière principale au pied d'un réservoir et que la seconde est au fil de l'eau, en aval de la première et située de telle façon que les apports sauvages du bassin intermédiaire ne soient pas négligeables. Lorsqu'on commence un calcul sur un intervalle de temps donné, il est évident qu'il faut d'abord utiliser toute l'énergie que peut produire le fil de l'eau avant de faire appel au réservoir. Mais ce fil de l'eau comporte deux parties :

- la partie des apports naturels du bassin jusqu'au réservoir, qu'on ne peut pas stocker (lorsque ces apports excèdent la capacité résiduelle),
- les apports sauvages du bassin intermédiaire.

On commencera donc par remplir le réservoir, turbiner les excédents (jusqu'à concurrence des possibilités des groupes), puis on turbinera les (excédents + apports sauvages) dans la centrale au fil de l'eau. Si cela suffit pour satisfaire la demande, le problème est réglé (on remarquera qu'on a peut-être déjà dû faire appel à des calculs itératifs). Sinon, il faut faire appel à un soutirage dans le réservoir. Un premier problème se pose pour fixer la valeur du soutirage à effectuer. En effet, le déficit constaté avec le seul fil de l'eau ne peut être exprimé qu'en valeurs d'énergie (par exemple Mwh). Le calcul du débit nécessaire à produire cette énergie à partir de l'usine du barrage réservoir n'est déjà pas direct, car les pertes de charge vont augmenter, non seulement pour la partie de l'énergie qu'on se propose de calculer, mais pour celle qui a déjà été calculée.

Puis la chute totale va diminuer, puisque le débit augmentant par rapport au débit du premier calcul, la cote de l'eau à la restitution va augmenter. Enfin, les nouveaux débits provenant du barrage réservoir remplacent ceux qui ont été pris pour le premier calcul ; il faut donc tout recommencer. On voit aisément qu'un tel processus de calcul ne peut être qu'itératif. Une des difficultés est de trouver un critère raisonnable permettant l'arrêt du calcul.

c/(iii) b - Problèmes relatifs au fil de l'eau -

S'il n'y a aucun stockage, qui soit d'une certaine importance compte-tenu du pas de temps, il est assez rare que le pas de temps mensuel puisse être adopté ; on doit souvent descendre à l'échelle journalière. Il se peut, surtout si le fonctionnement est complexe et si on veut tenir compte dans le détail des courbes de rendement et des variations de pertes de charge, que la modélisation reste un outil quasi indispensable. En bien des cas, cependant, on peut aborder le problème par des méthodologies plus simples mettant en oeuvre, directement, des statistiques de défaillances (défaillances de hautes eaux et de basses eaux, décomptées à l'échelle journalière). Les données hydrologiques alors utilisées sont les débits caractéristiques. On sort du domaine des méthodes de simulation.

c/(iii) c - Autres problèmes -

Quand on parle d'hydroélectricité, on ne peut pas passer totalement sous silence ses relations avec d'autres formes de production de l'énergie électrique, centrales thermiques classiques et nucléaires. Ces formes de production peuvent parfaitement être intégrées à des modèles de simulation du type de ceux qui ont été évoqués.

Enfin, la dernière question à laquelle on fera allusion est celle de la modulation de la production dans l'intervalle de calcul, notamment pour assurer les puissance de pointe. En principe, si les variations des réservoirs ne sont pas trop importantes, on pourra procéder à peu près comme s'il s'agissait de satisfaire une demande constante, en faisant toutefois attention aux débits limites admis par les groupes et aux pertes de charge. Un bon moyen consiste à faire les calculs pour le pas de temps opérationnel du modèle, mais à introduire comme durée de fourniture un temps qui ne soit qu'une fraction de ce pas de temps. On peut enfin travailler effectivement sur une courbe de charge journalière moyenne, mais la description du processus de calcul nous entraînerait trop loin.

c/ (iiii) - Organigramme d'un programme de simulation -

La figure 5 montre l'organisation générale d'un programme de calcul pour la simulation d'un aménagement de simple fourniture. La cellule essentielle du programme est constituée par le travail dans l'intervalle de temps mensuel contenu dans la boucle centrale (numérotée ici 7000). Les programmes sont généralement conçus pour effectuer plusieurs séries d'essais.

d/ - Utilisations et interprétation des résultats -

On a déjà, tout au cours de l'exposé, indiqué la plupart des conditions d'exploitation et commenté le contrôle de la réalisation des objectifs. On regroupe dans ce paragraphe, de façon schématique, les idées déjà exprimées.

d/ (i) - Conditions d'utilisation -

On rappelle qu'un modèle de simulation ne peut être utilisé que pour une situation donnée de la prospective, c'est-à-dire que l'ensemble des besoins ne doit pas varier au cours d'une série d'essais et tant que les résultats n'ont pas été totalement interprétés.

La simulation peut utiliser en entrée, en ce qui concerne la ressource, soit des séries de données réellement observées ou étendues par analogie, interpolation, corrélations hydro-climatologiques (séries dites "historiques"), soit des séries obtenues par tirage au hasard dans les lois statistiques représentant la distribution des données "ressources" (échantillons dits "synthétiques").

Le but de la simulation étant finalement de fixer les caractéristiques des ouvrages et les consignes à mettre en jeu pour réaliser les objectifs de la façon la plus fiable et dans les meilleures conditions économiques, il est nécessaire de définir les paramètres représentant ces caractéristiques et consignes. Ce sont par exemple : la hauteur maximale du plan d'eau dans un réservoir (qui détermine la hauteur de l'ouvrage), le débit maximal d'une conduite ou d'un canal de transfert, la courbe de rendement d'un groupe hydroélectrique, sa courbe charge-débit, son débit à pleine ouverture, les volumes aux cotes d'alerte (réservoir) pour l'application des consignes de restriction.

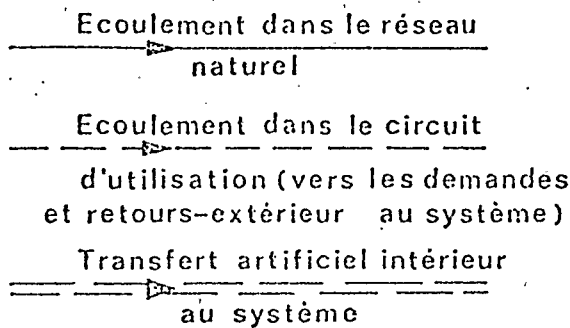
d/ (ii) - Utilisation et analyse des résultats -

L'ensemble des demandes étant fixé, un essai consiste à faire tourner le modèle pour des valeurs données des paramètres (ouvrages et consignes). Les résultats sont donnés sous forme de tableaux de déficits et de défaillances (totaux annuels) dont l'analyse statistique permettra de juger l'efficacité de la solution adoptée pour mener l'essai. En plus de ces données, il est souvent intéressant de "faire sortir" l'évolution du système, par exemple l'état des réserves à la fin de chaque mois et/ou de chaque année. D'autres renseignements, tels que la récapitulation des coefficients de restriction imposés ou des pertes d'exploitations, constituent un autre élément de jugement.

Des séries d'essais, effectués en faisant varier les valeurs des paramètres, chacun d'eux représentant ainsi une solution possible pour l'aménagement, permettent de comparer ces solutions entre elles et de s'acheminer ainsi vers une optimisation du système.

Pour que cette optimisation puisse être atteinte, il faut bien entretenir l'établissement de critères qui permettent d'établir un jugement. Ces critères ont toujours plus ou moins une base économique ; mais d'autres préoccupations d'ordre politique et/ou écologiques peuvent intervenir ; ces préoccupations ne sont pas toujours, et même pas souvent, chiffrables.

$n$  Numéro d'unité hydraulique



$A_n$  Apport naturel en tête de bassin dans l'unité  $n$

$AC_n$  Apport naturel du bassin intermédiaire relatif à l'unité  $n$

Débit transféré à l'intérieur du système (par transfert naturel ou artificiel)

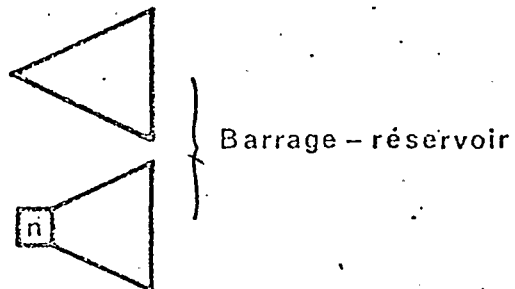
Débit transféré vers une demande (sortie définitive du système)

$J_n$  Jonction ou dispatching

Système de fourniture d'eau par des moyens artificiels

NAPP  $n$  Nappe souterraine

$\circ$  Délimitation d'unité hydraulique



Réservoir sans alimentation naturelle, non incorporé à une unité hydraulique

Pompage

Aire ou zone d'utilisation

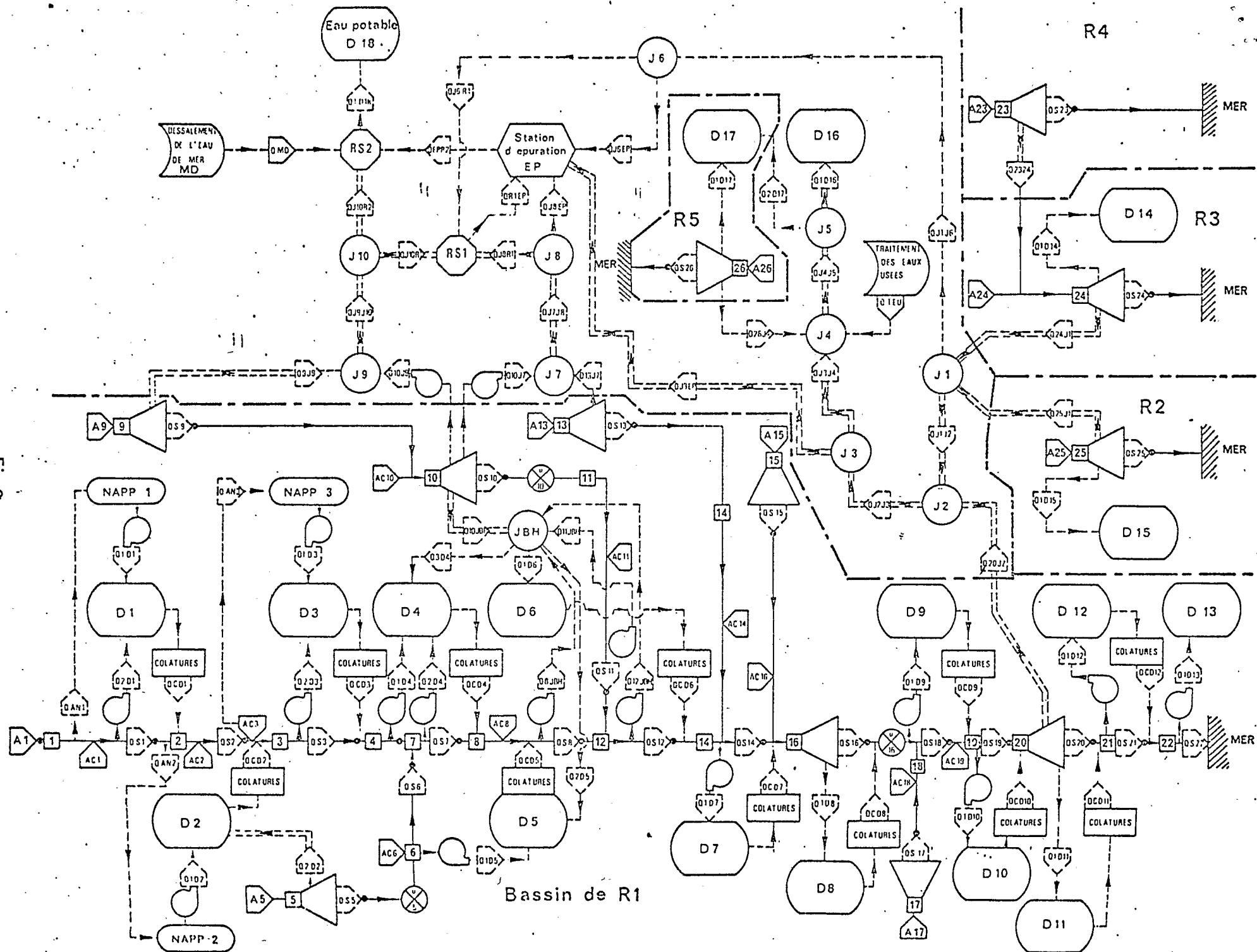
Colature Colature et son débit

EP Station d'épuration pour la production d'eau potable

Usine hydroélectrique à l'aval immédiat de l'unité  $n$

Fig. 1

Fig. 2.



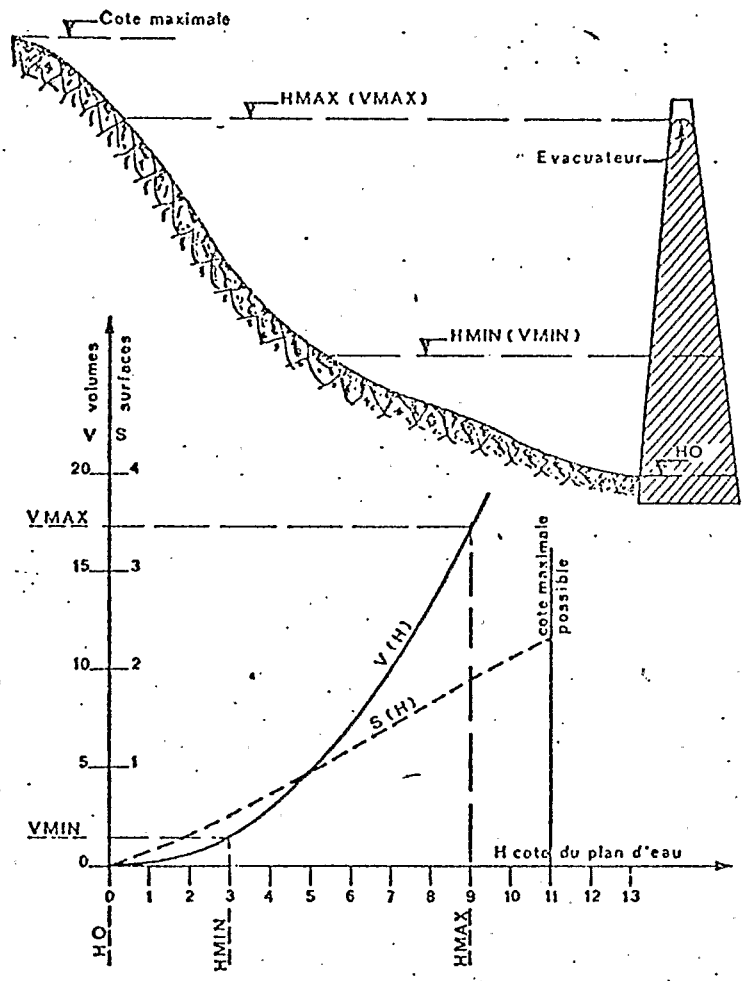


Fig. 3



CONFERENCE DE L'EAU DES NATIONS UNIES

(7-18 mars 1977 - MAR DEL PLATA)

---

Modèles de simulation dans les aménagements hydrauliques -  
Applications à la production hydro-électrique.

Marcel ROCHE, Ingénieur en chef  
à ELECTRICITE DE FRANCE  
Hubert DOSSEUR, Ingénieur  
à ELECTRICITE DE FRANCE

R E S U M E

L'étude hydrologique d'un aménagement ne peut guère se traiter indépendamment de l'objectif poursuivi, ce qui exige de définir le système d'eau aussi complètement que possible à partir de la prospection des possibilités naturelles en ressources et en sites d'aménagement, des besoins et de leur prospective. Un outil de choix pour traiter ce genre de problème est le modèle mathématique de simulation. Les auteurs s'attachent particulièrement à donner les principes généraux de la conception de ce genre de modèle, notamment l'élaboration du schéma topologique et de la structure des consignes. Ils mettent en évidence les caractères particuliers de ces modèles lorsqu'il s'agit de traiter des problèmes de production hydro-électrique. L'utilisation de tels modèles s'est avérée très satisfaisante pour la recherche de solutions efficaces au problème de la confrontation des besoins et des ressources dans les pays en voie de développement.