HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

PAR

R. KREMER

1. Nouvelles tendances dans la gestion des ressources en eau

L'eau est notre principale ressource naturelle. D'elle dépend en fait l'existence de toute vie et activité. Contrairement à ce qui se passe pour les autres ressources qui s'épuisent progressivement, les ressources en eau se renouvellent constamment de façon naturelle, grâce au processus d'évolution cyclique perpétuelle de l'eau dans le système océan-atmosphère-océan, connu sous le nom de cycle hydrologique (voir fig. 1).

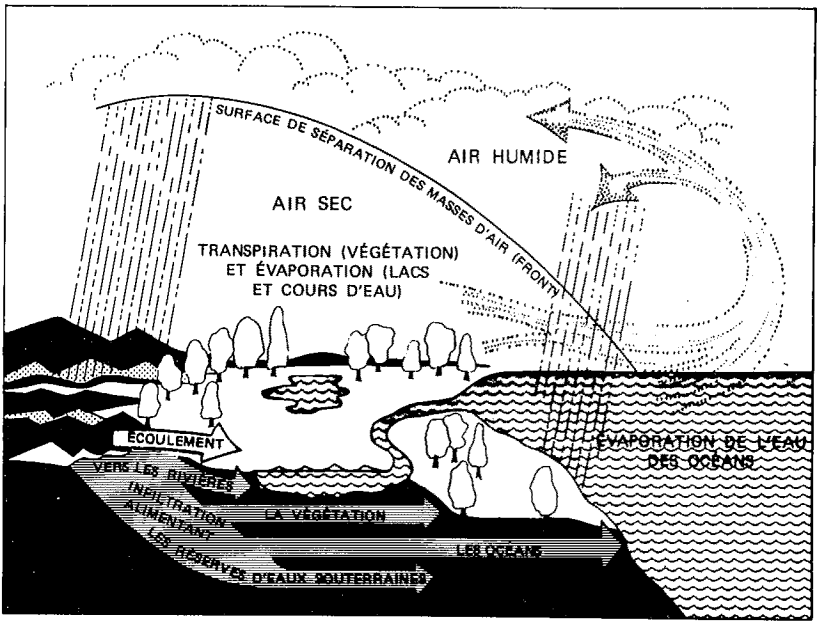


Fig. 1. Cycle hydrologique

Vu l'abondance quasiment illimitée de cette matière, on ne parlait guère, jusqu'à une date récente, de l'approvisionnement en eau, car on le tenait pour assuré. Toutefois le développement de l'activité économique pour satisfaire les besoins matériels d'une population de plus en plus exigeante, a soudainement obligé les responsables à prendre conscience du grave problème qui est celui de la répartition de l'eau dans le temps et dans l'espace. Dans les pays avancés, on se trouve confronté avec des consommations globales moyennes journalières par tête d'habitant de plusieurs milliers de litres, ce qui nécessite une gestion des ressources en eau, discipline qui s'est affirmée comme relativement indépendante au cours des dernières décennies. Elle est destinée à chercher des solutions générales optimales aux problèmes résultants du rapport entre les besoins en eau et les disponibilités offertes par la nature (voir fig. 2).

La recherche du bon équilibre entre ces deux éléments nécessite de les considérer comme inséparables du milieu physique et social. Ce sont d'ailleurs généralement des considérations d'ordre politique et économique qui joueront le rôle principal dans l'élaboration des décisions concernant cette gestion. La conception élargie présentée dans le schéma de la fig. 2 est née récemment de la conviction de plus en plus affermie que les ressources naturelles étant nécessairement limitées, leur gestion réfléchie et coordonnée est l'une des principales conditions du progrès. Naguère, la gestion des ressources en eau consistait à apporter des solutions ad hoc au problème de l'offre et de la demande d'eau, tel qu'il se posait à propos de certains travaux de génie civil, comme le captage et la distribution des eaux, les stations d'épuration, les centrales hydrauliques. Le problème était considéré comme de caractère purement technique, semblable à ceux de la composition du béton, de la disposition des fondations, de la stabilité des ouvrages. C'est seulement quand les réalisations ont augmenté en taille et en nombre qu'il est devenu évident que l'ensemble des solutions optimales propres à chaque problème aboutit à un conglomérat chaotique de situations contradictoires dont l'effet combiné sur l'économie, loin d'être optimal, est bien souvent néfaste. La gestion des ressources en eau a donc été portée du plan de la technique de l'ingénieur à celui de l'aménagement du milieu.

2. Nouvelles techniques dans la gestion des ressources en eau et leur relation avec l'hydrologie

Principale conséquence de cette conception élargie, la gestion des ressources en eau a beaucoup crû en complexité et nécessite de ce fait l'adoption de nouvelles techniques et méthodes d'analyse. La réponse à cette gageure est l'analyse des systèmes (recherche opérationnelle) qui

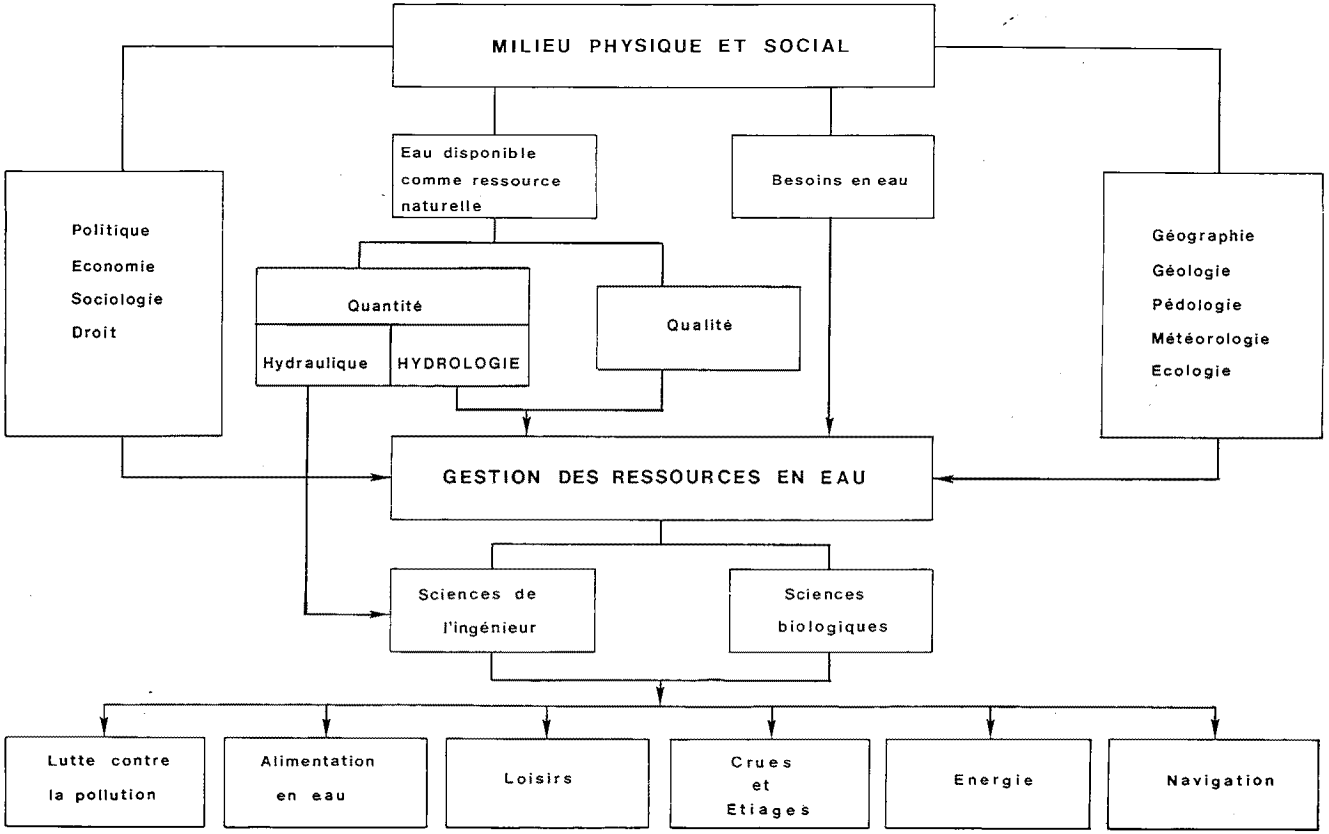


Fig. 2. La gestion des ressources en eau dans son contexte

cherche à atteindre la solution optimale non de manière empirique sur la base exclusive de l'expérience et de l'intuition, mais par voie analytique suivant un critère quantifiable, la fonction économique (F).

$$F = F(d_i) \qquad i = 1, 2, 3, \ldots\ldots n$$

F dépend de n décisions d_i en fonction des paramètres du système (par exemple: le niveau d'une digue à construire, le débit à fournir déterminé par l'ouverture de l'ouvrage de décharge d'un barrage).

Le critère établi par la fonction économique prendra une valeur différente pour chaque ensemble de paramètres. Comme ceux-ci sont choisis librement entre certaines limites, ils peuvent être déterminés de manière à rendre la fonction économique optimale, ce qui indiquera l'ensemble des paramètres optimaux recherchés. Cette valeur optimale de la fonction économique est toujours un minimum ou un maximum de sorte que la recherche de l'ensemble des décisions optimales revient à une recherche des valeurs extrêmes de la fonction F.

Dans la suite on va considérer l'exemple très simple d'une fonction économique à une variable, exprimée comme tel est souvent le cas, en unités monétaires (UM). Il s'agit de construire une conduite d'eau sur une distance déterminée L, pour transporter une quantité d'eau constante à partir de la station de pompage d'un barrage jusqu'à un château d'eau (voir fig. 3).

Le paramètre à déterminer de manière optimale, c'est le diamètre de la conduite (D), une variable discrète (voir fig. 4).

Deux fonctions du diamètre sont établies, celle des frais d'investissement F_i (D) et celle des frais d'exploitation F_e (D). La première augmente avec le diamètre, les conduites plus importantes étant plus chères. La deuxième diminue avec le diamètre, les conduites plus vastes ont des pertes de charge et donc des frais de pompage moindres. La fonction économique est obtenue en ajoutant les deux fonctions.

$$F(D) = F_i(D) + F_e(D)$$

Elle est minimum et donc optimale pour le diamètre de la conduite caractérisé par j + 1.

Cet exemple est évidemment banal, en pratique il y a toujours plusieurs variables décisives, ce qui pour la recherche de la valeur extrême de la fonction économique nécessite l'emploi d'ordinateurs.

Un type d'analyse très complet est « l'analyse de la valeur utile » (cost-benefit analysis), prescrite par le Ministre des Finances en Allemagne Fédérale pour les grands projets publics et qui sert depuis 1972

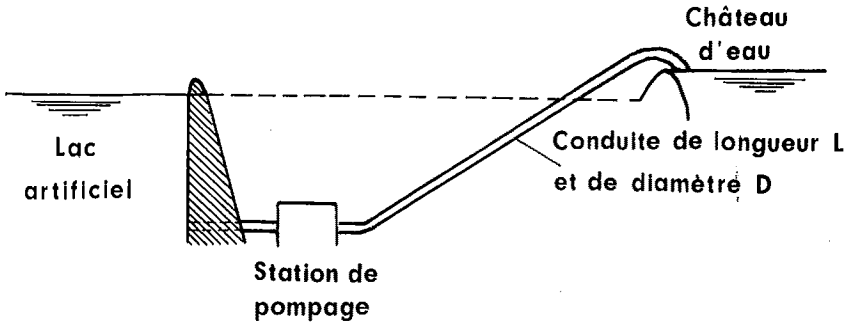


Fig. 3. Conduite entre station de pompage et château d'eau

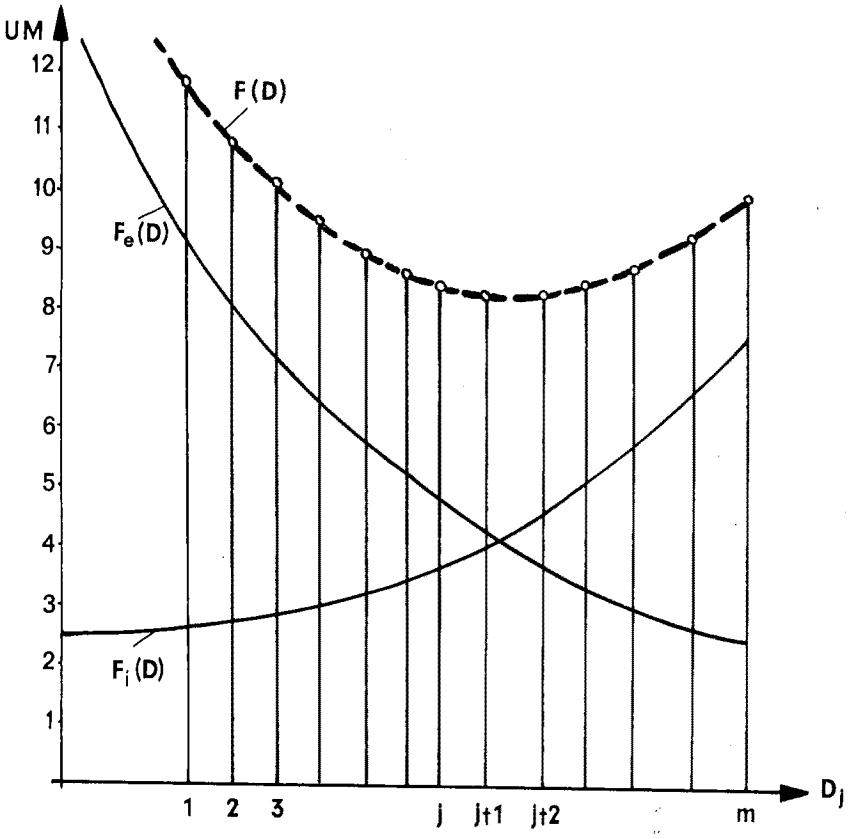


Fig. 4. Représentation de la fonction économique F(D)

aux Etats-Unis à diriger et à évaluer le programme fédéral pour la protection des eaux. Cette méthode cherche à opposer et à quantifier tous les frais et bénéfices, tangibles (investissements, bénéfices, etc.) et intangibles (possibilités de loisirs) d'un grand projet d'investissement. Or, la gestion des ressources en eau et donc les grands investissements dans le domaine de l'eau sont caractérisés par leur dépendance du cycle hydrologique.

Les donnés de base d'une « analyse de la valeur utile » d'un tel projet, le bénéfice (ou le rendement), l'investissement et les frais d'exploitation sont fortement influencés par les données hydrologiques, ce qui sera montré dans la suite.

Investissement. Le dimensionnement de toutes les conduites, prises, retenues, machines hydrauliques avec leurs accessoires, se base essentiellement sur les débits, leur fréquence et leur probabilité. Le choix de la probabilité dépend de considérations économiques comme la durée de vie probable de l'aménagement, son coût, le risque de destruction, etc. En fixant par exemple la durée de vie d'une retenue à m années et en choisissant une crue de projet ayant la fréquence n, la probabilité W de dépassement de la crue de projet peut être calculée par la formule

$$W = 1 - (1 - \frac{1}{n})\, m$$

Pareillement la probabilité des valeurs extrêmes du niveau d'eau joue un rôle important dans le calcul de la stabilité d'un ouvrage hydraulique, son dimensionnement hydrostatique.

En outre, le cycle hydrologique agit sur l'investissement par les frais d'assèchement ainsi que par le risque statistiquement bien défini de dépassement de la crue maximale prévue.

Frais d'exploitation. Ils sont influencés, pour ne citer que quelques exemples, par les besoins en énergie et l'usure des pompes, par les frais d'entretien provoqués lors de l'apport irrégulier de matières en suspension par les crues, par les droits de concession.

Bénéfice. Les fluctuations du débit en cours d'année agissent sur le rendement. Un cas typique est fourni par une centrale électrique de basse chute dont la capacité de régularisation est faible ou nulle. Sa production électrique annuelle totale dépend bien moins du volume annuel des eaux que de la distribution de l'écoulement au cours de l'année. Si, au cours d'une année pluvieuse, le gros du débit s'écoule lors de plusieurs fortes crues dont une partie seulement passe par les turbines, la production d'énergie sera bien moindre qu'au cours d'une année sèche où le débit est régulier et permet d'utiliser la majeure partie de l'eau. Autre exemple: dans un cours d'eau où la décharge d'effluents est relativement

constante, la pollution dépend du débit quotidien et non du volume annuel total.

En Grande-Bretagne on a constaté que l'opération inadéquate des systèmes de réservoir (eau de surface et eau souterraine), sans modèles mathématiques se fondant sur des séries de mesures hydrologiques, peut gaspiller jusqu'à 22% de la capacité de stockage.

Finalement il faut citer le bénéfice obtenu par diminution de dégâts en cas de crue, la fréquence des crues étant estimable à partir des séries de mesures hydrologiques.

Le degré d'exactitude d'une analyse de la valeur utile est proportionnel à l'exactitude des données de base. Dans la gestion des ressources en eau, celles-ci dépendent du cycle hydrologique qu'il faut donc étudier en détail pour pouvoir évaluer réellement l'effet des investissements.

Comme on a pu le constater, le rôle de l'hydrologie dans la gestion des ressources en eau est de fournir des données concernant la répartition de l'eau dans l'espace et dans le temps. Ainsi la gestion des ressources en eau ne concerne-t-elle pas l'hydrologie en tant que science de la terre, c.-à-d. la dynamique des phénomènes hydrologiques, leur comment et leur pourquoi, mais bien les résultats quantitatifs que l'hydrologie peut fournir.

De quelle manière, ces résultats quantitatifs sont-ils obtenus?

3. Les mesures hydrologiques

Pour un bassin versant déterminé, l'équation classique du bilan hydrologique peut s'écrire de la manière suivante:

$$Q = P - E - I \pm S \text{ avec}$$

P = précipitations
E = évaporation
I = infiltration
S = stockage
Q = débit

Précipitations. Y sont englobées toutes les eaux atmosphériques qui tombent sur le sol, sous forme liquide et solide, p. ex. neige, grêle. La hauteur des précipitations est toujours définie comme l'épaisseur comptée suivant la verticale, de la lame d'eau qui s'accumulerait sur une surface horizontale, si toutes les précipitations reçues s'y trouvaient immobilisées.

La mesure exacte est loin d'être aussi simple qu'il peut le paraître au premier abord, car chaque type de pluviomètre (voir fig. 5) crée une perturbation aérodynamique qui affecte la quantité de pluie et surtout

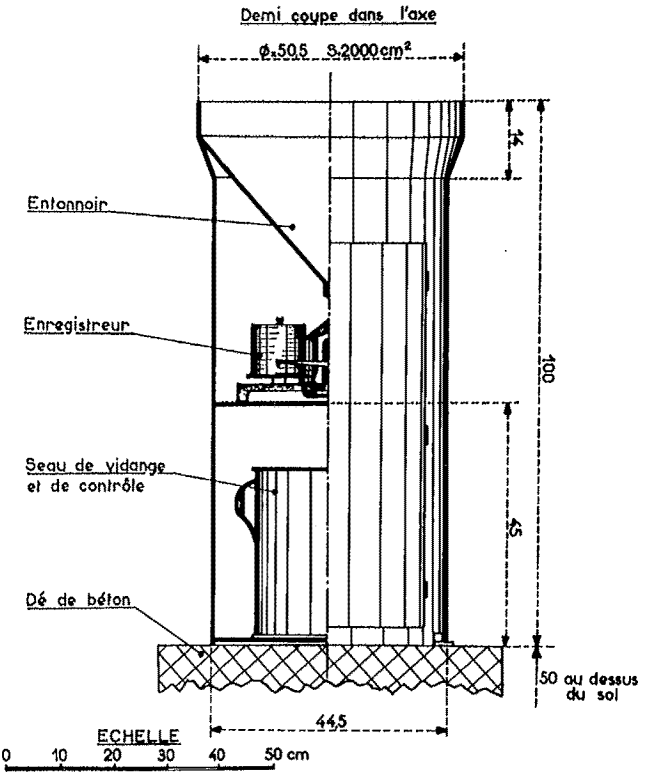


Fig. 5. Schéma d'un pluviomètre enregistreur

de neige captée. Ensuite, « l'échantillon » relevé par le pluviomètre est toujours extraordinairement petit par rapport à l'ensemble de la pluie qu'il est supposé déterminer sur une zone toujours trop étendue et il est d'autant moins représentatif que l'hétérogénéité spatiale de la pluie sur la zone considérée est importante.

Evaporation. Les phénomènes d'évaporation interviennent dans le cycle hydrologique dès le moment où les précipitations atteignent la surface du sol. Les principaux facteurs du pouvoir évaporant, mesurés aux stations météorologiques sont: Le déficit hygrométrique, la température de l'air, l'insolation, la vitesse du vent, la pression barométrique. Ces facteurs, introduits dans des formules comme celles de Penman, Thorntwhaite, Blaney et Criddle, Turc, permettent de calculer l'évaporation potentielle et les besoins en eau des cultures irrigées c.-à-d. l'évapotranspiration potentielle. La mesure directe de l'évaporation est souvent réalisée à l'aide de bacs (voir fig. 6).

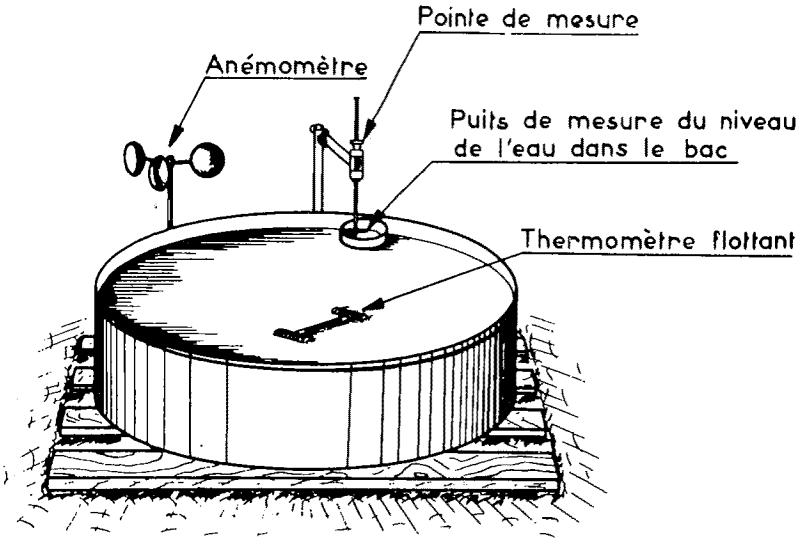


Fig. 6. Bac d'évaporation type A du Weather Bureau (USA)

L'évaporation totale annuelle moyenne effective varie en Europe occidentale entre 400 et 600 mm, suivant le degré de continentalité du climat.

L'infiltration se traduit par un apport aux nappes souterraines. Elle est mesurée dans des puits d'observation appelés piézomètres. Encore faut-il souligner que la ligne de partage des eaux de surface coïncide rarement avec celle des eaux souterraines.

Le stockage des eaux d'un bassin versant se fait généralement dans des réservoirs naturels ou artificiels comme les lacs, les retenues et peut être constaté en y observant les variations du niveau de l'eau.

Débit. Le régime des débits d'un cours d'eau durant une période déterminée est le seul poste du bilan hydrologique d'un bassin qui puisse être mesuré dans son ensemble avec une bonne précision. Les autres éléments de ce bilan, comme les précipitations et l'évaporation, ne peuvent être qu'estimés à partir « d'échantillons » prélevés en divers points du bassin ou déduits de formules hydrologiques toujours assez approximatives. D'autre part, dans les techniques de l'ingénieur, le régime des débits du cours d'eau est le plus souvent la donnée de base indispensable pour l'établissement des projets d'hydraulique. Néanmoins, la méthode de travail des hydrologues est restée la même depuis le début du siècle, ce que Sir James Jeans a illustré par la phrase caractéristique: « La radiation totale émise par le soleil dans l'unité de temps, transformée en mas-

se est quelque chose qui ressemble à 10.000 fois celle de l'eau qui coule en moyenne dans la Tamise sous le Pont de Londres et incidemment, si le facteur 10.000 est grossier, ce n'est pas parce que nous connaissons mal la masse exacte de la radiation solaire, mais parce que nous ne sommes pas capables de bien mesurer le débit moyen de la Tamise ».

En attendant que des méthodes d'enregistrement direct du débit, comme par exemple celle par ultrasons, deviennent mieux connues, les hydrologues continuent à procéder en deux étapes. D'abord ils lisent les hauteurs d'eau une ou deux fois par jour sur une échelle limnimétrique, ou les enregistrent d'une façon continue par un limnigraphe, à une section de jaugeage déterminée (voir fig. 7). Ensuite la courbe H (t) ainsi relevée est transformée dans celle des débits Q (t) correspondants, au moyen de la « courbe de tarage », établie par une série de jaugeages au moulinet ou chimiques.

4. Les modèles mathématiques

Les changements de conception dans la gestion des ressources en eau, les progrès réalisés dans le domaine de l'informatique, l'appareil méthodologique adopté, ont fourni, depuis une vingtaine d'années, une moisson de modèles mathématiques plus ou moins complets. Certains tiennent compte non seulement de l'hydrologie et de la qualité de l'eau, mais aussi de facteurs économiques, sociologiques (p. ex. « St. John River Model » appliqué à un bassin versant de 55.000 km^2 au Canada). Le plus grand nombre peut néanmoins être rangé dans la catégorie appelée modèles pluie-écoulement, permettant de calculer sur une section déterminée du cours d'eau le débit à partir des précipitations dans le bassin versant. Ces modèles servent:

— A estimer des débits à partir de précipitations prévues ou mesurées, pour une gestion optimale de l'eau, la prolongation du temps d'avertissement en cas de crue ou la détermination d'une crue de projet dans les bassins versants sans longue série de mesures du débit.
— A analyser l'impact des interventions humaines sur le régime des débits d'un bassin versant.
— Comme instrument de recherche pour étudier le cycle hydrologique dans un petit bassin versant expérimental.

Les modèles mathématiques représentent une manière entre autres (comme p. ex. les modèles analogiques, hydrauliques) pour étudier le système réel du cycle hydrologique. Les processus transformant des entrées (p. ex. pluie) en sorties (p. ex. débit), propres à cette machine, sont

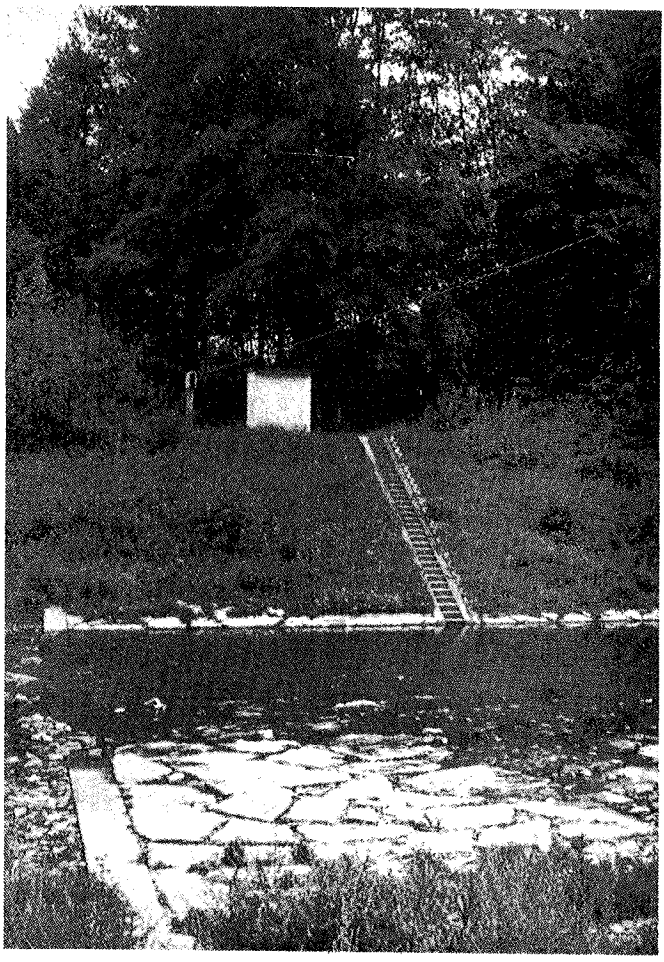


Fig. 7. Station de jaugeage sur l'Our à Gemünd

reproduisibles et mesurables. En principe, deux types de ces modèles existent à présent: l'un stochastique et l'autre déterministe.

Le mérite du premier est d'être moins exigeant envers les paramètres (p. ex. pluie) et relativement simple à appliquer. Par contre, il nécessite une quantité considérable de données d'un seul paramètre recueillies dans le passé pour pouvoir établir des corrélations valables avec un nombre adéquat de prédicteurs, donc ne peut pas être appliqué dans des bassins qui ne sont que récemment équipés de stations d'observation.

Le second type part pour la transformation de la pluie en débit, des mêmes conceptions hydrologiques physiques que les modèles stochastiques, mais ne profitant pas de la valeur statistiquement plus sûre de ces derniers pour la relation pluie-débit, doit utiliser un nombre plus élevé de paramètres comme l'humidité du sol, la capacité de rétention du bassin, l'évapotranspiration, etc.

Les modèles pluie-écoulement simulent une partie du cycle hydrologique (voir fig. 8). Avant de toucher le sol, les précipitations sont déjà diminuées de l'interception effectuée par les plantes. Suit un fractionnement successif à trois niveaux avec chaque fois un apport vers le chenal ou cours d'eau.

A la surface du sol, la première division entre évapotranspiration (évaporation du sol et transpiration des plantes), ruissellement de surface et infiltration se produit.

Dans la couche supérieure du sol, l'évaporation reste active et l'écoulement hypodermique chemine vers le cours d'eau en-dessous de la surface. L'infiltration vers le bas se poursuit avec des pertes sous forme d'emmagasinement.

Dans la couche inférieure du sol, l'emmagasinement dans la nappe phréatique s'accomplit et l'écoulement vers le chenal s'appelle le débit de base.

La figure 9 montre ce processus de manière schématique. Les modèles mathématiques en général n'en considèrent qu'une fraction. Ainsi on peut les diviser en trois types, délimités par pointillés dans le schéma:

1. Ceux servant à l'estimation des pertes (par interception, évaporation, infiltration) ou de la pluie effective produisant une crue.
2. Ceux qui servent au calcul des débits à partir des pluies effectives.
3. Les modèles pour le calcul du débit de base.

Pour être complet, un modèle pluie-débit doit donc contenir les trois types de modèle.

L'exemple de la figure 10 montre l'application d'un modèle stochastique au bassin versant de la Sûre en amont de Martelange. Le calcul se fond sur les moyennes mensuelles des pluies à Arsdorf et les moyennes

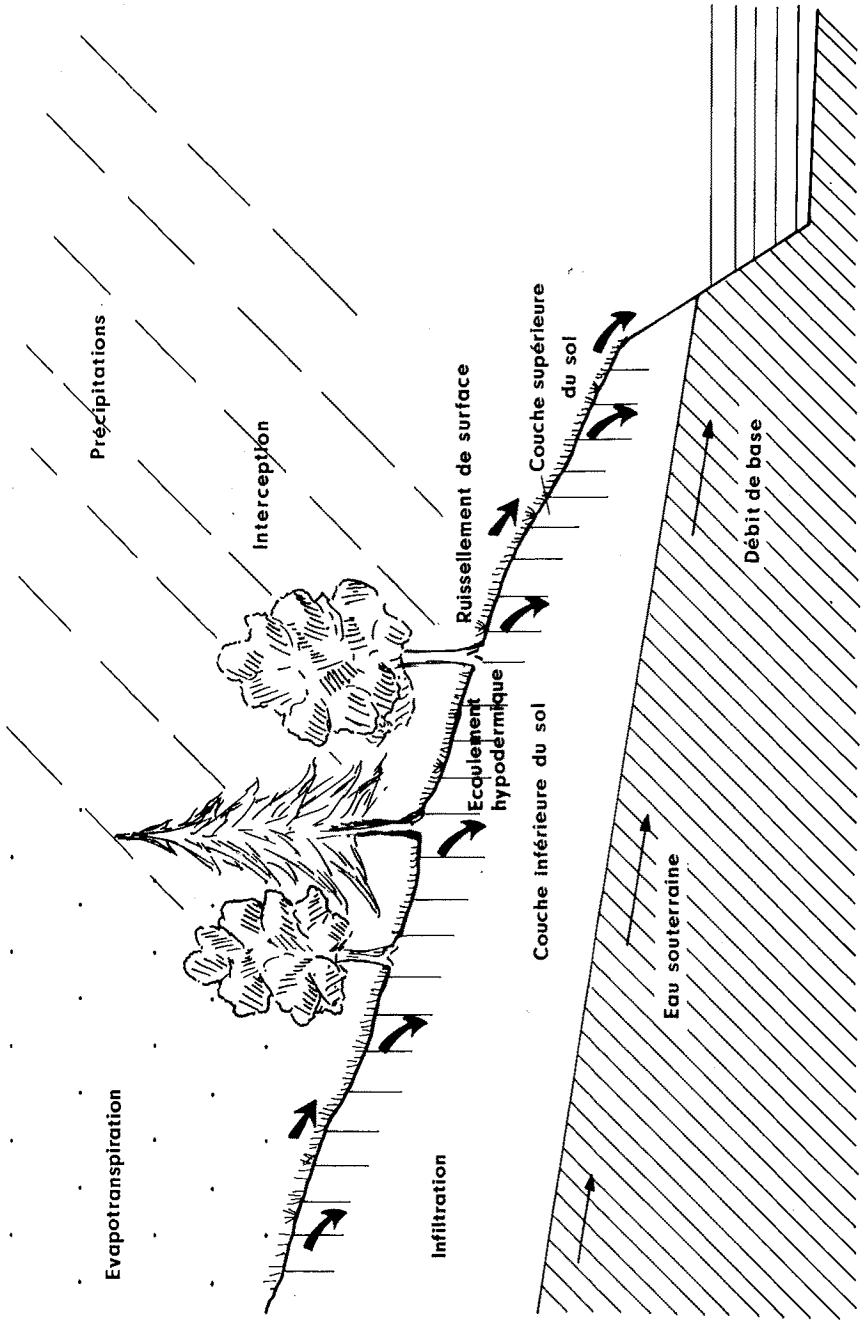


Fig. 8. Partie du cycle hydrologique

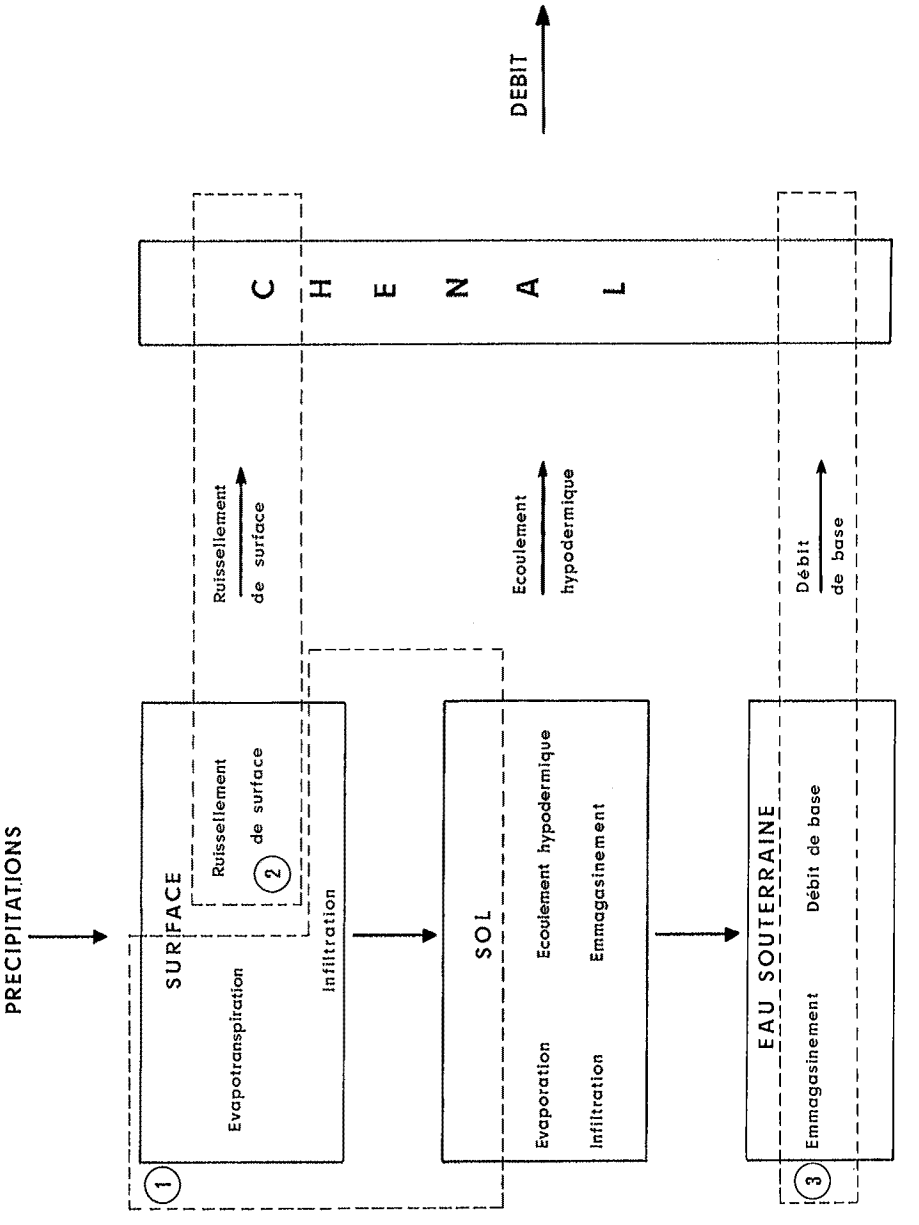


Fig. 9. Schéma de la partie du cycle hydrologique

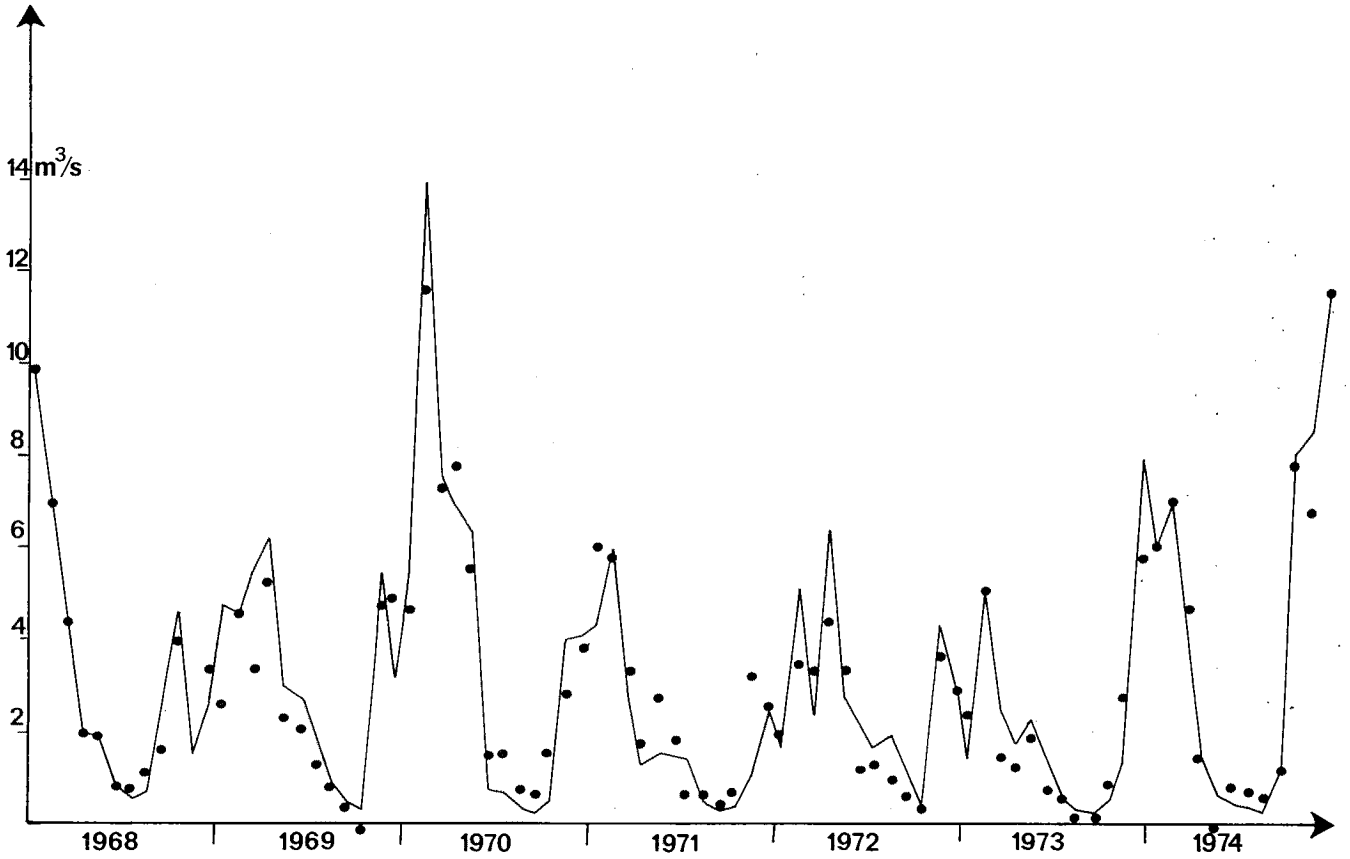


Fig. 10. Application d'un modèle mathématique à la Haute-Sûre

mensuelles des débits de la Sûre à Martelange. Sur la figure 10, la ligne continue représente les débits mesurés et les points indiquent les débits calculés. Il y a une divergence entre les deux, qui peut être expliquée partiellement par l'insuffisance des données de base. En effet,

— le calibrage de ce genre de modèles nécessite un minimum de 10 années de mesure des débits au lieu de 7 (1968–1974),
— la pluie mesurée à Arsdorf n'est pas représentative pour le bassin versant de la Sûre en amont de Martelange.

BIBLIOGRAPHIE

NAEF, F. Ein Vergleich von mathematischen Niederschlag-Abfluß-Modellen
Mitt. d. Vers. f. Wasserb. Hydr. u. Glaz. Nr. 26
ETH, Zürich 1977

PLATE, E. Optimierung und Optimierungsverfahren
8. DVWW Fortbildungslehrgang für Hydrologie

REMÉNIÉRAS, G. Hydrologie de l'ingénieur
Eyrolles, Paris, 1972

SCHROEDER, P. Les modèles mathématiques dans l'exploitation des ressources naturelles du domaine de l'eau
FUL, Juillet 1976

VISCHER, D. Nutzen-Kosten-Analyse in der Wasserwirtschaft
Mitt. d. Vers. f. Wasserb., Hydr. u. Glaz. Nr. 18
ETH Zürich 1975