

LES
PROCESSUS DU RAISONNEMENT
CHEZ L'HYDROLOGUE ⁽¹⁾

PAR

Marcel ROCHE

ingénieur en chef à l'Électricité de France

Lorsqu'on veut essayer de comprendre comment un chercheur, universitaire ou ingénieur, arrive à se frayer un chemin à travers les éléments touffus de sa spécialité, il n'est pas mauvais de faire quelques pas en arrière et d'examiner comment les phénomènes étudiés par ce savant ont été peu à peu découverts par l'homme. C'est d'abord par une évolution extrêmement lente, jalonnée de temps morts et de régressions, puis suivant cette croissance exponentielle bien connue depuis la fin du XVIII^e siècle, que l'aimable observation et l'expérimentation en « cabinet » des « gens du monde » ont conduit à la création des sciences modernes, puis à leur division en multiples spécialités.

Ceci dit, je n'ai rien d'un historien et ne prétends nullement que mes « quelques pas en arrière » puissent prendre l'aspect d'un condensé historique. Il ne sera pas non plus question de limites chronologiques précises, d'autant plus que les conceptions concernant les eaux ont pu se chevaucher, non seulement dans le temps, mais également dans l'espace, par suite des écarts entre les civilisations et de l'intérêt plus ou moins grand porté par les peuples aux problèmes de l'eau.

(1) Conférence prononcée à la Société hydrotechnique du Québec, Montréal, le 3 mai 1967.

Le mythe de l'eau

Tous les éléments naturels les plus utiles, les plus répandus ou les plus rares ont donné naissance à des mythes; c'est un lieu bien trop commun pour qu'il soit utile de citer des exemples. Les considérations sur la mythologie particulière de l'eau, pour passionnantes qu'elles puissent être, intéressent peu l'hydrologue en tant que tel. Par contre, le prolongement, même inconscient, des croyances mythiques jusqu'à une époque fort avancée a eu probablement une certaine influence sur l'évolution de la connaissance des régimes des cours d'eau. La déification, ou du moins la personnalisation des fleuves, conduisait à penser que ceux-ci tiraient leur origine des entrailles de la terre, idée entretenue semble-t-il avec une certaine complaisance, bien après que la croyance réelle ait disparue.

Pendant longtemps, pour ne citer que cet exemple, on a en maint pays argumenté sur la provenance des eaux de surface, invoquant des condensations dans des mystérieuses cavernes ou une provenance juvénile. L'idée simple que la pluie pouvait être à l'origine de toutes les eaux coulant dans les rivières a mis longtemps à faire son chemin; il faut dire que l'univers pensant méditerranéen, celui que nous connaissons le mieux et presque exclusivement, n'était pas très favorable, avec son climat peu pluvieux, pour observer de façon courante ce genre de phénomène. En effet, si les crues paraissent bien être une conséquence directe des orages, que dire du débit permanent que l'on peut observer durant plusieurs mois après la pluie? Avouez qu'il faut un sérieux effort d'imagination pour penser qu'il puisse y avoir un rapport quelconque entre les deux.

Dès l'origine probablement, et très nettement dans les temps modernes, l'émotion esthétique engendrée par les eaux de surface compte sans doute pour beaucoup dans la naissance, puis la persistance du mythe de l'eau. Dans un paysage, les seuls éléments dynamiques sont l'eau et l'air, l'eau singulièrement plus que l'air. L'observation directe des chutes, des rapides, des flots tumultueux de certains fleuves ou torrents, aussi bien que la contemplation d'une rivière tranquille ou d'un lac, sont une attraction majeure pour le voyageur et le touriste. La littérature s'est souvent fait l'écho de cette émotion esthétique, singulièrement chez ces rajeunisseurs de mythes qu'étaient les romantiques, dont la prose et les vers sont pleins de cataractes, de tourbillons, de flots déchaînés et de lacs paisibles. Les peintres également se sont acharnés à rendre le dynamisme de l'eau.

Les premiers pas

Il est peu d'hommes en fait qui restent totalement insensibles au spectacle des eaux, peu d'amoureux de la nature qui, penchés sur une rivière, n'aient rêvé à son origine, à son cheminement et à sa perte. Or, ce rêve contient en germe la première démarche de l'esprit qui sera celle de l'hydrologue. Bien entendu, ce n'est pas pour chaque individu la démarche historique de son initiation. Au cours des études spécialisées, cette première étape est souvent brûlée; par ailleurs, les futurs ingénieurs ou chercheurs ne ressentent pas toujours la nécessité d'une imprégnation directe de la nature.

Il n'en reste pas moins que, dans la chaîne de la pensée humaine au cours des temps, les sciences de l'eau, comme les autres, sont passées par cette phase semi-mythique annonçant une observation plus objective des phénomènes. Il n'est qu'à lire ce célèbre et curieux ouvrage de Bernard Palissy.

Le premier pas, avant toute tentative d'interprétation, fut, comme dans la plupart des sciences, la quantification du phénomène, c'est-à-dire la mesure du débit des rivières. Je dis bien mesure du débit; l'observation des hauteurs d'eau, connue et probablement suivie en maints endroits dès l'Antiquité, ne constitue pas pour l'hydrologue une mesure réellement quantitative, mais plutôt un repérage. J'ignore si l'on sait avec précision quand fut effectuée la première mesure de débit, mais il est certain que des jaugeages aux flotteurs étaient effectués en France, probablement de manière fort sporadique, dès le XVII^e siècle.

Le premier bilan hydrologique que nous connaissons date en effet de cette époque, ce qui prouve également que la mesure des précipitations était pratiquée, sans pour cela faire l'objet des réseaux dont nous avons maintenant l'habitude. Une fois franchi ce cap essentiel de la mesure des débits et de celle des précipitations, une fois acquise la notion primordiale de bilan hydrologique, les progrès furent très lents et l'hydrologie n'a pas bénéficié du spectaculaire développement de l'hydraulique à la même époque.

Il y a une première raison à cela. C'est que l'hydraulique était au départ une science de constructeur ou de manufacturier : un ouvrage mal tracé, une machine mal dessinée risquent de ne pas fonctionner, il faut donc à tout prix trouver des moyens de calcul. L'hydrologie, par contre, traite surtout de l'abondance des apports. Or, pendant fort longtemps, de l'eau, on en avait toujours assez.

L'ère des géographes

D'autre part, il manquait une donnée capitale aux savants plutôt physiciens qui étaient alors susceptibles de s'intéresser aux problèmes de l'eau : la notion précise de l'extension du phénomène en surface, c'est-à-dire sa répartition géographique à l'échelle locale, régionale ou mondiale.

Les géographes ont travaillé le problème de l'eau de la fin du XIX^e siècle jusqu'à nos jours. Leur action dans l'étude de l'hydrologie n'est du reste nullement démodée; simplement, elle n'est plus la seule à intervenir. A des titres divers, on peut citer les plus illustres de ces géographes-hydrologues : Martel, de Martonne, Coutagne et Pardé. Coutagne n'est pas à proprement parler un géographe, mais sa conception de l'hydrologie se rattache beaucoup plus à celle des géographes qu'à celle de ceux qu'il est convenu d'appeler les hydrologues modernes.

L'ère des géographes est essentiellement marquée par un travail de systématique sur les chiffres de débits, de crues, de variations saisonnières, de déficits d'écoulement, qui commençaient à surgir de par le monde. Le résultat de cette systématique s'est traduit par un développement de la notion de régimes hydrologiques, liés du reste aux régimes climatologiques. Ce travail va plus loin qu'une simple classification; une interprétation intelligente permet en effet une utilisation efficace des résultats obtenus à des fins de projets.

La naissance de l'hydrologie moderne

Personne ne peut prétendre que la conception géographique de l'hydrologie n'a plus sa raison d'être. Ce serait non seulement injuste mais faux, et il semble au contraire qu'un futur développement de l'hydrologie fera une part encore plus large à la géographie, notamment sous forme de géomorphologie.

Toutefois, une conception purement géographique de l'hydrologie ne saurait mettre en lumière tous les aspects du problème. Le géographe en tant que tel ne dispose pas de notions physiques ou statistiques suffisantes pour pousser très loin l'interprétation des phénomènes, surtout dans le domaine des applications.

Si l'on s'en tient au seul aspect du problème hydrologique que constitue l'hydrologie de surface que l'on traitera seulement ici,

sous l'impulsion de savants hydrologues plus portés aux sciences exactes, le cadre traditionnel de l'hydrologie des géographes a éclaté dans trois grandes directions :

- l'analyse des hydrogrammes;
- les corrélations pluies-débits et débits-débits;
- l'étude des séries statistiques constituées par les observations pluviométriques et hydrométriques.

Nous attacherons encore, et pour la dernière fois, quelques noms à ces différents aspects de l'hydrologie. L'analyse des hydrogrammes fut véritablement abordée par Shermann qui devait aboutir à la fameuse conception de l'hydrogramme unitaire, et par Caquot chez qui elle donna naissance à la méthode dite rationnelle. Les corrélations précipitations-débits ont fait l'objet d'études déjà fort détaillées de la part de Coutagne, bien que sa conception des régimes le rattache plutôt, à notre avis, au groupe de géographes. Enfin, les premières études statistiques ont surgi d'un peu partout; citons seulement, de façon très arbitraire, Gibrat et Gumbel.

Arrivé à ce point de notre rétrospective sommaire, on peut déjà entrevoir quel genre de démarche intellectuelle sera exigée de l'hydrologue.

Les concepts fondamentaux de l'hydrologie

Préhension qualitative générale des phénomènes d'abord... C'est un impératif commun à toutes les sciences naturelles et spécialement aux sciences à caractéristique géographique, c'est-à-dire comportant une distribution naturelle dans l'espace; cela semble aller de soi, mais réclame des qualités individuelles qui ne sont pas tellement répandues. Un chercheur incapable de « voir dans l'espace et dans le temps » l'ensemble des phénomènes hydrologiques, même si cette vue d'ensemble est relativement sommaire, peut aller fort loin dans l'analyse de détail des phénomènes, faire même avancer la « science hydrologique », mais il aura beaucoup de mal à réaliser des synthèses et ne sera jamais un hydrologue complet.

Dans la mesure où il est permis de résumer en quelques phrases les grandes lignes du fait hydrologique fondamental, on peut dire qu'il s'agit de la transformation, par l'opérateur physique géographique qu'est le bassin versant, des précipitations interceptées par ce bassin. On doit ajouter à l'influence de cet opérateur celle des facteurs climatologiques qui, sans fournir la matière première des

régimes hydrologiques, jouent un rôle plus ou moins important dans la transformation, notamment en introduisant des pertes par évaporation dans le cycle de l'eau (rayonnement, déficit de saturation, vitesse du vent, température, etc.).

Variabilité et statistique

La première conséquence de cette considération fondamentale est que le régime hydrologique, transformée physique du régime climatologique, va hériter de sa double variabilité dans le temps et dans l'espace. Et c'est là, bien entendu, que la statistique va entrer en jeu. L'introduction de cette discipline mathématique requiert toutefois une grande attention, sous peine de conduire à des conclusions incohérentes.

La statistique intervient dans les deux dimensions de la variabilité des phénomènes : espace et temps. Du point de vue du temps, c'est l'étude à poste fixe d'un phénomène pendant une certaine durée finie ou indéfinie. Une telle étude n'est évidemment possible que si l'on s'est fixé une variable aléatoire représentant tel aspect du phénomène. S'il s'agit par exemple d'étudier les débits passant en tel point d'une rivière, la variable aléatoire qui sera choisie pour l'étude statistique pourra être le débit maximal instantané annuel, le débit moyen de tel mois, ou d'un mois quelconque, le débit moyen annuel, un débit caractéristique, etc.

L'étude statistique des phénomènes hydro-pluviométriques se heurte à deux difficultés essentielles. La première est due au fait que l'on étudie des séries chronologiques soumises à des variations cycliques annuelles, dites variations saisonnières; la seconde provient des liaisons pouvant exister entre les valeurs successives de la variable. Les variations saisonnières doivent être considérées chaque fois que la variable se rapporte à une durée inférieure à l'année et qu'elle est prise au compte plus d'une fois par an.

Les liaisons entre variables successives dépendent de la période considérée, de la nature du phénomène et des circonstances géographiques particulières dans lesquelles ce phénomène est observé : à durées d'application égales, elles sont plus fortes pour les phénomènes hydrologiques que pour les précipitations. En effet, les premiers subissent par rapport aux secondes un certain effet de stockage qui dépend d'ailleurs de la taille du bassin et de ses caractéristiques géomorphologiques, effet capable d'étaler les apports et d'assurer le transfert d'une partie de l'eau sur des périodes plus ou moins longues.

Ajoutons enfin, pour clore cet aperçu plus que sommaire du rôle de la statistique dans la dimension temps du phénomène, que lors de l'étude d'une variable hydrologique complexe, c'est-à-dire issue de plusieurs composantes, il faut bien se garder de faire l'étude statistique sur les composantes dissociées, puis essayer de recoller les résultats. On doit calculer directement un échantillon de la variable, puis faire l'étude statistique sur l'échantillon ainsi obtenu. C'est une circonstance que l'on rencontre très souvent en hydrologie appliquée, par exemple dans la distribution du productif d'une centrale hydro-électrique, ou lors de l'inventaire des zones inondées dans les problèmes de cultures de décrue. Je considère personnellement qu'il s'agit là d'un point fort important de l'utilisation de la statistique en hydrologie, dont il est malheureusement très peu tenu compte.

La variabilité des régimes hydrologiques dans l'espace est due en partie à la variabilité spatiale du régime des précipitations et des autres facteurs climatiques, en partie à la variabilité des caractères géomorphologiques. L'étude de cette variabilité par des méthodes statistiques fait largement appel aux notions de corrélations et de régressions inter-stations, dont la mise en œuvre, comme pour l'étude ponctuelle du phénomène, requiert une définition précise de la variable sur laquelle doit porter l'étude.

L'étude de la variabilité spatiale est par essence l'outil de l'interpolation géographique des caractéristiques hydrologiques ou climatiques. A un niveau plus élevé, les deux variabilités se fondent pour constituer les éléments de la précision des estimations en un point quelconque du terrain. L'allongement de la période des observations à une station augmente la précision, ou plutôt améliore l'intervalle de confiance correspondant à un seuil de probabilité donné, de l'estimation ponctuelle de telle caractéristique du régime, par exemple la valeur moyenne du débit annuel ou son écart type, tandis que la multiplication des points d'observation augmente les coefficients de corrélation et donc améliore l'interpolation. C'est tout le problème des réseaux qui se trouve posé.

Bassin versant, analyse, synthèse

La seconde conséquence de nos concepts fondamentaux est la considération du bassin lui-même en tant qu'opérateur de transformation des pluies en débits. J'ai fait allusion tout à l'heure aux premières tentatives de Caquot et de Sherman; ce sont déjà des

applications d'un opérateur pluie-débit. Tandis que Shermann, avec l'hydrogramme unitaire, fournissait un moyen de traiter globalement le problème (opérateur global), la méthode rationnelle de Caquot préfigurait les modèles plus complexes basés sur une décomposition du bassin.

En fait, une analyse détaillée des phénomènes hydrologiques permet d'écrire des équations plus ou moins générales du ruissellement et même de l'écoulement souterrain. Ces équations sont extrêmement lourdes si on les accepte dans toute leur généralité. De plus, il est extrêmement difficile, sans hypothèse plus ou moins arbitraire, d'introduire autrement que sous forme de fonctions sans forme analytique définie, certains paramètres variables, tels que le coefficient de ruissellement qui régit la part des apports pluviaux susceptibles de se transformer en débit de surface.

En ce point du raisonnement hydrologique intervient une nouvelle option qui aura une influence sur la conception même de l'équation générale du ruissellement. La réaction du bassin vis-à-vis de la pluie peut-elle être considérée comme linéaire? Autrement dit, différents débits de ruissellement, provenant de pluies tombées à différents intervalles de temps découpés dans une averse, jouissent-ils de la propriété d'additivé? En toute rigueur, la réponse est sûrement négative; en pratique, sur un bassin naturel, on ne constate pas dans la majeure partie des cas que l'hypothèse de linéarité conduise à des erreurs observables. Il n'en est pas moins né, parmi les hydrologues modernes, une tendance dont les adeptes prônent la suprématie des opérateurs non linéaires, dont les opérateurs linéaires sont du reste un cas particulier.

Cette option étant faite, il reste à construire un opérateur qui sera effectivement capable, une séquence pluvieuse étant donnée avec sa répartition dans le temps et dans l'espace, d'en déduire avec une précision acceptable l'hydrogramme résultant. On a le choix pour cela entre un opérateur de type global, qui conviendra pour les bassins de taille réduite et des averses relativement homogènes, et un opérateur complexe, de type matriciel, qui sera capable de recomposer l'action spécifique des différentes parties du bassin.

L'hydrologue passe alors brutalement du plan théorique au plan pratique et son raisonnement, s'il le veut efficace, doit suivre le mouvement. Quelle que soit l'élaboration du modèle théorique adopté, la précision des résultats ne peut excéder la limite qui lui est impartie par la densité des appareils de mesure, des précipitations par exemple s'il s'agit d'un modèle pluvial. C'est souvent cette densité

et la fréquence des mesures, s'il ne s'agit pas d'enregistrements continus, qui décideront de la finesse du découpage dans le temps et dans l'espace, découpage qui marque le nécessaire passage du continu des équations générales au discontinu du calcul par différences finies.

Il reste alors souvent à écrire, en tenant compte des hypothèses plus ou moins simplificatrices adoptées, la forme mathématique du calcul et à choisir les paramètres d'ajustement de ce qu'on appellera désormais le modèle mathématique de transformation pluies-débits. Pour toutes les raisons que j'ai déjà indiquées, il ne me semble pas très raisonnable de vouloir à tout prix créer un modèle mathématique universel. Surabondant dans certains cas, il risquerait d'être insuffisant dans d'autres pour lesquels des astuces particulières pourraient permettre une bien meilleure efficacité; d'autre part, tels paramètres convenant parfaitement pour tel type de bassin peuvent être avantageusement remplacés par d'autres pour des bassins de type différent.

Il n'est dans notre propos d'entrer plus avant dans le détail des manipulations de ce genre de modèles. Disons seulement qu'ils nécessitent une longue mise au point et un réglage délicat, pour lesquels le concours d'un ordinateur est plus que souhaitable.

Bien d'autres sujets pourraient être groupés sous la rubrique d'analyse et synthèse sur les bassins versants. Un point fort important, que nous n'aurons malheureusement pas le temps d'aborder, est celui de la transposition spatiale des résultats hydrologiques. Nous en avons touché quelques mots au sujet des réseaux. Pour les petits bassins, susceptibles d'être manipulés avec des opérateurs globaux, le problème est beaucoup plus complexe et nécessite l'emploi de paramètres géomorphologiques; une des difficultés de l'étude, qui fait massivement appel aux méthodes de régressions multiples, est le choix d'une définition des paramètres géomorphologiques conduisant pour ces paramètres à des valeurs stables.

Dans ce rapide tour d'horizon sur les investigations de l'hydrologue et les fils directeurs qui le guident dans ses travaux, nous avons négligé pas mal de choses, telles que les méthodes propres à la qualité des eaux, à l'étude des eaux souterraines, etc. Cependant, si l'observation de ces données exige des « techniques » bien particulières, le processus général du raisonnement lors de l'interprétation, lié à cette caractéristique de double variabilité commune à tous les phénomènes hydrométéorologiques, a bien des points communs avec celui que nous avons décrit spécialement pour les eaux de surface.

S'il faut une conclusion à cet exposé, elle doit rappeler que l'étude des eaux naturelles dans leur ensemble et sous tous leurs aspects est la chose la plus souhaitable, la plus rationnelle et la plus... « économique » qui soit.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
COMITÉ DES TRAVAUX HISTORIQUES ET SCIENTIFIQUES

BULLETIN
DE LA
SECTION DE GÉOGRAPHIE

TOME LXXX

ANNÉE 1967

Extrait

M. Roche
Le processus de raisonnement chez l'hydrologue

PARIS
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE
1969

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 33337, ex 1

Cote : B

70995