

Marcel ROCHE*

Composition et rationalisation des réseaux hydrométéorologiques

Des réseaux ? Pourquoi ?

La caractéristique essentielle des sciences de la terre, auxquelles appartient sans conteste l'hydrologie, est d'être principalement basées sur l'observation de phénomènes sur lesquels on n'a pratiquement pas le pouvoir d'agir. Pour ces sciences, la part d'expérimentation est très réduite et se cantonne presque exclusivement dans l'élaboration de méthodologies ou dans l'étude détaillée d'un aspect du phénomène, étude qui débouche rarement sur l'utilisation directe des résultats.

Prenons, pour illustrer, l'exemple d'une étude à but forestier effectuée sur un bassin expérimental pour connaître l'action de tel type de forêt sur la conservation du sol. Quelle que soit la manière dont on procède, il y a toujours mise en coupe d'une partie de la forêt, éventuellement repousse plus ou moins contrôlée. S'il s'agissait d'une étude de conservation en zone cultivée, on essaierait différents modes de mise en culture, différents systèmes anti-érosifs. Il y a donc bien, en l'occurrence, expérimentation.

Examinons maintenant les résultats. Le contrôle de l'érosion va se traduire, au cours de la période d'observation, par un certain nombre de chiffres qui seront par exemple l'érosion spécifique annuelle exprimée en tonnes par an et par km² de bassin versant. On peut comparer les résultats obtenus avec ou sans boisement, ou à différentes étapes de reboisement. On peut même, si le fameux « toutes choses égales d'ailleurs » est respecté et si les essais sont nombreux, soumettre ces résultats à des tests statistiques, notamment pour estimer leur degré de signification. On peut, les tests ayant été jugés positifs, adopter la méthode de conservation qui ressort comme la plus efficace ou la plus économiquement efficace.

On ne peut pas tirer de ces seuls essais des conclusions pour le cas où le « toutes choses égales d'ailleurs » n'est pas respecté. On ne peut pas non plus en déduire le gain exact de terre, d'argent, de tout ce qu'on voudra, qu'on est en droit d'espérer de l'opération de conservation projetée. Autrement dit, l'économie réelle du projet n'est absolument pas accessible avec cette seule phase d'expérimentation.

Supposons maintenant qu'on ait installé un nombre suffisant de ces bassins expérimentaux, dans des conditions géomorphologiques et éventuellement climatiques suffisamment variées

* Ingénieur en Chef à l'Électricité de France. Chef du Département de la Recherche fondamentale du Service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.

pour que l'on puisse procéder à une analyse multivariée des phénomènes, analyse qui permettra de séparer l'influence des différents paramètres. On conçoit que déjà, si l'analyse conduit à des résultats satisfaisants, elle permettra de se passer du « toutes choses égales d'ailleurs » géomorphologique; on aura réalisé une possibilité d'extension dans l'espace, ou interpolation géographique.

Supposons d'autre part qu'on dispose d'un réseau de stations distribuées dans l'espace et auxquelles on dispose d'une longue série d'observations sur les phénomènes climatiques mis en jeu, les essais l'on montré, par notre opération de conservation. Ces données « longue durée » vont permettre d'échantillonner suffisamment les résultats « utiles » pour, dans chaque cas qui se présentera, en permettre l'étude statistique dans le temps, condition préalable à toute étude économique au sens large de ce terme.

J'ai pris intentionnellement un exemple d'étude hydrologique pour lequel la part d'expérimentation est des plus grandes. On voit que malgré cela, si on ne veut pas rester sur une conclusion finale qui, en dépit d'une présentation importante de données numériques, demeure qualitative, on doit utiliser l'expérimentation comme un stade préliminaire destiné à fournir des paramètres à une étude plus complète d'extension dans l'espace et dans le temps.

Car c'est bien là l'aspect décisif, la nature essentielle de l'hydrologie comme de la climatologie : double variabilité fondamentale dans l'espace comme dans le temps.

Dans les autres sciences de la terre, on observe aussi cette variabilité dans l'espace et le temps. Mais généralement les variations dans le temps sont infiniment moins rapides : exemple de la déclinaison, dont les variations sont sensibles mettons à l'année, de la géologie dont les phénomènes varient avec la lenteur proverbiale que l'on sait. Pour les phénomènes hydro-météorologiques, c'est chaque heure, chaque minute et même parfois chaque seconde, que les appareils sont capables de déceler une variation.

Il est bien évident que dans ces conditions, une méthodologie tout à fait particulière, basée essentiellement sur l'étude statistique des séries chronologiques, devra être mise en jeu. Comment aborder la question du point de vue statistique, comment simplifier les problèmes de séries chronologiques souvent très difficiles à manipuler, fixer des limites de validité aux modèles stochastiques fournis, cela n'est pas dans notre propos. Mais la fourniture des éléments destinés à servir de matière première aux calculs statistiques, la manière de s'y prendre pour rendre cette fourniture efficace et économique, autant de questions qui débouchent naturellement sur le problème des réseaux.

En effet, un réseau hydrométéorologique est un ensemble de stations distribuées dans l'espace auxquelles on mesure, pendant une durée indéfinie ou non, un certain nombre de paramètres concernant un ou plusieurs phénomènes hydrologiques ou météorologiques. Cette structure correspond donc bien aux nécessités de la double variabilité dont il a été question.

Comment sont-ils faits ? Qu'y mesure-t-on ?

Comme nous le verrons ultérieurement, le degré de variabilité de la chose mesurée influe directement sur la précision à attendre et par conséquent sur la rationalisation du réseau. Or ce degré de variabilité dépend beaucoup de la nature du phénomène observé, ainsi d'ailleurs que de celle du paramètre mesuré. Il n'est donc pas mauvais d'indiquer, au moins succinctement, comment sont constitués les réseaux hydrologiques et les réseaux météorologiques.

Les structures sont en fait assez différentes suivant les pays, mais tendent actuellement, sinon à se standardiser, du moins à se rapprocher. D'un point de vue général, on peut distinguer cinq grandes classes de phénomènes donnant lieu à des observations régulières, dites « de réseau » :

- Observations météorologiques;
- Observations de hauteurs et de débits dans les lacs et les rivières (hydrologie de surface et limnologie);
- Observations de hauteurs piézométriques dans les nappes (hydrologie souterraine);

- Érosion et transports solides;
- Physico-chimie et qualité des eaux.

Les observations sur la zone aérée du sol ne donnent pas encore lieu, à proprement parler, à des observations de réseau. Par contre, une tendance qui se dessine actuellement consiste à « mettre en réseau » de petites unités hydrométéorologiques complètes, sous forme de bassins témoins, représentatifs ou expérimentaux. La rationalisation de tels réseaux, encore mal entrevue, devra faire appel à une méthodologie très particulière dont il ne sera pas question ici. Nous énumérons brièvement ci-dessous les phénomènes généralement observés dans les réseaux hydrométéorologiques.

Observations météorologiques.

Si l'on fait l'inventaire de toutes les variations climatiques susceptibles d'être mesurées dans une station météorologique, on obtient à peu près ceci :

— TEMPÉRATURE DE L'AIR.

- Enregistrement continu;
- Mesures à heures fixes au thermomètre à mercure;
- Mesure du maximum et du minimum journalier (thermomètre à maximums et thermomètre à minimums);
- Température du sol (pour mémoire).

— TEMPÉRATURE DE L'EAU (éventuellement, dans un bac évaporatoire).

— HUMIDITÉ DE L'AIR.

- Enregistrement avec un hygromètre enregistreur;
- Mesure à heure fixe au moyen d'un psychromètre (température sèche et température humide). L'appareil peut être à convection naturelle (psychromètre mural), ou forcée (fronde, crécelle, à aspiration). Le psychromètre à aspiration peut être rendu enregistreur.

Les données du psychromètre fournissent la tension de vapeur d'eau dans l'air, le déficit hygrométrique et l'humidité relative.

- Mesure de la température du point de rosée.

— PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

- Enregistrement au barographe.

— VENT AU SOL.

- Enregistrement continu.
Direction : girouette enregistreuse;
Vitesse : anémographe;
- Observation à heures fixes.
Direction : girouette;
Vitesse : anémomètre.

Le vent dit « au sol » est souvent mesuré à plusieurs mètres au-dessus du sol. Pour certains usages (étude de l'évaporation) des mesures complémentaires doivent être assurées plus près du sol. On utilise également des anémomètres totalisateurs pour la détermination de la vitesse moyenne du vent sur un intervalle de temps assez long (journée ou demi-journée).

— VENT EN ALTITUDE.

- Vitesse et direction par différents procédés de sondage;

- par radio-sondage on peut mesurer également la température et l'humidité en altitude.
- PRÉCIPITATIONS.
 - *Pluie*.
 - journalière ou bijournalière avec pluviomètre;
 - enregistrement continu avec pluviographe;
 - totalisateurs.
 - *Neige* (1)
 - hauteur tombée (table à neige);
 - équivalent en eau de la précipitation journalière; en faisant fondre la neige recueillie dans un pluviomètre;
 - enregistrement continu dans un pluviographe à entonnoir chauffant;
 - étude de l'évolution du stock (table de pesée pneumatique à liquide, absorption des rayons gamma).
 - *Rosée* (drosomètre).
- NÉBULOSITÉ (fraction du ciel occupée par les nuages).
 - Mesure à heures fixes avec herse néphoscopique.
- VISIBILITÉ.
- INSOLATION.
 - Enregistrement continu (héliographe).
- RAYONNEMENT SOLAIRE.
 - Enregistrement continu et parfois intégration automatique (pyranomètres).
- ÉVAPORATION.
 - Observation à heure fixe d'un évaporomètre genre Piche;
 - Observation à heure fixe d'un bac d'évaporation (les bacs enregistreurs automatiques ou semi-automatiques existent mais leur introduction dans les réseaux est encore fort limitée).
- ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE.
 - La mise en réseau des évapotranspiromètres est encore très peu avancée.

Observations hydrométriques.

Ces observations comportent essentiellement des relevés ou enregistrements de hauteurs d'eau. Ces auteurs sont utilisées soit pour l'obtention des niveaux d'eau (d'où nécessité de repérer en altitude la hauteur correspondante à l'indication « zéro » de l'appareil), soit pour l'obtention des débits. Dans ce dernier cas, la station doit être étalonnée, c'est-à-dire que l'on doit établir au moyen de mesures directes du débit (opérations de jaugeage) la relation hauteurs-débits correspondant à l'emplacement choisi.

Actuellement les hauteurs de l'eau dans la rivière sont obtenues :

- par lectures discontinues à heures fixes sur une règle graduée fixe appelée « échelle » ou

(1) Les relevés des stocks de neige, bien que s'apparentant à une action réseau, consistent rarement en des observations continues ou à intervalles fixes et rapprochés. Le traitement des données recueillies et l'optimisation des relevés procèdent d'un esprit très différent de ce dont il est question ici.

- « échelle de crue ». Le zéro de cette échelle doit être nivelé par rapport à un repère réputé inamovible; dans la mesure du possible, on rattache ce repère au nivellement général;
- par enregistrement des mouvements d'un flotteur installé dans un puits ou une gaine en communication avec la rivière de telle sorte que le niveau de l'eau dans le puits ou la gaine soit très sensiblement le même que dans la rivière. L'enregistrement peut s'effectuer soit sur un diagramme sous forme de courbe, soit sur bande perforée;
 - par enregistrement de la pression fournie par un soufflet immergé à une profondeur fixe;
 - par enregistrement de la pression fournie par un appareil à bulles. Une variante de ce système permet l'enregistrement sur ruban perforé.

Notons enfin que le tronçon du cours d'eau dans lequel est installée la station peut être : en l'état naturel, stabilisé, ou aménagé de manière à obtenir artificiellement un contrôle hydraulique. C'est dans cette dernière catégorie que l'on rangera les stations équipées d'un déversoir ou d'un canal jaugeur.

Observations sur les nappes souterraines.

En opération « réseau », il s'agit uniquement de relever les niveaux des nappes en un certain nombre de points sélectionnés où des tubes piézométriques ont été installés. Les relevés peuvent se faire manuellement à jour fixe (de nombreux appareils sont disponibles pour ce genre d'observation). On peut également équiper le piézomètre d'un limnigraphe spécial et obtenir un enregistrement continu de la variation du niveau. Les réseaux « eaux souterraines » servent surtout à établir des repères d'hydraulicité.

Observations sur les débits solides.

Les réseaux de mesure du débit solide sont beaucoup moins développés que ceux qui sont consacrés à la mesure du débit liquide. Ceci est dû surtout à la plus grande complexité des opérations, mais aussi au fait que le besoin s'en fait moins sentir et que, de toute manière, on peut se contenter d'une précision bien inférieure. Quand une station de base a été choisie pour la mesure des débits liquides et qu'on décide d'en faire de plus une station pour débits solides, on procède de la manière suivante :

L'opérateur, chargé de l'exploitation de la station (ce peut être un simple observateur si celui-ci en est capable) exécute un prélèvement journalier, toujours au même point de la rivière, généralement en surface et près d'un bord. En cas de crue, les prélèvements, effectués toujours de la même manière, sont multipliés (par exemple à raison d'un par heure) suivant les caractéristiques des crues de la rivière; la fréquence est maintenue pour la décrue comme pour la crue. Les échantillons prélevés sont analysés afin d'obtenir une valeur de la turbidité (en gammes par litre ou par m³) au moment du prélèvement.

De temps à autre, pour toute une gamme de débits et tant à la crue qu'à la décrue, un jaugeage complet de débit solide est exécuté, en faisant des prélèvements sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs. Ces mesures permettent d'établir une corrélation entre la turbidité au point habituel de prélèvement et la turbidité moyenne dans la section. On peut ainsi, pour chaque prélèvement ponctuel couramment effectué, estimer la turbidité moyenne dans la section et, connaissant le débit liquide, en déduire le débit solide.

Qualité des eaux.

On groupe sous ce vocable une série de propriétés très différentes les unes des autres. Ce sont essentiellement :

- les propriétés chimiques : teneur en différents sels, bases etc., généralement exprimée en ions ou en équivalents ioniques;

- les propriétés physiques : température surtout, la tension superficielle et la viscosité sont assez peu demandées. La conductibilité électrique est surtout utilisée comme moyen pour le dosage des sels; elle a également des applications particulières dans le domaine de l'eau souterraine (origine du débit de base, sélection des sources et des aquifères);
- les propriétés physico-chimiques : pH, dureté;
- les propriétés biologiques; surtout la teneur en bactéries et la qualité de ces bactéries.

La turbidité, ou teneur en matières non dissoutes, qui est mesurée pour le calcul des débits solides, fait également partie des qualités de l'eau. Pour les besoins du réseau « qualité des eaux », les échantillons doivent être analysés de plus près que pour une simple mesure de débit solide. En particulier, il est nécessaire de séparer le résidu minéral du résidu organique, ce qui se fait très aisément, comme chacun sait, par calcination.

Enfin, intervient également, dans la qualité de l'eau, la « pollution », qui peut se définir comme une altération par l'homme de la qualité, étant sous-entendu que cette altération a un caractère indésirable par ses conséquences défavorables sur l'usage qu'on se propose d'en faire. La pollution est donc une notion subjective.

Cette sèche énumération résume l'ensemble des données qui peuvent faire l'objet d'une étude au moyen d'un réseau; elles présentent toutes le caractère de double variabilité dans le temps et dans l'espace et demandent donc des observations continues dans le temps à des stations de base judicieusement réparties dans l'espace.

Ces données présentent cependant d'énormes différences entre elles au point de vue variabilité, dans le temps mais surtout dans l'espace. C'est ainsi que la température relevée à un poste est représentative d'une région beaucoup plus vaste que la pluie journalière relevée au même poste. L'insolation est une variable encore plus stable dans l'espace que la température. Enfin, la variabilité spatiale varie suivant la variate définie pour le phénomène mesuré, autrement dit suivant l'espace de temps considéré : pour les deux mêmes postes, la corrélation entre totaux pluviométriques annuels sera meilleure que la corrélation entre totaux mensuels, qui sera elle-même bien meilleure qu'entre pluies journalières.

Dans ce qui suit, nous allons essayer d'éclaircir un peu ces notions.

Le mécanisme interne de la rationalisation.

Lorsqu'on parle d'observer quantitativement un phénomène naturel, la première chose à définir est le paramètre, concernant ce phénomène, qui devra être mesuré. Dans certains cas, il convient de définir également, de manière précise, le protocole de mesure. Si en outre, comme c'est le cas en hydrologie et en climatologie, les différentes valeurs que peut prendre ce paramètre appartiennent à une série chronologique aléatoire, on devra définir, parmi les évaluations possibles du paramètre, la variate à prendre au compte. Le choix de cette variate dépend très largement du but pratique à atteindre; dans le cas d'études systématiques ou d'étude générale des régimes, un certain nombre de variates sont préfixées de façon arbitraire.

EXEMPLE DE VARIATES :

— concernant la pluie :

- Totaux journaliers,
- Totaux mensuels,
- Total de tel mois déterminé,
- Total de tel jour de l'année,
- Maximum annuel des totaux journalier, etc.

— concernant les débits :

- Débit moyen journalier,
- Débit journalier le plus fort de l'année,
- Débit caractéristique de 10 jours, 20 jours,...
- Module annuel, etc.

Dans les deux cas, le paramètre étudié concernant soit le phénomène « pluie », soit le phénomène « débit liquide en un point d'une rivière », se rapporte à l'abondance du phénomène. Il

pourrait concerner autre chose, par exemple, pour la pluie, le nombre de jours où le phénomène s'est produit, pour les débits, le nombre de jours où le débit a été nul.

Le choix du paramètre étant arrêté, celui de la variate consiste, la plupart du temps, en la définition d'une durée sur laquelle on calcule une moyenne ou toute autre valeur statistique du paramètre.

L'opération de mesurage elle-même dépend peu du choix de la variate, sauf peut-être pour l'observation des pluies (pluviomètre ou pluviographe). Mais le contrôle de l'efficacité des mesures, ouvrant directement sur la rationalisation du réseau, *n'a de sens que si une variate a été définie.*

En effet, le problème de la rationalisation devrait se ramener à la question suivante : quelle doit être la densité du réseau pour connaître, avec telle précision, telle valeur caractéristiques de telle variate définie pour tel phénomène hydrologique ou météorologique ?

En fait, ce point de vue est un peu théorique et bien d'autres éléments vont entrer en jeu pour la réalisation pratique d'un réseau. Cependant, telle qu'elle est posée, cette question situe bien le problème et mérite d'être commentée; la réponse qui pourra lui être faite sera un guide efficace pour la décision finale.

Il convient de distinguer au départ entre les phénomènes hydrologiques et les phénomènes météorologiques. Ces derniers ont véritablement un caractère ponctuel, en ce sens que les quantités mesurées ou repérées en un point n'incluent pas de quantités mesurées ou repérées en un autre point. La pluie, par exemple, mesurée à un pluviomètre A pour un jour donné, n'inclut nullement la pluie mesurée à un pluviomètre B, quelle que soit la position relative de B et de A. Ceci ne veut pas dire que les pluies mesurées en A et B soient indépendantes d'un point de vue stochastique; une liaison ou corrélation peut exister et même être très forte, mais sa causalité est située au-dessus du niveau de la pluie elle-même à laquelle elle est antérieure (état général et évolution des masses d'air). On pourrait traduire cette propriété des données météorologiques en disant qu'elles ne sont pas cumulatives dans l'espace; dans le temps, elles peuvent l'être, comme la pluie, ou ne l'être pas, comme la température, le vent, etc. La conclusion est que, au niveau du sol, les relations entre les valeurs du même phénomène mesuré en deux endroits différents seront purement stochastiques.

Considérons maintenant une station hydrologique A située en un point donné du réseau hydrographique. Elle définit un bassin versant dont toutes les eaux de colature vont passer à son endroit. Soit une station B située sur le même cours d'eau en amont de A ou sur un affluent rejoignant ledit cours d'eau en amont de A; la station B est située à l'intérieur du bassin versant défini pour A, et son propre bassin d'alimentation est partie intégrante du bassin de A. Il en résulte que toute l'eau passant par B va passer par A, aux pertes près qui pourraient être subies entre B et A.

Définissons une variate du régime hydrologique, par exemple le débit moyen annuel ou « module ». Le module d'une année donnée mesuré en A contient le module mesuré en B, aux pertes près, plus le module fourni par le bassin intermédiaire :

$$\text{Mod A} = \text{Mod B} - \text{Pertes} + \text{Mod BVI},$$

de sorte que la variate Mod A est en relation fonctionnelle avec la variate Mod B pour la partie commune Mod B, et en relation stochastique pour la partie Mod BVI — Pertes, ou Mod BVI si l'on suppose les pertes négligeables devant les autres facteurs, hypothèse presque toujours sous-entendue dans la pratique.

$$\begin{aligned} \text{Posons} \quad & \text{Mod A} = Y \\ & \text{Mod B} = X \\ & \text{Mod BVI} = Z. \end{aligned}$$

On a, aux pertes près : $Y = X + Z$.

Le coefficient de corrélation entre X et Y peut donc s'écrire :

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(X - \bar{X} + Z - \bar{Z})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (X - \bar{X} + Z - \bar{Z})^2}}$$

Il est clair que ce coefficient est égal à 1 pour $Z = \bar{Z} = 0$, c'est-à-dire lorsque la station A est confondue avec la station B, et qu'il décroît lorsque la variate Z augmente, c'est-à-dire lorsque A s'éloigne de B vers l'aval.

Pour deux postes pluviométriques, si l'on choisit comme variate, par exemple, le total annuel des précipitations : Z à la station A et X, à la station B, le coefficient de corrélation sera :

$$r' = \frac{\sum (X - \bar{X})(Z - \bar{Z})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Z - \bar{Z})^2}}$$

qui, toutes choses égales d'ailleurs, est plus petit que r. On pourra donc déjà en conclure que, pour une connaissance équivalente des phénomènes et avec des variates de même dimension, un réseau pluviométrique devra être plus dense qu'un réseau hydrométrique.

Pour ce dernier type de réseau, on n'a considéré ci-dessus que le cas de bassins imbriqués, pour lesquels le problème de la connaissance des débits en un point quelconque du réseau est un véritable problème d'interpolation hydrologique. Si l'on considère des bassins disjoints, on devrait plutôt parler d'extrapolation, ou mieux de transposition. Par rapport à l'interpolation climatologique, une telle transposition fait appel à une caractéristique supplémentaire qui est le complexe physique du bassin lui-même en tant qu'outil de transformation des pluies en débits. La transposition exigerait donc normalement la définition et la mesure de paramètres géomorphologiques qui interviendraient, au moyen de régressions multiples, dans le calcul des débits. En fait, une telle voie est rarement suivie et on se contente au mieux de procéder par comparaison, les caractères géomorphologiques servant qualitativement à décider de la similitude physique des bassins entre eux, sauf pour les bassins de taille réduite où une méthodologie plus élaborée est en train de voir le jour.

On peut donc dire qu'en gros la valeur du coefficient de corrélation entre postes climatologiques dépend de la distance qui sépare ces postes. Pour des bassins imbriqués, le coefficient relatif à une variate hydrologique dépendra à la fois de la valeur des superficies et de la différence entre superficies. Pour les bassins disjoints, la corrélation dépendra de la distance entre bassins pour des régions géomorphologiquement homogènes, mais une distorsion systématique des vraies valeurs des débits se superposera à l'hétérogénéité climatique lorsque la géomorphologie de ces bassins sera variable.

Toutefois, le coefficient de corrélation ne peut être en lui-même un critère absolu de rationalisation. Ce qui nous intéresse réellement, c'est la précision de la connaissance d'un élément en un point donné.

Nous allons examiner comment les choses se passent dans un cas bien précis, en prenant pour variate le débit moyen annuel d'un bassin. Nous désignerons par x le débit moyen annuel à une station de base A et par y la même variate à une station secondaire B. On supposera que x et y sont normalement distribuées.

Soit k le nombre d'années d'observation à B et n le même paramètre à A. On supposera bien entendu que $n > k$. On sait que l'estimation de la moyenne à la station B compte tenu des observations en A est donnée par :

$$\hat{y} = \bar{y}_k - r_{xy} \frac{k s_y}{k s_x} (\bar{x}_k - \bar{x}_n)$$

avec les notations habituelles.

On sait également que l'efficacité relative des estimations \hat{y} et \bar{y}_k est donnée par :

$$E = 1 + \left(1 - \frac{k}{n}\right) \left[\frac{1 - (k-2)r^2}{k-3}\right]$$

ce qui veut dire que, pour l'estimation du module interannuel à B, on a la même précision, avec k années d'observation à B et n années d'observation à A, qu'avec $k' = k/E$ années d'observation directe à B.

Lorsque la durée des observations à la station de base croît indéfiniment, l'efficacité relative devient :

$$E = \frac{k-2}{k-3} (1-r^2)$$

C'est ainsi qu'une station secondaire observée pendant 10 ans, pour laquelle le coefficient de corrélation relatif aux modules serait de 0,95 avec ceux d'une station de base, bénéficierait d'une efficacité relative de 0,16 et donc d'une période étendue de $k' = 62$ ans, pour une durée d'observation infinie de la station de base.

Supposons maintenant que l'on exige, pour la connaissance du module moyen à n'importe quel point du réseau, une précision de $\pm p$ % et que l'on ne veuille pas prendre plus de 10 % de risque de se trouver à l'extérieur de la fourchette définie par cette précision. Cette dernière condition implique que p soit supérieur ou égal à 1,65 fois l'écart-type d'estimation divisé par le module moyen estimé et multiplié par 100, ou :

$$\frac{p}{100} \geq 1,65 \frac{s_{est}}{\hat{y}}$$

d'où l'on tire :

$$s_{est} \leq \frac{p \hat{y}}{1,65 \cdot 100}$$

Or, l'écart-type d'estimation est égal à l'écart-type de la variée divisée par $\sqrt{k'}$, soit :

$$s_{est} = \frac{s_y}{\sqrt{k/E}}$$

ou

$$s_{est} = s_y \sqrt{\frac{(k-2)(1-r^2)}{k(k-3)}}$$

étant bien entendu qu'il s'agit d'une valeur limite lorsque la station de base aura été exploitée pendant un très grand nombre d'années. En posant :

$$\frac{p^2}{(1,65 \cdot 100)^2} = a^2 \quad \text{et} \quad \frac{s_y^2}{\hat{y}^2} = C_v^2,$$

on obtient :

$$\frac{(k-2)(1-r^2)}{k(k-3)} \leq \frac{a^2}{C_v^2}$$

Il est commode, pour la discussion de cette relation, de ne conserver que le cas limite de l'égalité. Pour réaliser l'objectif, on a deux possibilités : soit se fixer r , c'est-à-dire finalement la densité du réseau, et faire varier k , c'est-à-dire le nombre d'années de fonctionnement d'une station secondaire; soit se fixer k et faire varier r . On sait qu'on arrivera à une espèce d'équilibre au sein d'une fonction économique et la décision devrait être emportée par le dispositif permettant d'atteindre l'objectif fixé au coût minimal. En fait, cet objectif n'est généralement pas très bien défini et il n'est pas toujours facile de dire raisonnablement quel ordre de précision doit intervenir.

k étant fixe, la valeur limite de r , c'est-à-dire celle qu'il doit au moins avoir pour que les conditions soient remplies, est égale à :

$$r = \sqrt{1 - \frac{a^2 k (k-3)}{C_v^2 (k-2)}}$$

Comme il fallait s'y attendre, r doit être d'autant plus grand, donc de réseau plus dense, que :

- le coefficient de variation C_v est plus grand,
- la précision demandée est plus grande, c'est-à-dire que p , donc a , est plus petit,
- le nombre d'années d'observations prévu pour la station secondaire est plus petit.

Si r est donné, on peut poser :

$$u^2 = \frac{C_v^2}{2a^2} (1 - r^2) + \frac{3}{2},$$

et la variation de k est donnée par :

$$k = u^2 + \sqrt{(u^2 - 2)^2 + 2}.$$

Il y a donc là, au moins théoriquement, un moyen de rationaliser un réseau hydrologique. Pour chaque variate choisie, on obtiendra naturellement des valeurs différentes de C_v et un même coefficient de corrélation ne correspondra pas obligatoirement à un même espacement des stations. Citons quelques variates que l'on peut définir sur une chronique de débits :

Variates indépendantes et non soumises à l'effet saisonnier :

- Débit moyen d'un mois donné;
- Débit moyen du mois le plus faible de l'année;
- Débit maximal de l'année;
- Débit d'étiage;
- Les différents débits caractéristiques;
- Débit moyen annuel ou module.

Variates non totalement indépendantes et soumises à l'effet saisonnier :

- Débit journalier;
- Débit moyen mensuel sans que le mois soit précisé.

Nous prendrons comme autre exemple le phénomène « pluies » et nous choisirons la variate indépendante « total pluviométrique annuel », dénommée couramment « pluie annuelle ». Le problème va se poser différemment suivant que l'on s'attache à la connaissance de la pluie en un point pour elle-même, ou qu'on la considère comme un des éléments destinés au calcul de la pluie moyenne sur une surface.

Dans le premier cas, les calculs sont analogues aux précédents. De plus, des diagrammes donnant la valeur des coefficients de corrélation en regard des distances séparant ces stations peuvent être établis.

Ces distances peuvent être traduites en densités exprimées par exemple en nombre de stations pour 1 000 km². Là encore, on passera par l'intermédiaire de la station secondaire pour traiter le problème.

S'il s'agit de déterminer la pluie annuelle moyenne sur une surface, on peut repartir de la définition même de cette moyenne et de son estimation à partir d'un certain nombre de stations. Si une station couvre en moyenne une surface s , la surface $S = Ks$ sera couverte par K stations et la moyenne pluviométrique annuelle sera :

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k$$

On définit ainsi une variate P_m dont la moyenne est :

$$\frac{1}{K} \sum_1^K \bar{P}_k \quad \text{et la variance :}$$

$$\frac{1}{K^2} \sum_1^K \text{Var } P_k + \frac{1}{K^2} \sum_{l=1}^K \sum_{\substack{n=1 \\ l \neq n}}^K r_{l,n} \sqrt{\text{Var } P_l \cdot \text{Var } P_n},$$

où $r_{l,n}$ est le coefficient de corrélation entre les variates P_l et P_n . On aura donc, en termes d'écart-type :

$$s_{P_m} = \sqrt{\frac{1}{K^2} \sum_1^K s_{P_k}^2 + \frac{1}{K^2} \sum_{l=1}^K \sum_{\substack{n=1 \\ l \neq n}}^K r_{l,n} \cdot s_{P_l} \cdot s_{P_n}}.$$

Si les pluviomètres étaient totalement indépendants, l'écart-type de la moyenne P_m serait minimal et on aurait ($r = 0$) :

$$s_{P_m}^2 = \frac{1}{K^2} \sum_1^K s_{P_k}^2.$$

S'ils étaient totalement liés, l'écart-type de P_m serait maximal et on aurait ($r = 1$) :

$$s_{P_m} = \frac{1}{K} \sum_1^K s_{P_k},$$

autrement dit, l'écart-type sur P_m serait égal à la moyenne des écarts-types pour chacun des pluviomètres.

La distribution dans le temps de P_m peut être supposée normale, donc définie par sa moyenne :

$$\frac{1}{K} \sum_1^K \bar{P}_k \quad \text{et son écart-type } s_{P_m} \text{ défini ci-dessus.}$$

En fait, on est rarement amené à étudier la distribution de P_m , l'emploi de cette variate se faisant par le biais des corrélations hydropluviométriques. Néanmoins, si on avait à le faire, on verrait que l'écart-type aléatoire de l'estimation de P_m est voisin de $\frac{1}{\sqrt{N}} s_{P_m}$, N étant le nombre moyen d'années d'observation aux différents postes utilisés pour le calcul de P_m . On pourrait parfaitement, comme on l'a fait pour les modules, se donner une précision à respecter et un seuil de confiance à ne pas dépasser. L'interprétation en matière de densité de réseau serait par contre plus délicate, étant donné la forme complexe sous laquelle interviennent les coefficients de corrélation inter-postes ($r_{l,n}$).

La conclusion de ce paragraphe est que l'on ne peut réellement et scientifiquement parler de rationalisation « physique » d'un réseau hydrométéorologique, que par rapport non seulement à un phénomène, mais à une variate définie dans ce phénomène. Or, si l'on peut tenir compte de la variabilité intrinsèque des phénomènes les uns par rapport aux autres, en installant plus de stations susceptibles de mesurer les phénomènes les plus variables, il est beaucoup plus difficile de tenir compte de la variabilité des différentes variates au sein d'un même phénomène. Il est donc à prévoir que des compromis seront indispensables pour la mise en pratique de la rationalisation.

Évolution des réseaux et planification.

Il n'échappera à personne que la rationalisation « physique » dont les principes viennent d'être exposés, demande pour son application une connaissance déjà très poussée des phénomènes. Cette exigence va un peu à l'encontre d'un état de fait puisque, si le réseau est inexistant ou peu développé, les phénomènes en question sont peu ou pas connus. Il est bien rare en effet que la rationalisation ait à s'exercer dans le sens d'une réduction des stations.

Lorsqu'un hydrologue prend un réseau en main, il peut se trouver en face de plusieurs situations :

- néant total;
- quelques stations disparates;
- réseau minimal;
- réseau rationnel.

S'il en est arrivé à la quatrième position, le seul problème qu'il ait à résoudre est un problème de gestion. Il est bien rare qu'il rencontre le néant total, mais supposons qu'il en soit ainsi.

Sur terrain vierge, il faudrait d'abord se faire une idée du régime en installant quelques stations d'une manière totalement empirique et les suivre pendant un certain nombre d'années. C'est ce qui a été fait depuis le début du siècle dans un certain nombre de pays neufs, tant pour les stations hydrologiques que pour les stations météorologiques. Si, pour quelque État, le problème se posait maintenant en ces termes, il est probable que cette phase préliminaire et transitoire serait éliminée et que l'on tenterait d'emblée l'établissement d'un réseau minimal.

En pratique, le cas le plus défavorable qui puisse se produire à l'heure actuelle se rapporte à la seconde situation : réseau inorganisé de stations disparates. On va alors tenter de mettre en place un réseau minimal. Le réseau minimal est défini comme celui qui permettra, dans le domaine de l'hydrologie comme dans celui de la météorologie, une étude des phénomènes suffisamment complète pour ne laisser aucune lacune très importante en regard des besoins de l'aménagement des ressources en eau.

Dans un tel réseau, on ne recherche donc nullement l'optimum physique et la densité sera reliée non seulement à la variabilité propre des phénomènes mais aussi à l'importance des besoins en eau et à leur nature économique. Le choix du réseau minimal sera très souvent influencé fortement par des considérations budgétaires, mais les responsables de l'hydrologie d'un pays ne doivent pas trop se laisser obnubiler par cette question. En fait, le plan initial doit être présenté et le devis correspondant établi, sans tenir compte des contingences financières; c'est à cette condition seulement que l'hydrologue peut jouer un rôle de promoteur et influencer les pouvoirs publics. Si, par la suite, le plan n'est pas approuvé dans son ensemble et le devis rogné, il sera toujours temps de se rabattre sur une solution moins efficace mais plus économique.

Quels sont, dans ces conditions, les critères qui vont permettre de choisir le réseau minimal? On peut d'abord tirer des enquêtes extensives, faites par différents organismes internationaux, une idée de la consistance, on dira la densité, à donner au réseau. Lorsque nous avons exposé les principes de la rationalisation, nous avons attiré l'attention sur la différence de nature qu'il y a entre la densité d'un réseau climatologique et celle d'un réseau hydrométrique; si une densité exprimée par exemple en nombre de stations par 1 000 km² convient très bien au premier, sa signification est moins nette pour le second. Mais ceci est surtout vrai pour un réseau rationnel;

pour le réseau minimal, on peut admettre cette définition de la densité pour les deux types de réseau, quitte à retoucher ensuite la distribution obtenue.

Les enquêtes dont il a été question ont porté sur des dizaines d'Etats. On demandait à chacun de ces Etats la densité, entre ses frontières, de chaque catégorie de station hydrométéorologique, les caractéristiques géomorphologiques essentielles du pays, en termes qualitatifs, le degré de développement, le climat, etc... et si les autorités compétentes estimaient que le réseau ainsi décrit permettait de faire face sans trop d'incertitude à la satisfaction des besoins en eau du pays. Le dépouillement des résultats de ces enquêtes a permis sinon d'établir des normes de densité, du moins de conseiller, suivant les climats et les caractéristiques du pays, des fourchettes de densités.

Ces résultats sont disponibles dans un certain nombre de publications internationales. Nous ne les énumérerons pas ici, d'autant plus que les conclusions auxquelles ils conduisent sont dépassées dans la plupart des pays développés.

Au bout de quelques années de fonctionnement d'un réseau minimal, on commence à disposer de données suffisantes pour estimer, de façon de plus en plus précise, les paramètres de la rationalisation physique. Nous avons déjà utilisé plusieurs fois ce dernier terme et peut-être n'en avons-nous pas indiqué suffisamment le sens. On peut effectuer une rationalisation, ou une optimisation, suivant plusieurs critères. Le choix d'un critère est en principe un acte d'autorité lié à la finalité que l'on envisage pour l'action entreprise, mais ce peut être également le résultat d'une contrainte extérieure, par exemple le fait accompli d'un budget limité.

On peut se placer dans ce dernier cas et accepter d'emblée un budget imposé. Le but de l'optimisation sera alors de gérer ce budget de manière à lui faire rendre le maximum d'informations hydrologiques : le problème a été traité par LANGBEIN (1). Le procédé, outre qu'il interdit toute initiative de la part de l'hydrologue, qui est tout de même le mieux placé sinon pour décider, du moins pour proposer, ne permet pas de localiser au mieux les stations hydrométriques (pour les stations météorologiques c'est sans importance).

Dans une élaboration « physique » du réseau, on ne s'encombre pas, au départ, des questions financières. Il s'agit uniquement de déterminer, avec une précision donnée et en acceptant un risque calculé, la valeur des paramètres de la distribution d'une variate donnée, étant entendu que les limites d'acceptation peuvent différer suivant la variate choisie et suivant, naturellement, la nature du phénomène.

Quand on établit un réseau rationnel, on travaille pour l'avenir, étant entendu qu'un tel réseau ne peut pas porter ses fruits tout de suite. Il est donc naturel, dans les calculs d'optimisation, de considérer le réseau de base avec un nombre infini d'années d'observation. Lorsqu'on voudra calculer les éléments d'un projet, on devra bien sûr réintroduire, dans la détermination des intervalles de confiance, la vraie durée de la période d'observation à la station de base.

Vient alors le choix de la précision avec laquelle on doit estimer le paramètre de la distribution de la variate dont on a besoin. Ce choix devrait normalement faire appel au calcul économique dans les termes suivants :

- diminuer l'erreur relative sur telle donnée de 1 % revient à tant;
- l'espérance mathématique de ce que risque de coûter le fait d'augmenter l'erreur relative de 1 % est de tant.

Lorsqu'en faisant varier la valeur de l'erreur relative, on obtient la même réponse aux deux questions ci-dessus, on a trouvé l'erreur relative à introduire dans les calculs d'optimisation... à supposer qu'on possède les éléments permettant de le faire, ce qui est une autre histoire.

Toutes les opérations précédentes supposent qu'on a choisi une variate pour laquelle optimiser le réseau. S'il s'agit de débits, on est tenté, de prime abord, d'opérer sur les modules, simples à manipuler et présentant le gros avantage de pouvoir être considérés en général comme norma-

(1) Le nombre total de stations étant fixé par le budget imposé, LANGBEIN calcule la répartition que l'on doit faire entre stations de base et stations secondaires pour maximiser le gain d'information.

lement distribués. Mais un tel choix ne conviendrait guère pour un pays ou une région où la plupart des aménagements envisagés reposent sur l'abondance des basses eaux. Une optimisation totale du réseau consisterait à étudier la rationalisation pour toutes les variantes possibles et à choisir le cas le plus défavorable. Très satisfaisante sur le plan technique, cette solution se traduirait vraisemblablement par un gaspillage des deniers publics. Il faudra très probablement rechercher un compromis et sacrifier un peu quelques-unes des variantes les plus dispersées.

Une fois le réseau optimal élaboré, on devra en présenter le plan et c'est là que va s'amorcer le retour à l'aspect financier du problème. Si le plan, et les dépenses qu'il entraîne, sont acceptés du premier coup, tant mieux, il n'y a plus qu'à passer à l'action; mais c'est là un rêve bien chimérique et il est beaucoup plus vraisemblable qu'une partie seulement des crédits sera accordée. Il faudra alors décider des priorités, en accord avec les plans d'aménagements, et attendre des jours meilleurs, ou le prochain budget, pour poursuivre l'implantation du réseau optimal.