

13 JUL. 1971

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° B4854

**LE RÔLE DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES  
DU MILIEU PHYSIQUE DANS LA SYNTHÈSE ET L'EXTRAPOLATION  
DES DONNÉES HYDROLOGIQUES RECUEILLIES  
SUR BASSINS REPRÉSENTATIFS**

P. DUBREUIL\*

Le bassin représentatif est un outil d'analyse du cycle hydrologique dans un certain espace géographique de dimensions modérées. Théoriquement, l'exploitation d'un seul bassin représentatif est une opération qui se suffit à elle-même; elle conduit à la connaissance du cycle hydrologique d'un certain espace géographique doté de propriétés déterminées. Cependant pratiquement, l'exploitation de plusieurs bassins représentatifs est beaucoup plus riche, car elle permet de dépasser le strict stade de l'analyse. La simple exploitation de bassins voisins permet d'observer que les caractéristiques du cycle hydrologique évoluent en même temps que les espaces géographiques concernés et plus précisément quand les propriétés de ces espaces varient elles aussi, totalement ou partiellement.

L'exploitation de plusieurs ensembles régionaux de bassins représentatifs, répartis dans une zone climatique ou dans des zones climatiques voisines, permet une confrontation des caractères hydrologiques et des propriétés des espaces géographiques, d'autant plus riche et vaste que ces espaces sont nombreux et dispersés et qu'en conséquence leurs propriétés sont variées.

Au-delà du stade de l'analyse, cette confrontation constitue une synthèse des caractères hydrologiques en fonction des propriétés ou des caractères physico-climatiques du milieu géographique.

Le Service Hydrologique de l'ORSTOM est bien équipé pour aborder une telle synthèse puisqu'il a exploité depuis 1954 environ ou exploite encore près de 250 bassins représentatifs répartis dans les régions semi-arides et intertropicales du continent africain principalement. Alors que la masse d'information collectée atteignait tout juste la moitié de la quantité disponible maintenant, une première tentative de synthèse avait vu le jour. J. Rodier et C. Auvray [1] avaient alors, en 1962, procédé à une synthèse et à une extrapolation des paramètres caractérisant la crue décennale issue de bassins de moins de 200 km<sup>2</sup>, en s'appuyant sur certaines variables du milieu physico-climatique.

Les paramètres hydrologiques étaient : le coefficient de ruissellement  $K_r$ , le temps de montée  $t_m$ , le temps de ruissellement ou de base  $T_b$ , le rapport de forme de l'hydrogramme  $Q_x/M$ ,  $Q_x$  étant le débit de pointe et  $M$  le débit moyen de crue durant le temps  $T_b$ .

\* Directeur de recherches, Chef du Département de la Recherche Appliquée, Service Hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Paris, France.

Mey 1970

Ces paramètres étaient explicités à l'aide de cinq variables du milieu physico-climatique : la hauteur ponctuelle de la précipitation décennale, le coefficient d'abattement de celle-ci sur la surface  $S$ , la surface  $S$  du bassin et deux indices  $R$  et  $P$  témoignant du relief et de la perméabilité des bassins. Les indices  $R$  et  $P$  qui pouvaient prendre respectivement 6 et 5 valeurs ( $R_1$  à  $R_6$ ,  $P_1$  à  $P_5$ ) étaient affectés à un bassin donné au vu des valeurs estimées des pentes transversales et longitudinales et du degré de perméabilité ou d'absorption des sols et sous-sols. Des couples  $R_i P_i$  étaient sensés représenter une certaine aptitude au ruissellement. Les résultats furent satisfaisants eu égard à la simplicité du mode de représentation du milieu physique. On se rendit cependant bientôt compte qu'une bonne part de la dispersion résiduelle devait être imputée à une mise en paramètres insuffisante du milieu physique. Ainsi naquit notre objectif d'une représentation quantitative aussi complète que possible du milieu physico-climatique avant de reprendre la synthèse des caractères hydrologiques non seulement de la crue décennale, mais de tous les autres aspects du cycle de l'écoulement.

### 1. LES CARACTÈRES PHYSICO-CLIMATIQUES DU MILIEU GÉOGRAPHIQUE D'UN BASSIN

Un milieu géographique est d'une telle complexité que l'on serait tenté de juger impossible de le représenter par  $p$  paramètres ou d'estimer que cette représentation exige pour le moins que  $p$  égale 100.

En réalité la complexité du milieu géographique ne doit pas paralyser l'hydrologue, car il est vraisemblable qu'une représentation, certes non exhaustive, mais cependant fidèle peut être obtenue avec quelques dizaines de paramètres principaux. Le choix des paramètres est à faire a priori et ne sera justifié qu'à l'issue des essais de synthèse; aussi doit-on à la fois ne pas s'encombrer au départ d'un excès de paramètres dont beaucoup seront soit inutiles, soit d'effet négligeable, et cependant garder la possibilité d'introduire quelques paramètres supplémentaires si le besoin s'en fait sentir.

La nature des bassins représentatifs de l'ORSTOM facilite le choix des paramètres en restreignant le champ à explorer. En effet, plus de 85% de ces bassins couvrent des surfaces comprises entre 1 et 500 km<sup>2</sup> et sur plus des deux tiers la couverture végétale naturelle est dominante (75 à 100% de la surface) tandis que moins de 5% de l'ensemble de ces bassins sont voués à la mise en cultures sur plus de 75% de leur superficie.

Le nombre limité et le caractère particulier des bassins de moins de 1 km<sup>2</sup> et voués à la culture nous ont permis de ne pratiquement pas prendre en compte les facteurs inhérents à l'utilisation agricole des terres qui, comme le montre la littérature américaine (Cf. entre autres [2]) peuvent atteindre plusieurs dizaines et dépasser 2 à 3 fois en quantité tous les autres facteurs réunis.

Les facteurs du milieu physico-climatique que nous avons retenus peuvent être mis en cinq groupes : physico-morphologique, de sol, de végétation, de géologie et de climat. Le tableau 1 les énumère. Beaucoup d'entre eux étant classiques, il a paru inutile de les décrire et d'en donner une définition, opérations que nous avons déjà faites dans de précédentes publications [3, 4, 5]. Il s'agit du premier choix a priori que l'analyse intrinsèque et la synthèse hydrologique permettront de confirmer ou de modifier. Certains de ces facteurs restent qualitatifs, mais une codification simple permet aisément de les représenter sous une forme numérique, et d'ailleurs tous ceux que l'on trouve sous les rubriques géologiques, pédologiques et de végétation ne sont utilisés que pour quelques rares bassins bien particuliers (expérimentation sur cultures, alimentation de nappe ...).

Enfin le nombre de paramètres supérieurs à 50 ne doit pas tromper. En matière de géologie et de végétation, la plupart du temps on se contentera d'utiliser les pourcentages de la surface couverts par tel type de substratum ou de végétation. En matière climatique, dans les zones semi-aride et intertropicale, les paramètres sont souvent très liés entre eux de sorte que l'emploi d'un ou deux suffira généralement à épuiser l'information contenue

dans tous. Enfin les facteurs pédologiques sont d'une telle diversité et d'une telle variabilité dans l'espace qu'ils ne seront vraiment significatifs donc utilisables que pour des bassins élémentaires, disons de superficie inférieure à 1 km<sup>2</sup>.

On voit donc que pour la majorité des bassins représentatifs de l'ORSTOM, à quelques exceptions près, le lot des paramètres actifs se réduit à une vingtaine et que parmi eux la rubrique des facteurs physico-morphologiques tient une place notable.

TABLEAU 1. Liste des facteurs physico-climatiques du milieu géographique retenus a priori

1. <i>PHYSIQUES et MORPHOLOGIQUES</i> (15)	Hauteurs moyennes mensuelles de précipitations
Superficie <i>S</i>	3. <i>GÉOLOGIQUES</i> (10)
Indice de compacité (ou de forme)	Nature du substratum (et % de <i>S</i> )
Longueur du rectangle équivalent	Épaisseur des terrains
Indice de pente <i>Ip</i> (de M. Roche)	Pendage
Indice de pente global <i>Ig</i>	Microtectonique*
Densité de drainage	Type du matériau d'altération*
Rapport de confluence	Épaisseur du matériau d'altération*
Rapport de longueur	Degré d'altération*
Longueur moyenne des thalwegs d'ordre 1	Existence d'une nappe aquifère*
Densité des thalwegs d'ordre 1	Mode d'alimentation de la nappe*
Altitude moyenne (ou maximale et minimale)	Mode de drainage de la nappe*
Orientation aux vents dominants*	4. <i>VÉGÉTATION</i> (7)
Unité géomorphologique (et % de <i>S</i> )	Nature du couvert végétal ou non (et % de <i>S</i> )
Aspect du réseau hydrographique*	Degré de recouvrement*
Nature du lit principal*	Densité des cultures
2. <i>CLIMATIQUES</i> (12)	Pratique culturale*
Température maximale moyenne mensuelle (extrême)	Durée du cycle végétatif de la culture*
Température minimale moyenne mensuelle (extrême)	Age d'une plantation*
Humidité relative maximale moyenne mensuelle (extrême)	Nature de l'assolement*
Humidité relative minimale moyenne mensuelle (extrême)	5. <i>PÉDOLOGIQUES</i> (13)
Insolation moyenne annuelle	Nature de l'unité de sol (et % de <i>S</i> )
Évaporation totale annuelle sur bac	Profondeur de l'horizon <i>A</i>
Hauteur moyenne annuelle de précipitation	Profondeur du sol
Écart-type de la distribution des hauteurs annuelles de précipitation	Répartition granulométrique
Nombre moyen annuel total de jours de pluie	Porosité
Nombre moyen annuel de jours de pluie supérieure à 10 mm	Teneur en eau à la capacité de rétention
Hauteur journalière ponctuelle de pluie de récurrence annuelle	Teneur en eau au point de flétrissement
Hauteur journalière ponctuelle de pluie de récurrence décennale	Indice d'instabilité structurale (log <i>IS</i> de Henin)
	Coefficient de perméabilité de Henin (sur sol remanié)
	Coefficient de perméabilité sur sol en place (méthode Porchet)
	Taux de matières organiques
	Présence d'une litière de débris organiques*
	Pourcentage de cailloux

\* Facteur qualitatif.

## 2. LE PROCESSUS DE LA SYNTHÈSE ET DE L'EXTRAPOLATION DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

Dans la synthèse des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs, on cherche à expliquer la variation de caractères hydrologiques homogènes à l'aide des facteurs physico-climatiques du milieu géographique. Soit  $H_i$  un certain caractère hydrologique observé et analysé sur  $n$  bassins et  $P_i, P_j, P_k$  divers paramètres du milieu de ces bassins. L'objectif est l'établissement de relations  $H_i = F(P_i, P_j, P_k)$  de telle sorte que l'écart résiduel soit minimal.

Quelle que soit la méthode analytique employée (corrélations linéaires multiples, déviations résiduelles etc...), on recherche parmi les facteurs  $P_i, P_j, P_k$  ceux qui réduisent la dispersion de  $H_i$  et on les fait intervenir dans l'ordre de leur « puissance de réduction », qui, si elle est conforme à  $P_i > P_j > P_k$  dans leur action de réduction, conduit finalement à une expression analytique du type :

$$H_i = F(P_i) + G(P_j) + H(P_k) + \varepsilon \text{ (relation a)}$$

$\varepsilon$  étant l'écart résiduel.

On conçoit que dans un tel processus, la simplicité et l'efficacité, allant de pair, recommandent l'emploi de paramètres de préférence indépendants et obéissant à une loi normale. Les tests de normalité et d'indépendance quelle que soit leur complexité doivent précéder la phase de synthèse proprement dite.

En travaillant sur la totalité des échantillons de paramètres du milieu relatifs aux bassins représentatifs de l'ORSTOM, on peut mettre en évidence le degré de dépendance des divers paramètres entre eux. Les paramètres indépendants ont une forte probabilité d'être ceux qui expliqueront la plus grande part de la dispersion d'un caractère hydrologique, les paramètres dépendants ne pouvant guère mieux que réduire quelque peu la dispersion résiduelle due aux premiers.

Le processus de l'extrapolation découle de celui de la synthèse. Une relation du type  $a$  ayant été établie, on peut en déduire la valeur vraisemblable d'un caractère  $K_i$  connaissant les paramètres  $P_i, P_j, P_k$  d'un bassin sans observation hydrométrique, à condition que les valeurs des paramètres soient toutes à l'intérieur de l'amplitude des gammes observées de ces paramètres.

L'homogénéité des caractères hydrologiques faisant l'objet d'une synthèse est évidemment nécessaire. Par exemple, on peut avoir observé sur trois bassins voisins, A, B et C, d'un même ensemble, diverses crues dont les débits maximaux ont été respectivement  $Q_{A1}, Q_{B1}, Q_{C1}, Q_{A2}, Q_{B2}, Q_{C2}, Q_{An}$  etc... Ces données  $Q$  constituent un échantillon hétérogène et il serait vain de rechercher en son sein l'influence d'un quelconque paramètre  $P_i$  du milieu sur l'écart entre les maximums de crue de chaque bassin. Il est préférable de commencer par définir un caractère hydrologique homogène, par exemple le débit maximal  $Q_x$  de la crue provoquée par une averse de récurrence décennale, puis de calculer par analyse des échantillons  $Q_{An}, Q_{Bn}$  et  $Q_{Cn}$  les valeurs de  $Q_{xA}, Q_{xB}$  et  $Q_{xC}$ ; ces trois valeurs sont homogènes et l'action des paramètres du milieu est beaucoup plus aisément décelable, et sera beaucoup plus significative, que celle l'on aurait pu trouver sur l'échantillon hétérogène.

Ainsi en matière de crue, a-t-on retenu et défini un certain nombre de caractères hydrologiques, comme par exemple :

- la lame ruisselée d'une averse de récurrence décennale;
- le débit maximal de crue due à une averse de récurrence décennale;
- le temps de montée de l'hydrogramme standard médian [6];
- le temps de réponse de l'hydrogramme standard médian;
- le temps de base du ruissellement de l'hydrogramme standard médian;

- le rapport de forme de l'hydrogramme standard médian (entre le débit maximal et le débit moyen durant le temps de base).
- etc...

On peut de même et sans limitation définir des caractères hydrologiques relatifs à l'écoulement mensuel, annuel, à l'étiage ... etc...

C'est selon un tel processus que J. Rodier et C. Auvray [1] avaient développé leur première synthèse de la crue décennale des petits cours d'eau d'Afrique occidentale. C'est selon un processus analogue que nous entreprenons la synthèse générale des études sur bassins représentatifs de l'ORSTOM. Certaines fractions de cette synthèse sont déjà réalisées ou en voie de l'être, comme ce fut le cas du travail de G. Vuillaume [7] consacré au ruissellement et à l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares dans la savane arbustive du Niger central, travail dans lequel une synthèse dégageait le rôle de divers paramètres du milieu (surface totale et pourcentage en cultures, indice de pente, taux d'argile, de limon et de sable grossier des sols) sur quelques caractéristiques (lame ruisselée annuelle et débit maximal de crue, érosion spécifique totale et part du charriage de récurrences 1 et 10 ans).

### 3. ANALYSE DES CARACTÈRES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES

Nous procédons actuellement à l'étude du comportement des divers facteurs quantitatifs physico-climatiques afin de mettre en évidence leurs degrés d'interdépendance. Ces facteurs se rangent rapidement en deux groupes :

- ceux qui présentent nettement, deux à deux, de fortes liaisons de dépendance;
- ceux qui apparemment ne présentent pas, à l'examen de l'échantillon total, de trace évidente de liaison.

Dans le premier groupe, on trouve les indices de pente d'une part et deux paramètres morphologiques d'autre part.

Que l'indice de pente  $I_p$  de Roche et l'indice global  $I_g$  soient assez fortement liés n'a rien pour surprendre. Leurs structures sont en effet voisines et le second a été proposé comme une formulation simplifiée susceptible de remplacer le premier. Rappelons que ces deux indices se calculent :

- $I_p$  comme la somme des produits des dénivelées entre courbes de niveau successives  $C_i, C_{i+1}$ , par les pourcentages d'aires du bassin comprises entre ces courbes, la dite somme étant divisée par la racine carrée de la longueur du rectangle équivalent  $L$ .
- $I_g$  comme le quotient par  $L$  de la dénivelée utile du bassin, qui est celle qui contient 90% du bassin (en laissant 5% de déchets dans les altitudes supérieures et autant dans les inférieures).

$I_g$  est en quelque sorte une pente constante moyenne utile du bassin assimilé à un rectangle, tandis que  $I_p$  prend en compte la distribution des pentes le long de la courbe hypsométrique. Sur 204 valeurs testées, six seulement sont un peu divergentes et toutes les autres suivent assez bien une relation qui peut être exprimée soit par  $I_g = 815 I_p^2$  soit, en ramenant  $I_g$ , exprimée en  $m.km^{-1}$ , à un nombre sans dimension, par  $I_p = 1,1 \sqrt{(I_g/1000)}$ . On peut donc envisager l'emploi de l'un ou l'autre des indices de pente dans les opérations de synthèse.

Une liaison peut-être moins serrée, mais néanmoins très nette apparaît d'autre part entre la densité de drainage  $Dd$ , longueur des thalwegs par unité de surface, et la densité  $F_1$  des thalwegs d'ordre 1, nombre des dits thalwegs par unité de surface. Aucun étonnement non plus à cette liaison puisque les thalwegs élémentaires d'ordre 1, nettement les plus nombreux, jouent un rôle déterminant dans la longueur totale des thalwegs. Comme il

n'est pas certain que la position exacte des points  $Dd, F_1$  ne subisse pas l'influence de la nature des terrains géologiques ou celle du climat, on se contente d'indiquer que la relation est dans tous les cas de la forme  $Dd = aF_1^n$ , et vraisemblablement que la relation générale s'approchera de  $Dd = F_1^{2/3}$ .

Dans le second groupe de facteurs, aucune liaison n'apparaît nettement à l'examen des échantillons complets. Avant de conclure peut-être imprudemment à l'indépendance des paramètres analysés, nous avons décidé d'approfondir l'analyse en l'exécutant dans des cadres homogènes. En effet les paramètres physiques et morphologiques sont les reflets du milieu, donc sont sensés exprimer numériquement les particularités des terrains géologiques placés dans certaines conditions d'altération entraînant certains modelés géomorphologiques superficiels. On est donc enclin à penser que s'il y a liaison entre deux paramètres, elle apparaîtra d'autant plus clairement que ceux-ci seront confrontés dans un cadre physico-climatique relativement homogène. Ce cadre nous l'avons voulu large, et pour ce faire nous avons procédé à un double découpage des conditions du milieu en fonction de la nature des terrains géologiques, préalablement regroupés en grandes classes, d'une part et des climats d'autre part.

TABLEAU 2. Classement des bassins représentatifs de l'ORSTOM par grandes unités de végétation et géologiques

	Schistes	Basaltes	Granites	Grès	Calcaires	Sables	Argiles	Alluvions	Total
Forêt dense	7	4	14	1		1		1	28
Forêt claire	4		2						6
Savane boisée				3					3
Savane arborée	7	4	38	4		4	2		49
Savane arbustive	11	3	36	5					55
Savane	3	2	4	5		3			17
Steppe arbustive				5					5
Steppe succulente (ou armée)	13		6	11	6	2	3	3	44
Steppe			3	3			1		7
Prairie inondable			1						1
Roches à nu				1					1
Zones urbaines						2			2
Total de bassins	45	13	104	38	6	12	6	4	228

NB. Certains bassins ne sont pas classés; d'autres figurent deux fois lorsqu'ils sont également situés sur deux unités.

La majeure partie des bassins représentatifs de l'ORSTOM se situant en Afrique occidentale, vaste continent où les variations climatiques sont lentes, homogènes et régulières et bien souvent caractérisables uniquement par le régime des précipitations

(hauteur et répartition), nous avons utilisé de préférence aux types de climat, notions abstraites, les types de végétation naturelle qui leur sont assez étroitement liés. Ce double découpage conduit à un quadrillage géographique à l'intérieur duquel nous avons placé les bassins représentatifs de l'ORSTOM. Le tableau 2 récapitule ce travail.

On y remarque l'absence ou le petit nombre de bassins dans plus de 50% des 96 cases du quadrillage tandis que certaines cases contiennent de nombreux bassins. La concentration la plus marquée affecte les 74 bassins, le tiers du total, sur terrains du groupe des granites (gneiss, migmatites...) et sous couvert de savanes arborée ou arbustive auxquelles correspond le climat tropical de transition plus ou moins pluvieux (de 800 à 1 800 mm par an) qui règne sur le nord de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Dahomey, sur le centre sud de la Haute-Volta, le centre du Cameroun etc...

Dans le cadre choisi, l'échantillon de ces deux « cases » (granites sous savanes arborée et arbustive) est le seul assez important pour permettre un examen des paramètres du milieu physique. Voici le résultat de cet examen :

- a) La densité de drainage  $Dd$  paraît indépendante des rapports de confluence  $Rc$  et de longueur  $Rl$ ;
- b) La longueur moyenne  $\bar{l}_1$  des thalwegs de l'ordre paraît indépendante du rapport de longueur  $Rl$ ;
- c) L'indice de pente  $Ip$  et la densité de drainage paraissent croître proportionnellement, mais la dispersion est très grande et il y a de nombreux points divergents;
- d) L'indice de pente  $Ip$  et la densité de drainage  $Dd$  décroissent quand la superficie du bassin  $S$  augmente, ceci en coordonnées logarithmiques et sans que ces liaisons soient nettes;
- e) Le rapport de confluence  $Rc$  croît proportionnellement avec le rapport de longueur et environ 1,5 fois plus vite, cette liaison étant moyennement dispersée.

Toutes les combinaisons possibles entre paramètres physiques et morphologiques n'ont pas été essayées et l'extension aux autres conditions du milieu non plus; ceci est actuellement en cours d'analyse. Mais d'ores et déjà, on peut penser que les paramètres physiques et morphologiques choisis sont raisonnablement indépendants à l'exception des couples  $Ip - Ig$ ,  $Dd - F_1$  et peut-être  $Rc - Rl$ .

Les analyses de comportement des facteurs physico-climatiques du milieu géographique sont indispensables pour aborder en toute connaissance la synthèse hydrologique proprement dite, qu'elles préparent et facilitent.

#### RÉFÉRENCES

1. RODIER, J. and AUVRAY, C. (1965): Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique occidentale, *ORSTOM et Comité Interafricain d'Études Hydrauliques*, 30 p. 21 × 27 + 13 gr.
2. Tennessee Valley Authority (1966): Dir. of Water control planning, Hydraulic data Branch. "Design of an hydrologic condition survey using factor analysis". Research paper no. 5, *Bull. A.I.H.S.*, 11<sup>me</sup> Année n° 2.
3. DUBREUIL, P. (1966): Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants; leur détermination avec une précision acceptable, *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, n° 5, Décembre 1966.
4. DUBREUIL, P. (1967): Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les bassins représentatifs et expérimentaux. (Protocoles de mesures), *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, Vol. IV, n° 3.

5. DUBREUIL, P. (1967): Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Publication provisoire des fiches descriptives, *ORSTOM*, Service Hydrologique, Paris.
6. ROCHE, M. (1967): Recherche d'un hydrogramme standard, *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, Vol. IV, n° 1.
7. VUILLAUME, G. (1969): Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin de Kountkouzout, Niger), *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, Vol. VI, n° 4.