

**Office de la Recherche Scientifique
et Technique Outre-Mer**

▼
Service Hydrologique

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE D'IMPLANTATION
DE BASSINS REPRÉSENTATIFS
DE RÉGIONS HYDROLOGIQUES HOMOGÈNES**



par

Pierre DUBREUIL

PARIS - MAI 1984

OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE
et TECHNIQUE OUTRE-MER

Service Hydrologique

CONTRIBUTION à l'ETUDE d'IMPLANTATION de BASSINS
REPRESENTATIFS de REGIONS HYDROLOGIQUES HOMOGENES

par

Pierre DUBREUIL

Paris, Mai 1964

Avec les échelles de son réseau hydrométrique et les pluviomètres du réseau météorologique, l'hydrologue dispose de son principal outil à l'aide duquel il peut théoriquement résoudre d'une manière globale la plupart des problèmes de l'écoulement des eaux dans les fleuves et rivières. Mais en dessous d'une certaine surface, son outil ne fonctionne plus. Cette surface limite varie évidemment d'une région à l'autre ; elle est généralement supérieure à la densité optimale recommandée pour les réseaux hydrométriques, laquelle passe de 700 km² (surface contrôlée par une station), pour les régions tempérées industrialisées, à 2 500 km² pour les régions intertropicales, à 8 000 km² et davantage pour les régions arides, polaires et très peu peuplées - Mis à part certains secteurs particuliers à forte précipitation (montagnes de régions tempérées, îles des CARIBBES etc...) où cette densité conseillée descend à 140 km², on peut donc dire que le réseau hydrométrique ne contrôle que des surfaces très supérieures à 1 000 km².

Pour de plus petites surfaces, l'hydrologue s'est fabriqué un nouvel outil complexe, le bassin versant représentatif ou expérimental qui réunit, sur une aire donnée, les instruments primaires : échelles et pluviomètres.

Il ne s'agit donc plus d'un outil ponctuel répandu avec une certaine densité pour couvrir un pays, mais d'un ensemble d'une certaine étendue.

A partir du moment où un outil intègre l'espace, il n'y a aucune raison de considérer ce facteur comme fixe et de ne fabriquer que des outils d'une certaine surface, par exemple des bassins de 25 km². Il y a, au contraire, tout intérêt à étudier ce facteur espace à travers l'outil nouveau et cela d'autant plus que la plupart des caractères quantitatifs de l'écoulement ont une variabilité dans laquelle le facteur espace tient une place prépondérante. Ainsi le bassin versant représentatif peut-il être utilisé pratiquement entre quelques dixièmes (plus petit, il devient une parcelle expérimentale) et quelques centaines de km² (plus grand il serait très difficile de le contrôler facilement sans moyens démesurés). Dans cette gamme d'étendues, il est certain que l'on emploiera plus fréquemment le bassin de dimensions les plus voisines par défaut de celles que couvre une précipitation simple : 25 km² répond fort bien à cette obligation pour de nombreux climats tempérés ou intertropicaux.

Il n'est peut-être pas inopportun de faire ici un court aparté sur la terminologie. L'expression communément utilisée en français jusqu'alors "bassin versant expérimental" n'est valable, disent assez justement certains critiques, que si l'on procède réellement à des expérimentations sur le milieu physique naturel, c'est-à-dire dans un cas sur 3 selon notre classification. Dans les deux autres cas, on ne modifie pas l'équilibre naturel, aussi peut-on considérer que ces deux classes de bassin représentent simplement l'équilibre naturel. Dans cette optique, les efforts d'homogénéisation des terminologies entreprises actuellement conduisent à ne retenir que deux groupes :

- a) les bassins expérimentaux, correspondant à notre 2ème classe,
- b) les bassins représentatifs, correspondant à nos classes 1 et 3, la frontière restant imprécise entre 1 et 3.

Nous admettrons temporairement de conserver, si le besoin s'en fait sentir, les compléments "de recherche" ou "à vocation pratique" pour distinguer les deux sous-groupes de bassins représentatifs.

Bien que très peu répandus jusqu'ici, nous n'aurions garde de passer sous silence un dernier groupe de bassins qui pourraient être, eux aussi, représentatifs non plus seulement de l'équilibre naturel du milieu physique soumis à l'influence de l'homme, mais de celui du même milieu physique protégé de l'homme. Il a été convenu d'employer l'expression de bassins repères pour désigner ces témoins de l'équilibre naturel.

Bien que les buts et souvent les moyens diffèrent d'une classe à l'autre des bassins versants, dans toutes, il faut mesurer les manifestations principales du cycle de l'eau : la pluie, l'écoulement dans les rivières, les mouvements de la nappe phréatique et cela s'effectue à l'aide d'appareils généralement semblables et selon une méthodologie assez constante.

La particularité des bassins de recherche ou d'expérimentation réside dans le fait qu'à ces mesures générales et classiques s'ajoutent d'autres mesures d'un caractère particulier à chaque cas, dont la méthodologie doit être sans cesse adaptée.

Il apparaît donc clairement que les mesures principales que nous venons d'évoquer représentent la majorité tantôt quasi absolue, tantôt relative, des travaux au champ et qu'il est donc très souhaitable qu'elles s'effectuent selon une méthodologie aussi homogène que

possible en tous lieux et que ces règles soient étendues aussi au rassemblement, au classement et à l'élaboration des données recueillies par ces mesures.

Nous avons l'intention d'apporter notre contribution à l'établissement de cette méthodologie du rassemblement, du classement et de l'élaboration des données recueillies dans les domaines climatologiques, pluviométriques et hydrométriques de surface en nous attachant tout particulièrement au cas du bassin versant représentatif à vocation pratique. Mais au préalable, il nous paraît souhaitable d'examiner les modalités du choix d'implantation d'un bassin d'études pour qu'il soit représentatif d'une région homogène.

- Le choix de l'implantation d'un bassin représentatif ou expérimental :

Cette implantation peut être fortement prédéterminée par l'emplacement de la future zone à aménager pour laquelle l'étude sur petit bassin est nécessaire ; c'est le cas presque général pour les aménagements de la couverture végétale (bassin à caractère strictement expérimental), c'est aussi en majorité celui des bassins représentatifs à vocation pratique. Dans ces conditions, les limites du choix sont très restreintes et celui-ci n'est pas très difficile.

Il en va tout autrement quand l'implantation est libre, ou tout au moins simplement assujettie à une représentativité régionale ; c'est généralement le cas des bassins de recherche ; c'est aussi parfois celui des bassins représentatifs à vocation pratique lorsqu'ils viennent compléter le réseau hydrométrique dans la recherche des données hydrologiques régionales de base, rôle qui est appelé à se développer considérablement.

Cette liberté d'implantation rend le choix très difficile puisque le critère de validité sera celui d'être représentatif au sein d'une région géographiquement homogène. Or, si qualitativement les facteurs physico-climatiques d'une région sont assez bien connus a priori, il en va tout autrement lorsque l'on veut les estimer quantitativement pour en vérifier l'homogénéité puisque justement les études projetées auront pour but de faire apparaître les liaisons quantitatives entre les dits facteurs et les caractères du régime hydrologique régional.

Pour lever l'indécision, il importe de définir la région géographiquement homogène en classant les facteurs physico-climatiques par ordre d'importance décroissante, en négligeant les facteurs secondaires. On peut ainsi adopter le schéma suivant de classification :

- a) le climat détermine la région,
- b) les divisions régionales (sous-régions ou zones) dépendent successivement des caractéristiques du sol et du sous-sol (notion de perméabilité), du relief (notion d'indice de pente) et de la couverture végétale.

Le climat intervient généralement (et tout particulièrement en zone intertropicale) dans le bilan hydrologique essentiellement par les précipitations (hauteur annuelle, irrégularité interannuelle, répartition mensuelle, type des chutes de pluie, hauteurs de précipitations exceptionnelles, intensités-durées-surfaces des chutes de pluie, etc...), secondairement par les températures (moyenne annuelle, variation mensuelle, maximums, minimums et écarts, etc...), et beaucoup plus accessoirement par le régime des vents et le degré d'humidité. Une bonne représentation du climat peut être fournie par l'un des indices classiques (W. KOPPEN, THORNTHWAITE ou TURC par exemple). Ces derniers, qui s'attachent à dégager l'évapotranspiration, paraissent plus intéressants pour l'hydrologue. Bien qu'il serait dangereux d'utiliser ces indices pour déterminer avec précision le montant réel de l'évapotranspiration d'une région quelconque du globe, on doit reconnaître qu'ils représentent assez fidèlement le climat et l'on peut dire qu'à indices égaux, des régions voisines auront certainement le même climat, donc qu'il s'agira dans notre schéma de régions homogènes.

Il est certain que les buts recherchés dans les études sur petits bassins peuvent influencer sur le choix de l'indice à prendre en considération, sans exclure tout autre facteur sélectif, pour discriminer les régions homogènes.

Etant donné la variété des climats et la multiplicité des classifications, il ne saurait être question pour l'hydrologue d'y ajouter d'autres cloisonnements arbitraires.

Nous pensons que le choix de l'implantation de bassins représentatifs doit se faire selon des règles à définir à l'intérieur de régions climatiques homogènes. Si des considérations de programmation imposent par exemple une étude générale d'un bassin assez vaste pour que l'homogénéité du climat puisse ne pas y être évidente, on s'efforcera de réduire au minimum le nombre de régions homogènes distinctes du point de vue climatique pour ne pas disperser à l'extrême l'analyse et rendre les synthèses ultérieures trop complexes.

Par ordre d'importance, les caractéristiques du sol et du sous-sol s'imposent au premier stade de division des régions climatiquement homogènes. Cette division paraît devoir s'accomplir selon le critère de la perméabilité du sol et du sous-sol afin d'individualiser des zones à dominance imperméable ou à dominance perméable ; ceci permet, en effet, de séparer les zones où la majorité des écoulements sont superficiels de celles où existe une nappe aquifère qui participe quantitativement de manière non négligeable au cycle de l'eau (1), les études à entreprendre et les moyens à développer étant assez différents dans les deux cas.

La clé de la division réside donc dans l'existence ou l'absence d'un sous-sol perméable ; la perméabilité du sol intervient généralement de façon secondaire et reste un facteur variable déterminant la plus ou moins grande potentialité de ruissellement (ou d'infiltration) du dit sol. En effet, sous l'angle de la perméabilité, sol et sous-sol sont liés mais peut-être pas d'une manière aussi étroite qu'on pourrait le supposer, les conditions de la pédogenèse pouvant très bien modifier, voire inverser relativement la plus ou moins grande perméabilité d'un sol vis à vis du sous-sol.

Sur le plan quantitatif, on affronte la difficulté de la séparation entre ces deux types de zones entre lesquelles il n'y a pas de frontière précise.

Si la nappe aquifère est drainée par le réseau hydrographique local, on pourra prendre comme limite un certain pourcentage de l'écoulement total moyen annuel fourni par le drainage (peut-être 40 % pour la limite inférieure de la zone à dominance perméable et 10 % pour la limite supérieure de celle à dominance imperméable).

En l'absence de drainage local, il faudrait reporter le choix du critère distinctif sur la valeur de la perméabilité moyenne des terrains K mesurée dans des conditions bien déterminées (méthodes d'analyse hydrodynamiques des sols en laboratoire ou au champ selon les procédés MUNTZ ou PORCHET par exemple). On pourrait admettre ainsi comme zone perméable celle où la perméabilité K est supérieure à $2,10^{-5}$ m/s soit 35 mm/h (2) environ et comme imperméable celle où K est inférieur à $4,10^{-6}$ m/s soit 15 mm/h (2) environ.

-
- (1) Soit que son alimentation dépende essentiellement des précipitations locales sur le terrain sus-jacent, soit que son drainage s'effectue dans le réseau hydrographique local.
 - (2) Ne pas confondre ces valeurs de perméabilité avec celles de l'infiltration réelle in situ ou encore celles du seuil inférieur de précipitation utile, toutes deux assez différentes ne serait-ce que par la micro-hétérogénéité du terrain, l'action mécanique de la pluie etc....

Dans les deux cas, la bande intermédiaire représente une zone sans dominance particulière en matière de perméabilité.

Il est certain que le choix des limites quantitatives est un peu arbitraire ; nous n'en n'avons parlé que pour en montrer les difficultés car en pratique on ne possède ni les renseignements (critère du pourcentage d'écoulement), ni les moyens de calcul rapide (critère de perméabilité moyenne) et la séparation des zones doit se faire qualitativement. Le choix est peut-être plus arbitraire, mais il est plus rapide et plus aisé pour un spécialiste averti. L'examen portera simplement sur la carte géologique, la tendance argileuse des sols, l'existence d'un écoulement pérenne en région à régime saisonnier de précipitations, etc....

On pourrait proposer les normes suivantes de division :

Zone imperméable	- Sous-sol pratiquement imperméable. Sol argileux ou argilo-limoneux. Absence de nappe phréatique. Ecoulement superficiel uniquement dépendant des précipitations, présentant un tarissement très rapide en région à saison des pluies marquée.	$K < 4.10^{-6}$ m/s (15 mm/h) Ruissellement > 90 % Ecoulement total
Zone faiblement perméable	- Sous-sol faiblement perméable. Sol limoneux, limono-argileux ou argilo-sableux. Possibilité d'existence de nappe phréatique localisée et de faible importance. Ecoulement superficiel soutenu par un tarissement à faibles débits. Assèchement possible en région à longue saison sèche.	$2.10^{-5} > K > 4.10^{-6}$ (15 à 35 mm/h) Ruissellement entre 90 et 60 % de l'écoulement total.
Zone perméable	- Sous-sol perméable. Sols sableux, sableux-limoneux ou sablo-argileux. Nappe phréatique générale. Ecoulement permanent en année non anormalement sèche	$K > 2.10^{-5}$ m/s (35 mm/h) Ruissellement inférieur à 60 % de l'écoulement total.

En second stade, le critère de subdivision régionale doit être recherché dans le relief. Celui-ci est un facteur d'importance capitale sur la plus ou moins grande aptitude au ruissellement des terrains ; il peut modifier la répartition entre infiltration et ruissellement estimée sous le simple aspect de la perméabilité ; il est surtout un facteur de répartition des eaux de pluie entre le ruissellement et l'évapotranspiration réelle. Son intervention s'impose dans la subdivision des zones homogènes en secteurs.

La préhension du relief doit être la plus globale possible ; elle peut rester qualitative comme pour la perméabilité, mais il semble facile d'en donner une vision quantitative sans avoir à effectuer des calculs complexes quand il s'agit d'une région pour laquelle on dispose d'une carte altimétrique.

Sous l'angle de son influence sur l'écoulement, le relief présente deux directions privilégiées, celle des thalwegs et celle des versants perpendiculaires à la précédente.

Il est facile de mesurer la pente longitudinale moyenne d'un cours d'eau et pas trop difficile, bien que plus délicat, d'estimer la pente transversale moyenne des versants. On peut penser posséder avec ces deux pentes une appréciation complète et satisfaisante du relief ; c'est vraisemblable sur le plan qualitatif. Cependant, si l'on désire subdiviser le relief en diverses classes, il faut constituer une certaine clé qui n'est pleinement satisfaisante qu'en associant pentes longitudinales et transversales. Mais comment le faire ?

La solution simple, pas plus mauvaise qu'une autre a priori, mais dont nous n'avons pu vérifier expérimentalement la valeur, serait de prendre la moyenne de ces deux pentes. On est alors obligé de s'imposer une distance de base le long des cours d'eau (10, 20 ou 50 km depuis la source par exemple) pour calculer la pente longitudinale, sinon on verrait celle-ci diminuer et, par conséquent, la pente moyenne du terrain diminuerait (quel que soit d'ailleurs le mode d'association entre pentes longitudinales et transversales) sans que le relief s'atténue vraiment.

La nécessité de cette restriction limite la préhension du relief à certains secteurs proches des lignes de partage des eaux ; il faudrait donc ensuite recommencer pour des longueurs de cours d'eau plus longues.

Mais dans ces conditions, autant choisir d'étudier le relief par bassins versants, en transposant la restriction linéaire en une restriction de surface, car l'on possède les moyens d'estimer très correctement la pente moyenne d'un bassin en tenant compte de la totalité du relief, avec l'indice de pente de M. ROCHE.

L'expression de cet indice est :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{s_i (d_i - d_{i-1})}$$

dans laquelle :

x_i est la distance qui sépare deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

d_i et d_{i-1} : les cotes de deux courbes de niveau voisines

s_i : la fraction de surface totale comprise entre ces deux courbes

L : la longueur du rectangle équivalent.

Outre le tracé des courbes de niveau sur la carte (il en faut au moins 3 pour que l'indice ait une certaine précision), il faut délimiter le bassin, mesurer la surface A , son périmètre P , son indice de compacité $K = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$ pour calculer L , puis mesurer les surfaces intermédiaires entre les diverses courbes de niveau.

Ce travail assez facile peut cependant être considéré comme trop long pour une prospection cartographique générale n'ayant pour but que de distinguer des secteurs à relief homogène.

On peut se simplifier grandement la tâche en se contentant de calculer la pente moyenne d'un bassin par application de la formule simple : $I = \frac{\Delta D}{L}$, quotient de la dénivelée du bassin par la longueur du rectangle équivalent.

Considérée comme un peu rudimentaire en général, cette pente moyenne, pour des bassins inférieurs à 500 km², les seuls qui nous intéressent ici, est au contraire tout à fait satisfaisante. Nous avons vérifié sur près de 40 petits bassins des régions arides, intertropicales et tempérées, que la pente moyenne était en corrélation étroite avec l'indice de pente selon la progression suivante :

Pente moyenne (m/km) :	2	5	10	20	50	100	200
Indice de pente :	0,042	0,070	0,100	0,145	0,235	0,340	0,490

Nous conseillons de calculer la dénivelée ΔD non pas en soustrayant sèchement l'altitude de l'exutoire du bassin de celle du point culminant mais, pour éviter une distorsion créée par des points singuliers, de prendre en considération les altitudes ayant approximativement 5 % de la surface du bassin en dessous et au-dessus d'elles ; leur détermination se fait aisément à l'estime.

Le relief étant ainsi pleinement représenté par la pente moyenne d'un bassin versant, il faut, pour établir une classification, partir d'une surface de base puis rechercher une loi de variation en fonction de la surface envisagée. On supposera cette surface de base égale à 25 km².

Nous proposons une divisions arbitraire du relief en 6 classes simplement désignées par un adjectif qualificatif et à chacune desquelles on fera correspondre des domaines de validité en pente moyenne et en indice de pente.

1 - Relief très faible	Pente moyenne inférieure à 5 m/km.	$I_p < 0,070$
2 - Relief faible	Pente moyenne comprise entre 5 et 10 m/km	$0,07 < I_p < 0,10$
3 - Relief modéré	10 à 20 m/km où	$0,10 < I_p < 0,14$
4 - Relief assez fort	20 à 50 m/km où	$0,14 < I_p < 0,23$
5 - Relief fort	Pente moyenne entre 50 et 100 m/km	$0,34 > I_p > 0,23$
6 - Relief très fort	Pente moyenne supérieure à 100 m/km	$I_p > 0,34$

Si l'on regarde maintenant de part et d'autre de cette surface de base de 25 km², on constate généralement que, pour des bassins plus petits (compris dans le bassin de 25 km²), la pente moyenne et l'indice de pente sont plus élevés, et que pour des bassins plus grands (intégrant le bassin de 25 km²), la pente moyenne et l'indice de pente sont plus faibles et cela pour une même région présentant un relief homogène, par conséquent une même aptitude au ruissellement, pourrait-on dire.

Pour conserver la même division en 6 classes de relief quelle que soit la superficie considérée, disons de 5 km² à 500 km², il faut établir un barème de variation des pentes moyennes et des indices de pente. Nous avons étudié très rapidement ce problème pour plusieurs groupes de bassins et bien qu'il y ait une certaine dispersion suivant les modelés d'une région à l'autre, nous avons retenu un barème moyen fournissant les coefficients K et K' par lesquels doivent être multipliés les pentes moyennes et indices de pente des bassins de 25 km², supposés égaux à l'unité, pour obtenir les valeurs correspondantes pour une nouvelle surface.

Surface km ²	Coefficient K des pentes moyennes	Coefficient K' des indices de pente
5	2	1,5
10	1,5	1,25
25	1	1
50	0,75	0,85
100	0,50	0,70
250	0,35	0,55
500	0,25	0,45

Dans la pratique, pour savoir dans quelle classe ranger un bassin d'une superficie donnée, on calculera sa pente moyenne, puis par application du coefficient $\frac{1}{K}$, on obtiendra la pente moyenne d'un bassin de 25 km² d'aptitude comparable au ruissellement, qui nous fournira la classe recherchée.

Etant donné la précision réduite de ce barème de variation, on ne réalisera la meilleure étude des reliefs d'une région climatiquement homogène - ou de l'une de ses zones homogènes en perméabilité - qu'en travaillant sur des bassins de superficie voisine de 25 km², en procédant à un certain sondage en divers lieux de la région ou de la zone étudiée.

L'expérience montre qu'un travail sur une base de 25 km² n'est possible qu'à grande échelle quand on veut réaliser une étude très détaillée d'une région limitée.

Mais quand il s'agit d'effectuer une étude extensive d'une vaste région (plusieurs dizaines de milliers de km² par exemple), il est certain que la rapidité d'exécution liée aux possibilités cartographiques (on travaille sur du 1/200 000^e ou du 1/500 000^e) ne peut être obtenue qu'en choisissant une base de 500 km², par exemple.

A titre de dernière remarque utile, nous signalons que la pente longitudinale moyenne des cours d'eau est peu différente de la pente moyenne des bassins drainés par ces cours d'eau, avec une légère tendance à lui être un peu inférieure. Mais on ne peut pas prendre cette pente longitudinale comme représentative du relief, car il est souvent difficile sur les cartes d'apprécier la longueur réelle d'un thalweg et son lieu exact de naissance ; de ce fait, les valeurs calculées présentent une dispersion notable, par comparaison avec l'indice de pente.

La végétation est le dernier élément du milieu naturel qui puisse intervenir pour la détermination de régions homogènes du point de vue hydrologique.

Il faut tout de suite remarquer que le choix du climat comme premier facteur de classification régionale implique, a priori, une prise en considération de la végétation naturelle. Il est en effet évident qu'à chaque grand type de climat correspond une certaine allure de la végétation : forêt tropicale, steppe herbeuse, etc.....

La végétation ne peut donc intervenir comme élément de différenciation, en quatrième stade, sous son aspect botanique et naturel mais sous son aspect de couverture du sol, en considérant sa plus ou moins grande dégradation due à l'influence de l'homme (exploitation intensive des bois, abattage ou brûlis pour mise en cultures).

On pourrait adopter le schéma suivant de classification de la végétation par importance décroissante de son rôle de couverture du sol :

- 1 - Forêt naturelle protégée (site classé).
- 2 - Forêt exploitée pour la production du bois, présentant des clairières en faible quantité.
- 3 - Forêt ou savane arborée dense dégradée par la mise en cultures d'îlots d'une certaine importance.
- 4 - Terrains cultivés soit avec subsistance d'îlots de forêt ou de savane arborée dense, soit en totalité mais sur lesquels les cultures assurent une assez bonne couverture du sol en période pluvieuse.
- 5 - Terrains cultivés sans protection efficace du sol en période pluvieuse. Savanes clairsemées d'épineux.
- 6 - Steppes herbeuses naturelles, prairies permanentes artificielles.
- 7 - Terrains incultes ou abandonnés après érosion due aux cultures et couverts d'une végétation herbacée clairsemée.
- 8 - Zones sans végétation : rochers de hautes montagnes, déserts, dunes, secteurs urbains, routes....

En d'autres termes, à l'échelle de quelques dizaines, voire de quelques centaines de milliers de km^2 , l'étude doit avoir deux buts :

- a) un but principal qui est de faire apparaître les régions hydrologiques homogènes et, par voie de conséquence, de permettre l'établissement d'un programme d'implantation de bassins représentatifs.
- b) un but secondaire qui, a posteriori, sera de rendre possible dans la zone étudiée l'extension spatiale des résultats localisés sur les bassins représentatifs en utilisant les clés de la régionalisation pour chiffrer un indice d'aptitude au ruissellement par exemple.

Sur le plan pratique du déroulement du travail, à cette échelle le climat est généralement homogène, à quelques nuances près et c'est la clé de la perméabilité qui nous semble l'élément essentiel de la régionalisation. La clé du relief qui provoque l'ultime découpage régional nous semble devoir être appliquée ainsi :

- examiner chaque bassin de 500 km^2 environ mais ne tenir compte dans un secteur donné que des tendances générales moyennes pour classer le relief ;
- négliger toutes les particularités locales à l'intérieur des surfaces de 500 km^2 .

Si l'on fait basculer dans un sens ou dans l'autre l'équilibre qui préside à l'application des règles de régionalisation, on accorde la prépondérance à l'un ou l'autre des termes de cet équilibre et cela correspond à la fois à une nouvelle méthode d'application des règles et à un nouveau type de problème.

Pour une zone de dimensions limitées à quelques milliers de km^2 , le problème n'est plus de faire apparaître les régions hydrologiques homogènes mais de préciser les nuances locales, par exemple sous l'angle de l'aptitude au ruissellement. A cette échelle, le climat est généralement homogène et la perméabilité perd de son importance au profit du relief et de la végétation qui deviennent les clés principales de l'analyse. L'étude sera entreprise sur des bassins inférieurs à 500 km^2 : 25 à 50 km^2 par exemple et les remarques formulées précédemment quant à l'application de la clé du relief restent valables ici, en changeant la surface de base. L'application de la clé de végétation doit se faire dans la même optique.

A l'opposé, la régionalisation hydrologique est le but unique d'une étude portant sur une zone dépassant nettement 100 000 km² par exemple ; on s'attache alors à définir des grandes régions nettement différenciées au sein desquelles pourraient être implantés des bassins représentatifs des tendances générales moyennes de la région. A cette échelle, la clé du climat prend la première place et l'application de la clé du relief, qu'il est difficile de faire sur des surfaces supérieures à 500 km², consiste à choisir dans les zones déjà individualisées, par l'application des clés du climat et de la perméabilité, quelques bassins de 500 km² qui paraissent, à première vue, représenter la tendance moyenne d'un secteur pour fixer la classe de relief de ce secteur.

Les trois possibilités différentes d'application des règles de régionalisation peuvent coexister dans une même zone, mais il va de soi que les limites que nous avons suggérées pour séparer les différents domaines d'application sont des ordres de grandeur moyens. Dans certaines parties du monde, les facteurs physiques (climat, sols, relief...) varient considérablement sur de courtes distances, comme dans les pays alpins ou toute autre région montagneuse de la bordure méditerranéenne et comme dans les pays andins ; dans ces conditions, les limites de domaine devraient être réduites et l'intérêt du domaine supérieur pourrait considérablement diminuer, car il n'y aurait plus de régions hydrologiques homogènes de grande surface.

A l'inverse, les limites pourraient être accrues dans les vastes plaines du Nord et de l'Est européen comme sur le continent Ouest africain ou la forêt amazonienne ; alors le domaine supérieur d'application des règles prendrait de l'importance et il pourrait devenir sans objet d'utiliser le domaine inférieur, car l'hétérogénéité hydrologique de détails n'existerait pratiquement pas.

Parmi les 3 domaines d'application des règles de régionalisation que nous venons de définir, le domaine médian qui semble devoir être le plus répandu et le domaine supérieur, par les buts mêmes qu'ils visent, demandent expressément que l'application des dites règles y soit le plus simple et le plus rapide possible.

Cette nécessité pratique justifie à nos yeux le choix que nous avons fait d'utiliser pour des régions climatiquement homogènes des clés successives de perméabilité et de relief et non une clé unique qui aurait pu prendre appui sur la géomorphologie quantitative.

La géomorphologie quantitative, qui prend ses racines dans les lois d'HORTON entre autres, est aujourd'hui à même de fournir un précieux instrument de travail à l'hydrologue. Les travaux des géomorphologues américains (LEOPOLD, KRIMGOLD, STRAHLER, MELTON, MILLER...), comme ceux des français qui s'en inspirent (TRICART, HIRSCH....) ont mis au point la détermination pratique de nombreux paramètres géomorphologiques :

- nombre et longueur moyenne des cours d'eau de divers ordres,
- rapports de confluence et de longueur
- densité de drainage ... etc...

Mais le calcul de ces divers paramètres est encore délicat et long et demande de toute façon à la fois des cartes assez sensibles (reproduction fidèle du réseau hydrographique), des calculs et des extrapolations graphiques. Il se justifie certainement au stade de l'interprétation et de la cartographie des aptitudes au ruissellement effectuées a posteriori des études sur le terrain.

Nous avons estimé que ce travail était trop compliqué pour le but que nous recherchions : implantation a priori de bassins représentatifs de zones hydrologiques homogènes.

Cependant, il faut reconnaître que le choix d'un indice géomorphologique à la place des clés "perméabilité" et "relief" n'est peut-être pas dénué d'intérêt, dans deux cas au moins :

- a) dans le domaine inférieur d'application de nos règles de régionalisation car il s'agit bien souvent là d'un travail très proche de celui de l'interprétation (homogénéité sous l'angle de l'aptitude au ruissellement),
- b) quand les cartes altimétriques font défaut. Ce cas n'est peut-être pas si rare dans de nombreux pays encore peu développés et il nous paraît intéressant que soit examinée la possibilité d'un relai de nos clés de relief par une clé géomorphologique à déterminer le plus simplement possible. Ce point à lui seul mériterait une étude particulière.

ESSAI de DETERMINATION de REGIONS HYDROLOGIQUES
HOMOGENES dans le BASSIN de JAGUARIBE (CEARÁ - BRESIL)

Les parties centrale, méridionale et orientale de l'Etat du CEARÁ sont entièrement occupées par le bassin hydrographique du rio JAGUARIBE qui couvre près de 80 000 km², soit plus de la moitié de la superficie de cet Etat.

Situé à l'intérieur du polygone de la sécheresse, ce bassin jouit d'un climat homogène, tropical humide à hiver sec et tendance isothermique (moins de 5° C d'écart entre les températures moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid), rentrant dans le type A w i de la classification de KÖPPEN.

Le problème qui nous était posé consistait à préciser les données de l'écoulement (apports annuels, irrégularité interannuelle et débits maximaux de crue exceptionnelle) nécessaire à la rationalisation de la politique de retenue superficielle des eaux pour satisfaire les besoins humains, animaux et agricoles.

Dans ce climat homogène, nous avons préféré faire apparaître deux nuances de part et d'autre de l'état moyen des précipitations : 600 à 800 mm par an, l'une plus pluvieuse dans 3 secteurs (deux en altitude au-dessus de 400 mètres, le 3ème au bord de la mer), l'autre plus sèche à l'extrême Ouest du bassin.

Nous avons ainsi adopté 3 classes de climat homogènes d'humidité croissante :

- H₁ - Précipitations annuelles moyennes inférieures à 600 mm, environ 11 500 km² à l'extrême Ouest du bassin.
- H₂ - Précipitations annuelles moyennes comprises entre 600 et 800 mm, sur la quasi-totalité du bassin (80 % environ).
- H₃ - Précipitations annuelles moyennes supérieures à 800 mm, en 3 secteurs (CARIRI et SERRA de CARIRIACÚ, SERRA de PEREIRO et bord de mer près d'ARACATI) couvrant environ 5000 km².

La carte géologique et les études entreprises par les hydrogéologues permettent d'aborder facilement le second stade de division régionale. A part trois secteurs limités de terrains sédimentaires, à l'extrême Sud, au centre et à l'extrême Nord-Est du bassin, et couvrant une superficie réduite, les terrains antécambriens généralement imperméables occupent la totalité du bassin. Suivant la clé proposée dans la note générale, nous adopterons trois classes à perméabilité croissante :

- P₁ - Terrains imperméables sur socle antécambrien.
- P₂ - Terrains faiblement perméables avec nappe phréatique localisée : bassins d'ICO et d'IGUATÚ, zone des grès inférieurs au pied de la CHAPADA de ARARIPE au Sud, et basse vallée alluviale au Nord.
- P₃ - Terrains perméables : CHAPADA de ARARIPE au Sud, CHAPADA d'APODI au Nord et dunes côtières.

La subdivision à partir des caractéristiques du relief a été opérée sur une carte au 1/500 000^e avec courbes de niveau figuratives équidistantes de 100 m. L'ensemble du bassin a été analysé en procédant par groupes hydrographiques de 300 à 500 km² environ, sans tenir compte des fleuves plus importants.

On a appliqué les règles proposées dans la note générale qui ont permis de différencier 4 classes de relief à partir de limites de la pente moyenne du bassin établies pour 500 km² :

- R₁ - Pentes très faibles inférieures à 1,25 m/km
- R₂ - Pentes faibles entre 1,25 et 2,5 m/km
- R₃ - Pentes modérées entre 2,5 et 5 m/km
- R₄ - Pentes assez fortes entre 5 et 12,5 m/km

Nous n'avons pas introduit d'autre discrimination, la végétation de la quasi-totalité du bassin nous paraissant ressortir de la classe 5 de la note générale : tantôt savane clairsemée d'épineux (caatinga), tantôt cultures ne protégeant pas efficacement le sol en saison pluvieuse.

Il est à noter cependant que la végétation assez dense et relativement protégée des CHAPADAS de ARARIPE et d'APODI pourrait se situer soit en classe 3, soit en classe 4, et accroître ainsi la consommation par évapotranspiration.

Les différentes limites de classes de climat, de perméabilité et de relief, ont été tracées sur une carte au 1/1 000 000^e ; la conjugaison des facteurs H₁ à H₃, P₁ à P₃ et R₁ à R₄, fait apparaître plusieurs groupements distincts, par association de trois facteurs. On en compte 18 formant 33 secteurs géographiques différents. Nous les avons récapitulés dans le tableau suivant.

Ces groupements couvrent des aspects hydrologiques très variables, depuis l'association P₃. R₁ qui représente des zones plates sans écoulement superficiel où l'infiltration alimente les nappes, jusqu'à P₁ . R₄ qui constitue, pour le bassin du JAGUARIBE, le maximum d'aptitude au ruissellement.

Il est important d'avoir présents à l'esprit les points suivants avant de vouloir utiliser cet essai cartographique :

- a) - dans notre découpage géographique, nous avons éliminé tous les micro-détails pour retenir les options essentielles ;
- b) - la présence de 18 groupements n'exclut pas a priori la possibilité, pour certaines caractéristiques de l'écoulement, d'une réponse identique de plusieurs groupements;
- c) - entre l'essai préalable d'une individualisation des régions hydrologiques homogènes et la détermination des caractéristiques quantitatives des régimes de chaque région à partir d'études ponctuelles, il y a un espace encore mal connu qu'il serait maladroit de vouloir franchir trop vite. Toute tentative de généralisation d'études sur bassins représentatifs faites sur un groupement déterminé à l'ensemble de la surface couverte par ce groupement comme à un autre groupement voisin ne peut être réalisée que par un hydrologue averti.

Il n'en reste pas moins vrai que ce travail clarifie la situation et ouvre des perspectives encourageantes pour l'établissement de normes régionales d'alimentation et d'exploitation de petites retenues d'eau superficielle.

Dans le bassin du JAGUARIBE, les études sur bassins représentatifs ont porté sur deux groupements :

- H₃ . P₂ . R₄ à partir des bassins du CARIRI dont les données pourront être vraisemblablement employées, après adaptation, pour tous les groupements de P₂ avec R₃ ou R₄ , quel que soit H.

GROUPEMENTS HYDROLOGIQUES HOMOGENES

- 1 - H3 - P3 - R1 Dunes d'ARACATI - Est de La Chapada d'ARARIPE
 - 2 - H3 - P2 - R3 Est de MILAGRES
 - 3 - H3 - P2 - R4 Est du CARIRI
 - 4 - H3 - P1 - R3 Sud d'AURORA
 - 5 - H3 - P1 - R4 Serras de CARIRIACÚ et de PEREIRO
-
- 6 - H2 - P3 - R1 Centre de la Chapada de ARARIPE - Chapada d'APODI
 - 7 - H2 - P2 - R1 Basse Vallée du JAGUARIBE
 - 8 - H2 - P2 - P3 Bassin d'IGUATÚ et d'ICÓ
 - 9 - H2 - P2 - R4 Nord d'ARARIPE - Sud de JATI - Bande de JARDIM à MAURITI
 - 10 - H2 - P1 - R1 Bas BANABUIÚ et Bas PALHANO
 - 11 - H2 - P1 - R2 Bande de QUIXERAMOBIM à SOLONOPOLIE et ORÓS - Bas Figueireido Haut-Sitia - Nord de S.A. de Russas.
 - 12 - H2 - P1 - R3 Région de Lavras, entre BASTIOES et JAGUARIBE, bande d'IGUATÚ à SENADOR POMPEU, BOA VIAGEM, et CUSTODIO - Haut PALHANO.
 - 13 - H2 - P1 - R4 Région de JATI - Régions d'ASSARE, AIUABA puis bande de SABOETIRO à MOMBAÇA - Extrême Nord-Ouest du bassin - Bande de l'Est d'ICÓ au Nord de JAGUARIBE
-
- 14 - H1 - P3 - R1 Extrême Ouest de la Chapada de ARARIPE
 - 15 - H1 - P2 - R3 Sud de CAMPO SALES
 - 16 - H1 - P1 - R1 Sud-Est de TAÚA
 - 17 - H1 - P1 - R3 Campo Sales - Haut JAGUARIBE amont d'ARNEIROZ
 - 18 - H1 - P1 - R4 Région d'IPUEIRINHAS à PARAMBÚ

- H₂ . P₁ . R₁ à partir des bassins de JUATAMA dont les données pourront être utilisées pour les groupements de P₁ avec R₁ et R₂ quel que soit H. Une étude de bassin représentatif sur groupement P₁-R₃ ou P₁-R₄ permettrait de combler une lacune (fort ruissellement) et de couvrir, avec les études déjà entreprises, la quasi-totalité du bassin du JAGUARIBE, aux exceptions près (CHAPADAS de type P₃-R₁) pour lesquelles l'étude du seul bassin en surface ne peut apporter des renseignements suffisants.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- ROCHE M. - "Hydrologie de surface" GAUTHIER-VILLARS,
éditeurs à PARIS, 1963.
- AUVRAY C. - "Estimation des débits de Comité Inter-Etats
crue décennaux en régime d'Etudes Hydrauliques -
tropical" Congrès de MONROVIA, 1962.
- WISLER C.O. et - "Hydrology" John WILEY and Sons
BRATER E.F. NEW-YORK, 1949
- KRIMGOLD D.B. - "Quantitative Geomorphology in U.S. Dp^t. Agriculture
Soil and Water Conservation 1963.
Research"
- HIRSCH F. - "Analyse morphométrique des Rev. Géom. Dyn. 3,
réseaux fluviatiles - Applica- p. 97 - 106, 1962.
tion à la prévision des débits
d'eau".

