

Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux

Pierre DUBREUIL
Directeur de Recherches ORSTOM
Marc MORELL
Ingénieur hydrologue ORSTOM
Patrick SECHET
Ingénieur hydrologue ORSTOM

RÉSUMÉ

Cette étude s'inscrit dans le cadre général d'estimation quantitative du rôle du milieu physique des bassins versants sur le cycle de l'eau.

Elle procède, à partir de l'information collectée depuis 1951 sur plus de 240 bassins représentatifs, information triée, analysée et mise en fichiers pour un traitement automatique.

Pour faciliter l'analyse, ces bassins ont été groupés en classes homogènes, tout d'abord en termes de climat, puis en termes de végétation, enfin en termes de substratum géologiques. On dénote une étroite correspondance entre classes de climat et de végétation, et une indépendance nette entre classes de végétation et de géologie.

Ce découpage conduit à des classes homogènes dont l'effectif est parfois insuffisant pour une analyse significative en termes statistiques. Des associations entre classes voisines sont effectuées pour y pallier.

Il est alors procédé à une analyse du comportement des divers paramètres physiques et morphologiques retenus : distributions empiriques marginales et influence du classement précédent sur ces distributions.

Ensuite, les liaisons entre paramètres sont recherchées, pris deux à deux d'abord, puis tous ensemble ensuite. Certaines liaisons apparaissent très significatives entre indices de pente, entre paramètres du chevelu hydrographique (densité de drainage, fréquence et longueur des thalwegs d'ordre 1), moins significatives entre paramètres de hiérarchie du chevelu (rapport de longueur et de confluence). Ces liaisons sont explicitées en termes de régression. L'influence du milieu sur la signification de ces liaisons est ensuite discutée.

Enfin, les auteurs montrent les limites de l'étude, dépendantes des effectifs analysés et dégagent des groupes indépendants de paramètres susceptibles de servir à la compréhension hydrologique du milieu : longueur du rectangle équivalent (en surface), indice de pente global (en dénivelée spécifique), densité de drainage (ou fréquence, longueur des thalwegs d'ordre 1), rapport de confluence.

Mots-clés. — Complexe physique de bassin. Réseau hydrographique. Morphométrie quantitative. Intercomparaison.

ABSTRACT

This study is carried out in the frame work of the general research on the influence of environment factors upon the hydrological cycle.

The available information is collected from about 240 representatives basins operated between 1951 and 1970. Punched cards have been made with the criticized data to permit automatical processing.

To make the analysis easier, all the data were distributed into homogeneous classes in terms of climate, vegetation and geology. Classification from climate and vegetation are quite well linked but vegetative and geological classes are independant.

When size of classes is not enough to supply a significant statistical analysis, association between adjoining classes was made.

The analysis of behaviour is developed for every physical and morphological parameters with the help of empirical distributions, taking account of the above mentioned classification effect. Relationships between parameters are then investigated. Some of them appear as very strong between slope index, drainage pattern parameters (drainage density, frequency and length of 1st order thalwegs). The influence of environment, classification upon these relationships is then analyzed and discussed.

In matter of conclusion, the authors show the limits of the study, due to size of classes. They pointed out independant groups of parameters able to explain the hydrological behaviour of the environment : lenght of equivalent rectangle (or basin area) global slope index (or specific gradient), drainage density (or frequency and lenght of 1st order thalwegs), bifurcation ratio.

Key words. — *Physical complex of basin. Drainage pattern. Quantitative morphometry. Intercomparison.*

Le milieu géographique d'un bassin versant est très complexe. Il est néanmoins possible de le représenter par des caractères numériques en nombre limité. Nous avons déjà en 1966 tenté une telle représentation paramétrique du milieu d'un bassin versant en nous limitant aux seuls caractères physiques et morphologiques [1]. Cette représentation peut paraître insuffisante et étriquée à un géographe ou à un géomorphologue plus sensible aux caractères globaux et évolutifs des paysages. Il n'est cependant pas exclu qu'une analyse des caractères physiques et morphologiques puisse offrir à ces spécialistes quelques confirmations d'ordre statistique aux analyses déductives qu'ils pratiquent. Ainsi une telle analyse pourrait-elle mettre en évidence pour certains caractères leurs valeurs propres et leurs interactions dans un milieu géographique homogène, comme elle pourrait déceler l'influence quantitative sur ces mêmes caractères du passage d'un milieu à un autre (de la forêt à la savane par exemple).

Pour l'hydrologue, l'étude du comportement et des interactions des paramètres physiques et morphologiques est à la fois un appendice et un jalon sur la voie de la synthèse géographique et de l'extrapolation des données hydrologiques à des bassins versants non observés. Nous avons déjà en 1970 longuement décrit le cheminement intellectuel justifiant cette analyse du comportement des paramètres du milieu [2]. L'objectif est de dégager des relations entre variables hydrologiques et paramètres du milieu à l'aide d'observations conjointes (synthèse) afin d'estimer les premières par la seule connaissance des seconds (extrapolation) pour des bassins n'ayant pas fait l'objet d'observations hydrologiques.

Un tel travail requiert une information abondante. Nous la trouvons dans les données de base des bassins représentatifs et expérimentaux exploités par l'ORSTOM depuis 1951 [3].

La synthèse précédente, à partir de ces données, est inscrite au programme de recherches du Service hydrologique de l'ORSTOM depuis plusieurs années.

Elle est fortement avancée et diverses relations « hydrologie-milieu » ont été dégagées et feront l'objet d'une publication dans un proche avenir.

Comme il avait déjà été dit [2], la recherche de ces relations nécessitait l'emploi de paramètres physiques indépendants et dont le comportement ne s'éloignerait pas trop de celui d'un échantillon normalement distribué. Les premiers résultats de l'analyse de comportement avait alors été mentionnés.

L'objectif de la présente publication est de décrire complètement les résultats de l'analyse de comportement des paramètres physiques et morphologiques et de mettre en relief les interactions et les indépendances les plus manifestes.

Le plan suivi s'organise ainsi :

- présentation de l'information utilisée, répartition en classes et groupes homogènes,
- comportement spécifique des divers paramètres,
- recherche des interactions par régressions simples, puis multiples.

1. UTILISATION DU FICHER DES BASSINS REPRÉSENTATIFS

1.1. L'INFORMATION DISPONIBLE

Le nombre de bassins représentatifs et expérimentaux ayant fait l'objet de recherches hydrologiques à l'ORSTOM (soit directement, soit en collaboration avec d'autres organismes) est très élevé et il continue à croître puisque l'ORSTOM exploite actuellement en 1974 quatorze ensembles de bassins des deux types. Dans ces conditions, les analyses de comportement des paramètres du milieu comme les analyses factorielles des caractères hydrologiques ne peuvent se concevoir à partir d'un simple recueil de données de base. La mise en fichiers et l'exploitation systématique de ces données en traitement automatique s'impose.

Une notable part des questions relatives à l'élaboration et à l'utilisation de ces fichiers a déjà été exposée dans une publication de 1971 [4]. La carte contenant l'information sur les paramètres physiques et morphologiques y était, entre autres, décrite en détail.

Depuis, les autres informations relatives au milieu géographique des bassins versants ont été introduites sur trois types de cartes comportant pour l'une la géologie, pour l'autre les sols, pour la dernière le climat et la végétation.

L'ensemble de ces cartes du milieu associé à celui des cartes d'identification et signalétique de bassin constitue un premier fichier des bassins représentatifs et expérimentaux, B.R.E.

Ce fichier mis régulièrement à jour chaque année permet de trier et de classer les bassins selon diverses rubriques, au choix, correspondant au climat, à la végétation ou à la géologie par exemple (cf. 1.2.).

Au début de cette étude du comportement des paramètres physiques, le fichier contenait des informations relatives à 241 bassins. Ceux-ci correspondent souvent à des bassins voisins faisant partie d'un même ensemble (plus de 100 ensembles au total). Géographiquement, ils occupent surtout les régions intertropicales et sahélienne — ou semi-aride — du continent africain : 133 bassins dans les Etats de l'Afrique de l'Ouest et 83 dans ceux du Cameroun et de l'Afrique Centrale. A côté de ce sous-ensemble majoritaire, on compte 25 bassins provenant soit de Madagascar, soit de la France d'outre-mer, soit du Brésil.

Bien entendu, l'étude du comportement des paramètres physiques du milieu a tout d'abord porté sur l'ensemble de l'échantillon dont l'effectif notable (241 bassins) était a priori garant de la stabilité des résultats qui seraient dégagés.

On a ensuite estimé que certains comportements ou certaines interactions pouvaient rester masqués dans un ensemble aussi vaste et hétérogène. Il est apparu souhaitable de constituer des classes homogènes en termes de milieu afin de préciser l'analyse globale. La classification a porté sur le climat, la végétation et la géologie. Pour la subdivision en classes on s'est efforcé de ne pas aller trop loin afin de garder des échantillons de grandeur suffisante pour l'analyse statistique.

Ceci nous a conduit à un nombre de classes peut-être trop restreint aux yeux des spécialistes de la météorologie, de la botanique et de la géologie. Nous pensons néanmoins qu'il suffit à définir des milieux homogènes, non pas en eux-mêmes mais en ce qui concerne leur influence sur le régime hydrologique.

1.2. RÉPARTITION EN CLASSES ET GROUPES HOMOGÈNES

Alors que le fichier des BRE contient dix unités principales de climat qui peuvent être subdivisées en variantes (telle que la variante de montagne ou celle à pluviosité anormalement élevée...), pour l'étude du comportement des paramètres du milieu, on s'est contenté de 5 classes de climat :

- le climat équatorial (pur et de transition) défini par l'existence de deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches, une hauteur annuelle de pluie supérieure à 1 000 mm et au moins 8 mois recevant en moyenne plus de 50 mm de pluie,
- le climat tropical de transition caractérisé par une seule saison pluvieuse d'au moins 6 mois et une saison sèche, 6 à 7 mois recevant en moyenne plus de 50 mm de pluie et un total annuel de précipitations généralement supérieure à 1 000 mm,
- le climat tropical pur dont la saison pluvieuse unique ne dépasse pas 6 mois, dont la hauteur mensuelle de pluies excède en moyenne 50 mm durant 5 à 6 mois et dont le total annuel de pluies s'inscrit entre 700 et 1 000 mm,
- le climat tropical semi-aride caractérisé par 3 ou 4 mois de pluies dépassant 50 mm et une hauteur annuelle de pluie entre 400 et 700 mm,;
- le climat semi-aride défini par une pluviosité annuelle moyenne de 100 à 400 mm et la présence en moyenne de 1 à 2 mois recevant plus de 50 mm de pluie.

Dans certaines zones d'extension limitées situées soit en altitude soit en bordure de mer, certaines caractéristiques du climat peuvent s'écarter quelque peu des références moyennes de la classification.

En ce qui concerne la végétation, il faut tout d'abord dire qu'il vaudrait mieux parler d'occupation des sols, celle-ci pouvant être naturelle ou artificielle. Dans le premier cas, on aura soit une roche affleurante (sol et végétation pratiquement inexistant), soit une végétation naturelle. Dans le second cas, on aura soit des cultures, soit une zone urbaine.

Dans les régions semi-arides et intertropicales étudiées, il se trouve que la mise en culture est assez peu répandue (culture extensive dominante) et que le choix des bassins représentatifs s'est souvent fait en évitant les régions très cultivées (sauf cas particuliers). C'est pourquoi les bassins ont été classés par type de végétation naturelle qu'ils soient ou non cultivés, l'expression « végétation naturelle » désignant à la fois celle qui précède les premiers défrichements de l'homme et celle qui se rétablit en période de jachère de longue durée — végétation souvent qualifiée de secondaire ou de secondarisée par opposition à la végétation primaire non violée.

Alors que le fichier des BRE contient vingt unités de végétation ou d'occupation des sols (cultures exclues), on a ici seulement retenu 7 classes dont 5 relatives à des types de végétation :

- la forêt qu'elle soit dense ou claire, sempervirente, semi-décidue ou décidue,
- la savane boisée ou arborée, c'est-à-dire composée d'arbres assez denses sur une strate herbacée dépassant 80 cm de haut,
- la savane arbustive dans laquelle les arbustes se combinent à la strate herbacée précédente,
- la steppe arbustive ou non dans laquelle la strate herbacée n'atteint pas 80 cm de haut et où les arbustes sont tantôt inermes tantôt épineux,
- la prairie, qu'elle soit savane ou marécage mais sans arbre ni arbuste, est une formation herbacée dense,
- l'affleurement rocheux des zones semi-arides sans sol développé,
- la zone urbaine.

Le tableau I représente le tableau de contingence entre classes de climat et classes de végétation.

TABLEAU I
TABLEAU DE CONTINGENCE CLIMAT - VÉGÉTATION

Végétation	Climat					Total
	équatorial	tropical de transition	tropical pur	tropical semi-aride	semi-aride	
Forêt	27	9 (1)				36 (1)
Savane boisée, arborée	12 (2)	52 (8)	8 (3)			72 (13)
Savane arbustive		5	42 (1)			47 (1)
Prairie	4 (2)	9	3	1		17 (2)
Steppe (arbustive ou non)				38 (6)	18	56 (6)
Zones rocheuses					5	5
Zones urbaines	5 (2)			3		8 (2)
Total	48 (6)	75 (9)	53 (4)	42 (6)	23	241 (25)

Entre parenthèses : bassins cultivés à plus de 50%.

On remarque tout d'abord que selon l'un ou l'autre des systèmes de classement, les effectifs de la majorité des classes sont assez élevés pour en permettre l'étude séparée. Seules les classes de zones rocheuses et de zones urbaines sont trop peu fournies (effectifs inférieurs à 10) ; la classe « prairie » est également un peu faible (effectif de 17).

On remarque ensuite que la correspondance entre les classes de climat et de végétation est très bonne. Plusieurs associations sont très nettes :

- forêt et climat tropical,
- savane boisée ou arborée et climat tropical de transition,
- savane arbustive et climat tropical pur,
- steppe arbustive et climats tropical semi-aride et semi-aride.

Il n'y a là rien d'étonnant puisque ces classes de végétation correspondent aux unités naturelles en équilibre avec le climat, c'est-à-dire aux végétations climatiques.

On notera à ce propos que la prairie est un type de végétation relativement indépendant du climat.

Bien entendu, malgré la netteté des quatre associations précédentes, elles ne peuvent être sans bavures, étant donné que le passage d'une classe à l'autre que ce soit en termes de climat ou de végétation s'effectue graduellement.

C'est pourquoi dans les analyses factorielles envisagées le découpage de l'ensemble des données se fera-t-il tantôt par classes de climat ou de végétation, tantôt par groupes homogènes correspondant plus ou moins aux associations précédentes. Alors que celles-ci sont matérialisées tableau I par un carré du tableau de contingence, les groupes pourront représenter plusieurs carrés voisins. Ainsi en est-il du groupe « forêt et savane boisée » (6 carrés en haut et à gauche) ou du groupe « savanes arborée et arbustive sous climats tropical pur et de transition » (4 carrés) ou enfin du groupe « steppe et zones rocheuses sous climats semi-arides » (4 carrés).

On achèvera l'examen du tableau I en remarquant que les bassins fortement cultivés — c'est-à-dire sur plus de 50% de leur superficie — ne représente que 10% de l'effectif global et qu'ils se situent surtout en savane boisée (sous climat tropical de transition) et en steppe (sous climat tropical semi-aride) sans que cela veuille dire que ces secteurs soient les seuls très cultivés, le choix de la plupart des bassins ayant été prémédité.

La dernière classification a porté sur la géologie des bassins. Le problème est évidemment plus complexe, ne serait-ce qu'en considérant le grand nombre de formations géologiques susceptibles d'être rencontrées dans la nature. Rien que pour les régions concernées par les bassins de l'ORSTOM, il a fallu codifier 34 formations géologiques dans le fichier.

Pour l'analyse qui nous intéresse ici, on a seulement retenu la formation géologique principale de chaque bassin (celle qui occupe la plus grande superficie) bien que près du tiers des bassins comporte deux formations géologiques et environ 15% trois formations. En réalité cette apparente complexité des substratums des bassins n'est pas trop gênante ; en effet, dans la plupart des cas, il s'agit d'une même roche dont les types d'altération diffèrent (cas du granite en boules et en arènes).

En outre, à peine 10% des bassins ont une formation géologique principale dont la part d'occupation de surface soit inférieure à 75%.

D'autre part, pour aboutir à des classes à effectifs suffisants, on a regroupé nombre de formations géologiques en grandes familles lithologiques. Ainsi la classification ne retient-elle que 6 classes :

- la classe des granites, incluant aussi diorites, syénites, gabbros, péridorites et gneiss,
- la classe des roches volcaniques incluant rhyolites, trachytes, dolérites, basaltes, laves et cendres volcaniques,
- la classe des alluvions, sables, conglomérats et molasses,
- la classe des schistes incluant aussi micaschistes, amphibolites, argiles, latérites et bauxites,
- la classe des grès et quartzites,
- la classe des calcaires incluant aussi les marnes, craies, tufs, dolomies et gypses.

Des subdivisions dans ces classes seront introduites ultérieurement si l'analyse en montre le besoin.

Le tableau II représente le tableau de contingence entre classes de végétation et de géologie.

TABLEAU II
TABLEAU DE CONTINGENCE VÉGÉTATION - GÉOLOGIE

	Végétation					Total
	forêt	savane boisée	savane arbustive	prairie	steppe et zones rocheuses	
Granites	18	47	31	5	22	123
Schistes	13	13	6	1	12	45
Grès	2	6	7	7	21	43
Roches volcaniques	2	2	3	2		9
Calcaires					3	3
Alluvions	1	4		2	3	10
Total	36	72	47	17	61	233

N.B. — Les huit bassins de zone urbaine n'ont pas été introduits dans le tableau.

On y remarque tout d'abord une forte disproportion entre les effectifs des classes de géologie puisque seules celles de granites, de schistes et de grès sont bien pourvues. Ceci est inhérent à la nature des formations géologiques dominantes dans la région intertropicale africaine où se situent plus de 90% des bassins considérés.

On y remarque ensuite que les deux classifications dénotent une indépendance à peu près générale.

Un examen plus attentif confirme cette première constatation. En effet, si l'on compare la distribution conditionnelle et la distribution marginale de chaque principale classe de géologie d'après la répartition globale des bassins en classes de végétation, on ne relève pas de distorsion systématique si ce n'est une légère tendance sous steppe et roches nues de la classe des granites à être moins abondante et de celle des grès à être plus abondante (répartition conditionnelle) que l'effectif global (répartition marginale). Ceci découle encore des positions géographiques dominantes relatives des granites et des grès sur le continent ouest-africain.

Enfin, si l'on voulait constituer des groupes homogènes on voit qu'a priori seuls les granites en offrent la possibilité pour au moins 2, sinon 3 types de végétation (effectif supérieur à 20), et les grès pour un seul, à moins que l'on associe dans de tels groupements plusieurs classes de végétation (cas des schistes en forêt et savane boisée).

L'analyse sur groupes homogènes de géologie-végétation ne sera donc tentée que pour des cas particuliers présentant a priori une tendance à l'obtention de résultats significatifs.

*
* *

En matière de conclusion, on notera que les bassins représentatifs de l'ORSTOM ne constituent pas un échantillon totalement aléatoire des bassins versants des régions semi-arides et intertropicales du globe.

Les restrictions sont surtout du domaine géographique — continent africain dominant — et du côté des surfaces de bassins réduites par le fait même de la méthodologie des BRE à des valeurs modérées. Ces restrictions somme toute mineures, l'échantillon, par son ampleur, reste à notre avis assez caractéristique du milieu considéré.

2. COMPORTEMENT DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES

2.1. CHOIX DES PARAMÈTRES ÉTUDIÉS

De l'ensemble des paramètres physiques et morphologiques utilisés dans le fichier des BRE, il a été constitué deux sous-ensembles :

- le premier contenant les paramètres mesurables représentant des variables continues ou assimilables et sur lesquels des essais de regression peuvent être tentés,
- le second qui concerne les paramètres représentant des variables discrètes telles que la classe de relief ou représentant des indices arbitraires de qualité tels que l'aspect du réseau hydrographique, la nature du lit principal. Sur ce second groupe on ne peut effectuer que des études de contingence.

On a évidemment considéré avec plus de minutie le sous-ensemble des paramètres continus. En voici la liste :

A	superficie du bassin en kilomètres carrés
Kc	indice de compacité, sans dimension
L	longueur du rectangle équivalent en kilomètre
Ip	indice de pente de Roche, sans dimension
Ig	indice global de pente en m/km
Dd	densité de drainage en km/km ²
Rc	rapport de confluence, sans dimension
Rl	rapport de longueur, sans dimension
\bar{l}_1	longueur moyenne des thalwegs d'ordre 1, en kilomètre
F ₁	fréquence des thalwegs d'ordre 1, sans dimension.

On aurait pu y ajouter l'altitude moyenne du bassin, mais comme il s'agit plus d'une caractéristique d'état dont l'influence ne se fait guère sentir qu'au niveau du climat (pluviosité, températures), elle n'a pas été systématiquement analysée.

Les effectifs globaux des échantillons de paramètres, comme les effectifs de classes ne sont pas identiques pour tous les paramètres.

En effet, certains paramètres, d'une part, n'ont pas pu être calculés dans certains bassins (pas d'indice de pente s'il n'y a pas de carte altimétrique, pas de densité de drainage ni de longueur et fréquence des thalwegs d'ordre 1 en l'absence de photographies aériennes, etc.), et, d'autre part, n'ont pas lieu d'être calculés car sans signification (cas des paramètres morphologiques pour des bassins élémentaires à chevelu hydrographique négligeable).

En outre, l'analyse du comportement a demandé près de deux années au cours desquelles le contenu du fichier des BRE a crû ; ainsi arrive-t-on pour des études récentes menées en 1973-74 à plus de 241 bassins, contenu du fichier en 1972.

On s'est efforcé de procéder aux analyses de comportement sur les effectifs les plus élevés, d'une part, et sur des effectifs identiques pour des paramètres assez liés entre eux (cf. 3) d'autre part.

2.2. DISTRIBUTIONS EMPIRIQUES

On a tout d'abord procédé à l'examen de la distribution empirique des effectifs globaux des principaux paramètres. Les renseignements intéressants issus de cet examen ont été groupés dans le tableau III.

TABLEAU III
DISTRIBUTION EMPIRIQUE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

Paramètre	Nombre de valeurs	Étendue empirique	Intervalle interdécile empirique	Mode D	Médiane	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation
Compacité (Kc)	252	1,03 - 1,94	1,12 - 1,47	1,18	1,24	1,27	0,145	0,11
Indice de pente (Ip)	207	0,04 - 0,49	0,07 - 0,22	0,08	0,12	0,14	0,08	0,57
Densité de drainage (Dd)	205	0,27 - 10,8	0,75 - 4,60	1,24	2,10	2,53	1,83	0,72
Fréquence (F ₁)	147	0,07 - 50	0,75 - 8,00	0 < D < 1,25)	2,37	4,10		
Longueur (\bar{l})	147	0,06 - 2,70	0,20 - 1,26	0,27	0,45	0,54	0,44	0,81
Rapport confluence (Rc)	131	2,20 - 6,35	3,40 - 4,75	4,03	4,03	4,03	0,64	0,16
Rapport longueur (Rl)	131	1,54 - 3,96	1,80 - 3,10	(1,93)	2,19	2,32	0,49	0,21
Surface (A)	252	0,02 - 5 600	1,40 - 360	(1 < D < 10)	25	115,9	409,2	3,54
Dénivelée spécifique (Ds)	250	3,30 - 790	19 - 155	(0 < D < 50)	(< 50)	85,7	118	1,37
Indice de pente (IC)	207	1,80 - 190	5 - 45			22,08	29,9	

N.B. — Entre parenthèses : valeurs du mode douteuses.

Il y a lieu de préciser que :

— l'étendue empirique est l'intervalle entre les deux valeurs extrêmes d'un échantillon,
— l'intervalle interdécile est celui qui, écartant aux deux extrémités de l'étendue 10% de l'effectif, contient 80% des valeurs observées,

— le mode ou dominante D a été estimé à partir de la relation $D = \bar{M} - 3(\bar{M} - Mc)$ dans laquelle \bar{M} et Mc sont respectivement la moyenne et la médiane, lorsque cela avait un sens évidemment.

Ces paramètres ont, pour la plupart, des domaines de variation bornés inférieurement à zéro (à 1 pour l'indice de compacité) ou sont simplement positifs et non nuls. En conséquence sur l'histogramme obtenu en classant un effectif en classes d'intervalles égaux (fig. 1), on constate que la distribution empirique est généralement unimodale, rarement normale, plus souvent à dissymétrie positive pouvant être accentuée au point que ladite distribution tende vers une forme en J ou exponentielle. Dans ce cas, on aura évidemment intérêt à remplacer la variable par son logarithme lors des études par régression. Il apparaît souhaitable de préciser les particularités de chacune de ces distributions empiriques de paramètres.

Surface

Ce n'est pas strictement une variable aléatoire puisque la dimension des bassins représentatifs est imposée par l'ampleur spatiale des précipitations et de ce fait généralement réduite dans les régions intertropicales. L'étendue de variation est très grande et la distribution très dissymétrique (tendance en J, mode non estimable simplement).

On note deux particularités intéressantes de la gamme des surfaces choisies :

- a) Elle constitue une distribution presque uniforme d'environ 40 valeurs par classes aux intervalles irréguliers suivants : 0-3, 3-10, 10-20, 20-50, 50-100, 100-500 km² si l'on fait abstraction de 12 valeurs supérieures à 500 km². Les dits intervalles ne sont pas purement gratuits puisqu'ils constituent des domaines dans lesquels le comportement hydrologique manifeste une certaine spécificité à un titre ou à un autre (formation des crues, occurrence d'événements unitaires...),
- b) Si l'on considère que la surface influe généralement sur l'évolution des variables hydrologiques par son logarithme, sa répartition en classes d'intervalles logarithmiques égaux (0,01-0,1, 0,1-1, 1-10, 10-100, 100-1 000, 1 000-10 000) apparaît unimodale et symétrique (environ 50% de l'effectif entre 10 et 100 km² et 90% entre 1 et 1 000 km²).

On peut donc conclure de cet examen de l'échantillon des surfaces que celles-ci sont particulièrement bien distribuées pour permettre une étude hydrologique entre 1 et 1 000 km² comme une étude de variation des autres paramètres du milieu dans la même gamme.

Compacité

L'indice de compacité toujours supérieur à 1 (bassin assimilable à un cercle) a une distribution unimodale à dissymétrie positive nette (fig. 1). L'échantillon est peu dispersé. Si l'on excepte 2 bassins urbains aux formes artificielles et 2 bassins des confins désertiques de l'est tchadien (longs thalwegs parallèles sans affluents qui s'achèvent en dépression d'épandage), l'étendue de variation se limite entre 1,03 et 1,63.

On mentionne au passage que le rectangle équivalent au bassin qui est d'autant plus allongé que l'indice de compacité est élevé a une longueur L_r égale à $f(K_c) A^{1/2}$.

La fonction $f(K_c)$ est égale à 1 pour $K_c = 1,12$ (bassin assimilable à un carré) et a fortiori pour les indices K_c plus petits ; elle croît ensuite avec K_c . Le paramètre L_r qui intègre l'effet de compacité dans la surface sera utilisé dans les analyses d'interaction et dans certaines relations hydrologie-milieu.

Indice de pente

L'indice de pente I_p de M. ROCHE est calculé à partir de la répartition hypsométrique du bassin ramenée dans le cadre du rectangle équivalent. L'échantillon a une étendue déjà notable (0,04 à 0,49) et suit comme K_c une répartition unimodale à dissymétrie positive nette (fig. 1).

Il n'a pas été jugé utile d'analyser la distribution empirique de l'indice global I_g qui est très étroitement lié à l'indice I_p (cf. chap. suivant). On rappelle ici que l'indice global I_g se calcule aisément en divisant la dénivelée utile par la longueur du rectangle équivalent, ladite dénivelée correspondant à l'intervalle contenant 90 % de la superficie du bassin sur la courbe hypsométrique, extrêmes exclus.

Comme on le précisera au chapitre suivant, ces indices I_p et I_g sont assez liés avec la surface des bassins, décroissants lorsqu'elle augmente. Cette liaison un peu gênante pour l'analyse de l'influence de la pente sur le régime hydrologique a conduit à introduire à cet effet un nouveau paramètre, la dénivelée spécifique D_s égale à $I_g \cdot A^{1/2}$. Cette dénivelée d'un calcul rapide et aisé avait été conçue à l'occasion d'études de planification de réseau hydrométrique [5]. Elle n'est plus, en effet, fonction que de la compacité K_c et de la dénivelée utile, citée à l'alinéa précédent : $D_s = f(K_c) \cdot Du$, ce qui en permet la détermination par abaque.

Cette variable est très dissymétrique et présente une distribution empirique d'aspect exponentielle (cf. fig. 2) ; près de 50% de l'effectif est dans la première classe de 0 à 50 m. Ceci n'est peut-être dû qu'à l'étendue considérable du paramètre qui ne permet pas un découpage en classes assez fin pour que l'intervalle 0-50 m puisse être subdivisé, ce qui pourrait faire apparaître un mode dans un intervalle ne partant pas de zéro.

Densité de drainage D_d

C'est la longueur totale des thalwegs du bassin ramené à l'unité de surface. Son équation de dimension est donc L^{-1} ; il eut fallu diviser ladite longueur par la racine carrée de la surface pour avoir une vraie densité, sans dimension. Quoiqu'il en soit, nous garderons et le nom et la formule tous deux consacrés par l'usage.

La densité de drainage est comparativement plus dispersée que l'indice de pente I_p : étendue empirique (en valeur relative 1 à 40 au lieu de 1 à 10) et coefficient de variation sont plus élevés. La distribution à dissymétrie positive paraît être plus aplatie qu'une distribution normale et la localisation du mode n'est pas évidente (contradiction entre le calcul et l'histogramme).

Fréquence F_1 des thalwegs d'ordre 1

C'est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre 1 par la surface du bassin. C'est évidemment un paramètre qui rend compte d'un effet de densité en nombre, certainement comparable à l'effet de densité en longueur que représente la densité de drainage. On verra d'ailleurs que F_1 et D_d sont assez étroitement liés (cf. chap. 3).

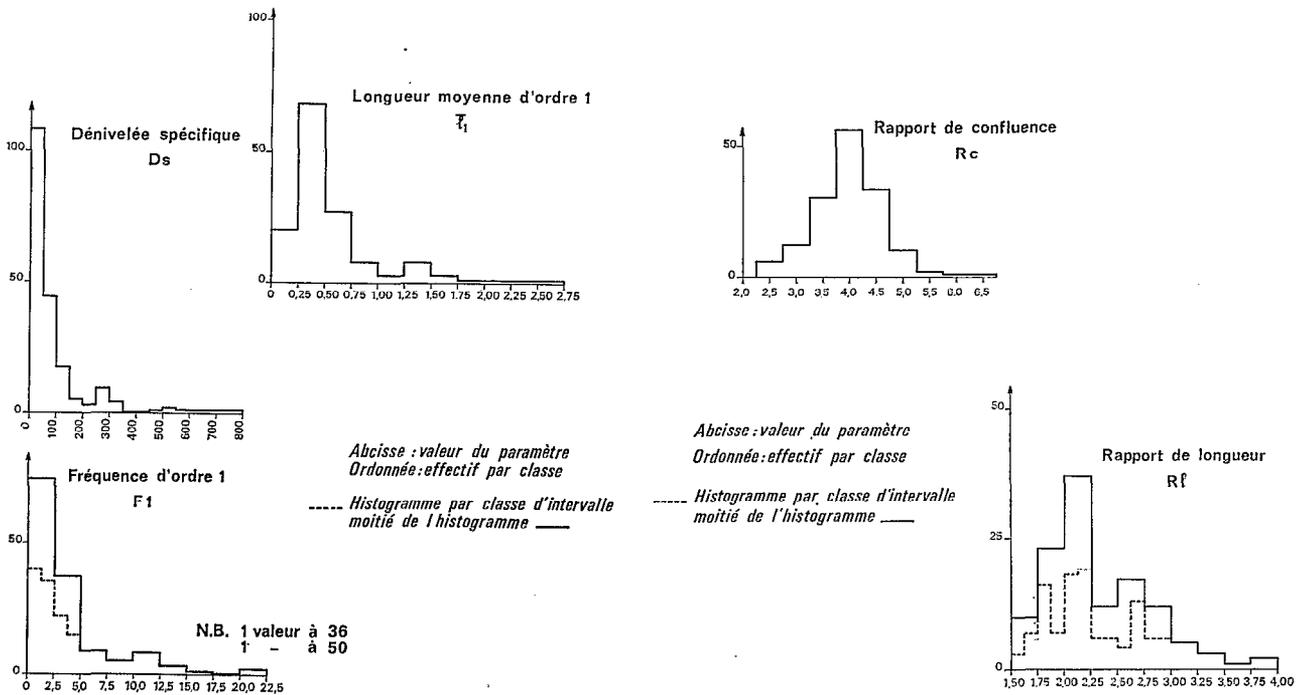
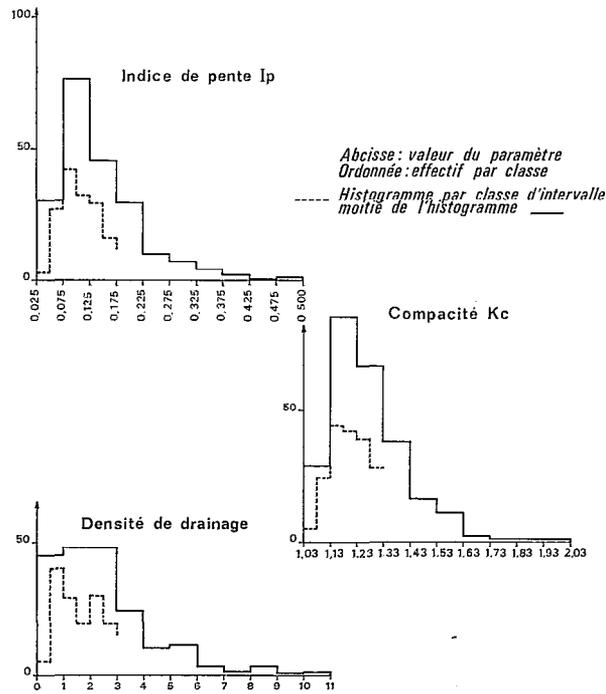


Fig. 1. — Fig. 2. — Fig. 3. — Distributions empiriques des paramètres physico-morphologiques

Ce paramètre a relativement une étendue empirique supérieure à celle de la densité de drainage (1 à 300 contre 1 à 50 environ (1)) ; il est encore plus dispersé et sa distribution empirique se rapproche d'une exponentielle. Il n'y a pas de mode aisément déterminable (contradiction entre calcul et histogramme).

C'est certainement l'un des paramètres les plus délicats à calculer car le décompte exact des thalwegs d'ordre 1 dépend de la bonne vision stéréoscopique de l'opérateur et de la qualité de la photographie aérienne. Et l'on sait par expérience que l'examen stéréoscopique peut être entaché d'erreurs opératoires fréquentes si l'on néglige les précautions de rigueur [1]. Des écarts aléatoires d'un bassin à un autre ne sont donc pas exclus, aussi faudra-t-il en tenir compte dans l'emploi ultérieur de ce paramètre. Il reste cependant intéressant car la grande étendue empirique le rend en pratique peu sensible (en valeur relative) à un écart absolu de calcul non négligeable.

Longueur moyenne \bar{l}_1 des thalwegs d'ordre 1

Comme le précédent ce paramètre dépend de l'établissement minutieux du chevelu hydrographique. Il est évidemment lié à F 1 et à Dd (cf. chap. 3). Malgré cela, il présente une bonne distribution empirique à dissymétrie positive et mode net. L'étendue empirique et la dispersion sont comparables à celles de la densité de drainage.

Rapport de confluence Rc

C'est le rapport entre le nombre de thalwegs de deux ordres voisins. On le détermine graphiquement puisque son logarithme est la pente de la droite d'ajustement du nombre de thalwegs (en logarithmes) à l'ordre de ces thalwegs.

Contrairement aux paramètres morphométriques précédents, son étendue et sa dispersion sont très faibles. Il n'est pas borné inférieurement (la droite précédente ne pouvant avoir une pente infinie) et est positif et non nul.

Autant qu'on puisse en juger sur l'échantillon disponible (fig. 3), le rapport de confluence a une distribution empirique s'approchant de la normalité.

Rapport de longueur R 1

C'est le rapport entre les longueurs moyennes de thalwegs d'ordre voisin que l'on peut déterminer, comme Rc, graphiquement puisque son logarithme est la pente de la droite $\log \bar{l}_x$ en fonction de x, qui est l'ordre des thalwegs.

L'étendue empirique est aussi faible que celle de Rc.

La distribution empirique, par contre, est loin d'être homogène. On peut l'assimiler à une distribution à dissymétrie positive mais le caractère unimodal est incertain. Selon la finesse du découpage en classes, l'histogramme (fig. 3) offre 1, 2 ou 3 modes possibles. On se contentera, ici sur le plan global, d'admettre que l'effectif est peut-être hétérogène, sans trancher sur l'existence ou l'absence d'un mode unique.

Remarque sur la dispersion des paramètres

Si l'on veut une bonne estimation de cette dispersion, on peut regarder l'intervalle interdécile (tableau III) qui ne tient pas compte des variations extrêmes des variables qui peuvent être dues à des phénomènes exceptionnels. Ces intervalles deviennent comparables si on les évalue en valeur relative soit en faisant le rapport du décile supérieur au décile inférieur (c'est le K 3 des modules d'hydrologie), soit en prenant l'intervalle réduit à la moyenne. On peut également considérer le coefficient de variation.

On peut ainsi grouper en 3 lots distincts les paramètres étudiés précédemment :

- a) Un groupe peu dispersé contenant l'indice de compacité Kc et les rapports de longueur et de confluence Rl et Rc dont les coefficients de variation sont inférieurs à 0,25 (rapport K 3 inférieur à 2) ;
- b) Un groupe moyennement dispersé contenant seulement l'indice de pente Ip, dont les coefficients de variation sont proches de 0,50 (K 3 de l'ordre de 3) ;
- c) Un groupe très dispersé contenant la dénivelée spécifique Ds, l'indice de pente global Ig, la densité de drainage Dd, la fréquence F1 et la longueur \bar{l}_1 (Cv supérieur à 0,50 et K 3 entre 6 et 10).

Pour les études d'interactions, on aura intérêt à utiliser le logarithme des paramètres très dispersés. D'un autre côté, la faiblesse de la dispersion de certains paramètres (1^{er} lot) peut les rendre inintéressants aussi bien au plan des interactions qu'à celui des relations « hydrologie-milieu ».

En effet, ces paramètres risquent alors de ne pas varier assez pour que leur variation puisse permettre d'expliquer celle d'un autre paramètre qu'il soit physico-morphologique ou hydrologique.

(1) En ne tenant pas compte de deux valeurs apparemment excessives (36 et 50).

2.3. EFFET DU MILIEU SUR LE COMPORTEMENT

2.3.1. Paramètres physiques mesurables

Il s'agit maintenant de regarder si les distributions empiriques précédentes qui caractérisent le comportement global des paramètres ne sont pas susceptibles d'être significativement modifiées si l'on considère les effectifs par classes homogènes de géologie ou de végétation.

Ceci revient à se demander si les paramètres physico-morphologiques de petits bassins versants intertropicaux peuvent être supposés faire partie de mêmes populations quelle que soit la classe de végétation ou de géologie à laquelle appartiennent les bassins.

Comme les échantillons par classes homogènes de végétation ou de géologie ne sont pas très grands (effectifs inférieurs à 50 sauf les granites, la savane boisée et la steppe arbustive) et que leurs distributions empiriques globales sont rarement normales, il est difficile de trancher nettement le dilemme.

On a appliqué, d'une part, le test du X^2 de PEARSON sur les distributions empiriques de fréquences, d'autre part, les tests de Fisher sur les comparaisons de moyennes et de variances en œuvrant soit sur la valeur des paramètres, soit sur le logarithme de celle-ci. Certaines valeurs de ces comparaisons sont groupées sur le tableau IV.

TABLEAU IV
INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION ET DE LA GÉOLOGIE SUR LES PARAMÈTRES PHYSIQUES

Classes	Effectif théorique	Compacité Kc		Pente Ip		Drainage Dd		F ₁		\bar{I}_1		Rc		Rl	
		m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
Ensemble	241	0,24	0,11	-2,08	0,50	2,53	1,83	0,86	1,21	-0,86	0,67	4,03	0,64	2,32	0,49
Forêt	36			-1,78	0,59	3,16	2,03	1,23	0,77	-0,88	0,30	4,28	0,69	2,38	0,38
Savane boisée	72			-2,07	0,44	2,11	1,85	0,23	1,32	-0,64	0,69	4,03	0,81	2,46	0,59
Savane arbustive	47			-2,15	0,48	2,52	2,09	0,42	1,31	-0,57	0,87	3,93	0,58	2,20	0,51
Steppe + roches	61			-2,28	0,50	2,42	0,93	1,11	0,75	-0,99	0,52	4,02	0,41	2,21	0,42
Granites	123	0,23	0,11	-2,06	0,49	2,77	2,15	0,99	1,22	-0,87	0,64	4,14	0,69	2,30	0,51
Schistes	45	0,21	0,09	-2,19	0,58	2,42	1,46	0,68	1,16	-0,88	0,71	3,93	0,62	2,22	0,30
Grès	43	0,25	0,12	-2,10	0,43	2,31	1,21	0,68	1,04	-0,78	0,67	3,99	0,45	2,26	0,38
Forme du paramètre		LOG		LOG		NAT		LOG		LOG		NAT		NAT	

N.B. — m et s sont respectivement la moyenne et l'écart-type de chaque échantillon.

Par mesure de prudence, on a décidé de ne pas rejeter l'hypothèse d'appartenance à une même population, si tous les tests n'étaient pas négatifs au seuil de probabilités 0,05. De la sorte, malgré les disparités apparentes entre les échantillons des divers paramètres rangés en classes de géologie et de végétation, on peut retenir l'appartenance à une même population.

On notera cependant que l'hétérogénéité la plus nette se manifeste sur la fréquence F_1 et la longueur \bar{I}_1 dont les échantillons sous forêt et steppe (zones rocheuses incluses) sont nettement moins dispersés qu'en savanes boisée et arbustive et nettement plus forts pour F_1 et plus faibles pour \bar{I}_1 en valeurs absolues. Un effet voisin mais moins net apparaît sur la densité de drainage liée à F_1 et \bar{I}_1 . On remarquera que l'hétérogénéité précédente s'estompe dans le classement géologique par suite de la contingence prononcée entre les deux classements.

En termes géomorphologiques, cela voudrait dire qu'il y a généralement en forêt et en steppe beaucoup plus de thalwegs d'ordre 1 et qu'ils sont plus courts qu'en savanes. Cela pourrait s'interpréter ainsi :

- en steppe et sur zones rocheuses, les terrains sont imperméables et mal protégés d'où la densité de petits thalwegs élémentaires,
- en forêt, l'abondance des précipitations favoriserait cette forte densité,
- en savanes la perméabilité des terrains serait très variable.

On voudra bien considérer l'« interprétation » émise ci-dessus plutôt comme l'engagement d'une analyse, d'une réflexion ou d'un débat à venir.

La dernière remarque sera pour constater que l'hétérogénéité apparente de l'échantillon global des rapports de longueur Rl ne trouve pas d'explication claire dans le découpage en classes homogènes de géologie et de végétation. On mettra donc plus raisonnablement cette hétérogénéité sur le compte du hasard, pour le moment.

2.3.2. Caractères qualitatifs

On s'est borné à examiner les deux plus importants caractères qualitatifs : l'aspect du chevelu hydrographique et la nature du lit principal.

L'examen a consisté en la comparaison des distributions empiriques conditionnelles, c'est-à-dire au sein d'une classe de végétation ou de géologie, à la distribution marginale, correspondant à l'échantillon global.

Tous les résultats ont été simplement présentés sous la forme de graphiques de distribution sur les figures 4, 4 bis et 5.

En ce qui concerne l'aspect du réseau hydrographique, on peut dire sur le caractère principal de celui-ci :

- a) que l'arête de poisson domine nettement (62,5%) les types à influence radiale pure ou mitigée ;
- b) que l'influence du milieu est réduite à une légère tendance à rencontrer un peu plus de chevelu radial sous forêt et savanes boisée ou arbustive et plus d'arête de poisson sous steppe (80%), mais que la nature géologique des terrains ne paraît pas avoir d'effet marqué.

Pour ce qui est du lit principal :

- a) le lit mineur net se manifeste un peu plus souvent en forêt (64%) qu'en steppe (45%) et sur grès (61%) que sur schistes (34%), la répartition marginale étant de 52% ;
- b) corollairement l'activité des lits majeurs et l'absence de lit mineur obéissent à des tendances opposées aux précédentes.

Mais aussi bien pour cette nature du lit que pour l'aspect du chevelu on ne peut vraiment affirmer une influence nette et significative du milieu.

3. LIAISONS ENTRE PARAMÈTRES PHYSICO-MORPHOLOGIQUES PRIS DEUX A DEUX

On a systématiquement pris chaque paramètre en le considérant comme variable dépendante de tous les autres paramètres pris un à un, et considérés alors comme variables explicatives. Ces régressions simples ont été traitées en utilisant tantôt le mode naturel tantôt le mode logarithmique pour les variables.

Ces liaisons entre paramètres ont été recherchées tout d'abord sur l'échantillon global, ensuite sur les sous-échantillons par classes homogènes de géologie et de végétation, bien entendu seulement si l'effectif en était suffisant. On va, comme pour le comportement intrinsèque des paramètres, traiter les deux cas successivement.

3.1. RÉGRESSIONS SIMPLES SUR L'ÉCHANTILLON GLOBAL

3.1.1. Importance des liaisons entre paramètres

Avec des effectifs globaux toujours supérieurs à 100 et parfois à 200, la liaison peut être statistiquement significative même avec un coefficient de corrélation faible, de l'ordre de 0,30 par exemple.

Il est important de dire tout de suite que, sans négliger les liaisons statistiquement significatives mais peu serrées, on ne porte ici un intérêt approfondi qu'aux liaisons qui apparaissent suffisamment serrées pour que l'on puisse convenir que deux paramètres sont nettement dépendants. Hormis l'intérêt intrinsèque ou physique de cette dépendance, on en retiendra la nécessité d'un choix ultérieur lors des analyses entre paramètres hydrologiques et paramètres du milieu afin de ne conserver comme explicatifs a priori que des paramètres physiques suffisamment indépendants.

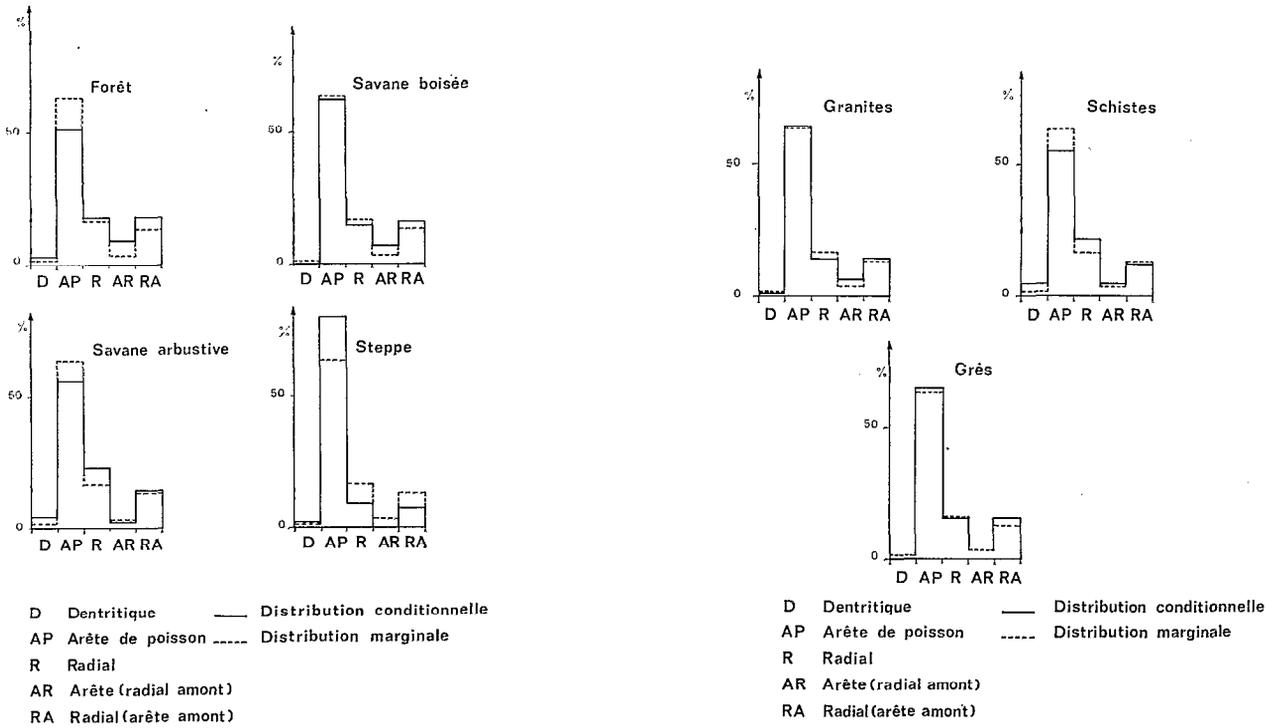


Fig. 4. — Fig. 4 bis. — Distributions des aspects d'un chevelu hydrographique

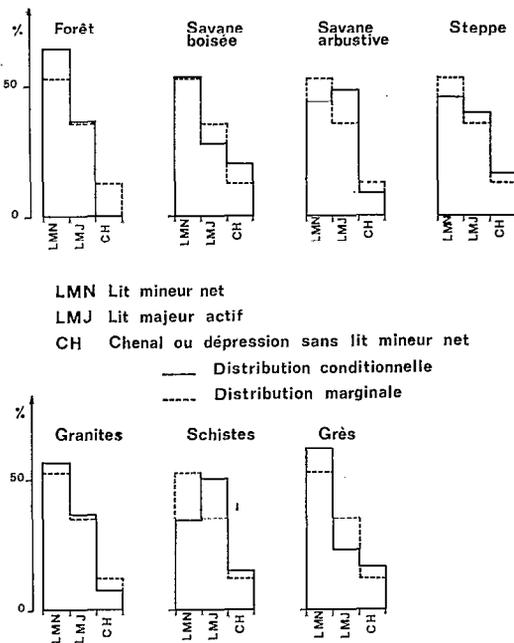


Fig. 5. — Distributions empiriques de la nature du lit

En première approximation, on peut admettre qu'il y a indépendance entre paramètres si le coefficient de corrélation est inférieur à 0,20 et que la dépendance est assez serrée si ce même coefficient dépasse 0,60.

Les résultats sont représentés sur les figures 6 à 6 ter. On y trouve chaque paramètre dépendant occuper le centre de circonférences dont les rayons sont d'autant plus grands que le coefficient de corrélation diminue ; chaque paramètre explicatif occupe la place de son influence, toujours selon le même rayon repère.

L'examen de ces figures nous montre les indépendances et dépendances nettes. Tout d'abord sur le plan des indépendances :

- les rapports de longueur R_l et de confluence R_c sont séparément indépendants de tous les autres paramètres, mais ne le sont pas l'un de l'autre (liaison très faible, $r = 0,34$),
- l'indice de compacité K_c est indépendant de la plupart des autres paramètres sauf évidemment de la longueur du rectangle équivalent dans le calcul de laquelle il intervient (liaison lâche, $r = 0,40$).

Ensuite, sur le plan des dépendances étroites, on peut noter :

- surface et longueur de rectangle équivalent (par définition) ; le coefficient de corrélation étant de 0,97, cela montre que la surface a un poids bien supérieur à la compacité dans l'élaboration de la longueur L_r ; ceci est dû aux distributions empiriques de ces paramètres, très étendue pour la surface et au contraire peu étendue pour la compacité (exemple typique d'influence d'échantillonnage).
- densité de drainage D_d , longueur et fréquence des thalwegs d'ordre un \bar{I}_1 et F_1 sont liés deux à deux et de manière assez serrée,
- l'indice de pente I_p n'est dépendant — de manière serrée — d'aucun autre paramètre, hormis les autres paramètres de pente (I_g et D_s) non considérés ici (cf. plus loin), I_p ayant été pris comme unique représentant de cette famille « pente » dans les figures 4 à 4 ter.

Ce premier examen visuel peut être repris et complété de façon plus rigoureuse si l'on se reporte au tableau V. Celui-ci contient tous les résultats des régressions : coefficient de corrélation précédé du signe de la liaison, nature des variables ayant fourni la meilleure liaison (N pour naturel et L pour logarithme neperien), caractère non significatif de la liaison au plan statistique (barre oblique) et existence d'une influence du milieu sur la liaison (symbole V.G.).

Par exemple, dans le carré $D_d - A$, on note une liaison significative négative ($r = -0,29$) entre les logarithmes des variables, liaison influencée par le milieu (végétation V ou/et géologie G).

Il semble bien que des éléments nouveaux fournis par ce tableau résident dans le comportement des paramètres de pente, entre eux et vis-à-vis des autres paramètres. Ces éléments nouveaux sont au nombre de trois.

3.1.2. Liaison entre indices de pente

L'indice I_p varie légèrement en sens inverse de la surface A et de la longueur L_r ($r = -0,49$, $\log - \log$) et dans le même sens que la densité de drainage ($r = +0,54$, variables naturelles) ; le fait que la pente diminue quand la surface croît et la constatation d'une augmentation de la densité de drainage avec la pente apparaissent physiquement compréhensibles ; l'influence du milieu sur ces liaisons fera l'objet d'un examen minutieux.

Les indices de pente I_p et I_g sont liés très étroitement ($r = +0,98$ entre logarithmes) à un point tel qu'il paraît possible de retenir une équation entre ces deux indices afin de passer de l'un à l'autre.

La régression a été faite dans les deux sens ; en comparant les écarts quadratiques moyens, réduits aux moyennes, on constate que la précision de l'estimation est meilleure dans le sens I_p en fonction de I_g .

L'équation de régression établie sur 207 couples de valeurs est :

$$\text{Log } I_p = 0,4784 \text{ Log } I_g - 3,2896$$

Elle peut s'écrire aussi :

$$I_p = 0,037 I_g^{0,478}$$

Il apparaît tentant de simplifier cette équation pour avoir la racine carrée de I_g , puissance aisée à calculer. L'équation finalement retenue est :

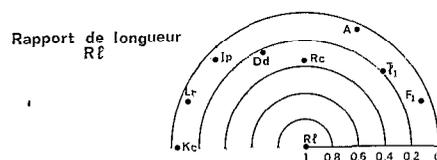
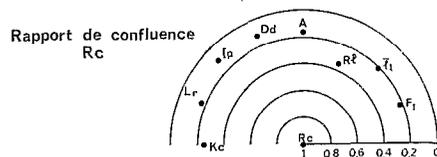
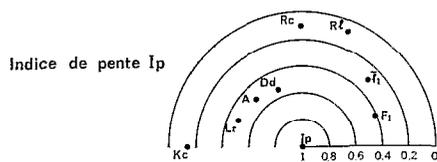
$$I_p = 0,035 I_g^{0,50} \quad (\text{équation 1})$$

qui peut également s'écrire :

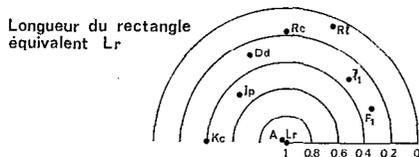
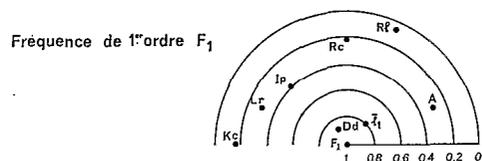
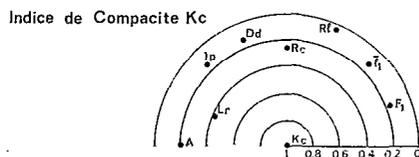
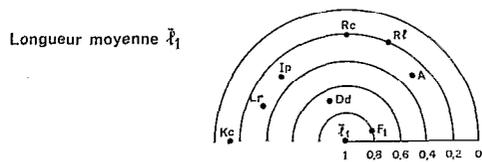
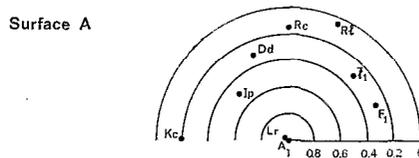
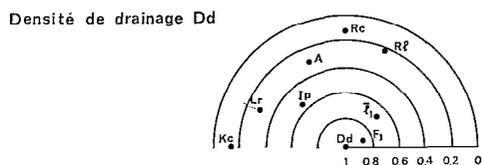
$$I_p = 1,10 \sqrt{\frac{I_g}{1\,000}}$$

On vérifie que cette équation simplifiée ne s'écarte de l'équation exacte que de $\pm 5\%$ au maximum.

L'écart-type résiduel de la régression étant de 0,097 sur $\text{Log } I_p$, on peut en déduire que l'intervalle de confiance à 80% de la valeur estimée de I_p d'après I_g correspond à une précision sur cette valeur comprise entre 5 et 8% sur l'étendue de variation de celle-ci.



Nota: les demi-circonférences sont tracées pour d'égales valeurs du coefficient de corrélation (portées en abscisses)



Nota: les demi-circonférences sont tracées pour d'égales valeurs du coefficient de corrélation (portées en abscisses)

Nota: les demi-circonférences sont tracées pour d'égales valeurs du coefficient de corrélation (portées en abscisses)

Fig. 6. — Fig. 6 bis. — Fig. 6 ter. — Regressions simples entre paramètres morpho-physiques

TABLEAU V
ANALYSE DES LIAISONS ENTRE LES PARAMÈTRES MORPHOLOGIQUES (ÉCHANTILLONS GLOBAUX)

VARIABLES EXPLICATIVES

	A	Kc	Lr	Ip	Dd	Rc	Rl	\bar{l}_1	F ₁	Ds
A										
Kc	+0,21 LL VG		+0,40 LL							
Lr	+0,97 LL	+0,40 LL								
Ip	-0,49 LL VG	-0,13 NN	-0,49 LL			-0,10 LL	-0,07 LL	-0,29 LL		
Dd	-0,29 LL VG	+0,12 NN	-0,28 NL	+0,54 NN		+0,12 NN	-0,22 LN	-0,67 LL	+0,87 LL	+0,34 NN
Rc	+0,15 LL	+0,25 NN	+0,17 LL				+0,34 NN			0,01 NN
Rl	-0,05 NN	+0,03 LL	-0,04 NN							-0,11 NN
\bar{l}_1	+0,32 LL	-0,11 NN	+0,33 LL			-0,20 LL	-0,18 NN			-0,10 NN
F ₁	-0,28 LL	+0,15 LL	-0,30 NL	+0,40 LL		+0,21 NN	-0,06 NN	-0,80 LL		-0,10 NN
IG				+0,98 LL						
Ds	0,06 NN	-0,03 NN	+0,14 NN	+0,66 NN						

On peut donc conclure qu'il suffit de déterminer I_g pour connaître I_p (opération plus aisée et plus précise que l'inverse) et qu'il suffit d'un seul indice de pente pour les analyses hydromorphologiques envisagées.

La dénivelée spécifique D_s produit de I_g par la racine carrée de la surface apparaît (tableau V) comme un paramètre indépendant de la plupart des autres. On note une liaison faible avec la densité de drainage ($r = +0,34$) et une liaison assez nette avec l'indice de pente évidemment. La dénivelée spécifique apparaît donc comme un substitut intéressant de l'indice de pente.

3.1.3. Liaisons entre Dd , F_1 et \bar{l}_1

L'existence de liaisons entre ces trois paramètres pris deux à deux n'est pas fortuite.

En effet, si l'on appelle L_1, L_2, L_3, \dots les longueurs totales des thalwegs d'ordre 1, 2, 3... dont les moyennes sont $\bar{l}_1, \bar{l}_2, \bar{l}_3, \dots$, et les nombres N_1, N_2, N_3, \dots , la densité de drainage

$$Dd = \frac{\sum_1^x Lx}{A}$$

peut s'écrire :

$$Dd = \frac{L_1}{A} + \frac{L_2}{A} + \frac{L_3}{A} + \dots \quad (\text{équation 2})$$

d'autre part, on a :

$$\bar{l}_1 = \frac{L_1}{N_1} \quad \text{et} \quad F_1 = \frac{N_1}{A}$$

En conséquence :

$$Dd = \bar{l}_1 F_1 + \bar{l}_2 F_2 + \bar{l}_3 F_3 + \dots \quad (\text{équation 3})$$

si l'on appelle F_2, F_3, \dots les fréquences des thalwegs d'ordre 2, 3...

Le premier terme de l'équation précédente explique la relation entre Dd , d'une part et \bar{l}_1 ou F_1 d'autre part, d'autant plus qu'il représente environ 50% de la valeur de Dd à lui seul.

On voit sur le tableau V que la meilleure liaison est entre Dd et F_1 ($r = +0,87$), la moins bonne entre Dd et \bar{l}_1 ($r = -0,67$).

$$\text{Log } Dd = 0,486 \text{ Log } F_1 + 2,515$$

$$\text{Log } Dd = -0,667 \text{ Log } \bar{l}_1 + 0,132$$

$$\text{Log } F_1 = -1,438 \text{ Log } \bar{l}_1 - 4,981$$

La densité de drainage est d'autant plus grande qu'il y a beaucoup de thalwegs élémentaires (F_1 grand) et qu'ils sont petits (\bar{l}_1 faible), ce qui est compatible et logique dans un bassin peu perméable à réseau hydrographique bien hiérarchisé.

Les liaisons précédentes sont cependant insuffisantes pour que l'on puisse envisager de les utiliser afin de substituer un paramètre à un autre (comme pour I_g et I_p) car l'examen des écarts-types résiduels montre que les estimations sont faites avec des précisions (correspondant à l'intervalle de confiance à 80%) atteignant 20-40% dans les meilleurs cas mais pouvant dépasser 100%.

Ces relations seront revues et améliorées lors des analyses par régressions multiples.

3.2. INFLUENCE DU MILIEU SUR LE DEGRÉ DE LIAISON

L'intérêt de rechercher si le milieu est influent sur le degré de liaison est au moins aussi grand que celui qui nous a fait regarder comment variait le comportement des paramètres avec les classes de végétation et de géologie.

3.2.1. Examen statistique

Il est évident que le milieu ne peut influencer sur les liaisons très étroites (surface, longueur rectangle ou $I_p - I_g$).

Au contraire, une liaison faible ou moyenne décelée sur l'échantillon global peut en réalité cacher une liaison plus serrée dans un milieu homogène, confondue avec l'absence de liaison, ou une liaison moindre, dans un autre milieu homogène.

Les effectifs disponibles par classes de végétation et de géologie étant, sauf exceptions, assez faibles, on a comme pour l'analyse du comportement (cf. 2.3.) été très prudent dans cette recherche de l'influence du milieu. On a admis qu'il ne pouvait pas y avoir présomption d'influence si les intervalles de confiance à 95% des coefficients de corrélation des diverses régressions n'étaient pas nettement distincts.

Nous allons passer en revue successivement les divers cas examinés.

a) *La liaison surface-compacité*, très lâche globalement ($r = 0,21$) mais significative, est en fait uniquement due aux bassins sous steppe [1], tandis que les bassins sur grès ne manifestent aucune liaison significative à l'encontre de ceux sur schistes et granites.

Ce n'est que dans la classe « steppe » (effectif de 54) que la compacité croît avec la surface ($r = 0,462$; IC de 0,21 à 0,65).

Près de 50% des bassins gréseux étant sous steppe et le tiers de la classe « steppe » sous grès (cf. tableau II), on conçoit que cette liaison puisse être encore plus marquée dans le milieu « granites et schistes sous steppe ».

b) *L'indice de pente I_p* est extrêmement sensible aux influences du milieu dans ses diverses liaisons.

Avec la surface, tout d'abord, le tableau suivant montre la variation du coefficient r et de son intervalle à 95%.

Milieu	Effectif	r	IC 95
Forêt	32	- 0,48	- 0,15 à - 0,72
Savane boisée	51	- 0,34	- 0,05 à - 0,57
Savane arbustive	49	- 0,78	- 0,64 à - 0,87
Steppe	40	- 0,84	- 0,71 à - 0,91
Granites	97	- 0,45	- 0,27 à - 0,59
Schistes	36	- 0,81	- 0,65 à - 0,90
Grès	40	- 0,43	- 0,13 à - 0,66
Ensemble	207	- 0,49	- 0,39 à - 0,58

Toutes ces régressions sont calculées entre logarithmes.

On décèle dans le tableau précédent que les classes de savanes arbustive, de steppe et de schistes auraient tendance à être significativement différentes des autres. On a constitué l'échantillon de 15 couples correspondant au milieu « Schistes sous savanes arbustive et steppe ». Il avoue un coefficient de corrélation de 0,94 que l'on aurait mauvaise grâce à ne pas considérer comme significativement différent des autres.

On a : $\text{Log } I_p = - 0,209 \text{ Log } A - 1,85$.

La figure 7 représente cette liaison. On y remarque l'étonnante répartition des couples presque uniforme

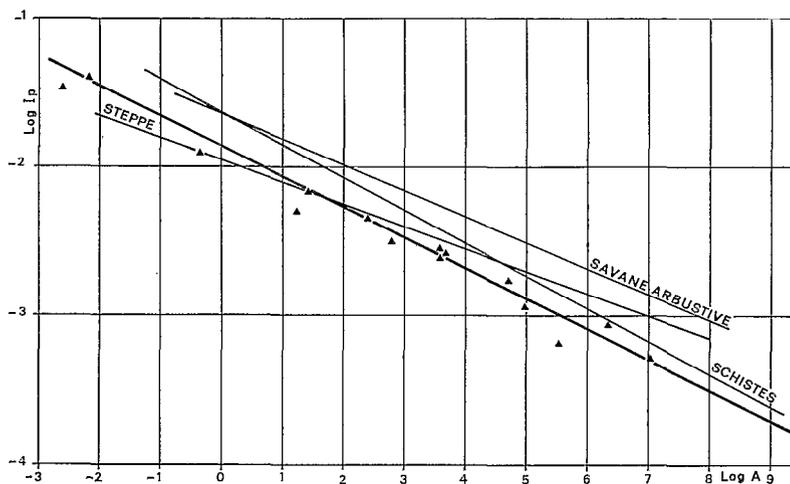


Fig. 7. — Indice de pente I_p et surface (bassins sur schistes, sous savane arbustive et steppe)

(1) Rappelons que, par souci de concision, on emploie le mot « steppe » pour désigner les classes de steppe arbustive, de steppe rase et d'affleurements rocheux.

le long de toute l'étendue empirique des deux paramètres : 0,04 à 0,24 pour I_p et de 0,1 à 1 000 km^2 pour A . La qualité de la liaison pourrait-elle n'être fortuitement due qu'à l'excellence de cette répartition ?

Avec la densité de drainage Dd à laquelle il est globalement lié ($r = +0,54$), l'indice de pente est sensible au milieu puisque cette liaison est en fait inexistante sous steppe et sur grès donc uniquement due aux autres classes, sans y être d'ailleurs plus nette. On notera que lorsqu'ils sont liés, I_p et Dd croissent de concert, en valeurs naturelles.

Enfin, avec les paramètres \bar{L}_1 et F_1 des thalwegs élémentaires, l'indice de pente accuse également une influence du milieu. Cette influence est évidemment du même ordre que celle relevée en comparant I_p et Dd . La liaison globale I_p/\bar{L}_1 , ou I_p/F_1 , est faible ($r < 0,40$), mais elle semble due uniquement aux classes sans végétation abondante (forêt et savanes boisée et arbustive) et à la classe sur granites puisqu'elle est non significative sous steppe et sur schistes et grès.

c) La densité de drainage est également sensible à l'influence du milieu quant à son degré de liaison avec les autres paramètres.

Tout d'abord la liaison avec la surface, très lâche avec l'échantillon global ($r = -0,28$), semble uniquement due à la savane arbustive et à la steppe d'une part, aux granites d'autre part, toutes les autres liaisons étant statistiquement non significatives (on notera que 2/3 des bassins sous savane arbustive sont sur granites).

Enfin, la liaison très lâche avec le rapport de longueur Rl ($r = 0,22$) semblerait également due uniquement aux classes sous savane boisée et sur granites (on notera que 2/3 des bassins sous savane boisée sont sur granites et que 38% des bassins sur granites sont sous savane boisée).

d) Les rapports de confluence et de longueur généralement indépendants sont un peu liés entre eux ($r = +0,34$). Cette liaison n'est pas fortuite. En effet, les formules de calcul de ces deux rapports sont les suivantes :

$$Rl = \frac{\bar{L}_x + 1}{\bar{L}_x} \quad Rc = \frac{N_x}{N_x + 1}$$

\bar{L}_x , N_x étant longueur moyenne et nombre de thalwegs d'ordre x .

En posant $L_x = N_x \bar{L}_x$, on peut écrire :

$$Rl = \frac{L_x + 1 \cdot N_x + 1}{L_x \cdot N_x} = Rc \cdot \frac{L_x + 1}{L_x}$$

Il n'est pas non plus inintéressant d'explicitier comment ces deux rapports peuvent intervenir dans la densité de drainage. Si l'on reprend l'équation 2 (cf. 3.1.3) on a :

$$Dd = \frac{L_1}{A} + \frac{L_2}{A} + \frac{L_3}{A} + \dots$$

Or l'on vient de voir que $L_x + 1 = L_x \cdot \frac{Rl}{Rc}$, donc :

$$Dd = \frac{L_1}{A} + \frac{L_2}{A} \frac{Rl}{Rc} + \frac{L_3}{A} \left(\frac{Rl}{Rc} \right)^2 + \dots$$

$$Dd = \frac{L_1}{A} \left[1 + \frac{Rl}{Rc} + \left(\frac{Rl}{Rc} \right) + \dots \right]$$

Comme en moyenne, on a $Rl < Rc$, on peut aussi écrire approximativement :

$$Dd = \frac{L_1}{A} \cdot \frac{Rc}{Rc - Rl}$$

Si l'on revient maintenant aux régressions entre Rc et Rl on constate ici aussi que la liaison n'est pas significative ni sous steppe ni sur grès et schistes. L'influence du milieu est curieusement la même qu'entre I_p et \bar{L}_1 (ou F_1).

3.2.2. Causes naturelles

On s'est efforcé dans le paragraphe précédent de présenter le strict point de vue statistique sur l'évolution du degré de liaison entre deux paramètres physiques lorsque l'on considère séparément les principales classes de végétation et de géologie.

Il s'agit maintenant en regroupant les constats statistiques faits de les examiner du point de vue synthétique du géographe physicien.

Rappelons tout d'abord que les seules classes à effectifs suffisants (plus de 20) sont celles de forêt, savanes boisée et arbustive, steppe d'une part, granites, schistes, grès d'autre part. C'est par conséquent sur elles seules que porte cet examen.

Bien que l'on ait montré (1.2) l'indépendance relative des classements par végétation et par nature géologique, il aurait été souhaitable de parfaire l'examen statistique précédent en œuvrant non pas séparément sur des classes de végétation puis de géologie mais directement sur des groupes homogènes de végétation-géologie. Le tableau II montre en fait que des effectifs de ces 12 groupes (3 classes de géologie \times 4 classes de végétation) sont inférieurs à 20 sauf pour 4 d'entre eux.

On doit donc se contenter des résultats acquis.

La première constatation qu'ils inspirent est que les évolutions du degré de liaison entre paramètres paraissent être plutôt des tendances que des certitudes — même d'un point de vue statistique.

La seconde constatation conduit à faire une distinction globale entre :

- d'une part, les bassins sur grès dans lesquels aucune liaison significative n'apparaît entre les divers paramètres physiques pris deux à deux,
- d'autre part, les bassins sur terrains cristallins et métamorphiques (granites, schistes) dans lesquels les liaisons sont toujours serrées quand elles existent.

L'indépendance manifestée au sein de la classe des « grès » semble pouvoir être mise à l'actif de la morphologie particulière de ces terrains sous les tropiques : relief à plateaux tubulaires, falaises abruptes... Un tel modelé est, en effet, inadéquat pour que naisse une influence de la surface drainée sur la pente ou la forme du bassin. Et si la densité de drainage est indépendante c'est peut-être que toute la gamme des perméabilités est possible sur grès.

Les tendances aux liaisons accentuées entre paramètres dans les classes de granites et de schistes ne paraissent pas découler de causes naturelles nettes. Même la seule liaison statistiquement significativement différente des autres, celle entre pente et surface sur schistes apparaît finalement plutôt due à un hasard d'échantillonnage, aucun ouvrage de spécialiste consulté (P. BIROT, M. DERRUAU, J. TRICART...) n'ayant indiqué de caractéristiques du modelé des terrains schisteux susceptibles de justifier une décroissance régulière de la pente moyenne avec la surface drainée.

Il reste néanmoins qu'hormis la liaison précédente $I_p - A$, seules les liaisons $I_p - D_d$ et compacité — surface (sous steppe seulement) sont accentuées sur bassins schisteux.

Ces liaisons et toutes les autres ($I_p - \bar{I}_1$, $D_d - R_l$, $R_c - R_l$, $D_d - A$) se manifestent par contre sur terrains granitiques.

On peut interpréter cela en considérant que dans les régions intertropicales étudiées, surtout localisées en Afrique occidentale, le modelé des terrains granitiques est peu variable : pédiplaines anciennes, glacis cuirassés ou collines molles (de blocs désagrégés en boules ou recouverts d'altération épaisse) alternent ou s'associent dans un paysage finalement « plat et monotone », d'un point de vue simpliste.

Enfin, l'on peut constater que toutes les liaisons évoquées se manifestent plutôt sous forêt et sous savanes arborée et arbustive que sous steppe. Le caractère heurté du climat semi-aride rejoint ici le modelé heurté des grès pour faciliter l'indépendance des paramètres.

Il faut néanmoins rappeler que la tendance aux liaisons précédentes provoquées par une relative homogénéité du milieu ne conduit pas à des corrélations suffisamment serrées sur le plan statistique pour que l'on puisse en conclure à la dépendance plutôt qu'à l'indépendance entre eux des divers paramètres du milieu.

Nous concluons provisoirement qu'en dehors des indices de pente I_p et I_g et du groupe $D_d - \bar{I}_1 - F_1$, les autres paramètres physiques ne sont pas trop liés entre eux sur terrains granitiques et sur schistes et ne le sont pas du tout sur grès, ces liaisons étant plus nombreuses et plus nettes sous végétation notable que sous steppe.

4. RÉGRESSIONS MULTIPLES ENTRE TOUS PARAMÈTRES PHYSIQUES

Dans ce chapitre, on s'efforce de rechercher les meilleures liaisons entre groupes de paramètres paraissant déjà liés de manière hautement significative lorsqu'ils sont pris deux à deux ($r > 0,80$). Mais la liaison très étroite entre les indices de pente I_p et I_g n'a pas lieu d'être revue, l'équation explicitant celle-ci étant déjà suffisante.

Cette recherche prend également en compte comme variables explicatives possibles d'autres paramètres qui, bien qu'apparemment indépendants lorsqu'ils sont pris par couples, pourraient faire partie de liaisons multiples plus complexes et moins évidentes a priori (cas de I_p , R_l et R_c).

Cette recherche mettant en œuvre la technique des régressions multiples utilisant la méthode Stepwise de sélection des variables explicatives, on a opéré en limitant à 5 le nombre de ces dernières et en prenant un échantillon global de tous les paramètres dont l'effectif est tantôt de 129 valeurs, tantôt moindre (87 au minimum) lorsque l'on introduit les rapports Rc et Rl qui sont souvent sans signification sur certains très petits bassins au chevelu hydrographique insuffisamment hiérarchisé.

4.1. RÉSULTATS GLOBAUX

Il est bon de faire partir l'interprétation de toutes ces recherches de régressions multiples des résultats du chapitre précédent illustrés par la figure 8.

On y remarque que dans l'espace des liaisons possibles, nous avons volontairement placé les paramètres en quatre nébuleuses distinctes :

- celle des paramètres de relief Ip, Ig, Ds,
- celle des paramètres topographiques A, Lr, Kc,
- celle des paramètres de densités de chevelu hydrographique Dd, F₁, \bar{l}_1 ,
- celle des paramètres de hiérarchie du chevelu Rc, Rl.

Ces quatre nébuleuses recèlent des liaisons internes parfois serrées, mais sont peu liées entre elles sauf celle de relief avec celle des densités de chevelu.

Les recherches de liaisons multiples montrent que certaines liaisons internes peuvent être renforcées et qu'il apparaît des liaisons externes faisant cette fois intervenir la nébuleuse de hiérarchie du réseau.

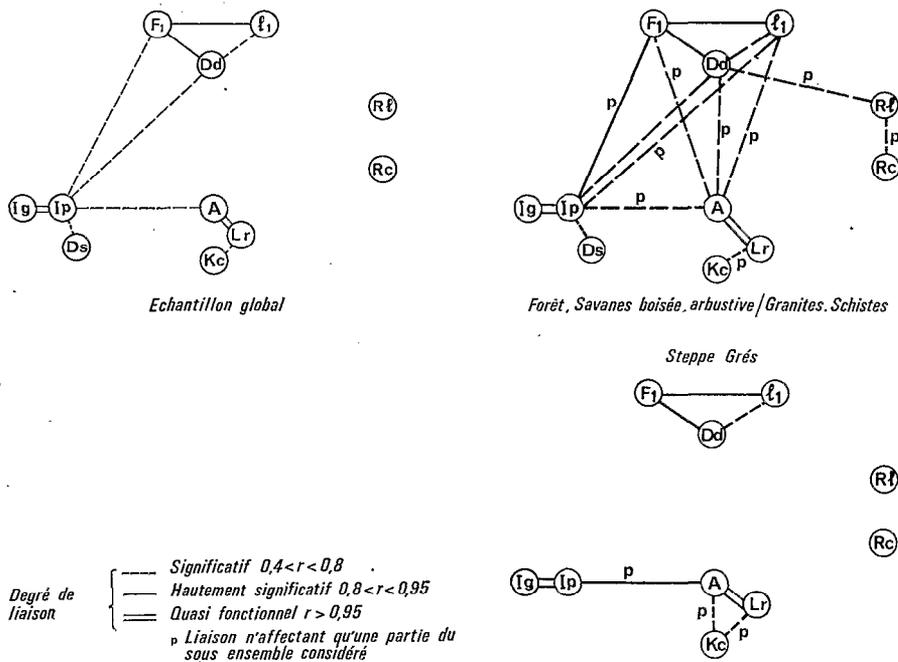


Fig. 8. — Degré de liaison entre paramètres physiques

On a classé les régressions multiples significatives au point de vue statistique (satisfaction du test F global de FISHER au seuil de 80%) en deux groupes, le second contenant des liaisons hautement significatives à coefficient de corrélation multiple supérieur à 0,80.

Dans le premier groupe ($r < 0,80$), on trouve :

- a) que le rapport de confluence Rc est faiblement lié à Rl, F₁ et Kc ($r = 0,504$ entre variables naturelles) ;
- b) que le rapport de longueur Rl est faiblement lié à Rc, Dd et \bar{l}_1 ($r = 0,589$ entre logarithmes).

Les résultats du second groupe sont rassemblés dans le tableau VI, dont la lecture appelle toute une série de commentaires.

Tout d'abord, et comme on pouvait s'y attendre, il n'y a de liaisons hautement significatives que dans la nébuleuse des densités de chevelu.

Ensuite, et selon que l'on a pris en compte ou non les rapports Rl et Rc, les résultats des régressions sont un peu différents entre eux et de ce que laissaient présager les régressions simples.

TABLEAU VI
RÉGRESSIONS MULTIPLES ENTRE PARAMÈTRES PHYSIQUES

Effectif	Equation de régression	Ecart-type marginal (1)	Ecart-type résiduel	Coefficient de corrélation multiple	% de variance expliqué
247	$L_r = 0,909 A^{0,50} \cdot Kc^{2,22}$	1,14	0,075	0,998	
129	$F_1 = 0,0039 Dd^{0,836} \cdot \bar{I}_1^{-0,861}$	1,16	0,567	0,876	76
113	$F_1 = 0,0015 Dd^{1,10} \cdot \bar{I}_1^{-0,76} \cdot Rc^{0,616}$	1,10	0,368	0,944	89
129	$\bar{I}_1 = 0,014 F_1^{-0,42}$	0,63	0,405	0,769	60
87	$\bar{I}_1 = 0,021 F_1^{-0,38} \cdot Rl^{-0,56} \cdot A^{+0,05}$	0,55	0,295	0,852	70
128	$Dd = 0,160 F_1 - 0,805 \bar{I}_1 + 5,65 I_p + 1,363$	1,64	0,718	0,901	80
87	$Dd = 0,138 F_1 - 1,426 \bar{I}_1 + 5,46 I_p - 0,697 Rl + 3,478$	1,66	0,637	0,927	85

(1) Ecart-type de la variable dépendante, dans le mode de la régression (naturel ou logarithmique).

Ces résultats bien que meilleurs quand Rl ou Rc interviennent, la part de l'écart-type marginal non expliqué diminuant, ne sont pas significativement différents (avec ou sans Rl ou Rc) car les intervalles de confiance à 95% des coefficients de régression multiple se recoupent tous.

On peut en conclure :

- que l'explication entre Dd, \bar{I}_1 et F_1 au sein de leur nébuleuse est suffisante et gagne peu à faire intervenir soit Rc, soit Rl,
- que la nébuleuse de hiérarchie du chevelu reste tout compte fait assez indépendante des autres, comme Rc et Rl peuvent l'être l'un vis-à-vis de l'autre.

On peut également noter que parmi les variables explicatives, la surface et l'indice de pente n'interviennent qu'une fois l'une sur \bar{I}_1 , l'autre sur Dd, de telle sorte que l'on peut maintenir que les nébuleuses de relief, de topographie et de densités peuvent être considérées comme assez indépendantes entre elles.

On notera, in fine, que la régression donnant la longueur du rectangle équivalent Lr en fonction de S et de Kc était sans intérêt puisque par définition $L_r = f(S, Kc)$. Mais il est amusant de noter que la forme de l'équation de régression est plus simple que celle de l'équation théorique.

On peut d'ailleurs vérifier que $L_r = 0,909 A^{0,50} Kc^{2,22}$ peut s'écrire plus simplement encore $L_r = A^{0,50} Kc^2$ (écart maximal de 5%).

On peut enfin vérifier que cette équation simplifiée donne un résultat presque identique à celui de l'équation théorique :

$$L_r = \frac{Kc A^{0,50}}{1,12} \left[1 + 1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2 \right]$$

tant que la compacité reste dans l'intervalle 1,12 - 1,65 (plus de 90% des valeurs de l'échantillon global).

D'autre part, bien que la puissance de Kc soit quatre fois celle de A, sa valeur proche de 1 et sa faible étendue empirique font, rappelons-le, que la longueur Lr dépend beaucoup plus de A que de Kc.

4.2. CAS DES DENSITÉS DE CHEVELU

Les liaisons entre les paramètres Dd , \bar{I}_1 et F_1 sont telles qu'elles méritent un examen particulier.

Voyons tout d'abord la densité de drainage.

La prise en compte de Rl comme 4^e variable explicative permet de faire passer le coefficient de corrélation multiple de 0,901 à 0,927 et la part expliquée de la variance de 80 à 85%.

Si l'on regarde la précision relative de l'estimation, dans un intervalle de confiance à 80%, on voit qu'elle varie peu et vaut dans les deux cas environ 35% autour de la moyenne, 20% vers les valeurs élevées et plus de 100% vers les valeurs basses de Dd . L'explication à l'aide des trois seuls paramètres F_1 , \bar{I}_1 et I_p semble suffire. On note en outre que I_p intervient en 2^e position avant \bar{I}_1 .

Ceci conduit à nuancer la conclusion hâtivement émise au 4.1 précédent quant à la relative indépendance des nébuleuses de relief et de densités.

La longueur moyenne \bar{I}_1 des thalwegs élémentaires est moins bien expliquée que Dd par les régressions multiples. Il reste tantôt 40% tantôt 30% de variance inexpliquée selon que l'on considère F_1 seul ou avec Rl et A comme variables explicatives, et la précision sur l'estimation, au seuil de 80%, est du même ordre que celle du Dd .

Seule la fréquence F_1 du nombre des thalwegs élémentaires par unité de surface est bien expliquée.

Avec Dd et \bar{I}_1 seuls, on explique 76% de la variance marginale et la précision, au seuil de 80%, sur l'estimation fournie est comprise entre 15 et 40% le long de l'étendue empirique. Avec Rc en plus, la variance expliquée atteint 89% et la précision sur l'estimation oscille entre 10 et 30% selon les valeurs de F_1 .

On peut donc considérer que l'une ou l'autre des équations donnant F_1 (tableau VI) peuvent être utilisées pour estimer ce paramètre avec une précision satisfaisante. On remarquera que l'équation :

$$F_1 = 0,0015 Dd^{1,10} \cdot \bar{I}_1^{-0,76} \cdot Rc^{0,616}$$

rend assez bien compte de l'équation (3) explicitée au paragraphe 3.1.3.

$$Dd = \bar{I}_1 F_1 + \bar{I}_2 F_2 + \dots \text{ etc.}$$

le rapport de confluence pouvant, dans une certaine mesure, représenter les termes d'ordre supérieur à 1, les fréquences en particulier.

5. CONCLUSIONS HYDROLOGIQUES

Cette étude des principaux paramètres physiques et morphologiques de petits bassins semi-arides et intertropicaux nous a amené à mieux connaître leur comportement intrinsèque et leurs interactions.

On a ainsi pu vérifier ou confirmer l'existence de quatre nébuleuses distinctes assez indépendantes entre elles, mais au sein desquelles par contre se manifestaient d'étroites liaisons. Ainsi en est-il de la dépendance étroite de la longueur du rectangle équivalent vis-à-vis de la surface, de la relation quasi fonctionnelle mise en évidence entre indices de pente I_p et I_g ($I_p = 0,035 I_g^{0,50}$), enfin de l'explication satisfaisante de la fréquence des thalwegs élémentaires F_1 par Dd , \bar{I}_1 et Rc .

On a d'autre part ressenti que les distributions empiriques des paramètres et surtout les liaisons simples, entre eux 2 à 2, étaient susceptibles de varier avec le climat, la végétation et la géologie des bassins.

Dans ce domaine de l'influence du milieu sur les paramètres physiques, nous sommes intervenus en statisticien et nos recherches d'explications géomorphologiques sont restées plutôt simples et peu approfondies.

Il serait juste de dire que l'échantillon livré à nos analyses n'était pas fortuit mais le fruit d'une politique concertée de bassins représentatifs, et malgré l'absence de distorsions manifestes en son sein, il faut bien le considérer comme ni optimal ni suffisamment fourni pour conduire à des conclusions définitives.

Un tel objectif ne pourrait être atteint qu'en choisissant au hasard, dans toute la gamme des surfaces de 0 à 1 000 km², une cinquantaine de bassins au moins dans chaque groupe homogène de géologie-végétation (ex. : schistes sous forêt). Un tel travail est plutôt du ressort du géographe physicien surtout en ce qui concerne l'interprétation ; aussi n'est-il pas dans nos intentions de l'entreprendre.

Quelques résultats de notre propre analyse peuvent néanmoins être rappelés ici, à savoir la nette indépendance de la majorité des paramètres physiques dans certains milieux (grès, végétation steppique) ainsi qu'une tendance à une évolution parallèle — pour ne pas parler d'une dépendance somme toute souvent faible — dans d'autres milieux (forêt et savanes boisée ou arbustives, granites et schistes).

Que nous importe-t-il finalement sur le plan hydrologique. Il est opportun de rappeler ici que l'étude exposée a été menée dans le cadre d'un programme tendant à découvrir l'influence du milieu sur les caractéristiques hydrologiques de petits bassins semi-arides et intertropicaux.

Dans cette optique, ce qui nous importe est d'utiliser des paramètres physiques explicatifs autant que possible peu dépendants les uns des autres, et dont les distributions empiriques se rapprochent de la normale, sans ou avec transformation préalable de variable.

Le choix des paramètres à retenir doit également tenir compte de la qualité et de la facilité de leur détermination.

Dans une première étape, on peut se contenter de ne retenir qu'un paramètre par nébuleuse. Dans une seconde étape, des adjonctions ou des substitutions restent envisageables.

Le tableau ci-dessous récapitule notre choix.

1 ^{re} étape	2 ^e étape
Longueur L_r du rectangle équivalent	Surface A Compacité K_c
Indice de pente I_p ou I_g	Dénivelée spécifique D_s
Densité de drainage D_d	Fréquence F_1 Longueur moyenne l_1
Rapport de confluence R_c	

La longueur L_r suffirait à caractériser la nébuleuse « topographie » mais comme la surface est un paramètre évident, il vaut mieux lui substituer A et K_c .

L'indice de pente I_g est plus aisé à calculer que I_p , mais peut-être vaut-il mieux prendre D_s , cette dénivelée spécifique beaucoup plus indépendante de la surface et de la densité de drainage.

La densité de drainage s'impose.

Le rapport de confluence est choisi de préférence au rapport de longueur parce que distribué plus normalement et plus facile à déterminer.

Le choix final serait donc constitué de la surface A, de la compacité K_c , de la dénivelée spécifique D_s , de la densité de drainage D_d et du rapport de confluence R_c .

RÉFÉRENCES

- [1] DUBREUIL (P.) - 1966 - « Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants ; leur détermination avec une précision acceptable ». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. III, n° 4.
- [2] DUBREUIL (P.) - 1970 - « Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. » Colloque AISH - UNESCO sur les résultats de recherches sur les BRE, Wellington (N.Z.), pp. 582-589.
- [3] DUBREUIL (P.) et als. - 1972 - « Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-69. » Ed. ORSTOM, Paris, 916 p.
- [4] DUBREUIL (P.) - 1971 - « L'exploitation systématique des données de bassins représentatifs en traitement automatique. » *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VIII, n° 3, pp. 3-46.
- [5] DUBREUIL (P.), GUISEFRÉ (J.) - 1971 - « La planification du réseau hydrométrique minimal ». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VIII, n° 1.