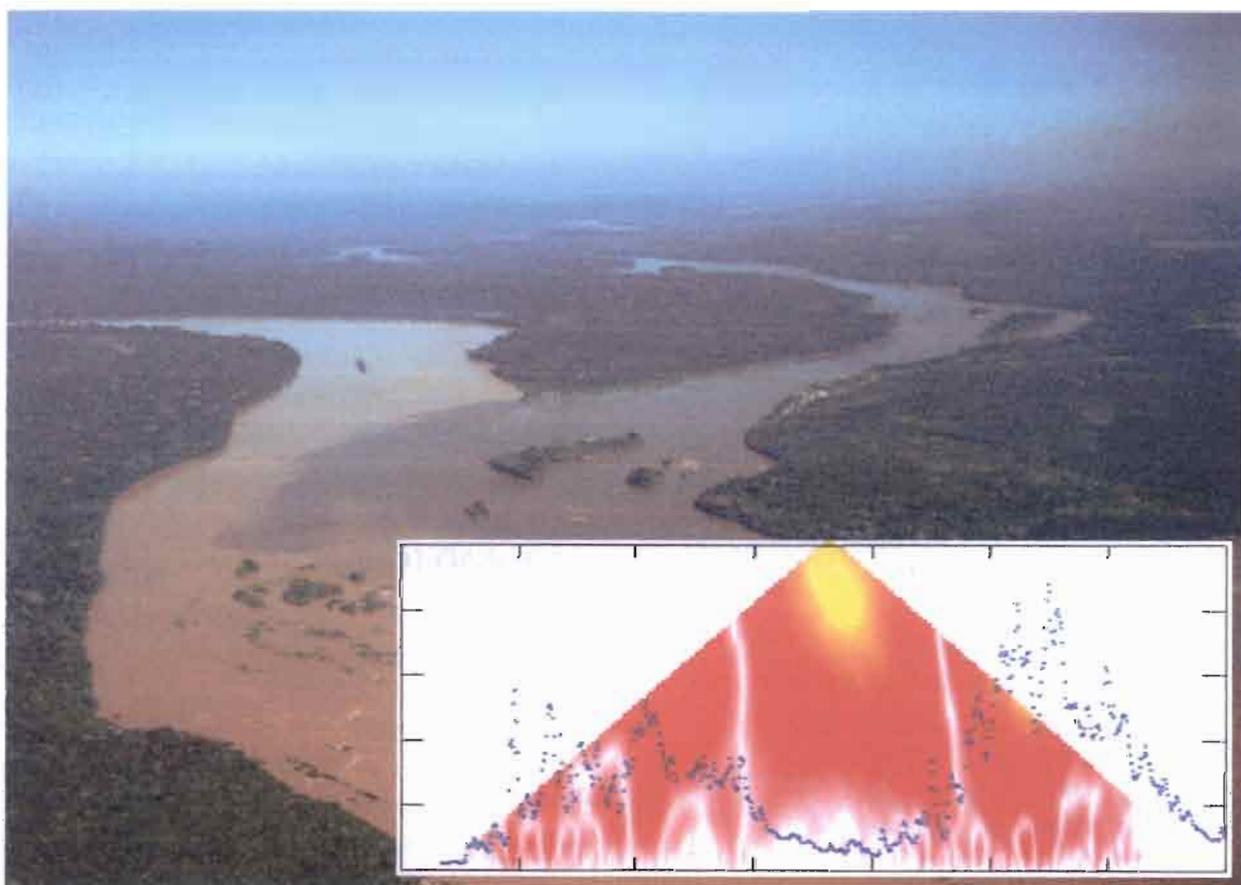




Institut de recherche
pour le développement

Caractérisation physique des bassins versants de la Guyane française



par
Cédric GAUCHEREL
17 juillet 2000

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	1
1. INTRODUCTION	4
1.1. CONTEXTE	4
1.2. PLAN DU RAPPORT ET JUSTIFICATION.....	4
2. DESCRIPTION HYDROLOGIQUE.....	6
2.1. LES DONNEES.....	6
2.1.1. <i>LE RESEAU HYDROMETRIQUE</i>	6
2.1.2. <i>DISTRIBUTION DES DEBITS</i>	7
2.1.3. <i>QUALITE DES MESURES</i>	9
2.2. ANALYSE STANDARD.....	9
2.2.1. <i>DESCRIPTEURS STATISTIQUES</i>	9
2.2.2. <i>DESCRIPTEURS DE VARIABILITE</i>	10
2.2.3. <i>DERIVEES DES DEBITS</i>	11
2.2.4. <i>ANALYSE FREQUENTIELLE</i>	13
2.2.5. <i>DECOPAGE DE LA COURBE DES DEBITS</i>	14
2.2.6. <i>LA FORME DES REGIMES</i>	15
2.2.7. <i>TENDANCES PLURIANNUELLES</i>	16
2.3. NOUVELLES APPROCHES.....	17
2.3.1. <i>LE MNH</i>	17
2.3.2. <i>LES ONDELETES</i>	19
2.3.3. <i>SENSIBILITE A L'ECHELLE</i>	22
2.4. BILAN	23
3. DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE	24
3.1. LES DONNEES.....	24
3.1.1. <i>LA DISTRIBUTION PLUVIOMETRIQUE</i>	24
3.1.2. <i>LA DISTRIBUTION HYDROMETRIQUE</i>	25
3.1.3. <i>LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE</i>	25
3.2. DESCRIPTION STANDARD	26
3.2.1. <i>LES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES</i>	26
3.2.2. <i>TRAITEMENT PRELIMINAIRE</i>	28
3.2.3. <i>LES LONGUEURS</i>	28
3.2.4. <i>LES DENSITES</i>	30
3.2.5. <i>LES COURBURES ET SINUSITES</i>	31
3.3. NOUVELLE APPROCHE	33
3.3.1. <i>SENSIBILITES A L'ECHELLE : LA LOGIQUE</i>	33
3.3.2. <i>SENSIBILITES A L'ECHELLE : FRACTALITE</i>	34
3.3.3. <i>SENSIBILITES A LA QUALITE DES DONNEES</i>	36
3.3.4. <i>LES TEXTURES</i>	36
3.4. BILAN	37

4. FUSION DES DESCRIPTIONS	38
4.1. METHODE ET JUSTIFICATION	38
4.2. REDUCTION DU NOMBRE D'INDICATEURS	39
4.2.1. REDUCTION DES INDICATEURS HYDROLOGIQUES	39
4.2.2. REDUCTION DES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES.....	40
4.2.3. REDUCTION GLOBALE	41
4.3. CLASSEMENT ET INDICE PHYSIQUE	42
4.3.1. UN INDICE PHYSIQUE	42
4.3.2. CLASSEMENT DES BASSINS VERSANTS	43
4.4. LIMITES ET PERSPECTIVES.....	44
5. CONCLUSION	46
ANNEXE.....	47
<i>PRESENTATION</i>	47
<i>LISTE DES CARTES</i>	47
BIBLIOGRAPHIE	48

1. Introduction

1.1. Contexte

Au XIX^{ème} siècle, les découvertes en immunologie et bactériologie de Louis Pasteur sont à l'origine des premières évaluations de la qualité de l'eau. En 1961 née la première loi française sur la qualité de l'eau, elle systématise son traitement. Dix ans plus tard débutent les mesures de la pollution chimique de l'eau, provenant de l'industrie, de l'agriculture et des produits utilisés par les consommateurs : métaux lourds, nitrates, pesticides, etc.¹ Toutes ces causes peuvent dans un avenir plus ou moins proche cristalliser dans les départements d'outre-mer telle que la Guyane.

La DIREN a ainsi initié le projet d'élaboration d'un système d'évaluation de la qualité globale des cours d'eau guyanais. Suite à un séminaire organisé en avril 1998, il a été décidé de préparer la mise en place d'un tel système de surveillance par la description des cours d'eau du département. Les instituts de recherche impliqués dans le projet ont donc pour tâche d'en brosser une typologie biophysique la plus complète possible².

Si l'on se réfère au système d'évaluation de la qualité des cours d'eau qui prévaut en France métropolitaine, la typologie des bassins guyanais aura intérêt à décliner des descripteurs biologiques autant qu'abiotiques. L'organisation biocénotique d'un cours d'eau dépend en effet en grande partie de son régime hydrologique et de son réseau hydrographique. Le débit d'une rivière est étroitement corrélé par exemple à la transparence, la composition chimique de ses eaux, la diversité des habitats ou les interactions biotiques³.

Pour la composante biologique, les diatomées, les macro-invertébrés et les poissons sont des pistes explorées dans ce projet tant il est vrai que cette faune renseigne sur la qualité de l'eau qui les accueille. L'étude complémentaire de leur habitat sera chimique autant que physique. Ce rapport détaille la description et caractérisation physique des cours et de leur bassin versant.

1.2. Plan du rapport et justification

Les hydrologues ont coutume de caractériser des bassins versants d'un point de vue climatologique d'abord, hydrologique ensuite et physio-géographique enfin⁴. La composante climatologique se résume en l'examen de la carte pluviométrique de la Guyane. Cette dernière est synthétisée par Météo France avec les données de la période 1961/1990, période qui correspond grossièrement à celle des enregistrements hydrologiques et suffit amplement à la perception des particularités climatologiques de chaque bassin (*cf.* Annexe).

Les deux autres composantes ont fait l'objet d'études fouillées qui nous ont permis d'extraire des données autant d'informations que faire ce peut. Les physiciens aiment à travailler avec des paramètres physiques, ultérieurement conciliés au sein de modèles schématisant un phénomène. Depuis peu, une nouvelle approche puissante voit le jour⁵. Elle manipule des « indicateurs » et les exploite en les faisant fusionner ou en leur trouvant des corrélations. Les indicateurs sont des variables qui n'ont pas forcément de réalité physique, mais trahissent (directement ou indirectement et surtout quantitativement) une caractéristique de l'objet d'étude. C'est cette approche que nous avons retenue ici. Nous nous sommes également demandé quelles devaient

être les qualités de nos indicateurs pour caractériser au mieux les cours d'eau et bassins versants de notre étude.

- Un tel indicateur doit en priorité être sensible : cela sous-entend qu'il soit monotone, variable, mais de faible dispersion pour rendre compte rigoureusement des différences entre les éléments de notre ensemble.
- Il doit être compréhensible : *i.e.* clairement défini d'une part, suffisamment simple pour être manipulé par tous d'autre part. Cette qualité n'est pas à confondre avec celle qui attribuerait un sens physique à l'indicateur, qui l'expliquerait. Ce qui en effet, n'est pas nécessaire pour caractériser !
- Il doit enfin être accessible : *i.e.* facilement reproductible et notamment à moindre frais. Avec ces qualités, un indicateur aura de fortes chances d'être « extrapolable » à d'autres régions ou d'autres problématiques que la notre... un plus en sa faveur.

Les indicateurs provenant des composantes que nous nommerons à l'avenir : hydrologique et morphologique (pour ce qu'elles caractérisent temporellement et spatialement les bassins versants) sont détaillées dans les chapitres 2 et 3 de ce rapport. Toutefois, ce travail présenterait peu d'intérêt si ses diverses composantes ne fusionnaient pas. Le chapitre 4 réalise et justifie la synthèse des ces différentes informations.

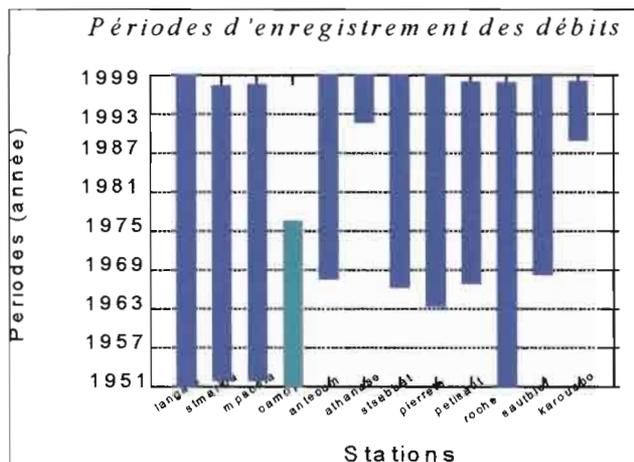
Nous avons également modulé les résultats finaux par les contraintes inhérentes à la région guyanaise. Cette dernière présente en effet des particularités (propres aux données, aux méthodologies qu'elle suppose d'employer, aux connaissances déjà acquises, etc.) qui contraignent notablement l'étude et nous ont obligés à recourir à de nouvelles méthodes de caractérisation de bassin versant. Ces contraintes seront examinées en détail dans la dernière partie, peu avant la conclusion.

2. Description hydrologique

2.1. les données

2.1.1. Le réseau hydrométrique

Le réseau hydrométrique de la Guyane française a vu le jour en 1950 avec l'installation de plusieurs stations sur les grands fleuves frontières. Actuellement, le service hydrologique de l'IRD gère une douzaine de stations hydrologiques dispersées sur tous les grands cours d'eau : le Maroni qui jouxte le Surinam (Antécum Pata, Dégrad Roche, Maripasoula et Langata biki), l'Oyapock frontière avec le Brésil (Camopi et Saut Maripa), la Mana (Saut Sabbat), l'Approuague (Pierrette et Saut Athanase), la Comté (Saut Bief), la Sinnamary qui accueille le seul barrage de Guyane (Petit Saut)⁶. A ce panel, a été rajouté la station de la petite rivière Karouabo, qui sortira régulièrement de nos statistiques mais sera précieuse pour fixer une limite inférieure à plusieurs paramètres.

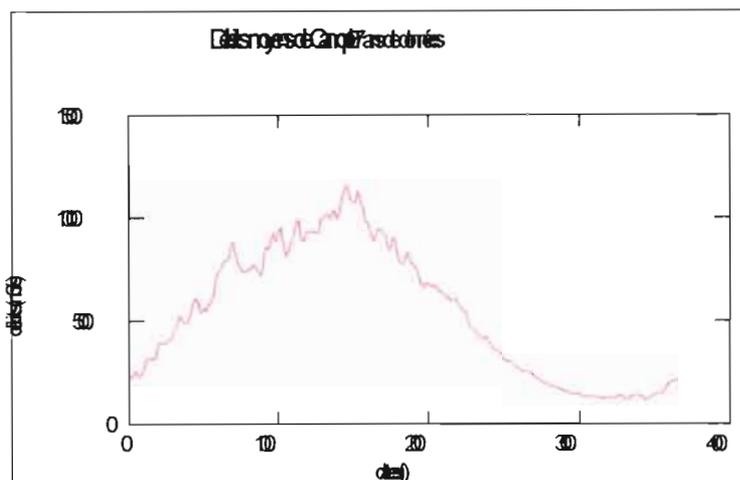


Années (de 1951 à 1999) suivies, pour chaque station hydrologique.

Période d'enregistrement des débits des 12 stations hydrologiques utilisées pour notre étude.

Si l'on excepte la station Camopi, les périodes d'enregistrement sont régulièrement actualisées et courent parfois depuis l'année de création du réseau de mesure. La station Camopi a été abandonnée pour une question d'accessibilité et parce que sa courbe d'étalonnage n'était pas univoque⁷. Ce sont en effet les hauteurs d'eau qui sont relevées sur le terrain, valeurs ultérieurement converties en débits à l'aide d'une courbe d'étalonnage. Camopi qui est en aval d'un point de confluence voit sa courbe influencée par le fleuve Oyapock et par l'un de ses affluents : à une hauteur mesurée ne correspond donc pas un unique débit⁴.

La Guyane est le siège d'une importante saison des pluies (de décembre à juin typiquement), généralement entrecoupée d'une courte période nommée « petit été de mars ». Cette période qui intervient à des dates variables dans l'année disparaît de fait dans l'hydrogramme moyen. Les régimes annuels moyens qui en découlent, d'une grande homogénéité entre les fleuves, font succéder la crue annuelle torturée à une décrue plus lente et régulière⁶.



Débits (m^3/s) en fonction des jours de l'année (de 1 à 365).

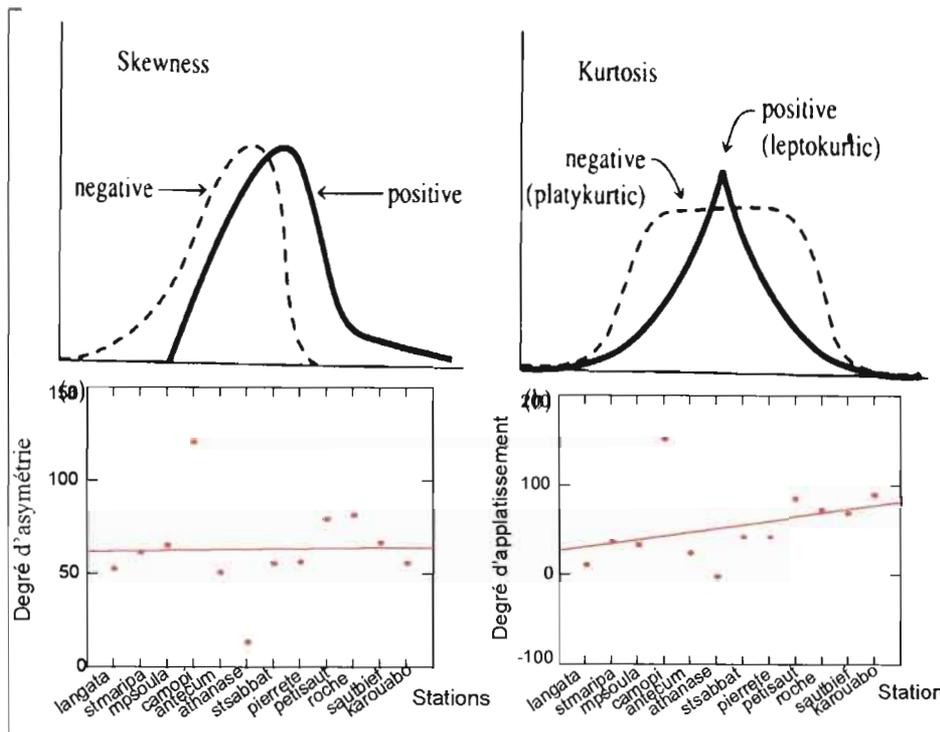
Forme caractéristique des hydrogrammes annuels moyens des cours d'eau guyanais. Exemple : Camopi, sur 27 ans de données.

Le tableau suivant donne une idée des débits et des surfaces des bassins versants associés à chaque station hydrologique de notre étude. Leur distribution spatiale sera commentée au chapitre 3.1. Deux grands fleuves (Maroni et Oyapock) et un petit (Karouabo) se dégagent des valeurs moyennes.

Stations	fleuve	débit moyen (en m^3/s)	Surface (en km^2)
Langata-biki	maroni	1798	60930
Saut-Maripa	oyapock	917	25120
Maripasoula	maroni	820	28285
Camopi	oyapock	462	5920
Antécum-Pata	maroni	391	10300
Saut-Athanase	approuague	391	7525
Saut-Sabbat	mana	321	10255
Pierrette	approuague	237	6105
Petit-Saut	sinnamary	236	5900
Degrad-Roche	maroni	176	7655
Saut-Bief	comté	109	1760
Karouabo	karouabo	5	76,7

2.1.2. Distribution des débits

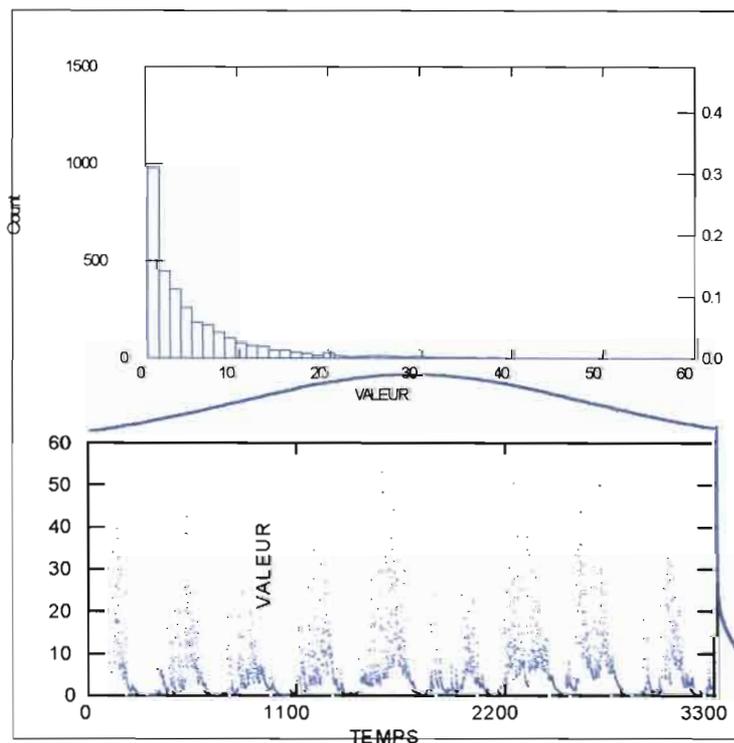
Une description statistique rapide des courbes de débits (à l'image des figures suivantes) permet d'ailleurs de fixer les ordres de grandeur de ces fleuves. Pour chaque cours d'eau, nous avons visualisé (avec le logiciel Systat 9.0[®]) les courbes de débits, moyennés par jour, et la forme de la distribution des débits (*i.e.* proportion de chaque valeur en fonction du total).



Indicateurs statistiques de forme (ordres 3 et 4) pour une distribution quelconque.

Exemple des mêmes indicateurs sur les distributions des stations de notre échantillon.

Pour quantifier cette forme, il est aisé de travailler avec les moments d'ordre 1 (moyenne), 2 (écart type), 3 (asymétrie) et 4 (aplatissement) de la distribution^{9,10}. Nous les utiliserons également plus loin pour toutes sortes de distributions. Les formes des distributions des débits se montrent quasiment tout le temps asymétriques (à droite, *i.e.* avec moins de débits élevés que de débits faibles) et « piquées » (*i.e.* avec un débit, d'étiage donc, préférentiel). Cette observation hydrologique est conforme à l'accoutumée¹¹.



Data for the following results were selected according to: (VALEUR < 9999)

	VALEUR
N of cases	3167
Minimum	0.002
Maximum	53.100
Range	53.098
Sum	16844.187
Median	2.860
Mean	5.319
95% CI Upper	5.555
95% CI Lower	5.083
Std. Error	0.120
Standard Dev	6.778
Variance	45.942
C.V.	1.274
Skewness(G1)	2.455
SE Skewness	0.044
Kurtosis(G2)	7.641
SE Kurtosis	0.087

Distribution des débits et courbe des débits journaliers ($m^3/s/jour$) de la station Karouabo. Indicateurs statistiques associés à cette distribution.

2.1.3. Qualité des mesures

Notons ici un point très important sur la qualité des données hydrologiques : pour des raisons d'accessibilité, mais aussi parce que les instruments sont très sollicités par les conditions climatiques guyanaises et tombent régulièrement en panne, toutes les courbes temporelles sont plus ou moins complètes (tableau suivant)¹². Le service hydrologique de l'IRD exploite les corrélations élevées entre stations hydrologiques voisines pour reconstituer les enregistrements manquants. Ainsi, on peut momentanément étudier une courbe qui est en fait celle de la station voisine ! Toutes nos conclusions seront modulées par l'incertitude que crée cette information sur les débits étudiés.

Les débits eux-mêmes doivent être affublés d'une incertitude difficilement quantifiable (pour les mêmes raisons). Nous l'avons estimée à 10% environ⁷. Sauf mention contraire, toutes les valeurs de ce chapitre doivent donc être lues avec ces imprécisions.

Stations	% de valeurs absentes
Langa-Tabiki	4.82
Saut-Maripa	1.79
Maripasoula	3.39
Camopi	8.85
Antécum-Pata	5.1
Saut-Athanase	28.3
Saut-Sabbat	47.86
Pierrette	18.52
Petit-Saut	3.06
Degrad-Roche	5.11
Saut-Bief	4.53
Karouabo	3.7

Finalement, bien que réduite à quelques stations hydrologiques, la couverture du département guyanais est complète et devrait permettre une analyse quasi exhaustive des comportements hydrologiques que l'on peut y déceler. On peut par exemple espérer repérer des cours d'eau « représentatifs » au sens hydrologique du terme, *i.e.* au sein desquels les spécificités hydrologiques de la Guyane se trouvent concentrées¹³.

2.2. Analyse standard

2.2.1. Descripteurs statistiques

Les descriptions statistiques des régimes des cours d'eau guyanais sont abondantes comme l'indiquent les pages consacrées à l'hydrologie dans l'Atlas de 1979 de Guyane. Les fréquences d'apparition et époques d'occurrence de certains modules, certaines crues ou étiages y sont discutées en détail, tandis que les lois qui les lient théoriquement sont vérifiées⁶. Ces descriptions s'appuient sur plusieurs études de l'ORSTOM (nouvellement IRD)^{10,12,etc.}. Nous noterons ici les

principales valeurs d'étiage et de crue annuelles en m³/s (à notre disposition) pour les stations qui sont concernées par cette étude. Les colonnes représentent les différentes fréquences d'apparition des valeurs annuelles moyennes : 0.1 est donc une fréquence décennale, 0.001 centennale.

Stations	Etiage 0.5	Etiage 0.1	Etiage 0.9	Crue 0.5	Crue 0.1	Crue 0.01
Langa-Tabiki	270	490	90	5600	6500	7200
Saut-Maripa	180	245	130	2770	3500	4100
Maripasoula	100	220	24	2600	3250	3800
Camopi	100	150	45	1900	2300	2650
Saut-Sabbat	80	130	23	900	1200	-
Pierrette	65	-	40	650	775	850
Degrad-Roche	20	35	5	700	950	1150

A l'opposé, peu d'études visant à expliquer les phénomènes hydrologiques de Guyane ont vu le jour. On note malgré cette observation un travail ancien sur trois petits bassins versants aux couvertures géologiques et végétales différentes^{14,15}. L'auteur utilise la notion d'hydrogramme unitaire (qui trahit la réponse du bassin versant à un événement pluvieux) pour décrire les rivières¹⁶.

Cette notion reste malheureusement impossible à exploiter sur nos grands bassins versants : Ils nécessiteraient un arsenal de mesure impossible à mettre en œuvre. De plus, la relation pluie/débit n'est pas univoque sur des grandes surfaces. L'hétérogénéité naturelle des pluies et de la surface réceptrice si elle excède une certaine taille n'autorise pas un comportement reproductible du cours d'eau.

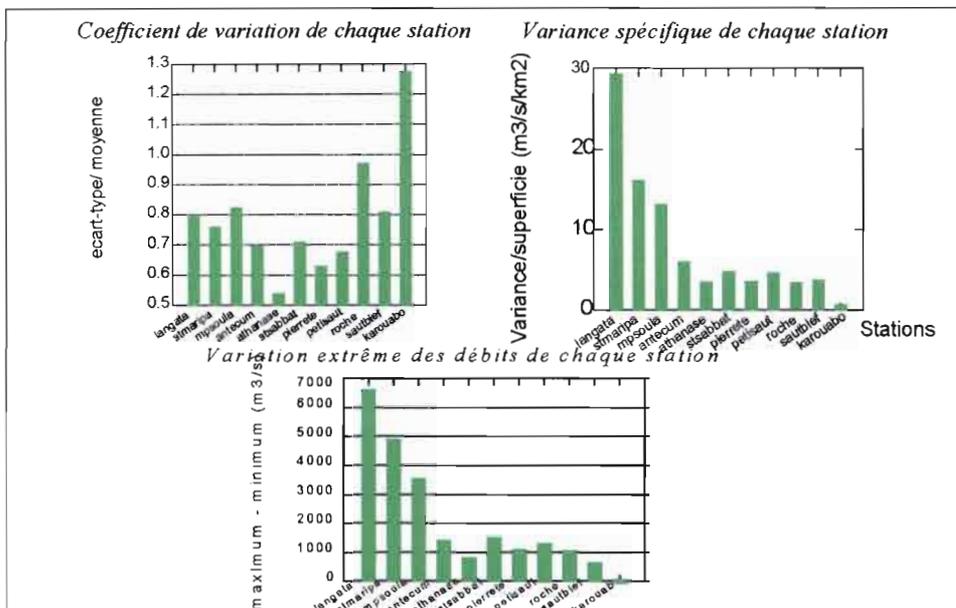
Dans un autre projet actuel, nous tentons malgré tout de décomposer nos courbes temporelles de débits à l'aide d'une technique bien connue des spécialistes de traitement du signal, en utilisant un filtre linéaire. Nous espérons ainsi remonter à une réponse impulsionnelle (qui s'apparenterait à un hydrogramme unitaire) propre à chaque fleuve.

2.2.2. Descripteurs de variabilité

A ce stade, il nous fallait chercher à caractériser plus en détail les 12 courbes de débits, en gardant à l'esprit la finalité de notre étude et son couplage futur avec les autres disciplines du projet. Les hydrobiologistes sont particulièrement intéressés par la variabilité des débits¹⁷, tandis que les hydrologues purs se concentreront sur la description de la surface collectrice des eaux de pluie¹⁸. En effet, la faune aquatique est très sensible aux changements, voire à la rapidité des changements de son habitat. C'est l'une des deux principales idées qui vont diriger ce premier chapitre et le choix de ses différentes méthodes de déduction d'informations des courbes temporelles.

Nous avons débuté cette quantification de la variabilité des cours d'eau par les calculs de différentes variables statistiques tels que le coefficient de variation des débits ($cv = \text{écart type}/\text{moyenne}$), la variation extrême des débits (maximum – minimum), la variance spécifique de chaque station (carré de l'écart type/surface du Bassin versant), etc⁸. Si l'on exclut volontairement

du lot la station Camopi, pour des raisons déjà évoquées, tous ces indicateurs ont présenté deux groupes de cours d'eau, ceux de taille importante et de taille plus réduite. Ils ne se montrent donc pas assez explicites.

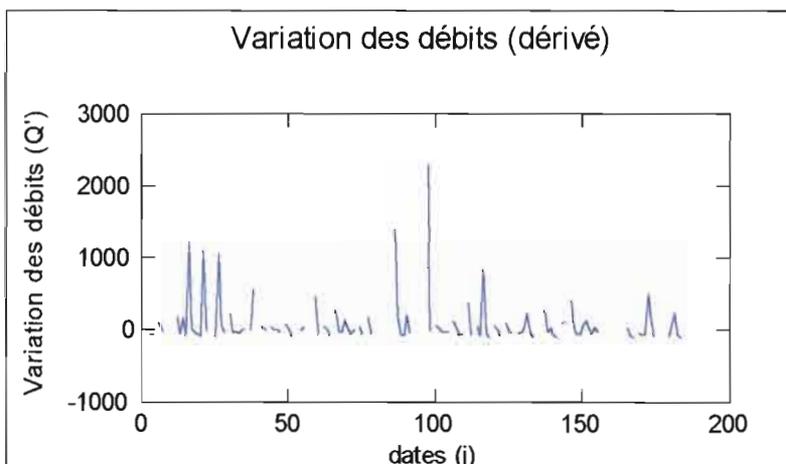


Les stations sont classées par ordre de débit moyen décroissant.

Différents indicateurs de variabilité des débits des stations de l'étude. On a volontairement omis la station Camopi.

2.2.3. Dérivées des débits

Dans le même esprit, nous nous sommes alors tournés vers une caractérisation des régimes à l'aide d'indicateurs utilisant les dérivées temporelles (premières et secondes) des débits, ainsi que ceux issus de leurs distributions respectives.



Dérivée des débits (m^3/s) en fonction des jours de l'année (sur une courte période). On voit clairement les périodes de crue et de décrue (plus stables).

Les dérivées successives dites : « relatives » se sont vite révélées pertinentes pour ce qu'elles permettaient de normaliser les contributions inégales des débits pendant les crues et les étiages et ainsi, de rendre possible leur comparaison. On se contente de faire le rapport entre la dérivée du jour $j0$ par la valeur du même jour qui est dérivée.

<i>Stations</i>	<i>der1-1</i>	<i>der1-2</i>	<i>der1-cv</i>	<i>der1-3</i>	<i>der1-4</i>
<i>Langu-Tabiki</i>	0.073	137.764	1887.178082	1.212	5.539
<i>Saut-Maripa</i>	-0.163	85.592	-525.1042945	1.077	10.391
<i>Maripasoula</i>	-0.072	59.887	-831.7638889	1.151	7.058
<i>Camopi</i>	0.044	68.208	1550.181818	0.734	9.249
<i>Antécum-Pata</i>	0.022	23.479	1067.227273	1.283	7.105
<i>Saut-Athanase</i>	0.019	29.817	1569.315789	0.854	3.862
<i>Saut-Sabbat</i>	-0.111	36.203	-326.1531532	0.714	6.248
<i>Pierrette</i>	0.013	25.038	1926	1.401	11.792
<i>Petit-Saut</i>	-0.01	44.604	-4460.4	0.534	9.179
<i>Degrad-Roche</i>	-0.011	21.647	-1967.909091	1.173	11.587
<i>Saut-Bief</i>	-0.039	20.441	-524.1282051	0.7	5.053
<i>Karouabo</i>	0.004	2.607	651.75	1.477	13.445

<i>Stations</i>	<i>der1rel-1</i>	<i>der1rel-2</i>	<i>der1rel-cv</i>	<i>der1rel-3</i>	<i>der1rel-4</i>
<i>Langu-Tabiki</i>	0.421	9.617	22.8432304	2.395	13.371
<i>Saut-Maripa</i>	0.462	10.254	22.19480519	2.326	15.029
<i>Maripasoula</i>	0.412	9.692	23.52427184	3.088	23.111
<i>Camopi</i>	0.692	12.317	17.79913295	2.348	14.068
<i>Antécum-Pata</i>	0.248	7.169	28.90725806	2.18	12.408
<i>Saut-Athanase</i>	0.579	11.423	19.72884283	1.878	6.569
<i>Saut-Sabbat</i>	0.74	13.352	18.04324324	2.962	25.787
<i>Pierrette</i>	0.701	12.715	18.13837375	2.507	14.416
<i>Petit-Saut</i>	1.311	17.712	13.51029748	2.472	13.913
<i>Degrad-Roche</i>	0.768	13.879	18.07161458	3.342	25.722
<i>Saut-Bief</i>	2.674	27.091	10.13126402	3.368	22.726
<i>Karouabo</i>	9.035	141.696	15.68301051	31.526	1146.779

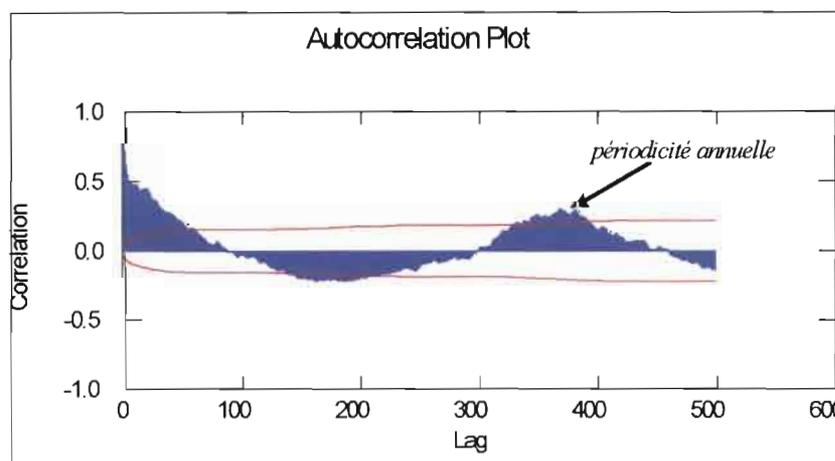
<i>Stations</i>	<i>der2-1</i>	<i>der2-2</i>	<i>der2-cv</i>	<i>der2-3</i>	<i>der2-4</i>
<i>Langu-Tabiki</i>	0.069	75.955	1100.797101	-0.34	6.192
<i>Saut-Maripa</i>	0.295	55.043	186.5864407	-1.038	12.452
<i>Maripasoula</i>	0.612	30.522	-49.87254902	-0.168	8.442
<i>Camopi</i>	-0.05	46.005	-920.1	-0.913	9.517
<i>Antécum-Pata</i>	0.08	12.52	156.5	-0.439	10.403
<i>Saut-Athanase</i>	-0.319	20.949	-65.67084639	-0.514	3.925
<i>Saut-Sabbat</i>	0.018	22.888	1271.555556	-0.281	6.459
<i>Pierrette</i>	-0.109	16.78	-153.9449541	-0.716	9.737
<i>Petit-Saut</i>	-0.171	32.212	-188.374269	-1.138	8.827
<i>Degrad-Roche</i>	-0.023	12.542	-545.3043478	-0.28	10.307
<i>Saut-Bief</i>	0.088	14.231	161.7159091	-0.471	4.386
<i>Karouabo</i>	0.001	2.09	2090	-1.82	14.004

Stations	der2rel-1	der2rel-2	der2rel-cv	der2rel-3	der2rel-4
Langu-Tabiki	-12,7	523,682	-41,23480315	-1,489	538,596
Saut-Maripa	-17,055	656,161	-38,47323366	3,127	290,161
Maripasoula	-8,882	512,857	-57,7411619	-12,808	795,066
Camopi	-26,716	1347,37	-50,43307381	-10,274	501,598
Antécum-Pata	-14,937	464,761	-31,11474861	-6,956	300,205
Saut-Athanase	-55,484	567,247	-10,22361401	-1,327	79,109
Saut-Sabbat	-24,706	695,169	-28,13765887	-2,302	190,904
Pierrette	-23,968	663,875	-27,69838952	2,532	190,177
Petit-Saut	-47,677	718,269	-15,06531451	-1,046	132,788
Degrad-Roche	-12,711	695,15	-54,68885218	-0,984	652,309
Saut-Bief	-33,222	1227,867	-36,95945458	4,087	492,578
Karouabo	-4,671	1347,37	-288,4542924	9,115	389,425

Ces indicateurs sont les premiers à entrer dans la caractérisation hydrologique finale (On applique pour ces tableaux toujours la même notation : lorsqu'il ne s'agit pas du coefficient de variation cv , les chiffres des titres des colonnes indiquent l'ordre des moments de la distribution des indicateurs précédemment décrits).

2.2.4. Analyse fréquentielle

Des techniques « classiques » telles que la recherche de fortes valeurs d'autocorrélation au sein de chaque courbe ou de fréquences dominantes par analyse de Fourier devaient permettre d'améliorer cette description préliminaire¹⁹. La première méthode renseigne sur les corrélations possibles entre des débits enregistrés à différentes dates, chaque fois décalées d'une même durée. Comme l'indique la figure suivante, elle n'a pas porté ses fruits, confirmant tout au plus la corrélation entre les débits séparés d'une année ou d'un semestre.

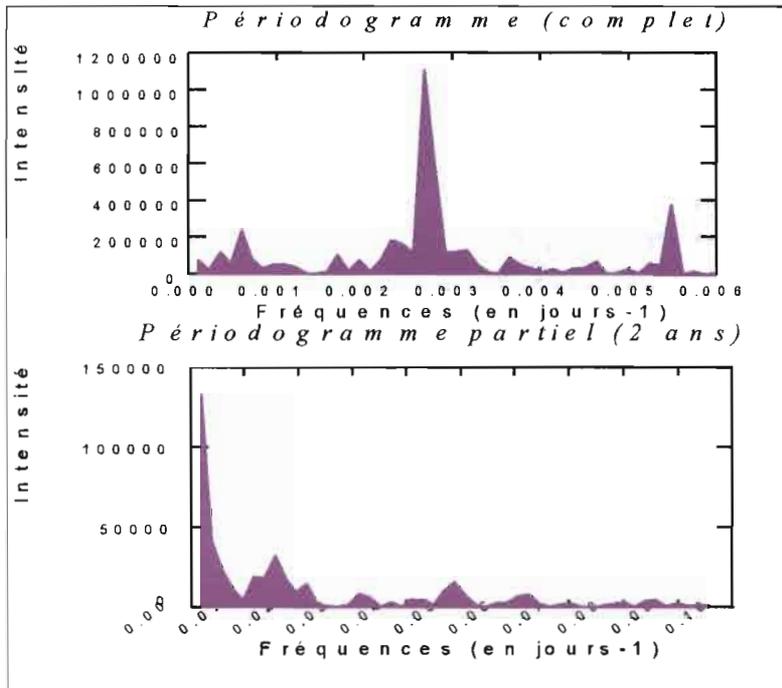


Indice sans unité (de 0 à 1) en fonction de la durée séparant deux débits corrélés.

Courbe d'autocorrélation de l'hydrogramme de la station Karouabo.

La deuxième méthode (Analyse de Fourier) décompose le signal hydrologique en une somme (théoriquement infinie) de fonctions périodiques. En pratique, on garde les périodes

majoritairement présentes dans le signal, qui renseignent souvent sur des phénomènes physiques périodiques sous-jacents²⁰. Là encore, malgré de nombreuses manipulations, aucune information pertinente n'a pu être extraite. On observe tout de même pour chaque cours d'eau une périodicité annuelle et, après découpages de la courbe, une autre légèrement inférieure au mois (de 21 à 28 jours) trahissant sans doute l'influence que l'on pensait négligeable de la marée.



Indice sans unité en fonction de la fréquence (en jours⁻¹) des 50 premières périodes des fonctions composant le signal.

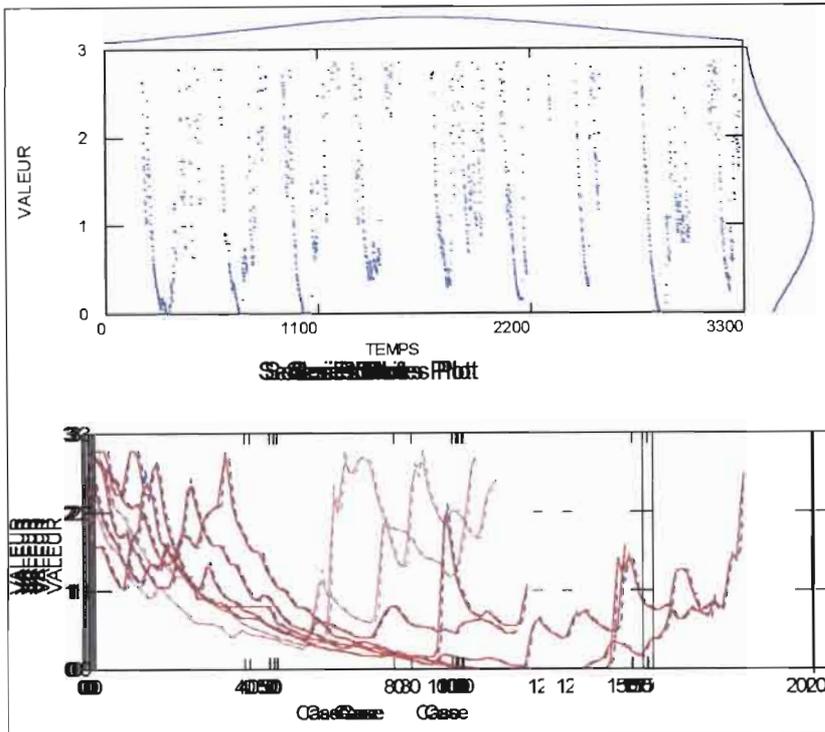
Périodogramme issu de l'analyse fréquentielle de Fourier de l'hydrogramme de la station Karouabo.

Fort de ces résultats négatifs, il était impératif de chercher une nouvelle méthode de caractérisation des variations de débits. Nous avons ainsi développé une approche pleinement novatrice basée sur la technique (décrite au chapitre suivant) des transformées en ondelettes.

2.2.5. Découpage de la courbe des débits

Les courbes de débit peuvent selon nous être appréhendées de deux façons distinctes : soit comme une courbe temporelle affublée de son sens physique (évolution dans le temps d'une quantité d'eau traversant une section choisie) comme nous venons de le faire, soit comme une succession de points sans signification *a priori*. Dans ce second cas, on peut chercher à caractériser les hydrogrammes par leur simple forme. C'est ce que nous avons tenté de faire en extrayant des « objets » hydrologiques (avec une signature bien définie) de la courbe initiale.

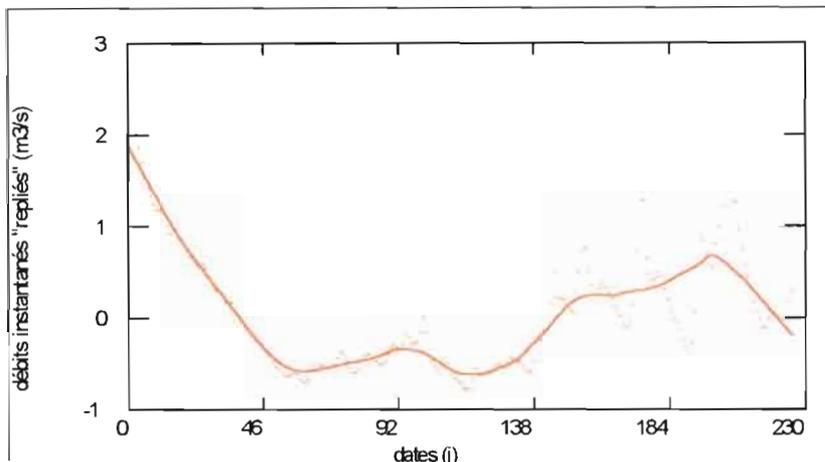
Nous avons ainsi cherché à découper la courbe en objets, dont les plus simples à première vue pouvaient être les crue et étiage annuels. Un exemple est montré sur la courbe de débit de la Karouabo enregistrée sur 9 années et dont on a gardé que les valeurs d'étiages standardisées (inférieurs à la médiane ici), *i.e.* ramenés à une moyenne nulle et un écart type égal à 1. La courbe est repliée manuellement. On observe une durée et une date de commencement variable à chaque nouvelle année.



Débits standardisés (moyenne = 0 ; écart type = 1) pour la comparaison, en fonction des jours de l'année ou de la période d'enregistrement.

Débits d'étiage de la Karouabo (coupés à la médiane) en fonction du temps (en jours). Seconde courbe identique, mais repliée manuellement.

Le résultat final est obtenu après moyennage et lissage (par les moindres carrés ici) de ces objets hydrologiques issus de différentes années. Une forme intéressante se détache, mais des variations importantes apparaissent au-delà du 140^{ème} jour. Ceci est clairement dû au découpage des objets (quel doit être le point 0 ? quelle durée exacte retenir ? etc.) qui introduit un biais sur la forme globale de l'étiage moyen.



Débits « d'étiage moyen » de la Karouabo en fonction du temps et moyenné sur les 9 années d'enregistrement.

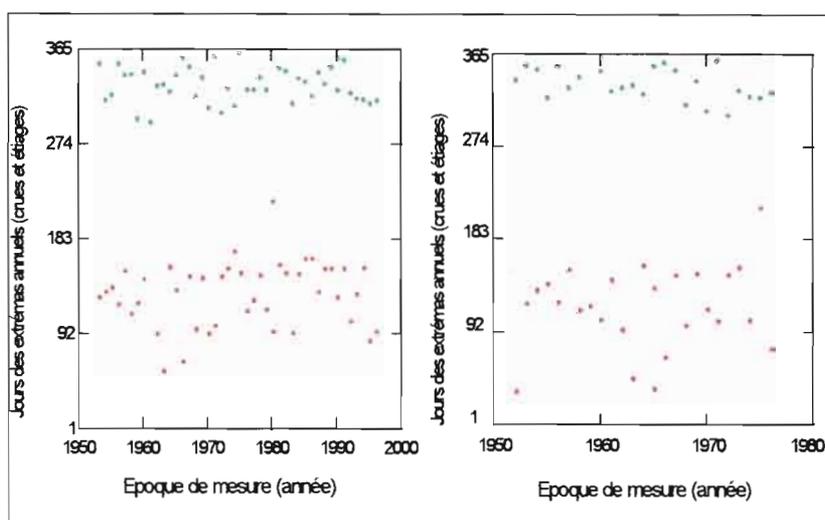
2.2.6. La forme des régimes

Nous n'avons pas réussi à découper de façon objective ces objets, dont la forme se révèle très dépendante du découpage et avons finalement décidé d'inverser les étapes de calcul. On commence par « replier » les hydrogrammes sur une année (périodicité dont on est sûr qu'elle a une réalité physique) et seulement après à les découper à l'aide de la médiane. On calcule enfin les moments de différents ordres qui décrivent les formes de la crue et l'étiage constituant cette courbe moyenne.

Stations	crue-1	crue-2	crue-cv	crue-3	crue-4	etiag-1	etiag-2	etiag-cv	etiag-3	etiag-4
Langa-Tabiki	70.95	80.34	1.13235	0.5746	-1.208	161.4	166.72	1.032962	0.1562	-1.807
Saut-Maripa	66.85	76.79	1.14869	0.6207	-1.142	158.52	163.1	1.028892	0.1536	-1.799
Maripasoula	67.28	77.34	1.14952	0.6171	-1.15	159.1	163.7	1.028913	0.1543	-1.797
Camopi	66.86	76.88	1.14987	0.6204	-1.142	158.51	163.09	1.028894	0.1534	-1.799
Antécum-Pata	66.2	76.53	1.15604	0.6291	-1.133	159.18	162.99	1.023935	0.1464	-1.797
Saut-Athanasie	62.83	74	1.17778	0.677	-1.071	155.56	160.54	1.032013	0.1721	-1.766
Saut-Sabbat	66.38	77.09	1.16134	0.6301	-1.143	159.99	163.84	1.024064	0.1509	-1.788
Pierrette	66.38	76.41	1.1511	0.6282	-1.131	157	162.44	1.03465	0.1655	-1.793
Petit-Saut	59.35	73.32	1.23538	0.4204	-1.008	156.05	162.22	1.039539	0.2184	-1.678
Degrad-Roche	66.25	76.47	1.15426	0.6297	-1.132	157.02	162.47	1.034709	0.1659	-1.792
Saut-Bief	53.15	67.05	1.26152	0.8333	-0.852	150.28	154.82	1.03021	0.2076	-1.667
Karouabo	52.43	68.43	1.30517	0.9028	-0.738	157.14	159.78	1.0168	0.2187	-1.584

2.2.7. Tendances pluriannuelles

Enfin, pour construire un dernier indicateur en conservant l'approche de manipulation de courbes de débits sans prendre en compte leur signification, on peut également répertorier les tendances pluriannuelles de variables telles que les dates de maxima ou de minima des débits.



Jour de l'année des extréma en fonction de l'année concernée.

Dates d'enregistrement des débits maximaux (rouge) et minimaux (vert) annuels des deux grands fleuves guyanais (Maroni et Oyapock).

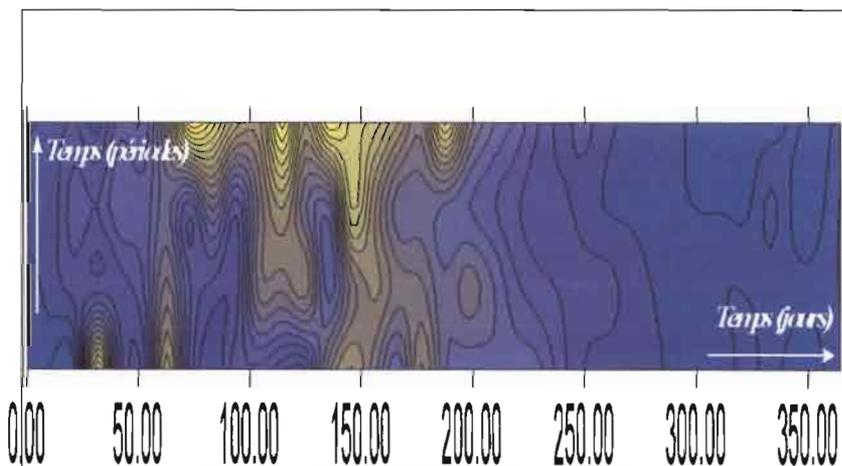
Ces diagrammes sont vraisemblablement chargés de nombreuses informations, mais leur combinaison rend très délicate l'observation de tendances pluriannuelles. C'est pourquoi nous avons mis au point une nouvelle technique de représentation des évolutions temporelle des débits (ou de toutes autres variables temporelles continue ou discrète d'ailleurs). Nous l'avons nommé MNH (Modèle Numérique Hydrologique) par analogie au MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui se révèle un guide fructueux pour l'exploitation de cette méthode de visualisation. Celle-ci est décrite en détail dans la section suivante.

2.3. nouvelles approches

2.3.1. Le MNH

Comme nous l'avons vu, les indicateurs statistiques habituellement usités pour la caractérisation hydrologique d'un régime offrent un cadre intéressant quoique restreint pour notre étude. Nous avons développé deux méthodes complémentaires pour différencier les cours d'eau relativement semblables de la région guyanaise.

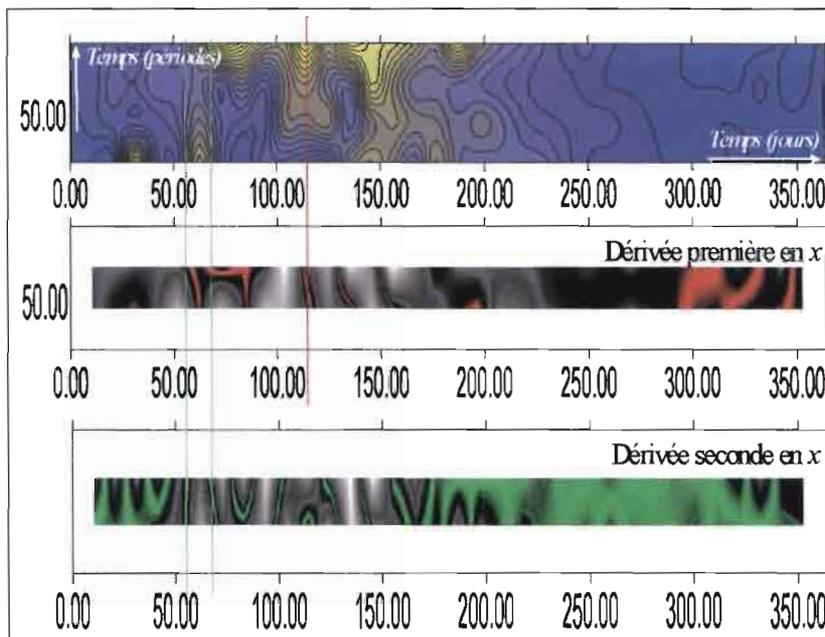
La première, le MNH, consiste en une nappe (*i.e.* une surface visualisée en 3D) construite à partir de l'hydrogramme. On découpe ce dernier selon sa période la plus marquée (l'année dans notre cas) et l'on dispose côte à côte les morceaux de courbes de débits obtenus. On les relie alors par interpolation (polynomiale exacte dans un premier temps), selon une nappe en 3D qui représente les débits selon l'axe z , le temps à la fréquence d'échantillonnage de la mesure selon l'axe des x , et le temps cette fois-ci par périodes successives selon l'axe des y . On doit donc « lire » la surface différemment selon la résolution temporelle choisie, *i.e.* selon l'angle de lecture avec les axes.



Débits en fonction des jours (en x) et des périodes (ici années, en y).

MNH de la station hydrologique de Camopi sur les 27 années d'enregistrement.

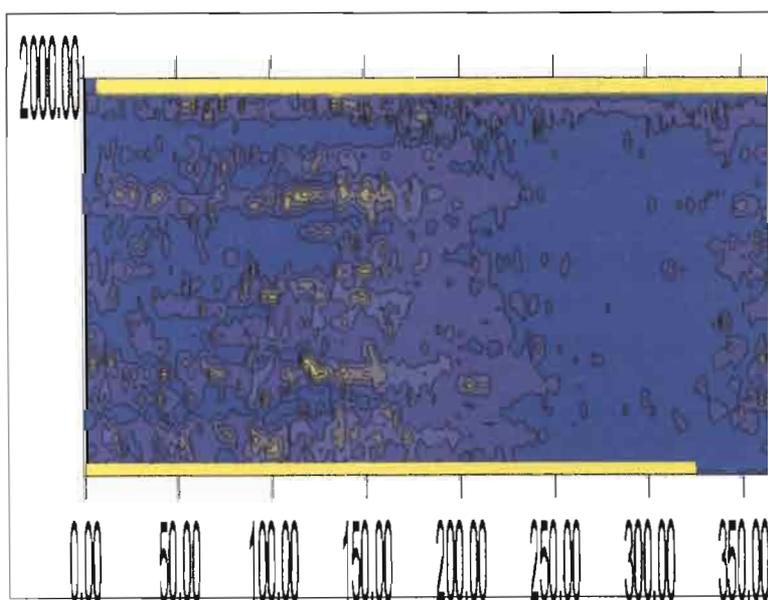
Avec le MNH, nous avons naturellement créé de nouveaux objets hydrologiques que sont les montagnes (en jaune) et les vallées (en bleu) qu'il contient. Les premières représentent les crues annuelles autant que leur perpétuation au fil des années. Les secondes montrent les étiages annuels qui perdurent ou disparaissent au fil des décennies.



Mêmes axes que le MNH. Les dérivées sont nulles lorsqu'elles sont colorées (en rouge et vert).

MNH et ses dérivées premières et secondes (selon l'axe des x) de la station hydrologique de Camopi sur les 27 années d'enregistrement.

Cette surface rend très aisée la déduction de tendances pluriannuelles, que l'on peut ultérieurement quantifier à l'aide des dérivées en 2D qu'elle sous-tend. La dérivée première s'annule au sommet des montagnes (donc au maximum des crues) et dans le creux des vallées (au minimum des étiages), tandis que la dérivée seconde qui s'annule aux points d'inflexion devrait permettre de découper astucieusement et surtout objectivement les objets précédemment décrits. Le MNH a beaucoup d'autres applications comme celle de déceler les absences ou erreurs de mesure des débits : la mise en eau du barrage de petit saut saute aux yeux sur son MNH, à l'instar des artefacts causés par l'absence de données de la station Saut sabbat.



Débits en fonction des jours (en x) et des périodes (ici années, en y).

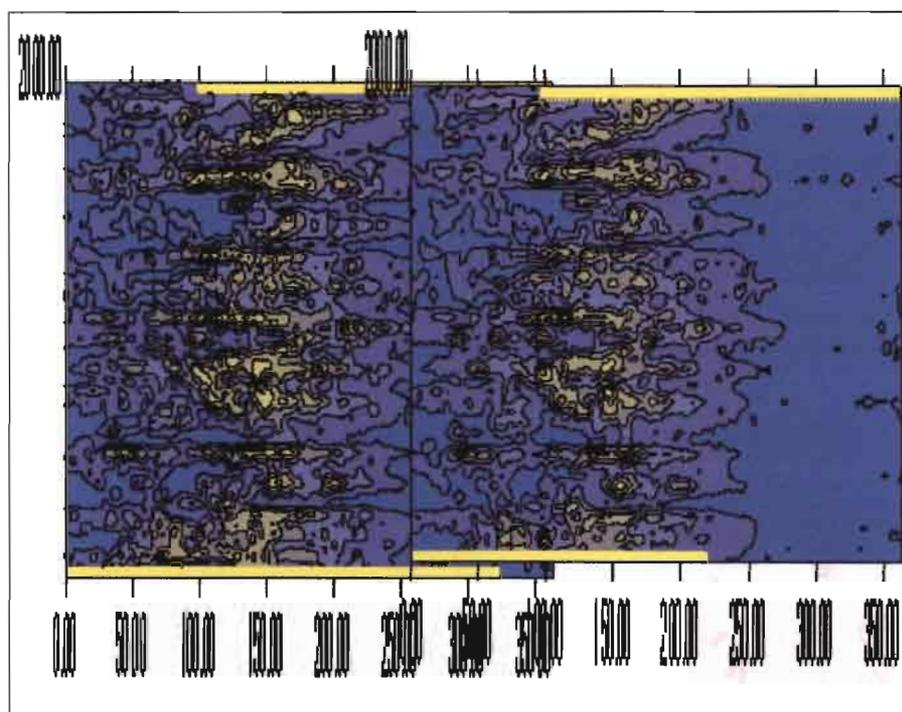
MNH de la station hydrologique de Petit saut (barrage sur la Sinnamary). La mise en eau du barrage dans les dernières années saute aux yeux : il n'y a pas de crue annuelle !

Malgré ses qualités, le MNH n'a pas rempli son rôle d'indicateur pour caractériser avec précision les différents cours d'eau de notre échantillon, et ce pour plusieurs raisons :

- D'abord, le MNH n'est pas un indicateur en soi et il aurait fallu se munir d'un arsenal mathématique pour exploiter des variables abritées par la nappe du MNH. Un travail est

actuellement en cours pour tenter d'exploiter dans ces moindres retranchements cette nouvelle notion.

- Le MNH s'est également révélé très dépendant des mailles et méthodes d'interpolation choisies pour relier les valeurs des débits dans l'espace (x, y, z) . Nous avons fait les choix les moins contraignants et les moins difficiles à justifier théoriquement : maille $[1 * 1]$ (*i.e.* les jours en x sont séparés de la même distance que les années en y) puis de $[7 * 7]$, tandis que l'interpolation polynomiale est exacte (*i.e.* passant par les points de la nappe).
- Ensuite et surtout, les MNH des différents cours d'eau de Guyane se ressemblent étrangement. Ils trahissent avec une précision inattendue les variations climatiques, pluviométriques à l'origine des débits. Ils ne nous ont donc pas permis de différencier les cours d'eau et de leur associer des caractéristiques flagrantes.

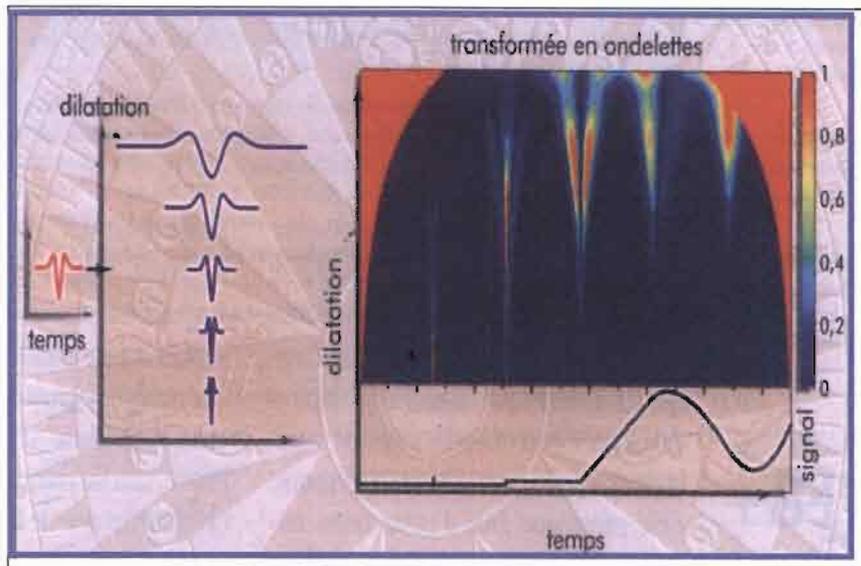


Débits en fonction des jours (en x) et des périodes (ici années de 1951 à 1999, en y , sont superposées pour les 2 graphes).

Comparaison des MNH des stations des grands fleuves frontières de Guyane : on identifie les objets hydrologiques deux à deux.

2.3.2. les ondelettes

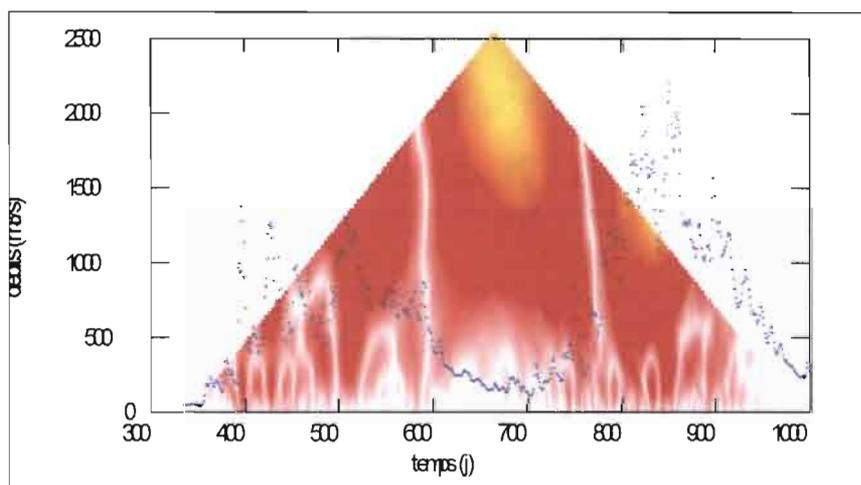
La seconde méthode novatrice que nous avons développée utilise la transformation en ondelettes des courbes de débits, pour palier les déficiences des analyses fréquentielles standards. Elle s'appuie sur les mêmes bases mathématiques que la décomposition en série de Fourier et cherche des corrélations entre le signal (l'hydrogramme pour nous) et une famille de courbes²¹. Ces dernières sont toutes de formes identiques, mais plus ou moins dilatées. C'est en jouant sur ce facteur de dilatation que l'on peut examiner les variations courtes ou plus étendues du signal. La transformée en ondelettes est une sorte de zoom mathématique²² !



« L'ondelette mère » est en rouge à gauche, son coefficient de dilatation croît selon l'axe y , l'axe x représente le temps, tandis que les couleurs indiquent l'intensité de la corrélation (de 0 à 1).

Principe de la transformation en ondelettes d'un signal (ici sismologique).

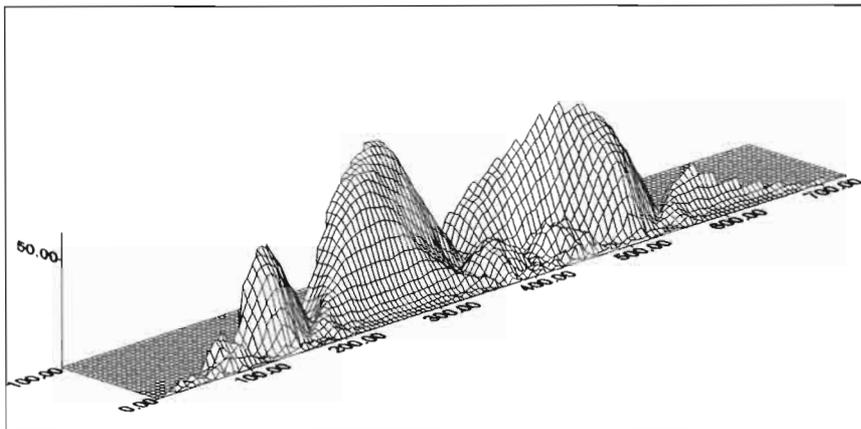
Comme on le devine sur l'exemple ci-dessus, la distribution des coefficients d'ondelettes (qui traduisent l'intensité de la corrélation entre une ondelette à dilatation fixée et le signal) permet d'identifier autant que de caractériser les accidents du signal temporel. Le dernier accident par exemple n'est pas détectable initialement sur la courbe. Nous avons ainsi eu l'idée de dresser des cartes de coefficients en ondelettes pour tous les cours d'eau guyanais et d'étudier leurs différences. Il nous a fallu pour ce faire, choisir une ondelette mère (le « chapeau mexicain », l'un des plus simples à manipuler) et programmer la recherche de corrélations (sous Visual Basic 6.0²³)²¹.



La carte des coefficients en ondelette en arrière plan (forte corrélation en jaune, faible en blanc). Les débits transformés sont en sur-épaisseur en bleu.

Décomposition en ondelettes d'un an et demi de débits de la Karouabo.

Nous avons commencé par replier les hydrogrammes de chaque station sur un an pour garder toute l'information sous-jacente, mais lisser les variations temporelles. Nous l'avons ensuite dédoublée pour tenir compte du fait que les variations qui vont réellement différencier les régimes entre eux seront concentrées dans la crue, qui est souvent à cheval sur deux années.



Autre représentation de la carte des coefficients en ondelettes. On distingue nettement les 2 bosses centrales caractérisant chaque bassin versant.

Calculée sur cette courbe moyenne, on retrouve dans la carte des coefficients une succession de fortes corrélations à longues échelles temporelles au moment des étiages annuels (ces derniers sont en effet suffisamment lisses pour ressortir ainsi, en jaune) et de faibles corrélations à courtes échelles temporelles au moment des crues annuelles (elles sont très torturées, en blanc). Ces représentations laissent espérer que l'on pourra dissocier les caractéristiques propres à chaque cours d'eau.

On peut faire une analyse de ces cartes à deux échelles : l'une globale (renseignant sur l'ensemble du profil des débits) en estimant les indicateurs statistiques standards de la distribution des coefficients, l'autre « zoomée » sur la partie localement variable (les deux bosses au premier plan de la deuxième représentation). La première est suffisante pour notre étude. Nous avons adjoint aux calculs des moments d'ordre 1 et 2, au coefficient de variation et au débatement de l'histogramme (maximum – minimum), une estimation de la surface et du volume (seuls et spécifiques, *i.e.* ramenés à la même surface) de la nappe sur la même durée. Les résultats sont consignés dans ce tableau.

Stations	ond-1	ond-2	ond-cv	ond-range	ond-surf	ond-vol	ond-surf-spe	ond-vol-spe
Langa-Tabiki	3799	4540	1.19505133	17160	6410000	146000000	1687.28613	38431.1661
Saut-Maripa	1854	2217	1.19579288	8382	3076000	71300000	1659.11543	38457.3894
Maripasoula	1695	2030	1.19764012	7706	2860000	65200000	1687.31563	38466.0767
Camopi	1210	1429	1.18099174	5402	2000000	46500000	1652.89256	38429.7521
Antécum-Pata	702	835	1.18945869	3207	1191000	27000000	1696.5812	38461.5385
Saut-Athanase	494	572	1.15789474	2191	903189	18900000	1828.31781	38259.1093
Saut-Sabbat	544	641	1.17830882	2417	998504	20900000	1835.48529	38419.1176
Pierrette	382	456	1.19371728	1729	685425	14700000	1794.30628	38481.6754
Petit-Saut	325	371	1.14153846	1419	661303	12500000	2034.77846	38461.5385
Degrad-Roche	416	494	1.1875	1876	713503	16000000	1715.15144	38461.5385
Saut-Bief	184	208	1.13043478	807	362329	7070000	1969.17935	38423.913
Karouabo	15	16	1.06666667	62	52011	582200	3467.4	38813.3333

A un examen attentif, ces indicateurs semblent se comporter de la même manière que les débits (décroissance régulière avec l'importance des bassins) et l'on s'attend à une certaine redondance

entre eux. Ce fait sera confirmé au dernier chapitre, dans lequel on ne pourra pas exploiter directement les valeurs de ce tableau. Il faut ici raisonner en relatif (et non en absolu), ce qu'autorise les couleurs des cartes de coefficients. On note plusieurs particularités :

- Plus les bassins sont étendus et plus les cartes sont lisses (couleurs uniformes, sans dédoublement des « ponts » de couleurs comme pour la Karouabo ou Petit-saut). Il est donc heureux de retrouver leur caractère intégrateur. Ceci mériterait d'être confirmé pour une même période d'enregistrement des débits.
- On retrouve également leur temps de réponse par la position de la transition (blanche) à grande échelle temporelle entre les saisons de crue et d'étiage. Outre le fait d'apporter confirmation à ce fait connu, ces cartes peuvent être un moyen pratique de quantifier le phénomène.
- On observe une « dérive » de la transition (blanche) vers la droite à mesure que l'on va vers les petites échelles temporelles pour les fleuves de l'Ouest de la Guyane (reciproquement vers la gauche pour les fleuves de l'Est). Ceci peut certainement s'expliquer par les tendances pluviométriques de la région et demande à être vérifié.

La Comté, ainsi que les autres petits bassins, se démarquent là encore.

2.3.3. Sensibilité à l'échelle

Nous avons brièvement estimé la sensibilité des indicateurs hydrologiques que nous avons identifiés à l'échelle temporelle. On se doute de leur grande dépendance à l'échelle. Nous avons simplement moyenné les valeurs quotidiennes de la courbe de débit la plus longue (Station de Langata biki) sur le mois. Les variables statistiques s'en trouvent généralement fortement modifiées et on observe des variations presque toutes supérieures à $\pm 100\%$. Tous sont donc très sensibles, mais l'information est trop précieuse pour s'en défaire. L'échelle intermédiaire qui moyenne les valeurs sur la journée est celle retenue.

Langata	débit	der1-1	der1-2	der1-cv	der1-3	der1-4	der1rel-1	der1rel-2	der1rel-cv
									2
journalier	1798	0.073	137.76	1887.2	1.212	5.539	0.421	9.617	22.843
mensuel	1689	2.549	668.84	262.39	0.1	-0.372	20.554	89.661	4.3622
variation	6.255	-188.9	-131.7	151.2	169.5	228.8	-192	-161.3	135.9
Langata	der1rel-3	der1rel-4	der2-1	der2-2	der2-cv	der2-3	der2-4	der2rel-1	der2rel-2
									1
journalier	2.395	13.371	0.069	75.955	1100.8	-0.34	6.192	-12.7	523.68
mensuel	2.926	13.033	-0.798	460.26	-576.8	0.998	0.691	33.233	888.27
variation	-19.96	2.56	-237.9	-143.3	640.2	-406.7	159.8	-447.4	-51.64
Langata	der2rel-cv	der2rel-3	der2rel-4	ond-1	ond-2	ond-cv	ond-range	ond-surf	ond-vol
journalier	#REF!	-1.489	538.6	3799	4540	1.1951	17160	6E+06	1E+08
mensuel	#REF!	8.209	98.216	696.11	631.88	0.9077	2197.2	13621	17056
variation	#REF!	-288.6	138.3	138.1	151.1	27.33	154.6	199.2	200

2.4. Bilan

En conclusion pour la composante hydrologique de ce projet, nous disposons de 4 groupes d'indicateurs, nommément : ceux concernant les dérivées premières et secondes des débits, ceux caractérisant la forme de l'hydrogramme moyen annuel (cruet et étiage), ceux ayant trait aux cartes de coefficients en ondelettes obtenus à partir des mêmes régimes. Nous avons écarté les études fréquentielles « standards » ainsi que le MNH, qui se révèlent intéressants dans un autre contexte que le notre.

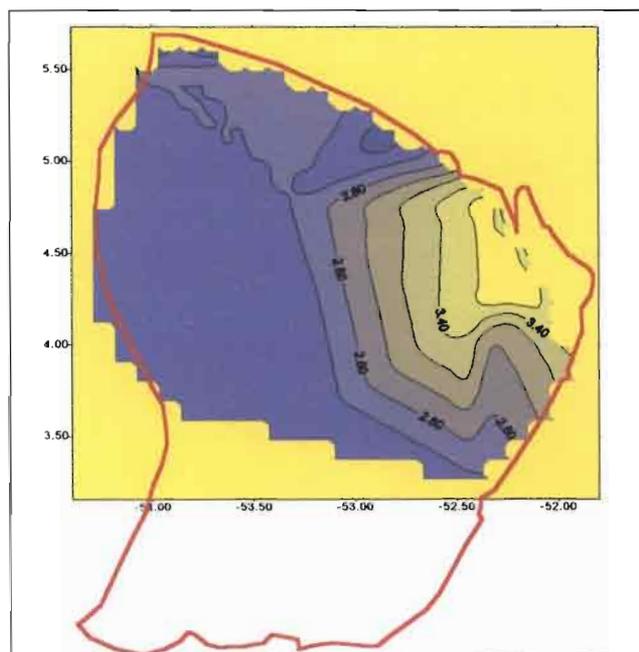
A ce stade, nous ne départageons pas encore les plus pertinents d'entre eux. Nous attendrons de disposer des indicateurs dits « morphologiques » pour trancher, puis classer les bassins versants ainsi caractérisés.

3. Description morphologique

3.1. les données

3.1.1. La distribution pluviométrique

Avant de décrire le réseau hydrographique examinons la carte pluviométrique de la Guyane. Celle-ci a été élaborée à partir des enregistrements d'une vingtaine de stations Météo France, essentiellement disséminées le long du littoral. Nous touchons ici du doigt la difficulté à se procurer des informations de quelque nature que ce soit sur les zones reculées du département. Ces données nous renseignent toutefois avec une précision variable sur la distribution spatiale des pluies. On observe un gradient pluviométrique de l'intérieur du continent à la côte, de 2.5 à 4m par an (sur la période de synthèse : 1961 – 1990), avec un maximum centré sur les montagnes de Kaw.



↑ Nord géographique. Coordonnées en latitudes / longitudes (degrés décimaux).

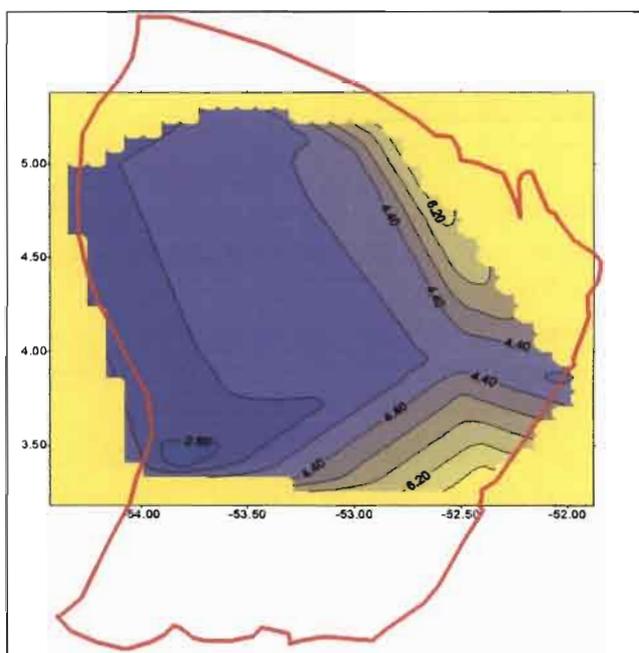
Carte des isohyètes de la Guyane d'après des données Météo France enregistrées entre 1961 et 1990. On note l'absence de données sur la moitié sud du département.

Pour l'étude qui nous concerne, on notera la grande homogénéité des pluies sur l'ensemble des bassins versants étudiés⁶ (à moins que cela ne soit un biais de mesure). A l'exception des relativement petits bassins de l'Approuague et de la Comté, les stations hydrologiques sont suffisamment éloignées de la côte pour que leur bassin versant ne subisse pas ce gradient pluviométrique et soit arrosé en moyenne par la même quantité. Précisons que, sauf mention de notre part, les cartes de ce rapport sont présentées après interpolation polynomiale exacte (*i.e.* utilisant un polynôme qui passe par les points de mesure à interpoler)²⁴.

3.1.2. La distribution hydrométrique

Nous avons dressé la carte des débits moyens spécifiques (*i.e.* ramenés à une même surface de bassin versant) des fleuves étudiés pour appréhender la répartition spatiale de l'abondance des cours d'eau. Elle suit d'assez près la distribution des pluies en Guyane, exception faite de la station de Camopi qui peut être à l'origine d'un biais dans la partie sud-est (pour des raisons déjà évoquées). On peut s'en convaincre en prêtant à cette station un débit spécifique égal à la moyenne des autres et en retrouvant dès lors la même distribution que la carte pluviométrique.

Cette seconde carte est une façon rapide de confirmer l'homogénéité du comportement hydrologique des sols en Guyane, connus pour être une simple couche de latérite sur une cuirasse ferrallitique²⁵. La majorité des eaux de pluie se retrouvent ainsi tôt ou tard dans les écoulements de surface et le rôle de réservoir du sous-sol semble réduit (excepté dans certaines arènes)⁶. Ce point a son importance plus loin, lorsque nous discuterons le choix des indicateurs spatiaux.



↑ Nord géographique. Coordonnées en latitudes / longitudes (degrés décimaux).

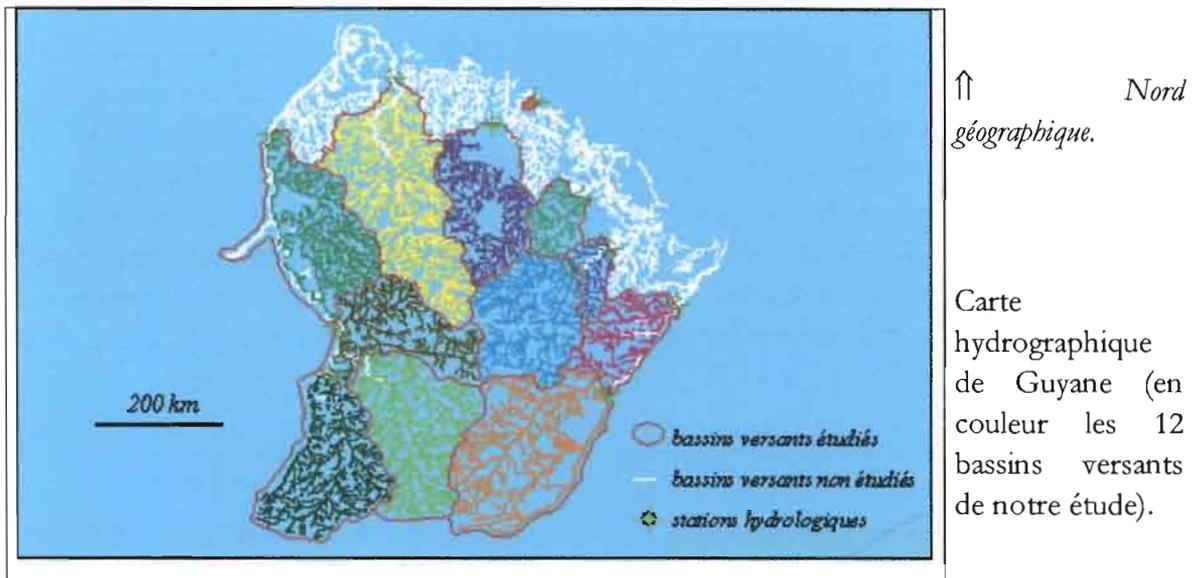
Carte des débits spécifiques de la Guyane rendant compte de la distribution spatiale de l'abondance des cours d'eau. La station de Camopi, mal étalonnée, biaise la partie sud-est.

La composante physio-géographique des bassins versants renvoie aux paramètres des réseaux hydrographiques que l'on espère extraire des données de télédétection. Le réseau hydrographique doit synthétiser à sa manière les contraintes environnementales du bassin versant, notamment : sa géologie, sa pédologie, sa topographie ou encore sa végétation²⁶. Une première étape consiste à extraire le réseau hydrographique des images à notre disposition. Une partie du réseau hydrographique guyanais (à basse résolution) a déjà été numérisé et a servi de base à ce travail.

3.1.3. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la Guyane est d'une grande densité qui s'explique surtout par l'absence de relief marqué. Ce dernier excède rarement 400m d'altitude dans le département et contraint donc les cours d'eau à se former là où tombe la pluie, puis à « sinuer » naturellement jusqu'au littoral. Les stations hydrologiques de notre échantillon ont été placées à une distance importante de la côte pour s'abstraire de l'influence de la marée. Elles nous définissent des

bassins versants (zone collectrice en amont du point de mesure) plutôt allongés, qui se jouxtent et couvrent plus de 90% du territoire.



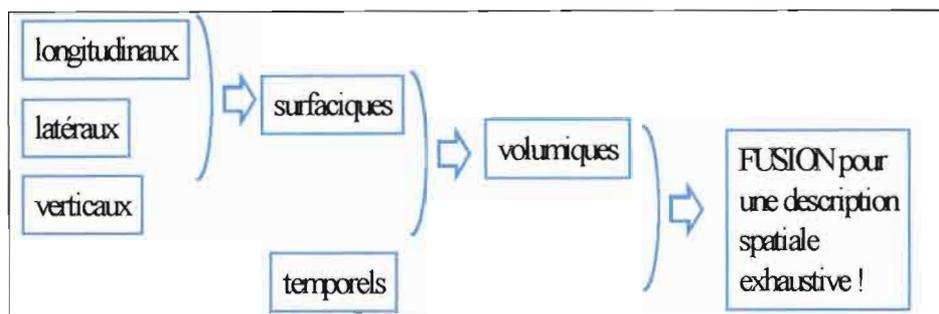
Nous avons volontairement ôté de notre examen le bassin de la Sinnamary qui accueille le barrage et ne peut donc être comparé aux autres dans sa morphologie. Nous ne disposons que des réseaux hydrographiques des bassins versants de Guyane, ce qui est contraignant pour les bassins des grands fleuves frontières (dont respectivement 56% et 50,8% sont au Surinam et au Brésil). Nous verrons dans le paragraphe dédié à leur analyse texturale comment contourner cette difficulté.

Entre autre difficulté, il est important de mentionner qu'il n'existe pas à ce jour de MNT (Modèle Numérique de Terrain²⁷) sur la Guyane. Ce manque sera discuté dans le paragraphe traitant des limites de l'étude.

3.2. Description standard

3.2.1. Les indicateurs morphologiques

Comme pour le chapitre précédent, il était crucial d'adopter la logique la plus rigoureuse et la plus exhaustive possible dans le choix des indicateurs morphologiques (dits aussi : « spatiaux ») qui allaient décrire les bassins versants. L'approche de cette composante purement spatiale de l'étude nous a suggéré de regrouper ses indicateurs par dimensions. Seront longitudinaux ceux qui sont calculés « le long du fleuve », latéraux ceux estimés en « regardant perpendiculairement au fleuve », etc.²⁸



Logique du choix des indicateurs spatio-morphologiques de notre étude.

A cette première liste, il est possible d'ajouter toutes les combinaisons imaginables entre ces indicateurs de base, ainsi que leur évolution temporelle si la région d'étude change rapidement (par exemple sous la pression anthropique). Nous ne sommes pas allés aussi loin : les combinaisons se prêtent plutôt aux études locales des bassins, bassins qui en Guyane évoluent bien plus lentement que l'échelle temporelle d'examen.

Le tableau ci-dessous donne une liste non exhaustive des indicateurs de base (dont certains complètement nouveaux) que nous aurions pu retenir pour ce projet. Ne pouvant matériellement pas tous les tester, nous n'avons retenu que des indicateurs longitudinaux et surfaciens. En effet, le relief inexistant de la Guyane réduit l'intérêt de ceux verticaux, tandis que l'uniformité du terrain (sol + végétation) qui compose le bassin rend l'étude de gradients latéraux peu pertinente⁶. Ces derniers auraient en plus nécessités de nombreuses images satellitales haute résolution que nous n'avions pas.

Longitudinaux	Latéraux	Surfaciens	Verticaux, Volumiques
<ul style="list-style-type: none"> • Longueurs • Courbures • Directions • Parallélisme • Angles de confluence • Taux de bifurcations • Valeurs hiérarchiques • Nb de sauts • Fractalité ... 	<ul style="list-style-type: none"> Distance au cours d'eau ou pourcentage de : • Végétation ripicole • Cultures • Autres zones anthropisées • Textures • Largeur du cours d'eau principal ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaisons des précédents • Densité et fréquences des points et des confluences • Surface BV en amont d'un point • Surfaces d'inondation et de cultures • Pentes et expositions 2D • Fractalité ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Coupe du talveg et de la végétation • Volume en amont d'un point • Fractalité ...

Certains indicateurs spatiaux étaient autant incontournables que simples à concevoir. C'est le cas de la longueur (indicateur longitudinal) des bras de cours d'eau et de la densité du réseau hydrographique (surfaciens)²⁹. Un bras de rivière est sa partie coincée entre une source et une confluence ou entre deux confluences. Pour chacun d'eux le résultat du calcul se présente comme une carte des valeurs d'indicateurs directement superposable à celle du bassin. On l'obtient en interpolant « prudemment » les valeurs estimées en certains point du réseau (nous y reviendrons)²².

Nous avons également testé des indicateurs plus complexes, tels que ceux qui trahissent la hiérarchie du réseau hydrographique ou la distribution de sa surface collectrice. Ces derniers

auraient nécessité plus de temps pour être parfaitement mis au point et ne se sont pas révélés assez pertinents pour cette composante du projet.

3.2.2. Traitement préliminaire

Les premières étapes donnant accès à ces indicateurs sont génériques. Le réseau hydrographique à notre disposition était sous forme vecteur (*i.e.* constitué d'un ensemble de figures géométriques de base, impossible à manipuler pour nos calculs). Il nous a fallu rastériser les différents bassins versants (*i.e.* les transformer en une succession de pixels noirs sur fond blanc disposés à reproduire la forme des cours d'eau³⁰). La taille de ces pixels représente d'ailleurs la résolution à laquelle le fleuve est vu. Nous l'avons choisi à l'échelle intermédiaire de 100m dans un premier temps.

Cette rastérisation est laborieuse et suppose de passer par différents formats de fichiers (qui plus est, pour chaque bassin) afin de garder le contrôle de la forme du réseau initial. L'étape suivante consiste d'ailleurs à « nettoyer » le réseau obtenu de sorte à éviter l'accrétion de points ou le dédoublement de bras de cours d'eau. C'est encore plus fastidieux, notamment parce qu'il n'est pas possible de nettoyer sans règles précises. Sans rentrer dans les détails, nous nous sommes imposés de déformer le moins possible la représentation initiale.

Les fichiers sont à présents prêts à être manipulés, il faut programmer (encore sous Visual Basic 6.0²³) les algorithmes qui permettent de parcourir le réseau. Nous n'avons pas de MNT disponible rappelons-le et ne pouvons donc pas utiliser les techniques habituelles qui reposent sur la « descente du terrain » selon la plus grande pente (comme le fait l'eau²⁹). Il nous a fallu affiner les programmes existants pour éviter notamment de revenir en arrière et être sûr de ne pas omettre de bras.

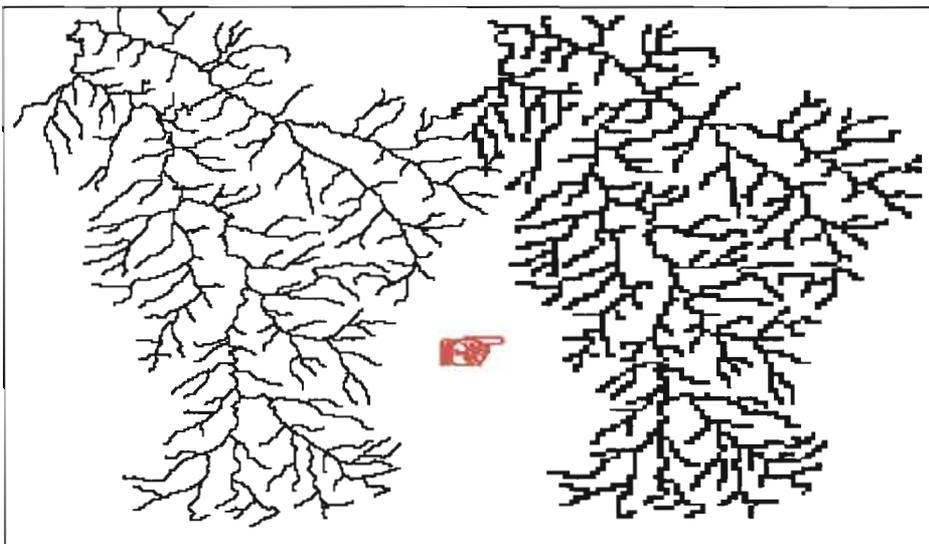
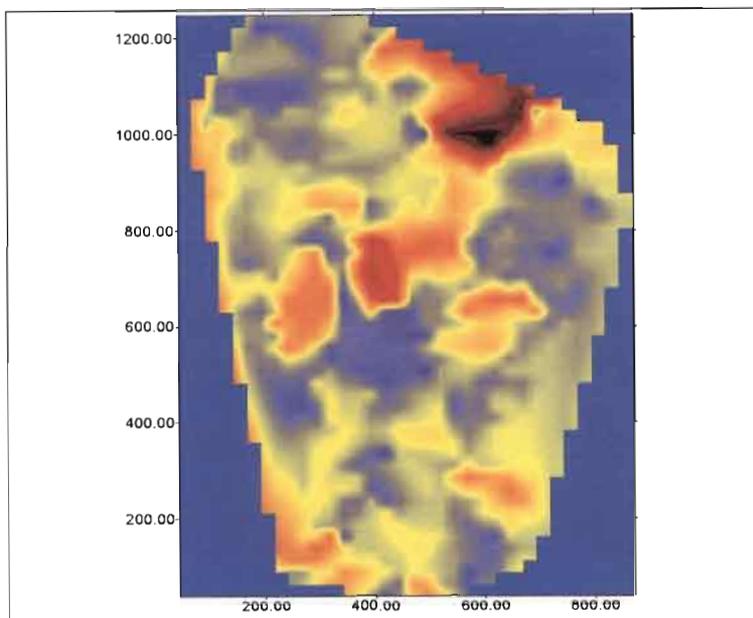


Illustration grossière du passage d'un fichier vecteur à un fichier raster (station Dégrad Roche). On note la taille des pixels finalement obtenus.

3.2.3. Les longueurs

Pour la carte des longueurs des bras de cours d'eau, on attribue comme longueur à chaque pixel du réseau hydrographique, le nombre de pixels de son bras. Cette définition de la longueur n'est possible que parce l'on moyenne dans toutes les directions du plan les erreurs causées par la forme carrée des pixels : sur un bras isolé, 5 pixels placés horizontalement ou en diagonale

n'auront pas la même longueur. Ces valeurs de l'indicateur, placées à des endroits précis (en données cartographiques, unité 100m) peuvent ensuite être interpolées et former une surface visualisable en 3D, ou en 2D à l'aide d'une échelle de couleur.



↑ Nord géographique. La carte est en coordonnées cartographiques (unité de 100m). L'échelle des couleurs est bleue/jaune/rouge/noir.

Carte des longueurs du bassin versant de la station Degrad-Roche (représentée juste au-dessus).

Une telle carte est elle aussi exploitable de 2 façons : soit localement en interprétant les fluctuations observées en un endroit comme l'influence combinée de facteurs tels que le relief ou la pédologie, soit globalement en examinant comme nous l'avons fait pour la carte en ondelettes la distribution de leurs valeurs sur l'ensemble du bassin décrit. La première démarche sort du cadre de cette étude ; nous avons retenu la seconde. Le tableau suivant résume les calculs pour ce premier paramètre, qui ne nécessite pas d'interpolation (les valeurs brutes sont utilisées).

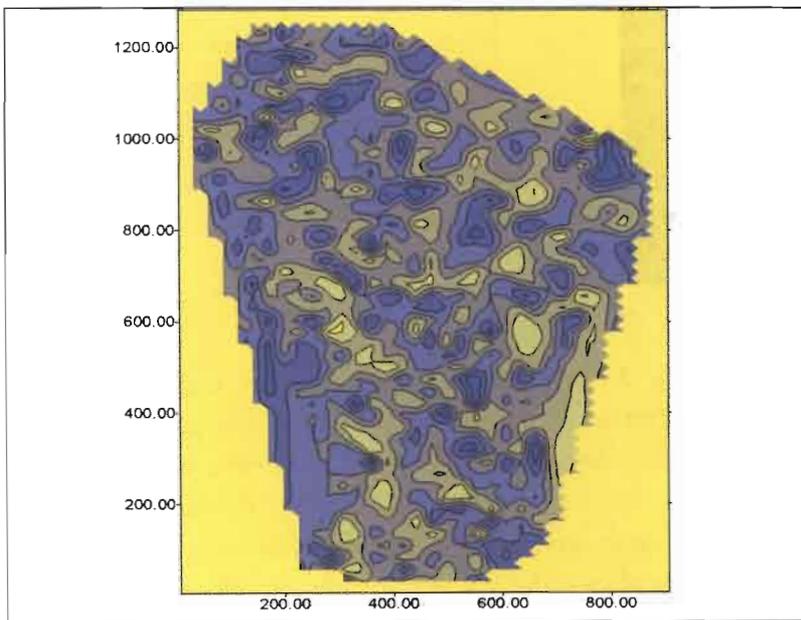
Stations	long-1	long-2	long-cv	long-3	long-4
Langa-Tabiki	112.747	69.923	0.620176147	222.5	233.64
Saut-Maripa	149.459	12.661	0.084712195	191.23	240.76
Maripasoula	85.094	50.235	0.590347146	1.369	3.192
Camopi	151.206	122.396	0.809465233	130.62	20.96
Antécum-Pata	107.293	64.888	0.604773844	105.18	94.21
Saut-Athanase	112.937	63.569	0.562871335	65.81	33.09
Saut-Sabbat	95.088	52.793	0.555201498	88.85	73.22
Pierrette	119.304	64.35	0.539378395	54.5	25.14
Petit-Saut					
Degrad-Roche	111.578	63.185	0.566285468	108.11	149.84
Saut-Bief	270.797	170.834	0.630856324	66.105	16.79
Karouabo	55.308	2.015	0.036432343	-0.331	-2.055

La longueur moyenne des bras de cours d'eau est de $10,5 \pm 7,3$ km avec un maximum à 27 km pour le bassin atypique de la Comté. Ce dernier semble en effet uniformément plat, même si d'autres bassins peuvent localement présenter un tel caractère (et dont les effets sont moyennés

avec d'autres zones au relief accentué). Cet indicateur apparaît, comme on pouvait s'y attendre très corrélé au relief.

3.2.4. Les densités

Partant des mêmes fichiers raster, nous avons localement estimé la densité du réseau hydrographique en attribuant à chaque pixel le nombre de ses voisins appartenant au réseau dans une fenêtre de taille constante. Après plusieurs tests, nous avons choisi une fenêtre circulaire de rayon 40 pixels, taille intermédiaire ne favorisant pas les petits ou grands bassins versants et permettant de recueillir suffisamment de points dans les zones peu denses²⁹. Plus loin, nous discutons l'influence de cette taille.



↑ Nord géographique. La carte est en coordonnées cartographiques (unité de 100m).

Carte des densités du bassin versant de la station Degrad-Roche. On note son hétérogénéité.

Pour l'interprétation finale, nous avons modifié la visualisation de la carte finale (avec la même méthode d'interpolation) et avons estimé de la même manière les variables statistiques décrivant la distribution des valeurs sur tout le bassin. Les variations sont significatives et renseignent efficacement sur le réseau de nos cours d'eau.

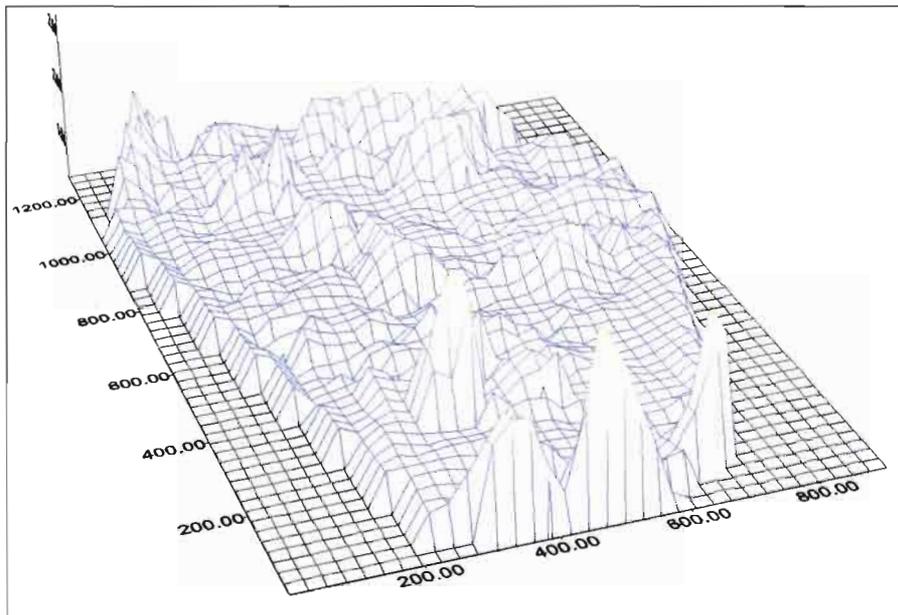
Stations	dens-1	dens-2	dens-cv	dens-3	dens-4
Langa-Tabiki	202.93	59.643	0.29391357	0.13	-0.33
Saut-Maripa	178.96	58.401	0.32633732	0.331	0.072
Maripasoula	201.33	57.698	0.28659133	0.185	-0.067
Camopi	173.75	52.194	0.30040058	0.183	-0.065
Antécum-Pata	201.66	54.065	0.26809977	0.092	-0.384
Saut-Athanase	194.95	71.106	0.36473406	0.425	-0.172
Saut-Sabbat	213.54	64.333	0.30127614	0.138	0.185
Pierrette	198.32	65.801	0.33179373	0.395	0.017
Petit-Saut					
Degrad-Roche	184.13	53.624	0.2912306	0.017	-0.395
Saut-Bief	128.01	43.518	0.33994719	0.265	-0.585

La densité moyenne sur la Guyane est de 201 ± 63 points, soit 38 ± 1.2 points par km^2 . Contrairement aux longueurs, on observe une faible dispersion (quoique cohérente avec les autres indicateurs) de ces valeurs entre les bassins versants. Une augmentation et baisse locale caractérise respectivement les bassins de la haute Mana et de la Comté.

3.2.5. Les courbures et sinuosités

Une autre information nous a semblé indispensable à l'analyse morphologique de nos bassins versants : celle qui prend en compte les courbures ou sinuosités des cours d'eau qu'ils abritent³¹. Ces deux indicateurs n'ont pas la même signification *a priori*. Le premier est une information très locale (qui peut-être spatialisée à l'instar des précédentes) sur la forme des méandres, l'autre constitue plus une intégration de la première sur les segments des cours d'eau.

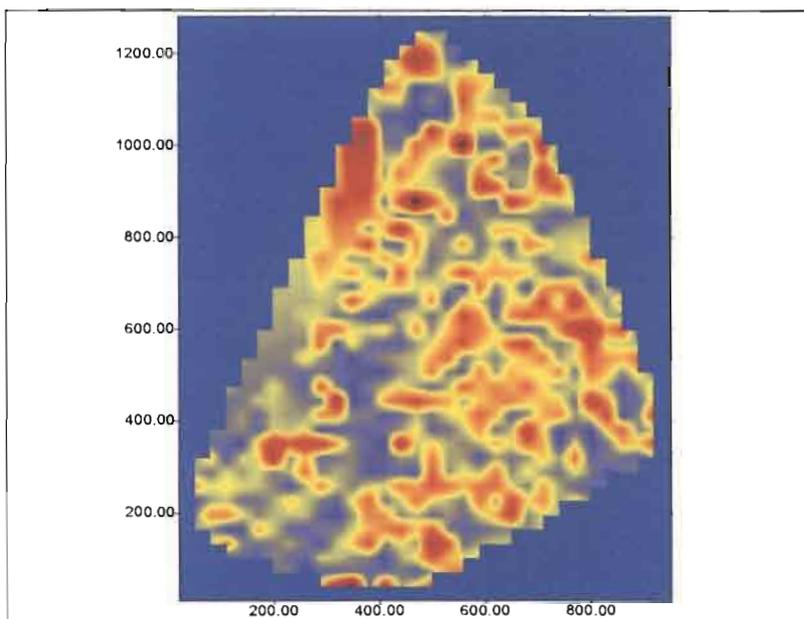
On s'attend bien sûr à ce que ces indicateurs soient également sensibles au relief, mais pas exclusivement (à la géologie, pédologie ou encore couverture végétale) ou tout du moins pas de la même manière que les indicateurs de longueurs et densités^{32,18}. La Fusion finale aidera normalement à les départager et à mettre à jour les redondances.



↑ Nord géographique.
La carte est en coordonnées cartographiques (unité de 100m).

Carte des sinuosités du bassin versant de la station Degrad-Roche.

La sinuosité se déduit facilement par le rapport de la longueur attribuée à chaque pixel par la distance à vol d'oiseau entre ses confluences amont et aval. Une sinuosité de 1 est ainsi calculée pour les cours rectilignes et peu monter souvent jusqu'à 10. La courbure elle, est estimée par une interpolation (de type moindre carré sur la base d'une parabole 2D) sur une partie de la rivière. Cette partie est centrée sur le pixel qui reçoit la valeur de la courbure de la courbe, ajustée avec un certain nombre de voisins. Ce paramètre est borné entre 0 (rectiligne) et $2\pi/n$, où n est le nombre de points servant à l'interpolation polynomiale. Ceci correspond à la courbure des points d'un cercle de périmètre égal à n (cas limite théorique)²⁹. Après plusieurs tests, nous avons retenu 4 voisins de part et d'autres du pixel central. La sensibilité à ce paramètre est également discutée plus bas.



↑ Nord géographique. La carte est en coordonnées cartographiques (unité de 100m).

Carte des courbures du bassin versant de la station Degrad-Roche.

De la même façon qu'avec les autres indicateurs on récupère deux cartes interpolées, directement interprétables et deux distributions globales décrites statistiquement pour chaque bassin versant. La sinuosité moyenne estimée en Guyane est de $1,57 \pm 0,56$. On retrouve une Comté plus sinueuse et un Tampoc moins sinueux que la moyenne. La dispersion est faible entre ces 11 valeurs. La courbure donne d'autres renseignements et paraît moins sensible que le précédent indicateur. Avec une moyenne pour la région de $-4,25 \pm 0,87$ (prendre la valeur absolue), Le bas Maripasoula se révèle très peu courbe (montagneux), contrairement à la Comté et à Pierrette (tendance locale).

Stations	sin-1	sin-2	sin-cv	sin-3	sin-4	courb-1	courb-2	Courb-cv	courb-3	courb-4
Langa-Tabiki	1.581	0.557	0.3523087	0.008	7764	-4.25	0.872	-0.2051765	62.73	24.74
Saut-Maripa	1.683	0.662	0.3933452	5.02	1230	-4.271	0.833	-0.1950363	35.625	12.18
Maripasoula	1.504	0.251	0.1668883	4.578	38.8	-3.581	1.24	-0.346272	1.483	1.27
Camopi	1.687	0.728	0.4315353	5.139	1013	-4.286	0.829	-0.1934204	29.89	10.67
Antécum-Pata	1.551	0.339	0.2185687	3.474	515	-4.221	0.882	-0.2089552	31.75	12.49
Saut-Athanase	1.619	0.577	0.3563928	4.244	650	-4.267	0.851	-0.1994375	29.75	9.386
Saut-Sabbat	1.445	0.228	0.1577855	3.558	7362	-4.245	0.903	-0.2127208	43.84	21.76
Pierrette	1.612	0.358	0.2220844	3.924	457	-4.302	0.829	-0.1927011	26.71	8.95
Petit-Saut										
Degrad-Roche	1.484	0.222	0.1495957	2.85	321	-4.253	0.882	-0.207383	32.96	19.5
Saut-Bief	1.805	1.332	0.7379501	4.082	410	-4.408	0.742	-0.1683303	27.62	22.58
Karouabo	1.451	0.066	0.0454859	-0.27	8	-4.333	0.951	-0.2194784	6.68	0.78

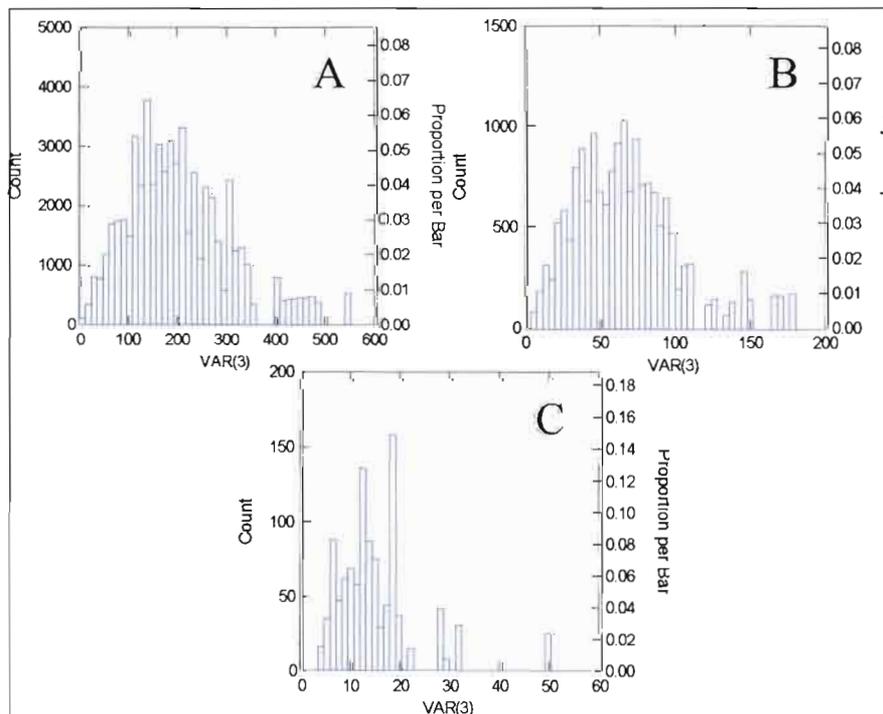
3.3. Nouvelle approche

3.3.1. Sensibilités à l'échelle : la logique

En particulier pour des données spatiales, les indicateurs qui nous ont semblé pertinents doivent être « qualifiés ». Peut-être sont-ils hautement variables selon l'échelle à laquelle le réseau est discrétisé ou sont-ils particulièrement sensibles à la qualité des données initiales³³ (le réseau hydrographique numérisé) ? Et dans ce cas, doit-on les garder si l'on sait qu'ils peuvent se révéler complètement différents avec des données, elles, à peine différentes ? Pour vérifier la première hypothèse, nous avons d'abord sélectionné un bassin versant et l'avons rasterisé à différentes résolutions.

Le bassin test (Degrad-Roche, déjà montré comme exemple plus haut) devait être de surface moyenne ou relativement faible pour réduire les temps de calculs et d'une morphologie représentative de l'ensemble de la Guyane (i.e. avec un spectre étendu dans les caractéristiques retenues, mais sans particularités flagrantes).

Les échelles devaient être choisies dans une fourchette la plus large possible tout en conservant un réseau « réaliste » : à la résolution grossière, il faut retrouver des bras de cours d'eau qui s'imbriquent les uns dans les autres, à la résolution la plus précise, le réseau ne doit pas ressembler à une somme de segments rectilignes, résultats de la vectorisation. Ce critère de sélection s'avère particulièrement pertinent lorsque l'on représente l'évolution des densités moyennes selon les échelles : le premier et les derniers points de la courbe montrent un écart important à la tendance de la courbe. Ainsi les dimensions des pixels allaient de 40m à 1km, d'un pas approximatif de 0.05 ordre de grandeur (i.e. en graduation logarithmique).

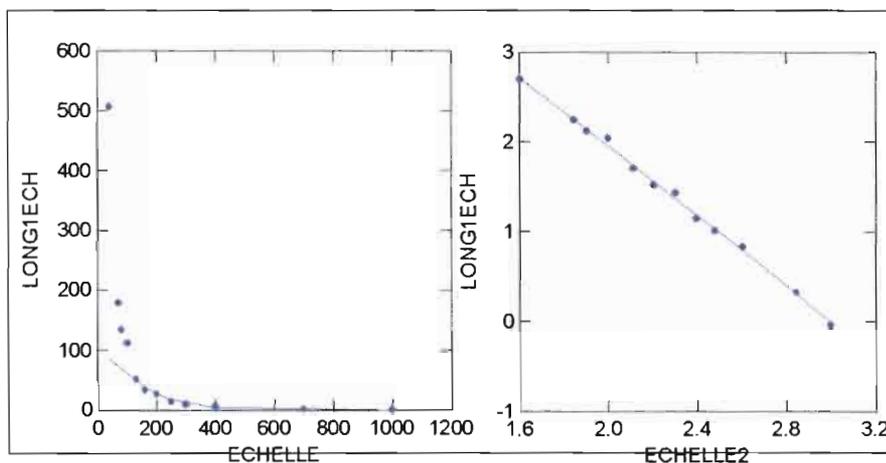


Nombre de point du réseau en fonction de sa valeur de densité.

Distributions des longueurs estimées sur le bassin versant de la station Degrad-Roche à différentes résolutions : 40m (A), 130m (B) et 700m (C).

Nous avons par exemple étudié la variation de la longueur moyenne du bassin de Degrad-Roche en fonction de la résolution à laquelle on regarde son réseau hydrographique. Nous avons

examiné dans un premier temps les distributions de cet indicateur sur l'ensemble du bassin. Une correction a été appliquée aux valeurs des longueurs pour prendre en compte la taille variable des pixels.



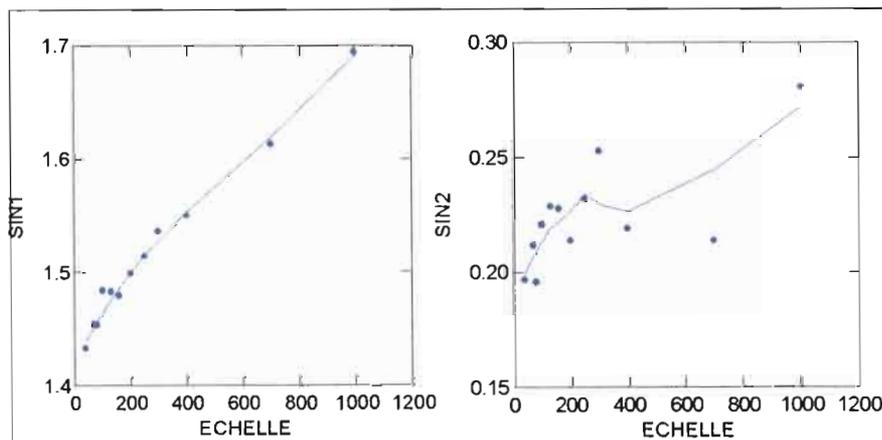
*Longueur moyenne du réseau (en hectomètres) selon la résolution (taille du pixel en m). Idem en $\log_{10} * \log_{10}$.*

Variations de l'indicateur des longueurs avec la résolution.

3.3.2. Sensibilités à l'échelle : fractalité

Chaque variable statistique (les moments) décrivant la distribution des longueurs a ensuite été représentée en fonction de l'échelle, en coordonnées logarithmiques. La variation de la moyenne se révèle fortement linéaire, ce qui corrobore des résultats antérieurs sur les cours d'eau du bassin amazonien³⁴. Cette propriété est nommée fractalité et traduit le fait que certaines propriétés des cours d'eau se reproduisent identiques à elles-mêmes à mesure que l'on fait varier l'échelle à laquelle on les observe. Les parties d'un fleuve guyanais ressemblent à son tout : le fleuve est « auto-similaire »³⁵. On a estimé sa dimension fractale à 1.956 ± 0.05 , valeur consistante avec les études antérieures mais très élevée pour ce bassin versant.

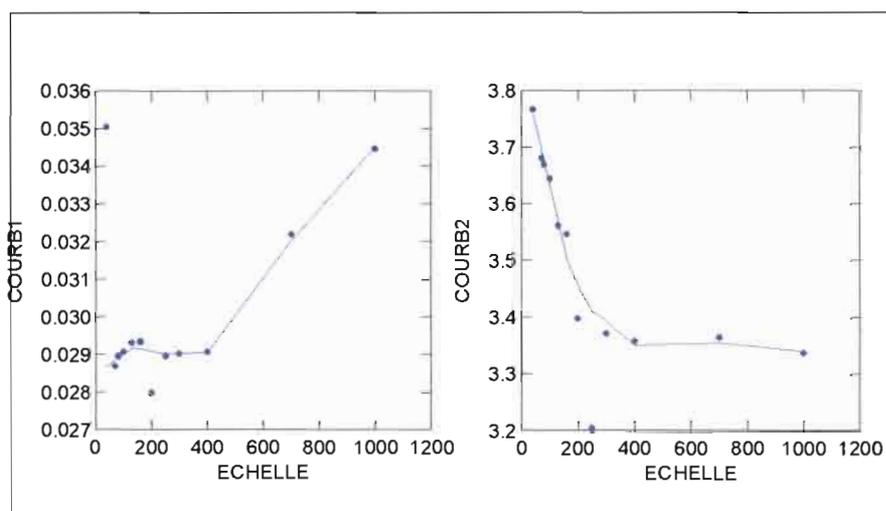
Notons que si l'on excepte peut-être l'écart type, les autres variables statistiques (qui nous renseignent sur la « déformation » de la distribution des longueurs avec l'échelle) ne sont pas fractales. En conclusion pour notre étude, cet indicateur varie de façon assez violente avec l'échelle et n'est pas le mieux indiqué pour la caractérisation de bassins versants. Mieux vaut disposer d'un indicateur indépendant de l'échelle et donc plus fiable. Toutefois, son caractère hautement fractal dans ce domaine d'échelles en fait un indicateur « prévisible » dont la variation est assez régulière pour s'abstraire de l'effet d'échelle.



Sinuosité moyenne et écart type de la sinuosité du réseau selon la résolution (taille du pixel en m).

Variations des 2 premiers moments de l'indicateur des sinuosités avec la résolution.

Nous avons procédé de même avec la sinuosité qui, rappelons-le, est un rapport de longueurs et ne devrait pas *a priori* se comporter de la même manière. C'est effectivement ce que nous observons. La sinuosité croît, mais lentement, avec l'échelle et semble donc constituer un bon indicateur pour la caractérisation. On observe même quelques « paliers » (3) qui pousse à croire que la sinuosité est « localement » insensible à la résolution de numérisation du réseau hydrographique.

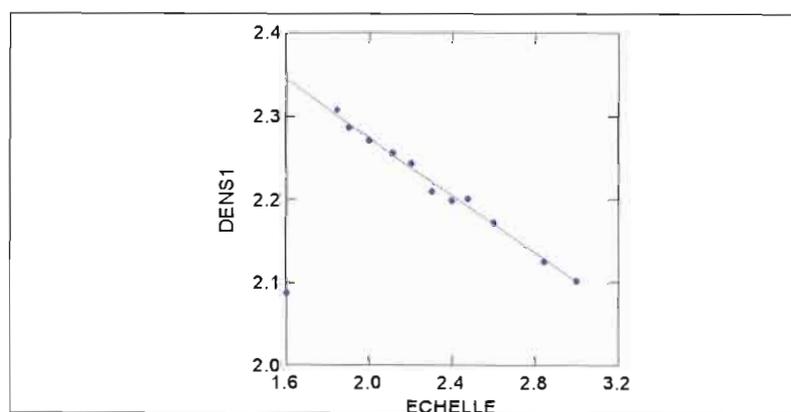


Moyenne et écart type de la courbure du réseau (sans dimension) selon la résolution (taille du pixel en m).

Variations de l'indicateur des courbures et de son écart type avec la résolution (du réseau hydrographique de Dégrad Roche).

La sinuosité intègre la courbure sur le trajet de l'eau. On pourrait ainsi s'attendre à ce que cette dernière reproduise la tendance de la première (*i.e.* que le fleuve soit moins rectiligne à mesure que l'échelle d'observation augmente). En fait, il n'en est rien : la courbure varie pratiquement pas en fonction de l'échelle d'étude. Cette différence de comportement montre tout l'intérêt de combiner les informations venant de plusieurs indicateurs.

On comprend que l'étape de rasterisation qui transforme un segment en pixels (qui se juxtaposent selon des directions discrètes) reproduise plus ou moins fidèlement la forme locale d'un cours d'eau. Du moins tant que l'on n'atteint pas des échelles extrêmes (le premier et les deux derniers points). Nous avons choisi de garder le même nombre de voisins (4) de part et d'autre du point concerné. Cet indicateur semble être le plus fiable.



Densité moyenne du réseau (en \log_{10} du nombre de pixels) selon la résolution (\log_{10} de la taille du pixel en m).

Graphes log/log de l'indicateur des densités avec la résolution.

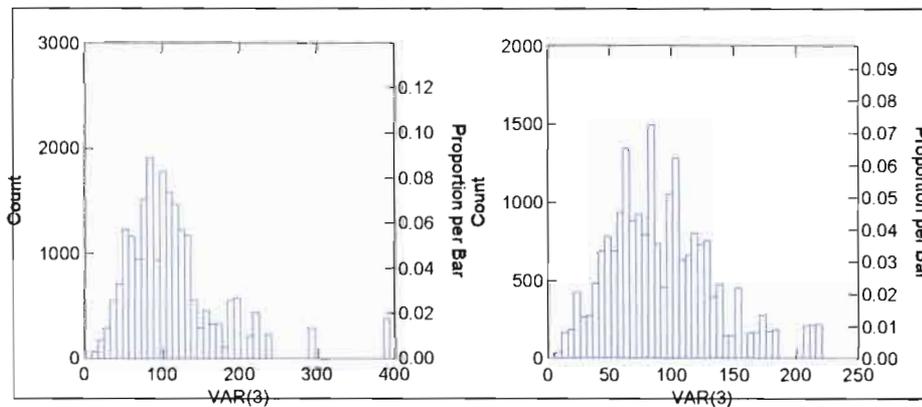
La densité moyenne du réseau hydrographique en amont de Degrad-Roche enfin, présente un caractère fractal assez marqué. Ce résultat est nouveau, nous avons calculé une pente moyenne de

-0.1177 ± 0.05 . Il serait intéressant de confirmer ou d'infirmer cette observation à l'aide de réseaux hydrographiques plus fins (par exemple numérisé à partir de cartes au 25 000^{ème}), ce que nous n'avons pas eu le temps de faire.

3.3.3. Sensibilités à la qualité des données

La sensibilité à la qualité des données des indicateurs précédents devait être également testée. Cette qualité ne sous-entend pas seulement l'exactitude à laquelle le réseau est numérisé, mais fait allusion à toutes les étapes intermédiaires qui transforme une section de cours d'eau en un pixel (précision planimétrique du placement depuis la photo aérienne ou satellitale, du couplage stéréoscopique, du dessin de la carte, de la numérisation manuelle, de la rasterisation, etc.). Nous l'avons expérimenté en « dégradant » volontairement le réseau hydrographique du bassin de Dégrad Roche. Quelques règles simples ont permis de dégrader de façon réaliste (et de réduire les biais occasionnés par cette déformation) :

- Garder les sources et confluences à peu près à la même place, compte tenu du fait qu'il est plus facile (à un homme qui numérise) de placer une intersection qu'un méandre ;
- Essayer de reproduire les méandres initiaux par d'autres similaires pour reproduire l'erreur d'un tracé à main levée (*i.e.* avec moins de repères).



Distribution des longueurs (en hectomètres) du réseau normal (gauche), puis déformé.

Variation des longueurs entre un réseau normal puis déformé.

Chaque indicateur a donc été recalculé sur ce réseau déformé à la résolution finale de 100m par pixel. Les écarts (ou variation en %) des variables décrivant leur distribution sur l'ensemble du bassin renseignent sur leur stabilité respective. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant et indiquent de façon flagrante l'intérêt des densités et des courbures du réseau.

Statut	long-1	long-2	sin-1	sin-2	dens-1	dens-2	courb-1	courb-2
normal	111.98	62.858	1.484	0.221	186.52	55.689	-3.538	1.293
déformé	91.074	43.131	1.42	0.169	178.246	53.136	-3.51	1.314
variation	20.5916	37.2246	4.4077	26.667	4.53661	4.69194	0.79455	-1.611

3.3.4. Les textures

A ce stade, les indicateurs spatiaux qui caractérisent les bassins versants guyanais à partir de leur réseau hydrographique montrent leurs limites. Dans les réseaux, nous avons surtout caractérisé l'objet intermédiaire qui concentre les eaux de pluie jusqu'à l'exutoire du bassin. Il nous a semblé

que nous n'avions pas une vue assez exhaustive du bassin et en particulier de sa surface collectrice³⁶.

En gardant à l'esprit les spécificités des bassins guyanais (*i.e.* plats, de végétation uniforme et avec peu de transferts latéraux) et compte tenu des données spatiales à notre disposition, nous avons choisi de compléter notre échantillon d'indicateurs par la texture de surface déduite d'images radar satellitaires³⁷. Celle-ci rend autant compte du relief (en partie examiné grâce aux indicateurs précédents) que des variations de la couverture végétale, de la géologie, de la pédologie, etc. Elle est pleinement complémentaire des indicateurs morphologiques déjà mentionnés.

Nous disposons de deux mosaïques radar : ERS1 réalisée en 1992 (bande C à 100m de résolution) et JERS plus récentes (bande L à environ 200m de résolution). La dernière empiète largement aux Surinam et Brésil et offrira l'avantage d'examiner les bassins non guyanais des fleuves frontières (Maroni et Oyapock).

Nous avons adopté la démarche de caractérisation explicitée plus haut et n'avons pas tenté d'interpréter les résultats de la classification des textures (ce travail est en cours par ailleurs). Après avoir rigoureusement identifié et défini les classes de texture, nous avons estimé leurs surfaces respectives (en %) au sein de chacun de nos 11 bassins versants.

A l'heure de la rédaction de ce rapport, les calculs concernant les textures des bassins versant guyanais ne sont pas terminés. Ils ne seront donc pas intégrés dans la fusion détaillée au chapitre suivant, mais seront présentés lors de la réunion de synthèse prévue au mois de septembre 2000.

3.4. Bilan

En conclusion, ces études complémentaires, indispensables à la rigueur de la caractérisation des bassins versants, donnent une idée précise des qualités et défauts des indicateurs morphologiques retenus. Toutes informations confondues, la sinuosité est sans conteste le plus fiable d'entre eux, suivi juste après par les densités et longueurs des bras de cour d'eau. Nous n'excluons pas a priori la courbure (qui est d'ailleurs plus pénible à calculer que les autres) et laisserons le soin à la fusion du dernier chapitre de mieux cerner son rôle et la richesse de ses informations.

4. Fusion des descriptions

4.1. Méthode et justification

Il y avait plusieurs méthodes envisageables pour faire fusionner les études hydrologiques et morphologiques, les indicateurs temporels et spatiaux caractérisant les bassins versants :

- Nous pouvions rassembler les indicateurs de différentes natures au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). Un SIG aurait permis de présenter les informations spatiales comme des « couches » directement superposables, auxquelles on aurait adjoint des tableaux d'informations vectorielles sur les débits³⁸. Cette technique est très interactive et autorise une manipulation et modification aisée plusieurs années après sa conception, si l'on décidait par exemple de réfléchir à nouveau sur le thème. Elle prend par contre du temps à être mise en place. Enfin et surtout, le SIG ne réalise pas lui-même la fusion et se contente de la faciliter ; il oblige son concepteur à découper lui-même des zones d'intérêt et à chercher les corrélations cachées entre indicateurs. Pour toutes ces raisons, nous n'avons pas retenu cette approche.
- Pour palier le principal défaut du SIG et assister la recherche de corrélations entre indicateurs, nous pouvions utiliser un réseau de neurones qui aurait codifié la relation entre bassin versant et régime³⁹. Les réseaux de neurones s'inspirent du fonctionnement de notre cerveau et combine des informations pour en déduire de nouvelles. Ils supposent un apprentissage qui aurait été délicat à mener dans notre cas et le résultat final constitue une « boîte noire » qui rend inexploitable les liaisons mises en évidence entre les indicateurs. De plus, cette technique aussi nécessite du temps (de programmation) que nous n'avions pas.
- Finalement, une approche mathématique a fait ses preuves depuis longtemps pour mettre à jour des corrélations entre paramètres, pour éliminer les redondances et monter en exergue les variables inhabituelles, pour les classer et montrer du doigt celles qui recèlent le plus d'informations : il s'agit de l'Analyse en Composante Principale (ACP)⁴⁰. Cette technique très utilisée en statistique et en traitement d'image consiste à chercher les valeurs propres d'une matrice qui lie les variables de départ à celles qui concentreront leurs informations³⁰. Plus rapide à mettre en œuvre, c'est cette approche que nous avons retenue.

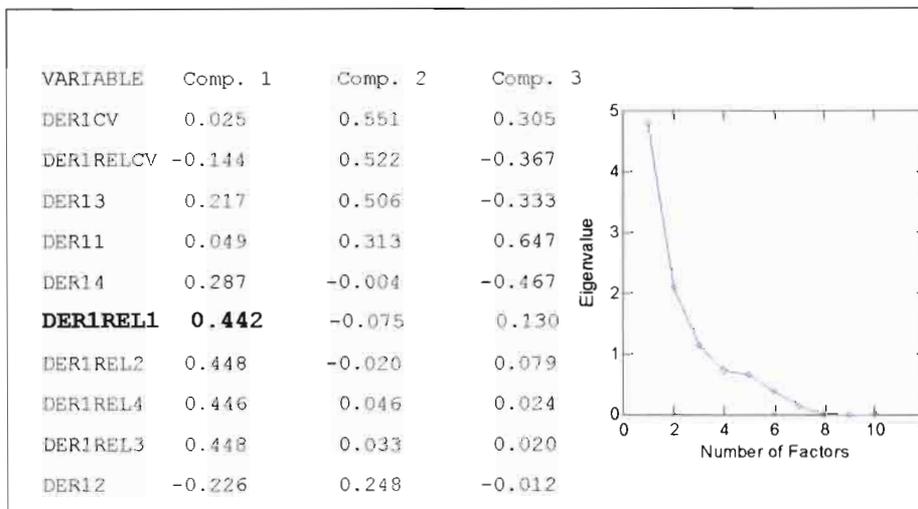
Une ACP peut être vue comme une projection du nuage de points de l'hyperespace formé par les variables initiales sur des axes appropriés à la concentration des informations³⁰. Le premier axe (*i.e.* la première composante) est celui qui contient le plus d'informations, quantité qui décroît ensuite plus ou moins rapidement avec les autres composantes (nous en préciserons la vitesse au besoin).

Nous avons donc entrepris de réduire le nombre variables à notre disposition en gardant une variable statistique par groupe d'indicateurs hydrologiques, celle qui contribue le plus à la composante principale. Cette démarche est indispensable si l'on considère que nous avons une faible statistique (12 objets d'étude) et beaucoup de paramètres descriptifs. L'analyse gagnera en fiabilité si l'on se rapproche d'une matrice d'analyse [bassins versants * indicateurs de caractéristiques] carrée.

4.2. Réduction du nombre d'indicateurs

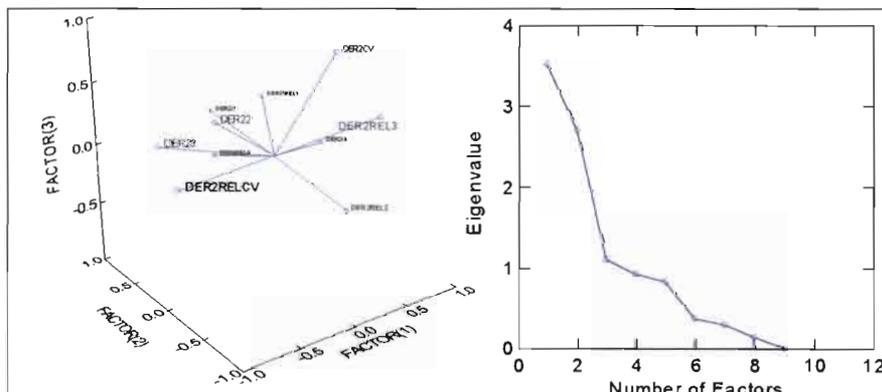
4.2.1. Réduction des indicateurs hydrologiques

Nous avons vu que les produits issus de la dérivée première sont nombreux. Une première ACP sur ceux-ci a permis de réduire leur nombre. Sa composante principale recèle à elle seule 50% de l'information (*i.e.* de la variance totale) comme suggère la décroissance des valeurs propres. La moyenne de la dérivée première relative y contribue à hauteur égale avec d'autres variables. C'est celle que nous avons gardée.



Valeurs propres (à droite) et vecteurs propres des composantes de l'ACP basée sur les variables statistiques de la dérivée première.

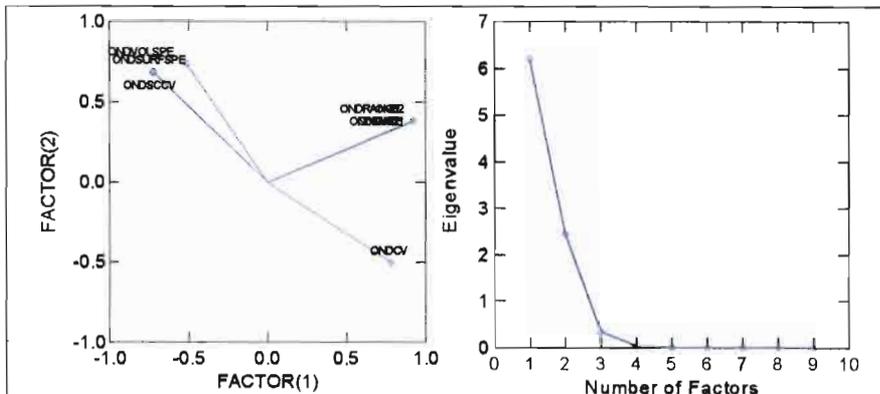
La même méthode est appliquée aux variables déduites de la dérivée seconde. L'information est plus « noyée » que dans le cas précédent et il s'agit même du cas le plus délicat à trancher. Nous avons retenu le coefficient de variation de la dérivée relative seconde qui contribue le plus à la composante principale (35% du total de l'information). La distribution spatiale des variables de ce groupe dans l'espace des 3 principales composantes montre combien elles sont indépendantes (leurs distances respectives se valent et ne sont pas négligeables).



Valeurs propres (à droite) de l'ACP basée sur les variables statistiques de la dérivée seconde, et leur distribution dans l'espace des 3 premières composantes.

Les variables liées aux ondelettes présentent par contre un comportement relativement similaire et sont faciles à « agréger ». La moyenne des coefficients d'ondelettes par exemple explique pour une part importante la composante principale qui regroupe 69% de l'information. Le graphe des valeurs propres résume bien cette distribution. De même pour les paramètres de crue et d'étiage

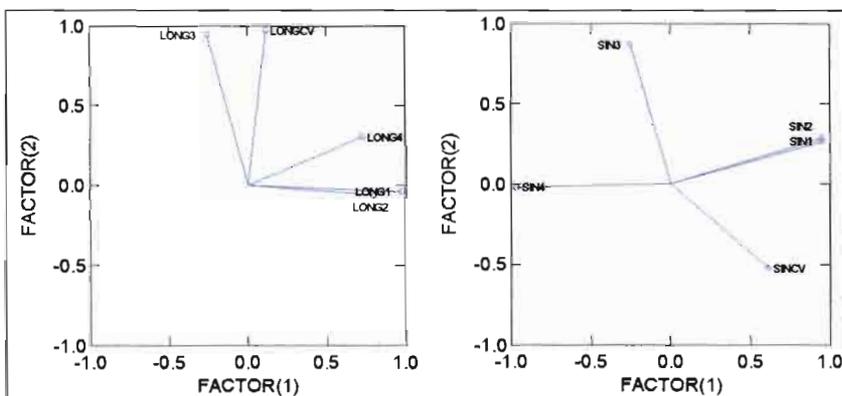
annuels, la composante principale (81%) est bien décrite par l'écart type des formes de crue par exemple (*i.e.* la largeur de la bosse de l'hydrogramme annuel moyen).



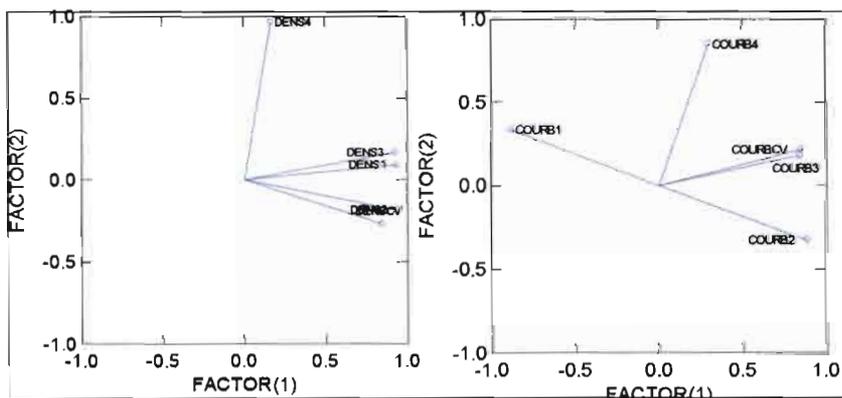
Valeurs propres (à droite) de l'ACP basée sur les variables statistiques des coefficients en ondelettes, et leur distribution dans l'espace des 2 premières composantes.

4.2.2. Réduction des indicateurs morphologiques

L'indicateur des longueurs est bien résumé dans sa moyenne. La composante principale explique ici 44% de la variance totale, mais les variables statistiques restent globalement assez regroupées comme l'indique leurs positions dans le plan des deux premières composantes. Un même raisonnement permet de retenir l'aplatissement de la sinuosité (65% expliqué), l'écart type de la densité (67%) et la moyenne de la courbure (62%).



Distribution des variables statistiques des longueurs et sinuosités dans l'espace des 2 premières composantes fournies par leur ACP respective.

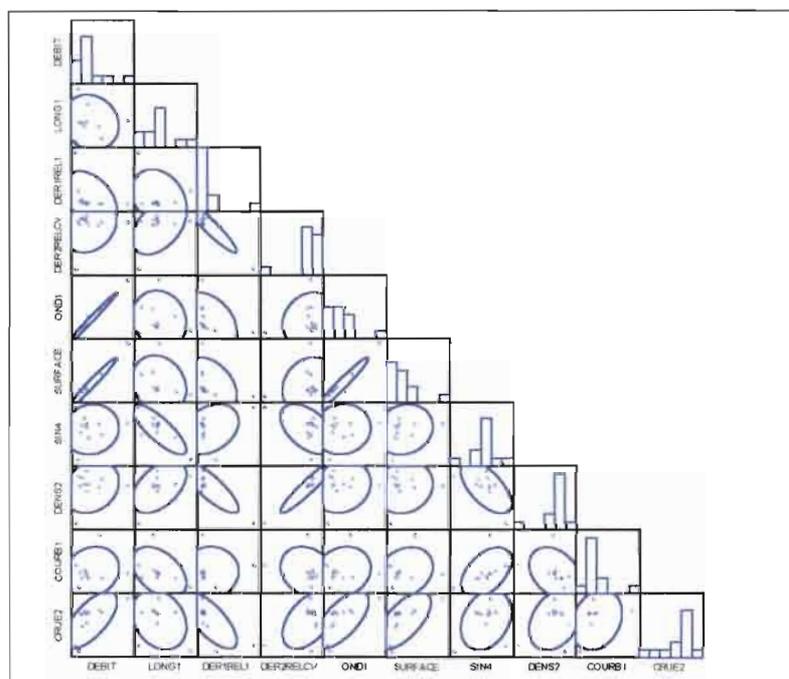


Distribution des variables statistiques des densités et courbures dans l'espace des 2 premières composantes fournies par leur ACP respective.

4.2.3. Réduction globale

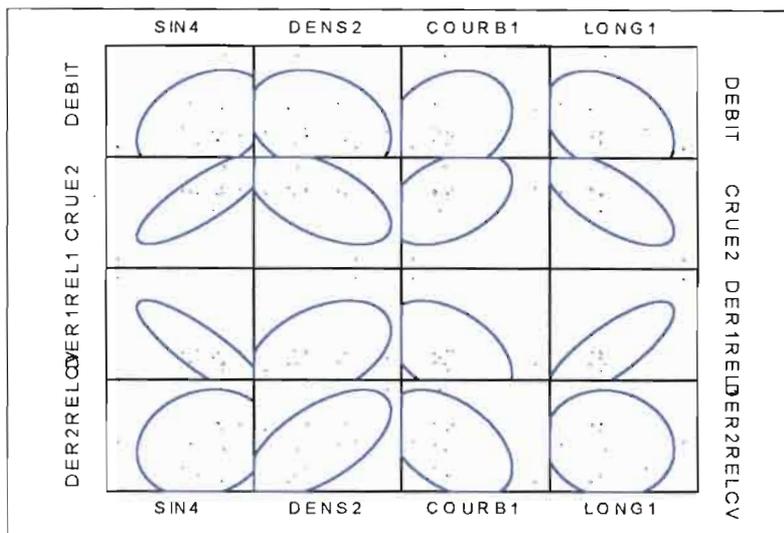
En y ajoutant les débits et surfaces des bassins versants, nous disposons d'un ensemble de 10 indicateurs calculés indépendamment les uns des autres et contenant *a priori* des informations distinctes sur les cours d'eau guyanais. Il est intéressant à ce stade de vérifier le degré de cette indépendance à l'aide d'une matrice de corrélation (méthode de Pearson).

Cette matrice est bien visualisée par les graphes de dispersions (scatterplot) qui positionnent chaque bassin selon les indicateurs pris deux à deux (sur les axes x et y). Après avoir volontairement omis la Karouabo (trop atypique), l'ellipse qui entoure le nuage de points indique une corrélation (si elle est allongée), une absence de relation (si elle est circulaire) et ce, de façon plus ou moins intense selon que l'ellipse est compacte ou non.



Graphes de dispersion (méthode de Pearson) positionnant chaque bassin versant en fonction des valeurs de ses indicateurs pris 2 à 2. Les ellipses ajustées autour des nuages de points donnent une idée de la dispersion des objets d'étude dans ces plans et indiquent s'il apparaît des corrélations entre les paramètres descriptifs.

Il apparaît nettement que les débits, surfaces et ondelettes sont corrélés et propagent donc la même information. Ce que confirme la méthode ACP utilisée sur les mêmes indicateurs. Nous n'avons par la suite conservé que les débits. Comme le signale la figure suivante, d'autres corrélations pourraient être mises en évidence (notamment entre les indicateurs temporels et ceux spatiaux), mais nous nous sommes gardé de la faire compte tenu de la statistique de départ (10 bassins versants).



Matrice de dispersion (méthode de Pearson) indiquant la distribution des bassins versants en fonction des valeurs de ses indicateurs hydrologiques et morphologiques pris 2 à 2. La statistique est faible pour conclure à des corrélations.

4.3. Classement et indice physique

4.3.1. Un indice physique

Les 8 indicateurs encore en lice peuvent être combinés au sein d'un indice (noté *BV*) que nous avons démontré suffisamment simple et exhaustif pour la description de l'état physique des Bassins Versants. Nous avons adopté pour son calcul l'approche du Programme des Nations Unies (PNUD) lors de son estimation d'un « Indicateur de Développement Humain » (IDH) servant à classer les pays de la planète⁴¹.

Après avoir standardisé (*i.e.* ramené les valeurs de notre échantillon à une moyenne nulle et un écart type de 1), nous faisons la moyenne des 8 indicateurs dits : « standards » pour déduire l'indice. Voici les résultats, classés par indice décroissant pour les 12 bassins de Guyane (nous avons pris la moyenne des autres bassins versants, *i.e.* 0, pour les valeurs de la station de Petit saut, station pour laquelle il manque les valeurs des indicateurs spatiaux).

Stations	BV	débit	der1	der2	crue	long	sin	dens	courb
Langa-Tabiki	0.5173	2.66351	-0.4405	0.20762	1.37847	0.06325	0.40029	0.02527	-0.1591
Maripasoula	0.4312	0.67414	-0.4442	-0.0142	0.59611	-0.3608	0.34118	-0.0849	2.74199
Saut-Sabbat	0.1213	-0.3409	-0.3107	0.38361	0.53092	-0.3057	0.79169	0.13609	0.08528
Saut-Athanase	0.0717	-0.1985	-0.3762	0.62432	-0.2749	-0.0736	0.10607	1.09119	-0.3247
Camopi	0.0397	-0.0541	-0.3302	0.08401	0.47615	1.19346	-0.6763	0.12291	-0.4981
Pierrette	0.0219	-0.5118	-0.3266	0.38951	0.35358	-0.0568	0.23027	0.59541	-0.4981
Antécum-Pata	-0.0145	-0.1985	-0.5109	0.3436	0.38488	-0.0452	0.35354	-0.3633	-0.0803
Saut-Maripa	-0.0578	0.87145	-0.4238	0.24472	0.45268	-1.1701	-0.4841	0.51328	-0.4666
Petit-Saut	-0.0606	-0.5138	-0.0784	0.55926	-0.4522	0	0	0	0
Degrad-Roche	-0.1262	-0.6358	-0.2993	0.02683	0.36923	-0.0819	-0.2933	-0.0151	-0.0803
Saut-Bief	-0.3389	-0.7721	0.47625	0.26506	-2.0874	2.23677	-2.3638	0.71812	-1.1839
Karouabo	-0.6052	-0.9837	3.06458	-3.1144	-1.7275	-1.3994	1.59442	-2.739	0.46369

Cet indice BV permet de caractériser les bassins guyanais à l'aide d'un unique paramètre et de rapidement dissocier ceux atypiques de ceux « normaux ». Se détachent nettement le Maroni d'une part, les Karouabo et Comté d'autre part. On observe aussi combien les stations Pierrette et Antécum Pata sont « normale » en Guyane française.

4.3.2. Classement des bassins versants

L'indice BV n'évite toutefois pas les inconvénients d'un paramètre unique et reste grossier. Il concentre trop l'information contenue dans les indicateurs. Mieux vaut en effet disposer de l'information la plus complète possible pour classer les bassins. Nous avons donc doublé l'ACP d'une méthode statistique de classification par ensembles (« cluster analysis ») à partir des 8 indicateurs précédents pour regrouper les bassins guyanais et préciser ceux qui en sont les plus représentatifs.

Cette méthode estime les « distance euclidiennes » respectives des valeurs indicateurs pour chaque bassin et regroupe ceux dont les distances sont les plus faibles (2^{ème} colonne du tableau ci-dessous). Cette technique va donc avoir tendance à isoler les grands bassins versants. Plus loin, les bassins sont classés par débits moyens décroissants (case 1 à 11).

Nous avons également « modulé » les résultats bruts de cette méthode mathématique, aidé de notre expérience des particularités des bassins versants. La Karouabo par exemple n'a pas été incluse dans l'analyse. Tout petit bassin, il sort systématiquement du lot et constitue à lui seul un groupe. La première classification fait avec l'hypothèse vraisemblable de 5 groupes isole Saut bief (bassin effectivement atypique comme l'indique les Indicateurs morphologiques), les grands fleuves en trois groupes que l'on peut réunir au besoin (ils sont très différents des autres, ils sont très différents entre eux, mais ont la plupart de leurs caractéristiques communes) et tous les autres bassins.

Cluster 1 of 5 contains 6 cases						
Members		Statistics				
Case	Distance	Variable	Minimum	Mean	Maximum	St.Dev.
Case 5	0.27	DEBIT	-0.64	-0.40	-0.20	0.18
Case 6	0.35	DERIREL1	-0.51	-0.32	-0.08	0.14
Case 7	0.27	DER2RELCV	0.03	0.39	0.62	0.21
Case 8	0.18	CRUE2	-0.45	0.15	0.53	0.41
Case 9	0.34	LONG1	-0.31	-0.11	-0.05	0.11
Case 10	0.28	SIN4	-0.29	0.24	0.79	0.39
		DENS2	-0.36	0.29	1.09	0.57
		COURB1	-0.50	-0.18	0.09	0.23

Cluster 2 of 5 contains 1 cases						
Members		Statistics				
Case	Distance	Variable	Minimum	Mean	Maximum	St.Dev.
Case 11	0.00	DEBIT	-0.77	-0.77	-0.77	
		DERIREL1	0.48	0.48	0.48	
		DER2RELCV	0.27	0.27	0.27	
		CRUE2	-2.09	-2.09	-2.09	
		LONG1	2.24	2.24	2.24	
		SIN4	-2.36	-2.36	-2.36	
		DENS2	0.72	0.72	0.72	
		COURB1	-1.18	-1.18	-1.18	

Cluster 3 of 5 contains 1 cases						
Members		Statistics				
Case	Distance	Variable	Minimum	Mean	Maximum	St.Dev.
Case 1	0.00	DEBIT	2.66	2.66	2.66	
		DERIREL1	-0.44	-0.44	-0.44	
		DER2RELCV	0.21	0.21	0.21	
		CRUE2	1.38	1.38	1.38	
		LONG1	0.06	0.06	0.06	
		SIN4	0.40	0.40	0.40	
		DENS2	0.03	0.03	0.03	
		COURB1	-0.16	-0.16	-0.16	

Cluster 4 of 5 contains 1 cases						
Members		Statistics				
Case	Distance	Variable	Minimum	Mean	Maximum	St.Dev.
		DEBIT				
		DERIREL1				
		DER2RELCV				
		CRUE2				
		LONG1				
		SIN4				
		DENS2				
		COURB1				

Extrait de l'analyse par « clusters » qui permet de regrouper les bassins versants guyanais en fonction des valeurs de leurs indicateurs spatio-temporels.

On a fait l'hypothèse de 5 groupes, estimés en fonction des distances (euclidiennes) de leurs indicateurs.

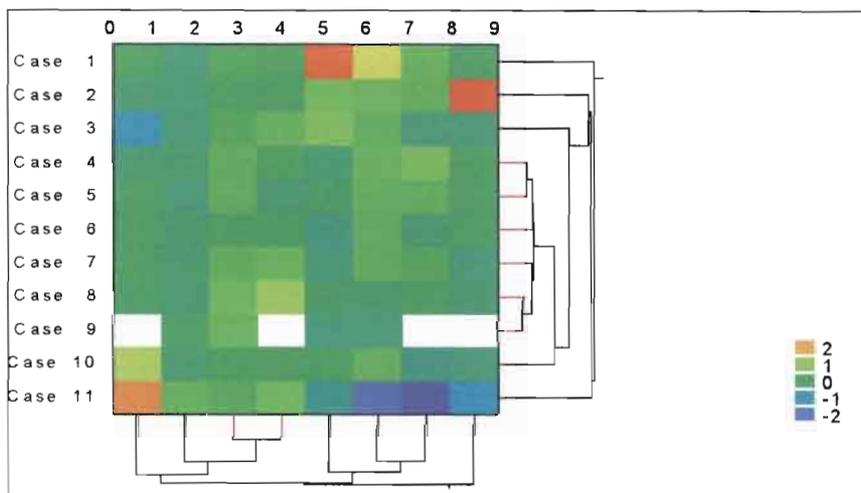
Pour chacun d'eux des moyennes et autres informations statistiques

Case 3	0.00	DEBIT	0.67	0.67	0.67	
		DERIRELI	-0.44	-0.44	-0.44	
		DER2RELCV	-0.01	-0.01	-0.01	
		CRUE2	0.60	0.60	0.60	
		LONG1	-0.36	-0.36	-0.36	
		SIN4	0.34	0.34	0.34	
		DENS2	-0.08	-0.08	-0.08	
		COURB1	2.74	2.74	2.74	

Cluster 5 of 5 contains 2 cases						
Members		Statistics				
Case	Distance	Variable	Minimum	Mean	Maximum	St.Dev.
Case 2	0.46	DEBIT	-0.05	0.41	0.87	0.65
Case 4	0.46	DERIRELI	-0.42	-0.38	-0.33	0.07
		DER2RELCV	0.08	0.16	0.24	0.11
		CRUE2	0.45	0.46	0.48	0.02
		LONG1	-1.17	0.01	1.19	1.67
		SIN4	-0.68	-0.58	-0.48	0.14
		DENS2	0.12	0.32	0.51	0.28
		COURB1	-0.50	-0.48	-0.47	0.02

sont fournies pour justifier la classification.

Une deuxième et dernière classification (en trois sous-groupes) sur le groupe chargé permet d'apparier ces bassins intermédiaires déjà très similaires : Antécum pata/Saut sabbat ; Saut athanase/Petit saut ; Pierrette/Dégrad Roche. Ce résultat est rapidement appréhendé avec la matrice de permutation des données (Permuted data matrix) qui attribue un code de couleur à chaque couple indicateur/bassin versant selon sa distance à la moyenne. Sur ses flans, on devine les appariements des entités de chaque axe (indicateurs = axe des x ; bassins = axe des y).



Matrice de permutation des données qui attribue un code de couleur à chaque couple indicateur (vertical) / bassin (horizontal) selon sa distance à la moyenne. On voit également leur organisation hiérarchique.

En résumé, cette analyse poussée semble définir quatre groupes :

1. Les grands bassins [Maroni et Oyapock], dont on conseille Langata biki comme station de référence ;
2. Le plus petit bassin [Karouabo], qui pourrait être représenté par d'autres choisis le long de la côte guyanaise ;
3. Celui de [La Comté à Saut bief] assez atypique et à ne pas omettre dans une étude complète de la Guyane ;
4. Et les autres [le haut Maroni, la Mana, la Sinnamary et l'Approuague], dont on conserve par exemple la station de Pierrette comme référence.

4.4. Limites et perspectives

Nous tenions à revenir avant de conclure aux limites inhérentes à cette étude des bassins versants de la Guyane. Nous avons mentionné certaines d'entre elles comme l'absence d'étude de la relation pluie - débit sur le plateau des Guyanes, qui nous aurait beaucoup aidé à comprendre les

liens entre la distribution pluviométrique et les débits observés. Nous aurions également gagné à disposer d'une carte du relief du DOM. Elle aurait permis un calcul moins biaisé des indicateurs spatiaux et aurait autorisé une première interprétation de leurs cartes respectives. Il est à espérer que ces manques seront prochainement comblés par les scientifiques œuvrant en Guyane.

Nos données sont biaisées, nous ne l'ignorons pas. Les débits ont une incertitude importante et mal connue. Les absences de mesures des débits sont souvent complétés par corrélation avec les stations voisines, qui fait que l'on étudie parfois les secondes au lieu des premières. Utiliser des débits décennaires au lieu de ceux quotidiens, aurait également grandement faussé notre jugement. De plus, nous n'avons pas réalisé l'étude temporelle sur la même période (qui dans ce cas aurait été réduite à 2 ou 3 ans seulement à cause des absences de données !).

De même avons nous estimé en partie qualitativement les différences que causerait un réseau numérique mal numérisé, ou simplement numérisé à la mauvaise échelle. Les cartes et images d'origines (pour les textures) ne favorisaient également pas unanimement les bassins versants sur une si grande surface.

Malgré ces restrictions, nous pensons être allé au bout de l'analyse qu'il était possible de faire aujourd'hui avec ces données. Notre vision hydrologique de la Guyane est globale compte tenu de l'échelle d'examen et le principal gain que l'on pourrait attendre d'une étude additionnelle serait de « zoomer » en certains endroits du département. Il manque peut-être en effet une analyse fine des bassins versants, utilisant par exemple des indicateurs latéraux ou verticaux pour approfondir notre connaissance du terrain (et sa caractérisation).

Une dernière approche est possible et même souhaitable dans ce domaine : l'étude diachronique des bassins versants guyanais. La Guyane reste une contrée relativement vierge de l'emprise humaine, mais à la démographie croissante, à l'économie changeante. L'environnement pourrait pâtir de ces évolutions. La partie aval des bassins de notre étude pourrait par exemple rapidement s'anthropiser. Cette étude a été réalisée de sorte à être reprise avec facilité dans plusieurs années. C'est sans doute aussi le rôle d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux !

5. Conclusion

Le projet « qualité des cours d'eau de Guyane française » aura notamment permis une analyse complète, s'il en est, des bassins versants de sa région. Il était important pour cette complétude que nous nous attachions autant aux régimes des fleuves qu'à la morphologie de leurs bassins versants. C'est ce que nous avons fait en recherchant systématiquement des indicateurs pertinents pour une telle description.

Après en avoir essayé de nombreux, nous avons pu retenir 4 indicateurs purement hydrologiques mettant l'accent sur la variabilité des débits. Il s'agit d'une notion clé pour caractériser l'environnement dans lequel évolue la faune aquatique parallèlement étudiée par les hydrobiologistes du projet. En sus des débits moyens, des variables statistiques issues de leurs dérivées premières et secondes et un dernier qui rend compte de la forme de la crue annuelle constituent notre échantillon.

Un travail analogue a été réalisé avec des indicateurs calculés à partir des réseaux hydrographiques des bassins en amont de chaque station hydrologique. Leurs surfaces et les formes des voies de drainage que ces dernières imposent sont révélatrices des comportements hydrologiques observés. Nous avons utilisé les longueurs, courbures et sinuosités d'une part, la densité du réseau hydrographiques d'autre part, pour les caractériser.

Standardisés puis moyennés, ces indicateurs ont autorisés la conception d'un indice qui a été en partie utilisé pour classer les 11 bassins versants de notre étude. Bien que l'on retrouve les grands groupes auxquels on pouvait s'attendre (bassins versants grands, petits et intermédiaires), cette étude a mis en évidence un ordre entre les cours d'eau d'un même groupe et a signalé leurs caractéristiques respectives. Ceci est particulièrement vrai pour les fleuves intermédiaires, plus nombreux et relativement similaires. Notons en outre qu'un fleuve s'est révélé physiquement très différent des autres : La Comté.

Annexe

Présentation

Cette annexe présente les figures résultats des calculs effectués pour la « Caractérisation physique des bassins versants de la Guyane française ». Pour les commentaires, se référer au texte du rapport du même titre.

Liste des cartes

1. Carte pluviométrique de la Guyane
2. Carte du réseau hydrographique de Guyane française
3. Carte des longueurs de bras de cours d'eau de Guyane française
4. Carte de densité du réseau hydrographique de Guyane française
5. Carte des sinuosités des cours d'eau de Guyane française
6. Carte des courbures des cours d'eau de Guyane française
7. MNH de 10 bassins versants de Guyane française
8. Cartes des coefficients de la transformée en ondelettes de 12 stations hydrologiques de Guyane française
9. Evolution de l'histogramme des longueurs (bassin versant de Dégrad Roche) en fonction de la résolution spatiale
10. Répartition des variables statistiques de chaque indicateur selon les premières composantes de leur ACP

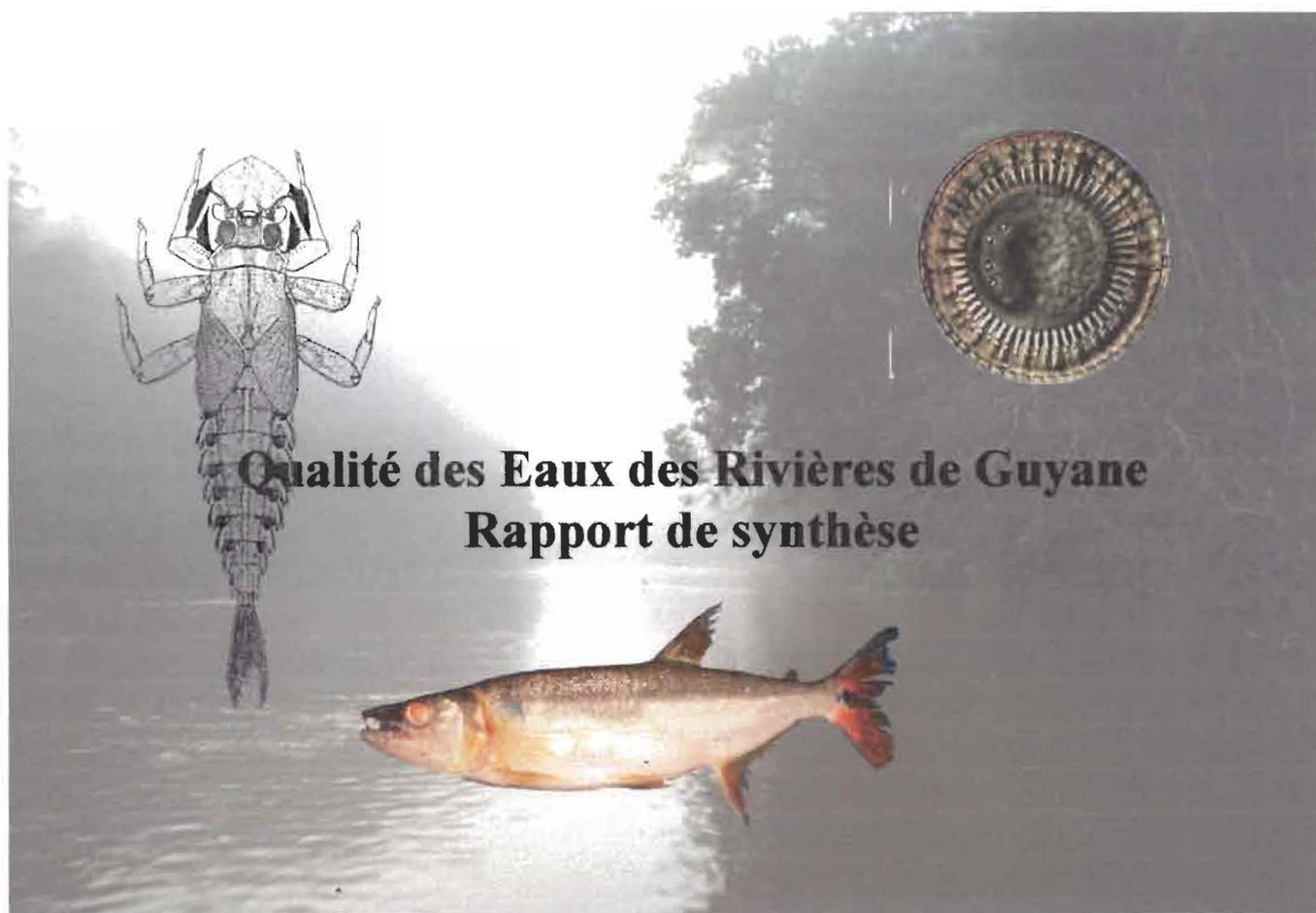
Bibliographie

- ¹ H. Cné, 6 juin 2000. 40 chantiers pour un nouveau siècle : la traque aux pollutions de l'eau. Quotidien Libération.
- ² JP. Carmouze, 1998. Projet DIREN « Qualité des cours d'eau guyanais », dossier technique. Note interne.
- ³ P. Calow & G.E. Petts, 1994. The rivers handbook, hydrological and ecological principles. Vol. 1, 470p.
- ⁴ M. Roche, 1963. Hydrologie de surface. Gauthier-villars paris, ORSTOM, 430p.
- ⁵ C. Pieri & al., 08/1995. Land quality indicators : a discussion paper. World Bank discussion paper N° 315, 74 p.
- ⁶ M. Hoepffner & J. Rodier, 1976. Chapitre sur l'hydrologie. ATLAS des D.O.M. – La Guyane – Dirigé par le CNRS.
- ⁷ (Communication personnelle avec JP. Mobèche, directeur du laboratoire d'hydrologie de l'IRD).
- ⁸ M.R. Spiegel, 1981. Probabilités et statistique, cours et problèmes. Série Schaum. Chap. 3 : espérance mathématique, p. 91.
- ⁸ SYSTAT guide book, 1999, Vol. 1 & 2 : statistics.
- ¹⁰ W.H. Press & al., 1992. Numerical Recipies in Fortran, the Art of Scientific Computing, second edition. Chap. 14 : statistical description of data.
- ¹¹ G. Hiez & P. Dubreuil, 1955. Les régimes hydrologiques de Guyane française. Paris, ORSTOM, 119 p., (Mémoire ORSTOM 3).
- ¹² JP. Mobèche, 1998. Situation du réseau hydrométrique guyanais en début 1998. Note interne IRD, 18 p.
- ¹³ J. Rodier, 1982. La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°2.
- ¹⁴ M. Roche, 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecérex, en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XIX, n°2.
- ¹⁵ P. Dubreuil, 1974. Résumé des résultats de recherches sur le bassin représentatif de la Crique Virgile (Guyane). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XI, n°2.
- ¹⁶ C. Toebes & V Ouryvaev. Les bassins représentatifs et expérimentaux, guide international des pratiques en matière de recherche, Ed. UNESCO.
- ¹⁷ F.L. Tejerina-Garro & B. de Merona, 2000. Spatial variability of biotic and abiotic factors of the aquatic habitat in French Guiana. Soumis à ..
- ¹⁸ N. Leroy Poff & al., 1997. The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restauration. Bioscience, Vol. 47, N° 11, p. 769.
- ¹⁹ Ph. Bois, 1991. Introduction au traitement de données en hydrologie. Institut national polytechnique de Grenoble, Ecole supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble. 50 p.
- ²⁰ W.H. Press & al., 1992. Numerical Recipies in Fortran, the Art of Scientific Computing, second edition. Chap. 13 : Fourier and spectral applications.

-
- ²¹ W.H. Press & al., 1992. Numerical Recipes in Fortran, the Art of Scientific Computing, second edition. Chap. 13 : Wavelet Transforms.
- ²² D. Lanne, 1993. Application des ondelettes aux séries pluviométriques. Mémoire de DEA, laboratoire d'hydrologie et modélisation, cahier ORSTOM.
- ²³ G. Frantz, 1998. Visual Basic 6.0, le platinium, éd. SYBEX.
- ²⁴ C. Obléd, 1986. Introduction au krigeage. Actes des deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM.
- ²⁵ JP. Deroin, JP. Cautru & JP. Rudant, 1992. The SAREX-92 experiment in french Guyana : lithological and geomorphological aspects, comparison with ERS1 satellite data.
- ²⁶ R. Caloz & C. Puech, 1996. Précis de télédétection, chap. 5 : hydrologie et imagerie satellitaire. Vol. 2, éd. Aupelf-Uref.
- ²⁷ L.Polidori, 1995. Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. Paru dans...
- ²⁸ M.J. Schuft & al., 1999. Development of landscape metrics for characterizing riparian-stream network. Photogrammetric engineering & remote sensing, oct. 1999, p. 1157.
- ²⁹ S. Riazanoff, 1989. Extraction et analyse automatiques de réseaux à partir de modèles numériques de terrain (MNT). Contribution à l'analyse d'images de télédétection. Thèse de l'Université de Paris VII, oct. 1989.
- ³⁰ Erdas Field Guide, 3rd edition, 1995. Chap. : Raster data.
- ³¹ D.R. Lueder, 1959. Aerial photographic interpretation, principles and applications. Mcgraw-hill book company, inc.
- ³² L. Leopold & W. Langbein, 1995. Les méandres des rivières, pour la science HS n°8h de juin 95.
- ³³ C. Puech, 1993. Influence de la résolution dans l'estimation des surfaces d'érosion généralisée par imagerie satellitaire. 2^{ème} réunion sur les changements d'échelle de l'environnement et de la télédétection, Strasbourg, 17-19 mai 1993, p. 59.
- ³⁴ H.Maître & M. Pincioli, 1996. Fractal characterisation of hydrological basin using SAR satellite images. Article 96 C002 de l'école nationale supérieure des télécommunications.
- ³⁵ AA. Beauvais & DR. Montgomery, 1997. Are channel networks statistically self-similar ?. Geology, dec. 97, v. 25, n°12, p. 1063-1066.
- ³⁶ JL. Guyot. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Etudes & Thèses, éd. ORSTOM.
- ³⁷ R.M. Haralick, K. Shanmugam & I. Dinstein, 1973. Textural features for image classification. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, Vol. smc-3, n°6, nov. 1973.
- ³⁸ S.D. McCracken & al., 1999. Remote sensing and GIS at farm property level : demography and deforestation in the Brazillian Amazon. Photogrammetric engineering & remote sensing, nov. 99, p. 1311-1320.
- ³⁹ P.Durand, P. Gaussier & S. Hamidou, 1993. Classification neuronale d'une banque d'images de textures nuageuses à partir d'outils géostatistiques. 2^{ème} réunion sur les changements d'échelle de l'environnement et de la télédétection, Strasbourg, 17-19 mai 1993, p. 91.
- ⁴⁰ J.R. Carr & K. Matanawi, 1999. Correspondance analysis for Principal Components transformation of multispectral and hyperspectral digital images. Photogrammetric engineering & remote sensing, août 99, p. 909-914.
- ⁴¹ L'état du Monde, 1998. Annuaire économique et géopolitique mondial, éd. La découverte.



Préfecture de la région Guyane



UMR CNRS 5576 CESAC
Université Paul Sabatier
TOULOUSE



juin 2001

