



HAL
open science

Descripteurs de la variabilité hydrologique temporelle pouvant structurer les peuplements des écosystèmes d'eau courante

Alexis Malafosse

► **To cite this version:**

Alexis Malafosse. Descripteurs de la variabilité hydrologique temporelle pouvant structurer les peuplements des écosystèmes d'eau courante. Hydrologie. ENSMP, 1996. Français. NNT : . tel-03965318

HAL Id: tel-03965318

<https://hal.inrae.fr/tel-03965318>

Submitted on 31 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Présentée à

Thèse



Alexis MALAFOSSE

Pour obtenir le titre de

Docteur

en

Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives

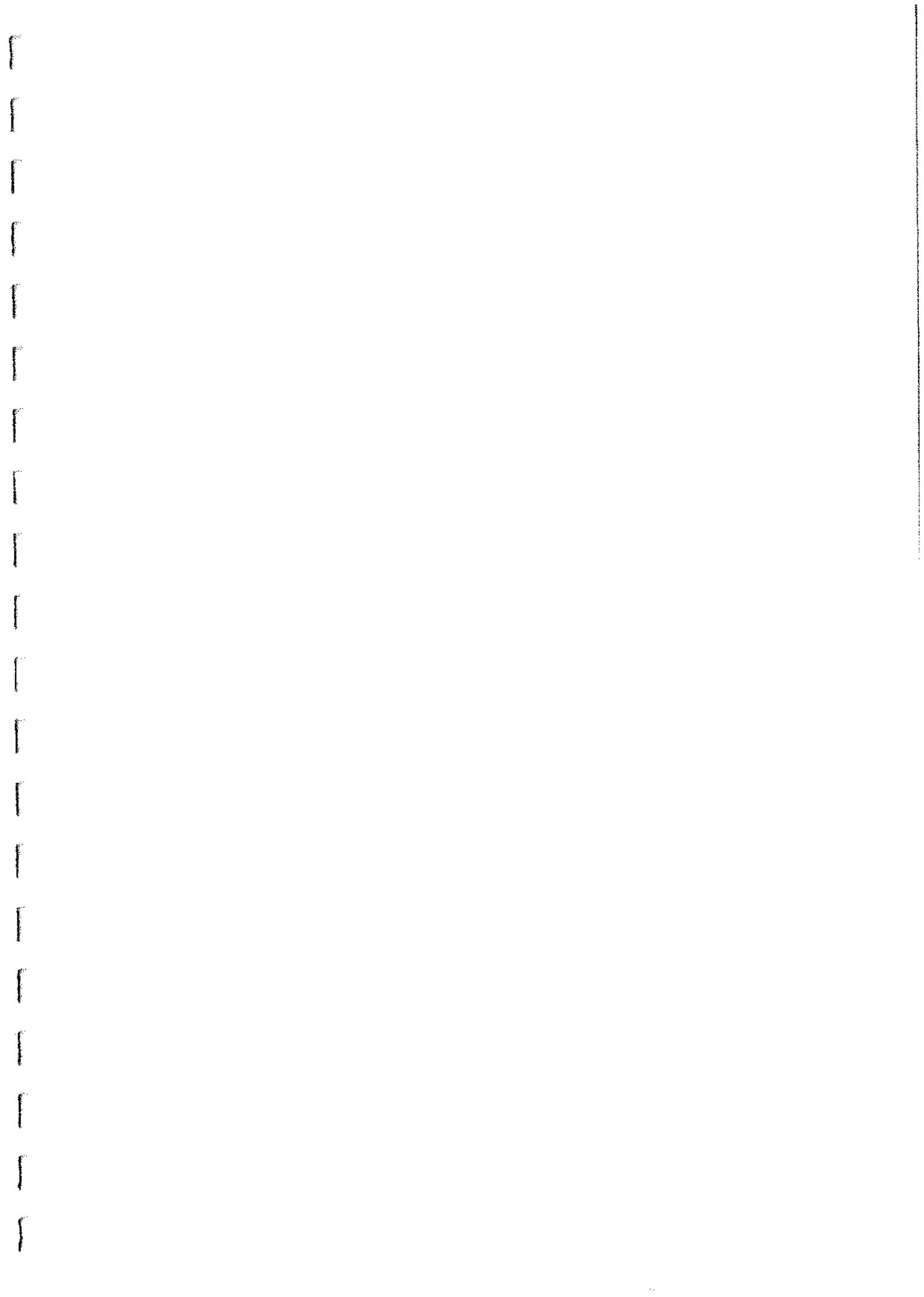
**Descripteurs de la variabilité
hydrologique temporelle
pouvant
structurer les peuplements
des écosystèmes d'eau courante**

Soutenue le 9 octobre 1996 devant le jury composé de :

P. Hubert
G. Oberlin
J. M. Fritsch
D. Pont
P. Brell
Y. Souchon
P. Mérot

Ensm / Cig
Cemagref-Lyon
Orstom
Cnrs-Arles
Cemagref-Lyon
Inra-Rennes

Président
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur



Remerciements

Quatre ans de thèse, c'est une expérience enrichissante que j'ai menée dans la division Hydrologie-Hydraulique du Cemagref de Lyon. Merci à Bernard Chastan, chef de division à mon arrivée, de m'avoir accepté dans son équipe, puis à Pierrick Givone qui l'a remplacé en 1994.

Cette expérience, je la dois également à mon directeur de thèse, Pierre Hubert, Professeur au Centre d'Information Géologique, à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Qu'il en soit remercié. Je la dois aussi à Guy Oberlin, qui m'a fait connaître les recherches en Hydrologie menées au Cemagref de Lyon. Il a su me conseiller, m'a permis de participer à divers congrès ou symposiums internationaux.

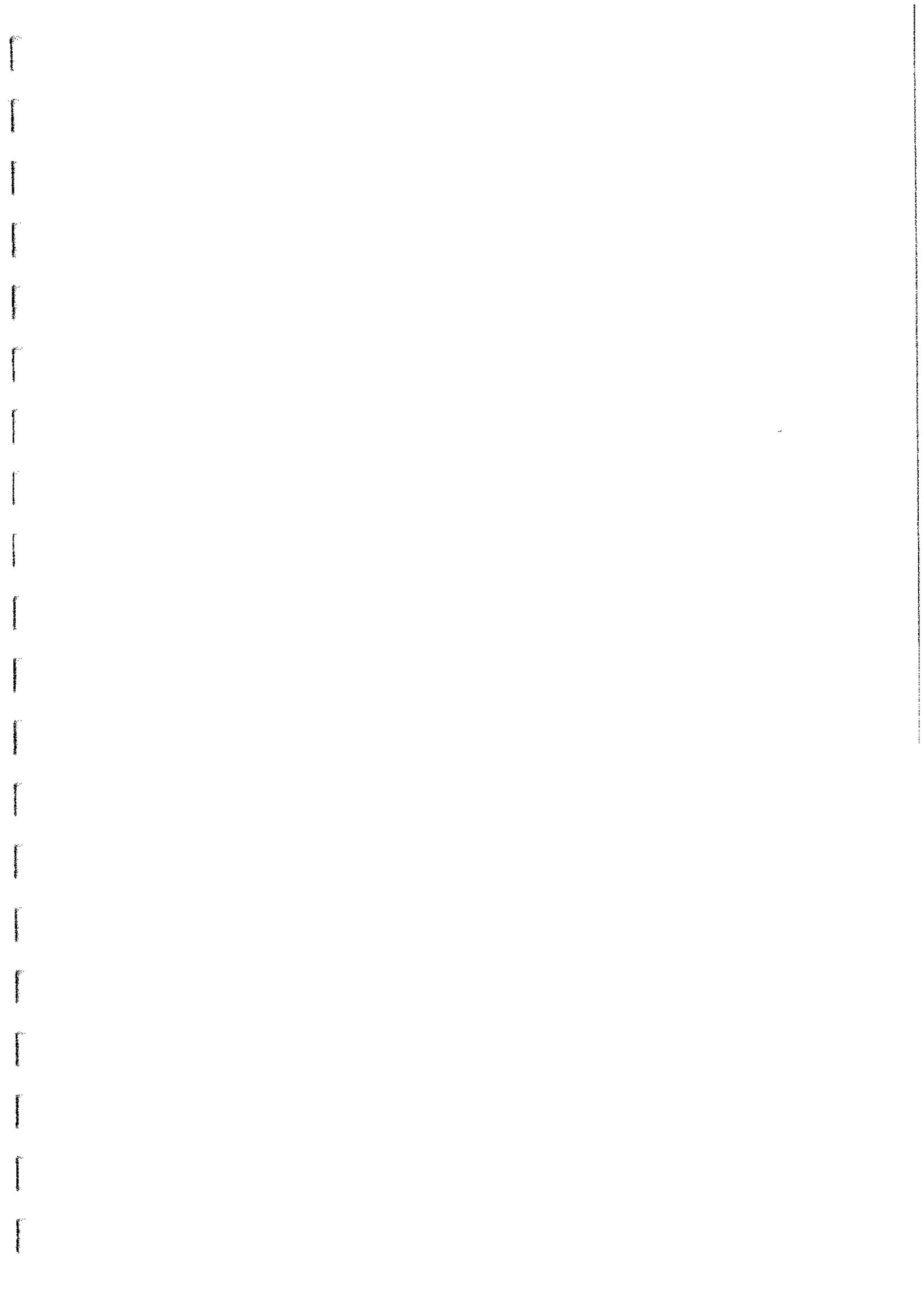
Je remercie également Pascal Breil, Chargé de recherche au Cemagref de Lyon, d'avoir suivi ces recherches pendant ces quatre années.

Je tiens à remercier les deux rapporteurs de ce travail, Messieurs Jean Marie Frisch, Directeur de recherche à l'Orstom de Montpellier et Didier Pont, Chargé de recherche au CNRS.

Je remercie aussi tous les lecteurs du manuscrit, qui m'ont conseillé pour la présentation et la mise en page ainsi que les thésards et stagiaires de la division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques pour m'avoir aidé à découvrir l'environnement du Macintosh.

Enfin, l'Ecole des Mines de Paris et sa formation doctorale en Hydrologie et Hydrogéologie quantitatives a mis à disposition du CEMAGREF de Lyon une bourse de thèse MRT, sans laquelle ces recherches n'auraient pas été possibles.

Cette thèse a été soutenue le 9 octobre 1996 et a reçu la mention très honorable.



Introduction générale

L'hydrologie a développé depuis de nombreuses années des outils mathématiques pour répondre aux besoins de gestion de la ressource en eau liés aux activités humaines. La fin de 20^{ème} siècle marque en France et en Europe (loi sur l'eau, 1992), au travers d'un cadre législatif de plus en plus contraignant, une prise de conscience générale quant aux limites de la ressource en eau superficielle facilement utilisable. En particulier, la diversification des usages de l'eau, générateurs d'interactions avec le milieu naturel, pose des problèmes de qualité des rivières qui jouent aussi le rôle de collecteur.

Au travers de l'étude des populations des écosystèmes aquatiques, l'écologie des rivières permet aujourd'hui de caractériser des états de qualité. Elle est cependant conçue pour des protocoles d'échantillonnage très localisés, et doit considérer les relations fonctionnelles entre le milieu physique et l'activité biologique. L'écologie des rivières a développé nombre de concepts sur les déterminants physiques de l'habitat aquatique, en relation avec des informations piscicoles, sans jamais quantifier le rôle de ces déterminants physiques.

L'hydrologie peut fournir des éléments quantifiés, par l'étude des caractéristiques de débit dans le temps, des conditions physiques de l'habitat aquatique. Sur la base de concepts écologiques régulateurs de la dynamique des populations piscicoles, nous tenterons de développer des caractéristiques de débit adaptées à la description de la variabilité hydrologique pour en dégager une typologie "hydro-écologique". Pour ce faire, il est constitué un échantillon de stations hydrométriques représentatives d'écoulements naturels et sélectionnées selon la diversité des régimes qu'elles représentent. Au cours de ce travail de recherche, il convient d'évaluer l'intérêt de ces nouvelles variables par rapport à des descripteurs plus classiques de la variabilité d'un signal.

Ce travail est ensuite orienté sur l'étude des paramètres physiques et météorologiques pouvant déterminer la variabilité hydro-écologique des écoulements. Une raison essentielle est d'évaluer cette variabilité en tout point du réseau hydrographique des lors que l'on souhaite considérer cette information dans un Schéma Directeur de Gestion et d'Aménagement des eaux, ou SDAGE.

Enfin, il faut noter que cette typologie hydro-écologique ne fournira qu'une variabilité potentielle, en ce sens qu'elle devra être réinterprétée localement en fonction des caractéristiques morphologiques locales des tronçons de rivières qui déterminent prioritairement la disponibilité en habitat aquatique.



Résumé étendu

La Variabilité Hydrologique, notée VH dans ce qui suit, est reconnue par de nombreux auteurs comme étant un des éléments qui structure les Ecosystèmes d'Eau Courante, notés EEC. De nombreux descripteurs de la VH existent en hydrologie mais ils sont conçus pour le dimensionnement d'ouvrage hydrauliques, de franchissement ou encore d'irrigation. Ils répondent prioritairement aux nécessités des activités humaines.

Pour ces raisons, de nouveaux descripteurs de la VH sont proposés dans ce travail à partir des acquis bibliographiques qui sont :

- la nécessité de distinguer la Variabilité Hydrologique fréquente, notée VHf, de la Variabilité Hydrologique peu fréquente, notée VHpf. La VHF structure les EEC à long terme alors que la VHpf les structure à court terme. Les EEC supportent des variations de débit pourvu qu'elles soient peu importantes et pas trop brutales.
- la notion de variation de débit doit être intégrée pour décrire la VH. En effet, Resh *et al.* (1988) considère que ce n'est pas tant un débit atteint ou non qui perturbe les EEC mais un écart de débit par rapport à une référence qui doit être représentative des débits fréquents.

En l'absence de question biologiques précises et de données biologiques nous définissons une caractéristique de débit présentant un intérêt général. Ainsi, nous définissons des variations de débit comme la différence entre le débit d'un jour donné et la médiane des débits des 30 jours précédents qui sont notés ΔQ . La durée de 30 jours est notée mémoire M. A défaut de question biologique précise, seuls les ΔQ les plus forts sont considérés. Ils sont synthésés par deux indices, obtenus par ajustement statistique, qui est la loi exponentielle habituellement appliquée aux crues. Ces indices sont :

- l'indice A. C'est le paramètre d'échelle des ΔQ . C'est un descripteur de la VHpf. Il correspond à l'accroissement des ΔQ avec la période de retour pour $T > 1$ an.
- l'indice B. C'est le paramètre de position des ΔQ . C'est un descripteur de la VHF. Il correspond à la borne supérieure des ΔQ fréquents.

Pour tenir compte des cycles biologiques, la limite séparant la VHF de la VHpf est fixée à un an. Les débits d'une fréquence supérieure à 10 ans ne sont pas considérés car ils suivent habituellement d'autres lois que celles suivies entre 1 et 10 ans. Le domaine de 1 à 10 ans paraît suffisant pour la dynamique biologique des EEC.

Les ΔQ doivent être échantillonnées avec un écart de date de 3 jours pour des bassins versants de moins de 2 000 km² alors qu'ils doivent être échantillonnés avec un écart de date de 10 jours pour les bassins versants d'une taille supérieure à 6 000 km².

La VHpf est peu sensible à la mémoire M alors que la VHF diminue quand la mémoire M diminue. Pour le moment, la mémoire M est conservée comme étant égale à 30 jours, durée compatible avec le cycle d'une partie du bentos. C'est une mémoire à court terme.

Pour savoir si ces nouveaux descripteurs apportent une information complémentaire aux paramètres classiques de la VH, un échantillon de 55 stations hydrométriques est constitué. Les débits sont au pas de temps journalier. Ces stations hydrométriques correspondent à des bassins versants d'une surface inférieure à 1 000 km² pour réduire l'effet d'échelle spatiale, avoir des écoulements peu influencés par les activités humaines. A défaut de données biologiques, l'effet du régime sur la VH est recherché car les EEC ne sont les mêmes selon les régimes. Ainsi, les stations sont choisies comme ayant un régime simple ou mixte, du régime glaciaire au régime pluvial. Ces régimes sont basés sur les débits moyens mensuels inter-annuels définis par Parde (1968). Cependant, des bassins versants d'une surface allant jusqu'à 115 000 km² sont utilisés pour rechercher l'effet d'échelle spatiale sur la VH.

Les descripteurs classiques de la VH sont également rappelés, par saison mensuelle et pour chaque station hydrométrique et comparés aux indices A et B. Seuls l'inter-décile et l'inter-quartile décrivent la VH alors que l'indice A et le gradex des débits sont relativement redondants. Ils correspondent à la VHpf.

Une Analyse en Composantes Principales normée groupe les divers descripteurs qui distinguent la VH et la VHpf selon les critères suivants :

- l'indépendance des descripteurs. L'ACP montre clairement 3 groupes de descripteurs qui sont les indices d'asymétrie, la VH et la VHpf.
- la sensibilité des descripteurs aux distributions de fréquence des débits, donc leur aptitude à distinguer les hautes et basses eaux. Ce critère élimine les indices d'asymétrie.
- l'attribution d'une fréquence d'apparition des variations de débit, pour tenir compte de la durée de vie des espèces aquatiques. Le gradex, des débits, la crue annuelle et les indices A et B sont retenus.

- la prise en compte des variations de débit comme suggéré par Resh (1988).
- l'efficacité de la distinction entre VHF et VHpf. Seuls les indices A et B, le gradex des débits et la crue annuelle remplissent ces conditions. L'inter-décile et l'inter-quartile ne distinguent que la VHF et l'écart-type mélangent les deux.

Les indices A et B sont retenus comme descripteurs remplissant ces conditions. Cependant, les nouvelles variables ne sont pas confrontées pour le moment aux données biologiques.

L'effet du régime et de la saison doivent être conservés pour décrire la VH. En effet, la VH moyenne par mois (en mélangeant les 7 régimes) ou par régime (en mélangeant les 12 mois) fait perdre de 76 à 87% de la variance de l'échantillon.

L'effet d'échelle spatial sur la VH est recherché sur des bassins versants de la Loire et du Rhône. La VH est très dépendante du bassin versant pour des surfaces inférieures à quelques milliers de kilomètres carrés puis elle décroît de façon importante avec la surface.

Ensuite, la régionalisation de la VH est abordée sur le bassin versant de la Loire, qui est découpé en 4 grandes hydroécorégions, avec des critères de relief, de géologie et de climat. Ces hydroécorégions forment des groupes de VH homogène en hautes et basses eaux. Elles sont classées par VH croissante. Parmi les caractéristiques disponibles sur le bassin versant de la Loire, la VH est fortement corrélée aux variables d'écoulement (débit spécifique) mais peu aux autres caractéristiques.

Résumé détaillé

Le rapport de thèse ci-joint fait une large part à l'approche analytique, parfois rébarbative par son caractère redondant mais incontournable pour tout travail de défrichage d'où il est nécessaire d'extraire les résultats essentiels. Un résumé étendu en fonction des principales étapes de cette analyse est donc proposé aux lecteurs qui souhaitent utiliser le caractère méthodologique de ce travail, appliqué ici aux événements hydrologiques de type crue.

1 Rappels bibliographiques.

Les rappels bibliographiques se limitent à l'importance du facteur temps sur la dynamique des écosystèmes en eau courante et aux liens conceptuels entre les fréquences d'une caractéristique de débit et un indicateur biologique dépendant. En effet, l'hydrologie est souvent reconnue comme un facteur physique structurant les écosystèmes en eau courante.

1.1 Importance du facteur temps sur la dynamique des Ecosystèmes en Eau Courante (EEC).

Les EEC sont définis comme un milieu (biotope) inondé dynamique et l'ensemble des espèces animales et végétales (biocénose) qui y vivent. C'est un espace fonctionnel qui rend compte des interrelations trophiques et énergétiques entre les divers composants.

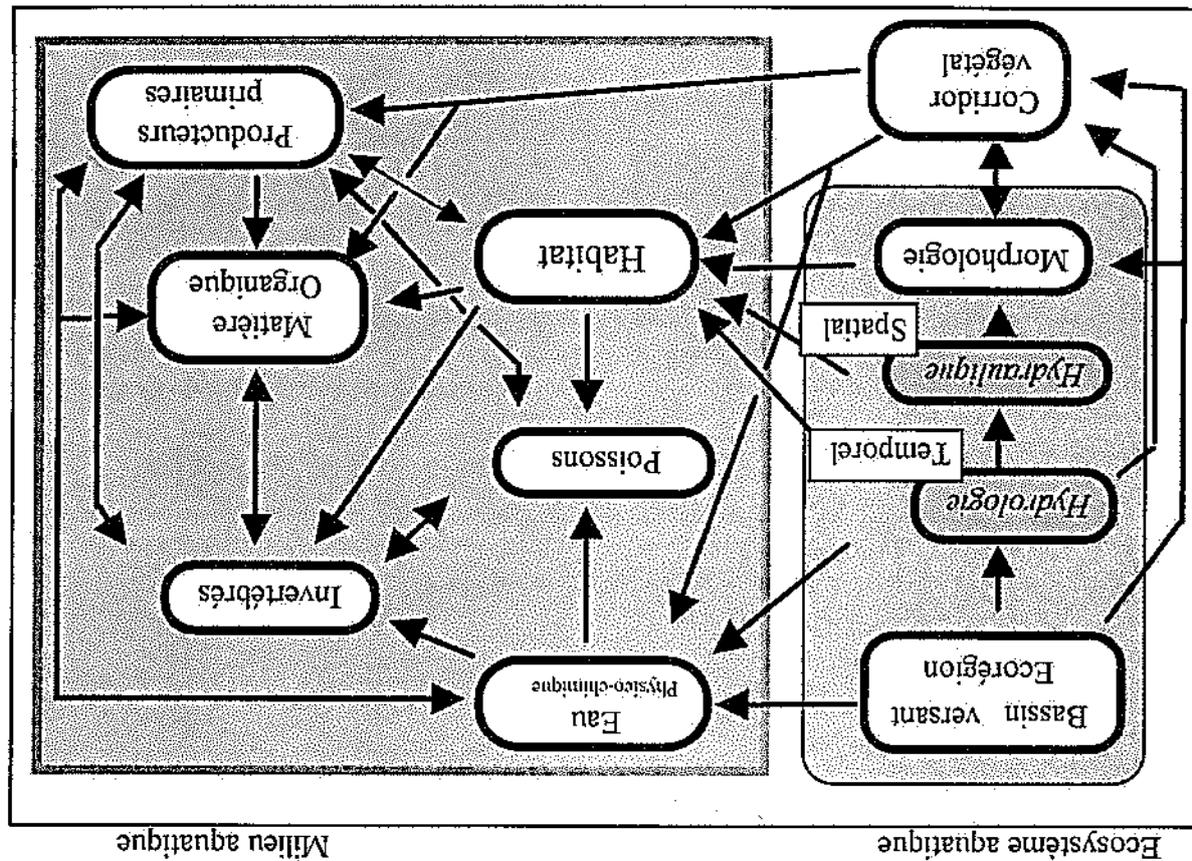


Figure 1.1 Modèle conceptuel de l'écosystème en eau courante (Wasson, 1989, revu par Malafosse, 1993)

L'EBC est divisé en plusieurs compartiments représentatifs des éléments de la biocénose (invertébrés, poissons, producteurs primaires, végétation rivulaire) et du biotope (habitat, morphologie, qualité de l'eau, régime hydrologique).

L'hydrologie est le principal vecteur temporel des flux d'un EBC. Elle agit sur la et la qualité physico-chimique de l'eau à court terme et sur la morphologie du lit de la rivière à moyen terme. Elle conditionne l'habitat aquatique au quotidien comme sur le long terme.

1.2 Lien conceptuel entre les fréquences d'une caractéristique de débit et un indicateur biologique dépendant:

L'hydrologie influence les EBC car elle conditionne l'espace disponible pour les êtres vivants. Les crues et les étiages sont habituellement considérées comme des perturbations des EBC. En effet, ils entraînent une perte de biomasse plus ou moins importante selon leur intensité et selon leur saison.

La question biologique détermine :

- la caractéristique de débit (CD)
- les domaines de fréquence de la CD
- la saisonnalisation qui impose la référence des conditions fréquentes.

Les concepts bibliographiques suggèrent de travailler sur des "variations de débit" calculées par rapport à une référence, qui doit être choisie comme représentative des débits fréquents.

Caractéristique de débit

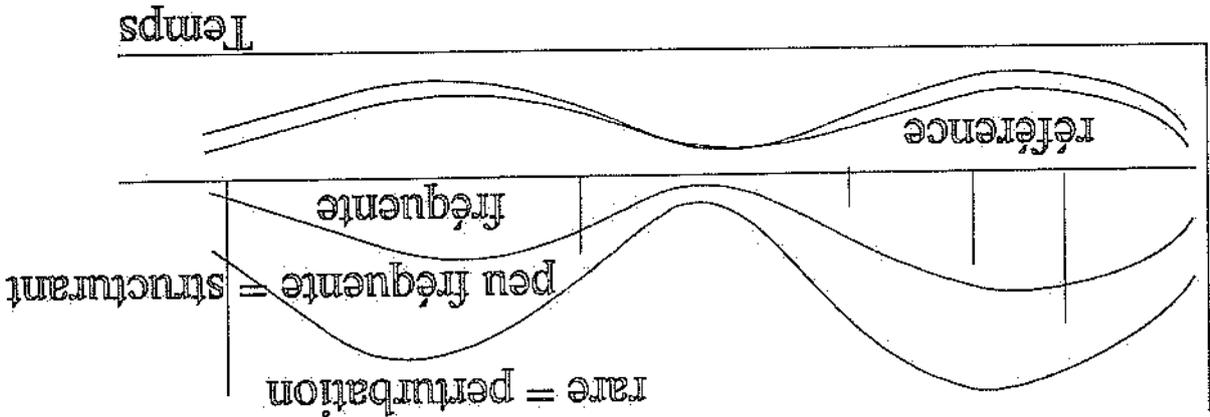


Figure 1.2.1 Représentation des domaines de variation d'une variable d'état au cours des saisons.

La figure 2 synthétise les concepts bibliographiques. Elle représente les divers domaines de variation d'une caractéristique de débit autour d'une référence. Ces domaines sont :

- le domaine des variations fréquentes,
- le domaine des variations peu fréquentes. Ces événements structurent les écosystèmes.
- le domaine des variations rares, qui sont les perturbations qui vont modifier l'équilibre d'un écosystème. Ce domaine n'est pas étudié dans ces recherches.

Naturellement, les domaines d'évolution de la caractéristique de débit changent avec les saisons.

Les variations d'une caractéristique de débit autour d'une référence peuvent être positives ou négatives. Enfin, la référence doit être choisie comme étant représentative des conditions fréquentes de la caractéristique de débit.

Enfin, les traits verticaux représentent divers écarts de la caractéristique de débit, qui peuvent se produire dans les divers domaines cités. Ces écarts de la caractéristique de débit n'ont pas le même effet sur les EBC selon leur intensité, et donc leur fréquence.

Les biologistes ont accès à l'état des écosystèmes à certains moments seulement (figure 3), représentés en gris alors que l'indicateur biologique dépendant évolue avec le temps. L'indicateur biologique est une mesure de l'état de l'EBC, comme la quantité de biomasse présente, le nombre d'espèces aquatiques... Il est indiqué par la ligne continue. Cet indicateur tend vers une valeur optimale, qui évolue avec le temps, représentée par la ligne en pointillé.

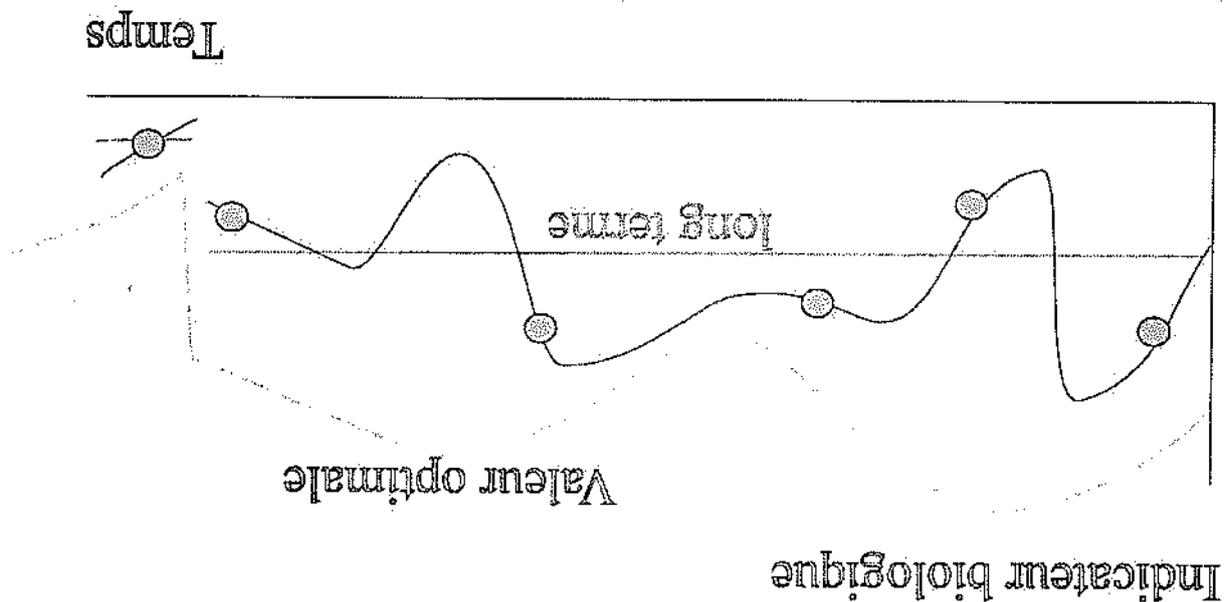


Figure 1.2 Représentation de l'évolution d'un indicateur biologique sous l'effet des événements structurants et des perturbations et des points accessibles aux biologistes (en gris).

Sous l'effet des événements structurants et des perturbations, l'indicateur biologique évolue plus ou moins brutalement, autour d'une valeur centrale ou long terme. Lors d'une perturbation, il y a rupture de l'équilibre de l'écosystème, c'est ce qui est représenté par la discontinuité de la ligne pleine. L'écosystème revient plus ou moins rapidement à l'état antérieur selon l'intensité de la perturbation. Si celle-ci est très forte, l'écosystème peut ne pas à cet état antérieur. Il tend vers un nouvel équilibre "long terme".

En l'absence de données biologiques et de question biologique précise, nous partons de l'hypothèse que pour différents régimes d'écoulement, les EBC sont différents. Ainsi, un

2.2 Données sélectionnées.

Les chroniques de débits journaliers non influencées par des aménagements sont retenues comme données de base.

rarement concomitantes. La connaissance régionale de la VH est indispensable.

- être régionalisable. En effet, les données biologiques et hydrobiologiques sont hydrologique calculée soit représentative du régime et du cours d'eau étudié.
- être disponible, il doit exister des chroniques assez longues pour que la variabilité la dynamique des espèces aquatiques (quelques années à quelques décennies)
- permettre le calcul de fréquences des caractéristiques de débits en rapport avec milliers de km².
- rendre compte au mieux de la dynamique d'écoulement des bassins versants souvent rencontrés, pour des bassins versants d'une surface de quelques centaines à quelques

Les caractéristiques requises de la donnée choisie doit :

2.1 Critères de choix des données hydrologiques.

- de l'absence de question biologique précise.
- des concepts bibliographiques,

présentes, en tenant compte :

Les données hydrologiques sont présentées puis de nouveaux descripteurs de la VH sont

2 Données hydrologiques et construction de nouveaux descripteurs de la VH tenant compte des concepts bibliographiques.

La seconde partie est consacrée aux choix des données utilisées pour décrire la variabilité hydrologique et la méthode proposée pour distinguer la VHF et la VHP.

choisir, elle doit être facile à calculer et à comprendre.

indicateur de la capacité d'accueil long terme d'un cours d'eau. Naturellement, la référence est à effet, la référence évolue probablement au cours de l'année. Ce descripteur pourrait être un

- un descripteur rendant compte de la variabilité saisonnière de la référence. En fonction de critères biologiques, comme la durée de vie des espèces aquatiques ou du cycle annuel
- des descripteurs de la VHF et de la VHP. ces descripteurs doivent être calculés à partir de variations de débit. Cela implique de choisir une référence, qui doit être prise comme représentative des débits fréquents. La limite entre la VHF et la VHP doit être choisie, en

de la question biologique posée. Nous devons proposer deux types de descripteurs de la VH :

La variabilité hydrologique fréquente structure les EBC à long terme alors que la VHP les structure à court terme. Cependant, il faut définir la caractéristique de débit étudiée en fonction

1.3 Résumé de la bibliographie.

Les événements maxima journaliers sont retenus comme caractéristiques de débit d'ordre général. Ils sont utilisés comme tels dans le développement méthodologique. De plus,

Tableau 2.3 Durée de vie et durée du cycle de reproduction des poissons et des invertébrés.

Caractéristiques de débit (CD)	Crues et étiages selon les stades	Crues essentiellement
Cycles de reproduction	1 an	quelques mois
Cycles de vie	5 à 6 ans	1 mois à plus
Poissons	Invertébrés	

En l'absence de question biologique précise, il a été défini une question biologique d'ordre général à partir de deux indicateurs biologiques considérés comme représentatifs de l'état d'un écosystème d'eau courante. Ces indicateurs sont les Poissons et les Invertébrés.

2.3 Question biologique d'ordre général.

Les données choisies sont de petits bassins versants pour ne pas être influencés par les aménagements et pour être en régime simple ou mixte, pour éviter les mélanges de régimes qui pourraient modifier la sensibilité des descripteurs au régime.

Tableau 2.2 Répartition des stations hydrométriques selon les régimes d'écoulement (Parde, 1968)

N°	Régimes	Nombre	Surface	Durées
1	Glaciaire	4	2200 km ²	9 à 87 ans de QJ
2	Nivo-glaciaire	6		
3	Nival	10		
4	Nivo-pluvial	13		
5	Pluvio-nival	5		
6	Pluvial non cévenol	10		
7	Pluvial cévenol	7		

La répartition des stations hydrométriques selon les régimes d'écoulement est proposée.

Cependant, cette classification n'est pas universelle, elle ne s'applique pas à tous les régimes d'écoulement. Les données sont choisies dans l'arc alpin car les régimes d'écoulement y sont diversifiés et contrastés, d'où une large gamme de variabilité hydrologique a priori.

La classification des cours d'eau qui est choisie est celle de Parde (1968). La classification des régimes d'écoulement proposés par cet auteur est basée sur la répartition des débits moyens inter-annuels mensuels au cours de l'année. Cette classification est choisie car :

- elle simple et opérationnelle,
- elle ne présente pas trop de régimes et de sous - régimes,
- elle s'applique bien aux climats tempérés.

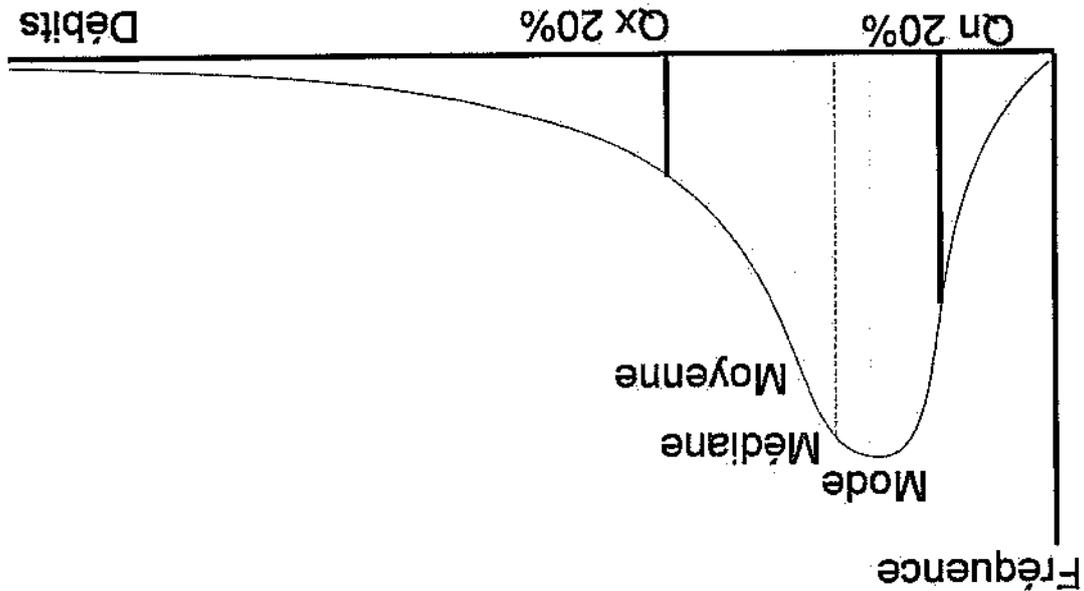
≠ régimes ⇒ ≠ écosystèmes

échantillon de 55 stations hydrométriques au pas de temps journalier est constitué. L'intérêt de tester les nouvelles variables sur des régimes contrastés est de vérifier leur sensibilité au régime à défaut d'en vérifier la pertinence biologique.

La médiane d'un échantillon de débits est représentative des débits fréquents, elle sera conservée comme référence pour calculer la VH à long terme ou à court terme.

Pour l'ensemble des stations sélectionnées, l'interquantile 20 % / 80 % correspond à moins de 10 % de la variance totale des débits autour de la médiane.

Figure 2.4.1 Distribution de fréquence théorique de débit journaliers et position de débits représentatifs des débits fréquents.



La référence permettant de calculer les variations de débit doit être représentative des débits fréquents. Nous avons plusieurs choix.

- la moyenne, facile à calculer mais influencée par les valeurs extrêmes, non représentatives des débits fréquents,
- le mode, qui impose le choix des classes de débits. La valeur du mode dépend également des classes de débits. De plus, le risque d'avoir des distributions de débit plurimodales n'est pas négligeable.
- la médiane, facile à calculer, représentative des débits fréquents et facile à comprendre. De plus, elle n'est pas influencée par les valeurs extrêmes, comme l'est la moyenne.

2.4.1 Choix de la référence représentative des débits fréquents.

D'après la bibliographie, seuls les "variations" de débit sont à prendre en compte pour définir la perturbation (Resh et al., 1988). Il faut choisir une référence pour calculer ces variations de débit.

2.4 Choix d'une référence représentative des débits fréquents et calcul de sa variabilité saisonnière.

les outils statistiques permettant de travailler sur ces événements sont disponibles et opérationnels.

2.4.2 Calcul de la variabilité saisonnière des débits fréquents.

Les débits considérés comme représentatifs des débits fréquents sont les débits médians. Ce descripteur de la VH rend compte de la distorsion des débits journaliers mensuels au cours de l'année par rapport au débit médian général.

Pour chaque station, les 12 débits médians mensuels inter-annuels sont calculés pour une station. Le débit médian inter-annuel général sert de référence. Ils sont représentés sur la figure 2.8.1.

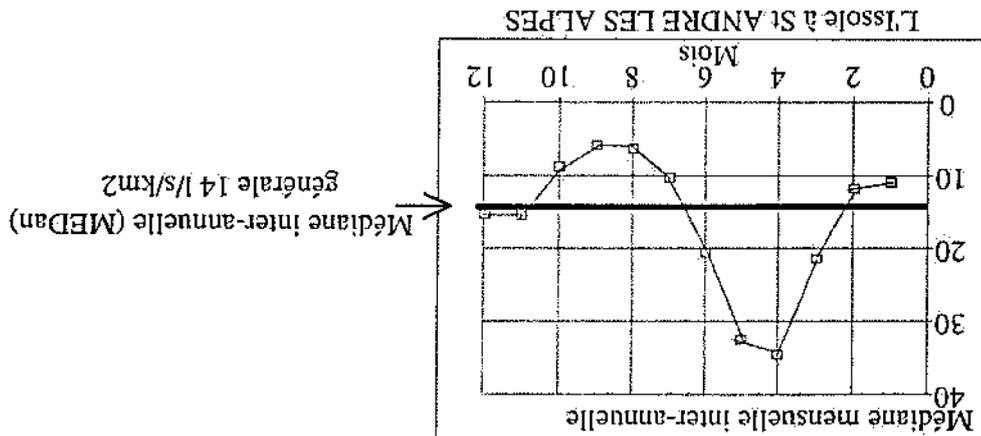


Figure 2.4.2.1 Médiane mensuelle inter-annuelle et médiane inter-annuelle générale.

Pour chaque mois et pour une station donnée, le rapport entre le débit médian inter-annuel et cette référence est calculé, selon la formule indiquée ci-dessous. Ce rapport fournit une indication de la distorsion des débits fréquents au cours du cycle annuel, de 12 mois.

$$RAPM = MED_m / MED_{an}$$

La figure 2.4.2.2 représente l'indice mensuel de distorsion pour une station.

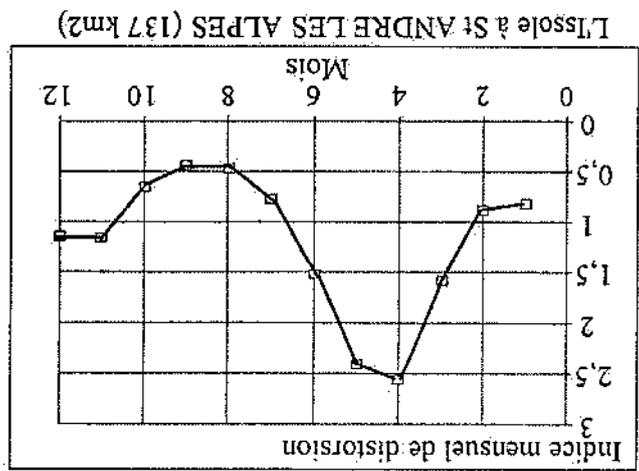
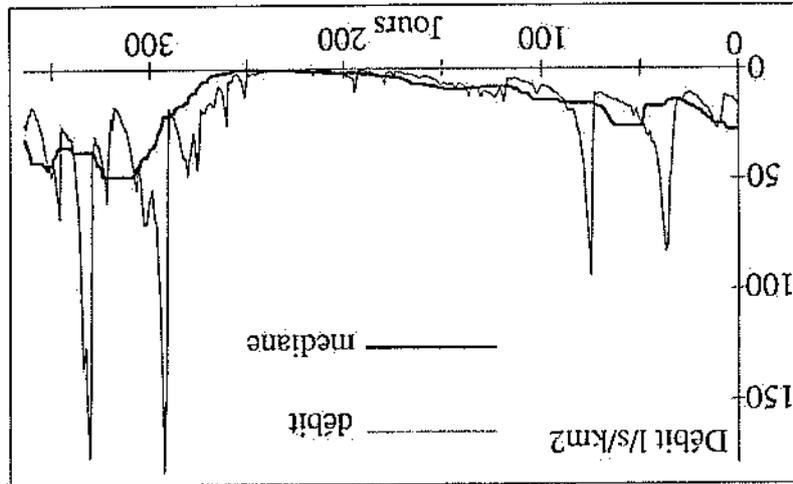


Figure 2.4.2.2 Indice mensuel de distorsion sur une station.

Les chroniques de débits journaliers sont transformées en chroniques de ΔQ journaliers, ce qui est facile à faire de tels débits. Seule la valeur absolue des ΔQ est considérée, ce qui exclut les ΔQ négatifs. De plus, les ΔQ les plus forts sont positifs car ils correspondent à des

Figure 2.5.1.1 Exemple de chronique de débits journaliers et de médiane glissante sur 30 jours.



La durée de 30 jours est retenue car elle correspond à certains cycles du benthos, mais elle peut être modifiée. Pour le moment, nous n'avons pas de donnée biologique permettant de la fixer.

$$\Delta Q_j(t_0) = Q_j(t_0) - [\text{médiane des } 30 Q_j(t) \text{ antérieurs à } t_0]$$

Les variations de débit sont définies comme la différence entre le débit d'un jour donné et la médiane des débits de 30 jours précédents. La médiane sert de référence pour calculer les écarts de débits, notés ΔQ . Les écarts de débits sont donc calculés par rapport aux débits fréquents. Cette mémoire est une mémoire à court terme.

Pour définir la perturbation, la définition de Stanford et Ward (1986) ou celle de Resh *et al.* (1988) est reprise. La perturbation est un écart de débit par rapport aux débits fréquents, les débits fréquents étant représentés par la médiane des débits.

2.5.1 Définition et calcul des variations de débit.

Dans un premier temps, les variations de débit sont définies et calculées avant de calculer la VHF et la VHpf.

2.5 Définition et calcul de la VHF et de la VHpf.

Ce rapport est important car les débits fréquents structurent également les EBC, mais à long terme. Plus la distorsion est grande, plus les débits fréquents évoluent fortement au cours de l'année.

L'indice mensuel de distorsion RAPM caractérise la VH relative intra-annuelle des débits fréquents. RAPM pourrait être un indicateur de "capacité d'accueil maximale des cours d'eau" saisonnière.

augmentations brutales de débit, à l'occasion des crues. La VHF et la VHPF sont calculées à partir des chroniques de ΔQ .

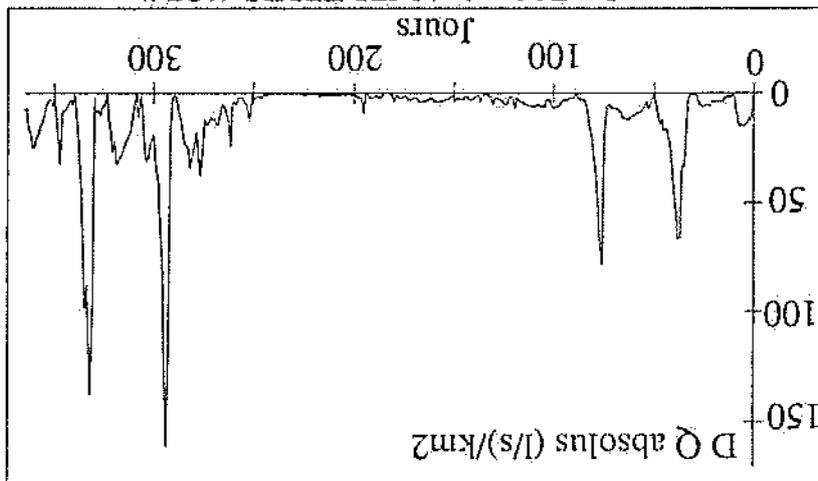


Figure 2.5.1.2 Exemple de chronique ΔQ de journaliers.

Les chroniques de débits journaliers sont transformées en chroniques de ΔQ .

2.5.2 Distinction et calcul de la variabilité hydrologique fréquente (VHF) et peu fréquente (VHPF).

Comme les ΔQ sont calculés chaque jour, il est nécessaire de les synthétiser, comme cela se fait avec les débits. De plus, seuls les ΔQ les plus forts peuvent être des perturbations. Les ΔQ les plus forts sont échantillonnés avec deux règles :

- 6 maxima par an pour avoir des échantillons suffisamment étouffés,
- un intervalle de date de 3 jours entre deux ΔQ pour assurer une certaine indépendance entre les ΔQ .

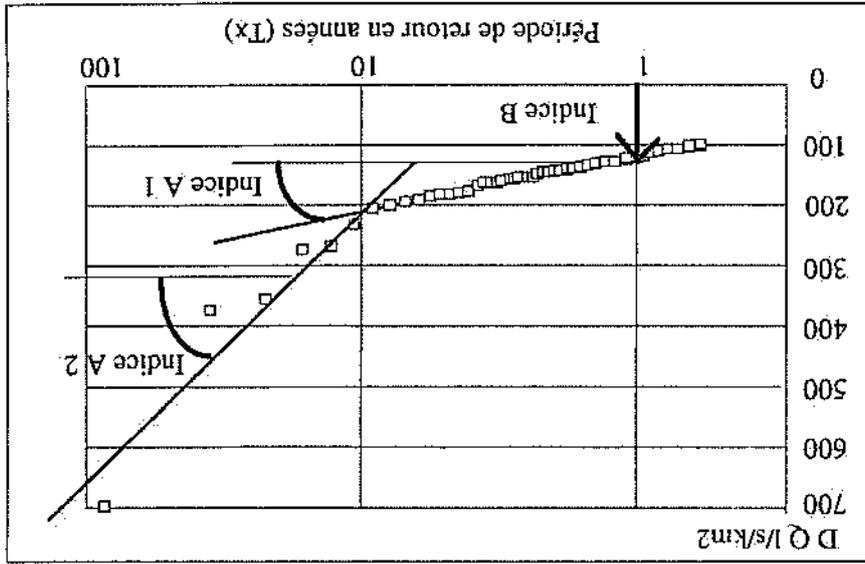
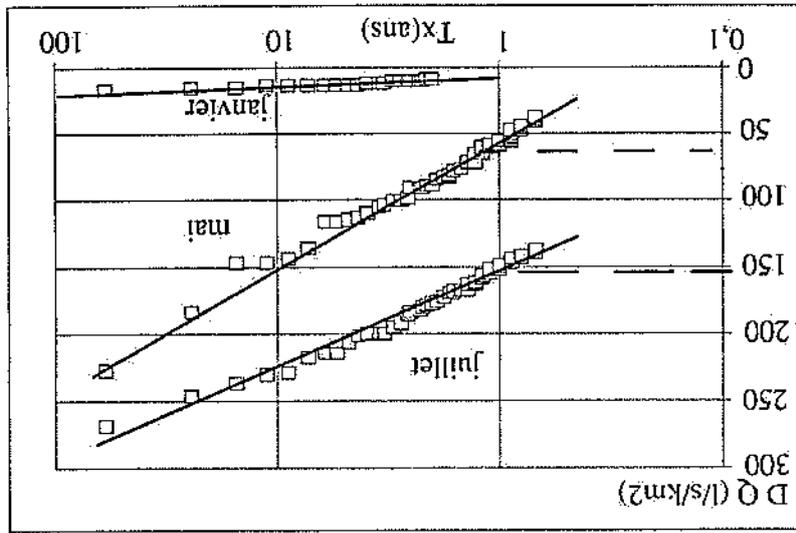


Figure 2.5.2 Quantification de la VHF et de la VHPF sur un exemple, la Roizonne à la ROCHETTE (72 km², nival, septembre).

Figure 2.6 Effet de la saison sur les ΔQ sur l'Isère à Val d'Isère (46 km², régime glaciaire).



La saisonnalisation de la VH est nécessaire pour tenir compte des cycles biologiques. Elle permettra de rendre compte de l'évolution de la VH au cours de l'année et de cerner quelles sont les saisons pendant lesquelles la VH est la plus forte et celles pendant lesquelles elle est la plus faible. L'exemple présenté est l'Isère à Val d'Isère, qui est un cours d'eau en régime glaciaire.

2.6 Saisonnalisation de la variabilité hydrologique.

Les ΔQ d'une fréquence supérieure à 10 ans sont considérés comme des perturbations et non étudiés. En effet, selon les bassins versants, les débits suivent un autre gradex, pour des périodes de retour dépendant du bassin et de la saison. Ce phénomène se produit lorsque les bassins versants sont saturés. Le gradex des débits tend vers le gradex des pluies. Tout accroissement de précipitation provoque un écoulement supplémentaire. C'est la perturbation, qui s'accompagne d'une rupture de l'équilibre de l'EBC, plus ou moins important, souvent accompagné d'un remaniement important de l'habitat.

La pente de la droite d'ajustement, obtenue par la méthode du maximum de vraisemblance.

- la VH peu fréquente correspond aux périodes de retour comprises entre 1 an et 10 ans. Elle est notée VHPF. Ces limites sont choisies car elles sont compatibles avec la durée de vie des espèces piscicoles (quelques années). Elle est notée indice A. Elle correspond à la
- la VH fréquente pour $T < 1$ an. Elle est notée VHF. C'est la variabilité court terme subie par les EBC, sans perte de biomasse. La limite est choisie à 1 an car elle est compatible avec la durée de vie de bien des espèces piscicoles comme la Truite. Elle est notée indice B.

Les fréquences suivantes sont retenues :

Les ΔQ sont classés par ordre décroissant et une période de retour est attribuée à chaque ΔQ , le plus grand ayant la plus grande période de retour. La loi exponentielle de distribution des débits est appliquée aux échantillons de ΔQ . Habituellement, les ΔQ suivent une loi exponentielle à deux paramètres.

Pour l'exemple présenté, les mois d'étiage se caractérisent par une faible VH, alors que les mois d'écoulement (mai à juillet par exemple) se caractérisent par une forte VH, notamment une forte VHF.

La durée de la saison et la caractéristique de débit déterminent la constance de l'échantillon statistique. Pour le poisson, une saisonnalisation mensuelle de la VH paraît adaptée mais elle est également utilisable pour les invertébrés.

La saison mensuelle est retenue car :

- elle est facile à programmer,
- elle est assez fine pour rendre compte de la saisonnalisation de la VH au cours de l'année.
- elle semble bien adaptée aux espèces aquatiques, et notamment aux poissons.

Une saison plus fine aurait posé des difficultés de programmation, de gestion des données et d'échantillonnage des ΔQ , sans forcément mieux décrire la VH.

2.7 Conclusion de la construction des nouveaux descripteurs de la VH.

Cette partie est consacrée à la méthodologie de calcul de la VHF et de la VHPF. Les chroniques de débit journaliers sont les données hydrologiques de base. En l'absence de question biologique précise, les maxima journaliers sont retenus comme étant la caractéristique de débit retenue. En effet, il existe des outils opérationnels permettant de travailler avec les crues.

En l'absence de données biologiques, la sensibilité des descripteurs au régime est recherchée car les écosystèmes en eau courante ne sont pas les mêmes selon les régimes.

La VH est calculée pour chaque mois de l'année, en inter-annuel, pour percevoir l'effet de la saison, pour tenir compte des stades biologiques des diverses espèces aquatiques.

La VHF et la VHPF sont distinguées avec la loi exponentielle appliquée aux chroniques de ΔQ . Les ΔQ sont calculés comme la différence entre le débit d'un jour donné et la médiane des 30 jours précédents, qui sert de référence. Compte tenu de la longévité de bien des espèces piscicoles comme la Truite et du cycle de reproduction annuel, les fréquences limitant ces VH ont été choisies comme étant égales à :

- 1 an : les événements ayant un période de retour inférieure à 1 an sont considérés comme ne structurant pas les écosystèmes aquatiques. Ce domaine de fréquence est considéré comme appartenant à la VHF.
- entre 1 et 10 ans, c'est le domaine de la VHPF. C'est le domaine qui structure les EBC.
- pour des fréquences supérieures à 10 ans, ce sont les perturbations. Elles ne sont pas étudiées pour le moment.

3 Evaluation des nouveaux descripteurs de la VH.

Les nouveaux descripteurs proposés dans la partie précédente sont comparés et évalués aux nombreux descripteurs classiques de la VH. Pour cela, il faut se donner des critères d'évaluation des nouveaux descripteurs.

Les critères de choix des descripteurs qui sont conservés sont :

- la capacité à distinguer la VHF et la VHP, conformément aux concepts bibliographiques;
- l'association des variables avec la fréquence, pour coller aux cycles du benthos et pour distinguer la VHF et la VHP;
- la sensibilité à la saison, donc la capacité à distinguer les hautes eaux des basses eaux. Les distributions de fréquence des débits ne sont pas les mêmes selon les saisons, un descripteur qui ne les distinguerait pas ne serait pas intéressant.
- la sensibilité aux régimes, pour distinguer les régimes entre eux car les EFC ne sont pas les mêmes selon les régimes.

Tableau 3.1 Présentation des descripteurs classiques de la variabilité hydrologique.

Descripteurs de la VH	Mesure de DF	Taille échantillon
	A	peu fréquent
	B	fréquent
	RAFm	fréquent
	Grades des débits	peu fréquent
	Q0	fréquent
	Ecart-type	
	Inter-décile	Étendue
	Inter-quartile	
	Indice saisonnier	
	Coef variation	
	Moyenne/Médiane	
	Inter-décile/Médiane	
	Inter-quartile/Médiane	
	Ordre 3	Asymétrie
	Qx 25% / Qn 25%	
	$\sigma[\ln(Q)]$	
	$\sigma[\ln(Q+1)]$	
	C.V. $[\ln(Q)]$	
C.V. $[\ln(Q+1)]$		

Pour 1 station,
12 valeurs
soit 660 valeurs
(55 stations*12 mois)

Les nouvelles variables sont comparées aux descripteurs de la VH classiques. Les descripteurs classiques sont l'écart-type, de l'inter-décile, de l'inter-quartile, du moment d'ordre 3. La liste n'est pas exhaustive. En tout, 19 descripteurs de la VH sont testés, dont les 3 nouveaux.

3.1 Critères d'évaluation des nouveaux descripteurs de la VH.

Pour valider les nouveaux descripteurs de la VH, il est essentiel de vérifier s'ils sont redondants avec les descripteurs classiques de la VH. Pour cela, la sensibilité des descripteurs à la saison est testée avec l'analyse de variance et l'ACP normée définit les grands groupes de descripteurs.

3.2 Recherche de la sensibilité des descripteurs de la VH aux effets saisonniers.

La sensibilité à la saison est testée à l'aide de l'analyse de la variance. Les crues se produisant plutôt en hautes eaux, les descripteurs qui présentent leur valeur maximale en hautes eaux sont plus intéressants que les autres. L'exemple choisi est l'indice A (variabilité peu fréquente) en régime évenol.

À partir des valeurs de cet indice pour chaque mois et pour chaque station, nous pouvons constituer des saisons de VH moyenne identique, au sens statistique de terme, en regroupant des mois de même VH moyenne. Pour cela, la VH moyenne du mois de janvier est comparée à celle des 11 autres mois, celle de février est comparée à celle des 10 mois suivants... Le test utilisé est celui de Fisher.

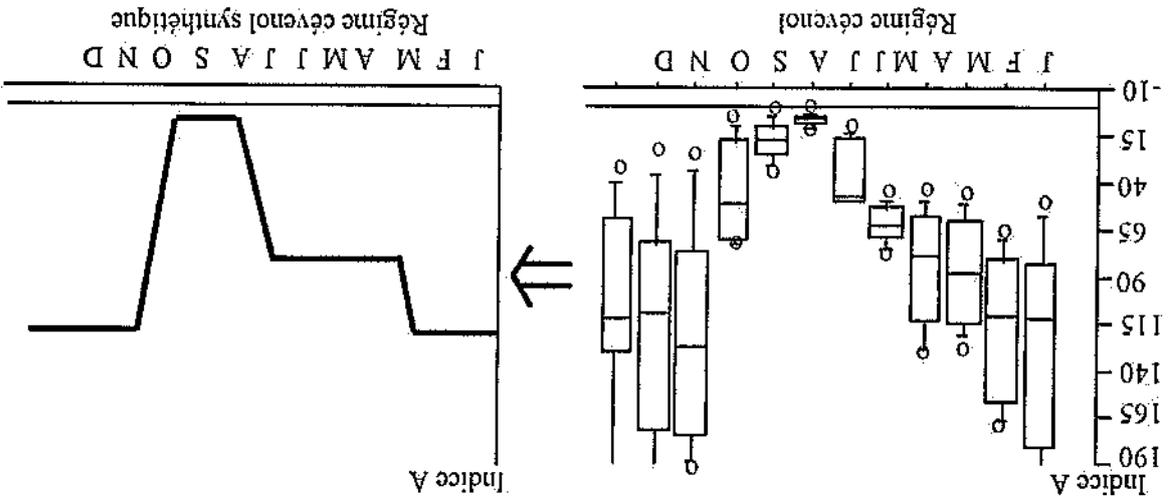


Figure 3.2 Constitution des régimes synthétiques à partir des données brutes.

Les mois de même VH moyenne d'un régime donné sont regroupés et constituent une saison de VH homogène, continue ou non. Ainsi, les "régimes synthétiques" sont constitués, avec n saisons, $n \leq 12$.

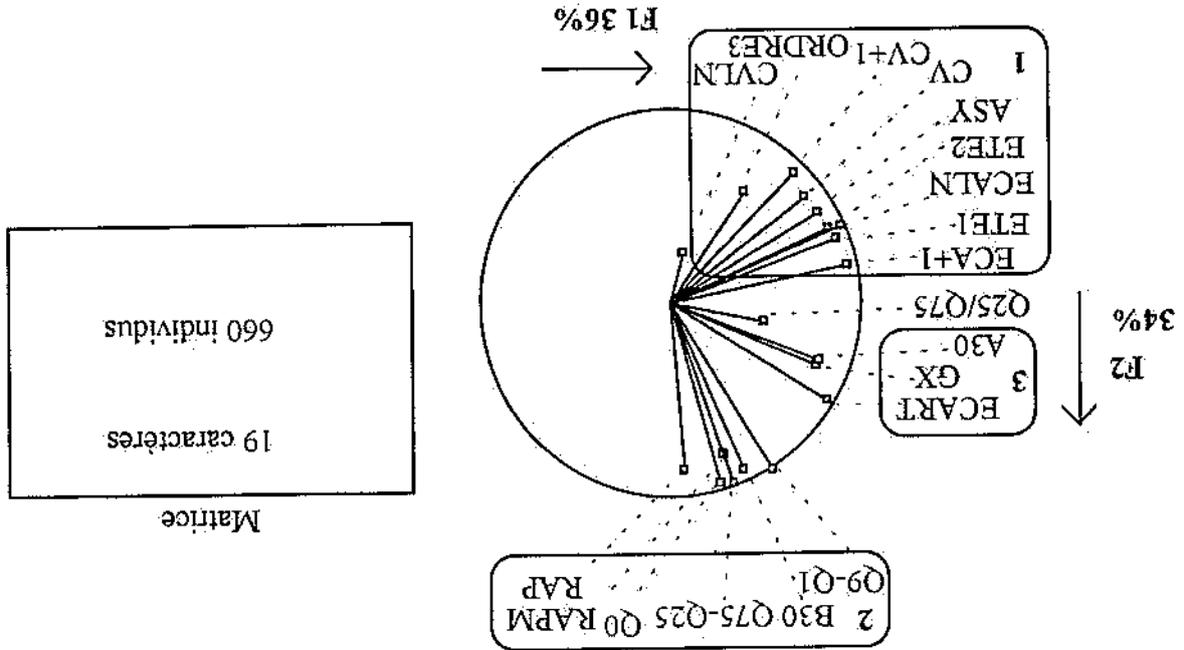
Deux groupes de descripteurs ont été définis :

- les descripteurs peu sensibles aux distributions de fréquence des débits, donc à la saison. Ils présentent une valeur similaire aussi bien en hautes qu'en basses eaux alors que les distributions de fréquence des débits ne sont pas les mêmes. Leur la valeur passe par un maximum à la fin de l'étage, pour tous les régimes. Parfois, un deuxième maximum intervient à la fin des écoulements, lorsque l'étage commence. De plus, ces descripteurs présentent un faible rapport entre saison de VH extrême.

- les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence des débits, donc à la saison. Nous avons les indices A et B, mais aussi le gradex des débits, la crue annuelle, les inter-quartile et l'écart-type. Ces indices sont plus sensibles aux distributions de fréquence des débits car ils passent par leur valeur maximale en hautes eaux, par leur valeur minimale en basses eaux et leur rapport entre saison de VH extrême est plus fort qu'avec les indices d'asymétrie.

- l'axe F1 (36%), qui regroupe les indices d'asymétrie, (groupe 1) comme le rapport de la moyenne à la médiane, le moment d'ordre 3, l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane, l'écart-type et le coefficient de variation. Les indices de déviation ou non, le coefficient de variation.

Figure 3.3.1 Définition des grands groupes de descripteurs de la VH sur le plan factoriel F1F2.



Le cercle de corrélation indique trois groupes de variables. Ces groupes sont encadrés.

3.3.1 Définition des grands groupes de descripteurs.

L'évaluation de la redondance des nouveaux descripteurs avec les descripteurs classiques de la VH est réalisée avec l'ACP normée. Les descripteurs sont centrés réduits pour les rendre comparables entre eux. L'ACP normée définit des groupes de variables plus ou moins redondantes mais aussi de savoir quelle est la sensibilité des descripteurs aux régimes et à la saison.

3.3 Evaluation de la redondance des nouveaux descripteurs avec les descripteurs classiques de la VH.

Les indices A et B sont sensibles à la saison car ils décelent un grand nombre de saisons et le rapport entre saisons extrêmes est fort. Ils conservent l'information liée aux effets saisonniers.

Tableau 3.2 Distinction des deux groupes de descripteurs selon leur sensibilité aux saisons.

Type de descripteurs	Nombre de saisons	1 à 4 (2,7)	1 à 7 (4)	Sensibles aux saisons
Rapport des extrêmes	1 à 4,6 (<2)	1 à 20 (5)		
Asymétrie				Fréquent, peu fréquent, étendue

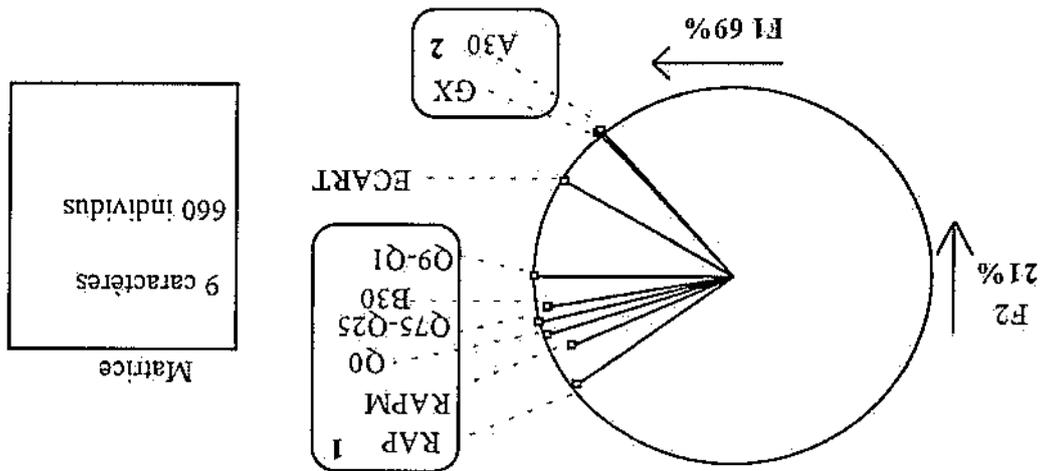
La position de régimes dans le plan de la VHF et de la VHPf permet de savoir si elles sont à même de les distinguer. Les centres de gravité des régimes sont placés dans le plan F1 F2. Les traits relient chaque point de chaque régime au centre de gravité du régime correspondant, d'où les étoiles.

3.3.3 Position des régimes dans le plan des variabilités fréquentes et peu fréquentes.

Par contre, l'indice A et le gradex des débits sont fortement redondants alors que l'indice B et RAPM sont liés aux étendues de débits, comme l'inter-décile et l'inter-quartile.

- l'axe F2 (21 %) est dominé par la VHPf (groupe 2). La VHPf est indépendante de la VHF, le coefficient de détermination entre la VHF et la VHPf est de 0,21 pour les 660 individus.
- l'axe F1 (69 %) est dominé par la VHF, (groupe 1) notamment par l'inter-décile qui est situé sur cet axe.

Figure 3.3.2 Distinction des variabilités fréquentes et peu fréquentes dans le plan factoriel F1F2



Une nouvelle ACPn est réalisée sans les indices d'asymétrie pour vérifier que la VHF et que la VHPf se distinguent. L'ACP normée permet de distinguer deux grands groupes de descripteurs.

3.3.2 Distinction des variabilités fréquentes et peu fréquentes.

Les indices d'asymétrie forment un groupe homogène mais ils sont supprimés car peu sensibles aux saisons. De plus, le logarithme des débits efface les plus forts débits, c'est un inconvénient.

- le groupe 3 correspond à la VHPf, avec l'écart-type, le gradex des débits et l'indice A.

- l'axe F2 (34 %), qui représente la VHF, (groupe 2) avec des descripteurs comme l'indice B, l'inter-quartile et l'inter-décile, la crue annuelle, l'indice mensuel de distorsion et l'indice saisonnier.

La variance des caractères est donc essentiellement due à la VH à l'intérieur d'un régime donné. Les régimes et les saisons doivent être conservés pour décrire la VH.

Tableau 3.4 Répartition de la variance de l'échantillon selon les régimes et les saisons.

ACP inter	24 %	
ACP intra	76 % de la variance	87 % de la variance
Régime		Saison

Les différences entre classes (analyse inter-régime et inter-mois) sont faibles alors que la VH à l'intérieur d'une classe donnée (analyse intra-régime et intra-mois) est forte. Cela s'explique car les régimes présentent une VH qui évolue au cours des saisons.

Les analyses intra et interclasses (Chessel et Dolédec, 1993) permettent d'apprécier l'effet du régime et de la saison sur la VH. Comme nous n'avons pas de méthode permettant d'optimiser la VHF et la VHPF par régime et en l'absence d'autres critères de regroupement, la classification des régimes de Pardé (1968) est conservée.

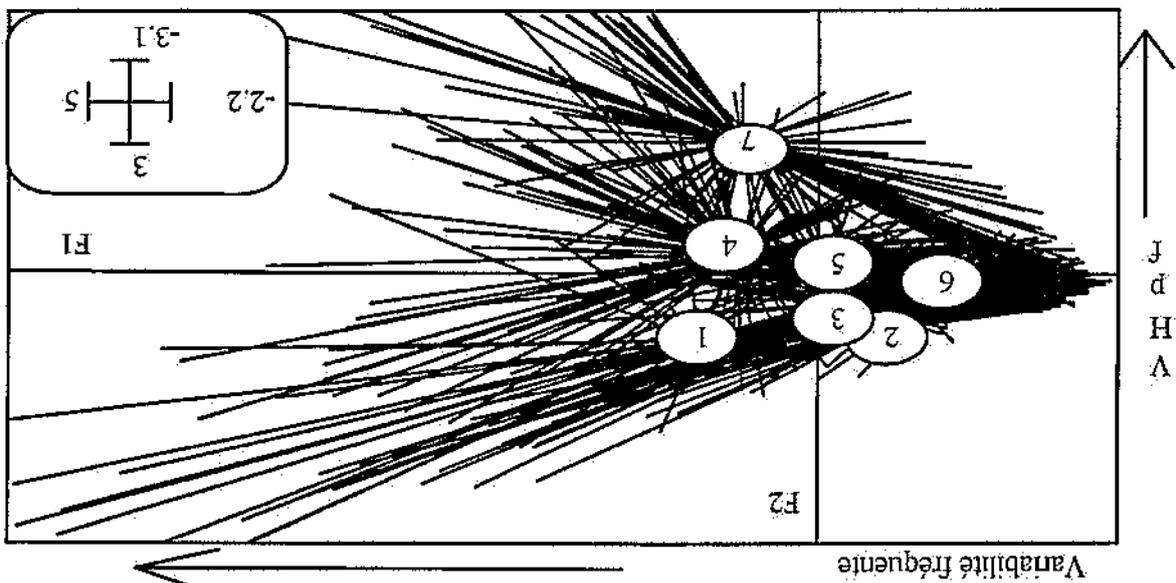
3.4 Recherche de la sensibilité de la VHT et de la VHPF au régime et à la saison avec les régimes synthétiques.

Les variabilités fréquentes et peu fréquentes sont à même de distinguer les régimes entre eux, c'est un critère important qui les valide.

Les régimes pluvio-nival (5) et pluvial (6) présentent une VHF et une VHPF assez faibles alors que le régime cévenol (7) se distingue nettement des autres régimes par une forte VHPF.

Les régimes glaciaire (1), nivo-glaciaire (2) et nival (3) se caractérisent par une faible VHPF alors que le régime nivo-pluvial (4), présente une VHF et une VHPF assez fortes.

Figure 3.3.3 Position des centres de gravité des régimes dans le plan factoriel F1F2.



- le haut du bassin versant de la Loire, à l'amont du Bec d'Allier, plaines profondément exclues (Limagne, Plaine du Forez). Cette hydro-écovégétation rassemble les massifs granitiques et volcaniques du Cantal, des Monts Dore, du Velay, les Monts du Forez et le Livradois Forez. Elle est appelée écovégétation "granite et volcanique". Cette région a un relief marqué, elle a un climat de montagne.

Les 4 grandes hydro-écovégétations sur le bassin versant de la Loire sont :

Le bassin versant de la Loire est divisé en 4 grandes hydro-écovégétations. Elles présentent une certaine homogénéité de relief, de géologie et de climat (Wasson *et al.*, 1993). Ces hydro-écovégétations ont été définies avec des variables rassemblées par les géographes de St Etienne et le laboratoire de "Biologie des écosystèmes aquatiques" du CEMAGREE de Lyon (Wasson *et al.*, 1993).

4.1.1 Cadre de travail.

La régionalisation de la VH est nécessaire car l'hydrologie et l'hydrobiologie ne sont pas toujours concomitantes. Une connaissance régionale de la VH est indispensable pour corréler la biologie et l'hydrologie.

4.1 Tentative de régionalisation de la Variabilité Hydrologique sur le bassin versant de la Loire.

Le régime d'écoulement largement dominant sur ce grand bassin versant (115 000 km²) est essentiellement de type pluvial, ce qui simplifie la régionalisation de la VH. L'influence de la neige sur les écoulements moyens mensuels est limitée à quelques bassins versants, comme la Loire à RIEUTORD (62 km²) ou l'Allier à LAVALETTE (394 km²).

L'objectif de cette partie est de tenter une régionalisation de la VH sur le bassin versant de la Loire, suite à une demande formulée par les biologistes.

4 Recherche des variables expliquant la VH sur le bassin versant de la Loire.

Enfin, comme la VHF et la VHPF sont fortement dépendantes du mois et du régime, elles doivent être décrites dans le détail, en conservant le mois et le régime.

Pluvial,
Nivo-glaciaire, nival et pluvio-nival,
Glaciaire, cévenol, nivo-pluvial,

Les régimes peuvent être classés par VH décroissante :

Les descripteurs A, B et RAPM semblent pertinents pour distinguer la VHF et la VHPF, mais le gradex des débits et la crue annuelle distinguent également la VHF et la VHPF.

3.5 Conclusion de l'évaluation des nouveaux descripteurs.

L'effet d'échelle spatiale sur les indices A et B est illustré ou sont représentés :
 - la forte dispersion des indices A et B pour les bassins versants d'une surface inférieure à 4 000 km²,
 - l'effet d'échelle spatiale sur l'ensemble des bassins versants utilisés.

4.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH en hautes eaux.

Huit bassins versants ont une surface supérieure à 20 000 km², ils appartiennent à plusieurs hydroécorégions.
 La surface des bassins versants varie de 33 à 115 000 km². Cependant, 82 bassins versants ont une surface inférieure à 1 000 km² alors que 12 d'entre eux ont une surface supérieure à 10 000 km². Les chroniques sont au pas de temps journalier et ont une longueur de 8 à 99 ans pour une durée moyenne de 24 ans.

Tableau 4.1.2 Répartition des 123 bassins versants selon leur taille et leur hydro-écorégion.

Surface en km ²	Granite et volcanique (1)	Sédimentaire (2)	Granite Limousin (3)	Granite Armoricain (4)
Total	26	39	21	29
10 à 20 000	1	4	1	0
3 à 10 000	3	3	3	2
1 000 à 3 000	0	9	5	4
< 1 000	22	23	12	23

Sur le bassin versant de la Loire, 123 bassins versants ont été sélectionnés, en régime peu ou pas perturbé par les activités humaines pour avoir une VH de référence.

4.1.2 Données hydrologiques.

- le Granite Armoricain. Cette hydro-écorégion correspond au Layon, la Sèvre Nantaise, la petite Maine, la Mayenne et une partie de la rive droite de la Sarthe. Cette hydro-écorégion repose également sur un socle granitique, mais avec des pluies annuelles plus faibles que le granite limousin et des altitudes plus faibles. Bien que les altitudes soient modestes, le relief est plus marqué que celui de la région sédimentaire mais moins marqué que celui des régions granite et volcanique et limousin. Elle est notée "granite armoricain".

- le Granite Limousin. Il s'agit de la Vienne à l'amont d'Ingrandes, de la Creuse, de la Gartempe et de la partie amont du Cher. Cette écorégion repose sur un socle granitique, elle a un climat de moyenne montagne et des contraintes de relief moyennes à assez fortes. Elle est appelée "granite limousin".

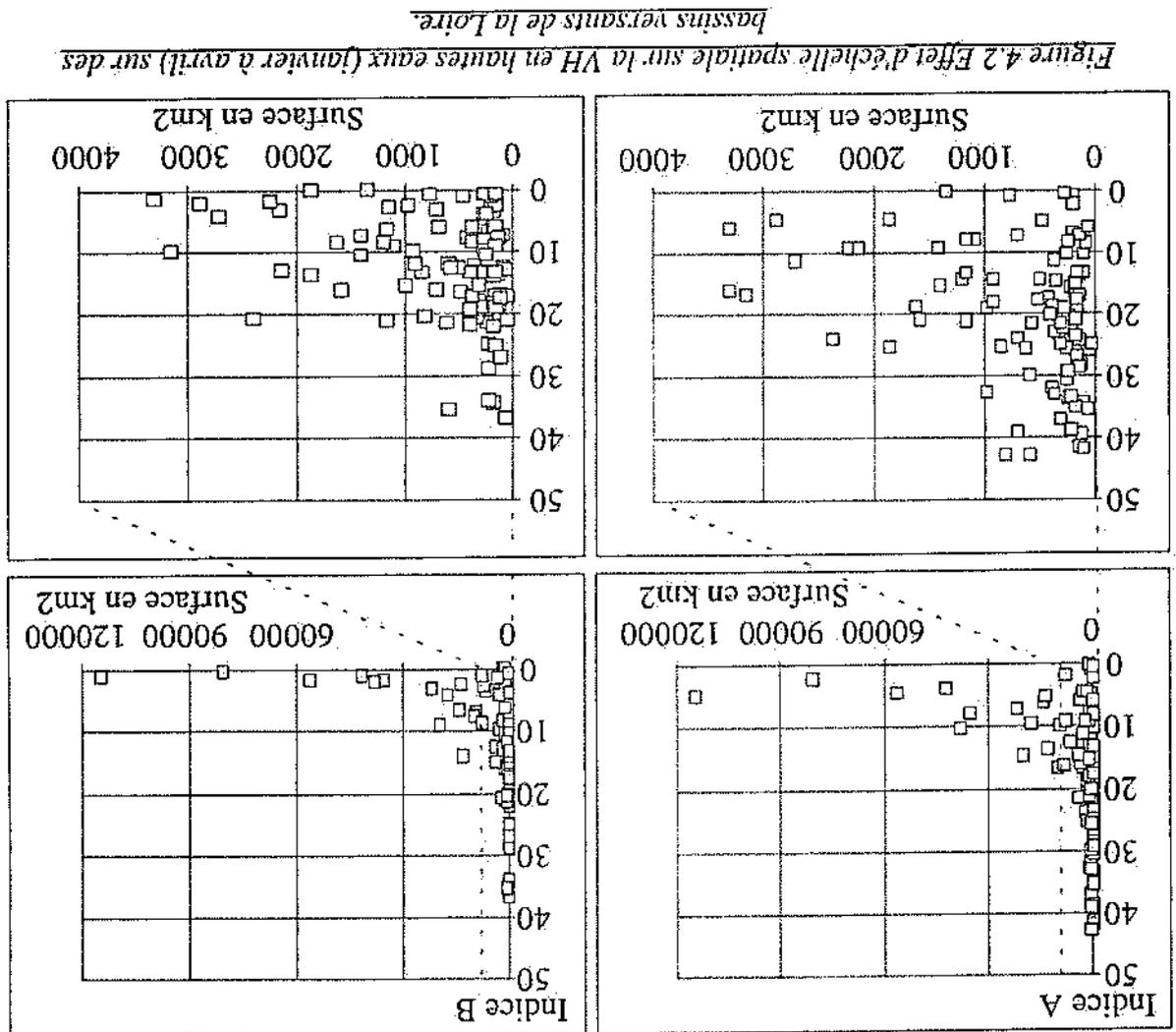
- la partie du bassin versant de la Loire qui repose sur les sédiments. Il s'agit de la partie de la Loire à l'aval du Bec d'Allier, de la Sologne, du Cher, de l'Indre, du Loir, du Clain, de la partie aval de la Vienne et de la rive gauche de la Sarthe. Elle comprend également la Limagne et la plaine du Forez. Cette hydro-écorégion est appelée "sédimentaire". Cette région repose sur des sédiments, elle a un climat de plaine et des précipitations annuelles plus faibles que la précédente. Le relief est peu marqué.

Pour régionaliser la VH des petits bassins versants, il faut comprendre les facteurs expliquant la VH. La surface à elle seule ne suffit pas.

Ces résultats sont conformes avec ceux présentés par Horwitz, (1978) et Richard (1989 et 1990), avec des descripteurs classiques de la VH.

D'une façon générale, la VH décroît lorsque la surface croît. Cependant, la VH est très liée au bassin versant pour les petites surfaces. De petits bassins versants peuvent présenter une faible VH, comme de grands bassins versants. Par contre, seuls les petits bassins versants peuvent présenter une forte VH.

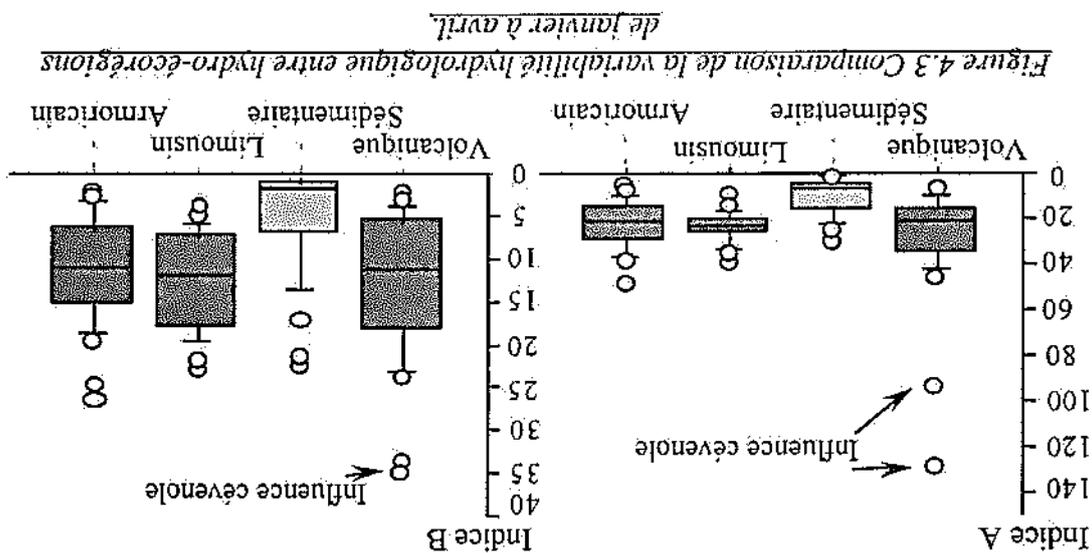
Les modèles liant les indices A et B avec la surface sont inexploitable, les coefficients de détermination sont voisins de 0,20 à cause de la forte dispersion des points pour les faibles surfaces.



4.3 Liaison entre la VH et les hydro-écotopes sur le B.V de la Loire en hautes eaux.

La liaison entre la VH et les hydroécotopes est recherchée en hautes eaux. La base de la régionalisation de la VH est le découpage en hydro-écotopes du bassin versant de la Loire, proposé par les biologistes (Wasson et al., 1993).

La VHF et la VHPF sont assez homogènes entre les hydro-écotopes granite et volcanique, limousin et armoricain.



L'influence cèvenole est bien marquée (hydro-écotopes granite et volcanique) sur deux bassins versants (la Loire à RIUTORD, 62 km² et l'Allier à LAVALLETTE 394 km²) qui présentent une VH très forte par rapport aux autres bassins versants.

L'hydro-écotopes sédimentaire présente une VH plus faible que les 3 hydro-écotopes précédentes, à cause de la perméabilité des sols qui tempère les crues et par le faible relief.

Les hydro-écotopes Limousin, Granite et volcanique et Armoricain sont sur des substrats géologiques plus imperméables, d'où un ruissellement plus important, propice à générer des crues.

En hautes eaux, deux groupes d'hydro-écotopes se distinguent :

- L'hydro-écotopes sédimentaire présente la plus faible VH.
- Les 3 autres hydro-écotopes présentent une VHF et une VHPF voisines et plus élevée qu'en hydro-écotopes sédimentaire. En hautes eaux, ces hydro-écotopes (granite et volcanique, limousin et armoricain) présentent une VHF et une VHPF moyennes assez homogènes.

Le découpage en hydro-écotopes présente une certaine pertinence au point de vue de la variabilité hydrologique. En effet, il existe des différences significatives entre ces hydro-écotopes et la variabilité hydrologique. Cependant, de faibles VH se rencontrent sur toutes les hydro-écotopes alors que les fortes VH se rencontrent plutôt en hydro-écotopes granitiques. L'hydro-écotopes sédimentaire ressort comme étant celle qui présente la VH qui évolue le moins au cours de l'année.

4.4 Relations entre des caractéristiques de bassins versants et la VH en hautes eaux.

Les hautes eaux et les basses eaux sont également distinguées, selon le même découpage. En effet, nous savons que la surface n'est pas suffisante pour régionaliser la VH, pour de petits bassins versants. D'autres facteurs doivent être pris en compte.

Les autres facteurs ont été choisis selon plusieurs critères :

- leur rôle supposé sur les écoulements,
- leur disponibilité et leur possibilité d'être facilement cartographiables ou cartographies.

Les facteurs disponibles sont au nombre de 12 et se répartissent de la façon suivante :

- les facteurs topographiques, comme la pente, le relief (écart-type des altitudes moyennes par maille kilométrique pour chaque bassin), les altitudes extrêmes de chaque bassin versant, et l'altitude moyenne.
- les facteurs climatiques, comme la pluie moyenne inter-annuelle, le gradex des pluies journalières moyen et maximal pour chaque bassin versant. Les données climatiques sont disponibles selon des mailles kilométriques.
- la surface topographique des bassins versants.
- des facteurs de ruissellement, comme la géologie, la présence ou non d'aquifères et les débits spécifiques inter-annuels d'été et d'hiver.

Ensuite, les corrélations entre la VH et ces facteurs supposés comme expliquant la VH ont été recherchées avec des régressions linéaires multiples pas à pas, par hydro-écotémoins.

Le signe + signifie que le facteur explicatif est très corrélé à la VH est que la corrélation est positive alors que - signifie que le facteur est fortement corrélé, mais négativement. Les corrélations de 2^{ème} rang sont notées 2+ ou 2-, celles de 3^{ème} rang 3+ ou 3- selon le sens de la corrélation.

Dans l'ensemble, les corrélations sont bonnes mais les variables ne sont pas les mêmes selon les hydroécotémoins. Elles dépendent fortement des hydroécotémoins mais quelques tendances se dégagent.

- le débit spécifique est souvent la variable qui explique le plus la VH. En sédimentaire, la VH est d'autant plus forte que le débit spécifique d'hiver est faible alors qu'elle est d'autant plus faible que le débit spécifique d'été (juillet / octobre) est fort. Cela s'explique par la capacité de stockage des sols, qui tempèrent la VH.
- les autres facteurs ne ressortent pas nettement, sauf la surface en sédimentaire, où se situent les plus grands bassins versants.

Les autres facteurs qui pourraient améliorer les modèles de régionalisation pourraient être une meilleure connaissance de la géologie et des facteurs climatiques, comme la pluie journalière décennale; le nombre de jours de pluie dépassant un seuil ou des cumuls de pluie sur des durées données. Il ne faut pas négliger les facteurs comme l'occupation des sols, la surface boisée, les terres labourables... qui étaient disponibles, mais avec une maille trop grande pour être utilisée (mailles de $10 * 10$ km, soit 100 km^2).

Les facteurs de ruissellement sont largement corrélés à la VH, notamment les débits spécifiques. Les débits spécifiques sont des données plus ou moins bien cartographiées. Cependant, la régionalisation de la VH dépend du niveau de précision demandé. Au seuil de 50% de la variance expliquée, la régionalisation de la VH est possible pour toutes les hydro-écotétons, sauf en granitique et volcanique en été. Si le seuil est choisi à 75%, les possibilités de régionalisation sont plus limitées, d'autres facteurs facilement accessibles et cartographiables ou cartographiés doivent être recherchés.

4.5 Conclusion sur les variables pouvant expliquer la VH.

Pour l'hydro-écotéon Limousin, le débit spécifique d'hiver est fortement corrélé à la VH, cela traduit un ruissellement rapide, ce qui se justifie par la géologie (granite). Pour l'hydroécotéon sédimentaire, la capacité de stockage des aquifères se traduit par la corrélation fortement négative (-) entre le débit spécifique d'été et la VH d'hiver alors que le débit spécifique d'hiver n'intervient qu'en 2^{ème} rang (2+).

Loire par hydro-écotéons.

Tableau 4.4 Principaux facteurs expliquant la VH en hautes eaux sur le bassin versant de la

Ecoregions	Variables		Altitude moyenne	Relief	Pente moyenne	Altitude extrêmes	PA moyenne	Grades moyen des pluies journalières	Grades maximal des pluies journalières	Surface	Géologie	Nappe	Débit Hiver (l/s/km ²)	Débit Été (l/s/km ²)	R ²		Nombre de stations
	VHpf	VHF													20	27	
Granite et volcanique	VHpf	VHF					3+			1-			1+		0,70	0,77	20
	VHpf	VHF								3-			2+		0,51	0,80	27
Sédimentaire	VHpf	VHF													0,92	0,89	13
	VHpf	VHF													0,58	0,54	14
Granite	VHpf	VHF							1+								14
	VHpf	VHF															14

5 Conclusion générale.

La VH est reconnue par les hydrobiologistes comme un facteur structurant les EEC. Conformément aux concepts bibliographiques, une méthodologie de calcul de la VH est proposée, en tenant compte des EEC. Les nouveaux descripteurs proposés distinguent la VHF et la VHPF, ils ne sont pas redondants avec les descripteurs classiques de la VH et sont sensibles à la saison et au régime hydrologique.

Pour le moment, la méthodologie de calcul est appliquée aux crues car il existe des outils hydrologique opérationnels pour les synthétiser. Cette méthodologie pourrait s'appliquer à d'autres caractéristiques de débit, selon la question biologique posée.

Enfin, un essai de régionalisation est tenté sur le bassin versant de la Loire. En effet, une connaissance régionale de la VH est indispensable pour rapprocher les données biologiques et la VH. Les variables liées aux écoulements, comme le débit spécifique, sont fortement corrélés à la VH alors que les autres variables sont peu représentées. Par contre, la VH est faible sur les bassins versants d'une surface supérieure à 4 000 km² alors qu'elle est très liée au bassin versant pour des surfaces inférieures à 2 000 km².

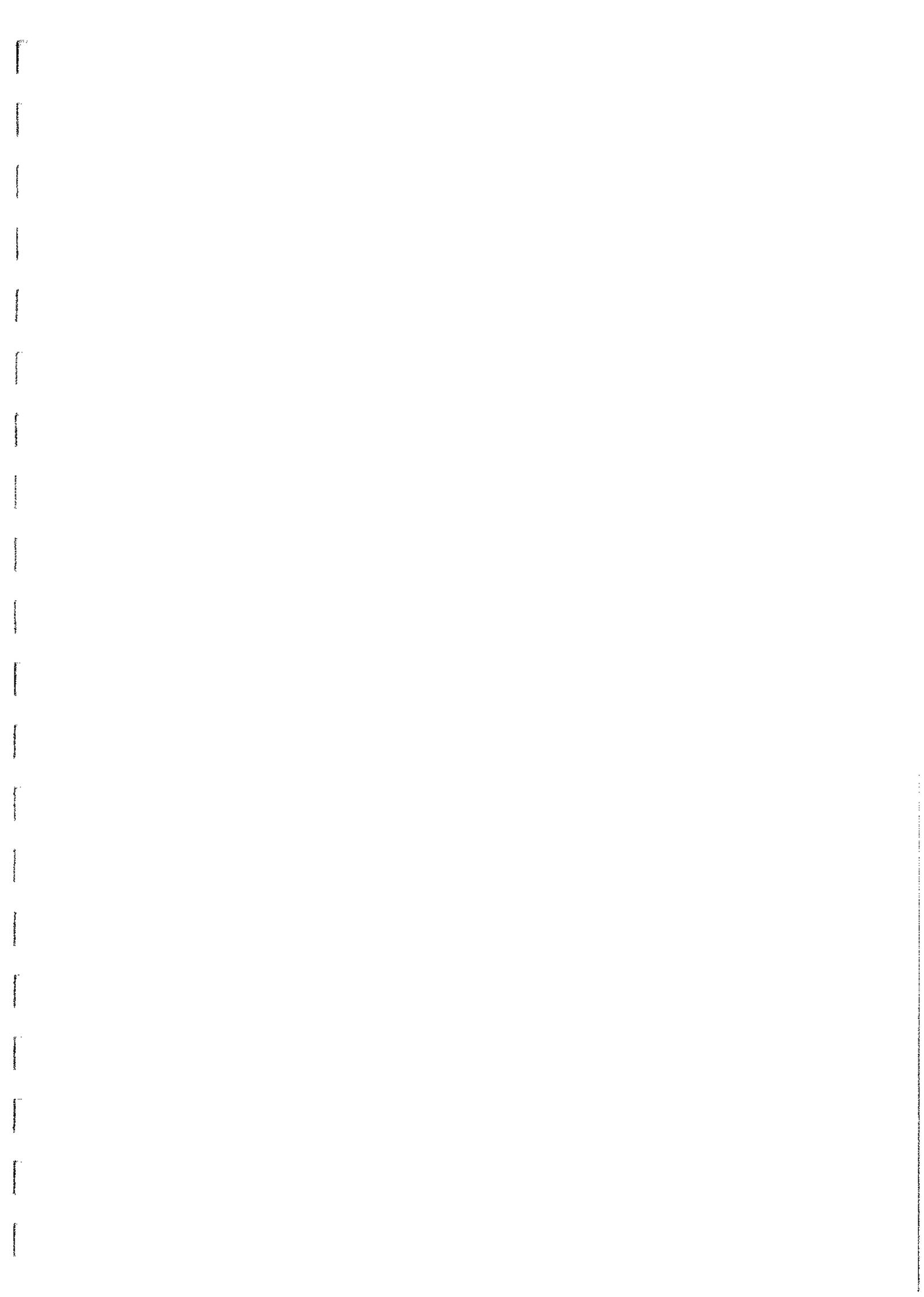


Table des matières simplifiée

Introduction générale

Résumé étendu

Résumé détaillépages i à xxiii

Partie I - Problématique, moyens et méthode d'analyse

Chapitre 1 - Analyse bibliographique.....5

Chapitre 2 - Synthèse critique de l'analyse bibliographique.....35

Partie II - Descripteurs de la variabilité écohydrologique VH

Chapitre 3 - Outils, méthode d'analyse et définition des variabilités hydrologiques fréquentes (VH) et peu fréquentes (VHpf).....51

Chapitre 4 - Détermination des caractéristiques de calcul des variabilités hydrologiques fréquentes (VH) et peu fréquentes (VHpf).....77

Chapitre 5 - Comparaison des indices A et B avec les descripteurs synthétiques classiques de la variabilité hydrologique.....95

Chapitre 6 - Regroupement par analyse de variance des descripteurs de la variabilité hydrologique.....113

Chapitre 7 - Sélection des descripteurs d'intérêt par analyse en composantes principales normée (ACPn).....207

Partie III - Eléments de régionalisation de la VH

Chapitre 8 - Effet d'échelle spatiale sur la VH et sur la VHpf et sur l'indice mensuel de distorsion.....183

Chapitre 9 - Liaison entre les caractéristiques de la VH et de la VHpf et le découpage en hydro-écorégions du bassin versant de la Loire.....201

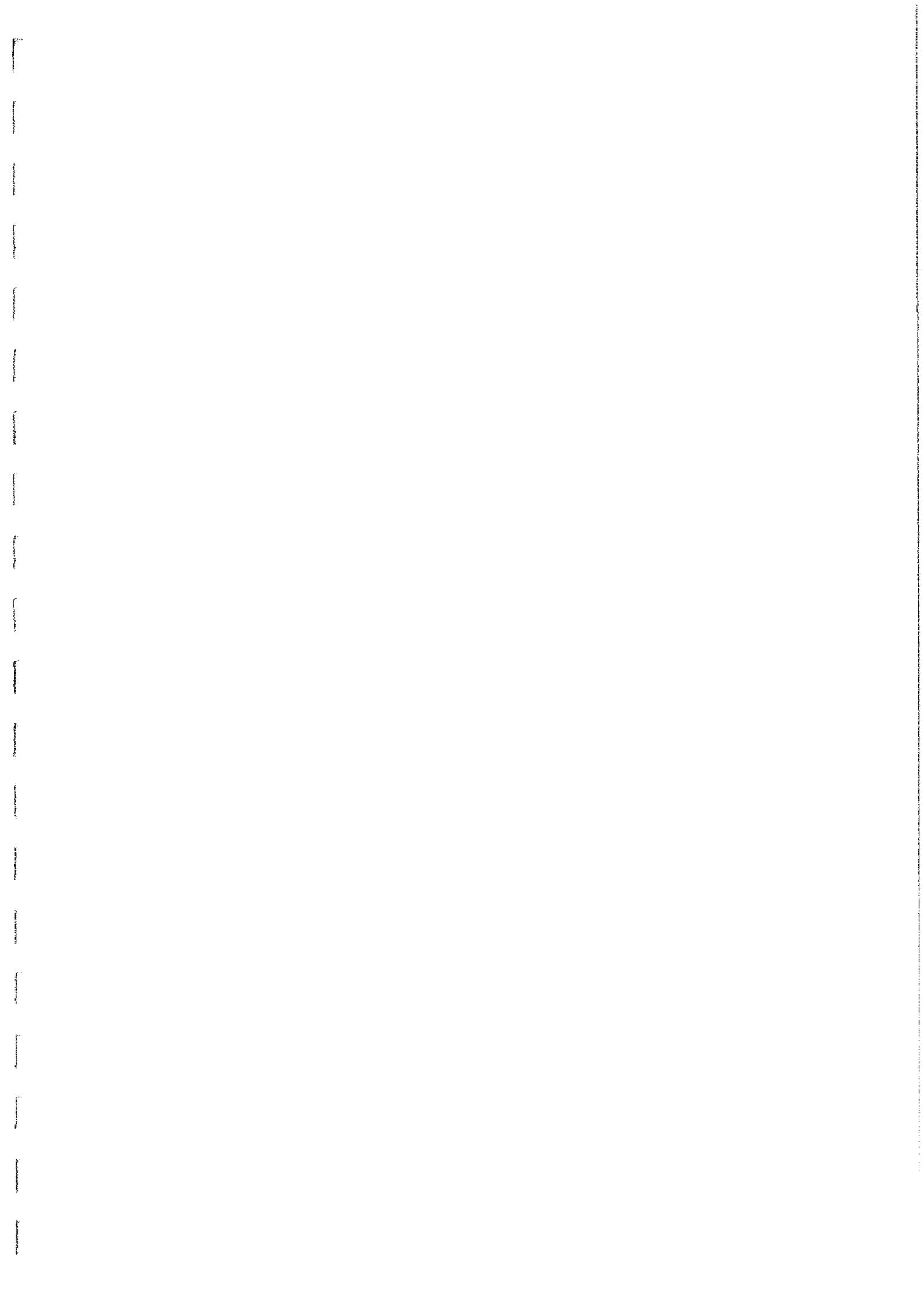


Table des matières détaillée

Remerciements

Introduction générale

Résumé étendu

Résumé détaillé.....pages i à xxiii

Partie I - Problématique, moyens et méthode d'analyse

Chapitre 1 - Analyse bibliographique.....5

1.1 Notion de perturbation écologique au travers d'événements hydrologiques.....	7
1.1.1 Différentes définitions du terme "perturbation".....	7
1.1.2 Effet de la VH sur les écosystèmes en eau courante.....	10
1.1.3 Distinction entre variabilités hydrologiques fréquentes (VHF) et peu fréquentes (VHpf).....	11
1.1.4 La variabilité hydrologique, facteur d'équilibre des écosystèmes en eau courante.....	13
1.1.5 Conclusion.....	14
1.2 Principaux descripteurs statistiques de la Variabilité Hydrologique (VH).....	14
1.2.1 Généralités.....	15
1.2.2 Descripteurs traditionnels de la VH.....	15
1.2.3 Notion de prévisibilité, constance et contingence.....	23
1.2.4 Mesure de la quantité d'information.....	25
1.2.5 Descripteurs spécifiques aux étages.....	25
1.3 Intérêt de saisonnaliser la variabilité hydrologique.....	26
1.3.1 Notion de cycle biologique.....	26
1.3.2 Saisonnalisation de la variabilité hydrologique.....	27
1.4 Problèmes soulevés par la régionalisation de la VH.....	28
1.4.1 Effet d'échelle sur la variabilité hydrologique.....	28
1.4.2 Méthodes de normalisation de la variabilité hydrologique.....	30
1.4.3 Régionalisation des écoulements et regroupement des cours d'eau.....	31
1.5 Conclusion de l'analyse bibliographique.....	33

3.1 Outils, données et méthode d'analyse de la variabilité hydrologique.....52

3.1.1 Caractéristiques et répartition des stations hydrométriques par régime mensuel.....52

3.1.2 Critique des données.....58

3.1.3 Recherche de la stationnarité des chroniques des débits.....59

3.1.4 Méthode d'analyse.....62

3.1.5 Les programmes utilisés pour ces recherches.....65

3.2 Définition des variations de débit et calcul des nouveaux descripteurs de la VH. Distinction entre la VHF et la VHpl.....66

3.2.1 Définition des variations de débit.....66

3.2.2 Définition de l'indice mensuel de distorsion.....72

3.3 Conclusion du chapitre 3. Introduction d'un nouveau concept de la VH.....75

Chapitre 3 - Outils, méthode d'analyse et définition des variabilités hydrologiques fréquentes (VHF) et peu fréquentes (VHpl)51

Partie II - Descripteurs de la variabilité échohydrologique (VH)

2.1 Approche saisonnière de la variabilité hydrologique.....35

2.2 Recherche d'un débit de référence pour calculer les "variations de débit".....36

2.2.1 Choix du débit de référence.....36

2.2.2 Evolution du débit de référence sur un exemple sur une année donnée.....38

2.2.3 Evolution saisonnière du débit de référence sur plusieurs stations.....39

2.3 Distinction entre variabilité hydrologique fréquente et peu fréquente avec la loi exponentielle.....39

2.3.1 Justification et choix de la limite entre variabilité hydrologique fréquente et peu fréquente.....41

2.3.2 Limite supérieure des débits ou des variations de débit pris en compte pour nos recherches.....42

2.4 Le pas de temps des débits.....43

2.5 Standardisation de la VH.....43

2.6 Plan de travail.....44

2.7 Conclusion du chapitre 2.....45

Chapitre 2 - Synthèse critique de l'analyse bibliographique.....35

5.1 Comparaison des indices A et B avec les descripteurs ayant les dimensions d'un débit.....96

5.1.1 Indépendance de la VHF et de la VHPf.....96

5.1.2 Comparaison entre les indices A et B et l'écart-type, l'inter-décile et l'inter-quartile.....97

5.1.3 Conclusion.....97

5.2 Comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie.....97

5.2.1 Comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie n'utilisant pas les logarithmes.....97

5.2.2 Comparaison des indices A et B avec les descripteurs sans dimension utilisant le logarithme des débits, traduits ou non.....99

5.2.3 Conclusion de la comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie.....100

5.3 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'inter-quartile et l'inter-décile rapportés à la médiane et avec l'indice saisonnier.....100

Chapitre 5 - Comparaison des indices A et B avec les descripteurs synthétiques classiques de la variabilité hydrologique.....95

4.1 Influence de la mémoire M prise en compte sur la VH.....79

4.1.1 Généralités et définition de la notion de la mémoire calculée sur une durée M.....79

4.1.2 Exemple de l'effet de la mémoire de 3 jours sur les indices A et B. (M = 3 jours).....79

4.1.3 Influence de la mémoire M sur les indices A et B calculés avec une mémoire M de 7 et de 30 jours.....81

4.1.4 Influence de la mémoire M sur les indices A et B calculés avec une mémoire M de 3 et de 30 jours.....82

4.1.5 Conclusion du paragraphe 4.1. Effet de la mémoire M sur les indices A et B et les $(\Delta Q)_x$85

4.2 Recherche de l'effet du critère d'indépendance sur la VHF et sur la VHPf.....86

4.2.1 Effet du critère d'indépendance sur les indices A et B sur les stations de référence.....87

4.2.2 Effet du critère d'indépendance sur la VH sur des grands bassins versants.....88

4.2.3 Conclusion de l'influence du critère d'indépendance sur la VH.....89

4.3 Comparaison des principales caractéristiques des crues et des principales caractéristiques des ΔQ90

4.4 Conclusion du chapitre 4.....93

Chapitre 4 - Détermination des caractéristiques de calcul des variabilités hydrologiques fréquentes (VHF) et peu fréquentes (VHPf).....77

Chapitre 6 - Regroupement par analyse de variance des descripteurs de la variabilité hydrologique..... 113

5.3.1 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane..... 101

5.3.2 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'indice saisonnier..... 101

5.4 Comparaison des caractéristiques de crues avec les débits classes..... 103

5.4.1 Comparaison de la crue annuelle avec les débits classes..... 105

5.4.2 Comparaison de la crue décennale avec les débits classes..... 105

5.4.3 Comparaison du gradex des débits avec les débits classes..... 106

5.4.4 Conclusion de la comparaison des caractéristiques de crues avec les débits classes..... 107

5.5 Comparaison des caractéristiques de ΔQ avec les débits classes..... 108

5.6 Récapitulatifs des comparaisons entre les ΔQ et les débits avec les débits classes..... 109

5.7 Conclusion du chapitre 5..... 111

6.1 Les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence..... 114

6.1.1 Les ΔQ et les indices A et B..... 114

6.1.2 Typologie du gradex des débits et de la crue annuelle par régime..... 121

6.1.3 Description détaillée et typologie des régimes avec l'indice mensuel de distorsion..... 123

6.1.4 Typologie de l'écart-type des débits par saisons mensuelles et par régime..... 128

6.1.5 Typologie de l'inter-décile par régime..... 129

6.1.6 Typologie de l'inter-quartile par régime..... 129

6.1.7 Typologie de l'indice saisonnier..... 130

6.1.8 Conclusion du paragraphe 6.1..... 131

6.2 Les descripteurs peu sensibles aux distributions de fréquence..... 131

6.2.1 Typologie de l'inter-décile rapporté à la médiane par régime..... 131

6.2.2 Typologie de l'inter-quartile rapporté à la médiane par régime..... 132

6.2.3 Typologie du rapport du quartile supérieur au quartile inférieur..... 133

6.2.4 Typologie du coefficient de variation par saisons mensuelles et par régime..... 133

6.2.5 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits par saisons mensuelles et par régime..... 134

6.2.6 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits par régime..... 135

6.2.7 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits traduits par saisons mensuelles et par régime..... 136

6.2.8 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits traduits par saisons mensuelles et par régime..... 136

6.2.9 Typologie de la moyenne rapportée à la médiane par saisons mensuelles et par régime..... 137

6.2.10 Typologie du moment d'ordre 3 par saisons mensuelles et par régime..... 138

6.2.11 Conclusion du paragraphe 6.2..... 139

Chapitre 7 - Sélection des descripteurs d'intérêt par analyse en composantes principales normée (ACPn)..... 147

6.3 Synthèse du nombre de saisons et du rapport entre saisons extrêmes des descripteurs de la VH. 139

6.3.1 Nombre de niveaux de saisons par régime. 139

6.3.2 Recherche du nombre de changements de niveaux de saisons par régime et par descripteur. 140

6.3.3 Rapport entre saisons extrêmes. 141

6.3.4 Un parallèle avec la notion de prévisibilité développée par Colwell (1974). 142

6.4 Conclusion du chapitre 6. 145

7.1 Constitution des principaux groupes de caractères. Élimination des descripteurs synthétiques utilisant le logarithme des débits. 149

7.1.1 Recherche des principaux groupes de descripteurs. 150

7.1.2 Identification des groupes de caractères avec le cercle de corrélation. 150

7.1.3 Conclusion. 151

7.2 Constitution des groupes de caractères avec 15 caractères hydrologiques. Élimination des indices d'asymétrie. 152

7.2.1 Recherche des principaux axes de l'ACPn. 152

7.2.2 Identification des groupes de caractères avec le cercle de corrélation. 152

7.2.3 Position respective des 7 régimes dans le plan factoriel F1 F2. 153

7.2.4 Distinction des 7 régimes dans le plan factoriel. 154

7.2.5 Conclusion. 155

7.3 Distinction de la VHF et de la VHPf avec 9 caractères hydrologiques. 156

7.3.1 Recherche des axes principaux de l'ACPn sans les indices d'asymétrie. 156

7.3.2 Distinction de la VHF et de la VHPf avec le cercle de corrélation. 157

7.3.3 Position respective des régimes dans le plan factoriel F1 F2. 157

7.3.4 Distinction des 7 régimes dans le plan factoriel F1 F2. 158

7.3.5 Conclusion. 160

7.4 Conclusion partielle du chapitre 7. 160

7.5 Recherche de l'effet de la saison et du régime sur la VH. 161

7.5.1 ACPn globale sur les caractéristiques des 7 régimes. 162

7.5.2 Recherche de l'effet temporel sur la VH. 165

7.5.3 Recherche de l'effet du régime sur la VH. 168

7.5.4 Part de l'effet saisonnier et de l'effet du régime dans la VH. 171

7.6 Conclusion du paragraphe 7.5. 174

7.7 Conclusion du chapitre 7. 175

Conclusion de la partie II. 177

Partie III - Eléments de régionalisation de la VH

Chapitre 8 - Effet d'échelle spatiale sur la VH..... 183

183	8.1 Effet de la surface sur la VHF et sur la VHPf sur l'échantillon des 55 stations hydrométriques.....
183	8.1.1 Effet de la surface sur les indices A et B en régime glaciaire à nival.....
183	8.1.2 Effet de la surface sur les indices A et B en régime nivo-pluvial et pluvio-nival.....
184	8.1.3 Effet de la surface sur les indices A et B en régime pluvial.....
184	8.1.4 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur la VH pour les 55 stations hydrométriques.....
185	8.2 Cas des bassins versants emboîtés sur la Durance.....
186	8.2.1 Effet de la surface sur la VH de la Durance en basses eaux.....
187	8.2.2 Effet de la surface sur la VH de la Durance en hautes eaux (mai à août).....
187	8.3 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur la VH à partir de grands bassins versants sur le Rhône et la Loire.....
187	8.3.1 Effet de la surface sur la VHF et la VHPf en hautes eaux sur le Rhône et la Loire (janvier à avril).....
188	8.3.2 Effet de la surface sur la VHF et la VHPf en basses eaux sur le Rhône et la Loire.....
190	8.3.3 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur le linéaire du Rhône et de la Loire.....
191	8.4 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur 123 stations hydrométriques sur le bassin versant de la Loire.....
191	8.4.1 Effet d'échelle spatiale sur des bassins versants de la Loire en hautes eaux (janvier à avril).....
191	8.4.2 Effet d'échelle spatiale sur des bassins versants de la Loire en basses eaux (juillet à octobre).....
193	8.4.3 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur les ΔQ des 123 bassins versants de la Loire.....
194	8.5 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion avec les 55 stations hydrométriques de référence.....
194	8.5.1 Régime glaciaire à nival.....
195	8.5.2 Régime nivo-pluvial et pluvio-nival.....
195	8.5.3 Régime pluvial.....
196	8.5.4 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion.....
196	8.6 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion sur les 123 stations hydrométriques de la Loire.....

.....	Glossaire
.....	Annexes
.....	Liste des tableaux
.....	Liste des figures
.....	Liste des articles et ouvrages cités
231

Conclusion générale..... 225

.....	Conclusion de la partie III	223
.....	découpage en hydro-écotétons sur le bassin versant de la Loire	221
.....	9.4 Conclusion sur les liaisons entre les caractéristiques de la VH et le	218
.....	9.3.5 Recherche de facteurs explicatifs de la VH	217
.....	distorsion	216
.....	9.3.4 Recherche de l'effet de la géologie sur l'indice mensuel de	216
.....	surface	216
.....	9.3.3 Corrélation entre la VH, la géologie, le débit spécifique et la	216
.....	9.3.2 Corrélation entre le débit spécifique et la VH en hautes eaux	214
.....	basses eaux	214
.....	9.3.1 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPf en hautes et	213
.....	sur la VH	210
.....	9.3 Recherche de l'effet de différentes caractéristiques des bassins versants	210
.....	écotéton	207
.....	9.2.3 Comparaison des débits médians mensuels entre hydro-	204
.....	écotéton	204
.....	9.2.2 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-	204
.....	9.2.1 Comparaison de la VHF et VHPf entre hydro-écotéton	204
.....	9.2 Comparaison de la VH entre hydro-écotéton	203
.....	9.1.2 Choix des stations hydrométriques et du pas de temps des débits	203
.....	écotétons	203
.....	9.1.1 Découpage du bassin versant de la Loire en 4 grandes hydro-	203
.....	9.1 Méthode de travail	203

Chapitre 9 - Liaison entre les caractéristiques de la VHF et de la VHPf et le découpage en hydro-écotétons du bassin versant de la Loire..... 201

.....	8.6.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en	196
.....	hautes eaux (janvier à avril)	197
.....	8.6.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en	197
.....	basses eaux	199
.....	8.7 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur la VH	199



**Problématique moyens
et méthode d'analyse**

PARTIE I

Introduction de la partie I.

La variabilité hydrologique est l'un des éléments, avec les variabilités physiques et physico-chimiques des eaux, qui structure les Ecosystèmes en Eau Courante (EEC). Le régime hydrologique est l'un des éléments essentiels qui structure les EEC, à cause de la variabilité hydrologique qui influence l'habitat disponible. Ce travail part de l'hypothèse que les descripteurs de la variabilité hydrologique classiques ne sont pas suffisants pour la décrire. La variabilité hydrologique est notée VH tout au long de ces recherches.

Les travaux de Cohen (1994) rassemblent de nombreuses références bibliographiques à ce sujet. Power et *all.* (1988) citent également le rôle de l'hydrologie dans l'équilibre des EEC, tout comme Pont et *all.* (1993). Cependant, d'après des recherches menées par Changuaux (1995) sur le bassin versant du Rhône, les peuplements de poissons européens sont soumis à trois influences qu'il qualifie de majeures : le gradient amont aval, engendré par le mouvement de l'eau, les variations de pente et les différentes régions écologiques. C'est également l'avis de Pont et *all.* (1995) qui travaillent sur quatre ensemble hydrographiques français, la Seine, le Rhône et les fleuves côtiers bretons et du Languedoc Roussillon. Ces auteurs indiquent que la température joue également un rôle sur la structure des peuplements piscicoles.

Ces descripteurs ne traitent pas directement la VH à l'échelle des saisons biologiques (quelques semaines à quelques mois) et ne distinguent pas la Variabilité Hydrologique (VH) et la Variabilité Hydrologique peu fréquente VHF. En effet, ils sont souvent conçus pour le dimensionnement d'ouvrage d'ouvrage d'art ou de prises d'eau et sont issus des statistiques.

Les descripteurs classiques de la VH ne sont pas conçus pour une approche écologique de la VH. De plus, il existe de nombreux descripteurs de la VH, seuls deux ou trois d'entre eux sont suffisants pour la décrire. Des descripteurs de la VH pouvant structurer les EEC sont recherchés, avec les concepts acquis dans l'approche bibliographique proposée au chapitre I.

La première partie est divisée en deux chapitres qui sont :

- la synthèse bibliographique qui comporte quatre paragraphes.

- la définition du terme de perturbation pour les EEC au travers d'événements hydrologiques. Ce terme est très souvent employé mais défini de plusieurs façons. Généralement, les crues et les étiages sont considérés comme des perturbations hydrologiques des EEC. Il existe deux définitions principales de la perturbation hydrologique.

- la recherche et la définition des principaux descripteurs de la VH. Les nombreux descripteurs de la VH sont passés en revue, avant d'être testés sur des stations de référence.

- l'intérêt de saisonnaliser la VH. Comme les stades de développement des différentes espèces ne se produisent pas aux mêmes saisons et que la VH change au cours des saisons, la VH est saisonnalisée.

- une synthèse critique de la bibliographie où les choix effectués pour la suite des recherches sont exposés, notamment quant à la saisonnalisation de la VH. Le choix des débits utilisés et la standardisation de la VH est précisé. La standardisation de la VH est indispensable pour la rendre comparable d'un bassin versant à un autre. Les choix porteront également sur les limites proposées pour séparer la variabilité hydrologique fréquente et peu fréquente et les outils qui permettent de les calculer.

- les problèmes soulevés par la régionalisation de la VH. La régionalisation de la VH est indispensable. Les données biologiques ne sont pas toujours disponibles sur des cours d'eau dont la VH est connue car tous les cours d'eau ne sont pas jaugeés. La VH d'un cours d'eau non jaugeé doit être quantifiée à partir de plusieurs cours d'eau dont la VH est connue. Pour régionaliser la VH, il faut la standardiser pour la rendre comparable d'un bassin versant à l'autre et connaître quels sont les facteurs qui l'influencent.

Chapitre 1 - Analyse bibliographique

L'EBC peut être défini comme un milieu (biotope) inonde dynamique (rivière ou torrent) et l'ensemble des espèces animales et végétales (la biocénose) qui y vivent. L'EBC rend compte des relations trophiques et énergétiques entre les divers composants. C'est un espace fonctionnel. Dans notre cas, l'espace géographique est restreint aux eaux courantes continentales, ce qui exclu les lacs et les étangs.

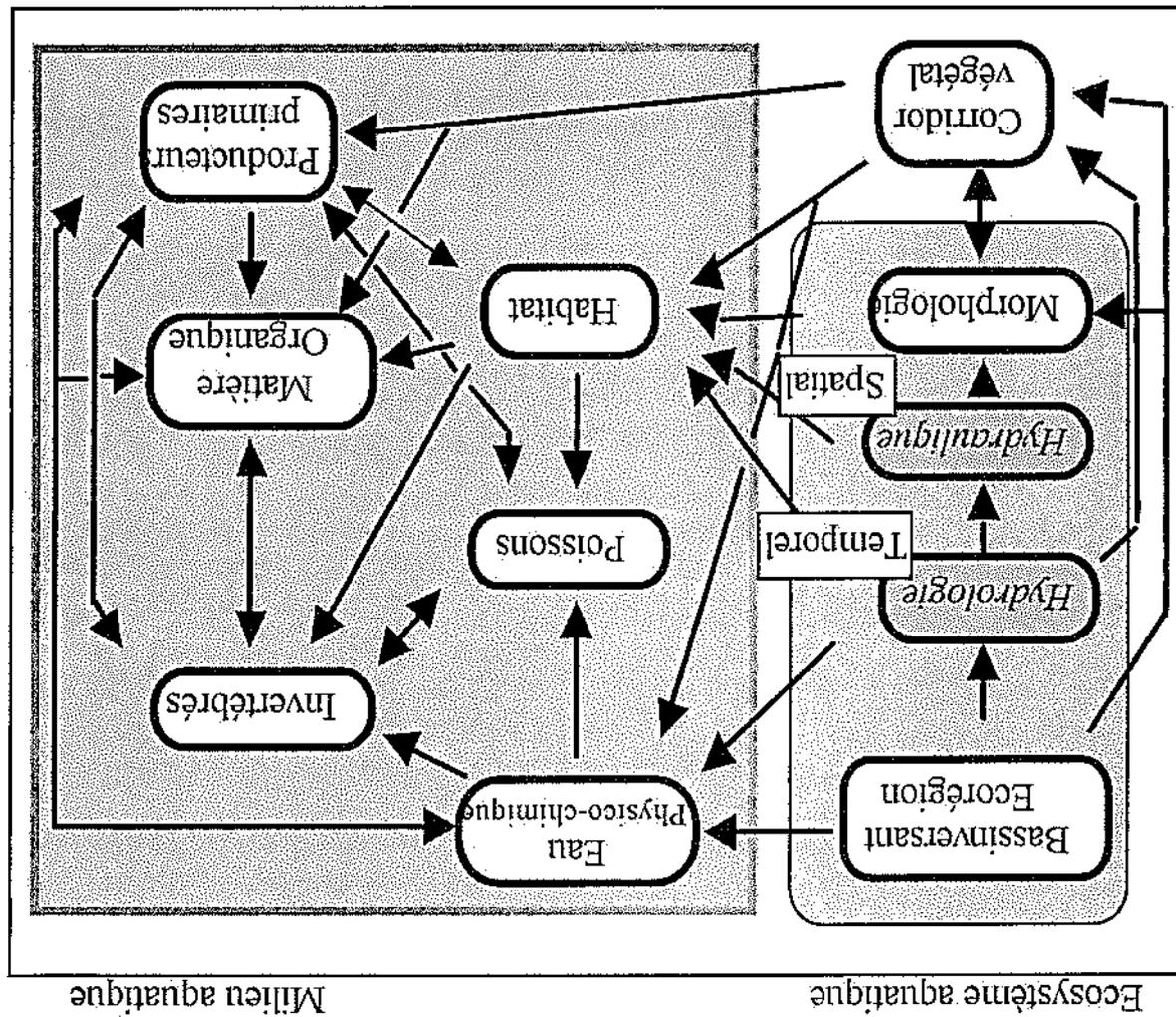
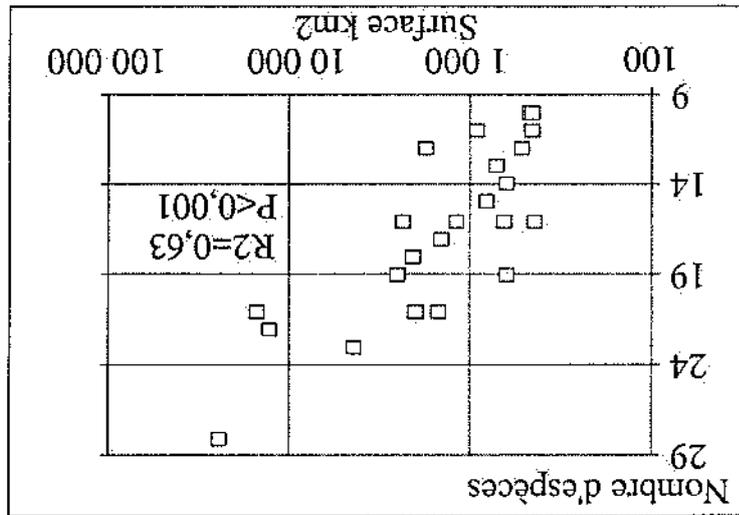


Figure 1.0 Modèle conceptuel de l'écosystème en eau courante (Wasson, 1989, revu par Malgosse, 1993)

L'EBC est composé de plusieurs compartiments représentatifs des éléments de la biocénose (invertébrés, poissons, producteurs primaires, végétation rivulaire) et du biotope (habitat, morphologie, qualité de l'eau, régime hydrologique) et des interactions qui les relient entre eux.

La VH semble mal quantifiée alors que son rôle sur les EEC est fortement pressenti. Il est donc à la fois indispensable de faire un état des connaissances, de rechercher comment les auteurs qui travaillent sur le sujet définissent la VH et comment elle influence les EEC. La VH joue également un rôle important sur le transport de matières en suspension et la disponibilité de la ressource en eau.

Figure 1.1 Nombre d'espèces piscicoles en fonction de la surface sur le bassin versant du Rhône à partir des données de Changuex et Pont (1994).



Ces auteurs constatent également un accroissement du nombre d'espèces présentes avec la surface. Or la VH n'est sans doute pas la même selon les cours d'eau.

- la Saône, dominée par une grande plaine alluviale,
- l'Isère, influencée par le climat alpin,
- la Durance, fortement influencée par le climat méditerranéen.

Changuex et Pont (1992 et 1994) étudient la structure des communautés de poissons à l'échelle du bassin versant du Rhône. La richesse piscicole est estimée par le nombre d'espèces présentes sur un tronçon de rivière. D'après ces auteurs, le nombre d'espèces des sous bassins directement connectés au Rhône est fortement lié à leur surface. Le bassin versant du Rhône est découpé en trois grandes régions piscicoles :

D'après Statzner et Higler (1986), les caractéristiques des cours d'eau ne doivent pas être négligées. Les forces tractrices et de cisaillement sont aussi d'importants descripteurs de l'habitat, comme la température de l'eau. Ils pensent que l'hydrologie est un facteur essentiel intervenant sur les EEC. Ils basent leurs conclusions sur 14 exemples de cours d'eau du monde dont ils ont étudié les invertébrés.

Le modèle conceptuel proposé par Wasson (1989) a été modifié. En effet, l'hydrologie agit sur les écosystèmes en eau courante par l'intermédiaire de l'hydraulique. L'hydrologie intègre la dimension temporelle alors que l'hydraulique intègre la dimension spatiale. Cette nuance, qui paraît importante, n'est pas précisée par Wasson (1989).

1.1 Notion de perturbation écologique au travers d'événements hydrologiques.

La perturbation hydrologique pour un EBC est définie à l'aide des travaux effectués par divers auteurs. Les EBC sont organisés selon le gradient amont-aval des cours d'eau, ce qui leur confère une structure orientée par rapport aux écosystèmes terrestres selon Ward (1989).

C'est à partir de la notion de perturbation qu'est conceptualisée la relation entre le régime hydrologique et la dynamique de population d'un EBC. Il est ainsi largement admis par les hydrobiologistes que la structuration des EBC dépend pour une large part de la VH. Cela doit se traduire par l'expression quantitative des facteurs limitants que sont les crues et les étiages qui caractérisent les régimes d'écoulements, de l'amont vers l'aval des systèmes hydrologiques.

En tête de bassin versant, le nombre d'espèces est limité par la VH. A l'inverse, à l'aval des grands bassins versants, la VH est faible, ce sont la compétition et la prédation qui régissent l'équilibre des EBC. Cependant, la faible richesse en espèces dans les petits cours d'eau s'explique au moins en partie par les faibles surfaces mouillées, ce qui limite fortement l'espace vital.

1.1.1 Différentes définitions du terme "perturbation".

Il existe plusieurs définitions du terme perturbation. Les deux principales sont celles proposées par Resh *et alii* (1988) et Leroy Poff (1992). Mais il existe également des définitions assez générales.

1.1.1.1 Définitions générales des perturbations.

Pickett et White (1985) atteignent la vision catastrophique de la perturbation, telle qu'elle est souvent définie. Pour ces auteurs, une perturbation pour un écosystème est un événement relativement discret dans le temps qui en modifie la structure et le fonctionnement. Une perturbation modifie les communautés vivantes c'est à dire la biocénose mais aussi l'environnement physique, le biotope. Ce serait un événement assez rare, discret et imprévisible. Les conséquences d'une perturbation peuvent se manifester à plusieurs échelles d'espace et de temps.

Cette définition est assez vague, elle peut s'appliquer à beaucoup d'événements. Les caractères de fréquence et d'imprévisibilité sont retenus.

L'étude fonctionnelle des relations entre le poisson et son habitat aquatique apporte des compléments d'interprétation. Ainsi, pour Capra *et alii* (1995), les débits ont une grande importance sur le recrutement des Truites sur deux cours d'eau sans influences anthropiques du Massif Central et du Jura. Si les débits sont trop faibles ou trop élevés plus de 20 jours de suite, le recrutement en jeunes individus (individus de l'année dits 0+) est très faible. Cette période de 20 jours consécutifs perturbe le recrutement lorsqu'elle se produit sur la période d'octobre à mars. En effet, les salmonides pondent leurs œufs d'octobre à décembre et l'éclosion a lieu de janvier à mars.

Cet exemple illustre très bien l'importance des débits sur la dynamique des espèces piscicoles et l'importance de la saison pour une approche de la VH. L'aspect durée est lié à une notion d'épuisement des organismes à se maintenir en un lieu donné. L'intensité paraît moins importante en cas de crue car les abris hydrauliques sont souvent utilisés par les organismes aquatiques mobiles.

De plus, Ward (1983) propose l'hypothèse de la perturbation intermédiaire, selon laquelle la perturbation n'a pas toujours un effet destructeur des EBC mais un effet structurant.

1.1.1.2 Définition des perturbations selon Le Poff et Ward.

Le terme de perturbation se définit également sur des bases physiques comme le remanement du substrat. D'après Leroy Poff (1992), une perturbation est un événement destructeur des communautés. Pour ces auteurs, définir une perturbation comme nécessairement imprévisible est un pléonasme. Les effets écologiques d'une perturbation sont clairs mais les perturbations sont imprévisibles car aucun échantillon d'individus ne peut être adapté à un événement hydrologique qui perturbe l'habitat ou qui expose les ressources. Ils suggèrent que l'adaptation des espèces toliques aux perturbations comme étant une hypothèse à vérifier.

Joyett et Richardson (1989) travaillent sur les effets d'une crue sur les échantillons de Truites sur 7 cours d'eau de Nouvelle-Zélande. Selon les cours d'eau, ces crues ont une période de retour estimée entre 20 et 500 ans. Les auteurs observent une baisse de 25 à 90% de l'effectif des Truites après ces crues, surtout parmi les jeunes individus dont l'effectif baisse de 90 à 100%. Ces jeunes individus ont une taille de 10 à 20 cm. Les Truites sont dénombrées par la méthode de la plongée dérivante (en anglais : drift diving). Il s'agit de plonger dans la rivière avec un masque et un tuba, de se laisser dériver dans l'eau puis de compter les poissons. Dans l'un des 7 exemples, les auteurs observent une augmentation du nombre d'individus.

Les crues peuvent être considérées comme des perturbations pour les EBC car une partie des Truites a disparu. Cependant, on ne sait pas si ces Truites sont tuées par les crues ou si elles sont emportées. De plus, ce travail n'inclut pas la notion de cycle hydrologique et de la VH sur la durée d'une chronique mais seulement l'effet d'événements hydrologiques particuliers. C'est une information de type fonctionnelle qui doit s'intégrer dans une dynamique de régime à long terme dont l'effet structurant sur les EBC serait mieux interprétable.

Barti *et al.* (1994) citent le cas de l'Abatesco qui est un petit cours d'eau de la Corse. Ce cours d'eau a subi une crue de 500 m³/s en septembre 1989. La période de retour de cette crue est estimée à 40 ans. La méthode d'attribution de la période de retour de cette crue n'est pas précisée ni la surface du bassin versant où ce débit a été estimé. Ils ont observé un remanement pratiquement total de l'habitat aquatique, de la faune benthique et de la végétation. Après la crue, seules 3 Truites ont été pêchées (pêche électrique) sur un tronçon de rivière de 150 m de long. Ensuite, 20 000 Truitelles ont été déversées dans le cours d'eau principal et ses affluents. Plusieurs pêches électriques et une analyse génétique ont été réalisées 3 ans plus tard. La recolonisation du cours d'eau s'est réalisée à partir des populations des affluents qui ont mieux résisté à la crue.

Les crues ont un effet important sur les espèces piscicoles et sur leur habitat mais il ne faut pas négliger le rôle de refuge des affluents.

D'après Malavoi et Souchon (1992), les débits sont morphogènes pour une période de retour supérieure à 2 ans et correspondent habituellement au débit de plein bord. Cette limite dépend de la morphologie des cours d'eau et du régime. Ces débits remanent le substrat. Ces auteurs observent une importante perte en Truites sur la Sévère après une crue dont le débit instantané maximal est de 70 m³/s pour 220 km² de bassin versant. La période de retour de cette crue n'est pas précisée, elle est qualifiée d'importante. Elle a provoqué un déplacement du chenal principal de 20 m sur le tronçon de rivière étudié. Cette crue a eu un effet morphogène considérable sur le chenal principal. D'après ces auteurs, les crues sont des perturbations car elles remanent l'habitat physique et De plus, la modification du substrat provoque une perte des stades juvéniles ou des frayères qui sont particulièrement sensibles aux fortes vitesses de l'eau. La perte des frayères ou des juvéniles empêche le renouvellement des espèces piscicoles.

Si une telle crue intervient au moment du frai ou de l'éclosion, elle perturbe le recrutement en alevins, qui est faible ou très faible. Si les débits restent inférieurs au débit morphogène, il pourrait être considéré comme non perturbateur pour le milieu physique. Le débit correspondant au remanement du substrat pourrait être la limite distinguant les débits susceptibles de perturber les EBC sur des bases physiques (entraînant le substrat par le courant).

Valentin (1994) signale l'importance des faibles débits sur le succès du recrutement en jeunes individus sur un tronçon de rivière soumis à écluses d'une à plusieurs fois par jour. Les écluses sont les lâchers d'eau brutaux et fréquents qui se produisent lors de la production d'hydro-électricité. Le recrutement en jeunes individus est mauvais lorsque les faibles débits, imposés de façon artificielle, sont d'environ 1/40^{ème} du module inter-annuel. Les alevins seraient emportés des émergences à cause des augmentations brutales de débit. L'ateur préconise un débit entre écluses plus élevé pour ne pas trop détruire les peuplements piscicoles. Un cours d'eau soumis à écluses n'a pas de peuplement piscicole naturel, à cause des variations brutales et fréquentes des débits. Certaines espèces piscicoles ne s'habituent pas à ces variations brutales et fréquentes de débit.

Les faibles débits artificiels sur des cours d'eau soumis à écluses.

Les étages sont donc aussi des perturbations des EFC par confinement et modification physico-chimique, comme la température, le pH... Cependant, les organismes benthiques peuvent s'adapter aux étages grâce à des taux élevés de migration, la production d'oeufs résistants à la dessiccation et la tendance à chercher un refuge dans la zone hyporhéique.

Pour Leroy Poff et Ward (1989), les étages nuis ressortent comme étant des contraintes fortes pour les EFC. Les étages, même non nuis, restreignent considérablement l'espace vital des espèces aquatiques. Ils ont pour effet d'augmenter la prédation et la compétition des espèces entre elles et la prédation des vertébrés, comme les hérons ou les ratons laveurs.

Deluchi (1988) utilise la durée d'étage nul pour regrouper les cours d'eau d'un même réseau hydrographique de l'état de New-York. Il travaille sur la structure des peuplements invertébrés à l'aide du filet troubleau. Le filet troubleau est un filet monté sur un cadre pour gratter le fond de la rivière sur une largeur bien déterminée pour récupérer les invertébrés qui sont identifiés et dénombrés. Il conclut que la structure de la communauté d'invertébrés benthiques dépend de la permanence des zones rapides.

Les faibles débits naturels.

Les faibles débits constituent également des contraintes hydrologiques importantes pour les EFC. Bien qu'ils ne soient pas étudiés pour nos recherches, un paragraphe leur est consacré.

1.1.1.4 Le cas des faibles débits.

Resh *et al.* (1988) proposent de tenir compte du contexte des débits pour définir le terme de perturbation hydrologique, en calculant un écart de débit par rapport à une référence. Ils estiment que les EFC sont capables de supporter un écart de débit pas trop important sans dommage alors qu'un fort écart de débit est une perturbation.

Un tel débit est une perturbation potentielle. De plus, la VH normale ou fréquente a aussi un effet structurant sur les EFC sans être une perturbation. Par contre, la distinction entre débit perturbateur ou non perturbateur est arbitraire. En effet, aucune fréquence n'est attribuée à cette limite.

Resh *et al.* (1988) utilisent deux critères purement statistiques (2 écarts-types autour de la médiane et la mesure de la prévisibilité sur les débits moyens journaliers extrêmes de chaque mois) pour identifier les perturbations. Ils suggèrent qu'une perturbation soit un événement qui sort de la VH "normale" au sens statistique du terme.

Une perturbation est perçue par les écologistes comme un événement destructeur des écosystèmes. Resh *et al.* (1988) suggèrent que tous les processus écologiques aquatiques soient affectés par les débits extrêmes, ce qui s'observe par une perte de biomasse ou d'individus. C'est une façon de définir les perturbations mais la fréquence et l'intensité des débits extrêmes doit être prise en compte.

1.1.1.3 Définition des perturbations selon Resh *et al.* (1988).

Cette thèse montre que les variations de débit importantes et les faibles débits perturbent les EEC, même lorsqu'ils sont habituels.

1.1.2 Effet de la VH sur les écosystèmes en eau courante.

Il s'agit de savoir quel est le lien qui existe entre la VH et les EEC. Cette fois, la notion de VH intègre une notion de durée, de cycle hydrologique. Les différentes façons de calculer la VH fait l'objet de la seconde partie de la bibliographie.

Horwitz (1978) est l'un des premiers auteurs à s'intéresser à l'effet de la VH sur les espèces piscicoles. Il travaille sur 102 stations hydrométriques sur 15 réseaux hydrographiques d'une surface allant de 2 000 à 24 000 km². Il signale aussi l'effet structurant du gradient amont-aval de la température de l'eau. Il constate que la richesse en espèces piscicoles tend à augmenter d'amont vers l'aval, presque exclusivement par addition de nouvelles espèces. La VH reste le facteur prépondérant pour expliquer la richesse en espèces d'un cours d'eau.

Par contre, Horwitz (1978) a tiré les richesses en espèces piscicoles de diverses sources bibliographiques, ce qui peut avoir une influence sur les observations.

D'après Leroy Poff et Ward (1989), la VH est un facteur structurant les processus écologiques des cours d'eau. Pour ces auteurs, les données débitimétriques journalières sont des informations précieuses pour l'évaluation de l'environnement lotique en fonction du temps et du lieu sans en préciser les raisons. Ce sont, par exemple, les crues ou le degré d'intermittence des écoulements, mesuré par le nombre moyen de jours de débit nul par année, qui limitent le développement de la faune.

Ces auteurs ont retenu, par ordre décroissant : le degré d'intermittence, la fréquence des crues, puis la prévisibilité des débits comme variables hydrologiques les plus importantes. La matrice de contingence ($365 * 11$) est définie avec 11 classes de débits et des 365 jours de l'année en utilisant la méthode proposée par Colwell (1974).

Jowett et Duncan (1990) pensent également que la VH est le facteur limitant l'abondance et la distribution des Truites dans les cours d'eau. Cependant, ils s'intéressent aussi à la qualité de l'eau, au périphyton (algues liées au substrat) et aux invertébrés. Pour chaque descripteur de la richesse faunistique, ils disposent de 80 sites d'observation. Les Truites Arc-en-ciel sont présentes dans les cours d'eau pour lesquels la VH des débits est faible mais ils n'ont pas trouvé de relations entre l'abondance des Truites Brunes et la VH. Parmi les facteurs environnementaux, la qualité des eaux a un effet majeur sur les communautés du périphyton et des invertébrés tandis que la VH, surtout des crues, affecterait la biomasse globale.

Ils concluent que la vitesse moyenne de l'eau dans un tronçon de rivière est le facteur hydrologique le plus important sur la structure des communautés aquatiques. Ce facteur joue sur la température de l'eau, la stabilité du lit et sur l'habitat disponible.

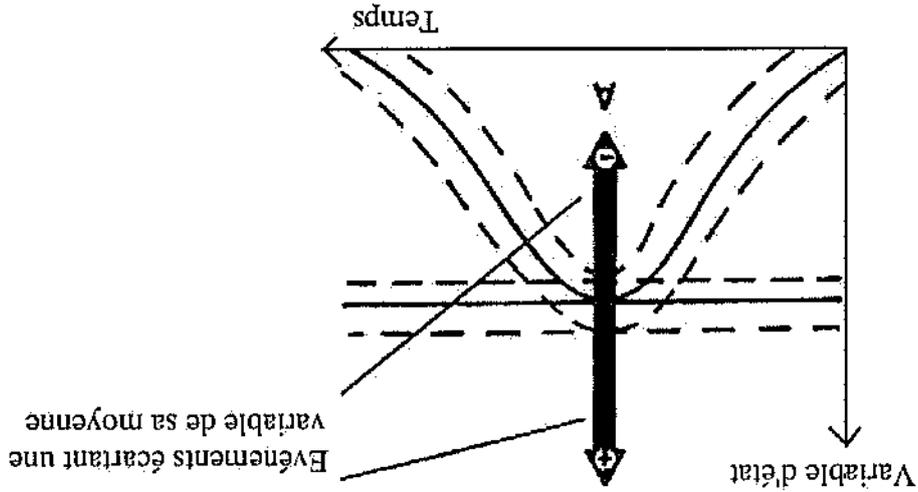
Par contre, il est regrettable que les données soient issues de divers auteurs car les méthodes de pêches ne sont pas forcément les mêmes et donc de représentativité variable.

Osborne et Wiley (1992) travaillent sur l'influence de la VH et de l'ordre amont/aval des cours d'eau sur la richesse en espèces de différents cours d'eau, appartenant à 3 bassins

Pour Blandin et Lamotte (1985), cette distinction est plus nette. Ils distinguent deux domaines de perturbations :

- un domaine de fluctuations qui englobe les différents états normaux d'un écosystème. Ce domaine délimite l'évolution saisonnière de la variable d'état d'un système. L'écosystème n'est donc modifié que temporairement, il peut revenir à son état antérieur.
- un domaine de fluctuations moins fréquent, qui provoque une modification durable de la structure et du fonctionnement de l'écosystème. Le système glisse vers un nouvel équilibre. La variable a dépassé les limites du domaine de stabilisation.

Figure 1.1.3.1 Notion de perturbation d'après Stanford et Ward (1983).



Stanford et Ward (1983) considèrent que tout événement lié au hasard et qui éloigne significativement une variable d'état de sa moyenne est une perturbation. Cela veut dire que la variable d'état peut s'écartier légèrement de sa moyenne mais qu'il ne s'agit pas forcément d'une perturbation. Si l'écart est plus important, c'est une perturbation.

Une approche intéressante de la définition du terme "perturbation" est proposée par divers auteurs.

1.1.3 Distinction entre variabilités hydrologiques fréquentes (VHF) et peu fréquentes (VHPF).

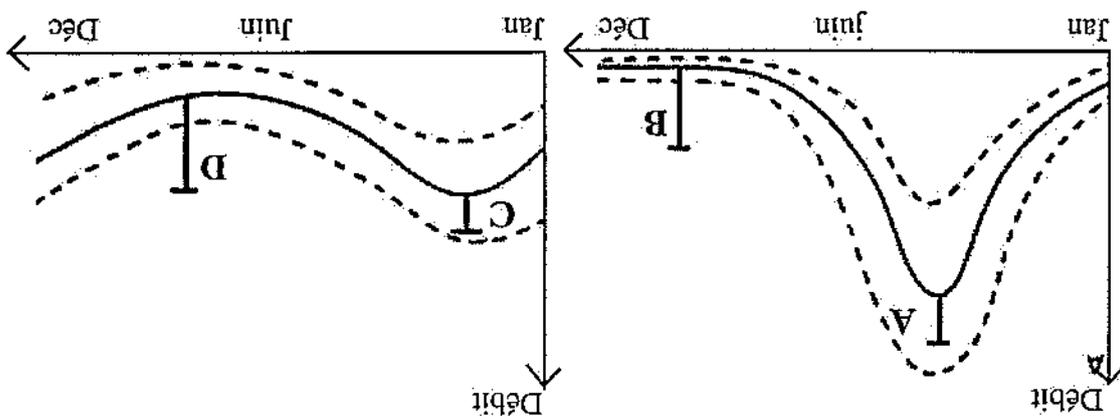
Cependant, ces auteurs n'ont effectué des pêches que sur un cours d'eau et ont utilisé les résultats de pêches électriques d'autres auteurs pour comparer les espèces présentes sur ces 3 bassins versants. Leurs recherches suggèrent que les poissons aient la possibilité de se déplacer d'un affluent de faible ordre (forte VH) à un cours d'eau d'ordre élevé (faible VH), si celui-ci se trouve à proximité. L'effet de la VH sur les EFC est compensé par le rôle de refuge que jouent les affluents.

Osborne et Wiley (1992) concluent que la VH est un facteur limitant le nombre d'espèces. A surface égale, mais inférieure à 250 km², ce sont les cours d'eau se jetant dans un cours d'eau d'ordre élevé qui sont plus riches en espèces par rapport aux bassins situés en tête de réseau.

versants différents. Ces bassins ont une surface de 2 300 à 3 500 km² et sont situés dans l'Illinois (USA).

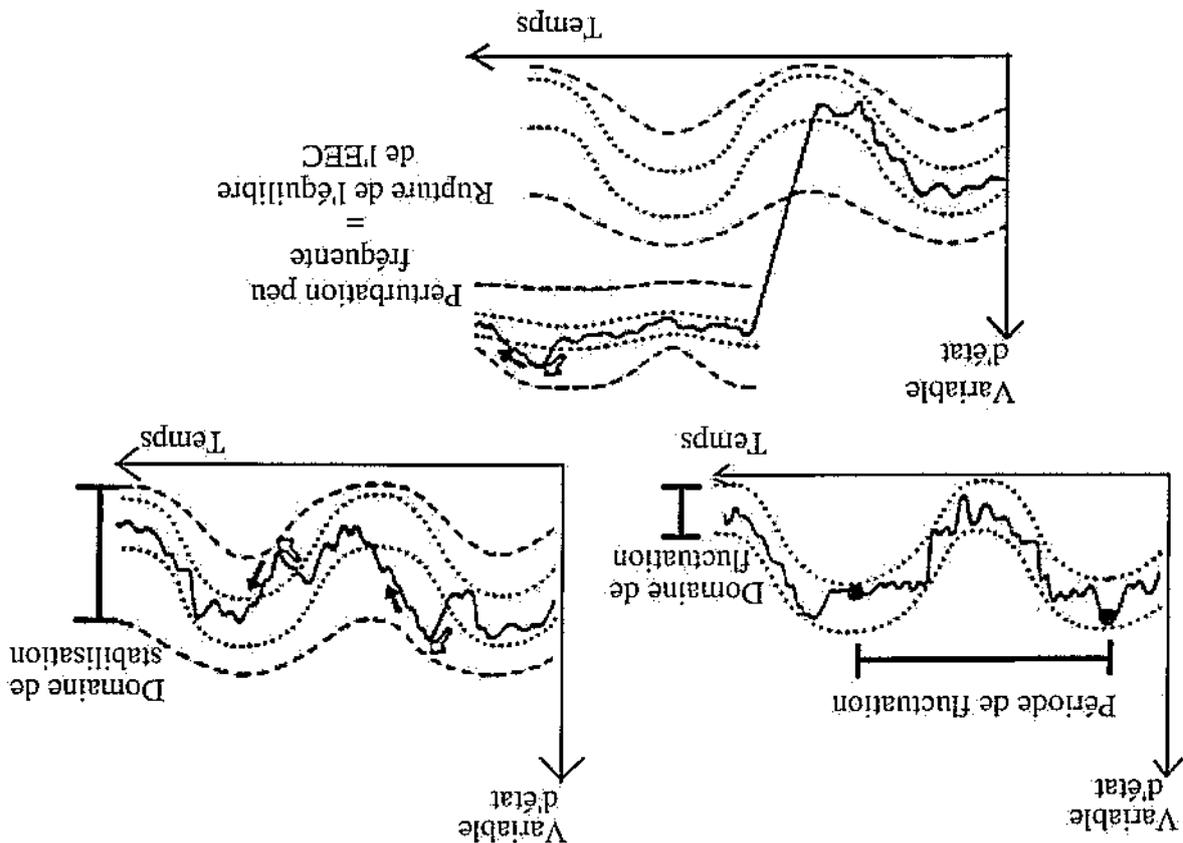
Ainsi, le débit noté (a) n'est pas une perturbation bien qu'étant plus élevé que le débit (b). En effet, le débit (a) s'inscrit dans un contexte de débit élevé comme l'indique la courbe en gras, qui représente la médiane des débits. Le débit (d) est une perturbation car il s'inscrit

Figure 1.1.3.3 Conditions hydrologiques fréquentes et peu fréquentes selon Resh et al. (1988).



Cette distinction est également reprise par Resh et al. (1988). D'après ces auteurs, un EFC peut supporter des variations de moins de 2 écarts-types des débits. Si cette limite est dépassée, le débit est une perturbation. Ce n'est pas un débit atteint qui peut perturber un EFC mais l'écart de ce débit à une référence. Cette référence est choisie comme étant la médiane des débits mais il ne précise pas sur quel échantillon la médiane est calculée.

Figure 1.1.3.2 Représentation schématique des domaines de fluctuation et de stabilisation d'un écosystème (Blandin et Lamotte, 1985).



dans un contexte de conditions médianes de faibles débits. Ce débit n'aurait pas été une perturbation s'il s'était produit lorsque se produit le débit (c). En effet, le débit (c) s'inscrit dans un contexte de débits médians élevés.

Leroy Poff (1992) critique cette approche de la perturbation car cette limite est statistique et considère qu'une perturbation est l'évènement qui entraîne une mortalité massive des organismes aquatiques.

1.1.4 La variabilité hydrologique, facteur d'équilibre des écosystèmes en eau courante.

Malgré ses inconvénients sur les EBC, la VH participe aussi à leur équilibre. Les crues nettoient le substrat des particules fines qui se déposent en leur absence (O'Brien, 1987; Stalnaker et al., 1989; Tyus, 1992).

Dans les cours d'eau dont les débits sont contrôlés par un barrage, les frayères sont progressivement colmatées par des particules fines puis abandonnées. Cela entraîne la disparition des espèces de poissons qui ont besoin de frayères bien oxygénées pour se reproduire.

Le renouvellement des perturbations dans le temps semble conditionner la diversité biologique, en fonction de la capacité de régénération des espèces. Cette assertion repose sur l'hypothèse que les espèces situées au bas de l'échelle trophique reconstituent plus facilement leur population que les compétiteurs et les prédateurs supérieurs.

D'après Huston (1979), si la durée séparant deux perturbations successives est inférieure au temps d'élimination d'une espèce par compétition ou par prédation, cette espèce est maintenue dans l'écosystème.

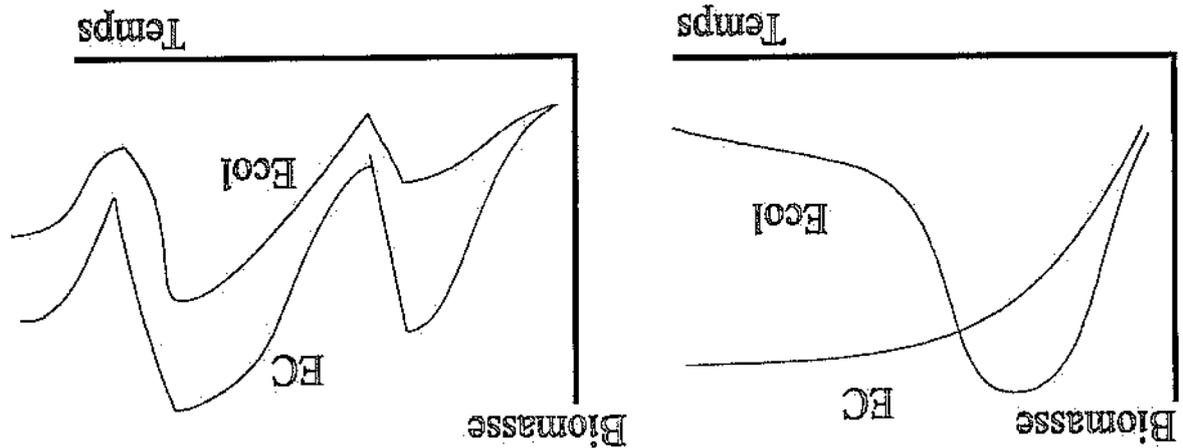


Figure 1.5 Effet des perturbations sur la biomasse d'un écosystème (d'après Huston, 1979). Ecol signifie espèces compétitives supérieures et Ecol espèces colonisatrices.

En l'absence de perturbation (graphique de gauche), les espèces inférieures se développent plus vite que les compétiteurs supérieurs et les prédateurs, mais ils sont consommés par ces derniers. Dans le cas de perturbations successives (a, b, c), les communautés sont en équilibre (graphique de droite). La diversité des EBC s'explique en partie par la succession

d'événements hydrodynamiques suffisamment forts pour rééquilibrer le réseau trophique, mais d'intensité et de durée suffisante pour ne pas modifier profondément l'écosystème.

Une absence ou une faible VH n'est pas favorable aux EEC. Elle participe également à leur reproduction de bien des espèces piscicoles. Elles permettraient le maintien de certaines espèces selon Huston (1979).

1.1.5 Conclusion.

D'un avis général, les auteurs s'accordent à dire que les crues et les étiages sont des perturbations des EEC. Il existe 2 définitions complémentaires du terme perturbation, celle de Leroy Poff (1992) et celle de Resh *et al.* (1988). Les auteurs s'intéressent aux crues, parfois aux étiages.

Pour rechercher l'effet de la VH sur les EEC, deux approches sont possibles :

- l'étude d'un cours d'eau en particulier ou d'une crue particulière. C'est le cas de Jowett et Richardson (1989), Baril *et al.* (1994), Capra *et al.* (1995). Cette approche n'intègre pas la notion de VH dans son ensemble mais des cas particuliers. Cette étape est nécessaire pour bien comprendre les conséquences des crues et des étiages sur les EEC.
- l'étude de nombreux cours d'eau, où le lien entre la VH et les EEC est recherché dans son ensemble, avec des chroniques de débit (Horwitz, 1978, Leroy Poff et Ward, 1989 ; Jowett et Duncan, 1990 ; Osborne et Wiley 1992). Chaque auteur définit la VH avec des descripteurs statistiques.

Les crues n'ont pas les mêmes conséquences sur les EEC selon la saison pendant laquelle elles se produisent (Seegrist et Gard, 1972). C'est également l'avis de Leroy Poff (1992) et de Resh *et al.* (1988). Un débit donné n'est pas une perturbation des EEC s'il se produit en période de hautes eaux alors qu'il en est une s'il interrompt brutalement un étiage.

Afin de pallier le manque d'information hydrobiologique, il est proposé dans ce travail une approche discriminatoire de la VH à partir des chroniques de débit. L'objectif étant à terme de régionaliser l'information des caractéristiques de débit pertinentes pour les EEC et de corréler cette information avec les données biologiques.

1.2 Principaux descripteurs statistiques de la Variabilité Hydrologique (VH).

La VH est calculée à partir des chroniques de débit. Ces débits peuvent être des débits instantanés, horaires, journaliers, mensuels ou annuels. Les chroniques de débit constituent la source d'informations à synthétiser. Les débits évoluant dans le temps, il faut trouver des descripteurs qui rendent compte de la VH qui se calcule de nombreuses façons.

Dans ce paragraphe, les descripteurs de la VH sont critiqués. L'effet d'échelle spatiale et temporelle, la régionalisation, la standardisation et la saisonnalisation de la VH sont abordés.

Les échelles de temps des descripteurs classiques de la VH sont celles du transect amont/aval (quelques heures à quelques jours), les saisons et les années. A ces échelles

L'écart-type des débits est facile à calculer et à comprendre. Par contre, il est très sensible aux valeurs éloignées de la moyenne, même si elles ne sont pas nombreuses, ce qui est une des limites de ce descripteur.

Où :

X_i sont les valeurs constituant l'échantillon, avec $1 \leq i \leq n$
 $\bar{\mu}$ est la moyenne de l'échantillon,
 n est l'effectif de l'échantillon.

$$\text{Ecart-type} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{\mu})^2 / n}$$

L'écart-type d'un échantillon de débits se calcule comme suit :

Hugues (1987), Hugues et James (1989), Jowett et Duncan (1990) décrivent la VH avec l'écart-type des débits. Il est calculé avec la totalité des débits, sans distinction de saisons dans l'année.

Ecart-type des débits.

Ecart-type des débits, du logarithme des débits et des valeurs extrêmes.

L'écart-type et le coefficient de variation sont très utilisés en hydrologique, avec ou sans le logarithme des débits.

débits.

1.2.2.1 Ecart-type et coefficient de variation des débits ou du logarithme des

La plupart des descripteurs traditionnels de la VH sont issus des statistiques. Seuls les descripteurs de la VH appliqués aux crues (paragraphe 1.2.2.8) sont des descripteurs de la VH destinés à l'hydrologie.

1.2.2 Descripteurs traditionnels de la VH.

Les paramètres des lois de distribution des débits (journaliers, mensuels ou annuels) sont des descripteurs de la VH très utilisés pour décrire la VH. Les lois utilisées en hydrologie pour des débits instantanés ou journaliers sont les lois de Poisson ou la loi Log-normale. Pour des débits annuels ou mensuels, la loi normale convient en général. La loi normale est décrite avec deux paramètres, qui sont la moyenne et l'écart-type.

En statistique, les moments d'ordre 3 et 4 sont des estimateurs de l'asymétrie des échantillons de valeurs.

Une manière d'exprimer la VH est de quantifier l'asymétrie d'un échantillon de débits. Il peut s'agir de la moyenne mensuelle qui évolue d'un mois à l'autre. Parfois, l'écart-type des débits est relativisé en le divisant par la moyenne, c'est le coefficient de variation. Le terme de coefficient de variation est très utilisé en hydrologie pour décrire la VH. L'écart-type des débits spécifiques (ou des pseudo-spécifiques avec la surface à la puissance a , avec $0 < a < 1$) ou le coefficient de variation des débits sont employés pour comparer ces descripteurs entre plusieurs bassins versants.

1.2.1 Généralités.

temporelles, nous voulons rajouter une échelle de mémoire biologique de quelques semaines, éventuellement saisonnalisée.

Le coefficient de variation des débits est calculé à partir de l'écart-type des débits. Il s'agit de l'écart-type des débits divisé par la moyenne. Hugues et James (1989) travaillent avec des débits moyens mensuels. C'est un paramètre classique des statistiques, facile à calculer.

Coefficient de variation des débits.

Le coefficient de variation des débits est utilisé avec ou sans le logarithme des débits. Le choix de l'utilisation du logarithme normalise la distribution des débits.

Coefficient de variation des débits et du logarithme des débits.

L'écart-type des débits les plus forts, échantillonnés chaque année dans une chronique de données, paraît peu intéressant car trop lié à la période d'échantillonnage (pluriannuelle) et à l'imprécision des débits les plus forts. Cet écart-type est également calculé avec le logarithme de ces débits. Il est parfois divisé par la moyenne ou la médiane des débits. (Hugues, 1987; Hugues et James, 1989).

Le débit est un débit instantané (Jowett et Duncan, 1990) ou un débit journalier, parfois mensuel (Hugues, 1987; Hugues et James, 1989). Un tel indice rend compte de la dispersion des débits extrêmes tout en étant très sensible à la qualité des observations (Jowett et Duncan, 1990). Cela est d'autant plus vrai lorsque ces indices sont calculés avec le débit instantané maximal de chaque année.

Parfois, l'écart-type des débits est calculé avec les débits les plus forts ou les plus faibles, en échantillonnant une valeur par année d'observation. Cette méthode d'échantillonnage tient compte de toutes les années alors que d'autres méthodes échantillonnent les débits dépassant un seuil.

Ecart-type de valeurs extrêmes.

L'utilisation d'une fonction puissance comporte cette difficulté, avec un exposant inférieur à l'unité. Le problème reste le choix de cet exposant. De plus, la question du choix d'un écart-type calculé sur des débits ou des logarithmes des débits, traduits ou non, reste posée.

La transformation logarithmique écrase les forts débits par rapport aux autres débits, ce qui n'est pas intéressant pour évaluer la VH en rivière.

Il diminue l'inconvénient de l'incertitude avec laquelle les débits les plus forts sont connus. Par contre, le logarithme des débits ne se calcule pas avec des débits nuls. Lorsque les débits sont inférieurs à l'unité de débit (1 l/s/km^2 , $1 \text{ m}^3/\text{s}$), des valeurs négatives apparaissent. Ces débits augmentent la dispersion du logarithme des débits, et donc l'écart-type du logarithme des débits. A la limite, pour des débits très proches de zéro, ce descripteur tend vers l'infini. Pour des débits très faibles, l'écart-type du logarithme des débits présente donc des défauts certains.

Le logarithme relativise les débits les plus forts par rapport aux débits fréquents. Cela rend la distribution de l'échantillon de débits au pas de temps journalier à peu près normal (Richard, 1989 et 1990).

Ecart-type du logarithme des débits.

Par contre, un faible écart-type des débits indique une faible dispersion des débits autour de la moyenne.

Ces deux cas présentent un écart-type des débits important. Pourtant, leurs effets ne sont pas *a priori* les mêmes vis à vis des EEC.

En effet, il n'est pas possible de faire la différence entre les deux cas suivants :

- quelques débits sensiblement éloignés de la moyenne mais peu fréquents,
- des débits peu éloignés de la moyenne mais assez fréquents.

La distorsion des débits est généralement calculée à partir des débits classés par ordre croissant ou décroissant, en mélangeant les débits de toutes les années. La distorsion est calculée comme une

La distorsion des débits.

Enfin, il n'est pas intéressant de les calculer avec des débits classés inter-annuels trop rares. En effet, la différence entre Q_N 1% et Q_n 1% est très proche de Q_N 1% car ce débit classés inter-annuel est bien plus élevé que son symétrique à la médiane. Q_N 1% signifie débit classés inter-annuel dépassé 1% des jours. Q_n 1% signifie débit classés inter-annuel dépassé 99% des jours.

Les valeurs retenues par Richards (1989 et 1990) sont $x = 10, 20$ et 25%. Elles ne renseignent pas sur la dispersion des débits intermédiaires. Comme l'écart-type des débits, les étendues de débits doivent être calculées en débits spécifiques pour être comparables d'un bassin versant à l'autre.

Q_N x% signifie débit qui est dépassé x% des jours alors que Q_n x% signifie débit qui n'est pas dépassé x% des jours. Cette notation est conservée au cours de ce travail.

$$\text{Etendue} = Q_N x - Q_n x$$

Les étendues de débits sont calculées comme une différence entre deux débits classés inter-annuels, symétriques par rapport à la médiane. En anglais, elles sont appelées "spread measures". Elles correspondent aux inter-déciles, inter-quiniles ou aux inter-quartiles. Elles sont de la forme :

Les étendues de débits.

Elles sont également très utilisées, faciles à calculer et à comprendre.

1.2.2.2. Étendues de débits et indices de distorsion.

La moyenne μ relative l'écart-type des débits et rend ce descripteur plus ou moins comparable d'un bassin versant à l'autre. La normalisation par la moyenne n'apparaît pas des plus judicieuse car la moyenne est influencée par les débits extrêmes. La normalisation par la moyenne pose un problème pour une saisonnalisation de la VH en rivière car la moyenne des débits évolue au cours des saisons.

Où :
 X_i est le débit,
 μ la moyenne du logarithme des débits transformés,
 n l'effectif de l'échantillon.

$$\text{Coef. var} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(X_i + 1) - \mu)^2 / n}{\mu}}$$

Richard (1989) propose le calcul du coefficient de variation du logarithme des débits moyens journaliers pour ses recherches sur le transport des matières en suspension dans divers cours d'eau des USA. Le logarithme relative les débits les plus élevés par rapport aux autres débits. Horvitz (1978) et Hugues et James (1989) contournent la difficulté des débits nuls en ajoutant 1 aux débits. Ce sont des débits transformés. L'unité des débits n'est pas précisée mais il s'agit de débits journaliers. La formule est la suivante :

Coefficient de variation du logarithme des débits transformés ou non.

Où :
 X_i sont les valeurs constituant l'échantillon, avec $1 \leq i \leq n$,
 μ la moyenne de l'échantillon,
 n l'effectif de l'échantillon.

$$\text{Coef. var.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2 / n}{\mu}}$$

Le coefficient de variation se calcule de la manière suivante :

Il existe plusieurs façons de quantifier l'asymétrie d'un échantillon en statistique. Certains auteurs utilisent un autre coefficient d'asymétrie des débits très simple à calculer. Il s'agit de la moyenne divisée par la médiane.

1.2.2.4 L'asymétrie des débits.

La normalité est obtenue par la transformation logarithmique pour les données de débits journaliers mais cela écrase l'information recherchée sur la VH. De plus, la mesure CVFL5 ne tient pas compte des 5% des débits les plus forts, qui sont pourtant les débits qui peuvent perturber les EBC au sens de Leroy-Folt (1992).

Richardts (1990) propose une mesure de la VH qu'il appelle CVFL5 sur des débits moyens journaliers. C'est le coefficient de variation du logarithme des débits classés inter-annuels des centiles {5, 10, 15, 20, ..., 80, 85, 90, 95} soit 19 valeurs. Cette mesure évite le calcul du coefficient de variation sur toute la série de débits considérés car CVFL5 préserve ce qu'il appelle "l'essence des propriétés de la série de mesures". Il ne précise pas quelle est la signification statistique de cette mesure. CVFL5 a essentiellement la même moyenne que l'échantillon parent si l'échantillon est normal et un écart-type égal à 88% de celui de l'échantillon parent.

1.2.2.3 Mesure CVFL5.

La dimension des débits utilisés pour le calcul de ces distorsions importe peu car il s'agit de rapport entre deux débits ou entre deux différences de débits. Ces distorsions importent peu ou moins comparables entre bassins versants.

Une forte distorsion peut être le résultat de différentes situations qu'il n'est pas possible de distinguer :

- un numérateur élevé, qui traduit une gamme de débit étendue, qui dépend elle-même des débits classés inter-annuels choisis.
- un dénominateur faible, lorsque la médiane des débits ou le Qx_{10} , 25% sont faibles.

Cette distorsion quantifie l'asymétrie d'un échantillon de débits vers les forts débits, mais sans choisir les débits extrêmes, qui sont connus avec une certaine imprécision. De plus, les débits classés inter-annuels les plus élevés sont mal estimés sur des chroniques courtes et dépendent trop de la période pluriannuelle d'échantillonnage.

$$\text{Indice} = Qx_{5\%} / \text{Médiane}$$

Le rapport du débit atteint ou dépassé 5% des jours divisé par la médiane des débits et proposé par Hugues et James. (1989). Ce rapport est de la forme :

Richardts (1990) propose également le rapport de deux débits classés inter-annuels, symétriques par rapport à la médiane. Il prend le débit atteint ou dépassé 20% du temps divisé par le débit atteint ou dépassé 80% du temps ($Qx_{20\%} / Qn_{20\%}$). Ce rapport peut-être calculé avec d'autres débits classés inter-annuels ($Qx_{10\%} / Qn_{10\%}$, $Qx_{25\%} / Qn_{25\%}$ par exemple).

Rapport de débits classés inter-annuels.

Richardts (1989 et 1990) propose deux distorsions de débits avec x égal à 10% ou 25%. Ce sont des inter-déciles et des inter-quartiles rapportés à la médiane.

$$\text{Indice} = (Qx_x - Qn_x) / \text{médiane}$$

Cette distorsion est de la forme :

Inter-décile ou inter-quartile rapportés à la médiane.

étendue de débit rapportée à la médiane de la même saison (Richardts, 1989 et 1990). La distorsion augmente lorsque les étendues de débit sont larges mais elle dépend également de la médiane des débits.

$$\text{Coefficient} = \frac{(N^2 * \sum \bar{\sigma}^2 - 3 * N * \sum \bar{\sigma} * \sum \bar{\sigma}^2 + 2 * \sum \bar{\sigma}^3)}{(N * (N-1) * (N-2)) * Sx}$$

forme :

Huges et James (1989) proposent un coefficient d'asymétrie des débits moyens annuels de la

Coefficient d'asymétrie.

Le moment d'ordre 3 n'est pas intéressant pour mesurer l'asymétrie des débits car il varie trop selon les échantillons et il est trop sensible aux débits extrêmes.

Cela paraît logique car le logarithme des débits intervient à la puissance 3. Les auteurs précisent qu'il est difficile d'en obtenir une bonne évaluation pour de courtes chroniques de débit à cause des observations qui évoluent avec le temps.

D'après ces auteurs, cette asymétrie est très variable selon les échantillons et elle est très sensible aux débits extrêmes.

- positif, l'asymétrie est vers les valeurs fortes;
- nul, il n'y a pas d'asymétrie. C'est le cas d'un échantillon normal;
- négatif, l'asymétrie est vers les faibles valeurs.

Le moment d'ordre 3 peut être :

N est l'effectif de l'échantillon.
 X est le logarithme du débit maximal annuel,
 Xm la moyenne du logarithme des maximaux annuels,
 Sx l'écart-type du logarithme de ces débits.

Où :

$$\text{Ordre 3} = (N * \sum(X - X_m)^3) / ((N-1)(N-2)Sx^3).$$

La formule de cette asymétrie est de la forme :

Babak Naghavi et Fang Xin Yu (1991) utilisent ce descripteur statistique pour caractériser la VH en rivières. Ces auteurs cartographient l'asymétrie des débits maximaux annuels des cours d'eau de la Louisiane. Ils disposent de chroniques de débits d'une durée supérieure à 20 ans. Le pas de temps des débits n'est pas précis.

Le moment d'ordre 3.

Par contre, elle présente l'inconvénient déjà évoqué pour les rapports de quantiles. En effet une forte asymétrie peut être le résultat de deux situations totalement différentes et impossibles à distinguer :

- des débits élevés mais peu fréquents, c'est le cas en régime pluvial à influence cévenole par exemple,
- une médiane des débits très faible. Ce cas peut se produire lors d'une approche mensuelle de la VH. Certains cours d'eau présentent une médiane des débits très faible une partie de l'année.

$$\text{Asymétrie} = \text{Moyenne} / \text{médiane}.$$

Sa formule est :

Jowell et Duncan (1990) calculent l'asymétrie des débits comme le ratio de la moyenne et de la médiane. Plus ce rapport est élevé, plus l'asymétrie vers les forts débits est grande. En effet, ils influencent la moyenne alors que la médiane est peu affectée. Cette asymétrie est comparable d'un bassin versant à l'autre car elle est sans dimension, quels que soient les débits utilisés. C'est un avantage par rapport à d'autres descripteurs pour lesquels les débits spécifiques sont utilisés pour rendre la VH comparable d'un bassin versant à l'autre. De plus, cette asymétrie est facile à calculer.

Rapport de la moyenne à la médiane.

Le coefficient saisonnier est proposé par Pardé (1968). Il se calcule de la façon suivante :

1.2.2.7 Coefficient saisonnier.

Ces auteurs suggèrent que ce rapport soit le même pour la crue centennale et la crue décennale. Ils estiment que les résultats sont prometteurs mais que les travaux doivent être étendus sur plus de stations hydrométriques. Par contre, la méthode d'attribution de la période de retour aux débits n'est pas précisée, pas plus que leur dimension des débits ou leur pas de temps.

Turcott et Greene (1993) proposent le rapport des crues de périodes de retour différentes pour estimer la sévérité des crues de 10 cours d'eau de divers états des USA (Californie, Nouveau Mexique, Texas, Minnesota...). Ce rapport est la crue de période de retour 10 ans divisée par la crue de période de retour un an.

1.2.2.6 Rapport de crues de différentes périodes de retour.

Les débits classés ne fournissent pas la répartition des débits dans la saison, comme pour les descripteurs précédents. Ils sont intéressants pour estimer des quantités d'eau, comme le font ces auteurs.

Où e, f, g, i et j sont les variables à ajuster pour chaque station hydrométrique et pour chaque coefficient a, b, c, et d. C'est donc un modèle de régionalisation à 16 paramètres, d'où une faible capacité à la régionalisation.

$$a, b, c \text{ et } d = c * (P_f) * (A \cdot B) * (H^i) * (L^j)$$

Ces variables sont liées à la pluie annuelle P, la différence d'altitude entre les points extrêmes du bassin versant considéré H, la longueur du cours d'eau L, et l'aire du bassin versant A selon le modèle :

a, b, c, d sont les variables positives à ajuster.
D est la durée de dépassement d'un débit donné.

Q est le débit spécifique.

Où :

$$Q = a - b * D + c * D^2 - d * D^3$$

L'équation des courbes de débits classés proposée par ces auteurs est un polynôme du troisième degré de la forme :

Les débits classés sont utilisés pour décrire la VH. Il s'agit de la courbe liant les durées de dépassement cumulées dans la saison étudiée et des débits correspondants. Ces débits sont utilisés par Mimitkou et Kacmaki (1985) pour la régionalisation des débits moyens mensuels dans l'ouest de la Grèce.

1.2.2.5 Les débits classés.

Cette formule est issue des statistiques, elle se rapproche du moment d'ordre 3. Elle est assez compliquée, elle présente l'inconvénient de faire intervenir des débits à la puissance 3, ce qui diminue la signification de ces indices.

La même formule est proposée avec le logarithme des débits maximums annuels. Mais le pas de temps de ces débits n'est pas précisé.

S est l'écart-type des débits.
N l'effectif de l'échantillon.
Q les débits moyens annuels.

Où :

- le gradient exponentiel ou "gradex" des débits, qui renseigne sur le taux d'accroissement des caractéristiques des crues (intensité, volume, .. pour différentes durées) en fonction de leur occurrence et pour un site donné. Selon le gradex, les crues peu fréquentes à rares

- la crue de période de retour un an, qui est considérée pour ce travail et en première approximation, comme la limite entre le domaine fréquent des débits ou des variations de débit et le domaine moins fréquent. C'est un débit susceptible d'être subi en moyenne chaque année. La structure biologique de l'EFC et forcément adaptée à cet événement, compte tenu de sa fréquence. Cette limite tient compte de la durée des cycles biologiques, et de la durée de vie (> 1 an) des peuplements piscicoles qui sont souvent utilisés comme marqueurs biologiques de l'état des EFC.

On peut aussi choisir que la loi exponentielle synthétise les débits avec les deux variables suivantes, différentes des deux paramètres de base précédents, implicites dans ces modèles (via leur fréquence d'apparition $F(Q)$) :

Ces deux paramètres sont déterminés par des formules sommaires de régionalisation et sont corrigés par une analyse régionale de ces paramètres à partir des données hydrométéoriques disponibles à proximité. La simplicité des modèles de régionalisation pour le cas des crues observables (période de retour moyenne inférieure à quelques décennies) ne fait pas intervenir l'information pluie. Sa robustesse en fait un outil particulièrement intéressant pour la régionalisation des caractéristiques de débit.

- la durée caractéristique de crue D ,

- le débit instantané décennal Q_{X1A10} .

Cette méthode présente l'avantage important de ne s'appuyer que sur deux paramètres caractéristiques des bassins versants modélisés qui sont :

L'hydrologie régionale est synthétisée, entre autres, sous la forme de modèles liant des caractéristiques de débit (débit seuil, volume, ..) à des durées et des fréquences d'observation. Le triplet QdF (débit, durée, F fréquence) répond à l'essentiel des problèmes posés en aménagement des rivières. La méthode d'analyse QdF généralisée à quelques centaines de bassins versants en France et à l'étranger a permis de dégager trois modèles de base du comportement des débits de crue. Ces trois modèles servent à la prédétermination de ces caractéristiques en tout point d'un réseau hydrographique, jaugeé ou non.

La loi exponentielle (Gatica *et al.*, 1994; Prud'homme 1995) est issue de travaux de recherche menés par le CEBAJAGER depuis plusieurs années. En effet, les crues font l'objet d'études essentiellement pour la protection des ouvrages hydrauliques et des riverains. De par l'ala nature de l'occurrence des crues et de leur intensité, il est nécessaire d'évaluer un "risque d'occurrence" associé. Cela permet, par exemple, de dimensionner les aménagements de protection en fonction d'un risque consenti. L'étude détaillée des régimes de crue nécessite de longues chroniques de débit rarement disponibles. Pour pallier ce manque, les hydrologues ont choisi de s'appuyer sur la connaissance régionale.

Présentation de la loi exponentielle.

Les descripteurs de la VH appliquée aux crues sont issus de la loi exponentielle, qui est très utilisée en hydrologie.

1.2.2.8 Descripteurs de la VH appliquées aux crues.

Ce coefficient rend compte de la dispersion des débits mensuels inter-annuels par rapport au module. Il peut être appelé indice saisonnier. Il est facile à calculer, il tient compte de tous les débits observés.

$Q_M(t)$ est le débit mensuel inter-annuel du mois t ,
 Q_A le débit inter-annuel.

Où :

$$\text{Coefficient}(t) = Q_M(t) / Q_A$$

sont susceptibles de modifier l'équilibre d'un EFC plus ou moins fréquemment. Le gradex constitue donc un marqueur de la VH pour des fréquences supérieures à l'année.

Pour la suite des recherches, nous préférons la crue annuelle et le gradex des débits à la durée D et au Q_{XIA10} car nous travaillons avec des débits journaliers. Les débits instantanés ne sont pas disponibles sur les stations hydrométriques qui servent à ces recherches.

Exemple d'application de la loi exponentielle aux débits.

Un exemple d'application de la loi exponentielle est proposé. Il s'agit de la Veyle à Lant, petit cours d'eau des Dombes. À partir de la chronique de débits journaliers, les débits les plus forts sont extraits. Les débits sont choisis selon deux critères, destinés à en assurer l'indépendance et à les échantillonner toutes les années :

- pas plus de 6 maxima par an.
- un écart de date minimal de 3 jours entre deux débits extraits.

Ces débits sont classés par ordre décroissant. Une période de retour est attribuée pour chaque débit. Le débit de rang 1 a la plus forte période de retour.

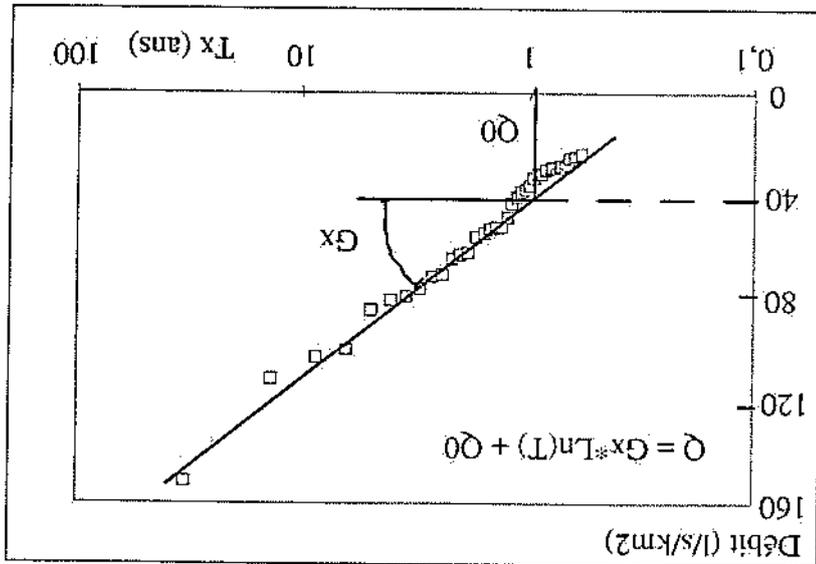


Figure 1.2.8 Exemple d'ajustement des débits avec la période de retour sur la Veyle à Lant et calcul du gradex des débits G_x et de la crue annuelle Q_0 (m³/s).

Les débits les plus forts suivent habituellement une loi exponentielle à deux paramètres qui sont :

- la pente de la droite, qui est le gradex des débits. C'est le paramètre d'échelle.
- le débit à l'origine, pour $T_x = 1$ an. C'est la crue annuelle ou paramètre de position des débits.

Ces deux paramètres suffisent à modéliser les débits les plus forts. La loi exponentielle est sensible au pas de temps utilisé. Il importe donc de le préciser et de le choisir en fonction du problème posé. La loi exponentielle est plus sophistiquée que le calcul de la plupart des autres descripteurs proposés par d'autres auteurs. Elle apporte des informations complémentaires et une potentialité de régionalisation démontrée.

1.2.3 Notion de prévisibilité, constance et contingence.

Parmi les descripteurs de la VH, il paraît important de considérer les notions biologiques de prévisibilité, constance et contingence. En effet, un éventuel aspect cyclique des perturbation a aussi une importance sur les EBC.

1.2.3.1 Définition et intérêt de la prévisibilité, constance et contingence.

Les paramètres de la VH proposés dans la littérature ne permettent pas de savoir si les crues ou les étages ont un aspect cyclique ou non. Pourtant, Resh *et al.* (1988) suggèrent que la prévisibilité des événements hydrologiques influence l'évolution des mécanismes de comportement et la synchronisation des cycles de vie des individus. Colwell (1974) propose trois valeurs statistiques destinées à caractériser la prévisibilité de la structure temporelle de divers phénomènes. Ainsi, il définit :

- la prévisibilité P qui est composée de deux parties qui s'additionnent :
- la constance C qui est une mesure de l'invariance temporelle des états. Elle quantifie la stabilité du phénomène étudié dans le temps. Elle est élevée lorsque l'état d'un phénomène n'évolue pas ou peu dans le temps.
- la contingence M qui est une mesure de la périodicité des états. Elle atteint un maximum pour un phénomène très lié à une saison particulière.

Pour calculer ces variables, une matrice de fréquence avec 1 colonnes (1 saisons du cycle) et 5 lignes (états possibles du phénomène étudié) doit être établie. A chaque intersection de cette matrice correspond la fréquence du phénomène sur la durée d'observation.

Stearn (1981) teste la précision et la sensibilité des mesures de Colwell sur des séries simulées de 30 à 300 observations en comparant cette méthode avec un traitement classique du signal avec les transformées de Fourier. Leur capacité à détecter les fluctuations de grandes longueurs d'onde est satisfaisante. Stearn (1981) souligne le cas des états non représentés. Si une colonne ou un rang n'est pas représenté, le degré de liberté doit être diminué de 1 par état nul. Pour rechercher la périodicité d'un phénomène, il faut travailler avec différentes durées de saisons.

La périodicité d'un phénomène est significative lorsque la contingence passe par un maximum supérieur à 0,200. Pour pouvoir détecter cette périodicité, une chronique d'observations dont la durée est de 5 à 6 fois la périodicité du phénomène recherchée est nécessaire.

Cette méthode considère des valeurs ordinales pour les états, ce qui est nécessaire pour décrire et hiérarchiser une information biologique. L'outil est donc prometteur pour les applications visant à comparer des informations biologiques et débitométriques.

La prévisibilité, constance et contingence sont intéressantes pour nos recherches mais il faut transformer les débits en valeur discontinues. Les classes de débit sont à définir. Le seuil de débit reste également à préciser, il pourrait être choisi comme la limite entre la VHF et la VHPF.

1.2.3.2 Application de la prévisibilité, constance et contingence aux débits.

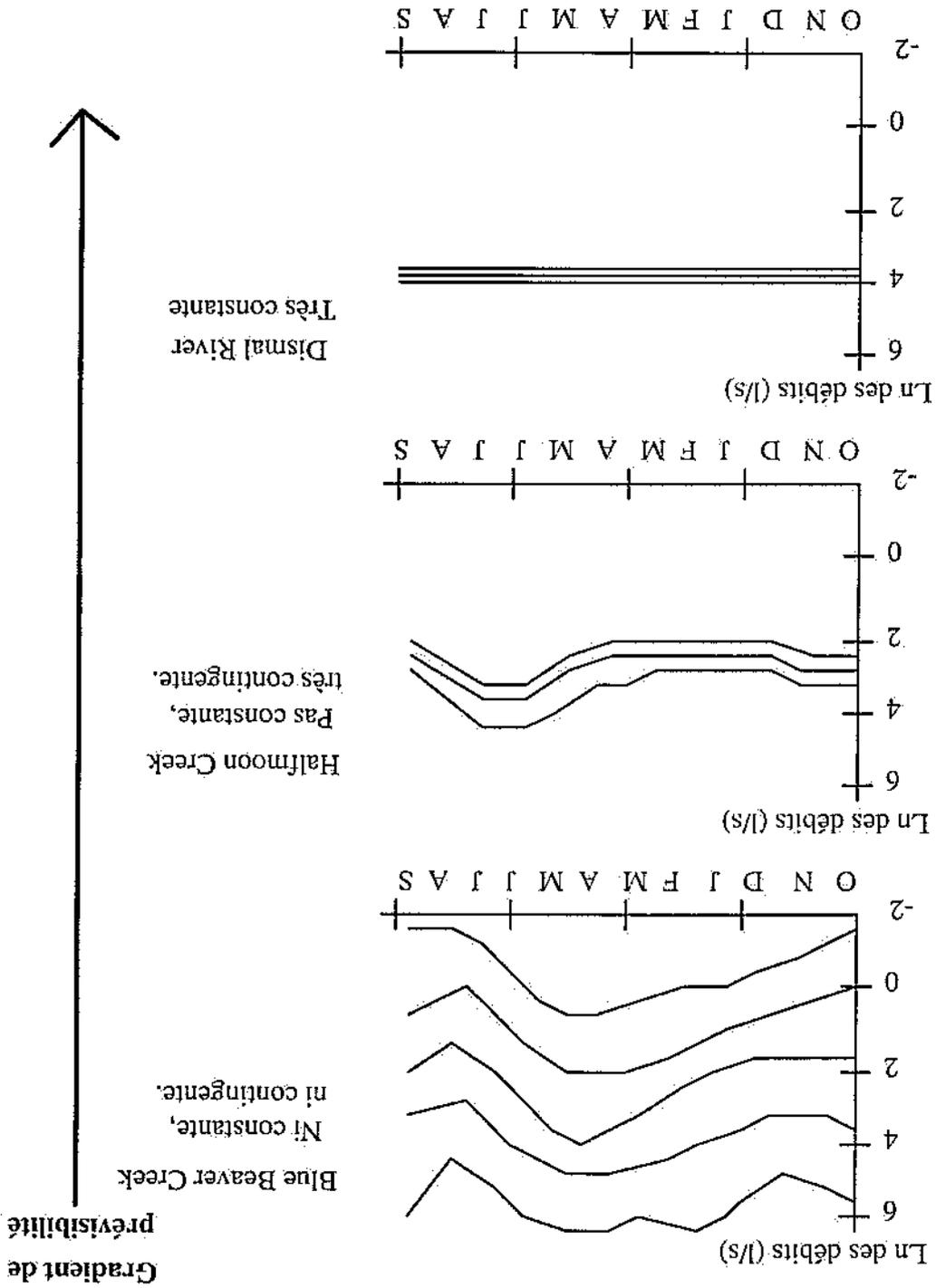
LeRoy Poff et Ward (1989) proposent un travail original avec la prévisibilité, la constance et la contingence des débits pour exprimer la VH. Ils travaillent avec des débits transformés et définissent 11 classes de débit (appelées environmental states) à partir du débit moyen annuel de divers cours d'eau. Les époques du cycle sont les 365 jours de l'année. Ils concluent que les débits des cours d'eau en régime nival sont très prévisibles alors que les cours d'eau en régime pluvio-nival présentent une moindre prévisibilité des écoulements.

Resh *et al.* (1988) définissent les états en utilisant la partie entière du logarithme des débits moyens journaliers maximaux (QJX) et minimaux (QJN) par saisons mensuelles. Ils travaillent sur 3 cours d'eau dont la surface est respectivement de 60, 64 et 2 486 km².

Le logarithme du débit maximal pour chaque mois tend à être constant au cours des 12 mois de l'année pour le grand bassin versant, ce qui n'est pas le cas des deux petits bassins versants. Les débits utilisés sont des litres par seconde. Ce ne sont donc pas des débits spécifiques.

La forte constance des débits maximaux sur le grand bassin peut s'expliquer par le choix des classes de débits. Quand les débits augmentent, la probabilité qu'un débit maximal soit dans la même classe de débits est forte car il s'agit de la partie entière du logarithme des débits. L'écart de classe s'élargit en valeur absolue avec l'accroissement des débits. Les résultats n'auraient sans doute pas été les mêmes avec les débits spécifiques.

Figure 1.2.3.2 Illustration des notions de prévisibilité, constance et contingence sur les débits maximaux mensuels de trois rivières nord-américaines (d'après Resh et al., 1988).



Ils concluent que les débits minimaux sont très prévisibles à la différence des débits maximaux, en particulier pour le bassin versant de 64 km². Pour les débits maximaux, la prévisibilité est maximale pour le grand bassin versant et faible pour les deux petits bassins versants. La corrélation des débits maximaux est forte sur les petits bassins versants et faible sur le grand bassin versant.

1.2.4 Mesure de la quantité d'information.

Cette mesure est proposée par Shannon (1948) et Shannon et Weaver (1949). Le but était d'optimiser la quantité d'information contenue dans un message.

Appliquée aux débits elle peut constituer un indice de variabilité des distributions de fréquence des débits. La quantité d'information se mesure selon la formule suivante :

$$\text{Quantité d'information} = a * \log(a) + b * \log(b) + c * \log(c) + \dots$$

Où :

a est la fréquence de la première classe de débit,
b la fréquence de la deuxième classe etc.

Aucune classe de débits ne doit être vide, sa fréquence serait nulle et le calcul du logarithme impossible.

La quantité d'information est maximale lorsque toutes les classes de débits ont la même fréquence et minimale si une seule classe de débits est constituée. Pour une distribution ne contenant qu'une classe de débits, la quantité d'information est nulle.

Malheureusement, il faut choisir l'intervalle de classe de débits et la même quantité d'information peut être trouvée pour des distributions différentes. La quantité d'information ne semble pas être utilisable pour nos recherches.

1.2.5 Descripteurs spécifiques aux étiages.

Les descripteurs des étiages sont peu nombreux. Les étiages se caractérisent par une faible VH

Pour apprécier la sévérité des étiages, les auteurs comptent les jours de non-dépassement moyen par année de divers seuils. Ces durées peuvent être continues ou non. Hugues et James (1989) considèrent ce seuil à 5% du débit moyen inter-annuel QA. Le seuil choisi dépend de QA. Le nombre de jours de débit nul est appelé degré d'intermittence par Leroy Poff et Ward (1989).

Delucchi (1988) se sert de la durée de débit nul pour distinguer divers cours d'eau d'un même réseau hydrographique dans l'état de New-York. Ces cours d'eau sont regroupés selon ces durées : à sec plus de 3 mois par an, à sec moins de 3 mois par an et permanent. La notion de durée de non-dépassement d'un seuil est retrouvée dans cet article. Cette durée sert de base pour une typologie des étiages. Ces seuils sont arbitraires, c'est un inconvénient.

Kaabi (1994) échantillonne un étiage par an pour un cours donné. Un étiage est considéré comme le débit moyen minimal sur j jours consécutifs (VCN_j, volume cumulé minimal sur j

Dans l'ensemble, ces stades sont vulnérables aux crues et aux étiages. En effet, de fortes variations de débit s'accompagnent de fortes variations de vitesse de l'eau. Comme le stade dit 0+ se déplace assez lentement, il n'est pas toujours assez rapide pour trouver une zone de calme. S'il n'en trouve pas, il est trop faible pour lutter contre le courant et est entraîné par l'écoulement.

mobile, donc moins vulnérable aux crues ou aux étiages.

- de juin ou juillet, jusqu'en septembre. Le stade 0+ s'est développé, il est plus de courant faibles, qui se trouvent à l'abri des pierres ou sur les bordures des cours d'eau.

mobiles, donc vulnérables aux variations de débits. Les alevins dits 0+ recherchent les vitesses - le stade dit 0+, qui commence en mars ou avril. Jusqu'en juin, les alevins sont peu soit suffisant.

- l'émergence, de fin novembre à mars. Elle nécessite un cumul de degré jours qui risque de dessèchement, ce qui est préjudiciable à la reproduction des espèces aquatiques.

- la ponte, d'octobre à décembre. Les débits forts déplacent le substrat, ce qui détruit

Pour la Truite Fario, l'année se divise en 4 saisons.

Pour la France et pour les 2 groupes spécifiques que sont les Salmonides (poissons d'eaux froides, température létale de 20 à 25 °C, comme la Truite, le Saumon ou l'Omble), les Cypripides (Gardon, Chevaine), le découpage de l'année en saisons civiles est approprié (hiver, printemps, été, automne). La répartition des débits ou des variations de débits extrêmes au cours de l'année permettra de définir une typologie des régimes adaptée aux EBC.

1.3.1 Notion de cycle biologique.

La saisonnalisation de la VH est destinée à savoir si elle varie au cours de l'année et à rapprocher la VH des cycles biologiques.

1.3 Intérêt de saisonnaliser la variabilité hydrologique.

La problématique de description des étiages comme facteur limitant la dynamique des EBC apparaît comme très différente de celle des crues. Elle nécessite d'autres outils que ceux évoqués pour décrire la VH. Les modèles d'étiage restent à découvrir, c'est du domaine de la recherche. Il n'est pas encore possible de les approcher avec des outils comparables à ceux qui existent pour les crues.

Le VCN j a l'avantage de ne pas imposer un seuil de débit arbitraire et de ne pas être sensible au débit minimal observé à l'étiage.

Le VCN 30 jours de période de retour 2 ans est le moins difficile à estimer a priori hors modèle et facile à interpréter d'après ses recherches.

Habituellement, la VH est calculée à partir de toutes les informations disponibles, sans distinction de saison. Cette approche globale de la VH n'indique rien de son évolution au cours des saisons (mensuelles, trimestrielles, ...) dans l'année. Pourtant, les diverses espèces passent par des stades plus ou moins sensibles aux crues ou aux étiages.

1.3.2 Saisonnalisation de la variabilité hydrologique.

En conclusion, l'époque à laquelle se produisent les crues favorise l'une ou l'autre des espèces et participe à l'équilibre des EBC.

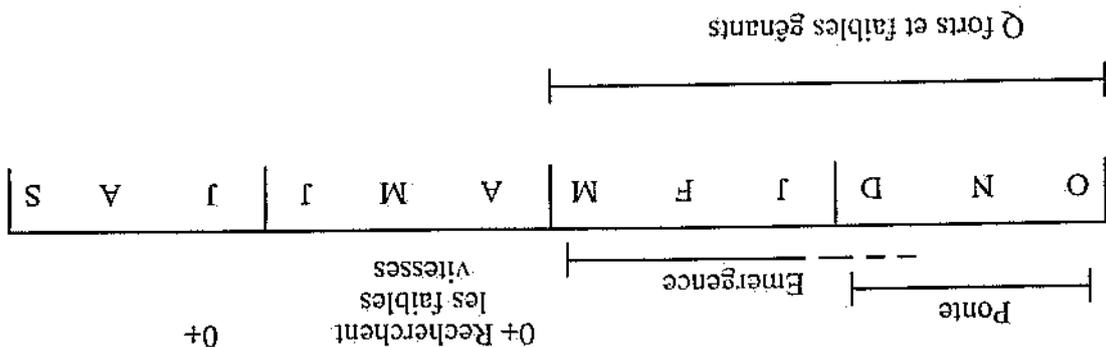
Seegrist et Gard (1972) constatent que les Truites Brunes et les Truites Arc-en-ciel sont deux espèces compétitives des cours d'eau Californiens. La Truite Brune pond à l'automne, avant la Truite Arc-en-ciel. La Truite Brune est avantagée par rapport à la Truite Arc-en-ciel en l'absence de crues hivernales car les frayères et les stades précoces sont préservés. A l'inverse, les crues hivernales favorisent la Truite Arc-en-ciel, qui pond plus tard. Si des crues hivernales se produisent, les stades précoces de la Truite Brune sont emportés par les eaux, ce qui laisse la place à la Truite Arc-en-ciel pour pondre et pour les stades précoces de cette espèce.

Le cycle biologique des espèces piscicoles justifie une approche saisonnière de la VH. De plus, toutes les espèces piscicoles ne se reproduisent pas en même temps. Par exemple, le Chevaine ou le Gardon (Cypripides) pondent en avril, mai ou juin, quand l'eau a une température supérieure à 15 °C. Les époques des stades sensibles aux crues et aux variations de débit ne sont pas les mêmes selon les espèces piscicoles.

L'année suivante, comme le poisson a grandi, il est plus mobile. Ce stade s'appelle I+ ou stade juvénile. Un poisson juvénile trouve plus facilement des zones de calme pour se reposer mais il est plus sensible qu'un adulte aux variations de débit. Ce n'est qu'à l'âge de 2 ans (stade I+) qu'un poisson devient assez résistant aux crues ou aux étiages car il est assez mobile pour se déplacer rapidement en cas de variations de débit. De plus, il dispose d'un potentiel énergétique suffisant pour résister à des crues plus longues.

A l'inverse, de trop faibles vitesses d'écoulement (donc de faibles débits) nuisent au développement du stade 0+ car la nourriture, entraînée par l'eau, fait défaut.

Figure 1.3.1 Cycle annuel de la Truite Fario en France.



O : octobre, N novembre, D décembre, J ...

Le pas de temps journalier est souvent utilisé car c'est une donnée fréquemment disponible. Il rend compte avec suffisamment de détail de la dynamique des écoulements de bassins versants d'une surface de quelques centaines de kilomètres carrés. Les bases de données hydrométriques (Programme FRIEND de l'UNESCO...) confirment la grande disponibilité de ce type d'information. C'est un argument de poids car l'un des objectifs à terme est la régionalisation de l'information échohydrologique.

Horwitz (1978), Richards (1989), Hugues et James (1989), Leroy Poff et Ward (1989), Osborne et Wiley (1992) utilisent des débits moyens journaliers dans leurs analyses.

Débits journaliers.

Les mesures à pas de temps fins sont réservées à des problèmes spécifiques et offrent une faible couverture spatiale et temporelle, ce qui en limite l'intérêt.

Hugues et James (1989) calculent l'écart-type des débits ou du logarithme des débits instantanés 15 minutes. Cairne (1992) utilise les débits moyens horaires sur les écoulements d'un petit torrent alimenté par la fonte d'un glacier.

Pas de temps inférieur à un jour.

Plus le pas de temps utilisé est fin, plus la VH apparaît importante, surtout sur de petits bassins versants. Un pas de temps adapté au phénomène dont on souhaite décrire la VH doit être défini, compte tenu de son effet structurant pour les EEC. Des débits moyens mensuels ou annuels sont surtout pluviales, durent bien moins d'un mois sur des bassins versants de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres carrés.

Le problème du choix du pas de temps des débits se pose. Divers pas de temps sont utilisés. Ils représentent la durée d'intégration des débits à partir desquels est calculé le débit moyen correspondant.

1.4.1.1 Effet d'échelle temporelle sur la variabilité hydrologique.

L'effet d'échelles se décompose en effet d'échelles temporelles et spatiales.

1.4.1 Effet d'échelle sur la variabilité hydrologique.

La régionalisation de la VH est indispensable pour estimer la VH d'un site non jaugeé à partir de sites jaugeés à proximité. C'est aussi un aspect important de la gestion échohydrologique opérationnelle, qui ne peut pas se concevoir à l'échelle locale. Ainsi, l'effet d'échelles spatio-temporelles et la normalisation de la VH sont abordés dans ce paragraphe ainsi que le regroupement des cours d'eau et la recherche de la cohérence spatiale de la VH.

1.4 Problèmes soulevés par la régionalisation de la VH.

Mimikou et Kaemaki (1985) et Copp (1991) proposent une approche mensuelle de la VH. Cette approche semble adaptée à l'évaluation des conditions hydrologiques saisonnières auxquelles sont soumis les EEC. Ils constatent que la VH évolue au cours de l'année.

Enfin, Parde (1968) a classé les régimes hydrologiques selon leurs écoulements moyens mensuels. Ces écoulements changeant fortement au cours de l'année, les contraintes hydrologiques subies par les EEC évoluent certainement.

D'après Leroy-Poff et Ward (1989), les débits moyens journaliers sont une source d'information précieuse pour l'évaluation de l'environnement lotique au cours du temps et dans bien des régions géomorphologiques et écologiques. Mais il n'en précise pas les raisons.

Débits mensuels ou annuels.

Mimikou et Kaemaki (1985), Hugues (1987), Hugues et James (1989), Copp (1991) utilisent les débits moyens mensuels. Enfin, les débits moyens annuels sont également utilisés par Hugues (1987), Hugues et James (1989).

Les auteurs ne précisent pas les raisons du choix du pas de temps utilisé pour leurs travaux, pourtant d'une grande importance pour décrire la VH.

1.4.1.2 Effet d'échelle spatiale sur la variabilité hydrologique.

L'effet d'échelle spatiale est la décroissance de la VH lorsque la surface d'un bassin versant augmente.

Les auteurs n'abordent pas l'effet d'échelle spatiale de la même façon. Ainsi Richards (1989 et 1990) tient compte de la surface du bassin versant. Horvitz (1978) tient compte de la longueur du cours d'eau principal. Ils observent un effet d'échelle spatiale sur la VH pour des cours d'eau dont la taille est appréciée par :

- soit la longueur du cours d'eau principal si celle-ci est supérieure à quelques dizaines de kilomètres.
- soit la surface du bassin versant est supérieure à quelques centaines de kilomètres carrés.

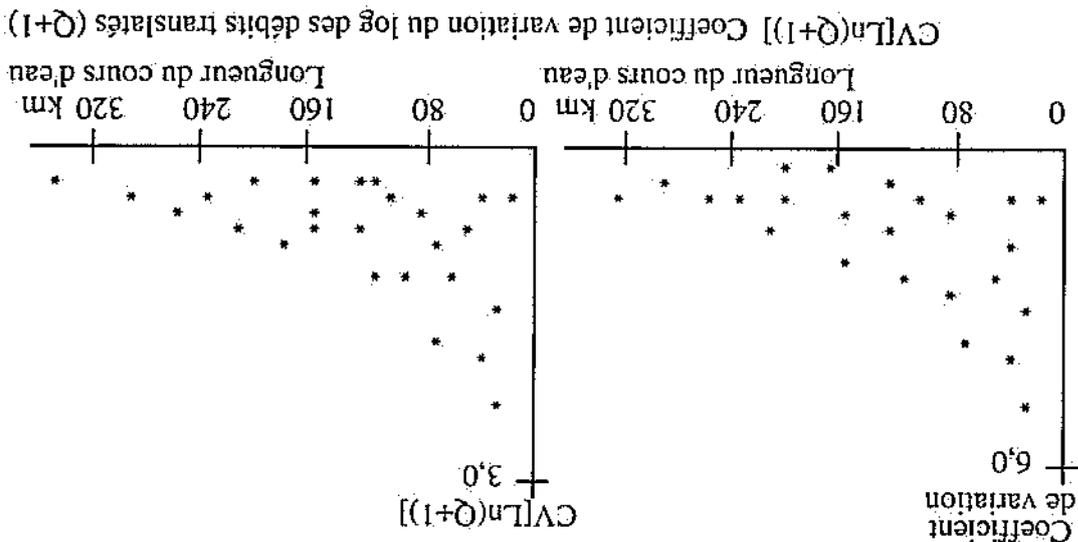


Figure 1.4.1.2.1 Effet d'échelle spatiale sur la VH selon Richards (1989 et 1990).

Bien entendu, les mesures sont liées. Plus un cours d'eau est long, plus la surface du bassin versant correspondant tend à augmenter, mais de façon très différente selon sa forme.

Les coefficients de régression entre la VH et la surface sont inférieurs à 0,3 (Horvitz 1978, Richards 1989 et 1990). En effet, la VH est très liée au cours d'eau pour des bassins versants d'une taille inférieure à 1 000 à 2 000 km². Ces indices tendent à s'homogénéiser sur de grands bassins versants.

Cette forte dispersion s'explique par les caractéristiques des bassins versants comme la géologie, leur forme, l'occupation du sol et le climat. Pour des bassins versants d'une surface de quelques centaines de km², la VH serait très liée aux caractéristiques des bassins versants. L'ordre des cours d'eau n'est pas précis.

Des essais menés par Galéa (1988) avec $a = 0.8$ ne donnent pas des résultats encourageants, la surface ne paraît pas être le facteur marquant de la typologie du régime d'écoulement. Pourtant, la puissance a , avec les débits pseudo-spécifiques sont des débits rapportés à la surface élevée à la puissance a , avec à l'inférieur à 1. La puissance reste à choisir.

1.4.2.2 Les débits pseudo-spécifiques.

La normalisation des descripteurs de la VH est réalisée lorsqu'il s'agit d'un rapport de deux débits, comme les indices de distorsion (étendue de débit divisée par la médiane), les coefficients de variation (écart-type divisé par la moyenne), les rapports de deux débits classés inter-annuels (Qx divisé par la médiane). Cependant, cette façon de procéder tient compte des débits qui sont observés, comme la moyenne ou la médiane des débits, qui dépendent eux aussi de la surface des bassins versants, voire de la saison considérée.

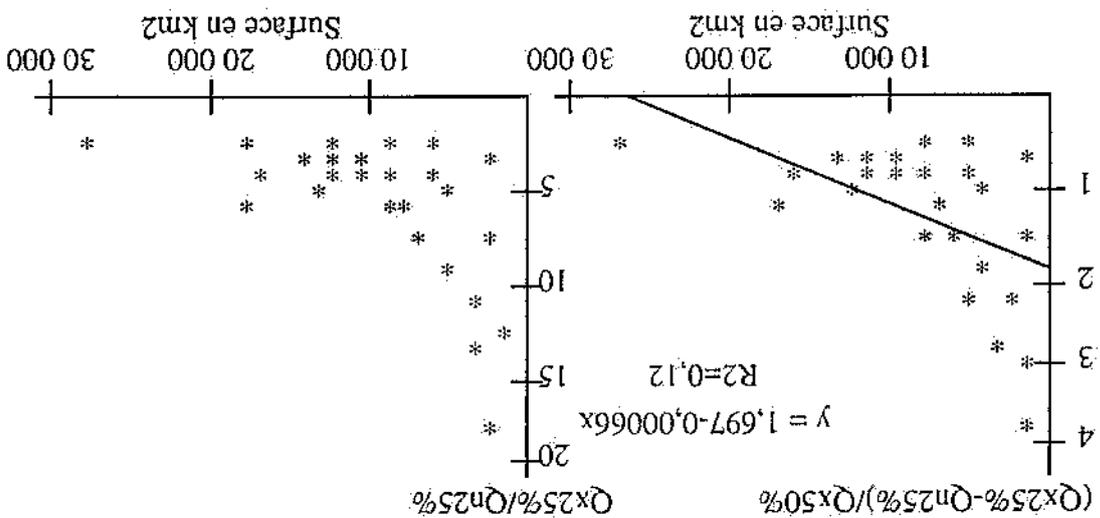
1.4.2.1 Normalisation par la moyenne ou la médiane.

Pour être comparable d'un bassin versant à un autre, la VH doit être normalisée. C'est une étape indispensable pour la régionalisation de la VH. En effet, la surface des bassins versants et donc les débits (module, médians, décennaux...) sont très variables. La VH peut être normalisée par la moyenne ou par la médiane, par la surface ou par l'utilisation de débits pseudo-spécifiques.

1.4.2 Méthodes de normalisation de la variabilité hydrologique.

L'effet d'échelle spatial sur la VH s'explique par le laminage :
 - hydrologique : plus un bassin versant est grand, plus la surface relative de la zone de production par rapport à la surface totale du bassin versant est faible.
 - hydraulique : plus un cours d'eau est long, plus l'hydrogramme de crue a tendance à s'étaler. Lors d'une crue débordante, l'eau a tendance à envahir la plaine d'inondation ou à s'infiltrer dans le sol, ce qui diminue la rapidité avec laquelle les débits augmentent puis diminuent à un point donné.

Figure 1.4.1.2.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH selon Horwitz (1978).



Les modèles liant uniquement la VH et la surface des bassins versants ne sont pas satisfaisants à cause de la diversité des caractéristiques des bassins versants.

- la surface du bassin versant,
- le débit moyen inter-annuel QA,
- la lame d'eau écoulée,
- la moyenne du logarithme des débits journaliers.

La cohérence spatiale de la VH est recherchée par Hugues (1987) et Hugues et James (1989) qui régionalisent le coefficient de variation des débits de divers cours d'eau. Poff et Ward (1989) effectuent une typologie à partir de 78 cours d'eau des États-Unis. Ils utilisent quatre variables pour constituer leurs groupes de cours d'eau qui sont :

La régionalisation des cours d'eau est souvent réalisée via une analyse en composantes principales ou via une analyse par arborescence (Hugues, 1987; Hugues et James, 1989; Leroy Poff et Ward 1989).

Tout modèle de régionalisation doit s'appuyer sur des variables facilement accessibles et de préférence déjà cartographiées. Ces variables sont synthétisées pour représenter une information spatiale, temporelle (moyenne, indice) ou ponctuelle (altitude d'une station hydrométrique). Comme pour les modèles hydrologiques de pluie-débit, l'abondance de paramètres explicatifs en limite l'application car les informations ne sont pas toujours disponibles. C'est un critère fort pour la recherche d'un modèle de régionalisation de la VH.

La régionalisation du comportement des cours d'eau se justifie car il n'existe pas de données hydrologiques sur tous les cours d'eau. Cette nécessité est liée à la disposition spatiale des stations hydrométriques et des stations d'échantillonnage hydrobiologiques. Ces informations sont rarement disponibles en un même lieu.

1.4.3 Régionalisation des écoulements et regroupement des cours d'eau.

La surface d'un bassin versant est une donnée facile d'accès, la normalisation de la VH par la surface paraît la plus intéressante.

Les débits d'un grand bassin versant présentent un très grand écart-type avec les débits absolus car ils sont importants. La situation est totalement différente pour un petit bassin versant, ce qui porte à croire et à tort, que la VH est plus forte sur les grands bassins versants. La VH est plus forte sur les petits bassins versants avec des débits spécifiques à cause de l'importance relative des débits extrêmes.

La normalisation de la VH consiste à travailler avec les débits spécifiques. Il s'agit des débits divisés par la surface topographique du bassin versant correspondant. Ces débits indiquent la contribution moyenne de chaque unité de surface à l'écoulement. Les écarts-types (des débits ou du logarithme des débits), les étendues de débits, les débits d'une fréquence donnée peuvent être comparés.

1.4.2.3 Normalisation par la surface.

A cause de ces contraintes, la normalisation de la VH avec des débits pseudo-spécifiques n'est pas intéressante.

Hyderabad (1993) sur le Rival montre une évolution de ce coefficient de l'amont vers l'aval sur une dizaine de kilomètres au sud-est de Lyon, dans le département de l'Isère. C'est un affluent du Rhône, en rive gauche.

Les modèles QdF font l'objet d'une thèse présentée par Prudhomme (1995) qui définit 3 modèles principaux (Florac, Vandenesse et Soyans), utilisés par Sourisseau (1995). Ils tentent une régionalisation de ces modèles à l'échelle du bassin versant de la Loire. Ils disposent des débits moyens journaliers de 76 bassins versants et des débits instantanés maximaux mensuels. La surface des bassins versants utilisés varie de quelques kilomètres carrés à 3 000 km².

Les modèles QdF restituent la grande diversité des régimes en crue de ce bassin versant, grâce à la connaissance du débit instantané décennal et de la durée caractéristique de la crue. Cependant, le choix d'un modèle parmi les trois à disposition selon la localisation géographique du bassin versant n'est pas encore possible, à cause du climat, du sol, de la forme du bassin versant qui influencent les écoulements et les crues.

Mimikou et Kaemaki (1985) s'intéressent aux quantités d'eau disponibles pour l'hydroélectricité. Ils retiennent les précipitations annuelles, la différence d'altitude entre les points extrêmes des bassins versants, la surface du bassin versant et la longueur des cours d'eau pour régionaliser les courbes de débits classés.

Copp (1991) utilise la latitude et l'altitude du centre du bassin versant pour régionaliser la contribution de chaque mois à l'écoulement annuel. Son modèle régional est un polynôme du second degré. Le nombre de paramètres est réduit car le contexte climatique est assez homogène.

Kaabi (1994) propose la méthode du double cumul avec des jaugages épisodiques (5 à 10 jaugages instantanés par an pendant 5 à 10 ans) pour régionaliser les étages d'une fréquence de 5 à 10 ans dans le Nord Ouest de l'Algérie.

D'après Buffin (1995), la géologie joue un rôle important sur le rapport des débits médians mensuels rapportés à la médiane inter-annuelle sur 17 bassins versants bretons, d'une surface de 7 à 820 km². Il travaille avec des chroniques journalières d'une durée de 10 à 30 ans. Il constate que l'amplitude de ce rapport est plus forte sur schiste que sur granite car les granites présentent quelques aquifères qui tamponnent les effets des précipitations sur les débits médians mensuels. La VH est plus forte sur des bassins versants dont une partie a une pente supérieure à 7%. Elle est définie avec les descripteurs proposés par Breil et Malafosse (1993 et 1994) et repris dans ces recherches au chapitre 3. Enfin, il constate que la VH est fortement corrélée avec les précipitations, en comparant les précipitations et la VH sur des périodes glissantes de 10 ans.

Buffin (1995) conseille d'affiner les indicateurs de la pluviosité pour rechercher une relation entre la pluviosité et la VH et de travailler avec des chroniques plus longues.

Malheureusement, il est bien difficile de proposer des mesures de descripteurs physiques, comme le relief, la géologie, le climat qui ont leur rôle certain sur la VH. Des variables comme l'altitude de la station hydrométrique ou les précipitations sont cartographiables avec plus ou moins de précision mais les cartes obtenues ne suffisent pas à décrire le relief ou le climat.

1.5 Conclusion de l'analyse bibliographique.

Dans l'ensemble, les auteurs s'accordent à dire que la VH limite le nombre d'espèces présentes dans un cours d'eau qui augmente de l'amont vers l'aval alors que la VH diminue, à cause du laminage hydrologique et hydraulique.

Les deux principales définitions du terme "perturbation" sont celles proposées par Le Poff et (1992) et par Resh (1988).

- pour Le Poff (1992), la perturbation est un événement brutal et destructeur des communautés aquatiques;

- pour Resh (1988), les processus écologiques sont affectés par les débits extrêmes, ce qui s'observe par une perte de biomasse. Il utilise un critère statistique pour définir la perturbation. Il choisit de la définir comme un débit qui dépasse deux fois l'écart-type autour de la médiane des débits. Un débit est perturbateur selon son contexte.

Les notions de variabilité hydrologique fréquente (VHF) et de variabilité hydrologique peu fréquente (VHpf) sont introduites et sont également proposées par Blandin et Lamotte (1985), Stanford et Ward (1983) et Resh *et al.* (1988).

- la variabilité hydrologique fréquente est subie habituellement par l'EBC. Elle structurerait les EBC à long terme. Elle n'entraîne pas de perte d'individus ou de biomasse;

- la variabilité hydrologique peu fréquente, qui sort des limites habituelles. Elle structurerait les EBC à court terme. Elle correspond aux crues étudiées par Baril *et al.* (1994) ou par Jowett et Richardson (1989). Elle s'accompagne souvent d'une baisse importante du nombre d'individus et de la biomasse.

Naturellement, une limite séparant ces VH est indispensable.

Cependant, les crues sont un facteur d'équilibre des EBC car elles nettoient le substrat. En l'absence de VH, le nombre d'espèces piscicoles diminue avec le temps à cause de la compétition et de la prédation (Huston, 1979).

La VH est quantifiée de nombreuses façons et bien des définitions sont issues des statistiques (écart-type, coefficients de variation, moment d'ordre 3 par exemple). Il existe deux grands types de descripteurs :

- les coefficients d'asymétrie, comme le coefficient de variation, le moment d'ordre 3, les étendues de débit rapportées à la médiane, le rapport de la moyenne à la médiane. Ces rapports sont souvent sans dimension, ils sont plus ou moins comparables entre bassins versants.

- les autres descripteurs, qui ont souvent les dimensions d'un débit, comme l'écart-type, les étendues de débit, les débits classés. Ils doivent être calculés avec les débits spécifiques pour être comparables entre bassins versants.

Les auteurs n'expliquent pas le choix des variables décrivant la VH pour leurs recherches. L'utilisation du logarithme des débits relativise les forts débits. Pourtant, bien que son utilisation soit assez répandue, le logarithme semble sans intérêt.

Le pas de temps des débits utilisés pour quantifier la VH doit toujours être précisé. Ce choix a une grande importance dans l'expression de la VH, surtout pour les recherches de la VH sur les EEC. En effet, plus le pas de temps utilisé est fin, plus la VH est forte. Le choix du pas de temps n'est pas toujours précisé clairement par les auteurs qui recherchent l'effet de la VH sur les EEC. Les débits journaliers sont fréquemment utilisés, et ils sont souvent disponibles.

La saisonnalisation de la VH n'est pas souvent abordée. Pourtant, la VH évolue au cours des saisons selon Copp (1991) et Mimitkou et Kaemaki (1985). L'époque à laquelle se produisent les crues participe à l'équilibre des EEC.

La régionalisation de la VH est un point important pour la connaître en tout point d'un bassin versant. Elle soulève plusieurs questions qui sont :

- la comparaison de la VH entre bassin versant. En effet, la VH est comparée entre bassins versants de taille très différente. La standardisation de la VH est indispensable. Elle se fait par la surface, par les débits pseudo-spécifiques et les rapports sans dimension. La standardisation par la surface semble la plus intéressante.

- l'effet d'échelle spatial et temporel sur la VH. La VH décroît de façon générale de l'amont vers l'aval à cause du laminage hydrologique et hydraulique.

- le regroupement des cours d'eau. Souvent, les auteurs recherchent une cohérence spatiale de la VH sur divers cours d'eau avec une classification hiérarchique. C'est le cas de Hugues (1987), Hugues et James (1989), Jowett et Duncan (1990) et Richards (1990).

Au chapitre 2, les choix effectués pour la suite des recherches. Seules les crues sont étudiées car les outils de travail sont opérationnels. Les étages demandent des outils qui ne le sont pas.

Il importe de connaître la VH selon un découpage adapté aux cycles biologiques annuels. L'effet structurant des débits étant évalué par les biologistes au travers des valeurs en

l'année.
La VH évolue considérablement au cours de l'année. Mimikou et Kaemaki (1985), Copp (1991) utilisent une approche mensuelle de la VH. Ils montrent que la VH évolue au cours de

l'approche classique de la VH sur des saisons inter-annuelles est habituellement proposée, même par des auteurs qui s'intéressent au rôle de la VH sur les EBC. Cette approche de la VH paraît trop globale, en regard des cycles biologiques des EBC.

2.1 Approche saisonnière de la variabilité hydrologique.

Le chapitre 2 est consacré au choix qui sont effectués pour la suite des recherches. Ces choix s'appuient sur les acquis bibliographiques. Les choix portent sur :

- l'approche saisonnière de la VH. Nous proposons la durée de la saison à conserver pour saisonnaliser la VH afin de tenir compte des cycles biologiques des espèces aquatiques.
- le débit de référence. Quel débit est retenu pour rendre compte des variations de débit et quel est le débit considéré comme représentatif des débits fréquents ?
- la distinction de la VHI et de la VHPI. Naturellement, une limite séparant ces VH est proposée et largement discutée.
- le pas de temps de débit. Il faut choisir des débits rendant compte des crues sur de petits bassins versants mais suffisamment disponibles pour être opérationnels.
- la standardisation de la VH, pour la rendre comparable d'un bassin versant à l'autre.

En effet, les EBC ont une certaine capacité à résister aux variations progressives de débit qui marquent l'évolution saisonnière moyenne. Les EBC sont perturbés de façon plus ou moins durable si les débits s'écartent trop de leur évolution saisonnière. Au travers cette analyse bibliographique, il apparaît nécessaire de développer la VH dédiée à l'expression de l'effet structurant des régimes hydrologiques sur les EBC. Nous partons dans ce qui suit de variables écohydrologiques.

L'approche bibliographique suggère plusieurs points importants pour l'organisation de ce travail. En effet, plusieurs auteurs (Stanford et Ward, 1983; Blandin et Lamotte, 1985; Resh et al., 1988) pensent que distinguer la VHI de la VHPI d'une variable d'état (température, débit, précipitations ...) est nécessaire. Dans notre cas, cette variable est un débit.

Chapitre 2 - Synthèse critique de l'analyse bibliographique

La dispersion des débits autour de la médiane est faible. C'est la variance à la médiane.

La médiane mensuelle est assez représentative de l'inter-quintile. En effet, 60% des débits centrés autour de la médiane sont peu dispersés par rapport à l'ensemble des débits. $Q_x X\%$ signifie "débit dépassé $X\%$ des jours", $Q_n Y\%$ est le débit qui n'est pas dépassé $Y\%$ des jours. Ainsi, $Q_x 20\%$ est le débit qui n'est pas dépassé 20% des jours alors que $Q_n 20\%$ est le débit dépassé 80% des jours.

Sur l'échantillon de 55 stations hydrométriques utilisé pour nos recherches, nous avons cherché à caractériser l'étendue du domaine inter-quintile par rapport à l'étendue totale des débits et à trouver un débit qui représente cet inter-quintile.

Par contre, la médiane des débits est peu influencée par les débits extrêmes et elle est facile à calculer.

Le débit de référence doit être facile à calculer, ce qui exclut le mode des débits sur les n jours précédents. Le mode suppose une hypothèse de largeur de classe qui peut générer des distributions multimodales, quand l'effectif de l'échantillon est modifié. Cet aléa a été écarté compte tenu du nombre de stations retenues, en lui préférant la médiane après contrôle du domaine de représentativité de cette variable. La moyenne est facile à calculer mais elle présente l'inconvénient d'être influencée par les débits extrêmes, qui ne sont pas représentatives des conditions fréquentes de débit.

2.2.1 Choix du débit de référence.

Le débit de référence évolue avec le cycle hydrologique annuel, comme proposé par Resh *et al.* (1988). Ce débit ne doit pas être transformé par des calculs complexes pour être facile à se représenter.

Stanford (1983), Blandin et Lamotte (1985), Resh *et al.* (1988) proposent de tenir compte d'un état de référence pour distinguer les débits qui sont des perturbations pour les EBC de ceux qui n'en sont pas. Cet état de référence doit être représentative des débits fréquents car les variations de débit doivent être considérées comme des écarts de débits aux débits fréquents.

2.2 Recherche d'un débit de référence pour calculer les "variations de débit".

La durée de la saison qui est choisie est le mois. En effet, une telle durée décrit assez finement l'évolution saisonnière de la VH. Ainsi, 12 valeurs de VH sont calculées pour chaque station, une par mois, durée de l'épreuve. Cependant, les mois présentant une VH similaire sont regroupés en saisons avec l'Analyse de la Variance. Ce regroupement confirme qu'il n'est pas utile de descendre à un niveau de saison plus court.

abondance, diversité et fréquence des stades d'évaluation, il convient de considérer la dynamique de recolonisation d'un secteur après une perturbation. Cette dynamique peut aller de quelques semaines à quelques années selon les espèces. Le choix du marqueur biologique est prépondérant pour la définition des saisons.

Cependant, une série de débits est indispensable pour la calculer. Il existe de nombreuses façons de calculer la médiane d'une série de débits. Resh *et al.* (1988) suggèrent que la médiane soit calculée à partir de toutes les valeurs de l'échantillon, avec un pas de temps fin. Cette référence paraît trop générale. En effet, les EFC ne perçoivent pas la médiane des débits sur plusieurs années.

La médiane des débits peut être considérée comme représentative des variations fréquentes, compris entre Qx 20% et Qn 20%. Elle est utilisée pour calculer les variations de débit.

D'une façon générale, le rapport de variance de cette gamme de débit diminue lorsque la pluie génère les écoulements. La dispersion des débits compris entre les quintiles supérieurs et inférieurs diminue du régime glaciaire au régime pluvial. En effet, les crues pluviales ne durent que 2 ou 3 jours sur des petits bassins versants alors que les crues glaciaires se prolongent plusieurs semaines.

Les débits classés entre Qx 20 et Qn 20%, soit 60% des débits centrés autour de la médiane, expliquent :

- 10% de la variance totale à la médiane en régime glaciaire,
- moins de 5% de la variance totale en régime pluvial.

Où :

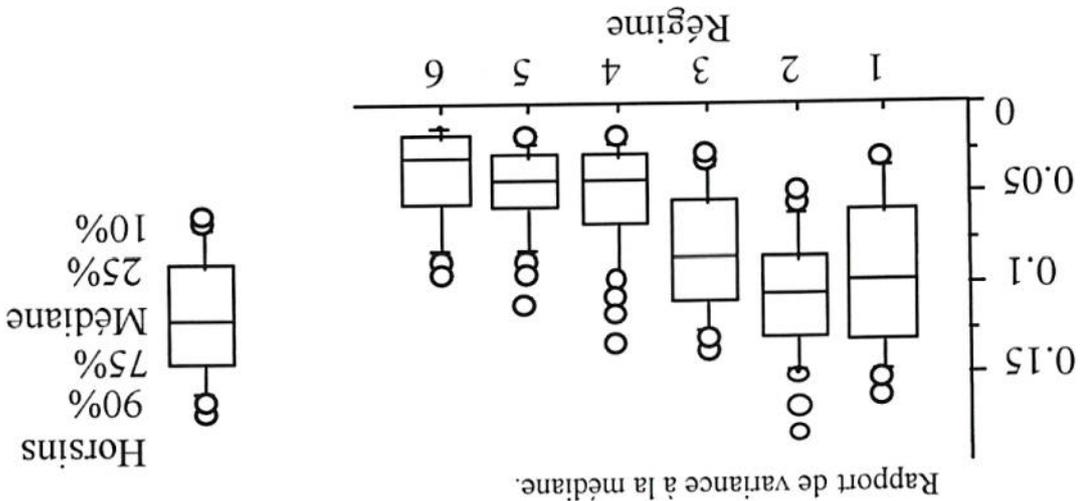
med est la médiane mensuelle des débits (Qx 50%).
 $Q_{J(i=20...80\%)}$ les débits journaliers compris entre Qx20% et Qn20%
 $Q_{J(i=20...80\%)}$ les débits journaliers observés un mois donné, en inter-annuel.

$$\text{Rapport de Variance} = \frac{\sum (Q_{J(i=20...80\%)} - \text{med})^2}{\sum (Q_{J(i=1...100\%)} - \text{med})^2}$$

La formule utilisée est la suivante :

Régime : 1, glaciaire; 2, nivo-glaciaire; 3, nival; 4, nivo-pluvial; 5, pluvio-nival; 6, pluvial.

Figure 2.2.1 Rapport de variance à la médiane pour les débits compris entre Qx 20% et Qn 20% et la variance totale par régime.



Les isoquantiles des débits journaliers apportent diverses informations :

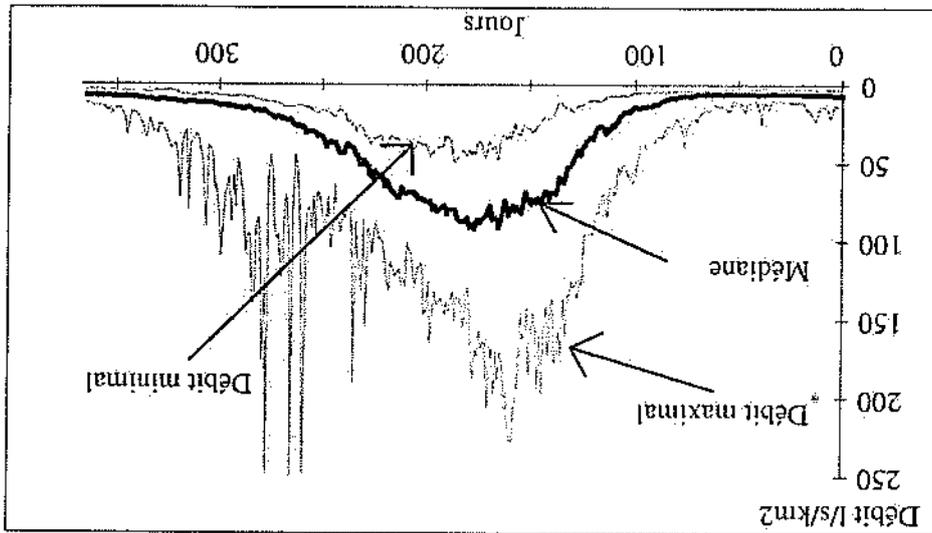
- les débits les plus forts sont éloignés des débits pouvant être considérés comme fréquents, ils correspondent aux crues. Les crues se produisent à certaines périodes de l'année et peu ou pas aux autres, ce qui est d'une grande importance pour les EEC.
- il existe une tendance saisonnière des débits fréquents, qui peuvent être représentés par la médiane des débits.
- les débits les plus faibles changent également au cours des saisons.

Les débits indiqués sont :

- le plus fort débit observé chaque jour,
- la médiane des débits de chaque jour,
- le débit minimal observé chaque jour.

La même opération est renouvelée pour les 365 jours de l'année.

Figure 2.1.2.3 Isoquantiles de débits journaliers sur un exemple.



Les isoquantiles journaliers inter-annuels de débits montrent qu'il existe une évolution saisonnière des débits. L'exemple traité est tiré d'une chronique de débits journaliers d'une durée de 48 ans. Nous avons donc 48 débits journaliers par date, pour le premier janvier, le deux janvier, jusqu'au 31 décembre. Ces 48 débits par date peuvent être classés par ordre décroissant et placés sur un graphique, d'où la notion d'isoquantiles journaliers.

2.2.2 Evolution du débit de référence sur une année donnée.

En conséquence, le débit de référence est la médiane glissante sur 30 jours consécutifs, pour tenir compte d'une certaine mémoire biologique à court terme. Cette durée correspond également au cycle d'une partie du benthos.

Cependant, la médiane mensuelle inter-annuelle est utilisée pour définir un nouvel indice de VH, censé représenter l'évolution des débits fréquents (assimilés à la médiane) au cours des 12 mois de l'année.

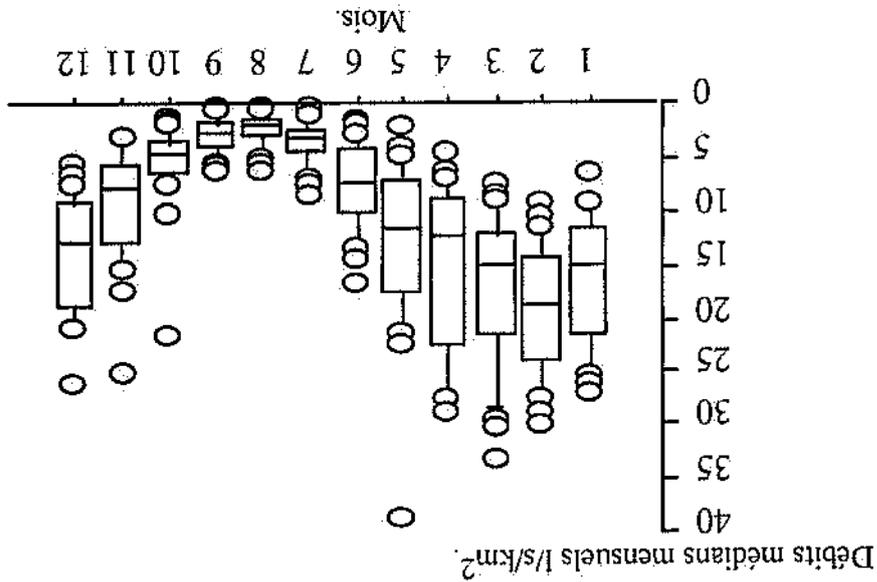
La distinction de la VHF et de la VHPT impose de choisir des limites séparant ces VH. Ces limites sont choisies en fonction de la durée de vie des espèces piscicoles (5 à 6 ans pour la plupart d'entre elles) car elles sont bien connues et de divers critères, comme la période de retour des débits de pleins bords. Les débits sont reliés aux fréquences grâce à la loi exponentielle. En effet, il a paru plus logique de fixer les limites entre les VH en fonction de la durée de vie des espèces aquatiques qu'arbitrairement, comme le fait Resh *et al.* (1988).

2.3 Distinction entre variabilité hydrologique fréquente et peu fréquente avec la loi exponentielle.

Les débits médians, pris comme isoquantiles journaliers ou comme débits médians inter-annuels changent au cours de l'année. C'est un premier niveau de la VH saisonnière. Ce premier niveau est réduit avec les nouvelles variables.

C'est également le cas des débits moyens mensuels, comme le signale Parde (1968). En régime pluvial, c'est en février que les débits médians sont les plus forts et en août qu'ils sont les plus faibles. Cette tendance saisonnière des conditions fréquentes des écoulements est également importante pour les EFC car elle les structure à long terme.

Figure 2.1.2.4 Débits médians mensuels sur 30 stations hydrométriques en écoulement naturel en régime pluvial



Les débits médians évoluent également au cours de l'année. Cela est le cas d'un échantillon de stations hydrométriques en régime pluvial, pris sur le bassin versant de la Loire.

2.2.3 Evolution saisonnière du débit de référence sur plusieurs stations.

Les débits médians journaliers changent au cours des saisons.

Ainsi, les débits ayant une période de retour inférieure à un an sont des débits fréquents et ceux ayant une période de retour supérieure sont peu fréquents.

Pour les petits bassins versants, la période de retour du débit de pleins bords serait largement dépendante des caractéristiques climatiques locales (Boulon, 1995). Sur 9 bassins versants d'une surface inférieure à 100 km^2 choisis sur le bassin versant de la Loire, les débits de plein bord ont une période de retour variant entre 0,14 et 20 ans. Cependant, pour 6 bassins versants, cette période de retour est comprise entre 0,14 et 1,7 ans. Il existe de nombreuses définitions du débit de plein bord (Boulon, 1995).

Pour leurs recherches, Malavoi et Souchon (1992) utilisent une base physique pour séparer les débits non perturbateurs des débits perturbateurs. Ces auteurs constatent que les débits de période de retour 1,5 à 2 ans sont morphogènes. Cette limite pourrait être utilisée pour distinguer la VHF de la VHPF des débits puisqu'elle vient modifier les conditions de l'habitat aquatique. Cependant, il s'agit de débits absolus et non de variations de débit relatives à un contexte.

Lors des crues débordantes, les poissons trouvent refuge dans les zones inondées, en dehors du lit mineur, ce qui diminue l'influence des crues juste débordantes sur les espèces de poissons. Ils peuvent également trouver refuge dans les affluents (Osborne et Wiley, 1992; Baril *et al.*, 1995). Les crues les plus fortes, bien que très débordantes, ont un effet très défavorable sur les EFC car le courant est souvent important et le substrat est remanié.

Une telle récurrence est citée par Petit et Daxhelet (1989) sur 34 cours d'eau Belges, dont la surface du bassin versant va de 4 à $1\ 600 \text{ km}^2$.

Petit *et al.* (1994) sur des rivières Belges.

- 1 à 3 ans pour des rivières dont le bassin versant a une taille de 100 à $5\ 000 \text{ km}^2$ par 50 km^2 .
- 0,5 an pour des rivières de dimension modeste (surface du bassin versant inférieure à 50 km^2).

La récurrence des débits de pleins bords a été estimée à :

Cependant, la crue de plein bord a souvent une période de retour voisine de un à 5 ans. Elle correspond bien souvent à la crue, qui est *a priori*, la crue la plus contraignante pour les EFC. En effet, les contraintes énergétiques imposées aux espèces piscicoles sont maximales. Les poissons ne trouvent que peu d'abri vis à vis de la force du courant.

La période de retour un an est-elle une limite entre le domaine fréquent et peu fréquent? Cela dépend des organismes vivants. Après une crue, les populations se reconstituent en :

- 3 à 4 semaines pour les algues,
- quelques mois pour les invertébrés,
- 3 à 4 ans pour les espèces piscicoles.

La distinction entre VHF et la VHPF implique une limite de séparation entre les deux VH à distinguer. La difficulté est justement de choisir cette limite.

2.3.1 Justification et choix de la limite entre variabilité hydrologique fréquente et peu fréquente.

Le critère de fréquence d'une fois par an semble une règle plus judicieuse que le débit de plein bord car structurant des EEC sur le long terme.

Cependant, la limite entre les écarts de débits qui ne perturbent pas les EEC et ceux qui les perturbent est floue.

2.3.2 Limite supérieure des débits ou des variations de débit pris en compte pour nos recherches.

La figure 2.3.2 représente un exemple d'application de la loi exponentielle avec des débits journaliers sur la Roizonne. Ce cours d'eau a un bassin versant de 72 km² et a un régime nival. A chaque débit échantillonné est attribuée une période de retour.

Des ajustements avec la méthode du maximum de vraisemblance permettent de calculer la crue annuelle et le gradex des débits (gradex 1). Pour les crues d'une période de retour supérieure à 10 ans dans cet exemple, les débits croissent rapidement avec la période de retour (gradex 2). Le gradex 2 est supérieur à gradex 1. Ce changement de comportement se produit pour des périodes de retour comprises entre 10 et 50 ans.

Pour ces périodes de retour, tout accroissement de précipitation provoque un écoulement car le bassin versant est saturé. Le gradex des débits tend vers le gradex des pluies (Margoum, 1992 et 1994). D'après Kayantard (1995), les crues rares et extrêmes ont bien souvent un comportement particulier. Les tests de cet auteur ont porté sur des cours d'eau alpins et méditerranéens, en reprenant des développements du modèle AGRGEB. Ces crues ont bien souvent un effet morphogène important et durable.

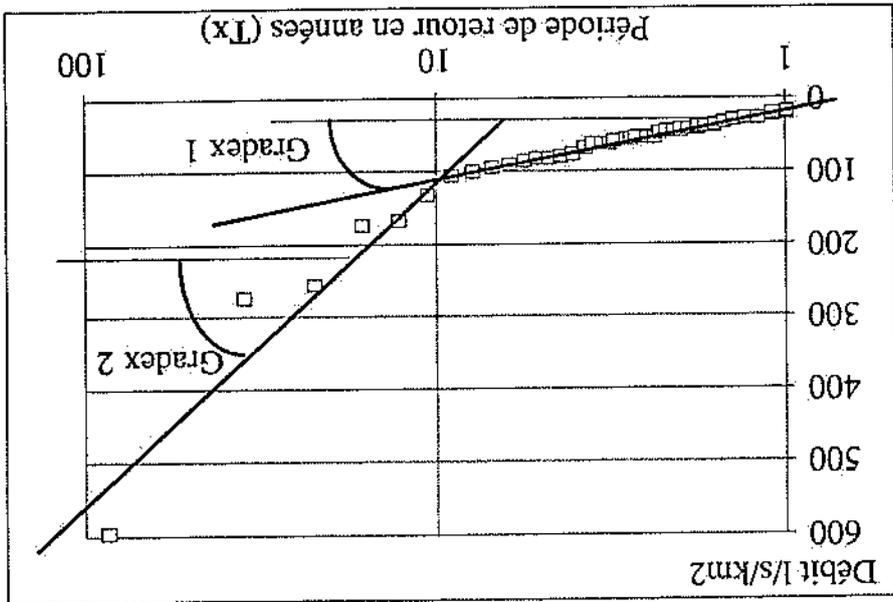


Figure 2.3.2 La Roizonne à la ROCHEFFE, 72 km², régime nival, mois d'août.

L'hypothèse dite du "gradex" a été développée par EDF pour le dimensionnement des grands barrages. Margoum (1992 et 1994) a tenté d'améliorer la continuité du passage entre les deux gradex suscités. Ce changement de gradex avec la période de retour justifie que les

ajustements effectués sont réalisés de préférence avec les crues d'une période de retour allant de 1 à 10 ans.

A l'expérience, la représentativité statistique d'une chronique de débit de quelques années permet d'extrapoler les débits au double de sa longueur. Une chronique de durée 5 ans permet de calculer la crue décennale sans trop d'erreur. Cela est d'autant plus réaliste que l'extrapolation intéresse des crues pas trop rares, telles que la décennale.

La crue décennale est retenue comme valeur pivot en regard de la longévité des espèces piscicoles des rivières qui servent de bio-marqueurs de l'état des BBC. En règle générale, la maturité de ces espèces est atteinte au bout de 3 à 4 ans. Les espèces piscicoles sont donc à même de se régénérer totalement durant un cycle décennal. De plus, la crue décennale est généralement bien connue car elle est observable et observée une ou plusieurs fois sur bien des chroniques de débit.

Ainsi, nous tenons essentiellement compte des débits ou des variations de débits ayant une période de retour inférieure à 10 ans pour la suite de nos recherches.

Les crues rares ($T > 10$ ans) ont un rôle morphogène essentiel et structurant le lit des cours d'eau et les formations végétales riveraines. Dans le futur, il faudra aussi s'intéresser aux crues rares. Il apparaît qu'elles ne contribuent pas directement à l'accommodation des BBC et ne sont pas structurantes à ce titre.

2.4 Le pas de temps des débits.

La VH est définie avec des pas de temps allant des débits instantanés au pas de temps annuel voire inter-annuel. Les auteurs ne justifient pas toujours leur choix, même pour des recherches hydrobiologiques. Leroy Poff et Ward (1989) considèrent que les débits journaliers sont une source d'informations précieuses pour les recherches hydrobiologiques, sans en préciser les raisons. Par contre, du point de vue hydrologique, le pas de temps journalier rend bien compte de la dynamique d'écoulement des crues pour des bassins versants supérieurs à une centaine de km^2 .

Pour les étiages, la régularité des débits autorise un pas d'intégration supérieur, la durée constituant *a priori* le facteur limitant. Cependant, le pas de temps journalier décele les crues d'orage estivales, suspectées d'être très perturbatrices pour le milieu aquatique.

Les données utilisées pour nos recherches sont donc des débits journaliers qui représentent une donnée hydrologique largement répandue.

2.5 Standardisation de la VH.

La standardisation de la VH se pose car ce travail a pour objectif de comparer la VH entre divers bassins versants et de proposer les éléments de régionalisation de variables écohydrologiques.

La standardisation de la VH par les débits pseudo-spécifiques ou des rapports sans dimension n'est pas très intéressante car il faut choisir le coefficient pour les calculer. Les rapports sans dimension sont standardisés par rapport à la moyenne ou à la médiane, qui changent au cours de l'année, lors d'une approche mensuelle de la VH. De plus, elles dépendent du cours d'eau.

La surface des bassins versants est classiquement représentative de l'aire de production. Elle exprime les variables descriptives par unité de surface. Pour l'étude des crues, son emploi est d'autant moins justifié que la surface du bassin versant est importante (faible zone de participation).

Ainsi, la VH est standardisée par la surface. Les débits et variations de débit sont exprimés en débits spécifiques ($l/s/km^2$).

2.6 Plan de travail.

Une approche statistique de la VH est proposée avec un échantillon de 55 stations hydrométriques, du régime glaciaire au régime pluvial. La loi exponentielle est appliquée aux débits et aux variations de débit. L'analyse des crues et des variations de débit maximales est limitée aux caractéristiques de durée d'un jour, qui exprime pour le pas de temps retenu les conditions maximales observées. L'intérêt d'étudier les durées caractéristiques supérieures à semble limité dans un premier temps car ces caractéristiques sont systématiquement inférieures en valeur. Une deuxième raison est que la durée amène une dimension supplémentaire au problème de la typologie qui n'est pas comparable avec les descripteurs classiques.

La loi exponentielle distingue et quantifie :

- la variabilité hydrologique fréquente, qui structure les EEC. La variation de débit de période de retour moyenne de un an servira de limite pour une première distinction de la VHF et de la VHP. Cette limite tient compte de la durée de vie de la plupart des espèces servant de marqueurs biologiques de l'état des EEC.

- la variabilité hydrologique peu fréquente, à laquelle les EEC ne sont pas habitués car elle correspond à des événements peu fréquents. Cette VH est susceptible d'écarter les EEC de leur "état moyen".

L'échantillon de stations hydrométrique servira à tester la sensibilité des nouveaux descripteurs de la VH et à proposer une typologie de la VH par régimes. En effet, la VH est calculée par saisons mensuelles puis les mois ayant la même VH moyenne sont regroupés pour former des saisons de plusieurs mois. Ces saisons sont probablement différentes selon les régimes et les descripteurs proposés.

Les descripteurs traditionnels de la VH sont également utilisés sur l'échantillon de stations hydrométriques pour comparer la capacité des différents descripteurs à distinguer les saisons de la VH au cours du cycle hydrologique. De plus, les divers descripteurs de la VH ne définissent pas les mêmes saisons. L'intérêt biologique de ces descripteurs n'est pas forcément le même pour chacun d'entre eux.

- Le chapitre 2 est consacré aux choix effectués pour définir la VH et aux outils utilisés pour la suite des recherches. Les choix sont :
- la définition de la durée de l'épreuve pour tenir compte des divers stades biologiques des espèces aquatiques. L'épreuve a une durée d'un mois, la VH est donc calculée pour les 12 mois de l'année.
 - la perturbation hydrologique est définie comme étant un écart de débit par rapport à une référence, comme le suggère Resh *et al.* (1988). L'écart de débit est également appelé variation de débit. Le débit de référence est choisi comme la médiane des débits car elle est représentative des débits fréquents et elle est facile à calculer et à comprendre. Elle évolue au cours de l'année, la notion de variation de débit permettra de s'affranchir de ce premier niveau de VH. La médiane des débits est calculée sur un échantillon de débit, qui est à choisir.
 - la distinction de la VHF et de la VHP est effectuée avec de la loi exponentielle. Elle est appliquée aux variations de débit. De plus, la loi exponentielle apporte une notion de période de retour des variations de débit, qui est choisie comme compatible avec la durée de vie des espèces piscicoles.
 - les débits ou variations de débit étudiés ont une période de retour comprise entre 1 et 10 ans, pour travailler avec des débits bien connus au point de vue statistique et pour lesquels la loi exponentielle est applicable.
 - la limite séparant la VHF de la VHP est fixée à un an, compte tenu de la durée de vie des espèces piscicoles et de la fréquence des débits de pleins bords. Ainsi, les débits ou les variations de débit d'une période de retour inférieure à un an sont considérés comme fréquents alors que ceux ayant une période de retour supérieure sont considérés comme peu fréquents.
 - les débits sont au pas de temps journalier, ils sont souvent disponibles et bien représentatifs des écoulements des bassins versants de quelques centaines de km².
 - la VH est standardisée par la surface pour la rendre comparable d'un bassin versant à l'autre. La standardisation de la VH est une étape indispensable avant sa régionalisation.

2.7 Conclusion du chapitre 2.

Conclusion de la partie I.

La première partie a posé les bases de la suite des recherches. Elle est divisée en deux grands chapitres qui sont :

- l'analyse bibliographique où plusieurs concepts sont mis en évidence. Les crues et les étiages sont des perturbations pour les EBC mais qu'ils participent à leur équilibre. Pour le moment, seules les crues sont étudiées car les étiages demandent des outils qui ne sont pas opérationnels.

Stanford (1983), Blandin et Lamotte (1985), Resh *et al.* (1988) suggèrent que la VH se décompose en VHF et VHP. Les EBC sont capables de supporter certaines "variations de débit" sans dommage, c'est la VHF. Pour des "variations de débit" plus importantes, l'EBC est perturbé, c'est la VHP. Resh *et al.* (1988) suggèrent de tenir compte du contexte pour définir le terme de perturbation. Pour ces auteurs, c'est un écart de débit (ou "variations de débit") à une référence représentative des débits fréquents qui définit le terme de perturbation.

Par contre, l'analyse bibliographique ne permet pas d'identifier les débits ou les durées de dépassement de débit pouvant perturber les EBC. Ces débits ou ces seuils évoluent en fonction des espèces aquatiques et des saisons, en fonction de leurs stades de développement. En effet, un débit peut être une perturbation ou non selon la durée pendant laquelle il est atteint ou non, selon la capacité des individus à résister à des débits contraignants. Les jeunes individus, *a fortiori* les oeufs, résistent mal aux forts débits et sont peu ou pas mobiles. Mais la bibliographie ne fournit aucune précision quant à la fréquence des débits pouvant perturber sensiblement les EBC. C'est l'une des difficultés de ces recherches.

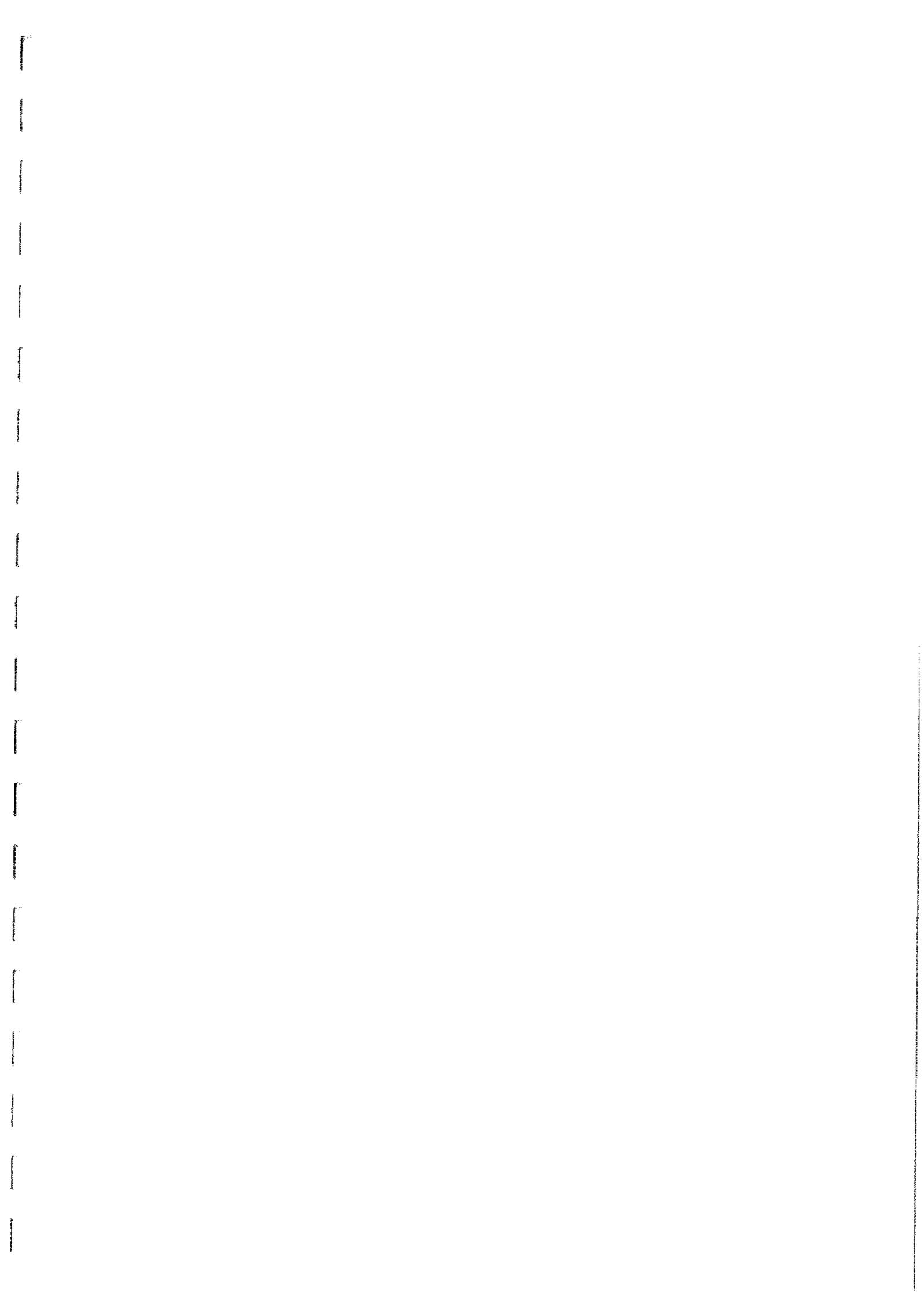
La VH se calcule de nombreuses façons. Les auteurs qui recherchent un lien entre VH et EBC ne justifient pas le choix des descripteurs qu'ils utilisent.

Enfin, la régionalisation de la VH est indispensable car tous les sites ne sont pas connus et il faut pouvoir étudier des sites inconnus à partir de sites connus. Pour cela, il faut normaliser la VH pour la rendre comparable d'un bassin à un autre.

- la synthèse critique de l'analyse bibliographique avec les choix qui sont effectués, notamment en ce qui concerne les outils utilisés et les moyens mis en oeuvre pour distinguer et calculer la VHF et la VHP. La VHF et la VHP sont définies, avec la loi exponentielle, appliquée aux variations de débit. La limite séparant ces VH est égale à un an, ce que la loi exponentielle peut quantifier.

Après avoir posé les bases bibliographiques dans la première partie, nous passons à la deuxième partie où qui comporte divers chapitres. Ces chapitres présentent les données utilisées pour valider les nouvelles variables de la VH, leur sensibilité à divers critères. Les nouvelles variables sont comparées aux descripteurs classiques de la VH avant de tester leur sensibilité à la saison.

Le troisième chapitre est consacré aux matériels et aux méthodes utilisés dans ces recherches puis à la définition des nouvelles variables.



PARTIE II
Descripteurs de la
Variabilité
"Ecohydrologique" (VH)

Introduction de la partie II.

Cette partie est consacrée aux traitements qui valident les nouvelles variables. Elle comporte plusieurs chapitres qui sont :

- la présentation de l'échantillon de stations hydrométriques et la formalisation mathématique des variables écohdrologiques (chapitre 3).

Comme nous ne disposons pas de données biologiques, nous testerons l'effet du régime sur la VH car les EEC ne sont pas les mêmes selon les cours d'eau. L'échantillon de stations hydrométriques est présenté ainsi que leur répartition par régime d'écoulement et que le choix de la classification qui est fait. Les données sont critiquées et leur stationnarité est vérifiée pour s'assurer de leur qualité.

Ensuite, la formalisation mathématique de la VH est abordée dans un deuxième paragraphe. La formalisation mathématique de la VH s'appuie sur les concepts et les acquis de l'analyse bibliographique qui sont présentés au chapitre précédent. La VHF et la VHPF seront distinguées à l'aide de la loi exponentielle appliquée à des variations de débit. La limite séparant ces VH est fixée à un an alors que les variations de débit d'une période de retour supérieure à 10 ans ne seront pas étudiées. Un indice pouvant être un indice de capacité d'accueil "long terme" d'un cours d'eau est présenté. Enfin, pour tenir compte des cycles biologiques, la VH est saisonnalisée, avec un saison d'une durée d'un mois.

Après présentation des données et la formulation mathématique des nouvelles variables, cette partie comporte divers chapitres qui sont :

- la détermination des caractéristiques de calcul de la VHF et de la VHPF, pour savoir si les nouvelles variables sont sensibles à la méthode d'échantillonnage et à la mémoire prise en compte pour le calcul des écarts de débit. Elles sont également comparées aux débits pour s'assurer de leur indépendance (chapitre 4).

- la comparaison entre VHF, VHPF et les descripteurs statistiques de la VH, pour vérifier l'indépendance des nouvelles variables avec les descripteurs classiques de la VH (chapitre 5). Quelques descripteurs classiques de la VH se rapprochent de la VHF.

- le regroupement par analyse de variance des descripteurs de la VH, VHF et VHPF (chapitre 6). Les mois présentant la même VH sont regroupés par régime pour tester la sensibilité des descripteurs de la VH aux distributions de fréquence des débits grâce aux :

- nombre de niveaux de saisons décelés par descripteur et par régime,
- rapport entre les saisons de VH les plus fortes et les plus faibles,
- les saisons présentant la VH la plus forte et la plus faible au cours de l'année.

- la sélection des descripteurs d'intérêt par analyse en composantes principales (chapitre 7). Les descripteurs retenus pour décrire la VHF et la VHPF sont choisis selon les critères suivants :

- la sensibilité aux distributions de fréquence des débits, donc l'aptitude à distinguer les hautes et les basses eaux,
 - leur signification, liée au mode d'échantillonnage,
 - leur capacité à être associées à une fréquence exprimée en années, pour se caler sur les cycles biologiques des poissons dans un premier temps,
 - leur capacité à distinguer la VHF et la VHfL
 - leur capacité à optimiser la variance de la VH de l'échantillon de stations prises comme référence. Cette capacité est appréciée avec les principaux axes de l'ACPn.

En troisième partie, la cohérence spatiale de la VH est recherchée sur le bassin versant de la Loire.

- la formulation mathématique de la VH est présentée. Deux groupes de descripteurs sont proposés :

- les ΔQ , qui sont des variations de débit, intégrant une mémoire "court terme", Ils permettent de quantifier la VHT et la VHPF, conformément aux concepts bibliographiques.
- l'indice mensuel de distorsion, qui pourrait être un indice de capacité d'accueil "long terme" d'un cours d'eau".

- l'Analyse en Composantes Principales normée. Elle précise les grands groupes de descripteurs, ce qui limite le choix des descripteurs retenus pour décrire la VH.

- l'Analyse de la variance qui permet de regrouper les saisons mensuelles présentant une VH comparable. Cette étape permet de connaître le nombre de VH pour chaque régime et de tester la sensibilité des descripteurs aux distributions de fréquence des débits.

- la méthode d'analyse est enfin présentée.

- les outils, données et méthode d'analyse sont abordés ensuite. Un échantillon de stations hydrométriques est constitué, les données sont critiquées et la stationnarité des chroniques est recherchée. Cet échantillon de stations servira pour toutes les recherches entreprises dans ce travail. La méthode d'analyse est présentée. Elle est utilisée pour choisir les descripteurs retenus pour décrire la VH avec, notamment :

- la critique des données hydrométriques pour en juger la qualité. La qualité des données a été un critère de choix des 55 stations hydrométriques.
- la stationnarité des chroniques pour savoir si la VH a évolué sur la durée des chroniques.

- la constitution d'un échantillon de 55 stations hydrométriques en régime contrasté et en écoulements naturels pour tester les nouvelles variables et les comparer aux variables existantes. Ces stations sont choisies comme appartenant aux régimes d'écoulements rencontrés en France, du glaciaire au pluvial, pour établir une typologie de la VH. En effet, et en l'absence de données biologiques facilement accessibles, une approche typologique de la VH s'avère indispensable.

- la présentation de l'échantillon des stations hydrométriques dites de référence, où sont présentés :

Ce chapitre se découpe en deux paragraphes principaux :

Chapitre 3 - Outils, méthode d'analyse et définition des variabilités hydrologiques fréquentes (VHT) et peu fréquentes (VHPF)

3.1 Outils, données et méthode d'analyse de la variabilité hydrologique.

Le principe retenu pour évaluer la pertinence des indices de VH est le suivant : en l'absence de données biologiques facilement accessibles dans le cadre de ce travail et compte tenu de la VH spatiale présumée du phénomène étudié, une approche typologique s'avère nécessaire. Pour ce faire, un échantillon de stations hydrologiques a été constitué sur les critères suivants :

- représenter la plus grande diversité possible de régimes d'écoulements,
- être peu ou pas influencée par des ouvrages hydrauliques pour se placer en situation d'écoulement naturel,
- présenter une chronique de débit journalier d'au moins 10 ans,
- représenter des surfaces de bassin versant peu importantes pour limiter l'effet d'échelle spatial et préserver la notion de régime homogène. Les régimes complexes peuvent être difficiles à comprendre.

Ces stations hydrologiques sont situées dans le quart sud-est de la France, essentiellement dans l'arc alpin, mais aussi dans les régions méditerranéennes. Le quart sud-est de la France a été choisi car tous les régimes hydrologiques sont représentés, du glaciaire au pluvial. Pour avoir une description de la VH naturelle des écoulements, les stations test ont été choisies comme peu ou pas influencées par les activités humaines. Dans l'arc alpin, il existe de nombreux aménagements hydroélectriques d'après Edouard et Vivian (1984).

3.1.1 Caractéristiques et répartition des stations hydrologiques par régime mensuel.

Les descripteurs de la VH étant testés sur des stations hydrologiques appartenant à des régimes contrastés, une classification des régimes doit être choisie.

3.1.1.1 Choix de la classification des cours d'eau.

Les régimes considérés sont ceux définis par Parde (1968). Cette classification a le mérite d'être simple et opérationnelle. Il distingue 3 grands types de régimes, d'après les caractéristiques débitométriques :

- les régimes simples : un seul mode d'alimentation (pluie, fonte des neiges ou fonte de la glace), alimente les écoulements, d'où le nom de régime pluvial, nival et glaciaire. Les régimes simples se caractérisent par un débit mensuel maximum et un débit mensuel minimum à deux époques de l'année.

- les régimes mixtes : plusieurs modes d'alimentation, (glace et neige, neige et pluie), d'où le nom de régime nivo-glaciaire ou glacio-nival et de nivo-pluvial ou de pluvio-nival selon l'importance respective de la glace et de la neige ou de la pluie et de la neige. Les régimes mixtes entraînent deux maxima plus ou moins net et un minimum par an.

- les régimes complexes. C'est une superposition de régimes simples qui se rencontre sur les grands fleuves soumis aux apports de nombreux affluents de régions climatiques contrastées. C'est le cas d'un grand fleuve comme le Rhône qui est alimenté par les pluies, la fonte nivale puis la fonte glaciaire selon les époques de l'année.

Jowett et Duncan (1990) classent 130 cours d'eau néo-zélandais en six groupes, basés sur des indices de la VH. Ils travaillent avec des débits journaliers. Ces indices sont le coefficient de variation, le débit moyen rapporté au débit médian, le débit moyen maximal échantillonné chaque année ou le débit moyen minimal rapporté au débit médian. Les cours d'eau sont regroupés grâce à une analyse discriminatoire qui fait ressortir une différence significative des indices entre groupes de cours d'eau.

Ainsi, Haines *et al.* (1988) établissent une classification des débits saisonniers basée sur l'analyse des débits moyens mensuels exprimés en % du débit moyen annuel. Cette méthode se rapproche de celle proposée par Parde (1968) et d'Edouard et Vivian (1984). De plus, les régimes de transition sont difficiles à classer.

Hugues, (1987); Hugues et Barry, (1989) font appel à des variables calculées à partir des débits moyens annuels et mensuels. Ils considèrent que les moyennes mensuelles sont de bonnes mesures de la saisonnalité.

Bois (1980) propose une classification des régimes hydrologiques voisins de celle de Parde. Elle est également basée sur les débits moyens mensuels. Il distingue les régimes glaciaire, nivo-glaciaire, nival, pluvio-nival, nivo-pluvial et pluvial selon l'époque à laquelle se produisent les hautes et basses eaux.

Quelques exemples de classification des régimes.

Remarque : Il existe d'autres classifications des cours d'eau mais elles sont plus ou moins opérationnelles. Cette classification est simple à utiliser, sauf pour les régimes complexes qui peuvent présenter plusieurs maxima annuels. Ces maxima ne se distinguent pas toujours nettement les uns des autres.

Tableau 3.1.1.1 Classification des régimes hydrologiques (Edouard et Vivian 1984).

Régimes	Mois du maximum	Mois du minimum	Observations
Glaciaire	Juillet / août	Janvier / février	+ de 20% de la surface du BV englacée
Nivo-glaciaire	Juin	Janvier / février	10% de la surface du BV englacée
Nival	Mai / juin	Décembre à mars	5 à 10% du BV englacée
Nivo-pluvial	Avril / mai	Juillet / août	Fonte de la neige plus précoce qu'en nival
Pluvio-nival	Mars / avril	Juillet / août	Faible influence de la neige
Pluvial	Février	Juillet / Août	Influence de la neige négligeable

Dans une étude sur la nouvelle hydrologie alpine, Edouard et Vivian (1984) ont clairement défini, pour chaque type de régime, les caractéristiques débitométriques du maximum et du minimum moyen mensuel. Les stations hydrométriques ont été classées selon les moyennes mensuelles inter-annuelles qui sont calculées à partir des chroniques de débits journaliers. Cette information est facile d'accès.

Principe de la classification des stations hydrométriques par régime.

Seuls de petits bassins versants sont utilisés, il n'y a pas de régimes complexes dans l'échantillon de stations hydrométriques.

Les analyses multivariées constituent une méthode plus ou moins objective pour générer des classifications de cours d'eau mais fournissent des résultats pas toujours faciles à interpréter et dépendants des variables fournies.

Ainsi, les cours d'eau sont classés à partir des débits moyens mensuels et la classification proposée par Pardé (1968) et par Edouard et Vivian (1984) est utilisée. Par la suite, les régimes sont notés régimes mensuels ou régimes de Pardé.

3.1.1.2 Caractéristiques générales des stations hydrométriques.

Les données débitométriques sont toutes au pas de temps journalier, pour des bassins versants dont la surface va de 5 à 2 170 km² (Surface moyenne : 290 km²). Le pas de temps journalier a été choisi car c'est un compromis de finesse du pas de temps et de disponibilité des données. En effet, il est suffisamment fin pour décrire la VH sur des bassins versants d'une surface de quelques centaines de km². Les chroniques de débits ont une longueur allant de 10 à 87 ans (Durée moyenne : 29 ans) et proviennent de la Banque Nationale de Données HYDRO. Le format des fichiers de données est fourni par le Ministère de l'Environnement (1993).

C'est en régime glaciaire que la surface des bassins versants est la plus petite alors que c'est en régime nivo-glaciaire que la médiane de la surface des bassins versants est la plus grande. Les surfaces topographiques des bassins versants sont celles fournies par HYDRO.

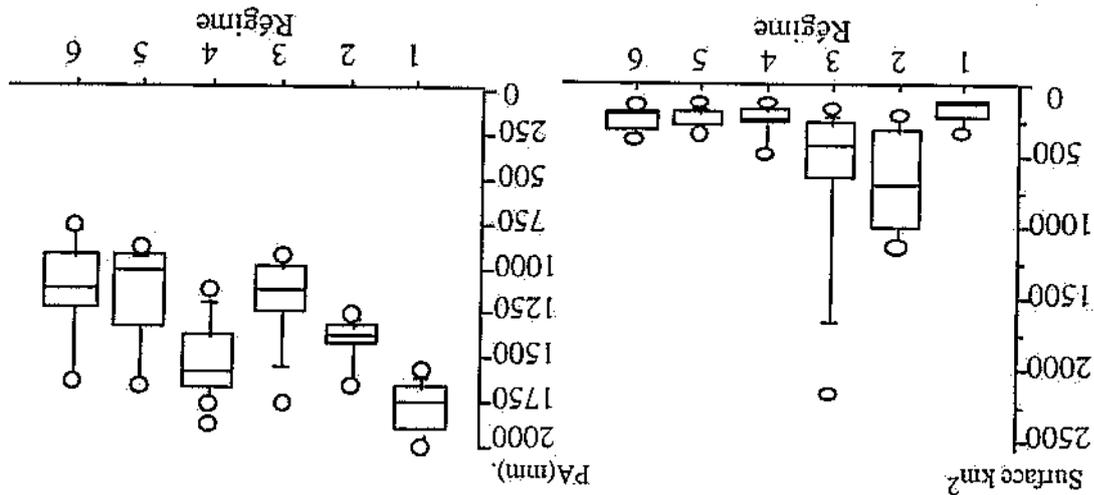


Figure 3.1.1.2 Surface des bassins versants et précipitations annuelles par régime mensuel.

Numéro de régime : 1, régime glaciaire; 2, nivo-glaciaire; 3, nival; 4, nivo-pluvial; 5, pluvio-nival; 6, pluvial.

C'est en régime glaciaire que les précipitations annuelles sont les plus fortes, avec une pluviosité médiane de 1 750 mm (figure 3.1.1.2). Les précipitations annuelles ont été tirées de Klessner (1986). Les autres caractéristiques et la liste des stations hydrométriques sont présentées en annexe 3.1.1.2.

3.1.1.3 Répartition des stations hydrométriques par type de régime mensuel.

La répartition des stations par régime mensuel est rapidement présentée.

Régime glaciaire.

La répartition théorique des débits mensuels inter-annuels d'un régime glaciaire non anthropisé est la suivante :

Quatre stations ont été sélectionnées pour une surface allant de 5 à 205 km². Elles sont situées dans le massif du Mt Blanc, de la Vanoise et des Hautes Pyrénées. Ce régime est caractérisé par des débits intenses en été (juillet et août) car les écoulements sont liés à la température ; c'est la fonte d'un stock de neige, puis de glace qui alimente ces écoulements.

Régime nivo-glaciaire.

La répartition des débits mensuels inter-annuels d'un régime nivo-glaciaire est la suivante selon Bois (1980).

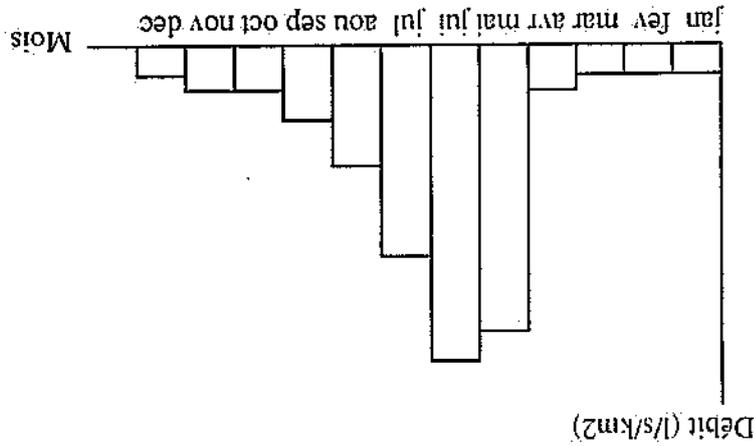


Figure 3.1.3.2 Débits mensuels inter-annuels en régime nivo-glaciaire (Bois, 1980).

Six stations ont été retenues pour une surface de 133 à 907 km². Les stations sont situées dans la Vanoise, les Hautes Alpes et dans le Massif des Ecrins. Ce régime se caractérise par des débits mensuels inter-annuels maximaux de mai à juillet. Les débits estivaux sont soutenus par la fonte glaciaire qui apporte un débit non négligeable.

Régime nival.

La répartition théorique des débits moyens mensuels d'un régime nival selon Bois (1980) est la suivante :

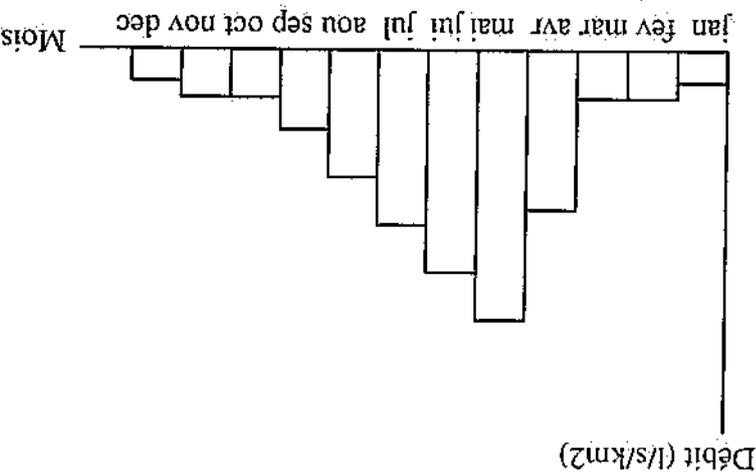


Figure 3.1.1.3.3 Débits mensuels inter-annuels en régime nivial (Bois, 1980).

Dix stations ont été utilisées, pour des surfaces allant de 72 à 2 170 km². Ce régime est plus répandu en France que les 2 précédents. Les écoulements mensuels inter-annuels maximaux se produisent en mai, lorsque la neige fond. Les écoulements sont faibles en juillet et surtout en août car la fonte des neiges est terminée et que les pluies ne sont pas suffisantes pour alimenter les écoulements. La fonte glaciaire est inexistante, ce qui ne soutient pas les écoulements estivaux. Les bassins versants répondant à ce régime sont situés sur la Durance, l'Ubaye, les Drance, la Tinée, la Roizonne et la Bonne.

Ces 3 régimes ont une caractéristique commune : ils présentent un étage en hiver, à la différence des autres régimes. En effet, les précipitations hivernales se produisent sous forme solide, ce qui ne provoque pas d'écoulement. Il y a donc stockage des précipitations une partie de l'année et fonte de ce stock de neige ou/et de glace pendant une autre partie de l'année. Par contre, la durée de cet étage hivernal diminue du régime glaciaire au nivial car la fonte nivale commence plus tôt que la fonte glaciaire.

Régime nivio-pluvial.

Troize stations ont été choisies, pour des surfaces allant de 33 à 495 km². L'influence des pluies sur les écoulements se fait sentir même l'hiver bien qu'une partie des précipitations tombe sous forme solide. L'influence d'un stock de neige existe aussi, mais il est moins net qu'en régime nivial. C'est un régime assez répandu dans les montagnes françaises. Les débits mensuels maximaux se produisent en avril car la fonte nivale est plus précoce qu'en régime nivial. Les bassins versants retenus sont situés dans les Préalpes (Chablais, Chartrouss, Vercors ou Dévoluy).

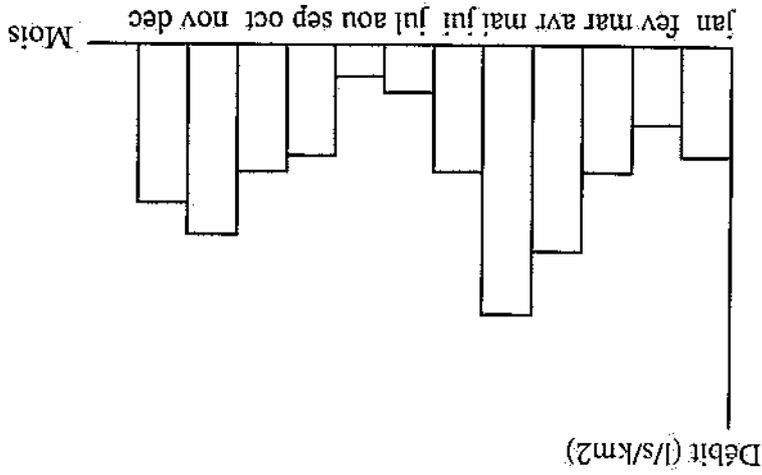


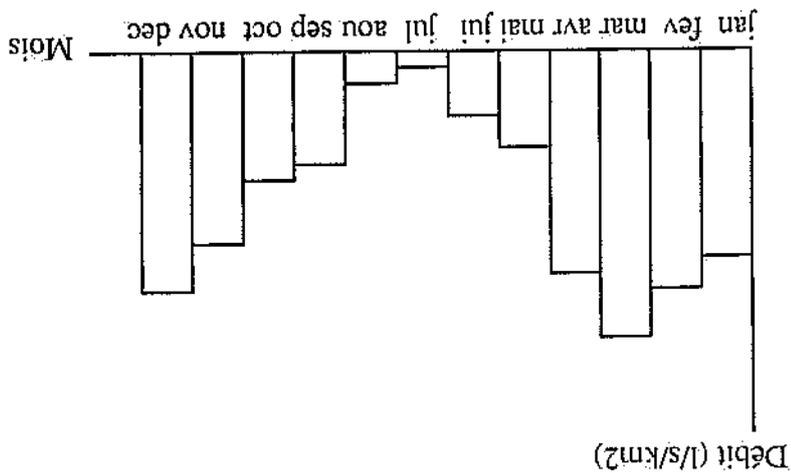
Figure 3.1.1.3.4 Débits mensuels inter-annuels en régime nivio-pluvial (Bois, 1980).

Dix-sept stations ont été choisies, dont la surface du bassin versant va de 34 à 263 km². Ce régime est exclusivement alimenté par les pluies. Les débits mensuels les plus forts se produisent habituellement en hiver ou au début du printemps, souvent en février. L'influence de la neige sur les écoulements est inexistante. C'est le régime le plus répandu en France. La répartition des débits moyens mensuels inter-annuels d'un régime pluvial est représentée dans la figure suivante.

Régime pluvial.

Ce régime est assez répandu en France. Les stations retenues sont situées dans les Pyrénées et l'une des stations est située en Auvergne (La Dordogne à St SAUVES D'AUVERGNE).

Figure 3.1.3.5 Débits mensuels inter-annuels en régime pluvio-nival (Bois, 1980).



Cinq stations ont été sélectionnées, dont la surface varie de 58 à 202 km². Les écoulements mensuels maximums ont lieu en février et en mars. La pluie joue un rôle prépondérant sur les écoulements mais un stock de neige se forme habituellement pour fondre dès le mois de mars.

Figure suivante.

La répartition des débits mensuels inter-annuels d'un régime pluvio-nival est représentée dans la

Régime pluvio-nival.

difficile à classer.

Le Giffre à Tanninge (Haute Savoie) est classé dans ce régime car les pluies hivernales provoquent des crues très fortes alors que ce cours d'eau présente un débit maximal en mai. Ce cours d'eau est

produit dans le cours d'eau. C'est également le cas de la Souloise, située dans le Dévoluy. Ainsi, le Meaudret à MEAUDRE (Vercors) a un débit spécifique qui n'est que de 10 l/s/km² pour des précipitations annuelles proches de 1 500 mm. En fait, seule une partie des écoulements se

produit dans le cours d'eau. Dans l'ensemble, ces régions reçoivent des précipitations importantes tout au long de l'année. Une partie de ces bassins versants est située sur des calcaires karstifiés. Le débit spécifique de ces bassins versants est très faible en dépit d'importantes précipitations (300 mm d'écoulement pour 1 500 mm de précipitation par an).

Les chroniques de débit ont été visualisées pour en vérifier la continuité et repérer les erreurs de codage. Ce travail est important car les erreurs de codage provoquent des erreurs qui se répercutent dans la suite des traitements. De plus, les stations influencées par des aménagements hydroélectriques présentent peu ou pas de crues ou des étiages soutenus.

3.1.2 Critique des données.

- 4 stations en régime glaciaire.
- 6 stations en régime nivoglaciale.
- 10 stations en régime nivoglaciale.
- 13 stations en régime nivoglaciale.
- 5 stations en régime pluvio-nival.
- 17 stations en régime pluvial dont 7 en cœvenol.

En résumé, les recherches sont réalisées sur un échantillon de 55 stations hydrométriques au pas de temps journalier, en écoulements peu ou pas influencés par les activités humaines. La classification des régimes utilisée est celle de Pardé (1968), Bois (1980), Vivian et Edouard (1984) qui repose sur les débits moyens mensuels. Les stations se répartissent comme suit :

Remarque : Si la place des régimes glaciaires est faible en nombre, ces régimes présentent un intérêt pour l'hydrobiologie. En effet, de tels régimes fournissent de l'eau en abondance, fraîche de surcroît, à une époque où les biocénoses en rivière souffrent habituellement d'un manque d'eau et d'un excès de chaleur.

Pour l'ensemble des stations, le relief est très marqué. Ces stations hydrométriques sont situées en région montagneuse, ce qui a certainement une influence sur les écoulements. Ce choix est obligatoire pour travailler en régime à influence nivale ou glaciaire en France. Seules quelques stations hydrométriques sont en plaine pour le régime pluvial. C'est le cas, par exemple, de la Veyre à LENT (33 km²) ou de la Reyssouze à MONTAGNAT (85 km²).

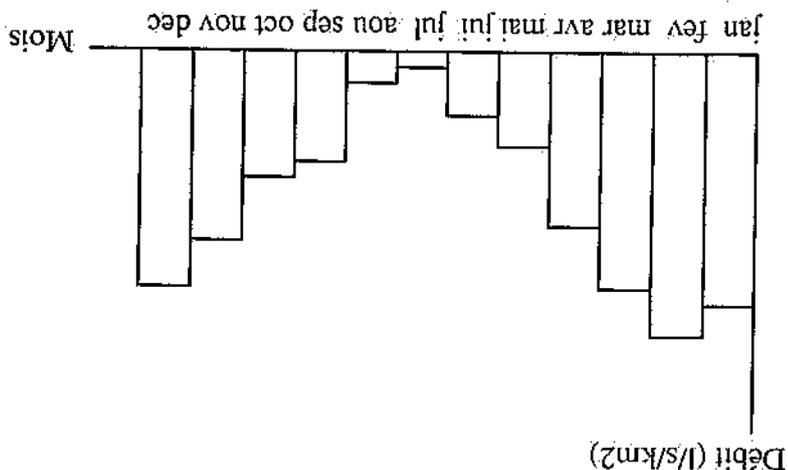
Sous nos climats, les régimes alimentés par les pluies sont caractérisés par des étiages estivaux. En effet, les pluies sont souvent plus faibles l'été alors que l'évaporation est intense. Habituellement, c'est en hiver et au printemps que les écoulements mensuels les plus forts se produisent.

bien marqué : pontes de l'Algonou ou montagnes ardéchoises par exemple.

Gard, les Pyrénées Orientales, les Alpes Maritimes et le Var. Le relief de ces bassins versants est - le régime pluvial à influence cœvenole. Les stations sont situées dans l'Ardèche, le département de la Loire, de l'Ain, de l'Isère et du Rhône.

- le régime pluvial sans influence cœvenole, les stations de données sont situées dans les Pour ce régime, deux groupes de stations ont été réalisés :

Figure 3.1.3.6 Débits mensuels inter-annuels en régime pluvio-nival (Bois, 1980).



Si N_c valeurs supérieures à un seuil sur l'intervalle de temps $[0; t_m]$ sont observées aux dates (1), T2, t_m , on représente sur un graphique :
 - la courbe expérimentale $m_1(t)$ du nombre de crues en fonction du temps t ;
 - la droite théorique $m_2 = n^*t$, pour un nombre moyen de dépassements $n = N_c/t_m$;

$$\text{Prob}[m_1 < m_2] = 0,90$$

avec $\sum_{k=0}^{N_c} W_k(t) = 0,05$ et $\sum_{k=2}^{N_c} W_k(t) = 0,95$

L'intervalle de confiance à 90% de la variable n , nombre de crues sur l'intervalle de temps $[0; t]$, est donné par :

$$W_k(t) = \left[\frac{t}{t_m} \right]^{N_c} C_k^{N_c} \left[\frac{t}{t_m} \right]^k \left[\frac{t_m - t}{t_m} \right]^{N_c - k}$$

Ce test vérifie l'hypothèse de stationnarité d'une série issue d'un échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil, à partir de l'intervalle de tolérance du nombre d'événements observés sur un intervalle temps donné. Si ce nombre est stationnaire et suit une loi de Poisson, la probabilité d'avoir k crues sur l'intervalle de temps $[0; t]$, sachant qu'il y a eu N_c crues sur $[0; t_m]$, vaut :

3.1.3.1 Principe du test de stationnarité.

Le nombre de dépassements en fonction du temps a été choisi car nos recherches portent sur les crues et que ce test est fiable et opérationnel. Ce test présente l'avantage de donner un critère objectif de rejet ou d'acceptation de l'hypothèse de stationnarité. La stationnarité des chroniques a été testée sur toutes les stations de référence.

Le test est basé sur le cumul du nombre de dépassements de seuil de débit au cours des années et un intervalle de tolérance qui peut être choisi (80, 90 ou 95% par exemple). Le seuil de débit est à choisir pour chaque station, mais pour assurer une indépendance des dépassements de seuil de débit, il doit être choisi de telle sorte qu'il ne soit pas dépassé plus de 2 à 3 fois par an en moyenne.

Avant de poursuivre les recherches, il faut vérifier la stationnarité des chroniques de débits pour s'assurer de la stabilité de la variabilité hydrologique des chroniques. Une dérive de la VH signifierait qu'elle évolue sur la durée des chroniques, ce qui est dommageable pour la typologie de la VH. Pour cela, un test mis au point par Lang (1995 a) permet cette vérification.

3.1.3 Recherche de la stationnarité des chroniques des débits.

La lame d'eau écoulée a été calculée pour chaque bassin car la surface géographique des bassins versants est connue. Si un bassin versant est situé sur des calcaires karstifiés, la lame d'eau écoulée est très inférieure à la pluviosité annuelle P_A .

Enfin, les débits moyens mensuels $QM(t)$, annuels $QA(t)$, et leur moyenne inter-annuelle QA et QM pour les 12 mois de l'année sont calculés. La répartition saisonnière des écoulements est connue, comme les étiages. À partir de ces calculs, les stations hydrométriques ont été classées par type d'écoulement selon la classification de Pardé (1968).

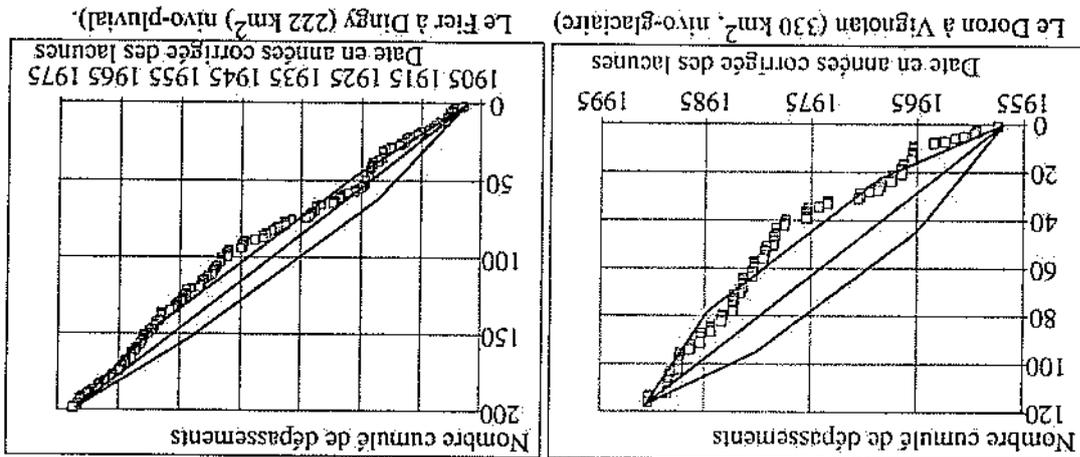
Parfois, les écluses sont visibles, même au pas de temps journalier. Les stations trop influencées par ces aménagements n'ont pas été retenues.

La courbe expérimentale reste dans l'intervalle de confiance. Dans ce cas, l'hypothèse de la stationnarité est retenue avec une probabilité supérieure à 90% d'être vraie.

3.1.3.3 Exemple de chroniques stationnaires.

Pour le Fier à DINGY, le seuil est fixé à 60 m³/s. Un seuil fixé à 55 m³/s amène également à la non-stationnarité de la chronique.
 Pour le Doron à VIGNOTAN, le seuil est fixé à 32 m³/s, ce qui donne 2,7 dépassements par an, en moyenne. D'autres seuils amènent également à la non-stationnarité de la chronique.

Figure 3.1.3.2 Exemples de chroniques non stationnaires.



La courbe expérimentale sort largement de l'intervalle de confiance. L'hypothèse de la non-stationnarité de la chronique est retenue avec une probabilité d'au moins 90% d'être vraie.
 L'intervalle de confiance est représenté par les courbes de part et d'autre de la droite théorique $m_f = \mu t$. Cette courbe enveloppe est représentée par des segments de droite.

3.1.3.2 Exemple de chroniques non stationnaires.

Ces dépassements de seuils doivent être indépendants les uns des autres, ce qui peut poser des difficultés pour les régimes à influence nivale ou glaciaire. En effet, ces régimes connaissent une forte composante saisonnière. Pour ces régimes, un écart de date suffisamment important doit être choisi pour que les dépassements de seuils soient indépendants les uns des autres.
 Pour tenir compte des lacunes, le temps indiqué en abscisse du graphique correspond à une durée cumulée d'observations (donc sans les années les ou mois manquants) et ne correspond pas exactement à la date d'occurrence de la crue.
 Si la courbe expérimentale $m_f(t)$ sort des limites de la courbe enveloppe, l'hypothèse de stationnarité de la série peut être rejetée avec un risque d'erreur inférieur à 10%.

- la courbe enveloppe des limites des intervalles de tolérance à 90% de m_f , pour $t = \left(\frac{NC}{J} \right)_{f_{lim}}$, où J varie de 1 à NC .

En tout état de cause, il est délicat de prendre une décision à partir de débits seuils en non de ΔQ seuils. Ensuite, il est délicat de négliger les aspects fréquents des ΔQ (ou des débits) pour le problème posé.

La stationnarité des débits fréquents n'a pas été vérifiée, aucune conclusion n'est possible sur l'indice mensuel de distortion.

La non-stationnarité de la chronique peut entraîner une légère modification de la VH mais ce cas est peu fréquent sur le données utilisées. Le maximum de vraisemblance pour le calcul de la VH limite les inconvénients de la non-stationnarité de certaines chroniques.

La non-stationnarité des chroniques peut être dommageable pour la typologie éco-hydrologique, encore faut-il que cela influence les indices A et B et l'indice mensuel de distortion. En toute rigueur, si la stationnarité est vérifiée pour les crues, nous pouvons supposer qu'elle est vraie pour les ΔQ , ce qui n'a pas été vérifié. Quand elle n'est pas stationnaire pour les crues, il aurait été souhaitable de le vérifier pour les ΔQ .

Dans le cas de la non-stationnarité, plusieurs hypothèses sont possibles :

- l'occupation du sol des bassins versants a été modifiée, d'où une modification de l'écoulement des eaux. Cela peut être le cas de certains bassins versants où s'est produit la déprise agricole ou l'extension de surfaces urbanisées.
- il s'est produit une légère modification naturelle du nombre de dépassements de seuil sur la durée de la chronique, suite à une modification du régime des pluies.
- la courbe de tarage s'est modifiée au cours de la chronique ou les opérateurs qui suivent la station hydrométriques ne sont pas les mêmes.
- le lit de la rivière a été modifié, suite à un curage, à des extractions de matériaux...

Cependant, 13 chroniques ne sont pas stationnaires, surtout parmi les plus longues. Même avec un seuil de 20% + chroniques ne sont toujours pas stationnaires.

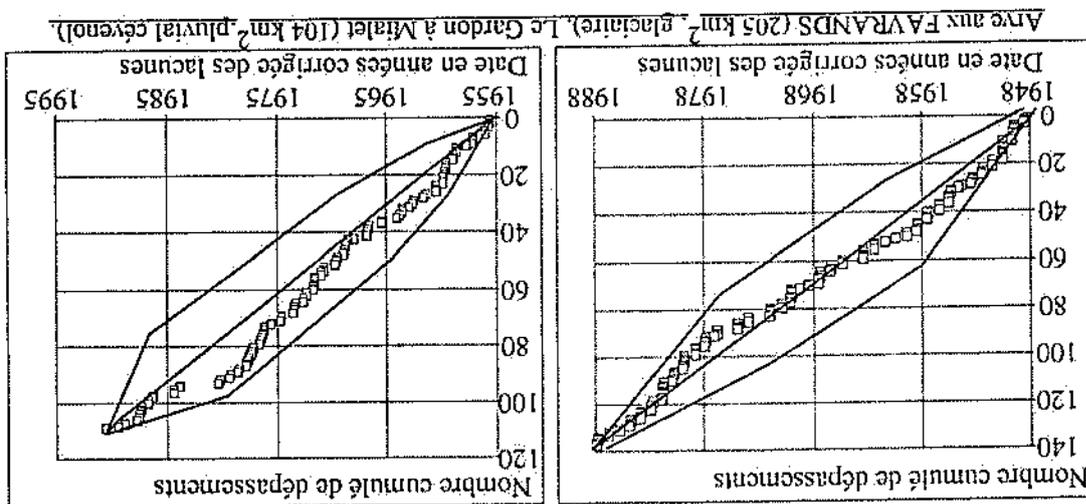
La plupart des chroniques (42/55) utilisées sont stationnaires pour le critère retenu, avec un seuil de rejet de l'hypothèse de la stationnarité à 10%.

3.1.3.4 Conclusion sur la stationnarité des chroniques.

Pour le Gardon de St Jean à MIALET, le seuil est fixé à 25 m³/s, soit 3,0 dépassements par an en moyenne. La courbe expérimentale reste dans l'intervalle de confiance. La chronique est stationnaire.

Pour l'Arve à PONT des FAVRANDS, le seuil est fixé à 43 m³/s, ce qui fait 3,1 dépassements par an en moyenne.

Figure 3.1.3.3 Exemples de chroniques stationnaires.



Enfin, les conclusions sur la stationnarité de la chronique n'auraient pas forcément été les mêmes en prenant un autre critère: comme les débits moyens mensuels ou annuels cumulés en fonction du temps.

3.1.4 Méthode d'analyse.

A partir de l'échantillon de 55 stations hydrométriques, les nouvelles variables (A) et leurs paramètres d'échelle A et de position B) sont calculées chaque mois de l'année pour chaque station, ce qui fournit 12 valeurs de descripteurs pour chaque station hydrométrique.

La même opération est réalisée pour les descripteurs classiques de la VH. Chaque station se caractérise par 12 décart-types, de coefficient de variation, de moment d'ordre 3... ce qui fait 19 variables étudiées, nouvelles variables comprises.

Ainsi, une matrice de 55 stations, 12 mois et 19 descripteurs est constituée (tableau 2.4). Cette matrice a des dimensions de 660 individus en ligne (55 * 12) et de 19 variables en colonne.

Les nouvelles variables sont comparées entre elles ainsi qu'aux descripteurs classiques de la VH pour savoir si elles apportent une information différente de la VH.

La description détaillée est réalisée pour chaque descripteur avec des diagrammes en boîte, pour savoir comment il évolue au cours des 12 mois de l'année et quelle est sa dispersion pour un mois donné et pour un régime donné.

N° de Station	N° du mois	Variable 1	Variable 2	Variable 19
1	Janvier = 1			
1	2			
1	3			
1...	4...			
1	Décembre = 12			
2	1			
2	2			
2	3			
2...	...			
2	11			
2	12			
3	1			
3	2			
3...	...			

Tableau 3.1.4 Exemple de matrice de 55 stations, 12 mois par station et de 19 variables utilisées dans la recherche de descripteurs.

Ensuite, des saisons de VH moyenne sont recherchées par régime, au moyen de l'analyse de la variance. Ces saisons peuvent être continues ou non. En effet, il faut savoir quelles sont les saisons présentant une VH homogène au cours du cycle biologique pour savoir quelles sont les contraintes hydrologiques auxquelles sont soumis les EEC. De plus, les saisons définies par chaque descripteur ne sont pas forcément les mêmes.

Les saisons qui sont définies pour chaque régime sont un critère de choix des descripteurs de la VH. En effet, cette étape indique quels sont les descripteurs sensibles aux distributions de débit. La saisonnalisation de chaque descripteur selon les régimes est appelée typologie de la VH.

Enfin, la matrice de 55 stations, 12 mois et 19 variables est analysée avec une analyse en composantes principales pour savoir quelles sont les variables les plus pertinentes à retenir pour décrire la VH. En effet, il faut savoir quelles sont la ou les variables qui sont retenues. Seules 2 à 4 variables sont conservées au lieu des 19 variables qui sont étudiées.

Les critères de choix des descripteurs retenus sont :

- la sensibilité aux distributions de fréquence des débits, afin de distinguer les hautes et les basses eaux,
- la distinction de la VHF et de la VHP,
- l'association à une fréquence d'apparition exprimée en année, pour se caler sur les cycles biologiques des poissons dans un premier temps,
- leur signification, essentiellement liée à leur mode d'échantillonnage

3.1.4.1 Présentation des graphes en boîte.

Les graphes en boîte ont été utilisés pour décrire la VH par régimes. Les horsins ou "outliers" sont des valeurs qui s'éloignent sensiblement des autres, qui posent le problème de l'homogénéité des échantillons.

Naturellement, il faut avoir assez de valeurs pour déterminer les déciles. En régime glaciaire, 4 stations sont disponibles. Dans ce cas, les déciles et les horsins ne sont pas déterminés. En effet, pour des raisons de disponibilité des données, les échantillons de stations hydrométriques ne sont pas toujours étroits.

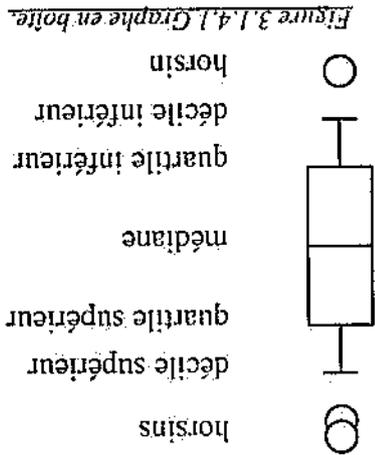


Figure 3.1.4.1 Graphique en boîte.

Lorsque le nombre de stations est suffisant, la dispersion des valeurs autour de la médiane est appréhendée par l'inter-quartile et par l'inter-décile.

3.1.4.2 Présentation de l'Analyse de la Variance.

L'analyse de la variance est la règle utilisée pour désigner un type d'analyse proposée par le logiciel STATVIEW. Elle est utilisée pour regrouper les mois présentant une VH moyenne semblable, d'ou une définition de saisons de VH homogènes, continues ou non. Elle est utilisée pour réaliser une typologie des diverses variables rencontrées, selon les régimes considérés.

L'ACP dégage les principaux groupes de variables redondantes. Dans notre cas, chaque individu possède 19 valeurs de VH (ΔQ et d'autres variables rencontrées dans la bibliographie). Il peut être placé dans un espace à 19 dimensions. L'ensemble des 660 individus représentés dans un espace à 19 dimensions constitue un nuage de points. L'ACP recherche quels sont les axes de ce nuage qui optimise la variance de ce nuage de points. Elle montre les axes pour lesquels la variance des individus est maximale.

3.1.4.3 Présentation de l'Analyse en Composantes Principales ou ACP.

Dans notre cas, c'est la VH moyenne de chaque mois qui est comparée à la VH moyenne des 11 autres mois. Si la probabilité que deux mois donnés aient la même VH moyenne est supérieure à 90%, ces deux mois ont la même VH. En comparant la VH moyenne des mois à deux, des groupes de mois ayant la même VH moyenne peuvent être définis. L'ANOVA regroupe les mois ayant même VH pour en faire des saisons homogènes. Il faut 66 comparaisons $[(12 \times 12 - 12) / 2 = 66]$ pour un régime et pour un descripteur pour constituer des saisons.

Si l'hypothèse H_0 (échantillon de même moyenne X_1 et X_2), n'est pas vraie, alors le numérateur est relativement grand par rapport au dénominateur. Plus F est grand, moins l'hypothèse H_0 est crédible. Les valeurs critiques du test F sont fournies dans les tables correspondantes, avec les degrés de la variance du numérateur ($a - 1$) et ceux de la variance du dénominateur $[a(n-1)]$. Ce sont les valeurs de F auxquelles est attribuée une probabilité en fonction des degrés de liberté du numérateur et du dénominateur.

où :

- a : est le nombre d'échantillons ($2 \leq a \leq n$).
- n : l'effectif de chaque échantillon, n est le même pour des échantillons de même effectif,
- X : est la moyenne commune aux a échantillons.
- X_i : est la valeur de rang i.
- X_{1i}, X_{2i} sont les valeurs de rang i des échantillons 1 et 2,
- X_1, X_2 est la moyenne des échantillons 1 et 2.

$$F = \frac{n(S_x^2)}{S_p^2}$$

Le test F devient :

$$S_p^2 = \frac{\sum (X_{1i} - X_1)^2 + \sum (X_{2i} - X_2)^2}{a(n-1)}$$

La somme des carrés des différences entre les valeurs observées et la moyenne des échantillons est :

$$S_x^2 = \frac{1}{a-1} \sum (X_i - X)^2$$

La variance de l'ensemble des échantillons est :

L'analyse de la variance est basée sur le test F (en mémoire de Sir Ronald Fisher), qui se calcule à partir de la variance S_x^2 de l'ensemble des échantillons et des carrés des écarts des échantillons S_p^2 .

Elle est dite robuste car les conclusions sont approximativement valables même pour des échantillons non normaux. Même si les variances d'échantillon ne sont pas toutes égales entre elles, les conclusions sont toujours approximativement les mêmes tant que les tailles d'échantillons sont du même ordre, ce qui est le cas ici.

L'analyse de la variance détermine quel est l'effet d'une variable explicative (ou supposée comme telle) sur la moyenne de deux échantillons. D'après Wonnacott (1991), elle est applicable aux échantillons suivant une loi normale, avec une variance commune σ^2 .

Comme les descripteurs évoluent selon des gammes de valeurs très différentes, l'ACP réalisée est normée pour comparer la VH.

La normalisation est la suivante :

$$X' = (X_i - M) / \sigma$$

Où :

X_i est la valeur d'un descripteur considéré pour un mois donné pour une station donnée,
 M la moyenne des 660 individus (55 stations * 12 mois),
 σ l'écart-type de ce descripteur, calculé sur les 660 individus.

L'ACP est réalisée sur les X'_i .

Grâce à l'ACP, des groupes de variables plus ou moins redondantes entre elles sont définis. Dans ces groupes, une ou deux variables sont retenues selon les critères déjà présentés.

Naturellement, une ACP intra et inter-date et intra et inter-station est réalisée pour savoir quelle est l'importance du facteur temporel et du facteur spatial sur la VH. En effet, nous voulons savoir si le découpage de l'année en saisons mensuelles et si les régimes présentent une VH différente. Un de l'autre.

3.1.5 Les programmes utilisés pour ces recherches.

Compte tenu de l'importance des données à traiter, il a fallu écrire des programmes pour réaliser tous les calculs. Ces programmes sont écrits en FORTRAN. Ils traitent les fichiers écrits au format HYDRO et au pas de temps journalier uniquement. Les résultats sont stockés dans des fichiers texte, où chaque station, régime et mois sont identifiés avec des numéros. Ces programmes sont automatisés. Il suffit d'écrire le nom de la ou des chroniques à traiter et de lancer le programme pour traiter autant de chroniques que désiré.

3.1.5.1 Le programme VARY.

Le programme a été développé par Dupeyron (1991) et Martin (1992) puis sensiblement amélioré depuis. Il s'appelait "Typologie". Actuellement, le programme d'analyse de la VH est "VARY".

Le programme propose 8 options qui sont :

- 0 : Créer le fichier des variations de débit (ΔD),
- 1 : Comparer les débits journaliers et les ΔQ journaliers fréquents et rares,
- 2 : Contrôle du degré auto corrélation d'ordre 1,
- 3 : Les isoquantiles de débit ou de ΔQ ,
- 4 : Les indices de variabilité globale médians et moyens,
- 5 : Une autre station, pour passer d'une station à une autre sans sortir du programme,
- 6 : Vos résultats sur imprimante,
- 7 : Ajuster une loi exponentielle sur les maxima de débits ou de ΔQ ,
- 8 : Quitter le programme.

Le travail effectué par chaque option est précisé lors de la définition des ΔQ , de la VHpt et de la VH, ou de l'indice mensuel de distorsion.

Le programme "VARY" comporte 1 800 lignes environ, mais il permet également des visualisations graphiques des résultats.

La figure 3.2.1.1 représente les débits et la médiane glissante des débits des 30 jours précédents pour un exemple, et pour une année donnée (1974). La médiane glissante est la référence qui sert à calculer les variations de débit. Le plateau présenté par la médiane glissante

Les variations de débit sont destinées à rendre compte des crues, au sens de Resh *et al.* (1988). C'est un écart de débit par rapport à une référence.

3.2.1 Définition des variations de débit.

La distinction de la VHF et de la VHP est importante pour évaluer l'effet de la VH sur les EBC. Ce concept a été montré en bibliographie. Ce paragraphe est destiné à la formulation mathématique de ces VH.

Enfin, la VHF marque l'évolution saisonnière, synthétisée par l'indice mensuel de distortion. C'est une caractéristique des régimes car proche des régimes tels que définis par Parde (1968). La VHP caractérise le contrôle dynamique du régime sur la dynamique biologique de l'écosystème sans être rare. Elle a un effet structurant à long terme à la différence des fortes perturbations.

la structure à long terme d'un écosystème aquatique ?

- peut-on déterminer une limite entre les domaines de VHF et VHP pouvant expliquer régimes d'écoulement ?
- existe-t-il une typologie des variations de débit fréquentes et non fréquentes selon les
- par quelles mesures caractériser les variations de débit ?

Plusieurs questions se posent :

Seules les variations de débit fortes perturbent un écosystème, de façon plus ou moins durable. Cette hypothèse est suggérée par l'approche bibliographique et les connaissances biologiques. mesure de supporter les variations de débit fréquentes qui se produisent sur un cours d'eau. Le calcul de ces descripteurs part de l'hypothèse que les écosystèmes aquatiques sont en

Le cas des étages se caractérise par l'absence de VH et n'est donc pas concerné par les nouveaux descripteurs proposés. Une autre approche est nécessaire pour les étages, qui sont également des perturbations pour les écosystèmes aquatiques. Compte tenu de la loi exponentielle qui permet de définir les nouvelles variables, seuls les aspects fréquents et non fréquents en crue sont traités dans ce travail.

3.2 Définition des variations de débit et calcul des nouveaux descripteurs de la VH. Distinction entre la VHF et la VHP.

Ces programmes calculent les débits mensuels (année par année ou les inter-annuels), les débits annuels (année par année ou les inter-annuels), de calculer les débits classés. Les descripteurs de la VH rencontrés en bibliographie sont également calculés, comme l'écart-type des débits, le moment d'ordre 3, le rapport de la moyenne et de la médiane... Une partie de ces programmes a été écrite par moi-même. Tous ces résultats sont stockés dans des fichiers texte, qui sont utilisés dans les traitements présentés dans ces recherches. Ces programmes sont assez courts, ils représentent entre 100 et 200 lignes.

3.1.5.2 Les autres programmes.

des débits (entre le 50^{ème} et le 70^{ème} jour) signifie que cette médiane n'évolue pas sur cette période. L'abscisse va jusqu'à 365 jours car l'exemple concerne une année entière. Pour être comparables d'un bassin versant à l'autre, les variations de débit sont calculées en débits spécifiques (l/s/km²).

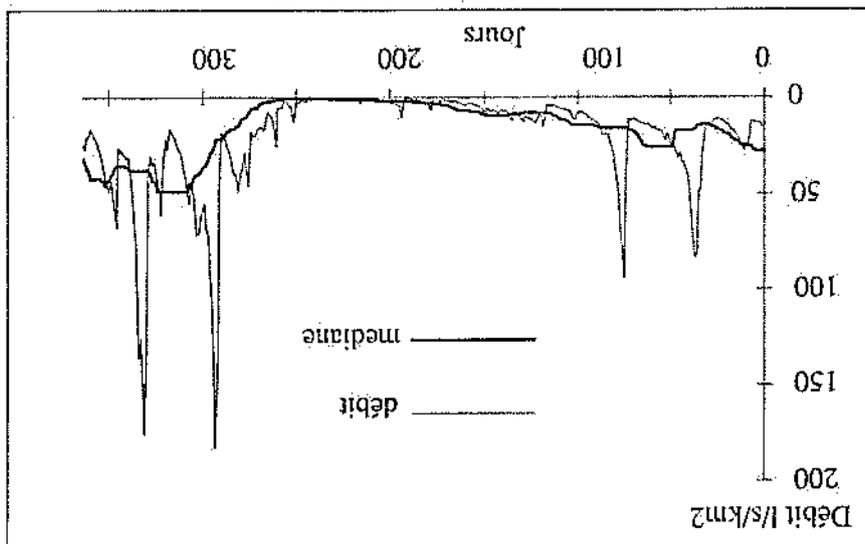
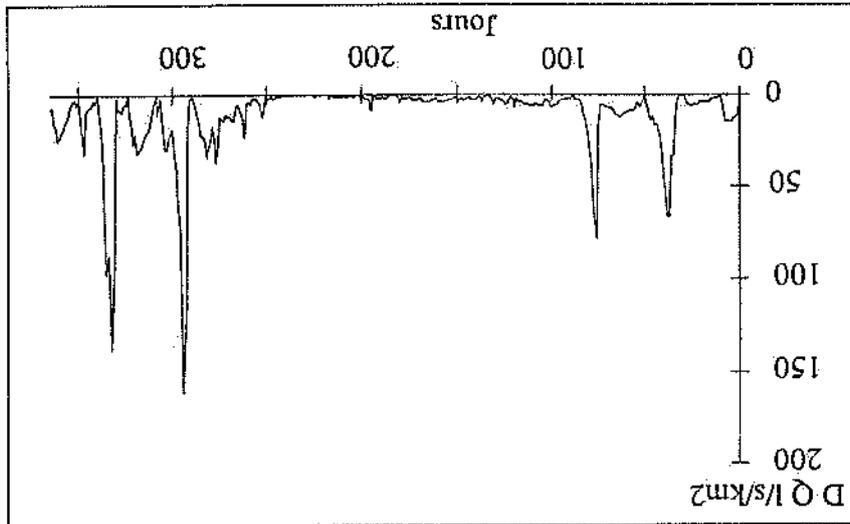


Figure 3.2.1 Exemple de chronique journalière de débit et de médiane glissante des débits

sur 30 jours.

médiane signifie médiane glissante des débits sur une durée de 30 jours.

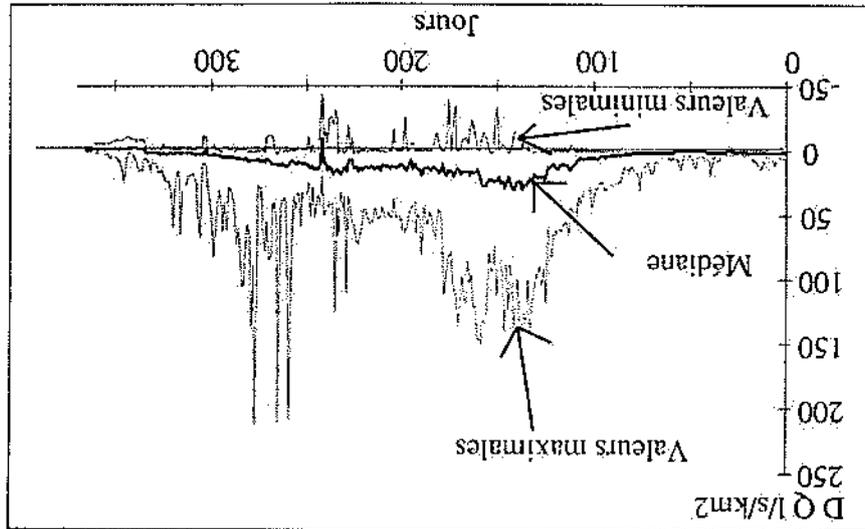
Les ΔQ (ou variations de débit) sont définis comme la différence entre le débit observé au jour j et la médiane des débits des 30 jours précédents. La médiane des débits a été choisie car elle n'est pas influencée par les valeurs extrêmes. Ces différences de débit sont notées ΔQ par la suite.



Le Rhins à Aimplépuis (1974)

Figure 3.2.2 Exemple de chronique de ΔQ journaliers (Le Rhins à Aimplépuis 114 km²) (option 0 de VARY).

Figure 3.2.1.1 Isoquantiles journaliers de ΔQ sur la Romanche au LAC CHAMBON (option 3 de VARY).



Comme pour les isoquantiles journaliers de débit, les ΔQ journaliers (des 48 premiers janvier de la chronique, des 48 deux janvier de la chronique) ont été classés par ordre décroissant. La même opération est renouvelée sur les 365 jours de la chronique.

À l'image des isoquantiles journaliers de débit, une figure des isoquantiles journaliers de ΔQ peut être construite sur la Romanche au LAC CHAMBON (220 km², régime nivo-glaciaire). Les isoquantiles journaliers de débits et de ΔQ sont obtenus avec l'option 3 du programme VARY.

3.2.1.1 Intérêt des variations de débit.

Cette information est à considérer comme l'expression des perturbations à effet temporaire, qui limite la dynamique d'évolution d'un écosystème en eau courante (modèle conceptuel de l'écosystème d'eau courante).

Les ΔQ sont considérées comme des variables véhiculant un historique des écoulements à court terme. Cette transformation des débits extrait la composante non saisonnière des débits peu fréquents mais pas rares qui structurent l'écosystème aquatique à long terme.

Dans un premier temps, la période de référence est de $M = 30$ jours, pour à la fois suivre les recommandations des biologistes et coller à la saison mensuelle. La durée de 30 jours est choisie car elle correspond à certains cycles du benthos.

Les variations de débit sont calculées chaque jour de la chronique, à partir des chroniques de débit journalières. Ainsi, les chroniques de débit sont transformées en chroniques de ΔQ (figure 3.2.1.2). Le fichier de ΔQ est obtenu avec l'option 0 du programme VARY. Le fichier de ΔQ est au format HYDRO.

Il existe de nombreuses formules empiriques définissant la probabilité expérimentale à attribuer à une observation. Le choix de l'une ou l'autre formule est lié au choix de la fonction de distribution à ajuster sur ces observations. Pour ramener les distributions de ΔQ à une même distribution expérimentale, nous avons préconisé l'utilisation de la formule $Tx = \frac{n+a}{1-b}$, qui fait correspondre à la ième valeur (X_i) de l'échantillon de n valeurs classées dans un ordre

Choix de la fréquence expérimentale des ΔQ .

Une fois l'extraction réalisée, un échantillon de ΔQ maximaux est constitué. Ces maxima sont classés par ordre décroissant. Une période de retour est attribuée pour chaque ΔQ . Le plus grand ΔQ a la plus grande période de retour, le plus petit ΔQ la plus petite période de retour.

Les ΔQ sont échantillonnés chaque année de la chronique pour tenir compte de toutes les années. En effet, les EFC subissent les ΔQ toutes les années, qu'ils soient forts ou non. Les ΔQ échantillonnés ne sont pas supérieurs à un seuil.

Ces deux règles sont :

- l'extraction de 6 maxima au plus par saison mensuelle, d'où des échantillons de ΔQ fournis,
- un écart de date entre deux ΔQ de 3 jours au minimum. Si plusieurs maxima se succèdent et qu'ils ont un écart de date inférieur à 3 jours, c'est le maximum le plus élevé qui est conservé.

À partir des chroniques de ΔQ , les ΔQ maximaux sont échantillonnés par une procédure informatique selon deux règles qui visent à en assurer l'indépendance. L'indépendance des ΔQ échantillonnés est indispensable pour l'application de la loi exponentielle.

Comme seuls les ΔQ les plus élevés sont susceptibles de perturber les écosystèmes aquatiques, nous ne travaillons qu'avec ces ΔQ . Il faut trouver le moyen de synthétiser l'information contenue dans ces ΔQ le plus simplement possible.

3.2.1.2 Calcul de la variabilité fréquente (VHf) et peu fréquente (VHPf) avec la loi exponentielle et les variations de débit.

L'intérêt des ΔQ est de ne rendre compte que des écarts de débit par rapport à une référence, représentative des débits fréquents, comme le suggère la bibliographie.

De plus, les ΔQ minimaux sont négatifs car il arrive que la médiane glissante des 30 jours passés soit plus forte que les débits. Cependant, les ajustements sont construits avec des ΔQ positifs car ce sont les ΔQ les plus élevés.

Les ΔQ maximaux, la médiane et les ΔQ minimaux de chaque jour ont été représentés. L'évolution saisonnière des ΔQ médians est très faible. Seuls les ΔQ les plus forts évoluent avec la saison.

paramètre d'échelle des ΔQ .
 exprime un potentiel de ΔQ dont l'occurrence est supérieure à l'année. C'est le
 - la pente, qui dépend en partie des ΔQ les plus forts. C'est l'indice A, qui

elle se caractérise par :
 des ΔQ échantillonnés. Comme toute droite placée dans un diagramme semi-logarithmique,
 maximum de vraisemblance pour ne pas tenir trop compte des ΔQ éloignés et isolés du reste
 paramètres de cette loi. La modélisation de ces couples est obtenue par la méthode du
 Une telle loi peut être modélisée par une droite dont les coefficients sont les deux

alignés. En effet, ces couples suivent généralement une loi exponentielle à deux paramètres.
 Placés sur un diagramme semi-logarithmique, les couples (ΔQ , Tx) sont habituellement

1995, ...)
 La formule (1) est très utilisée en hydrologie (Margoum, 1992; Prudhomme, 1995; Lang,

un seul sont échantillonnés.
 échantillonnées sont extraits chaque année. Ce n'est pas une Ts, où seules les maxima dépassant
 - Tx est la période de retour de la valeur de rang i. C'est une Tx car les maxima
 - n est la durée de la chronique en années,

Le ΔQ le plus élevé a pour rang 1,
 - i exprime le rang des maxima de ΔQ échantillonnés et classés par ordre décroissant.

Où :

$$Tx = \frac{n+0,4}{i-0,3} \quad (1)$$

(Margoum, 1992). La période de retour expérimentale devient :
 Pour n assez grand, cette relation entraîne $b = 1 - \text{Log}(2)$, d'où $b = 0,3$ et $a = 0,4$

$$\text{Probabilité } \{X \geq X_1 \text{ sur } n \text{ années}\} = 1/2 \text{ soit } F^n(X_1) = 1/2.$$

- la plus petite valeur de l'échantillon est dépassée en moyenne une fois par an, d'où :

$$F(X_1) = 1 - F(X_1^n), \text{ ce qui donne } a = 1 - 2*b.$$

- la distribution expérimentale est symétrique au moins aux extrémités, d'où :

Pour estimer les paramètres a et b, deux conditions sont nécessaires :

En pratique, on utilise souvent la notation $F_1 = 1 - F_1$ correspondant à la fonction de
 distribution au dépassement où $T = 1 / F_1$ correspondant à la période de retour.

$$F(X_i) = \frac{i-b}{n+a}$$

dépassement :
 croissant sur n années $\{X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_i \leq \dots \leq X_n\}$ la probabilité expérimentale au non

En janvier, les ΔQ sont faibles, c'est l'étiage. Les pics ΔQ sont peu nombreux et faibles, d'où des indices A et B sont faibles. En mai, la fonte nivale commence, les ΔQ augmentent. Les indices A et B ont augmenté depuis le mois de janvier.

Le découpage du cycle annuel en saisons est nécessaire. La VH évolue au cours de mois de l'année sur l'Isère à VAL D'ISÈRE (46 km², régime glaciaire). Les pics de ΔQ évoluent considérablement au cours de l'année. La loi exponentielle est appliquée aux ΔQ par saisons mensuelles.

Au-delà des aspects fréquents et non fréquents des variations de débit, la notion de cycle biologique doit être incluse. En effet, aux différents stades de développement des organismes aquatiques correspondent des périodes de fragilité plus ou moins prononcées aux débits fréquents. C'est à ces stades fragiles que la sélectivité des écoulements peu fréquents mais rares joue un rôle prépondérant (Seegrit et Gard, 1972, Capra *et al.*, 1995).

3.2.1.3 Intérêt de la saisonnalisation de la VHT et de la VHPT.

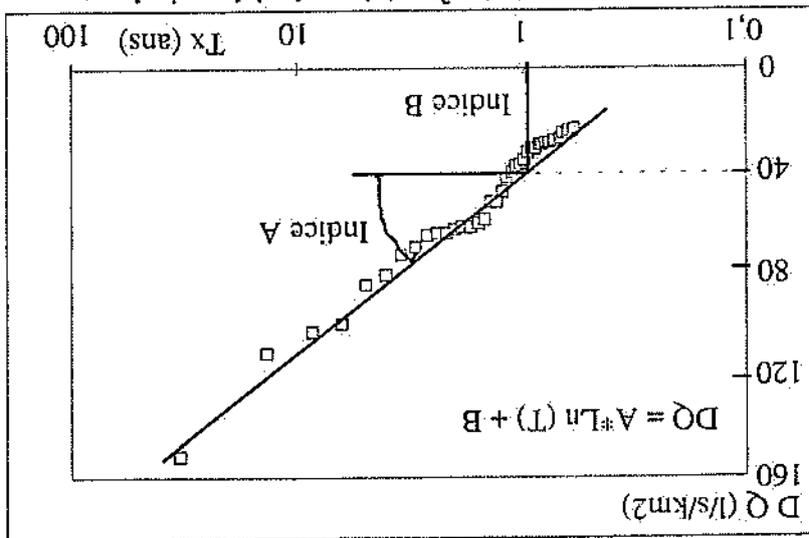
Le calcul de A et de B est montré pour la Veyle à LENT, pour le mois de mars. Les couples de points (ΔQ , Tx) sont placés dans un diagramme semi-logarithmique. La droite est l'ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance. Elle modélise la répartition des points (ΔQ , Tx). Les indices A et B représentent les paramètres de la distribution des ΔQ . Ils sont calculés à partir de l'option 7 du programme VARY. Les ΔQ les plus élevés se résument à deux paramètres faciles à calculer avec la loi exponentielle.

Sur la figure, les ΔQ sont notés ΔQ (l/s/km²).

(option 7 de VARY)

Figure 3.2.1.2 Exemple d'ajustement de ΔQ (ΔQ) en fonction de la période de retour.

La Veyle à LENT (34 km²), régime pluvial, mois de mars.



- le ΔQ pour la période de retour un an ou indice B. C'est une indication sur la borne supérieure du domaine des ΔQ fréquents. C'est également le paramètre de position des ΔQ .

Le débit médian mensuel inter-annual évolue de janvier à décembre. C'est le cas de l'Issole à St ANDRE LES ALPES (137 km²) en régime nivo-pluvial. Le trait à 14 l/s/km² indique la médiane inter-annuelle, sur toute la durée de la chronique. L'indice mensuel de distortion rend compte de la distortion des débits médians mensuels inter-annuels par rapport au débit médian inter-annual.

L'indice mensuel de distortion évalue l'écart des débits fréquents d'un mois donné à la médiane des médianes mensuelles. En effet, la médiane des débits représente les débits fréquents. L'indice mensuel de distortion évalue l'écart des débits fréquents d'un mois donné à la médiane des médianes mensuelles. En effet, la médiane des débits représente les débits fréquents.

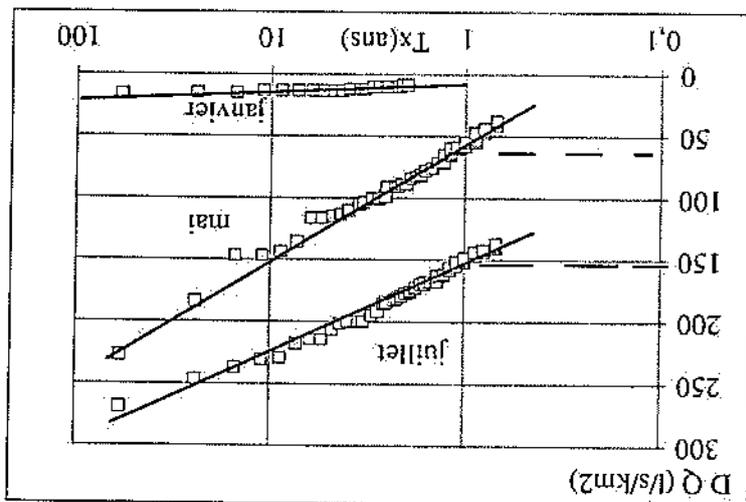
La répartition des débits fréquents selon les saisons influence *a priori* la présence des espèces aquatiques dont les cycles biologiques sont adaptés à ces débits. C'est le cas des espèces dont les stades sensibles de développement dépendent des conditions hydrodynamiques particulières. Le taux de recrutement dépend entre autres des perturbations hydrologiques de ces saisons. Les gradients d'évolution inter-saisonniers des débits fréquents définissent des périodes de VH homogènes, propres aux phases biologiques.

3.2.2 Définition de l'indice mensuel de distortion.

Enfin, il n'est pas raisonnable de descendre à un niveau de saison inférieur à un mois. Des saisons plus courtes n'apporteraient pas d'information supplémentaire et poseraient des problèmes d'échantillonnage des ΔQ . De plus, cela générerait beaucoup d'information, ce qui finirait par être difficile à gérer, même avec des moyens informatiques.

La VH est calculée par saison mensuelle pour tenir compte des cycles biologiques. En effet, l'Isère n'est pas un cas isolé. La VH évolue probablement au cours de l'année, pour tous les cours d'eau, quel que soit le régime.

Figure 3.2.1.3 Evolution des ajustements des pics de ΔQ sur les mois de janvier, mai et juillet sur l'Isère à VAL D'ISÈRE (46 km², régime glaciaire) (option 7 de VARY).



En juillet, c'est la fonte nivale puis glaciaire qui alimente les écoulements. C'est la période des hautes eaux. L'indice B est élevé par rapport aux autres mois présents mais l'indice A est comparable à celui qui est observé en mai.

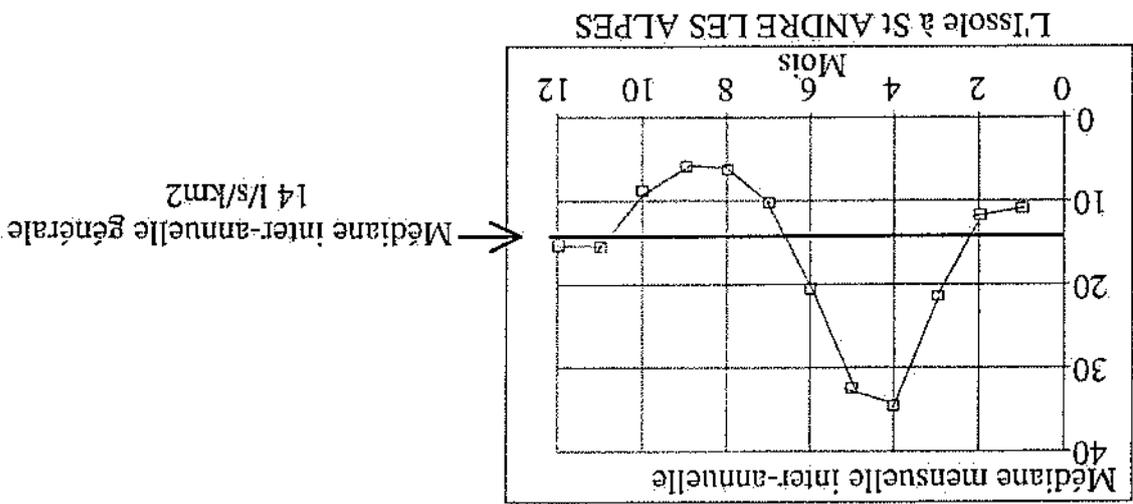


Figure 3.2.1 Débits médians inter-annuels mensuels (L'Issole à St ANDRE LES ALPES).

L'indice mensuel de distorsion du mois m est le rapport du débit médian mensuel inter-annuel du mois m et du débit médian inter-annuel. Son expression est la suivante :

$$Dm_m = MED_m / MED(m=1..12)$$

Dans cette expression,

- Dm_m représente l'indice mensuel de distorsion du mois m ,
- MED_m représente la médiane inter-annuelle des débits journaliers du mois m ,
- $MED(m=1..12)$ représente la médiane de la médiane des 12 mois de l'année, qui est très proche de la médiane annuelle car les mois ont pratiquement le même nombre de jours.

Une autre formule peut être proposée. Elle est retenue par la suite car plus facile à comprendre. C'est la suivante :

$$Dm_m = MED_m / MED_{an}$$

Dans cette expression,

- Dm_m est l'indice mensuel de distorsion du mois m ,
- MED_m est le débit médian inter-annuel des débits journaliers du mois m ,
- MED_{an} est le débit médian inter-annuel, tous mois et toutes années confondus, d'une chronique de débit.

Cet indice étant un rapport de deux débits, il est sans dimension et directement comparable d'une station à l'autre.

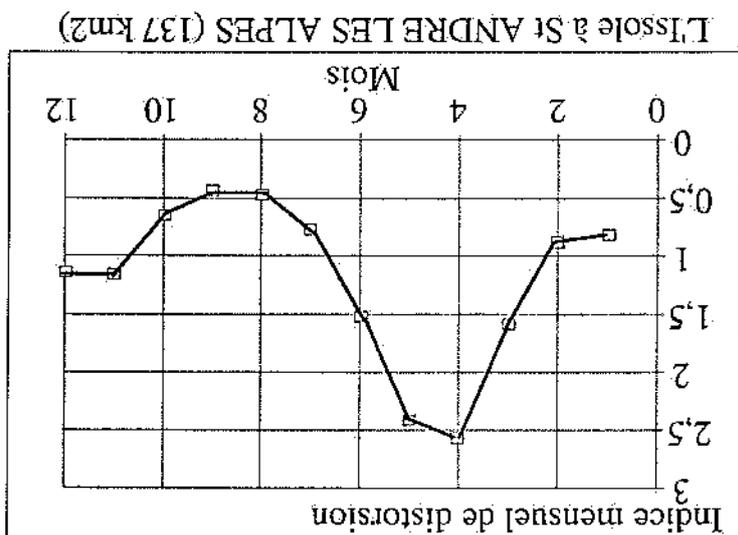
Le graphique suivant présente l'indice mensuel de distorsion pour l'Issole à Saint ANDRE-LES-ALPES, située dans les Alpes de Haute-Provence.

L'indice mensuel de distorsion et les variations de débits présentes dans ces recherches sont l'objet d'un sujet de DEA où les grands lignes des recherches ont été posées par Martin E. (1992). Des recherches complémentaires sont indispensables, c'est l'objet de cette thèse.

L'indice mensuel de distorsion rend compte de l'évolution des débits fréquents par rapport au débit médian inter-annuel.

C'est au mois d'avril, à la fonte des neiges, que les débits médians s'éloignent le plus du débit médian inter-annuel. Au contraire, l'été, les débits médians mensuels se situent à un faible niveau par rapport au débit médian inter-annuel.

Figure 3.2.2.2 Exemple d'indice mensuel de distorsion sur l'Issole à St ANDRE LES ALPES (option 4 de VARY).



3.3 Conclusion du chapitre 3. Introduction d'un nouveau concept de la VH.

Un nouveau concept de la VH est proposé pour construire des variables hydro-écologiques. Ce sont les variations de débit, notées ΔQ .

Ce concept tient compte des débits antérieurs pour définir les perturbations. Les débits antérieurs sont représentés par la médiane des débits sur 30 jours glissants. Ainsi, les ΔQ sont calculés comme la différence d'un débit d'un jour donné et la médiane des débits des 30 jours précédents.

Le choix de la médiane est justifié car elle représente les débits fréquents. Les chroniques de débit sont transformées en chroniques de ΔQ . Les ΔQ véhiculent une mémoire des débits passés, mais à court terme. Pour être comparables d'un bassin versant à l'autre, les ΔQ sont calculés en débits spécifiques.

A partir des chroniques de ΔQ , les ΔQ les plus élevés sont échantillonnés. Ils suivent généralement une loi exponentielle à deux paramètres qui définissent :

- la variabilité hydrologique peu fréquente (VHP), paramètre d'échelle des ΔQ . Il est noté indice A.

- la variabilité hydrologique fréquente (VHF), paramètre de position des ΔQ . Il est noté indice B.

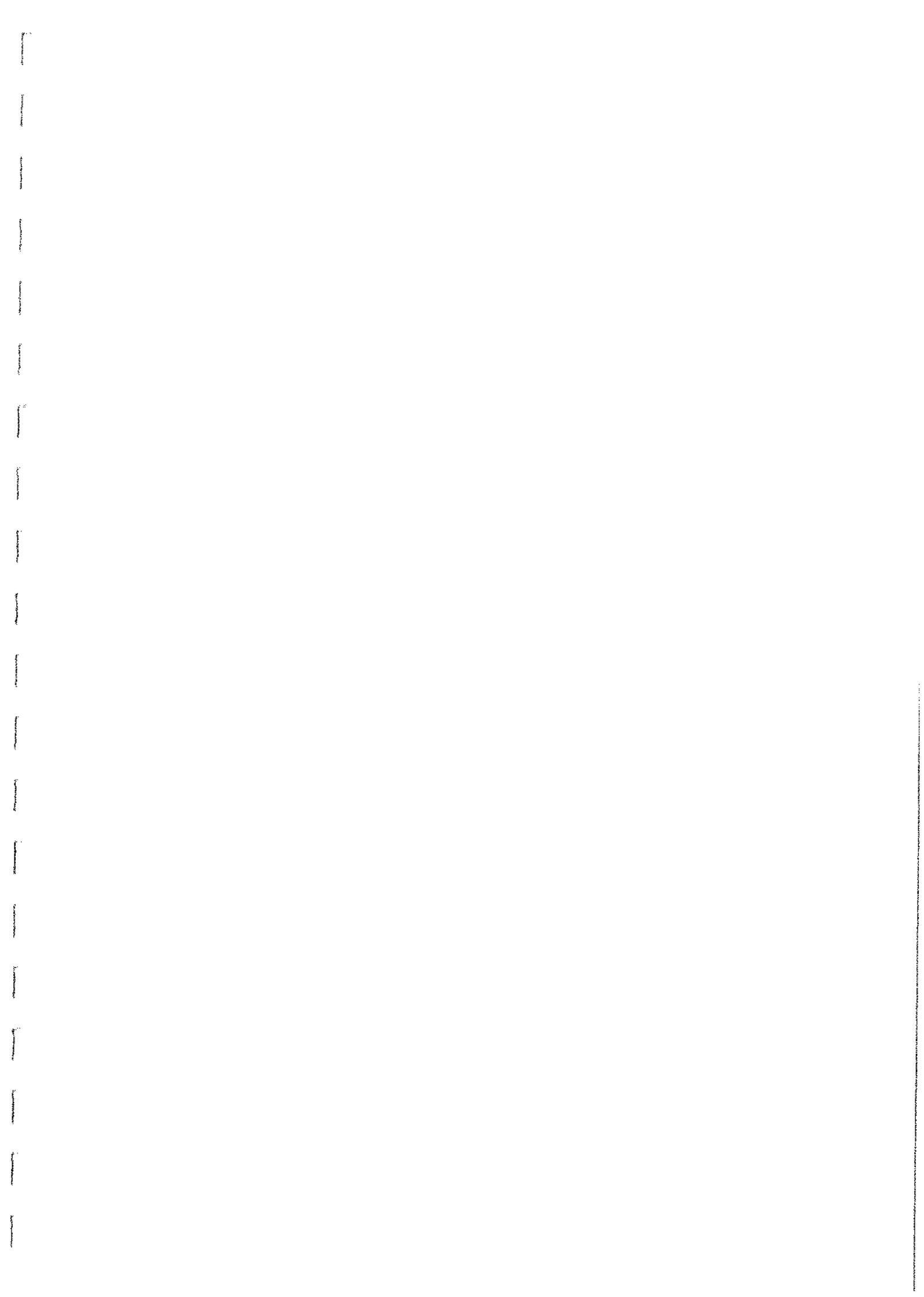
Dans un premier temps, la limite entre la VHF et la VHP est fixée à un an, pour tenir compte des cycles biologiques et de la fréquence des crues débordantes.

Comme les débits fréquents structurent également les écosystèmes aquatiques et qu'ils évoluent au cours de l'année, nous proposons un indice pour suivre cette évolution. C'est l'indice mensuel de distorsion, qui est le rapport du débit médian mensuel inter-annuel rapporté au débit médian inter-annuel. Ce rapport est sans dimension et comparable d'un bassin versant à l'autre.

L'indice Dm_m est l'analogie du coefficient saisonnier des régimes selon Parde, qui est le rapport de Qm_m et de Q_A . L'indice Dm_m est calculé à partir des débits médians mensuels alors que l'indice saisonnier est calculé à partir des débits moyens mensuels.

La VH est saisonnalisée pour tenir compte des différentes phases des cycles biologiques des espèces aquatiques. Dans un premier temps, la saison "standard" aura une durée d'un mois. Ainsi, 12 valeurs de VH sont disponibles pour une station hydrométrique et pour un descripteur. Les saisons mensuelles présentant la même VH sont regroupées avec l'Analyse de la Variance (chapitre 6).

Après avoir défini les nouvelles variables, divers tests sont proposés. L'effet de la mémoire M et du critère d'indépendance sur les ΔQ est recherché pour choisir la méthode de calcul des variabilités fréquentes et peu fréquentes. Les caractéristiques de D et Q et les caractéristiques de débit sont également comparés pour vérifier qu'ils sont suffisamment indépendants pour être conservés.



Chapitre 4 - Détermination des caractéristiques hydrologiques fréquentes (VHf) et peu fréquentes (VHpf)

Ce chapitre aborde les points suivants, comme indiqué à la fin du chapitre 3 :

- la sensibilité des ΔQ , via leurs paramètres d'échelle A et de position B, à la mémoire M prise en compte pour le calcul des variations de débit. Les ΔQ peuvent être calculés avec une médiane glissante portant sur une durée plus ou moins longue. Des mémoires M sont testées :

- 3 et 7 jours sur les 55 stations hydrométriques de référence, donc sur de petits bassins versants,
- 3 jours sur de grands bassins versants, situés sur le linéaire de la Loire et du Rhône pour vérifier si les conclusions sont les mêmes sur de tels bassins.

Dans les deux cas, l'effet de la mémoire M sur les ΔQ est recherché, mais à court terme. En effet, plus la médiane de référence est calculée à long terme, moins elle évolue avec le temps, et plus les ΔQ sont semblables.

L'effet de la mémoire prise en compte est également recherché sur les ΔQ classés pour savoir quels sont les ΔQ les plus sensibles à cette mémoire M.

- la sensibilité des ΔQ , via les indices A et B, à l'écart de date utilisé pour l'échantillonnage des ΔQ . Le calcul de ces indices repose sur l'échantillonnage des ΔQ les plus élevés, mais séparés par un écart de date minimal de 3 jours. Nous recherchons l'effet de cet écart de date sur les ΔQ avec des écarts de date qui sont de :

- 3 et 6 jours pour les 55 stations hydrométriques de référence. Comme ce sont des bassins versants d'une taille inférieure à 1 000 km², nous pouvons considérer que des ΔQ échantillonnés avec un écart de date de 6 jours sont indépendants. Des écarts de date plus grands n'ont pas été considérés car nous recherchons à fixer la limite supérieure des ΔQ fréquents avec l'indice B.

- 3, 10 et 20 jours sur de grands bassins versants, d'une surface allant de 6 000 à 115 000 km², situés sur la linéaire de la Loire et du Rhône. Des écarts de date plus longs ont été envisagés à cause de la longueur des crues, qui peut entraîner une plus grande dépendance des ΔQ échantillonnés. L'indépendance des ΔQ échantillonnés n'a pas été vérifiée pour des écarts de date supérieurs à 20 jours car les échantillons de ΔQ ne sont plus assez fournis pour calculer les indices A et B, à cause de la saisonnalisation de la VH.

Pour accepter H_0 , il faut que la valeur absolue de t soit inférieure ou égale à la valeur de $t_{\alpha/2}$ calculée au moyen d'une table de Student. Dans le cas contraire, le risque d'accepter à tort l'hypothèse alternative H_1 : $P \neq 1$ est de 5%. La valeur α' de la probabilité de la variable de Student est répartie dans les tableaux d'analyse et composée au seuil de $\alpha = 0,05$ comme critère de décision. Les probabilités en gras signifient que la pente de la droite de régression ne peut pas être considérée comme très différente de 1.

$$S_x^2 = \frac{[\sum X^2 - (\sum X)^2 / N]}{(N-1)}$$

avec S_x^2 la variance de la variable dépendante telle que :

$$\text{Var}(a) = \frac{[(\sigma_e^2) / (N-2)]}{(N-1)} * S_x^2$$

avec a la pente du modèle de régression linéaire, P_{th} la pente théorique prise ici égale à 1 et $\text{Var}(a)$ la variance de la pente de la droite de régression, qui se calcule de la façon suivante :

$$t = \frac{[a - P_{th}]}{[\text{Var}(a)]^{1/2}}$$

La variable de Student est calculée comme suit :

est de type bilatéral et utilise une distribution de Student à $N-2$ degrés de liberté. obtenues pour deux mémoires glissantes différentes sont identiques. α est choisi de 5%. L'hypothèse H_0 telle que la pente du modèle soit égale à l'unité, c'est à dire que les valeurs - à un test sur la pente de la droite de régression. $P = 1$ exprime que l'on teste - σ_e , qui est l'écart-type des résidus de la variable dépendante;

expliquée par le modèle, - au coefficient de détermination R^2 . Il rend compte du pourcentage de la variance corrélations sera appréciée grâce : justifie les graphiques. Ces modèles sont suffisants pour cette approche. La qualité des Les comparaisons sont effectuées avec des régressions linéaires et multiples, ce que

corrélations sont donc établies à partir d'un nombre important d'individus. Les comparaisons sont effectuées avec un effectif allant de 48 individus pour le régime glaciaire (4 stations et 12 mois) à 168 individus en régime pluvial (17 stations et 12 mois). Les

- ΔQ décennal et le débit décennal, qui seront notés $\Delta Q[10]$ et $Q[10]$.
- la crue annuelle et l'indice B. Ce sont, respectivement, les paramètres de position des débits et des ΔQ .
- le gradex des débits et l'indice A. Ce sont, respectivement, les paramètres d'échelle des débits et des ΔQ .
- les ΔQ et les débits sont comparés pour s'assurer de leur indépendance avant de poursuivre les traitements. Nous comparons :

4.1 Influence de la mémoire M prise en compte sur la VH.

Les ΔQ représentent un écart de débit par rapport à un état de référence. Cet état de référence est une sorte de mémoire des événements hydrologiques passés. Cette mémoire est notée mémoire M. Cependant, les ΔQ peuvent être calculés par rapport à d'autres références.

4.1.1 Généralités et définition de la notion de la mémoire calculée sur

une durée M.

La référence utilisée pour calculer les ΔQ est, pour des bassins versants d'une taille inférieure à 2 000 km² :

- la médiane glissante sur 30 jours,
- la médiane glissante sur 7 jours,
- la médiane glissante sur 3 jours.

Par convention, les paramètres sont notés comme suit :

"A_j jours" ou "B_j jours" signifie qu'il s'agit des indices A ou B calculés avec des ΔQ calculés avec une médiane des débits sur j jours consécutifs. La mémoire M servant de référence est de j jours.

"(ΔQ)x%" signifie ΔQ non dépassé j% des jours. (ΔQ)x j% correspond aux ΔQ classés par ordre décroissant, notés Qx j%. Les (ΔQ)x sont calculés par saisons mensuelles. Pour une fréquence donnée, il y a donc 12 (ΔQ)x par station hydrométrique. Divers (ΔQ)x j% sont comparés pour savoir quels sont les (ΔQ)x qui changent le plus avec la mémoire.

Le terme de "médiane glissante de j jours consécutifs" correspondra au calcul des ΔQ avec une médiane glissante sur j jours consécutifs.

Sur un exemple, nous allons comparer l'effet de la mémoire M sur 30 jours puis sur 3 jours sur les ΔQ . Ensuite, une approche statistique est proposée sur l'échantillon des 55 bassins versants.

4.1.2 Exemple de l'effet de la mémoire de 3 jours sur les indices A et B.

(M = 3 jours).

L'exemple choisi est le Rhins à AMPLÉPUIS (114 km²) pour l'année 1974. C'est un cours d'eau situé sur les rebords sud des Monts du Beaujolais, dans le département du Rhône. Ce cours d'eau a un régime pluvial.

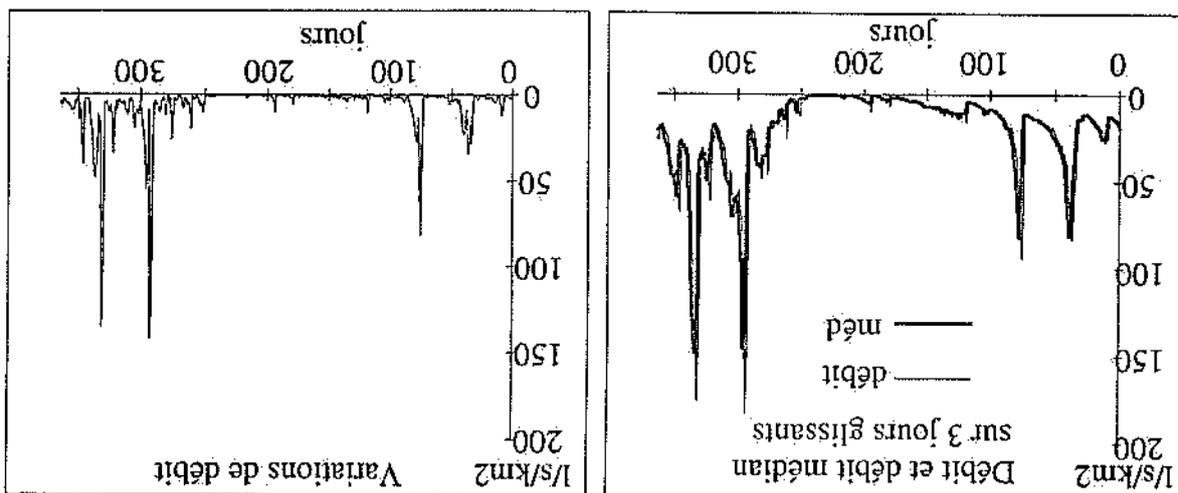
4.1.2.1 Exemple de mémoire sur 30 jours.

Le graphique de gauche (figure 4.1.2.1) représente la chronique de débit au pas de temps journalier et la médiane mobile à 30 jours.

Comme la médiane est calculée sur 30 jours, elle a une certaine inertie vis à vis des crues. Quand les débits augmentent, la médiane des débits augmente aussi, mais avec un certain retard. C'est la même chose lorsque les débits diminuent.

La médiane glissante des débits sur 3 jours évolue très vite selon les débits. Dès qu'ils augmentent, elle augmente aussi. Si les débits baissent, elle baisse aussi. Les ΔQ sont plus faibles que précédemment mais les ΔQ les plus forts restent assez élevés. Dans cet exemple, les ΔQ les plus forts sont assez proches des ΔQ les plus forts calculés avec la mémoire sur une durée de 30 jours.

Figure 4.1.2.2 Débit et médiane glissante sur 3 jours et chronique de ΔQ sur un exemple.

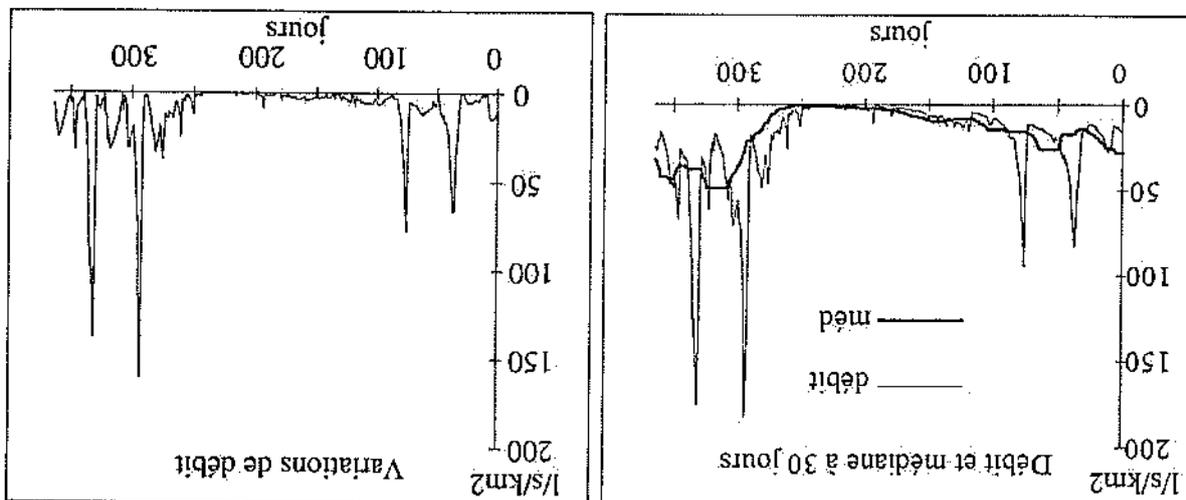


La même expérience est réalisée, avec une médiane mobile calculée sur une durée de 3 jours.

4.1.2.2 Exemple de mémoire à 3 jours.

Le graphique de droite représente la valeur absolue des ΔQ , qui sont calculés au pas de temps journalier. Avec une mémoire de 30 jours, les ΔQ atteignent 150 l/s/km² alors qu'ils sont très faibles en été car les débits ne varient pratiquement pas. Ces forts ΔQ correspondent aux crues et ce sont des ΔQ positifs. En effet, les crues sont supérieures à la médiane des débits des 30 jours précédents.

Figure 4.1.2.1 Débit et médiane glissante des débits sur 30 jours puis chronique de ΔQ sur un exemple.



4.1.3 Influence de la mémoire M sur les indices A et B calculés avec une mémoire M de 7 et de 30 jours.

A partir des ΔQ calculés avec une mémoire M de 7 jours, les indices A7 et B7 ont été calculés selon la procédure utilisée avec les ΔQ calculés avec la mémoire de 30 jours. Nous comparons respectivement :

- A7 et A30 pour tester l'effet de la mémoire M sur la VHPf,
- B7 et B30 pour tester l'effet de la mémoire M sur la VHF,
- $\Delta Q[10]7$ et $\Delta Q[10]30$ pour tester l'effet de la mémoire sur le ΔQ correspondant à la limite entre le domaine des ΔQ peu fréquents et rares.

Dans l'ensemble, les corrélations présentées dans le tableau 4.1.3 sont faibles.

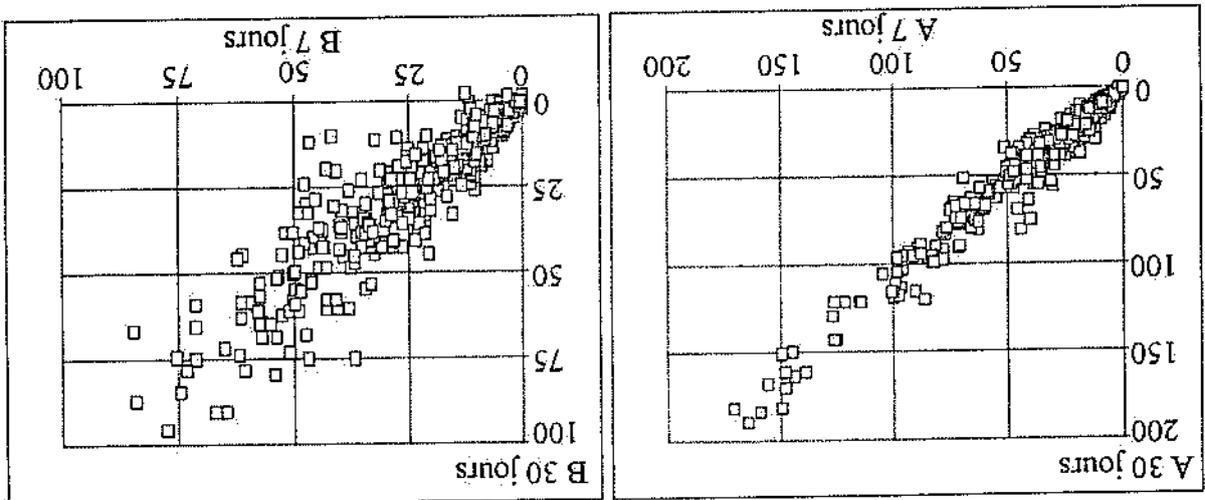


Figure 4.1.3 Effet d'une mémoire M de 7 et 30 jours sur les indices A et B.

L'indice A est peu affecté par la mémoire M, les ΔQ les plus forts ($T \approx 10$ ans) correspondent à des crues très fortes. Ces crues ne durent pas plus d'une journée sur des bassins versants de quelques centaines de km^2 . Elles correspondent à des augmentations brutales de débit.

L'indice B est plus ou moins sensible à la mémoire M selon le régime. En régime à influence pluviale, la pente de la droite de régression est voisine de l'unité avec une probabilité comprise entre 0,30 pour le régime pluvio-nival et 0,50 pour le régime pluvial.

		A_{30}/A_7			B_{30}/B_7			$\Delta Q[10]_{30}/\Delta Q[10]_7$		
Régime	R ²	ce	P=1	R ²	ce	P=1	R ²	ce	P=1	
Glaciaire	0,89	8,96	0,35	0,96	6,25	< 0,001	0,93	26,5	< 0,001	
Nivo-glaciaire	0,79	4,11	0,05	0,94	3,18	< 0,001	0,91	9,64	< 0,001	
Nival	0,91	4,39	0,90	0,87	5,73	< 0,001	0,93	11,3	0,05	
Nivo-pluvial	0,96	5,62	< 0,001	0,92	5,85	0,10	0,98	11,7	< 0,001	
Pluvio-nival	0,95	4,12	< 0,001	0,92	4,58	0,30	0,98	7,22	< 0,001	
Pluvial	0,98	5,99	< 0,001	0,82	5,31	0,50	0,99	11,2	< 0,001	

Tableau 4.1.3 : Influence de la mémoire glissante de M jours sur les différentes caractéristiques de ΔQ .

La mémoire M a peu d'influence sur l'indice A car les ΔQ ($T \approx 10$ ans) sont relativement peu affectés par cette durée, surtout pour les régimes dominés par les pluies. En effet, les variations de débit les plus fortes correspondent aux crues les plus fortes, qui sont brutales et ne durent qu'une journée ou deux.

La VHT décroît lorsque la mémoire M est courte, surtout pour les régimes dominés par la fonte d'un stock de neige ou de glace. La médiane glissante n'est pas négligeable face à la crue annuelle, d'où des ΔQ fréquents d'autant plus faibles que la mémoire M est courte. En effet, plus elle est courte, plus la médiane est sensible aux augmentations de débit. En régime à influence pluviale, la mémoire M a peu d'effet sur les ΔQ fréquents.

Nous comparons :

- A₃₀ et A₃₀ pour tester l'effet de la mémoire sur la VHT,
- B₃₀ et B₃₀ pour tester l'effet de la mémoire sur la VHT,
- $\Delta(Q[10])_3$ et $\Delta(Q[10])_{30}$ pour tester l'effet de la mémoire sur la VHT.

de référence.

4.1.4.1 Influence de la mémoire sur les indices A et B sur les stations

L'effet de la mémoire sur les indices A et B et les ΔQ classés est recherché sur les stations de référence mais aussi sur de grands bassins versants, d'une surface supérieure à 6 000 km².

Les ΔQ ont été calculés avec une médiane glissante des débits sur 3 jours consécutifs pour savoir si une mémoire M si courte joue davantage sur la VHT et la VHT. En effet, la médiane des débits évolue très vite avec les débits quand elle est calculée sur une telle durée.

mémoire M de 3 et de 30 jours.

4.1.4 Influence de la mémoire M sur les indices A et B calculés avec une

de temps journalier.

prévisible pour les organismes aquatiques. Cela traduit des variations de débit brusques au pas

Quand la VHT est insensible à la mémoire, nous pouvons supposer qu'elle soit peu

régime glaciaire et nival.

les crues peuvent survenir même dans un contexte de basses eaux alors que c'est moins vrai en

glaciaire ou nival mais peu dépendants les uns des autres en régime pluvial. En régime pluvial,

la bibliographie. En effet, les débits d'un jour à l'autre sont très liés entre eux en régime

mémoire M. Cette information est à relier avec les notions de prévisibilité évoquée au cours de

Les régimes se différencient légèrement par la sensibilité des indices A, B et les $\Delta Q[10]$ à la

l'indice B et sur ΔQ décennal pour tous les régimes.

versants de quelques centaines de kilomètres carrés. La mémoire M n'a pas le même effet sur

Lorsque la pluie alimente les écoulements, les crues durent peu de temps sur des bassins

crues (crue glaciaire, nivale ou pluviale) et à la rapidité des variations de débit déjà exposée.

La sensibilité de l'indice B et de ΔQ décennal à la mémoire M s'explique par le type de

régression est différente de l'unité avec une probabilité supérieure à 95% pour tous les régimes.

$\Delta Q[10]$ n'est pas le même selon le type d'écoulement. Cependant, la pente de la droite de

Le rapport entre les $\Delta Q[10]$ évoluent selon les régimes. L'effet de la mémoire M sur les

Les $(\Delta Q)_x$ sont à l'image des débits classés inter-annuels. Il s'agit des ΔQ classés mensuels inter-annuels. Pour une fréquence donnée, nous avons 12 $(\Delta Q)_x$ pour une station hydrométrique. Nous cherchons à connaître quelle est l'influence de la mémoire M sur les $(\Delta Q)_x$ pour des mémoires M de 3 et de 30 jours. Ainsi, nous comparons $(\Delta Q)_x$ avec $(\Delta Q)_{x30}$. L'approche statistique est proposée par régime. La mémoire M a bien entendu une influence sur les $(\Delta Q)_x$.

4.1.4.2 Influence de la mémoire M sur les ΔQ classés inter-annuels pour M égal à 3 et 30 jours.

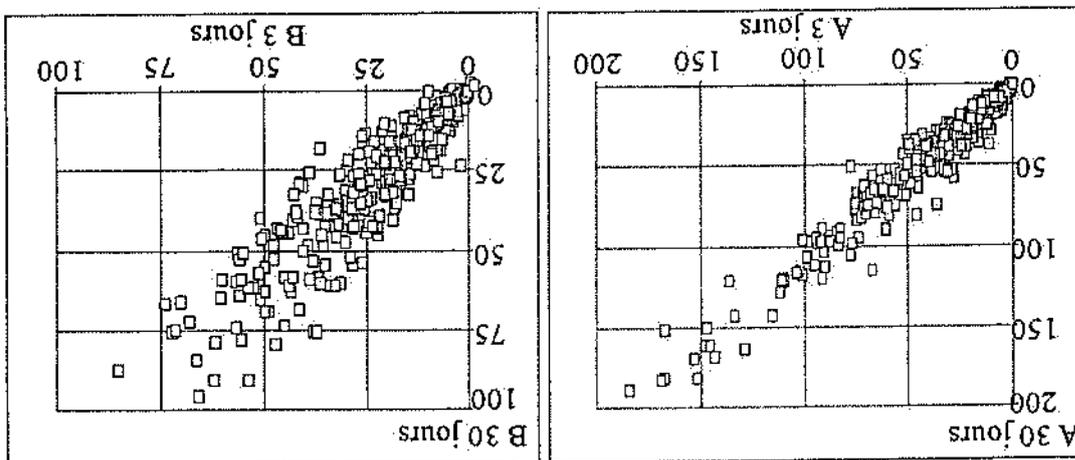
Dans l'ensemble, les pentes des droites de régression sont différentes de l'unité, sauf en régime nivéal, pour l'indice A .
 Pour un calcul pertinent des ΔQ , le choix de la mémoire M a une grande importance sur la VHT seulement. Le choix de la mémoire M pour calculer les ΔQ devra être précisé avec les hydrobiologistes.

Tableau 4.1.4.1 : Influence de la mémoire glissante de M jours sur les valeurs de différentes caractéristiques des ΔQ .

	A_{70}/A_3		B_{30}/B_3		$AQ[10]_{30}/AQ[10]_3$	
Régime	R^2	$P=1$	R^2	$P=1$	R^2	$P=1$
Glaciaire	0,84	0,15	0,92	8,97	0,89	34,1
						< 0,001
Nivo-glaciaire	0,70	0,25	0,91	4,10	0,83	13,1
						< 0,001
Nivéal	0,88	0,60	0,83	6,49	0,89	14,2
						0,005
Nivo-pluvial	0,94	0,001	0,90	6,55	0,96	16,6
						< 0,001
Pluvio-nivéal	0,95	4,11	0,87	5,79	0,97	8,8
						< 0,001
Pluvial	0,98	6,73	0,79	5,59	0,99	12,8
						< 0,001

La mémoire M a donc un effet différent selon les régimes sur les ΔQ fréquents. La sensibilité des ΔQ fréquents à la mémoire M est également un moyen de typologie des régimes.

Figure 4.1.4.1 Effet d'une mémoire M de 3 et 30 jours sur les indices A et B .



La sensibilité des indices A et B à la mémoire M a été testée pour des mémoires de 3 et 30 jours. L'effet de la mémoire M sur les ΔQ des grands bassins versants est sans doute influencé par la dépendance des débits successifs.

Les grands bassins versants sont situés sur le linéaire de la Loire (10 stations) et du Rhône (7 stations). Ces grands bassins versants ont une surface allant de 6 300 à 115 000 km².

4.1.4.3 Influence de la mémoire M sur les indices A et B pour des mémoires M de 3 et 30 jours sur des grands bassins versants.

La mémoire M à prendre en compte n'est pas forcément la même selon les espèces étudiées, qui se régénèrent plus ou moins vite.

Les fortes crues correspondent à une augmentation brutale des débits, surtout en régime pluvial. La médiane mobile des débits n'a pas le temps d'augmenter dès l'accroissement des débits. Ces ΔQ peu fréquents sont des perturbations potentielles des écosystèmes aquatiques.

Les (ΔQ)x sont plus faibles lorsque la mémoire M passe de 30 à 3 jours, quel que soit leur fréquence.

Tableau 4.1.4.2 Influence de la mémoire glissante de M jours sur les valeurs de différents ΔQ classés.

	$\Delta Q[1\%]_{30} / \Delta Q[1\%]_{30}$	$\Delta Q[5\%]_{30} / \Delta Q[5\%]_{30}$	$\Delta Q[15\%]_{30} / \Delta Q[15\%]_{30}$	$\Delta Q[25\%]_{30} / \Delta Q[25\%]_{30}$	$\Delta Q[50\%]_{30} / \Delta Q[50\%]_{30}$	$\Delta Q[75\%]_{30} / \Delta Q[75\%]_{30}$	$\Delta Q[95\%]_{30} / \Delta Q[95\%]_{30}$
Régime	R ²	σ_e	R ²	σ_e	R ²	σ_e	R ²
Glaciaire	0,78	29,8	0,89	11,7	0,95	3,59	σ_e
Nivo-glaciaire	0,79	7,90	0,86	3,58	0,83	1,80	1,58
Nival	0,80	14,4	0,85	5,18	0,89	1,54	2,34
Nivo-pluvial	0,75	27,8	0,82	9,98	0,88	1,91	1,54
Pluvio-nival	0,65	20,8	0,85	6,62	0,85	1,91	1,54
Pluvial	0,77	44,6	0,91	9,65	0,87	1,54	1,54

Note : les ΔQ sont classés par ordre décroissant. L'expression entre [] indique qu'il s'agit de valeurs maximales associées à un % ou à une fréquence au dépassement. La valeur de la mémoire glissante est exprimée par un indice en jours (3 ou 30).

La mémoire M a peu d'effet sur la VHP. Les ΔQ peu fréquents sont peu influencés par la mémoire M. En effet, les crues les plus fortes sont dues à des augmentations de débit qui se produisent brutalement (un jour ou deux pour des débits journaliers), surtout en régime pluvial. Mais c'est aussi exact en régime glaciaire ou nive-glaciaire, qui ne sont pas à l'abri de crues pluviales quelques mois par an.

La sensibilité de la VH et de la VHP à la mémoire M a été testée dans le paragraphe 4.1.

4.1.5 Conclusion du paragraphe 4.1. Effet de la mémoire M sur les indices A et B et les $(\Delta Q)x$.

Le choix de la mémoire M utilisée pour le calcul des ΔQ est donc important sur la VH et la VHP, même sur de grands bassins versants.

Ces corrélations confirment que la VHP est plus sensible que la VH à la mémoire des ΔQ , le coefficient de passage étant de 1,174 pour l'indice A et de 1,082 pour l'indice B. Ces coefficients doivent être considérés comme significativement différents de l'unité ($P < 0,001$).

Pour les $\Delta Q[10]$, nous avons :

$$\Delta Q[10]_{30} = 1,194 \Delta Q[10]_3 - 0,670$$

avec $R^2 = 0,91$ et la probabilité d'avoir une pente de la droite de régression égale à 1 inférieure à 0,001.

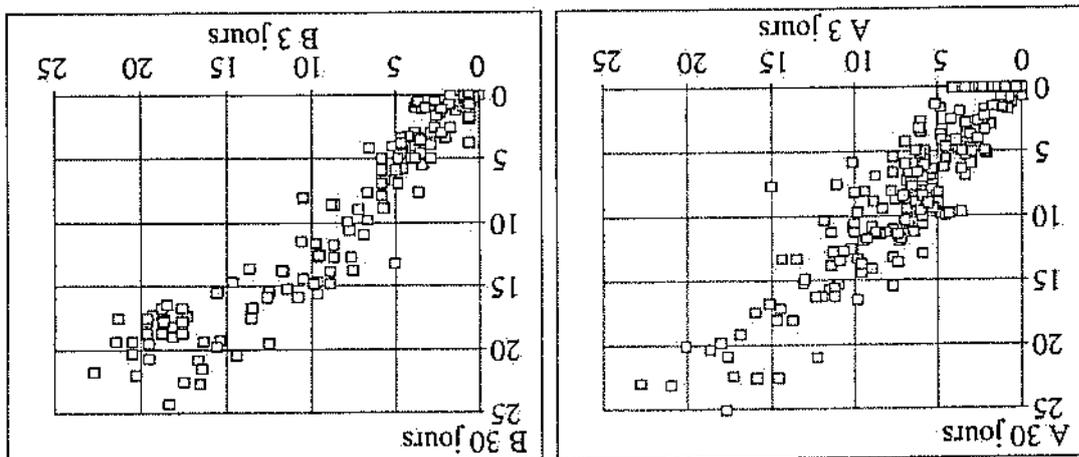
avec $R^2 = 0,92$ et l'écart-type des résidus selon B_{30} égal à 1,92 et la probabilité d'avoir une pente de la droite de régression égale à 1 inférieure à 0,001.

avec $R^2 = 0,83$ et l'écart-type des résidus selon A_{30} égal à 1,96 et la probabilité d'avoir une pente de la droite de régression égale à 1 inférieure à 0,001.

Les corrélations qui lient les indices A et B en fonction de la mémoire M sont les suivantes :

Les indices A et B sont sensibles à la mémoire M. Les indices A et B calculés avec une mémoire de 30 jours sont plus forts que ceux calculés avec une mémoire M de 3 jours.

Figure 4.1.4.3 Comparaison de A et de B calculés avec M = 3 jours et A et B calculés avec M = 30 jours sur 17 grands bassins versants.



problème de l'indépendance des ΔQ échantillonnées.

115 000 km². Sur de tels bassins versants, les crues sont prolongées dans le temps, d'où le

- 3, 10 et 20 jours sur des bassins versants d'une surface comprise entre 6 000 et
- 3 et 6 jours sur des bassins versants d'une taille inférieure à 2 000 km².

qui est de :

Ainsi, la VHT et la VHPT sont comparées pour chaque régime avec un écart de date

influence glaciaire ou nivale.

ne soit pas totalement indépendants les uns des autres, en particulier pour les régimes à date de 3 jours, il arrive que deux ΔQ soient issus d'une crue complexe dont les pics de débit

L'augmentation de l'écart de date restreint l'efficacité des échantillons de ΔQ . Pour un écart de

Dans ce paragraphe, la sensibilité des indices A et B au critère d'indépendance est testée.

effet, la loi exponentielle ne s'applique qu'à des valeurs indépendantes les unes des autres.

L'indépendance des ΔQ échantillonnés est essentielle pour le calcul des indices A et B. En

également noté critère dans ce paragraphe, le mot indépendance étant sous-entendu.

Le critère d'indépendance est l'écart de date qui sépare deux ΔQ échantillonnés. Il est

échantillonnés.

choisi égal à 3 jours pour respecter l'indépendance des pics de variations de débits

écart de date égal à 3 jours et sur l'utilisation de la loi exponentielle. Cet écart de date a été

Le calcul de la VHT et de la VHPT repose sur l'échantillonnage des pics de ΔQ séparés d'un

4.2 Recherche de l'effet du critère d'indépendance sur la VHT et sur la VHPT.

compte pour calculer les ΔQ .

Pour rechercher l'effet de la VH sur les EEC, il faudra choisir la mémoire M prise en

évidente.

événements appartenant à une autre saison, dont la signification sur les EEC n'est pas

logique compte tenu des cycles du benthos. De plus, une telle mémoire ne tient compte

Pour la suite des recherches, nous gardons une mémoire de 30 jours car elle paraît

diminuent lorsque la mémoire M est courte.

régimes (glaciaire, nivale et pluvial). Les ΔQ sont également sensibles à la mémoire M. Ils

fréquents ($T \approx 1$ an) sensibles à la mémoire M. La mémoire M sur les ΔQ distingue les divers

produit. À l'inverse, les crues glaciaires ou nivales sont durables et intenses, d'où des ΔQ

M. Cela est dû à la rapidité avec laquelle les débits augmentent lorsqu'une crue pluviale se

régimes. Les régimes à influence pluviale présentent les ΔQ les moins sensibles à la mémoire

Enfin, la réponse à la mémoire M de la VHT et de la VHPT n'est pas la même selon les

surtout des débits fréquents, d'où des ΔQ fréquents plus faibles.

La mémoire M a plus d'effet sur la VHT. Cela est dû à l'inertie de la médiane vis à vis des

débits. Lorsque la mémoire M est courte, la médiane glissante se rapproche des débits, et

C'est en régime pluvial que l'effet du critère d'indépendance est le plus fort sur la VHF. Des ΔQ fréquents échantillonnés avec un critère d'indépendance de 3 jours ne le sont plus lorsque ce critère est porté à 6 jours, en particulier en régime pluvial, d'où une baisse de la VHF.

L'indice B est relativement sensible au critère d'indépendance. En effet, l'indice B diminue lorsque le critère d'indépendance passe de 3 à 6 jours.

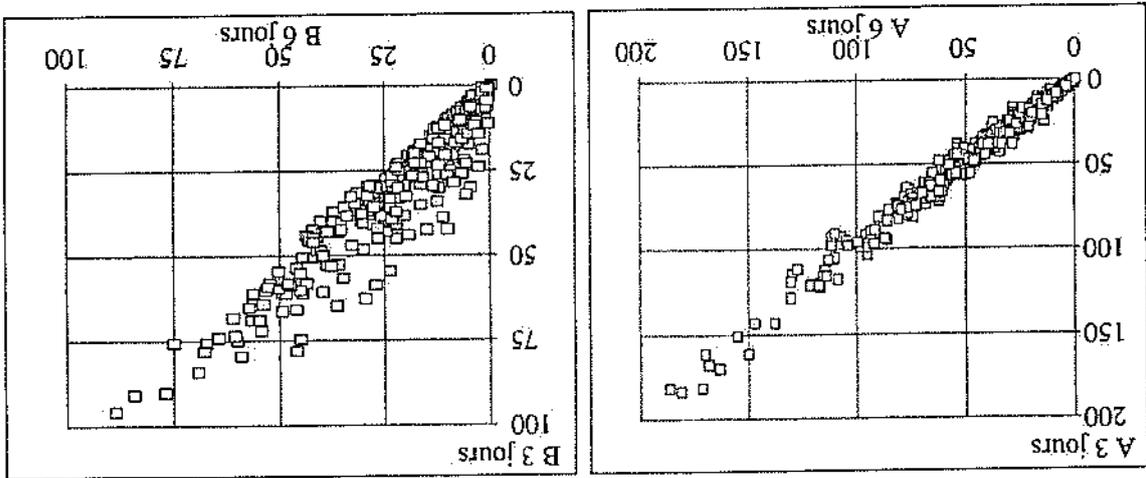
L'indice B est plus sensible au critère d'indépendance que l'indice A. En effet, l'échantillonnage avec un critère de 6 jours supprime surtout de faibles ΔQ .

- l'indice A_3 et l'indice A_6 ,
- l'indice B_3 et l'indice B_6 ,
- $(\Delta Q_{10})_3$ et $(\Delta Q_{10})_6$,

comparés, selon un critère d'échantillonnage de 3 et de 6 jours. Ainsi, nous comparons paramètres d'échelle et de position des ΔQ . Seuls les indices A et B et les ΔQ_{10} sont

L'effet du critère d'indépendance sur les ΔQ est perçu au travers des indices A et B. En effet, si le critère est pris à 3 jours, l'échantillonnage retient plus de ΔQ que si ce critère est égal à 6 jours. La valeur de rang n , classée par ordre décroissant, est donc plus forte avec un critère de 3 jours qu'avec un critère de 6 jours.

Figure 4.2.1 Comparaison des indices A et B calculés avec un critère de 3 jours avec les indices A et B calculés avec un critère de 6 jours.



- la VHF est sensible à ce critère.
- la VHF est peu sensible au critère d'indépendance servant à l'échantillonnage des ΔQ .

La corrélation entre les indices A et B calculés avec un critère d'indépendance de 6 jours en fonction de A et B calculés avec le critère d'indépendance de 3 jours est présentée (figure 4.2.1). Tous les régimes sont représentés, d'où le nombre élevé de points.

4.2.1 Effet du critère d'indépendance sur les indices A et B sur les stations de référence.

Dans le paragraphe 4.2, " A_n " ou " B_n " signifie que les indices A et B ont été calculés en échantillonnant les ΔQ avec un écart de date de n jours.

Sur de grands bassins versants, les pics de ΔQ échantillonnés ne sont pas forcément indépendants les uns des autres, à cause de la dépendance des débits successifs. Des ΔQ peuvent être issus d'une crue complexe, qui peut durer plusieurs semaines sur des bassins versants comme la Loire à MONTJEAN (115 000 km²) ou à la CHAPELLE SUR LOIRE (81 100 km²).

L'influence du critère d'échantillonnage des ΔQ est recherchée sur les indices A et B et sur $\Delta Q[10]$ pour des critères d'échantillonnage de 3, 10 puis 20 jours. Ainsi, sont comparés :

- l'indice A_3 avec l'indice A_{10} , puis l'indice A_3 avec l'indice A_{20} et l'indice A_{10} avec l'indice A_{20} .
- l'indice B_3 avec l'indice B_{10} , puis l'indice B_3 avec l'indice B_{20} et l'indice B_{10} avec l'indice B_{20} .
- $\Delta Q[10]_3$ avec $\Delta Q[10]_{10}$, puis $\Delta Q[10]_3$ avec $\Delta Q[10]_{20}$ et $\Delta Q[10]_{10}$ avec $\Delta Q[10]_{20}$.

Un grand bassin versant a une surface comprise entre 6 000 et 115 000 km². Il s'agit de 17 stations hydrométriques situées sur le linéaire du Rhône (7 stations) et de la Loire (10 stations).

versants.

4.2.2 Effet du critère d'indépendance sur la VH sur des grands bassins

Les $\Delta Q[10]$ sont peu sensibles au critère d'échantillonnage. Ils sont peu fréquents et habituellement espacés d'une durée supérieure à 6 jours.

Pour des bassins versants d'une taille inférieure à 2 000 km², la VHF est sensible au critère d'échantillonnage des ΔQ alors que la VHP ne l'est que peu. La VHT diminue lorsque le critère d'échantillonnage augmente.

Tableau 4.2.1 Influence du critère d'échantillonnage pour différentes caractéristiques des ΔQ calculées avec $M = 30$ jours et pour des bassins versants de moins de 2 000 km².

Régime		A_3/A_6		B_3/B_6		$\Delta Q[10]_3/\Delta Q[10]_6$	
R ²	ce	P=1	R ²	ce	P=1	R ²	ce
0,98	3,88	<0,001	0,98	6,11	<0,001	0,99	6,06
0,98	1,44	0,40	0,99	1,58	<0,001	0,99	2,45
0,97	2,55	<0,001	0,96	3,18	<0,001	0,99	4,50
0,97	4,93	<0,001	0,90	6,62	<0,001	0,99	8,08
0,96	3,62	0,10	0,91	4,74	0,005	0,99	5,34
0,98	6,52	<0,001	0,55	9,47	<0,001	0,99	9,86
0,98	0,98		0,98	0,98		0,98	0,98

Ce test soulève le problème de l'indépendance des ΔQ fréquents. Cette limite est connue pour les crues, la loi exponentielle n'est pas utilisable pour les crues d'une période de retour inférieure à 0,5 an. Il n'est pas conseillé de calculer les ΔQ pour Tx inférieur à 0,5 an.

La recherche de l'influence du critère d'échantillonnage des ΔQ a porté sur des bassins versants de diverses surfaces pour savoir si l'indépendance des ΔQ est la même selon leur taille. Les conclusions sont les suivantes :

4.2.3 Conclusion de l'influence du critère d'indépendance sur la VH.

Pour les grands bassins versants, l'échantillonnage des ΔQ avec un écart de date de 10 jours est préconisé.

Cela explique que l'indice A soit sensible au critère d'indépendance. Avec un critère de 10 jours, des ΔQ peu fréquents ne sont pas sélectionnés alors qu'ils le sont pour un critère de 3 jours. Cette comparaison confirme qu'il faut prendre un critère d'au moins 10 jours pour échantillonner les ΔQ peu fréquents sur un grand bassin versant.

pour une durée de 3 et 10 jours. Les $\Delta Q(10)$ sont indépendants les uns des autres quand ils $\Delta Q(10)$ calculé avec un critère de 10 ou de 20 jours est très proche de 1. Ce n'était pas le cas celui calculé avec un critère d'indépendance de 20 jours. En effet, le coefficient de passage de $\Delta Q(T = 10 \text{ ans})$ est sensible au critère d'indépendance. $\Delta Q(10)$ doit être calculé avec un critère d'indépendance de 10 jours.

Lorsque le critère d'échantillonnage est pris à 10 jours, des fortes valeurs de ΔQ ne sont pas échantillonnées alors qu'elles le sont avec un critère de 3 jours. Un critère d'échantillonnage de 3 jours n'est pas suffisant pour calculer la VHpf sur un grand bassin versant car les ΔQ peu fréquents échantillonnées ne sont pas indépendants. Ils sont issus de crues importantes et durables. Il faut échantillonner les ΔQ avec un critère d'échantillonnage d'au moins 10 jours pour en assurer l'indépendance.

Les indices A et B sont affectés par l'indépendance des pics de ΔQ . En effet, l'indice A est plus fort avec un critère d'indépendance de 10 jours qu'avec un critère de 3 jours. Par contre, l'indice B décroît quand le critère d'indépendance augmente. Dans les deux cas, les régressions sont assez bonnes. L'indice A est très sensible au critère d'indépendance alors que l'indice B est peu sensible à ce critère.

Tableau 4.2.2 Effet de la mémoire M sur les indices A et B et $\Delta Q(10)$ pour $M = 3$ et 10 jours.

A_1/A_{10}		B_3/B_{10}		$\Delta Q(10)_3/\Delta Q(10)_{10}$	
R ²	0,70	R ²	0,84	R ²	0,87
σe	2,59	σe	2,71	σe	5,56
P=1	< 0,001	P=1	< 0,001	P=1	< 0,001
A_3/A_{20}		B_3/B_{20}		$\Delta Q(10)_3/\Delta Q(10)_{20}$	
R ²	0,58	R ²	0,70	R ²	0,84
σe	3,04	σe	3,66	σe	6,10
P=1	< 0,001	P=1	< 0,001	P=1	< 0,001
A_{10}/A_{20}		B_{10}/B_{20}		$\Delta Q(10)_{10}/\Delta Q(10)_{20}$	
R ²	0,87	R ²	0,86	R ²	0,96
σe	2,58	σe	2,86	σe	3,96
P=1	< 0,001	P=1	< 0,001	P=1	< 0,001

Sur les bassins versants d'une taille inférieure à 1 000 km²,

L'écart de date minimum séparant deux ΔQ échantillonnés a une importance sur l'échantillonnage des ΔQ , et donc sur les indices A et B.

Pour un critère d'indépendance passant de 3 à 6 jours, les effets sur la VH sont les suivants:

- augmentation de la VHPf, dans un rapport inférieur à 10% environ, quel que soit le régime considéré. La VHPf est peu sensible au critère d'indépendance,
- diminution de la VHF, dans un rapport compris entre 1,1 et 1,4 selon les régimes.

Elle est relativement sensible au critère d'indépendance.

Cependant, comme la VHPf est peu sensible au critère d'indépendance et que nous cherchons à quantifier la borne supérieure de la VHF, nous préconisons de conserver un critère d'indépendance de 3 jours pour des bassins versants d'une taille inférieure à 2 000 km².

En effet, la droite de régression obtenue avec le maximum de vraisemblance s'appuie sur la plus grande densité de points de l'échantillon. Pour corriger le biais des débits ou de ΔQ dépendants, on ne retient que les crues ou ΔQ pour $T > 1$ an en principe mais cela dépend de la distribution de l'échantillonnage. Augmenter le critère d'échantillonnage diminue les ΔQ fréquents et biaise l'échantillon par le bas.

L'indépendance des ΔQ n'est pas un critère à retenir pour décrire la VHF. Ce qui compte, c'est ce que l'écosystème subit habituellement comme variations fortes, y compris dans le fréquent. Sinon, B n'est plus la limite supérieure du domaine fréquent des débits. Pour des bassins versants d'une surface inférieure à 2 000 km², une durée de 3 jours séparant les ΔQ échantillonnés est satisfaisante.

Sur les bassins versants d'une taille supérieure à 6 000 km²,

Les résultats sont différents pour les grands bassins versants. Ils sont caractérisés par des crues plus ou moins laminées, avec une grande dépendance des débits journaliers successifs. Les ΔQ successifs ne sont pas non plus indépendants les uns des autres. L'approche mensuelle de la VH sur de grands bassins versants se heurte à l'indépendance des ΔQ .

Pour les grands bassins versants, critère d'indépendance de 10 jours est conseillé car:

- la VHF est peu sensible à ce critère, lorsqu'il passe de 3 à 10 jours,
- la VHPf est peu sensible au critère d'échantillonnage lorsqu'il passe de 10 à 20 jours.

Ainsi, avec un critère d'indépendance de 10 jours, la borne supérieure de la VHF est décrite et les ΔQ peu dépendants les uns des autres, d'où une description correcte de la VHPf.

4.3 Comparaison des principales caractéristiques des crues et des principales caractéristiques des ΔQ .

Les débits et les ΔQ sont comparés au travers de leurs caractéristiques principales pour vérifier leur indépendance avant de poursuivre les recherches. Ainsi, nous comparons:

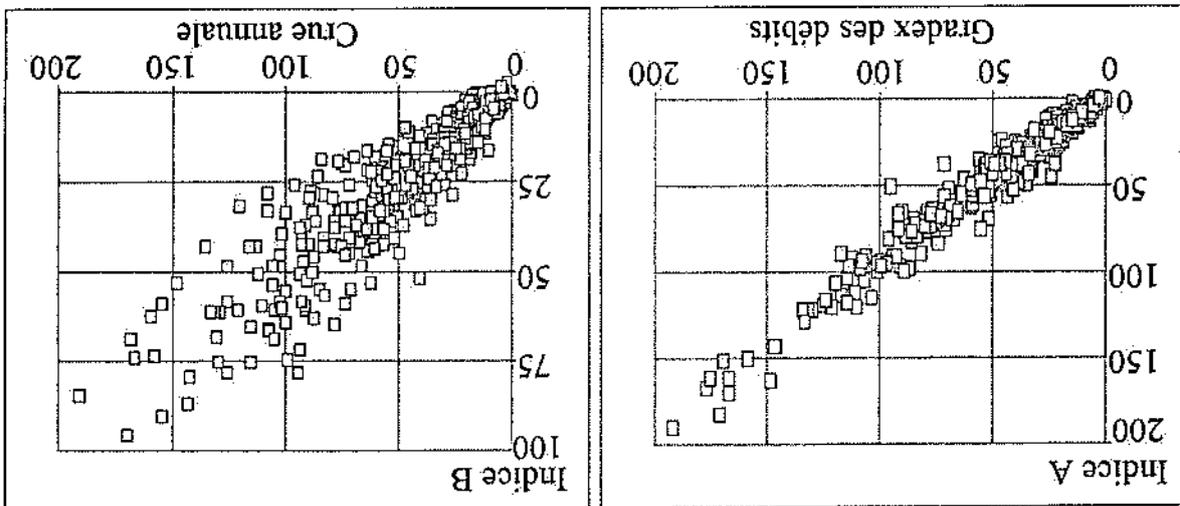
Tableau 4.3 Comparaison des caractéristiques de crue avec les caractéristiques de ΔQ .

Régime		R ²		P=1		R ²		P=1	
		oe		oe		oe		oe	
Glaciaire		0,91	8,12	< 0,01	0,91	9,41	< 0,001	0,92	29,6
Nivo-glaciaire		0,91	3,08	< 0,01	0,83	5,55	< 0,001	0,89	10,4
Nival		0,90	4,71	< 0,001	0,87	5,74	< 0,001	0,90	13,8
Nivo-pluvial		0,96	5,52	< 0,01	0,86	8,19	< 0,001	0,93	20,4
Pluvio-nival		0,92	5,23	0,05	0,91	4,87	< 0,001	0,94	12,9
Pluvial		0,98	6,23	< 0,001	0,86	5,23	< 0,001	0,99	12,1

L'indice A est redondant avec le gradex à un coefficient de passage près. Ce coefficient évolue de 0,85 à 0,94 selon les régimes. Les corrélations sont faibles. Le gradex des débits est également un estimateur de la Vhpt. Cependant, comme le coefficient de passage de l'indice A au gradex des débits change d'un régime à l'autre, l'indice A est conservé pour décrire la Vhpt.

Comparaison de l'indice A et du gradex des débits.

Figure 4.3 Comparaison des caractéristiques de crue et de ΔQ .



- le gradex des débits et l'indice A, qui caractérisent l'accroissement des débits avec la récurrence pour A,
- l'accroissement des débits avec la récurrence pour le gradex des débits.
- la crue annuelle et B, qui caractérisent la limite entre les débits fréquents et peu fréquents pour la crue annuelle,
- la limite entre les ΔQ fréquents et peu fréquents pour l'indice B,
- la $Q[10]$ et $\Delta Q[10]$, qui caractérisent les débits ou les variations de débits peu fréquents.

Comparaison de l'indice B et de la crue annuelle.

L'indice B et la crue annuelle ne sont pas totalement indépendants mais il n'est pas possible de calculer l'un à partir de l'autre. Le rapport entre l'indice B et la crue annuelle change selon le régime, de façon importante. Ce rapport varie de 0,396 pour le régime nivo-glaciaire à 0,623 en régime pluvial. Ce coefficient augmente lorsque les écoulements dépendent des pluies, à cause de la brutalité des augmentations de débit en régime pluvial. A l'inverse, les crues glaciaires ou nivales s'inscrivent habituellement dans un contexte de débits soutenus.

Comme le rapport de l'indice B et de la crue annuelle change avec le régime, l'indice B est conservé pour décrire la VHI.

Comparaison de ΔQ_{10} et Q_{10} .

ΔQ_{10} et Q_{10} sont également redondants, à un coefficient de passage près. Comme ce coefficient change avec le régime ΔQ_{10} doit être conservé. ΔQ_{10} est une caractéristique de la VHP.

Conclusion sur la comparaison des principales caractéristiques des débits et des ΔQ .

L'indice A et le gradex et Q_{10} et ΔQ_{10} sont fortement corrélés mais le coefficient de passage change d'un régime à l'autre, de façon importante.

L'indice B et la crue annuelle ne sont pas redondants, l'une des valeurs ne peut pas être déduite de l'autre avec une précision suffisante, surtout en régime pluvial. Les ΔQ ne sont pas identiques aux débits pour le domaine fréquent.

Les ΔQ doivent être conservés pour décrire les perturbations de type crue. Ils ne sont pas redondants avec les débits.

Le coefficient de passage entre l'indice A et le gradex des débits puis entre ΔQ_{10} et Q_{10} change selon le régime en raison de la brutalité des crues pluviales. Les crues glaciaires et nivales s'inscrivent habituellement dans un contexte de débits soutenus, d'où une médiane des débits plus élevée. La différence entre ΔQ et les débits est plus importante, en valeur absolue et relative.

4.4 Conclusion du chapitre 4.

Le chapitre 4 est consacré à la sensibilité des nouvelles variables à leur méthode de calcul et à la comparaison des ΔQ avec les débits. Ainsi, nous avons testé:

- la sensibilité des ΔQ à la mémoire M. Quand la mémoire M est courte l'influence sur la VH est la suivante:
 - la VHT diminue lorsque la mémoire M passe de 30 jours à 7 ou 3 jours. Plus la médiane glissante est calculée sur une durée courte, plus elle se rapproche des débits et plus les ΔQ fréquents diminuent.
 - la VHT est peu sensible à la mémoire M car elle dépend des ΔQ les plus forts, qui correspondent à des crues importantes. Ces crues ne durent pas plus d'un ou deux jours sur des bassins versants d'une taille inférieure à 1 000 km². Les ΔQ peu fréquents sont moins sensibles à la mémoire M.

Pour ces recherches, une médiane glissante sur 30 jours est proposée car elle paraît pertinente pour une première approche de la VH.

Nous suggérons d'associer M à ΔQ d'où la notation ΔQ_M recommandée à l'avenir. En dehors du paragraphe 4.1, la mémoire M, égale à 30 jours, est sous-entendue.

- la sensibilité des ΔQ au critère d'échantillonnage. Le critère d'échantillonnage est l'écart de date minimal entre deux ΔQ échantillonnés. Il est destiné à assurer l'indépendance des ΔQ , étape indispensable pour l'application de la loi exponentielle.

Pour des bassins versants d'une taille inférieure à 1 000 km², des écarts de date de 3 et 6 jours ont été testés. Il en ressort que:

- la VHT est peu sensible au critère d'échantillonnage car les ΔQ les plus élevés se produisent avec un écart de date supérieur à 6 jours,
- la VHT est plus sensible à ce critère. Quand ce critère augmente, la VHT diminue car les ΔQ fréquents ne sont pas toujours indépendants.

Comme nous cherchons à définir la borne supérieure de la VHT au travers de l'indice B, nous proposons de garder un écart de date minimal de 3 jours entre deux ΔQ échantillonnés.

Pour des bassins versants d'une taille supérieure à 6 000 km², les effets sur la VH sont inversés.

- la VHT diminue lorsque ce critère passe de 3 à 10 jours mais pas quand il passe de 10 à 20 jours,
- la VHT ne change pas quand le critère passe de 3 à 10 jours mais elle augmente lorsqu'il passe de 10 à 20 jours.

Pour de grands bassins versants ($S > 6\,000\text{ km}^2$), le critère d'indépendance doit être égal à 10 jours.

- enfin, les ΔQ sont indépendants des débits.

- l'indice A et le gradex des débits sont relativement redondants,
- l'indice B et la crue annuelle ne sont pas redondants,
- $\Delta Q[10]$ et $Q[10]$ ne sont pas redondants.

Ainsi, les ΔQ sont conservés pour la suite des traitements.

Dans le chapitre 5, l'indépendance des ΔQ avec les descripteurs de la VH est vérifiée, avec :

- la comparaison de la VHF avec la VHPF pour s'assurer de leur indépendance.
- la comparaison de ces VH avec les descripteurs bibliographiques de la VH.

Nous vérifierons si la VHF et si la VHPF ont déjà été définies dans des recherches antérieures pour savoir si ces VH peuvent être plus facilement calculées qu'avec les ΔQ et la loi exponentielle.

Les comparaisons sont effectuées avec des régressions linéaires et multiples, ce que justifient les graphiques. La qualité des corrélations est appréciée grâce au coefficient de détermination R^2 . Il rend compte du pourcentage de la variance expliquée par le modèle.

facilement, à partir des débits classés.
- la comparaison des caractéristiques de ΔQ (indice A et B et $\Delta Q(10)$) avec les débits classés. Nous voulons également savoir si ces caractéristiques peuvent se calculer

des débits classés.
- la comparaison des caractéristiques de crue (gradex des débits, crue annuelle et décennale) avec les débits classés, pour les situer par rapport à des outils très utilisés en hydrologie. Nous voulons savoir si la VHF et la VHPF peuvent se calculer facilement, à partir

rapportée à la médiane. Ces indices sont calculés avec des débits fréquents.
- la comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'indice saisonnier et deux indices de distorsion qui sont l'inter-quartile rapporté à la médiane et l'inter-décile

Ces comparaisons sont indispensables pour valider ce nouveau concept de la VH. En effet, ces comparaisons permettent de s'assurer que la VHF et la VHPF n'existent pas en bibliographie.

- la décomposition des descripteurs classiques en VHF et VHPF pour savoir si ces deux VH sont mélangées dans les descripteurs classiques de la VH.

qui ne les utilisent pas sont distingués.
l'indice saisonnier. Les indices d'asymétrie sont le coefficient de variation, les descripteurs synthétiques utilisant le logarithme des débits, (écart-type et coefficient de variation des débits translatés ou non), le rapport de la moyenne à la médiane, le moment d'ordre 3, l'inter-décile rapporté à la médiane, l'inter-quartile rapporté à la médiane, le rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur. Les descripteurs sans dimension utilisant le logarithme des débits et ceux

- les descripteurs sans dimensions, qui sont les indices d'asymétrie et l'inter-quartile et l'inter-décile.
- les descripteurs ayant les dimensions d'un débit, qui sont l'écart-type.

- la comparaison de la VHF et la VHPF avec :

- la comparaison de la VHF et de la VHPF pour s'assurer de leur indépendance, A présent, nous allons nous assurer de l'indépendance de la VHF et de la VHPF avant de poursuivre les traitements. Ce chapitre comporte plusieurs paragraphes qui sont :

Chapitre 5 - Comparaison des indices A et B avec les descripteurs synthétiques classiques de la variabilité hydrologique

Les corrélations entre les indices A et B et les descripteurs classiques de la VH sont recherchées par régime pour connaître les éventuelles différences entre les régimes.

L'effectif des échantillons utilisés pour les régressions linéaires et multiples varie de 48 individus en régime glaciaire (4 stations, 12 mois dans l'année) à 168 individus (17 stations, 12 mois dans l'année). Toutes ces régressions sont basées sur un nombre important d'individus, d'où une bonne signification.

5.1 Comparaison des indices A et B avec les descripteurs ayant les dimensions d'un débit.

Dans un premier temps, l'indépendance de la VHF et la VHPF est recherchée par régime. Ensuite, les corrélations entre la VHF et la VHPF et les autres descripteurs sont recherchées. Les descripteurs classiques ayant les dimensions des débits sont l'écart-type, l'inter-décile et l'inter-quartile. Ils doivent être calculés avec des débits spécifiques pour être comparables entre bassins versants.

Note : par souci d'encombrement, les relations testées sont symbolisées par un " / ", la variable dépendante étant située dans la première ligne du tableau et la (les) variable (s) indépendantes (s) dans la seconde ligne. Le symbole /AB signifie qu'il s'agit d'une corrélation multiple linéaire entre le descripteur concerné et les indices A et B. Cette corrélation indique si le descripteur mélange la VHF et la VHPF.

	A	Ecart-type		Inter-décile		Inter-quartile	
Régimes	/B	/A	/B	/A	/B	/AB	/A
Glaciaire	0,65	0,75	0,90	0,92	0,64	0,94	0,61
Nivo-glaciaire	0,52	0,73	0,85	0,92	0,62	0,88	0,91
Nival	0,11	0,57	0,56	0,81	0,27	0,74	0,79
Nivo-pluvial	0,45	0,70	0,72	0,85	0,42	0,86	0,29
Pluvio-nival	0,35	0,58	0,76	0,85	0,47	0,89	0,38
Pluvial	0,36	0,82	0,35	0,83	0,65	0,70	0,85
							0,47
							0,68
							0,70

Tableau 5.1 Coefficients de détermination entre les indices A et B, l'écart-type, l'inter-décile et l'inter-quartile.

Dans l'ensemble, les corrélations sont plus ou moins faibles, sauf pour la corrélation entre les indices A et B.

5.1.1 Indépendance de la VHF et de la VHPF.

Globalement, la VHF et la VHPF ne sont pas corrélées. En effet, $R^2 \approx 0,20$ lorsque tous les régimes sont considérés.

Par régime, les corrélations ne sont pas très bonnes ($R^2 < 0,65$), particulièrement en régime nival. Le régime nival est un cas particulier. L'influence des pluies sur la VHPF n'est pas négligeable à l'autome, d'où la grande dispersion des points et le faible coefficient de détermination.

Les indices d'asymétrie ne sont pas corrélés à la VHF ni à la VHpf. De plus, ils ne se décomposent pas en VHF et en VHpf. En effet, les coefficients de détermination sont très faibles. Les indices d'asymétrie sont difficiles à interpréter car ils sont relativisés par rapport à

5.2.1 Comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie n'utilisant pas les logarithmes.

des débits écrase les débits les forts par rapport aux débits fréquents.

débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers. Le logarithme des débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers. Le logarithme des débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers. Le logarithme des débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers.

- ceux qui utilisent le logarithme des débits, traduits ou non. Le logarithme des débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers. Le logarithme des débits est parfois utilisé pour normaliser les échantillons de débits journaliers.

- ceux qui n'utilisent pas le logarithme des débits, comme le coefficient de variation ou le moment d'ordre 3.

- ceux qui n'utilisent pas le logarithme des débits, comme le coefficient de variation ou le moment d'ordre 3.

Nous distinguons deux types de descripteurs sans dimension :

Les ΔQ , via leur paramètre d'échelle et de position A et B, sont comparés aux indices d'asymétrie et à l'indice saisonnier. Les coefficients d'asymétrie, étant sans dimension, sont plus ou moins comparables entre bassins versants. Les indices d'asymétrie sont issus des statistiques.

5.2 Comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie.

intéressants pour nos recherches.

Pour le moment, seuls les indices A et B distinguent la VHF et la VHpf, ce sont les plus intéressants pour nos recherches.

decomposition pas en VHF et en VHpf alors que l'écart-type mélange les deux.

Parmi les descripteurs ayant les dimensions d'un débit, l'inter-quartile et l'inter-décile sont des descripteurs de la VHF. Par contre, ils sont faiblement corrélés à la VHpf. Ils ne se décomposent pas en VHF et en VHpf alors que l'écart-type mélange les deux.

La VHF et la VHpf ne sont pas corrélées. Ces VH doivent être conservées.

5.1.3 Conclusion.

pour décrire la VHpf.

d'information sur la VHpf. L'inter-quartile est intéressant pour décrire la VHF mais pas pour décrire la VHpf.

- l'inter-quartile est proche de l'indice B, il décrit bien la VHF. Mais il n'apporte pas d'information sur la VHpf. L'inter-quartile est intéressant pour décrire la VHF mais pas pour décrire la VHpf.

proche de la VHF. Cependant, il ne décrit pas la VHpf.

- l'inter-décile présente également un intérêt pour nos recherches, car il est proche de la VHF. Cependant, il ne décrit pas la VHpf.

ces VH.

correlée à l'écart type. Pour cette raison, l'écart-type est peu intéressant pour distinguer les VH.

glaciaire, la VHF et l'écart-type sont corrélés alors qu'en régime cèvenol, c'est la VHpf qui est proche de la VHF. Cependant, il ne décrit pas la VHpf.

- l'écart-type mélange la VHF et la VHpf, c'est un inconvénient. En régime glaciaire, la VHF et l'écart-type sont corrélés alors qu'en régime cèvenol, c'est la VHpf qui est proche de la VHF. Cependant, il ne décrit pas la VHpf.

Les corrélations proposées dans le tableau 5.1 aboutissent aux conclusions suivantes :

5.1.2 Comparaison entre les indices A et B et l'écart-type, l'inter-décile et l'inter-quartile.

La VHF et la VHpf sont indépendantes. Elles doivent être conservées pour décrire la VHF. Comme les indices A et B sont indépendants, les corrélations entre la VHF et la VHpf et les autres descripteurs doivent être recherchées pour les indices A et B.

De plus, si un indice d'asymétrie est élevé, plusieurs cas se présentent :

- une médiane des débits très faible, pendant un étiaje par exemple. C'est le cas pour les stations présentant un rapport moyenne sur médiane voisin de 4 à 5 en août en régime pluvial. Parfois, les débits médians mensuels peuvent être nuls, au moins une partie de l'année.

avec les indices A et B.

Tableau 5.2.1.3 Coefficients de détermination entre le moment d'ordre 3 et l'indice saisonnier

	Moment d'ordre 3			Indice saisonnier		
Régimes	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB
Glaciaire	< 0,01	0,05	0,21	0,38	0,79	0,78
Nivo-glaciaire	< 0,01	0,09	0,32	0,38	0,75	0,74
Nival	0,19	0,11	0,45	0,04	0,62	0,62
Nivo-pluvial	0,01	0,19	0,29	< 0,01	0,26	0,46
Pluvio-nival	< 0,01	0,19	0,21	0,06	0,18	0,15
Pluvial	< 0,01	0,07	0,11	0,13	0,32	0,32

Tableau 5.2.1.2 Coefficients de détermination entre l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane et le rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur avec les indices A et B.

	Inter-décile / médiane			Inter-quartile / médiane			Qx 25% / Qn 25%		
Régimes	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB
Glaciaire	0,14	0,01	0,21	0,05	0,19	0,20	0,28	0,11	0,28
Nivo-glaciaire	0,34	0,12	0,33	0,19	0,34	0,32	0,43	0,38	0,45
Nival	0,50	0,02	0,51	0,07	0,34	0,34	0,28	0,24	0,38
Nivo-pluvial	0,03	< 0,01	0,06	0,01	0,06	0,07	0,01	< 0,01	< 0,01
Pluvio-nival	0,01	0,11	0,13	0,12	0,01	0,13	< 0,01	0,09	0,07
Pluvial	0,15	0,02	0,16	0,05	0,11	0,10	0,03	0,02	0,02

Tableau 5.2.1.1 Coefficients de détermination entre le coefficient de variation et le rapport de la moyenne et de la médiane avec les indices A et B.

	Coefficient de variation			Rapport de la moyenne et de la médiane		
Régimes	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB
Glaciaire	0,13	< 0,01	0,36	0,05	0,01	0,27
Nivo-glaciaire	0,32	0,04	0,40	0,15	< 0,01	0,36
Nival	0,62	< 0,01	0,70	0,47	< 0,01	0,28
Nivo-pluvial	< 0,01	0,10	0,22	0,02	0,02	0,11
Pluvio-nival	0,01	0,22	0,23	< 0,01	0,13	0,16
Pluvial	0,03	0,02	0,10	0,08	< 0,01	0,13

Les indices d'asymétrie n'utilisant pas les logarithmes des débits sont peu intéressants pour décrire la VHF ou / et la VHP.

la moyenne ou à la médiane. Ces indices n'ont pas la même signification selon la moyenne ou selon la médiane.

Ces descripteurs ne sont pas corrélés aux indices A et B et ils ne mélangent pas non plus la VHT et la VHTf. Ce sont des descripteurs complémentaires de la VH.

Tableau 5.2.2.1 Coefficient de détermination entre des descripteurs utilisant le logarithme des débits et les indices A et B.

	Coefficient de variation du logarithme des débits			Ecart-type du logarithme des débits		
Régimes	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB
Glaciaire	0,27	0,08	0,31	0,02	0,11	0,10
Nivo-glaciaire	0,33	0,17	0,31	0,01	0,02	0,08
Nival	0,48	0,04	0,47	0,09	0,09	0,26
Nivo-pluvial	0,03	< 0,01	0,06	0,05	0,07	0,06
Pluvio-nival	0,02	0,22	0,23	0,10	0,08	0,09
Pluvial	0,13	0,03	0,12	< 0,02	0,02	< 0,01

Dans les deux cas, il faut utiliser des débits spécifiques pour les rendre comparables entre bassins versants et on calcule :

- l'écart-type et le coefficient de variation des débits,
- l'écart-type et le coefficient de variation des débits traduits.

Les descripteurs de la VH calculés à partir du logarithme des débits sont au nombre de 4. Ils sont calculés à partir des débits ou des débits traduits, qui sont des débits auxquels est ajoutée une unité de débit, pour contourner les débits nuls.

5.2.2 Comparaison des indices A et B avec les descripteurs sans dimension utilisant le logarithme des débits, traduits ou non.

Dans le cas de la saisonnalisation de la VH, les indices d'asymétrie relatifs sont relatifs par rapport à une valeur qui évolue au cours des saisons, comme la moyenne ou à la médiane. Ces indices sont donc peu comparables d'un mois à l'autre, ce qui est inconvenient important pour saisonnaliser la VH. Pourtant, la saisonnalisation de la VH est indispensable pour tenir compte des stades des espèces aquatiques.

- des débits très forts, qui augmentent sensiblement la moyenne sans affecter la médiane. C'est le cas du régime pluvial à influence évenole au mois d'octobre par exemple. Dans ce cas, A est fort alors que B est faible.

L'indice mensuel de distorsion est comparé au :

- rapport de l'inter-décile et de la médiane,
- rapport de l'inter-quartile et de la médiane,
- l'indice saisonnier.

5.3 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'inter-quartile et l'inter-décile rapportés à la médiane et avec l'indice saisonnier.

Enfin, les indices d'asymétrie ne sont pas comparables d'un mois à l'autre, ce qui est également un inconvénient important pour saisonnaliser la VH. En effet, ils sont relativisés à une valeur (la moyenne, la médiane par exemple) qui évolue d'un mois à l'autre.

Les indices d'asymétrie sont des descripteurs de la VH différents des indices A et B, ils ne distinguent pas les VHF et VHPf, c'est un inconvénient. Par contre, ils ne se décomposent pas en VHF et en VHPf, à l'inverse de l'écart-type des débits. Les indices d'asymétrie ne sont pas intéressants pour nos recherches.

Les indices d'asymétrie sont des rapports sans dimension. Les indices A et B ne sont pas corrélés à ces indices qui ne se décomposent pas en VHF et VHPf. Ce sont des descripteurs complémentaires de la VH des indices A et B.

5.2.3 Conclusion de la comparaison des indices A et B avec les indices d'asymétrie.

D'une façon générale, il est peu intéressant d'utiliser le logarithme des débits, traduits ou non pour nos recherches. L'utilisation du logarithme relative trop les forts débits par rapport aux débits fréquents. Les perturbations pour les EHC correspondent aux forts débits ou aux forts ΔQ . Les descripteurs utilisant le logarithme des débits sont différents des indices A et B et représentent un moyen complémentaire de décrire la VH.

Ces descripteurs ne sont pas plus corrélés aux indices A et B et ils ne mélangent pas non plus la VHF et la VHPf. Ce sont également des descripteurs complémentaires de la VH.

Tableau 5.2.2 Coefficient de détermination entre des descripteurs utilisant le logarithme des débits traduits et les indices A et B.

Ecart-type du logarithme des débits traduits	logarithme des débits traduits		logarithme des débits traduits		logarithme des débits traduits	
	/A	/B	/AB	/A	/B	/AB
Régimes	0,37	0,13	0,38	<0,01	0,06	0,12
Glaciaire	0,39	0,23	0,37	0,05	0,01	0,11
Nivo-glaciaire	0,54	0,08	0,53	0,17	0,05	0,32
Nival	0,13	0,02	0,14	0,05	0,19	0,19
Nivo-pluvial	0,06	<0,01	0,12	0,18	0,46	0,44
Pluvio-nival	0,47	0,20	0,45	0,51	0,04	0,04
Pluvial						

Ces descripteurs sont comparés car ils sont calculés avec des débits considérés comme fréquents.

5.3.1 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane.

L'inter-quartile et l'inter-décile rapportés à la médiane ne sont pas du tout corrélés à l'indice mensuel de distorsion. Les coefficients de détermination sont extrêmement faibles.

Régimes	Inter-décile / médiane		Inter-quartile / médiane	
	R ²	σe	R ²	σe
Glaciaire	< 0,01	2,65	< 0,001	0,354
Nivo-glaciaire	< 0,01	1,00	< 0,001	0,181
Nival	< 0,01	1,22	< 0,001	0,219
Nivo-pluvial	0,11	0,778	< 0,001	0,398
Pluvo-nival	0,19	0,549	< 0,001	0,377
Pluvial	0,03	0,531	< 0,001	0,479

Tableau 5.3.1 Comparaison de la crue annuelle et de Q101 avec les débits classés.

L'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane sont indépendants. En effet, le rapport de la médiane mensuelle rapporté à la médiane annuelle augmente quand les conditions fréquentes augmentent, ce qui n'est pas le cas de l'inter-décile ou de l'inter-quartile rapporté à la médiane.

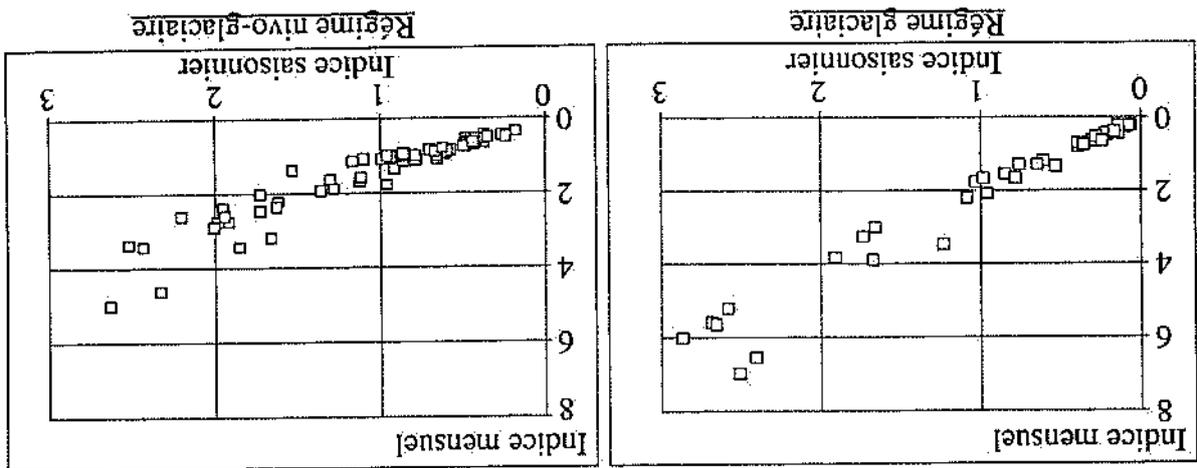
5.3.2 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion avec l'indice saisonnier.

L'indice saisonnier est proposé par Parde (1968) pour rendre compte de l'évolution des débits moyens mensuels inter-annuels par rapport au module inter-annuel. Il se calcule de la façon suivante :

$$\text{Indice saisonnier}(i) = QM(i) / QA$$

Où :

- QM(i) représente le débit mensuel inter-annuel du mois i
- QA le débit moyen inter-annuel.



Les deux indices sont fortement corrélés, surtout pour les régimes à influence glaciaire, mais le coefficient de passage de l'un à autre change de façon importante d'un régime à l'autre. Ces deux indices sont à conserver car ils ne sont pas totalement redondants.

Tableau 5.3.2 Corrélation entre l'indice saisonnier et l'indice mensuel de distorsion par régime.

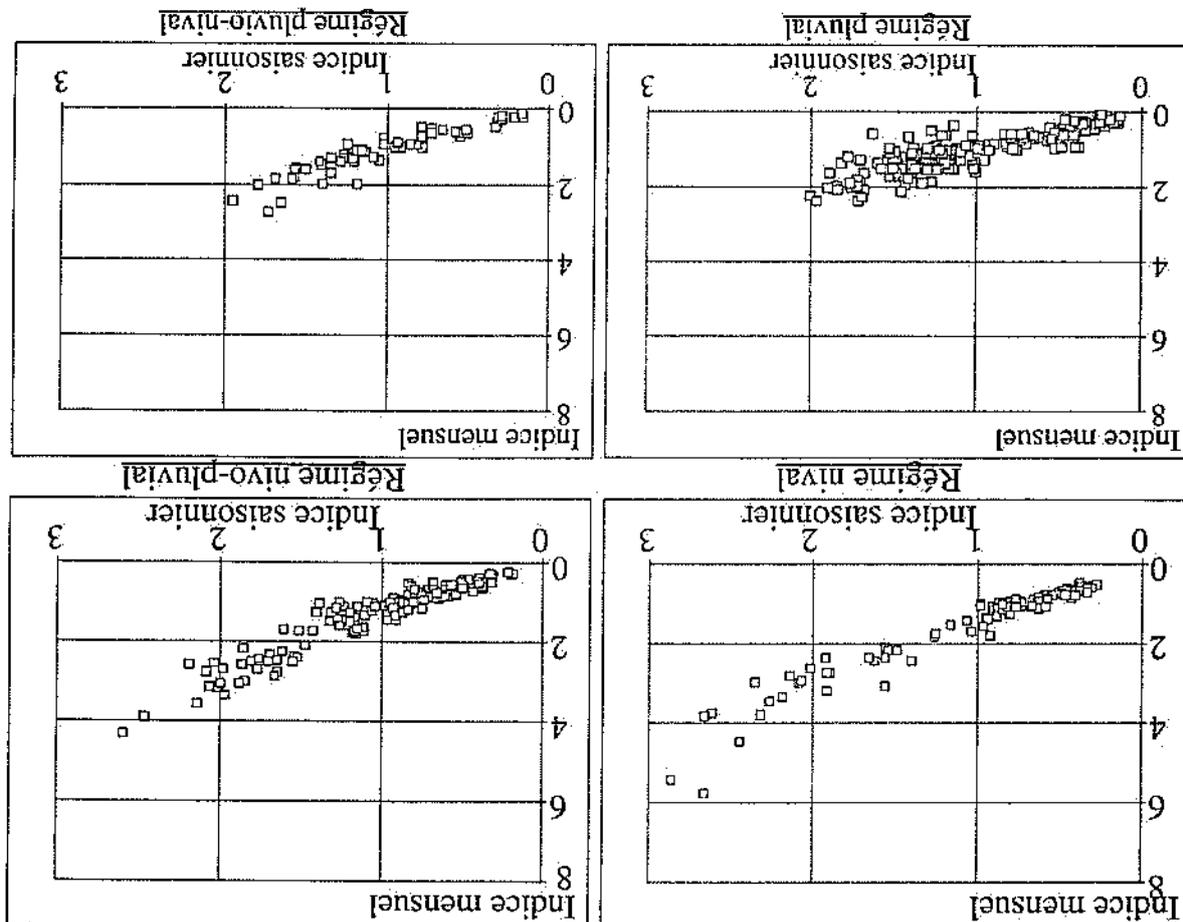
Régime	Coefficient C	Coefficient D	R2	Indice mensuel selon 0 résidus selon
Glaciaire	2,45±0,067	-0,195±0,097	0,97	0,489
Nivo-glaciaire	1,50±0,063	-0,144±0,075	0,89	0,333
Nival	1,66±0,042	-0,174±0,051	0,93	0,321
Nivo-pluvial	1,53±0,041	-0,274±0,046	0,90	0,257
Pluvio-nival	1,21±0,063	-0,144±0,069	0,86	0,226
Pluvial	0,947±0,037	0,036±0,041	0,76	0,259

Le signe ± indique l'intervalle de confiance à 95% des coefficients C et D.

$$\text{Indice mensuel de distorsion} = C * (\text{Indice saisonnier}) + D$$

La relation proposée est de la forme :

Figure 5.3.2 Comparaison de l'indice saisonnier et de l'indice mensuel de distorsion par régime.



Enfin, l'indice mensuel de distorsion est proche de l'indice saisonnier. Comme l'indice saisonnier est calculé avec des moyennes mensuelles et annuelles, il ne distingue pas la VHF et la VHPF pour tous les régimes.

5.4 Comparaison des caractéristiques de crues avec les débits classes.

L'intérêt de comparer les caractéristiques de débits avec les débits classes est de situer ces quantiles par rapport à une valeur facile à se représenter et à calculer. De plus, les débits classes sont connus depuis longtemps et très utilisés. Un moyen simple de calculer les principales caractéristiques des débits à l'aide de ces outils est également recherché.

Les débits classes par ordre décroissant sont notés $Qx\%$. Par exemple, $Qx 10\%$ signifie débit qui n'est pas atteint ou dépassé 10% des jours sur une durée donnée. Ce débit correspond au décile supérieur.

Les débits classes ont été calculés pour chaque mois de chaque chronique, en mélangeant tous les mois de janvier entre eux, puis tous les mois de février... Les débits ont été classés par ordre décroissant. À chaque station correspond 12 débits classes qui sont comparés à :

- la crue annuelle ($T = 1$ an),
- la crue décennale, notée $Q[10]$,
- le gradex des débits avec une différence de débits classes, déterminée après les comparaisons de la crue annuelle et de $Q[10]$ avec les débits classes.

Si ces débits classes peuvent être qualifiés d'inter-annuels, tel n'est pas le cas de l'estimation des quantiles mensuels de débit des débits journaliers. Si l'échantillonnage de ces derniers est fait selon la méthode dite de k maximum par an, avec $k \leq 6$, où la période de retour T_x peut être différente de celle des débits classes, ils s'apparentent plutôt aux valeurs dites sup-seuils donnant des périodes de retour T_s .

À ces écarts potentiels entre les T des Qx ou Qs , s'ajoutent les biais induits par la dépendance des débits successifs. Ces dépendances influencent beaucoup les débits maximaux continuellement dépassés (QCX) et les quantiles de débits journaliers estimés par k maxima par saison pour $k > 1$.

La figure 5.4.0 illustre les comparaisons qui vont être effectuées. Elle représente :

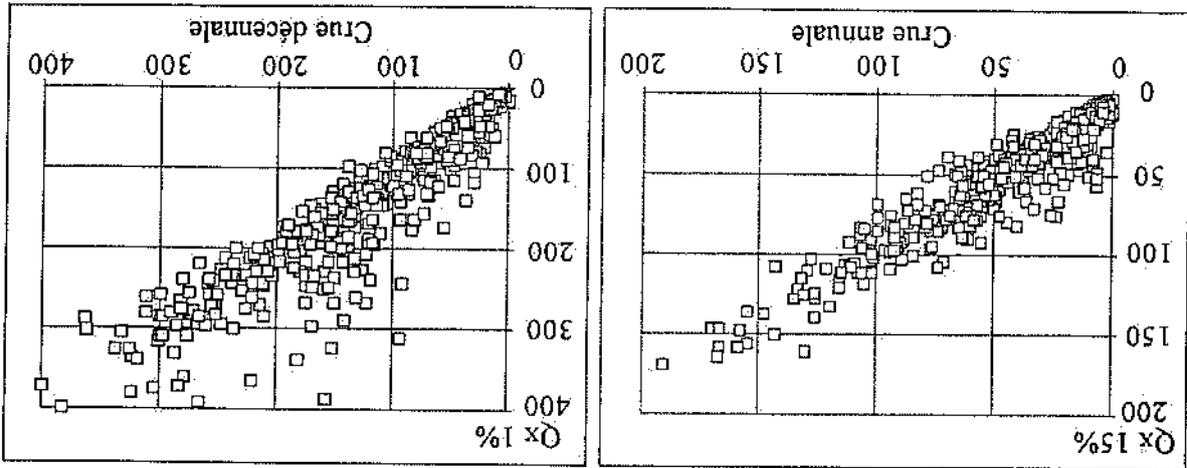
- le débit dépassé 20% des jours ($Qx 20\%$) et de la crue annuelle, calculés pour chacun des 12 mois de l'année,
- le débit journalier maximal observé chaque jour de la chronique et de $Q[10]$, calculés pour chacun des 12 mois de l'année.

L'exemple choisi est la Dordogne à St SAUVES D'AUVERGNE, la chronique des débits journaliers a une durée de 62 ans. Soixante-deux débits par date sont disponibles, du premier janvier au 31 décembre.

Note : le principe d'échantillonnage adopté pour l'extraction des valeurs maximales peut conduire à des échantillons statistiques quelque peu différents des débits classes qui privilégient les années à forte hydraulicité. Cependant, l'introduction d'une référence relative de calcul qui suit l'évolution saisonnière pourrait atténuer ce phénomène. L'existence d'une bonne relation entre ces deux types d'échantillons permettrait de recourir à une méthode de calcul simplifiée des descripteurs A et B.

Les statistiques sont présentes dans le tableau 5.4.0.

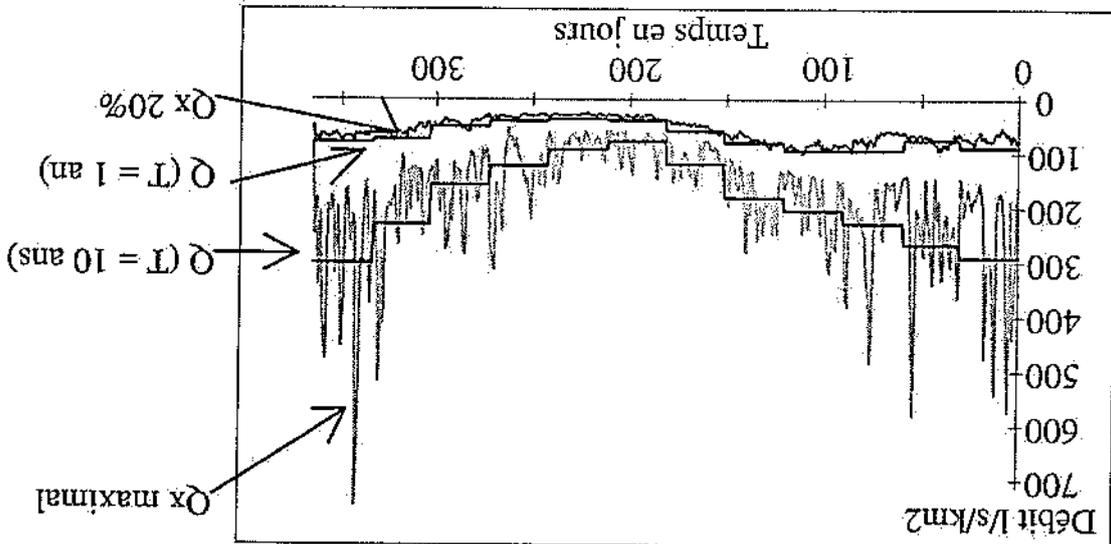
Figure 5.4.0.1 Comparaison des crues annuelles et décennales avec les débits classes.



La figure 5.4.0.1 représente les comparaisons de la crue annuelle et de la crue décennale lorsque tous les régimes sont mélangés.

Sur cet exemple, la crue annuelle est assez proche du débit dépassé 20% des jours, ce qui est vérifié dans les paragraphes suivants. Q[10] est voisin des débits les plus élevés.

Figure 5.4.0 Comparaison des débits classes avec les crues annuelles et décennales sur la Dordogne à ST SAUVES D'AUVERGNE (187 km², régime pluvio-nival).



Après divers tests, $Q[10]$ ressort comme étant voisin de $Qx 1\%$. Ce débit est atteint ou dépassé 1% des jours. Les régressions entre $Q[10]$ et $Qx 1\%$ sont plus ou moins faibles selon les régimes.

En théorie, $Q[10]$ devrait avoir une fréquence d'apparition de 1/300 (un jour tous les 10 ans, en tenant compte des saisons mensuelles). $Q[10]$ devrait être voisin de $Qx 0,33\%$ (1/300).

5.4.2 Comparaison de la crue décennale avec les débits classés.

D'autres Qx sont testés (annexe 5.5.2.1). Pour le régime pluvial, la crue annuelle se rapproche de $Qx 20\%$ (R^2 de 0,74 et coefficient de passage de 0,97). Les corrélations ne sont pas plus exploitables pour autant.

La différence observée entre la théorie ($Qx 3,3\%$) et la pratique ($Qx 15\%$) s'explique par la dépendance des débits journaliers d'un jour à l'autre. Quand le seuil de la crue annuelle est dépassé, il peut être dépassé plusieurs jours de suite, en particulier lors des fortes crues ($T \approx 10$ ans) ou en cas de crue complexe.

La limite séparant les débits fréquents et les débits non fréquents peut être grossièrement fixée à $Qx 15\%$ pour des débits journaliers, soit 4 à 5 jours par mois.

Les corrélations présentées sont relativement faibles, sauf en régime pluvial. Cependant, il n'est pas possible d'évaluer la crue annuelle à partir des débits classés, surtout en régime pluvial. L'écart-type des résidus par rapport à \bar{y} est important.

Après divers tests, la crue annuelle est ressortie comme étant voisine de $Qx 15\%$, qui est le débit dépassé 5 jours par mois en moyenne.

En théorie, le débit journalier annuel devrait être atteint ou dépassé 1 jour sur 30 en moyenne, pour un mois donné, il devrait correspondre au $Qx 1/30\%$ soit $Qx 3,3\%$.

5.4.1 Comparaison de la crue annuelle avec les débits classés.

Dans l'ensemble, les corrélations sont moyennes à assez bonnes mais le coefficient de passage entre ces crues et les débits classés changent de façon importante selon les régimes.

Tableau 5.4.0 Comparaison de la crue annuelle et de $Q[10]$ avec les débits classés.

Régimes	R^2	ce	$P=1$	R^2	ce	$P=1$
Glaciaire	0,98	10,6	< 0,001	0,90	44,8	0,80
Nivo-glaciaire	0,98	4,85	0,90	0,97	8,63	> 0,90
Nival	0,88	10,6	0,01	0,87	20,1	< 0,001
Nivo-pluvial	0,96	8,03	< 0,001	0,79	42,1	0,05
Pluvio-nival	0,93	7,58	0,15	0,60	40,7	< 0,001
Pluvial	0,74	10,7	0,05	0,69	19,2	< 0,001

Le Qx 1% est plus ou moins représentatif des débits journaliers décennaux selon les régimes.

La différence entre la théorie (Qx 0,33%) et la réalité (Qx 1 à 3% selon les régimes) s'explique par la dépendance des débits d'un jour à l'autre. Quand Q[10] est dépassé, le seuil peut être dépassé plusieurs jours de suite alors que l'échantillonnage des débits auxquels est ajustée la loi exponentielle ne se fait que sur des débits indépendants.

5.4.3 Comparaison du gradex des débits avec les débits classés.

Dans ce paragraphe, une corrélation entre les débits classés et le gradex des débits est recherchée. Une telle comparaison aiderait à mieux comprendre ce que représente le gradex des débits pour des non-hydrologues. En effet :

- la crue annuelle est approximativement voisine Qx 15%,
- Q[10] est approximativement voisin de Qx 1%.

Q[10] et le gradex des débits sont liés par la relation suivante :

$$Q[10] = \text{crue annuelle} + \text{Gradex} * \text{Ln}(10)$$

Nous déduisons que :

$$\text{Gradex} = (Q[10] - \text{crue annuelle}) / \text{Ln}(10)$$

Il est tentant de remplacer Q[10] et la crue annuelle par les débits classés correspondants pour vérifier si :

$$\text{Gradex} = (Qx 1\% - Qx 15\%) / 2,302$$

Comme il faut des chroniques assez longues pour déterminer Qx 1%, le gradex des débits est également comparé avec la différence de débits classés Qx 2% - Qx 15%.

	Gx / (Qx 1% - Qx 15%)	R2	σe	P=1	R2	σe	P=1
Régimes							
Glaciaire	0,94	7,02	< 0,001	0,86	11,3	< 0,001	
Nivo-glaciaire	0,84	4,08	< 0,001	0,82	4,34	< 0,001	
Nival	0,83	6,73	< 0,001	0,76	7,98	< 0,001	
Nivo-pluvial	0,87	9,54	< 0,001	0,87	10,3	< 0,001	
Pluvio-nival	0,85	7,29	< 0,001	0,80	8,47	< 0,001	
Pluvial	0,93	13,1	< 0,001	0,93	13,7	< 0,001	

Tableau 5.4.3 Comparaison du gradex des débits avec deux différences de débits classés.

Dans l'ensemble, les corrélations sont assez faibles. La différence de débit entre Qx 1% et Qx 15% permet d'approcher le gradex des débits de façon plus ou moins fiable. Le gradex des débits est approximativement égal à la moitié de la différence entre Qx 1% et Qx 15%.

Cependant, le Qx 1% demande de disposer de chroniques relativement longues pour être calculé. Il faut au moins 4 ans de données pour pouvoir calculer le Qx 1% par saison mensuelle. Cependant, il est préférable de travailler avec des chroniques d'une durée de 15 à 20 ans. Pour une chronique de 10 ans, 300 débits journaliers sont disponibles par saison mensuelle, il est possible de calculer Qx 1% facilement, c'est la troisième valeur, classée par ordre décroissant, pour un mois donné.

La différence entre Qx 2% et Qx 15% est comparée avec le gradex des débits pour savoir s'il est possible de l'approcher avec les débits classes, plus faciles à calculer.

Dans l'ensemble, ces corrélations sont relativement bonnes. Le gradex des débits est plus corrélié à la différence entre Qx 1% et Qx 15% qu'avec la différence entre Qx 2% - Qx 15%.

Le gradex des débits correspond approximativement à l'accroissement des débits compris entre Qx 1% et Qx 15% mais il n'est pas conseillé de le calculer avec les débits classes.

5.4.4 Conclusion de la comparaison des caractéristiques de crues avec les débits classes.

Les caractéristiques de crue qui ont été comparées aux débits classes sont la crue annuelle, la crue décennale et le gradex des débits.

Pour des débits journaliers et des saisons mensuelles :

- la crue annuelle est très approximativement égale au débit qui est dépassé 15% des jours (soit 4 à 5 jours par mois).
- Q[10] est très approximativement égal au débit dépassé un jour sur 100 en moyenne (1 jour tous les 3,3 ans en moyenne).

Cependant, les débits classes ne permettent qu'une estimation assez grossière des crues annuelles et décennales. Le souci de simplicité d'introduire les débits classes inter-annuels, tels que souvent utilisés, est pollué par les biais qu'introduisent les différences d'échantillonnage et la dépendance des débits journaliers successifs.

En conséquence, l'usage des débits classes pour estimer les crues annuelles et décennales (Q[10]) est fortement déconseillé.

Enfin, le gradex des débits correspond très approximativement à la moitié de la différence entre Qx 1% et de Qx 15%. Cependant, il n'est pas conseillé de calculer le gradex des débits de cette façon car les coefficients de passage entre cette différence de débit et le gradex des débits évoluent de façon assez importante d'un régime à l'autre. Cette comparaison est vouée à une meilleure compréhension de ce qu'est le gradex des débits, surtout pour des non-hydrologues.

5.5 Comparaison des caractéristiques de ΔQ avec les débits classés.

Compte tenu de l'originalité des ΔQ et de leurs différences avec les débits, les ΔQ sont comparés aux débits classés pour savoir s'il existe un moyen simple de les calculer. Les comparaisons entre les caractéristiques de ΔQ et les débits classés sont effectuées avec des ΔQ bien connus, dont la fréquence d'apparition correspond aux fréquences étudiées. Ainsi, nous comparons l'indice B et ΔQ_{10} avec les débits classés. La figure suivante représente les comparaisons effectuées dans ce paragraphe.

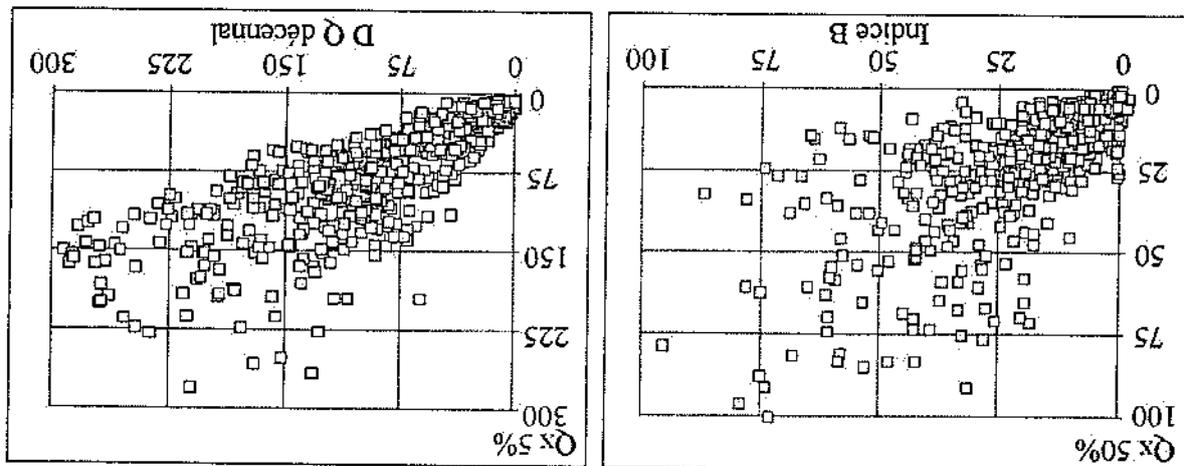


Figure 5.5 Comparaison des caractéristiques de l'indice B et de ΔQ_{10} avec les débits classés.

Le tableau 5.5.1 résume les statistiques des corrélations entre ces ΔQ et les débits classés.

		B / $Q_x(50\%)$		$\Delta Q_{10} / Q_x(5\%)$	
Régimes	R ²	ce	P=1	R ²	ce
Glaciaire	0,83	19,6	0,05	0,81	45,6
Nivo-glaciaire	0,73	6,99	< 0,001	0,79	14,9
Nival	0,71	8,45	< 0,001	0,55	28,7
Nivo-pluvial	0,53	14,6	0,001	0,62	48,7
Pluvio-nival	0,76	7,82	0,40	0,69	29,5
Pluvial	0,52	9,79	0,15	0,83	48,7
					< 0,001

Tableau 5.5 Comparaison de l'indice B et de ΔQ_{10} avec les débits classés.

Comparaison de l'indice B avec les débits classés.

Après divers tests, la médiane des débits s'est révélée plus ou moins proche de l'indice B. Cependant, les corrélations ne sont pas très fiables. La dispersion des points est importante, surtout en régime nivo-pluvial. De plus, la pente de la droite de régression est souvent différente de l'unité.

L'indice B ne peut pas être calculé à partir de la médiane des débits. L'imprécision du calcul est trop grande pour être opérationnelle. Avec d'autres Q_x , les corrélations entre les débits classés et l'indice B ne sont pas exploitables pour autant (annexe 5.5.3.1).

Comparaison de ΔQ_{10} avec les débits classés.

Après divers tests, le débit dépassé 5% des jours ($Q_x 5\%$) s'est révélé être le plus proche de ΔQ_{10} . Cependant, les corrélations ne sont pas exploitables. De plus, les coefficients directs des droites de régression changent d'un régime à l'autre, et de façon importante. Il n'est pas conseillé de calculer ΔQ_{10} avec les débits classés.

Conclusion sur les comparaisons entre les caractéristiques des ΔQ et les débits classés.

Il est fortement déconseillé d'évaluer l'indice B et ΔQ_{10} à l'aide des débits classés. Le calcul des ΔQ avec les débits classés est inutilisable car trop imprécis. De plus, le coefficient de passage de l'un à l'autre dépend trop du régime. Les ΔQ sont différents des débits classés.

Comme les corrélations entre l'indice B et ΔQ_{10} avec les débits classés ne sont pas utilisables et que l'indice A est fortement corrélié au gradex des débits, l'indice A n'est pas comparé aux débits classés.

5.6 Récapitulatifs des comparaisons entre les ΔQ et les débits avec les débits classés.

Les comparaisons effectuées au paragraphe 5.5 sont résumées dans ce paragraphe. Le mode d'échantillonnage des valeurs de débit servant au calcul des descripteurs Q_x et de la crue annuelle est décrit au paragraphe 1.2.2.8. Le calcul des indices A et B est proposé au paragraphe 3.2.1.2. Pour des débits (ou de ΔQ) journaliers, l'échantillon compte 300 valeurs par mois en inter-annuel. Le tableau qui suit récapitule les équivalences observées au travers des relations linéaires établies entre les débits classés et les débits (crues annuelle et décennale) et les ΔQ (indice B et ΔQ décennal).

Rappel important : les corrélations sont trop imprécises pour être exploitables. Il est fortement déconseillé de calculer les débits et les D à partir des débits classés.

Tableau 5.6 Comparaisons entre les débits, les ΔQ et les débits classés.

ΔQ	Débits	Rang de Q [%] / 300 valeurs pour une chronique de 10 ans	1%	3	Q_{100}	
			3%	9		
			5%	15		ΔQ_{100}
			10%	30		
			15%	45	Crue annuelle	
			20%	60		
			25%	75		
			50%	150		Indice H

5.7 Conclusion du chapitre 5.

Au chapitre 5, les ΔQ , via les indices A et B, ont été comparés aux :

- descripteurs classiques de la VH, qui se décomposent en :

- indices d'asymétrie, rapports sans dimension,

- écart-type, inter-décile et inter-quartile,

- débits classés.

Les indices A et B sont différents des indices d'asymétrie. Les indices d'asymétrie ne se décomposent pas en VHF et en VHPF, ils apportent une information différente des indices A et B sur la VH. Pour ces raisons, les indices d'asymétrie ne sont pas intéressants. En effet, nous cherchons à différencier la VHF et la VHPF.

Comme l'écart-type mélange la VHF et la VHPF, il n'est pas non plus intéressant.

Par contre, l'inter-décile et l'inter-quartile sont plus intéressants, ils correspondent à la VHF. Mais ils n'apportent aucune information sur la VHPF.

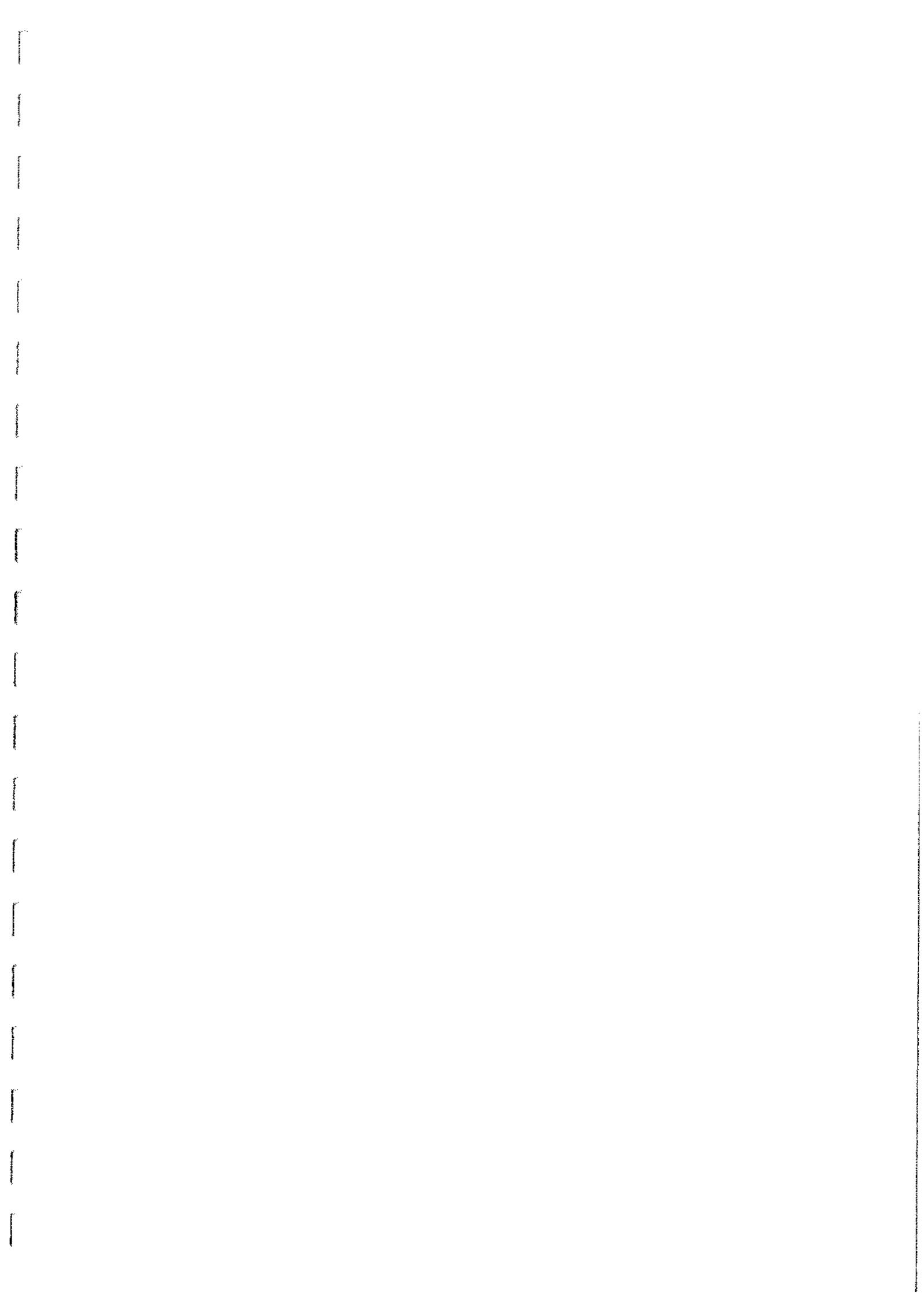
Enfin, il n'est pas conseillé de calculer les indices A et B avec les débits classés. En effet, ils sont trop différents.

La crue annuelle correspond approximativement au débit dépassé 4 à 5 jours par mois, $Q[10]$ correspond approximativement au débit dépassé 1 jour sur 100. Cependant, il n'est pas conseillé de calculer ces caractéristiques de débit à partir des débits classés. En effet, l'imprécision du calcul est trop grande et le coefficient de passage de l'un à l'autre change trop d'un régime à l'autre.

Enfin, le gradex des débits, qui est un descripteur de la VHPF, correspond approximativement à la différence entre $Qx 1\%$ et $Qx 15\%$, mais il n'est pas conseillé de la calculer de cette façon. L'imprécision du calcul est trop grande pour être opérationnelle. Cette comparaison permet seulement de comprendre à quoi correspond le gradex des débits.

Comme les indices A et B indépendants l'un de l'autre et qu'ils sont différents des autres descripteurs de la VH, ils doivent être conservés pour la suite des recherches.

A présent, les saisons mensuelles sont regroupées en saisons de VH homogène, pour chaque régime. Cela permet de distinguer les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence des débits, c'est élément de choix des descripteurs retenus pour décrire la VH.



Chapitre 6 - Regroupement par analyse de variance des descripteurs de la variabilité hydrologique

Le regroupement par analyse de variance de la VH est proposé pour regrouper les saisons mensuelles présentant la même VH pour un régime donné, que ces mois soient successifs ou non. Le regroupement est réalisé à partir de l'ANOVA, présentée au chapitre 2. Pour chaque régime, il faut réaliser 66 $[(2 \times 12 - 12) / 2]$ comparaisons de la VH moyenne entre les divers mois.

Ce regroupement détermine les diverses saisons de VH au cours du cycle annuel et de définir :

- le nombre de niveaux de saisons qu'un descripteur décrit pour chaque régime,
- le rapport entre saison de VH extrême, pour tester la sensibilité des descripteurs aux distributions de fréquence des débits. Plus ce rapport est élevé, plus le descripteur est sensible aux distributions de fréquence.
- les mois présentant la VH maximale et ceux présentant la VH minimale. Les descripteurs présentant un maximum en hautes eaux et un minimum en basses eaux sont sensibles aux distributions de fréquence des débits.

Les descripteurs de la VH sont groupés selon leur sensibilité aux distributions de fréquence. Ainsi, deux groupes sont définis :

- les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence.
- les descripteurs peu ou pas sensibles aux distributions de fréquence. Ils présentent des valeurs voisines pour des distributions de fréquence différentes.

Les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence sont choisis de préférence pour distinguer les hautes et les basses eaux.

Le regroupement des mois pour chaque régime est appelé typologie de la VH. La typologie est représentée dans des diagrammes en trois dimensions, qui sont :

- les mois, de 1 pour janvier à 12 pour décembre;
- les régimes, de S1 à S8. S1 pour le régime glaciaire; S2 nivo-glaciaire; S3 nival; S4 nivo-pluvial; S5 pluvio-nival; S6 pluvial, qui regroupe le pluvial sans influence cévenole et le cévenol; S7 pluvial sans influence cévenole; S8 pluvial cévenol.
- le descripteur considéré.

Pour des raisons de présentation, l'orientation des graphiques n'est pas toujours la même. Il arrive que les mois ne soient pas présentés en ordre croissant, de 1 à gauche et 12 à droite, mais dans un ordre inverse.

Pour les nouveaux descripteurs ΔQ via leur paramètre d'échelle A et de position B et l'indice mensuel de distortion, les graphes en boîte sont présentés de façon détaillée. Pour les autres descripteurs, ils sont donnés en annexe. Le numéro de l'annexe est celui du paragraphe correspondant.

L'ANOVA est basée sur le test de Fisher. Deux mois sont considérés comme ayant même VH moyenne lorsque $P \geq 0,90$. Les échantillons étant de petite taille ($4 \leq n \leq 17$), il n'est pas possible d'en vérifier la normalité. Cependant, d'après Wonnacott (1991), les conclusions sont approximativement les mêmes pour des échantillons non normaux, pourvu que leur effectif soit le même, ce qui est le cas, pour un descripteur et un régime donné. L'effectif de l'échantillon (nombre de valeur de VH pour un mois donné et pour un régime donné) est égal au nombre de stations sélectionnées par régime.

6.1 Les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence.

Ces descripteurs passent par leur maximum aux hautes eaux, au moment où les distributions de fréquence des débits sont les plus larges. Pour des distributions de débit différentes, ils sont différents.

6.1.1 Les ΔQ et les indices A et B.

Les ΔQ sont synthétisés par les indices A (VHP) et B (VH).

6.1.1.1 Description détaillée de la VH par régime.

La description détaillée de la VH est réalisée par régime, en distinguant le régime pluvial et le régime cévenol. Pour être facilement comparables d'un régime à l'autre, les graphes en boîte ont la même échelle pour tous les régimes.

Régime glaciaire.

La VHP passe par un maximum au mois de juin, avec une médiane voisine de 45. La VHP diminue lentement jusqu'en août. La VHP remonte un peu en septembre puis baisse jusqu'en décembre, lorsque la période de dégel commence.

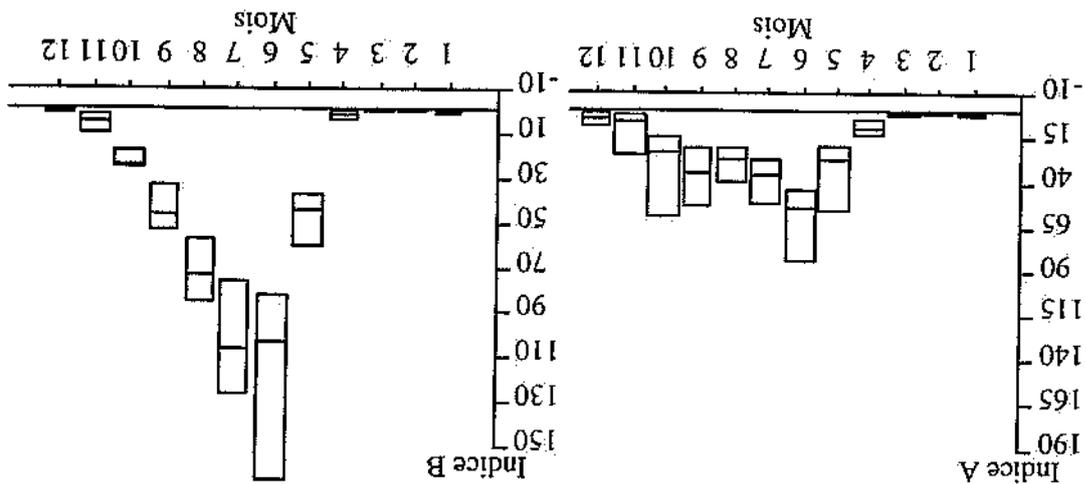


Figure 6.1.1.1 VHP et VHPf en régime glaciaire.

La VH passe par un maximum en juin et juillet, qui sont les mois pendant lesquels les écoulements sont les plus intenses (fonte nivale puis glaciaire). La médiane de la VHPf la plus forte, tous régimes confondus, avec 100 l/s/km². Lorsque la fonte commence, les débits progressent rapidement, d'où des ΔQ importants et fréquents car la médiane des débits des 30 jours précédents est en retard par rapport aux débits. Une crue glaciaire se produit à l'occasion de plusieurs jours chauds successifs et la médiane des débits n'a pas le temps d'évoluer sur une durée si courte.

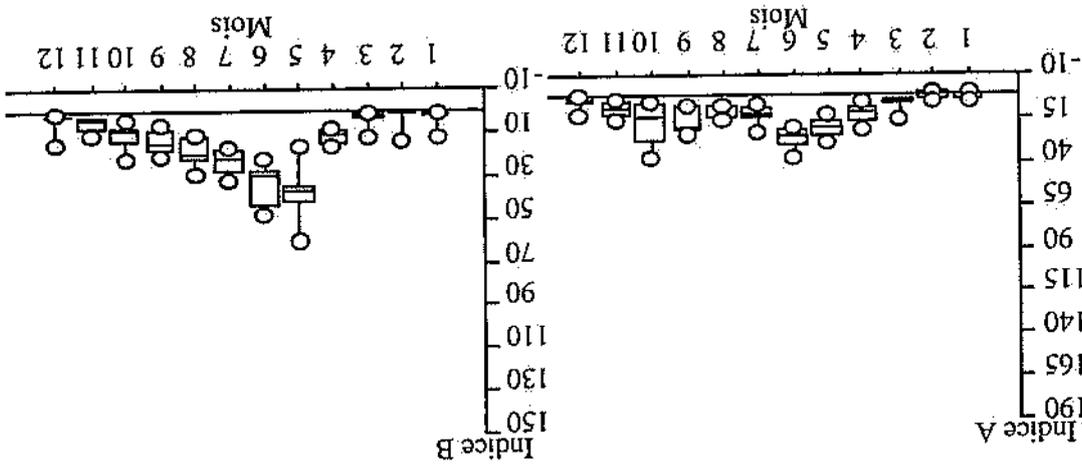
A l'opposé, la VHF présente un maximum très marqué en mai, comme en régime nivo-glaciaire, lors de la fonte nivale. La fonte nivale provoque une augmentation rapide des débits alors que la

représentation qu'en septembre ou octobre. L'influence des pluies automnales est plus marquée qu'en régime nivo-glaciaire, la VHP est plus forte en octobre qu'en régime nivo-glaciaire (médiane de 35 contre 10). En juillet et août, la VHP est faible car la fonte nivale est terminée et les écoulements ne sont pas alimentés par les pluies, qui ne

Régime nival.

Le régime nivo-glaciaire se caractérise par une VH plus faible qu'en régime glaciaire. Sa VHF passe par un maximum en mai alors que sa VHP présente deux maxima, l'un en mai, l'autre en octobre. L'étiage, de novembre à mars, se caractérise par une faible VH. Dans l'ensemble, ce régime se caractérise par une faible VH par rapport au régime glaciaire, peu dépendante du lieu d'observation. Pourtant, la surface des bassins versants varie de quelques dizaines de km² à 984 km². En effet, l'inter-quartile et l'inter-décile des 5 valeurs observées sont étroits.

Figure 6.1.1.1.2 VHF et VHP en régime nivo-glaciaire.



Comme pour le régime glaciaire, l'étiage, de novembre à mars, se caractérise par des ΔQ faibles. Le débit d'un jour donné est proche de la médiane des débits des 30 jours précédents.

La VHF passe par un maximum en mai, lors de la fonte nivale. Ce maximum, bien plus faible qu'en régime glaciaire, n'atteint que 40 l/s/km². La VHF diminue de juin à décembre, sans reprise à l'automne, car les crues automnales ne se produisent pas toutes les années.

Différence avec le régime glaciaire, la VHP passe par deux maxima d'importance égale et voisine de 30. Un maximum se produit en juin, dû à la fonte nivale, l'autre en octobre, à cause des pluies automnales qui se manifestent certaines années.

Régime nivo-glaciaire.

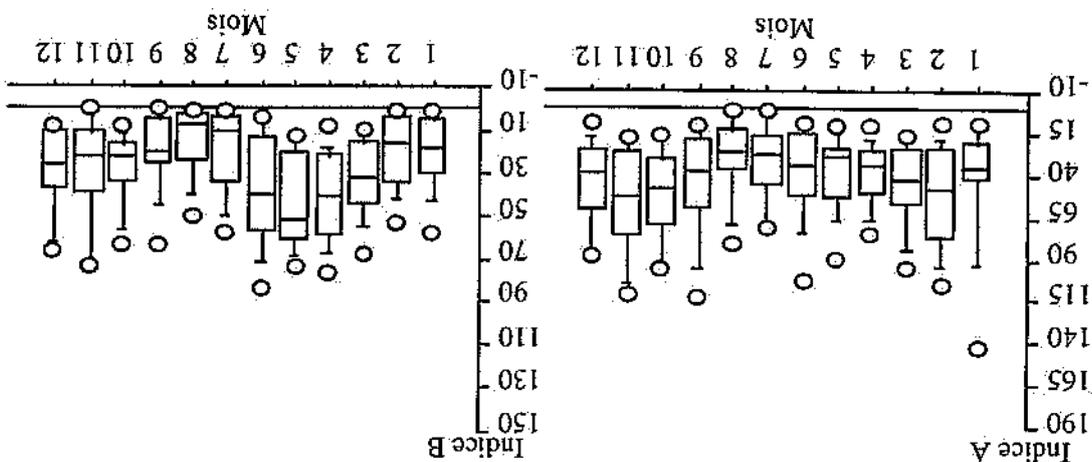
La fonte glaciaire s'accompagne d'une forte VHF, de mai à septembre. A l'étiage, de novembre à avril, la VH est très faible.

Par contre, bien que la tendance saisonnière soit la même pour les 4 stations hydrométriques retenues, la VHF et la VHP sont assez dispersées autour de la médiane pour chaque mois, à cause de l'effet d'échelle spatiale. C'est la station de 5 km² qui présente la VHF et la VHP les plus fortes.

L'étiage (décembre à mars) en régime glaciaire se caractérise par de faibles VHF et VHP, donc des débits très stables. Le débit d'un jour donné est proche de la médiane des débits des 30 jours précédents.

La forte VH de ce régime s'explique, au moins en partie, par une pluviométrie importante. La médiane de la pluviométrie annuelle sur les bassins versants étudiés est de 1600 mm par an. C'est le

Figure 6.1.1.1.4 VHF et VHPf en régime nivo-pluvial.



Ce régime se distingue des régimes précédents. La VH est élevée toute l'année. La VHPf est comprise entre 20 et 50, tous les mois de l'année. Les crues importantes et brutales sont possibles d'un bout de l'année à l'autre.

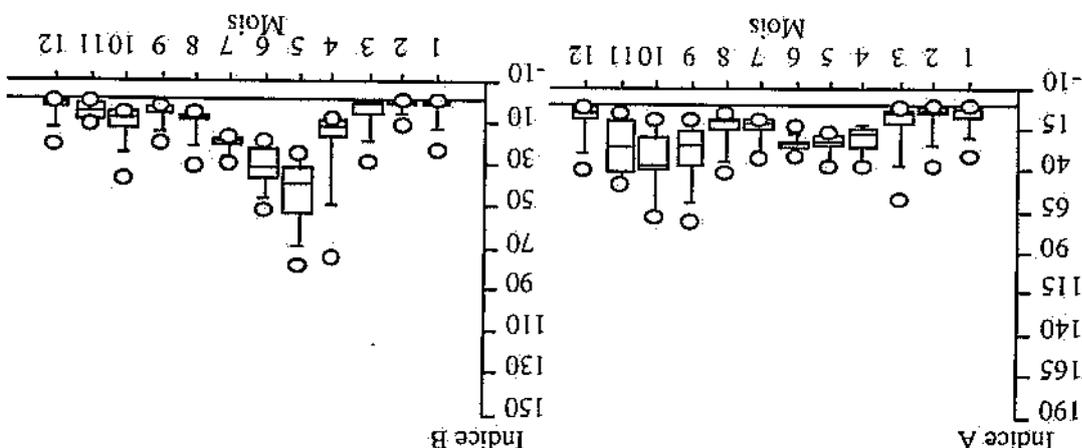
La VHF est voisine de 60 l/s/km², en mai, lors de la fonte nivale. Un minimum se présente en juillet et août avec 15 l/s/km². Les Δ Q fréquents sont importants pendant la fonte nivale, comme en régime nival.

Régime nivo-pluvial.

Pendant l'étage, de décembre à mars, les VHF et VHPf restent faibles car les débits sont stables. Les débits sont très proches de la médiane des débits des 30 jours précédents, comme pour le régime glaciaire et nivo-glaciaire et pour les mêmes raisons.

Le régime nival se caractérise par une forte VHF en mai, lors de la fonte nivale. Sa VHPf passe par deux maxima, l'un en avril et mai, peu marqué, l'autre en octobre. L'étage présente une faible VH, de décembre à mars.

Figure 6.1.1.1.3 VHF et VHPf en régime nival.



médiane des débits des 30 jours précédents est en retard, d'où des Δ Q élevés et fréquents. Dès le mois de juin, la VHF décroît rapidement, à la différence du régime nivo-glaciaire. Les écoulements ne sont pas soutenus par la pluie ou par la fonte nivale qui est terminée.

type de régime qui reçoit le plus de précipitations dans notre choix de bassins versants. En régime nival, les précipitations annuelles sont de 1000 mm.

Les bassins versants choisis sont situés pour la plupart dans les Préalpes (Chartreuse, Vercors, Bauges, Chablais...) qui sont des régions humides toute l'année, et parmi les plus humides de France. Cette forte VH s'explique aussi par la présence de neige une partie de l'année. Les pluies se produisent parfois sur des sols enneigés et gorges d'eau, d'où des écoulements importants et brusques.

L'issole à St ANDRE LES ALPES, qui présente la plus faible pluviosité annuelle (1000 mm) présente également la VH la plus faible.

Le régime nivo-pluvial présente une forte VHP, toute l'année alors que sa VHF passe par un maximum, peu marqué, d'avril à juin. La VH de ce régime dépend beaucoup du lieu d'observation.

Régime pluvio-nival.

Ce régime se caractérise par une VHP maximale en février et mars, à la fonte des neiges, d'où des écoulements importants. Un second maximum, d'importance équivalente, se produit à l'automne, lors de la reprise des pluies. Dans les deux cas, la médiane de la VHP est voisine de 40. Par contre, les mois de juillet et août se caractérisent par une faible VHP. Cette période correspond à l'étiage. La VH ne présente qu'un pic, en février, lorsque les écoulements sont alimentés par les pluies et la fonte de la neige. Pour tous les régimes étudiés à présent, ce régime présente la plus faible VHF, même lors de la fonte nivale.

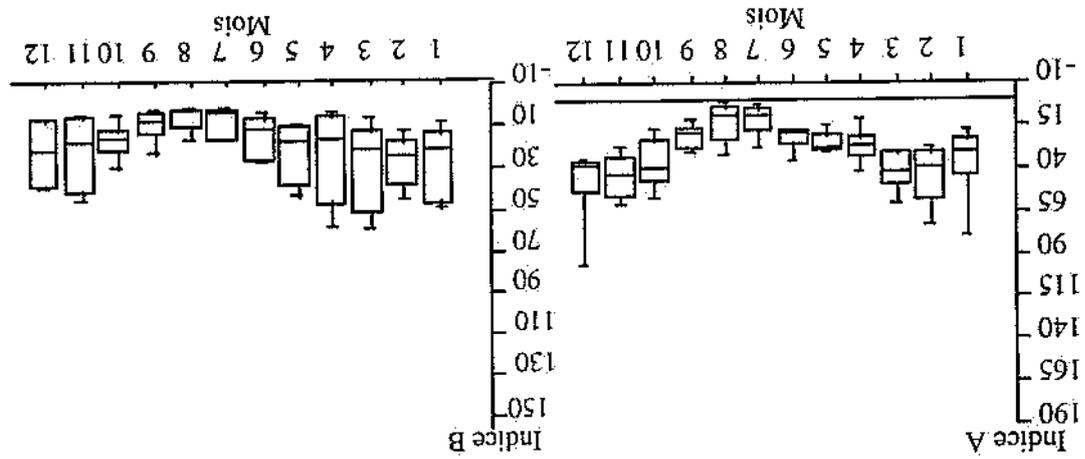


Figure 6.1.1.5 VHP et VHF en régime pluvio-nival.

Les mois de juillet et août présentent une faible VH. Les débits d'un jour donné ne sont pas éloignés de la médiane des débits des 30 jours précédents.

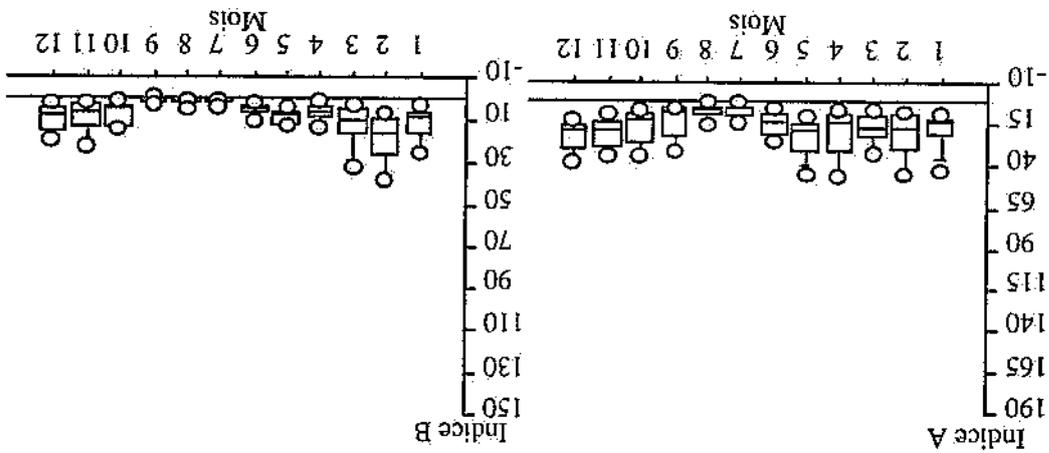
Le régime pluvio-nival présente une VH maximale de novembre à mars et une VH minimale en juillet et août. Cependant, la VH est plus faible que celle des régimes précédents.

Régime pluvial. Distinction entre le régime pluvial avec ou sans influence cévenole.

La VHP passe par un maximum en février et par un minimum de juin à septembre. La dispersion de la VH avec le lieu d'observation est importante. La VHF présente également un maximum en février mais sa dispersion est plus faible que pour la VHP.

Le régime pluvial sans influence cévenole se caractérise par une faible VH, tout au long de l'année, mais particulièrement à l'étage.

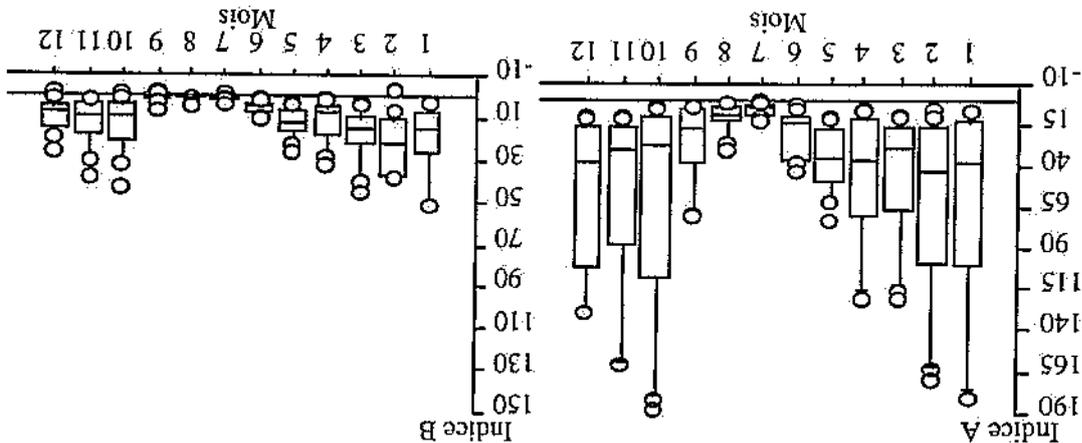
Figure 6.1.1.7 VHF et VHPf en régime pluvial.



Cependant, 2 groupes de cours d'eau sont à distinguer :
 - les cours d'eau sans influence cévenole, (figure 6.1.1.7).
 La médiane de la VHPf est voisine de 10 à 20 de novembre à juin. La VHPf est homogène et faible par rapport aux autres régimes. Les ΔQ correspondent à des augmentations de débit faibles et peu brutales.

Le régime pluvial se caractérise par une VHPf très forte mais très dépendante du lieu d'observation alors que la VHF est faible.
 La VHF passe par un maximum en février mais elle est très faible de juillet à septembre. L'étage (juin à septembre) se caractérise par de faibles ΔQ , comme pour les autres régimes.

Figure 6.1.1.6 VHF et VHPf en régime pluvial.



- les cours d'eau cèvenols.

La médiane de la Vhpf est la plus élevée, tous régimes confondus, d'octobre à février, elle est voisine de 110. La Vhpf dépend beaucoup du point d'observation, comme le montre sa forte dispersion.

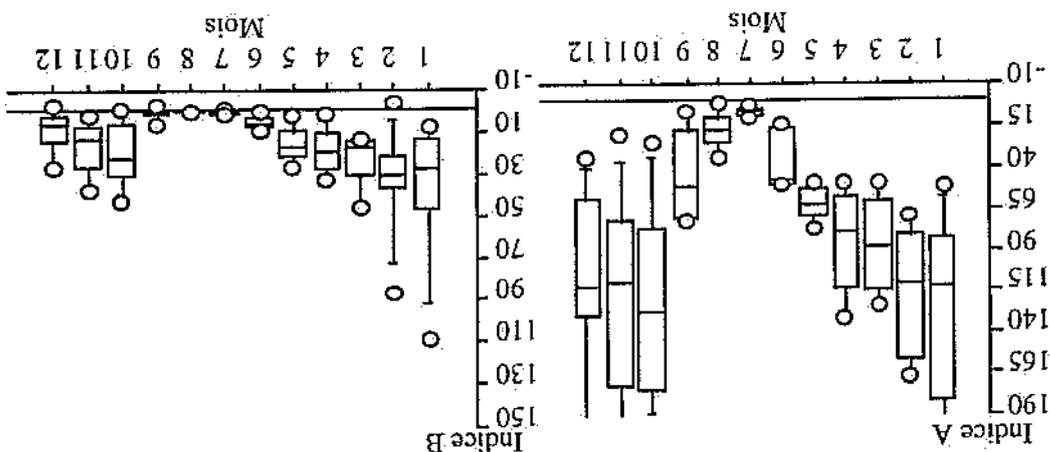


Figure 6.1.1.8 Vhpf et Vhpf en régime cèvenol.

Par contre, la Vhpf est voisine de celle des autres bassins versants en juillet et août, lors de l'étiage. L'effet de la saison sur ce descripteur est particulièrement net pour ce type de régime.

La distinction de la Vhpf entre le régime cèvenol et pluvial est aussi pertinente que pour la Vhpf. En régime cèvenol, la Vhpf est plus forte qu'en régime pluvial sans influence cèvenole mais d'octobre à avril. Pour cette période et pour ce régime, elle reste voisine de 30 l/s/km^2 alors qu'elle n'atteint que $10 \text{ à } 20 \text{ l/s/km}^2$ pour le régime pluvial sans influence cèvenole. Mais la Vhpf reste bien inférieure à celle d'autres régimes certains mois de l'année, comme en régime nivo-pluvial ou glaciaire. La Vhpf est faible de juillet à septembre.

Le régime cèvenol se caractérise par une forte Vhpf d'octobre à avril et par une Vhpf plus forte qu'en régime pluvial sans influence cèvenole. L'étiage se caractérise par une faible Vhpf.

Conclusion du paragraphe 6.1.1.1.

La fonte glaciaire se caractérise par une forte Vhpf quelques mois par an. La fonte nivale s'accompagne par une Vhpf assez forte, mais moins qu'en régime glaciaire. Le régime pluvial ne présente qu'une faible Vhpf. La saison de Vhpf maximale se décale d'un régime à l'autre. Elle se produit en juin, juillet et août en régime glaciaire, au mois de mai pour les régimes à influence nivale, en février et mars pour les régimes à influence pluviale.

La Vhpf est faible pour tous les régimes, comparée à celle du régime cèvenol. La Vhpf passe par un maximum en juin et juillet pour le régime glaciaire, deux maxima pour les régimes nivo-glaciaire et nival, au printemps et à l'automne. Pour les régimes à influence pluviale, ce maximum se produit en février et mars, lors des hautes eaux.

Dans l'ensemble, c'est le régime pluvial sans cèvenol qui présente la plus faible Vhpf alors que le régime glaciaire se caractérise par une forte Vhpf et que le régime cèvenol a une forte Vhpf.

6.1.1.2 Typologie par régime des nouveaux descripteurs de la Vh.

La typologie est présentée pour la Vhpf et pour la Vh séparément.

Typologie de la Vhpf (indice A).

Selon les régimes, il existe :

- un seul niveau de saison pour le régime nivo-pluvial,

La VHT représente l'enveloppe supérieure des ΔQ fréquents. Elle n'apporte pas la même information sur la dynamique hydrologique de régulation. Elle distingue des saisons à faibles ΔQ fréquents.

Le rapport entre saisons de VH extrêmes est de 20 en régime glaciaire, 9,8 en régime cévenol, 8,8 en régime pluvial sans influence cévenole. Pour les autres régimes, il varie de 1,7 en régime nivo-pluvial à 6,9 en régime pluvial. La VHT définit des saisons bien nettes, deux saisons se distinguent pour chaque régime.

- 2 niveaux de saisons en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cévenol,
- 3 niveaux de saisons en régime glaciaire, nival, pluvial sans influence cévenole,
- 4 niveaux de saisons en régime nivo-glaciaire.

La VHT définit également des saisons contrastées au cours du cycle hydrologique. En effet, il existe :

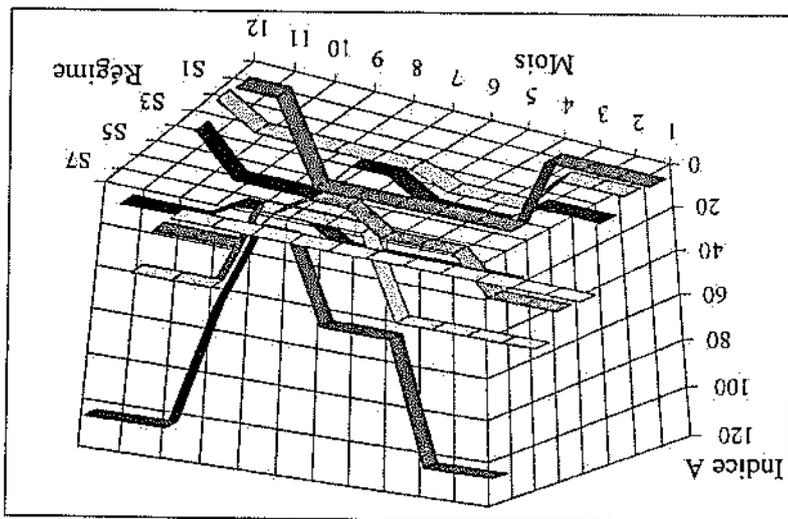
Typologie de la VHT (indice B).

Les cas extrêmes sont le régime cévenol avec une saison à très forte VHT et le régime nivo-glaciaire qui présente une dynamique de régulation hydrologique réduite. Il serait intéressant de comparer la diversité piscicole pour de tels régimes.

Les saisons de faible VHT sont à considérer comme peu ou pas régularisatrices des EBC car les ΔQ importants sont liés à des périodes de retour supérieures à 5 ans. La durée de cinq ans représente *a priori* la durée nécessaire pour qu'un espace soit colonisé par tous les stades d'une espèce piscicole qui trouve des conditions de perturbation temporaire favorables. Ce sont les durées de forte VHT qui vont déterminer la dynamique de régulation hydrologique.

Tentons d'interpréter ces regroupements en saisons homogènes. Le nombre de niveaux de la gamme de VHT toute l'année. Les stades de développement biologique sont soumis à la même dynamique de régulation hydrologique.

Figure 6.1.2.1 Typologie de la VHT par régime.



Le rapport entre la VHT pour les saisons extrêmes est important en régime cévenol (10) et glaciaire (7,2). Pour les autres régimes, il varie de 1 en régime nivo-pluvial à 5,5 en régime nivo-pluvial sans influence cévenole. La VHT définit des saisons contrastées pour la plupart des régimes. La VHT rend compte des perturbations temporaires dont la dynamique temporelle régit la dynamique biologique. La VHT passe par maximum en hautes eaux, elle rend compte des crues.

- deux niveaux de saisons pour les régimes glaciaire et pluvial,
- trois niveaux de saisons pour les régimes nivo-glaciaire, nival, pluvio-nival et cévenol.

La représentation détaillée du gradex et de la crue annuelle est présentée en annexe 6.1.2.1 et 6.1.2.2. Le gradex des débits et la crue annuelle sont obtenus avec la méthode QdF, développée au Cemagref mais appliquée aux débits. Ce sont aussi des descripteurs de la VH.

6.1.2 Typologie du gradex des débits et de la crue annuelle par régime.

La VHT et la VHPF passent des maxima en hautes eaux, alors que les contraintes hydrologiques liées aux crues sont les plus fortes. C'est un critère important pour le choix des descripteurs retenus pour décrire la VH. La VH évolue considérablement d'un mois à l'autre. La VH se saisonnalise bien. Les saisons de forte VH influencent certainement l'équilibre des EEC.

Le régime glaciaire se caractérise par une forte VHT, lors de la fusion estivale, alors que le régime nivéo-pluvial se caractérise par une VHT et une VHPF importantes tout au long de l'année. Au contraire, le régime pluvial se distingue par une VHT et une VHPF peu importantes, sauf dans le cas particulier du régime cévenol. En régime cévenol, la VHPF est très forte, une partie de l'année.

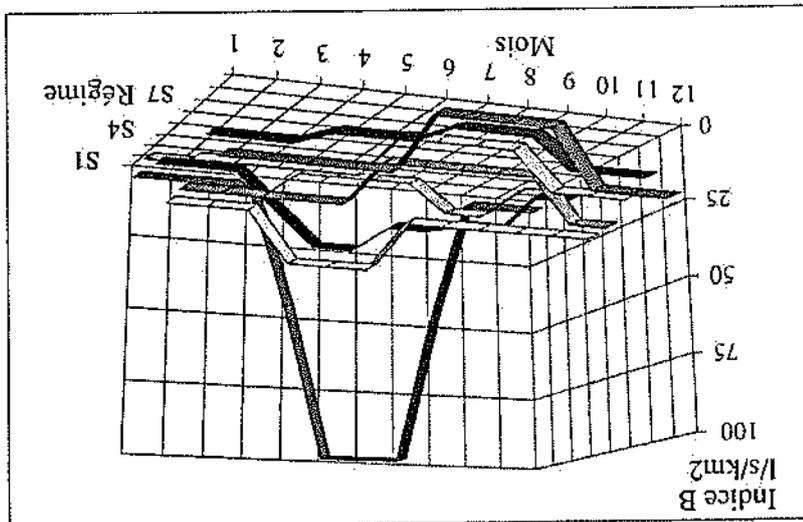
La distribution de ces descripteurs par régime montre l'intérêt de la saison mensuelle. Ces descripteurs évoluent considérablement pour chaque régime selon le mois considéré. La VH par régime ne se comporte pas de la même façon selon les régimes. La VHT et la VHPF par régime forment des groupes homogènes.

de la VHPF.

6.1.1.3 Conclusion de la typologie des A Q. Intérêt de la distinction VHT et

Ces saisons correspondent à des écoulements de basses eaux, donc à de faibles crues fréquentes. L'association d'une forte VHT et d'une forte VHPF constitue des saisons particulièrement contraignantes pour les EEC, au sens de la VH. Le régime glaciaire n'apparaît pas aussi contraignant que le régime cévenol. Les diversités piscicoles permettent de contrôler cette assertion. Cependant, la température et la turbidité de l'eau en régime glaciaire constituent certainement des facteurs très contraignants pour les EEC.

Figure 6.1.1.2 Typologie de la VHT par régime.



6.1.2.1 Gradex des débits.

Le gradex des débits représente l'accroissement exponentiel des crues avec la période de retour moyenne de ces crues. C'est un indicateur de la dispersion des crues d'une période de retour égale ou supérieure à l'année.

Selon le régime, le cycle hydrologique se décompose en :

- une seule saison pour le régime nivo-pluvial,
- deux saisons pour le régime glaciaire, pluvial et pluvial sans influence cévenole.
- trois saisons pour le régime nivo-glaciaire, nival, pluvio-nival et cévenol.

Le rapport entre saisons de VH extrêmes est important pour le régime glaciaire (6,8) et cévenol (5,9). Pour les autres régimes, il est compris entre 1 en régime nivo-pluvial et 4,0 en régime nivo-glaciaire. Le gradex des débits décrit des saisons contrastées au cours du cycle annuel, sauf pour le régime nivo-pluvial.

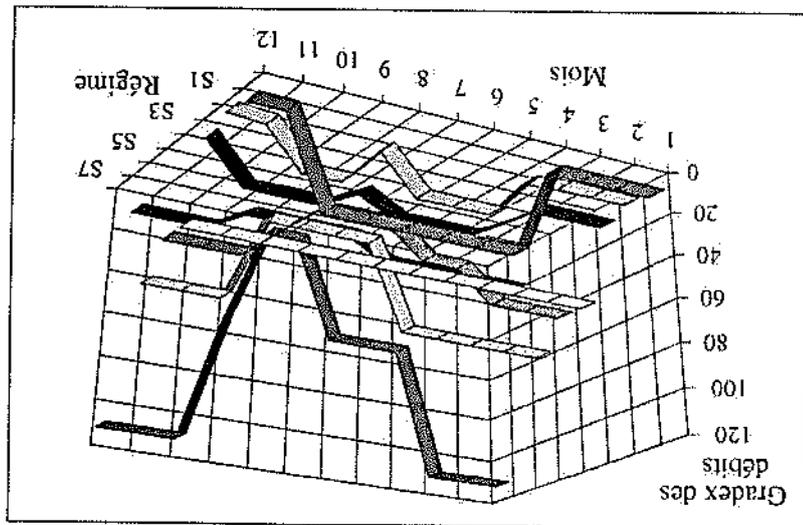


Figure 6.1.2.1 Typologie du gradex par régime.

Le gradex de la saison maximale n'évolue guère du régime glaciaire au régime pluvial. Seule sa position au cours du cycle hydrologique évolue. Par contre, le régime cévenol présente de très forts gradex.

6.1.2.2 Typologie de la crue annuelle.

La crue annuelle évolue au cours du cycle hydrologique annuel, comme les autres descripteurs.

Selon le régime, la crue annuelle au cours du cycle hydrologique se décompose en :

- 2 niveaux de saisons, en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cévenol. La saison la plus courte dure 4 mois pour le régime cévenol et 3 mois pour les autres régimes. Elle correspond aux mois d'étage. La crue annuelle est faible pendant ces mois car les écoulements sont faibles à cette période de l'année.
- 3 niveaux de saisons en régime glaciaire, nivo-glaciaire, nival et pluvial sans influence cévenole. Chaque saison dure au moins 2 à 3 mois. C'est en période d'étage que la crue annuelle est la plus faible. Elle augmente avec les écoulements.

Le rapport de la crue annuelle moyenne entre saisons extrêmes dépend beaucoup du régime. Ce rapport est de 22 en régime glaciaire, 6 en régime nivo-glaciaire et cévenol. Pour les autres régimes, il varie de 2 en régime nivo-pluvial à 4,6 en régime pluvial sans influence cévenole. La tendance saisonnière de la crue annuelle est donc importante mais liée au régime.

La crue annuelle a une bonne capacité à distinguer des saisons contrastées au cours du cycle hydrologique et à augmenter quand les crues sont fortes.

La description détaillée de l'indice mensuel de distorsion pas régime est également présentée avec les graphes en boîte.

6.1.3.1 Description détaillée de l'indice mensuel de distorsion par régime.

Cet indice est le rapport du débit médian mensuel inter-annuel rapporté au débit médian inter-annuel. Le débit médian inter-annuel est la référence et est ainsi nommée par la suite. Rappelons que le débit médian est représentatif de débits fréquents.

de distorsion.

6.1.3 Description détaillée et typologie des régimes avec l'indice mensuel

Le gradex des débits et la crue annuelle se saisonnalisent, comme les ΔQ . Les saisons indiquées par le gradex et la crue annuelle sont assez proches de celles définies par les ΔQ .

Le gradex et la crue annuelle ne tiennent pas compte des conditions passées de débit, à la différence de la Vhpf et de la Vhf, ils sont difficilement interprétables en terme de Vhf et de Vhpf. En effet, si la crue annuelle est forte pour une saison donnée, elle ne s'inscrit pas forcément dans un contexte saisonnier de débits élevés ou non. Pourtant, le contexte saisonnier des débits est important pour les EEC. La Vhf et la Vhpf prennent en compte de ce contexte saisonnier, ce sont *a priori* une variable éco-hydrologique plus intéressante que la crue annuelle.

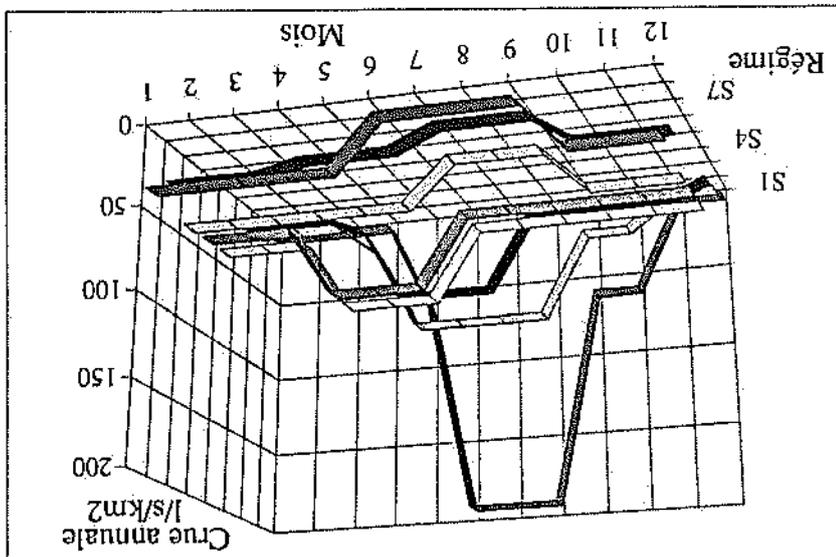
Le gradex des débits et la crue annuelle évoluent sensiblement au cours de l'année. L'année hydrologique est découpée en 2 ou 3 niveaux de saisons, sauf pour le gradex en régime nivo-pluvial.

annuale.

6.1.2.3 Conclusion de la typologie du gradex des débits et de la crue

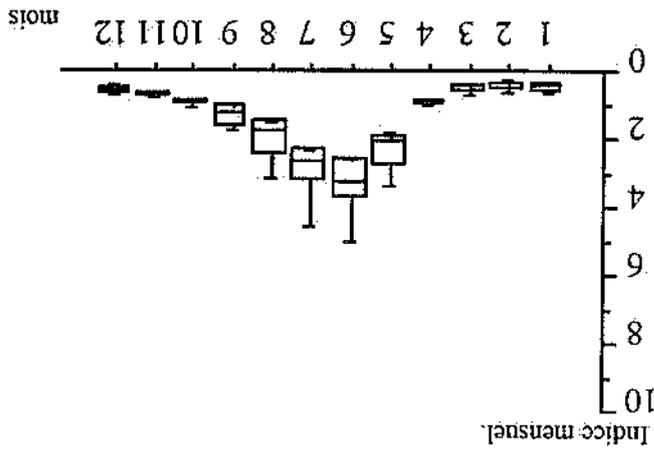
La saison présentant la crue annuelle maximale se déplace dans l'année, de juin à août en régime glaciaire puis d'octobre à avril en régime pluvial. Elle décroît du régime glaciaire au régime pluvial puis elle augmente en régime évenol.

Figure 6.1.2.2 Typologie de la crue annuelle par régime.



L'étage présente un faible indice mensuel de distortion, pendant une période plus courte qu'en régime glaciaire. Il ne commence qu'en décembre et s'achève en mars.

Figure 6.1.3.1.2 Indice mensuel de distortion en régime nivo-glaciaire.

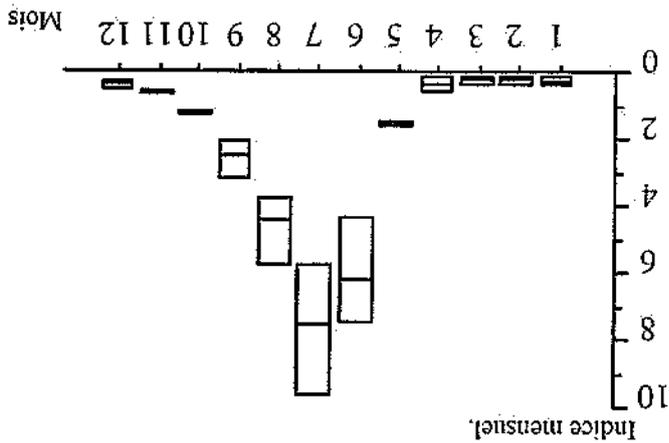


Cet indice atteint un maximum voisin de 3,5 en juin, lorsque de la fonte nivale. Les débits médians s'écartent moins de la référence qu'en régime glaciaire, même en période des hautes eaux.

Régime nivo-glaciaire.

À l'opposé, ce rapport est très faible pendant l'étage, de décembre à avril. L'hiver, les précipitations se produisent sous forme de neige et le froid empêche les écoulements.

Figure 6.1.3.1.1 Indice mensuel de distortion en régime glaciaire.



En régime glaciaire, les écoulements sont très saisonniers et se produisent pendant une période limitée à quelques mois dans l'année.

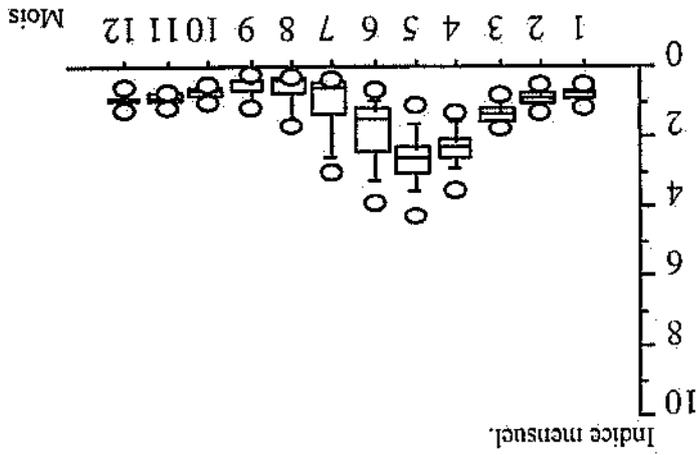
Ce régime se caractérise par un indice mensuel de distortion élevé. La médiane des 4 observations est voisine de 7 au mois de juillet. Les débits médians de juillet sont 7 fois supérieurs au débit médian inter-annuel. Cette forte distortion s'explique par la fonte glaciaire. Elle est intense et prolongée dans le temps.

Régime glaciaire.

Par contre, différence avec le régime nival, cet indice baisse en août et septembre (à 0,4) puis augmente ensuite jusqu'en novembre. Il se stabilise jusqu'en février.

Les pluies automnales et hivernales expliquent l'augmentation de cet indice des le mois d'octobre. L'inter-quartile de ces observations est plus étroit qu'en régime glaciaire, malgré une grande hétérogénéité de la surface, des précipitations et de la géologie des bassins versants de référence.

Figure 6.1.3.1.4 Indice mensuel de distorsion en régime nivo-pluvial.

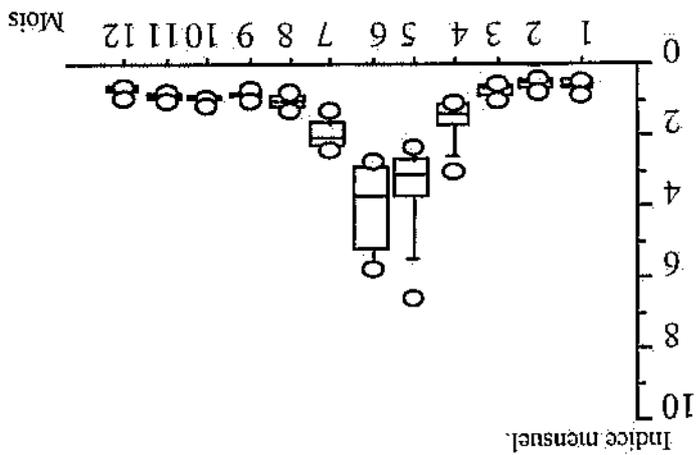


L'indice mensuel de distorsion atteint son maximum en mai (2,7), lors de la fonte nivale. Les débits médians mensuels sont influencés par la fonte nivale au printemps.

Régime nivo-pluvial.

L'influence des pluies automnales n'affecte pas la VHL en septembre et octobre, contrairement à la VHP.

Figure 6.1.3.1.3. Indice mensuel de distorsion en régime nival.

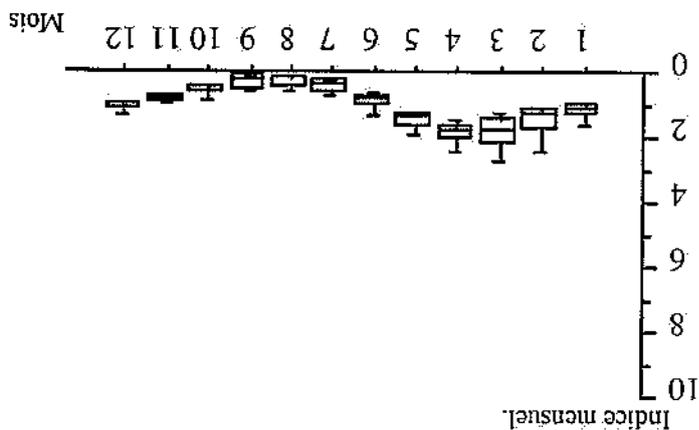


L'indice atteint un maximum de 3,5 en juin. La forte distorsion des débits médians en mai et juin est liée à la fonte de la neige. A l'inverse, cet indice évolue assez peu de septembre à mars et reste voisin de 0,6 à 0,7. Les débits médians de ce régime s'écartent assez peu de la référence mensuelle pendant cette période.

Régime nival.

Régime pluvio-nival.
 Ce régime se caractérise par un indice toujours inférieur à 2, à la différence des régimes précédents.

Figure 6.1.3.1.5 *Indice mensuel de distorsion en régime pluvio-nival.*



C'est en mars et avril que cet indice atteint un maximum, de 1,8. En août, il atteint son minimum de 0,2. Le maximum atteint en avril s'explique par les pluies printanières qui se produisent lors de la fonte nivale.

Au contraire, cet indice est faible en août à cause d'un étage assez sévère, qui rappelle celui du régime glaciaire.

Régime pluvial.

L'indice mensuel de distorsion évolue peu au cours de l'année, contrairement au régime glaciaire ou nival. En effet, les crues pluviales n'affectent qu'assez peu les débits médians car elles ne sont pas prolongées dans le temps.

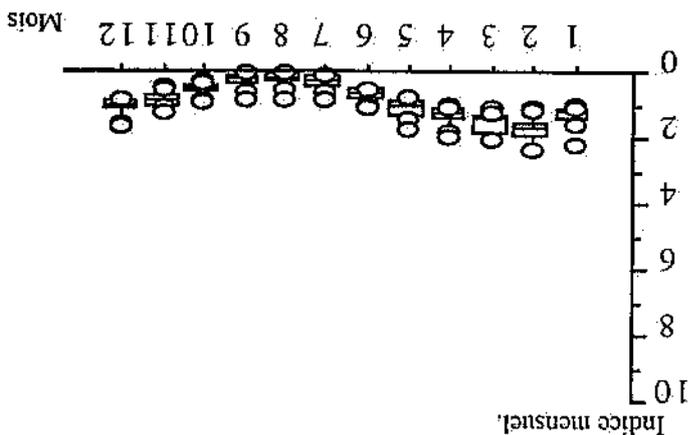
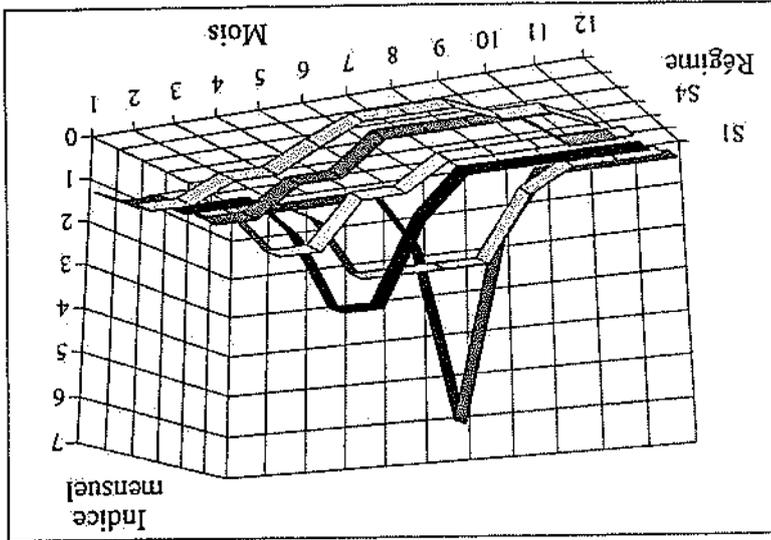


Figure 6.1.3.1.6 *Indice mensuel de distorsion en régime pluvial.*

Le régime cévenol ne se distingue pas du régime pluvial sans influence cévenole. C'est une différence importante par rapport à la VHPF et à la VHM.

L'indice mensuel de distorsion distingue un nombre important de saisons. Pour un régime donné, les saisons sont contrastées. En effet, le rapport entre les saisons extrêmes est de 14 en régime glaciaire, en liaison avec les forts écoulements estivaux. Pour les autres régimes, ce rapport est compris entre 3,1 en régime nivo-pluvial et 4,8 pour le régime pluvial.

Figure 6.1.3.3 Typologie de l'indice mensuel de distorsion par régime.



- 3 niveaux de saisons pour les autres régimes.
 - 4 niveaux de saison en régime pluvial.
- Selon les régimes, il existe :

6.1.3.3 Typologie de l'indice mensuel de distorsion par régime.

Cet indice pourrait être retenu pour définir les contraintes hydrologiques fréquentes subies par un EEC car il augmente lorsque les écoulements augmentent et diminue lorsqu'ils diminuent. Ces deux cas sont impossibles à distinguer. Ce rapport est toujours compris entre 0 et 1 en basses eaux alors qu'il n'est pas limité vers les maxima. En régime glaciaire, ce maximum est de 10 alors qu'il n'est que de 2 en régime pluvial. L'intérêt biologique de ce descripteur ne peut pas être conforté, mais il a paru nécessaire de relever cette propriété.

Cet indice étant un rapport de deux débits, il présente un inconvénient. Un faible rapport peut être le résultat de deux situations différentes :

- un numérateur élevé,
- un dénominateur faible.

Les cours d'eau d'un même régime forment des ensembles assez homogènes, malgré une grande hétérogénéité de la pluviosité annuelle, des contraintes de relief, de géologie et de taille des bassins versants. Ce descripteur ne distingue pas le régime évenol et le régime pluvial sans influence évenole. Par contre, ces deux régimes se différencient par leurs crues brutales. Du régime glaciaire au régime pluvial, cet indice passe par un maximum qui se situe de plus en plus tôt dans l'année, de juillet pour le régime glaciaire à février pour le régime pluvial.

D'une façon générale, la valeur maximale atteint par cet indice diminue lorsque la pluie alimente les écoulements. En effet, les crues provoquées par les pluies ne durent pas assez longtemps pour influencer les débits médians, à la différence de la fonte nivale et / ou glaciaire.

6.1.3.2 Conclusion sur la saisonnalisation de l'indice mensuel de distorsion.

6.1.4 Typologie de l'écart-type des débits par saisons mensuelles et par régime.

D'une façon générale, l'écart-type des débits par saisons mensuelles diminue du régime glaciaire au régime pluvial, régime cénéol excepté. L'écart-type des débits est élevé pendant les écoulements et faible en période d'étiage.

La saison présentant l'écart-type maximal se produit à diverses époques de l'année selon le régime. Ce maximum se produit :

- juin et juillet en régime glaciaire (moyenne 60 l/s/km²),
- mai à juillet (26 l/s/km²) en régime nivo-glaciaire,
- mai et juin (35 l/s/km²) en régime nival, avec un second maximum en octobre (20 l/s/km²).

Ces trois régimes présentent un faible l'écart-type des débits de décembre à mars car le froid empêche les écoulements.

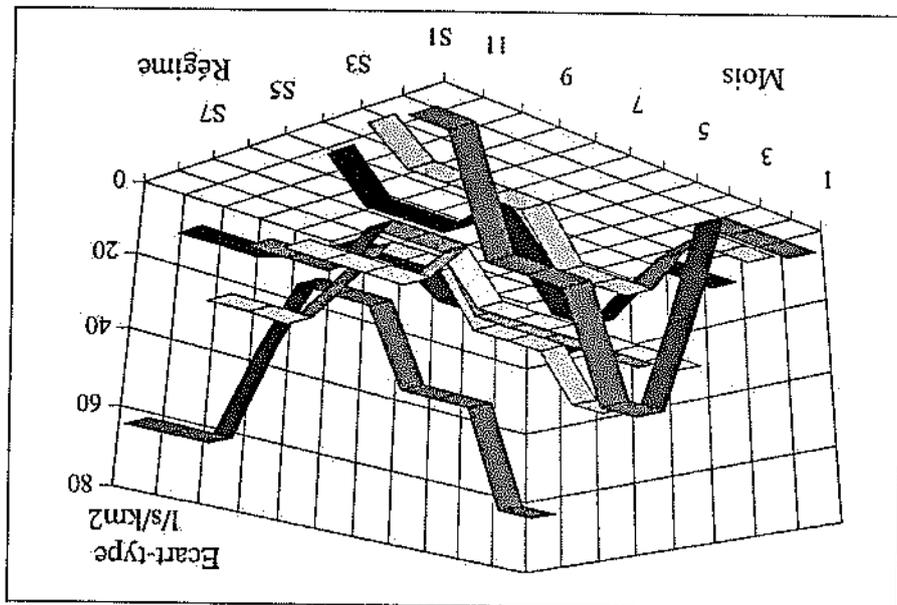


Figure 6.1.4 Typologie de l'écart-type des débits par régime.

Pour les régimes suivants, le maximum est atteint en :

- toute l'année en régime nivo-pluvial mais l'écart-type des débits reste élevé toute l'année. Seuls les mois d'août et de septembre présentent un faible écart-type,
- d'octobre à juin en régime pluvio-nival (27 l/s/km²),
- d'octobre à mars régime pluvial sans influence cénéole (18 l/s/km²).

Le régime cénéol présente un très fort écart-type des débits d'octobre à février, avec une médiane allant de 60 à 90 l/s/km² à cause des fortes crues cénéoles.

Selon les régimes, il existe :

- deux saisons, en régime nivo-pluvial et pluvio-nival, l'une des saisons ne dure qu'un mois en régime nivo-pluvial,
- trois saisons, pour les autres régimes. Chaque saison dure au mois deux mois.

Selon les régimes, divers niveaux de saisons se différencient :

- deux niveaux de saisons, en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et pluvial sans influence cévenole,
- trois niveaux de saisons pour les régimes glaciaire, nivo-glaciaire, nival et cévenol.

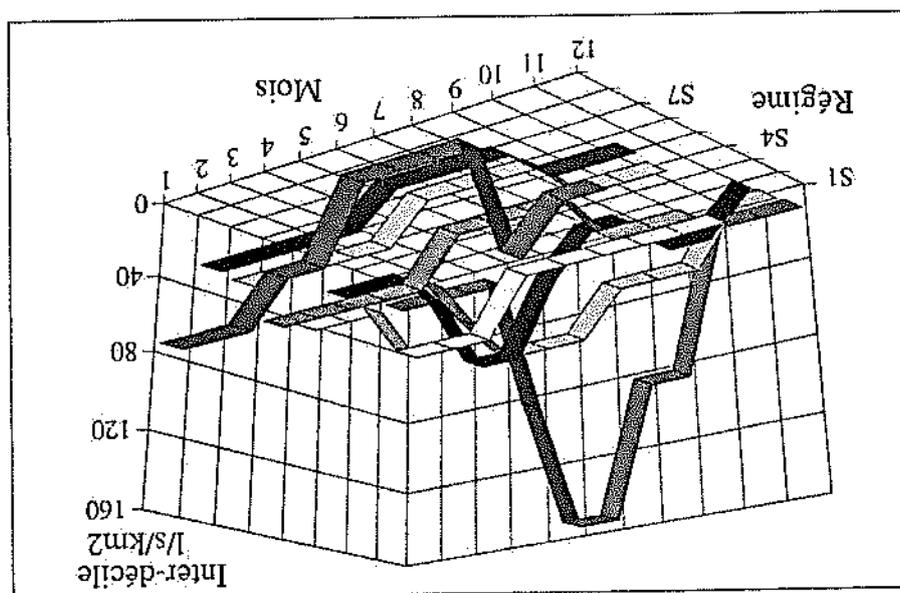
6.1.6 Typologie de l'inter-quartile par régime.

L'effet de la saison est d'autant plus marqué que les écoulements sont alimentés par la fonte glaciaire ou nivale. En effet, le rapport des inter-déciles entre les saisons extrêmes est de 1 en régime glaciaire et de 1,7 à 3 pour les régimes nivo-pluvial et pluvial sans influence cévenole. Parmi les régimes alimentés par les pluies, seul le régime cévenol présente une évolution saisonnière importante de ce descripteur avec un rapport de 6.

Selon les régimes, il existe :

- deux niveaux de saisons, en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et pluvial sans influence cévenole,
- trois niveaux de saisons, en régime glaciaire, nivo-glaciaire, nival et cévenol.

Figure 6.1.5 Typologie de l'inter-décile par régime.



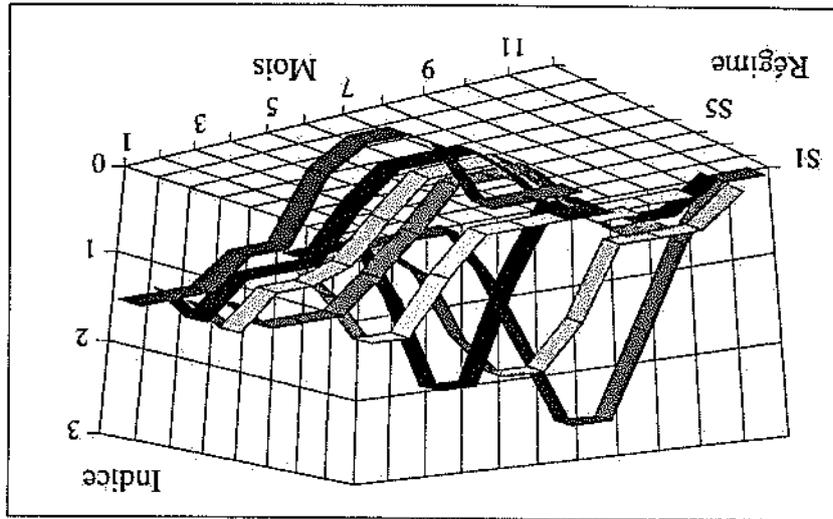
Par contre, l'inter-décile est faible à l'étiage, les distributions des débits sont plus étroites à l'étiage qu'en hautes eaux.

L'inter-décile est assez fort à fort en période de hautes eaux, ce qui rend compte d'une certaine dispersion des débits.

6.1.5 Typologie de l'inter-décile par régime.

Le rapport entre saisons de VH extrêmes est variable selon les régimes, il est de 11 en régime glaciaire, 6,2 en régime nivo-pluvial et de 4 en régime cévenol. Pour les autres régimes, il est compris entre 1,6 en régime nivo-pluvial et 3,5 en régime nival. Ce descripteur définit des saisons assez contrastées au cours du cycle hydrologique.

Figure 6.1.7 Typologie de l'indice saisonnier par régime.

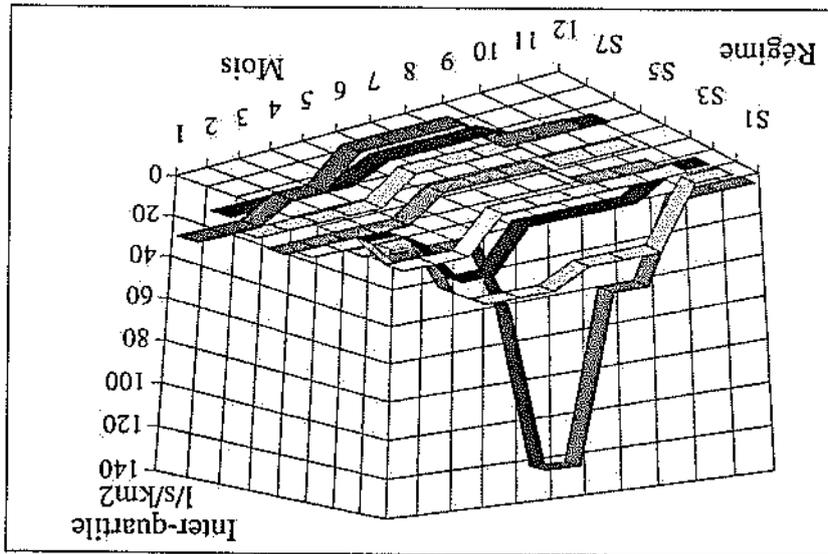


L'indice saisonnier fournit de nombreuses saisons qui sont contrastées.

6.1.7 Typologie de l'indice saisonnier.

En régime nivo-glaciaire, nival et cévenol, ce rapport est compris entre 4,5 et 5,8. Pour les autres régimes, il est compris entre 2 et 4. L'effet de la saison diminue du régime glaciaire au régime pluvial. A l'étaage, l'inter-quartile est faible pour tous les régimes, compris entre 3,7 et 7,6 l/s/km².

Figure 6.1.6 Typologie de l'inter-quartile par régime.



C'est le régime glaciaire qui présente la plus forte évolution saisonnière de l'inter-quartile. Le rapport de l'inter-quartile moyen des saisons extrêmes est de 13. Ce régime présente le plus fort inter-quartile, lorsque se produisent les écoulements, en juin et juillet. La moyenne de cette étendue de débit est de 80 l/s/km².

Il présente un nombre de saisons par régime relativement élevé. Ces saisons sont assez proches de celles obtenues avec les ΔQ .

En régime glaciaire et nival, l'une des saisons ne dure que 2 mois, avril et mai puis octobre et novembre respectivement.

- trois saisons en régime cèvevole.
 sans influence cèvevole.
 - deux saisons en régime glaciaire, nivo-glaciaire, nival, pluvio-nival, pluvial, pluvial
 - une saison en régime nivo-pluvial,
 Selon les régimes, l'année se décompose en :

L'inter-décile rapporté à la médiane passe par un maximum à la fin de l'étage, en avril et mai pour le régime glaciaire et nivo-glaciaire. Pour les régimes à influence pluviale, cet indice atteint un maximum à la fin de l'été ou à l'automne.

6.2.1 Typologie de l'inter-décile rapporté à la médiane par régime.

Ces descripteurs présentent les mêmes valeurs en hautes et basses eaux alors que les distributions de débits sont très différentes. C'est un inconvénient important.

6.2 Les descripteurs peu sensibles aux distributions de fréquence.

En conséquence, ces descripteurs remplissent les critères de choix recherchés, ils sont intéressants pour décrire la VH.

Dans l'ensemble, le rapport entre saisons de VH extrêmes (rapport de la saison de VH maximale sur la saison de VH minimale pour chaque régime) est plus ou moins élevé, d'environ 3 à 20 selon le descripteur et le régime considéré. Ce rapport traduit des saisons de VH contrastées au cours des 12 mois de l'année, donc une sensibilité plus ou moins forte aux distributions de débits.

Ces descripteurs passent par des maxima lorsque les distributions de débit s'élargissent, en période de hautes eaux. Ils sont intéressants pour nos recherches car les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence sont recherchés de préférence.

Les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence des débits sont :

- les ΔQ , via leurs paramètres d'échelle et de position A et B,
- les débits, via leurs paramètres d'échelle et de position G_x et Q_0 ,
- l'écart-type,
- l'inter-décile et l'inter-quartile, qui sont des étendues de débit,
- l'indice mensuel de distorsion et l'indice saisonnier.

6.1.8 Conclusion du paragraphe 6.1.

Le rapport entre saison de VH est de 6 à 8 pour les régimes à influence pluviale et de 20 en régime glaciaire.

Il se dessine :

- 5 niveaux de saisons en régime pluvial sans influence cèvevole.
- 4 niveaux pour les autres régimes.
- 3 niveaux de saisons en régime nivo-pluvial.

L'effet de la saison est peu marqué pour tous les régimes, excepté le régime cévenol qui présente un indice élevé en octobre. En régime glaciaire, le rapport entre les saisons extrêmes maximale ne dure qu'un mois.

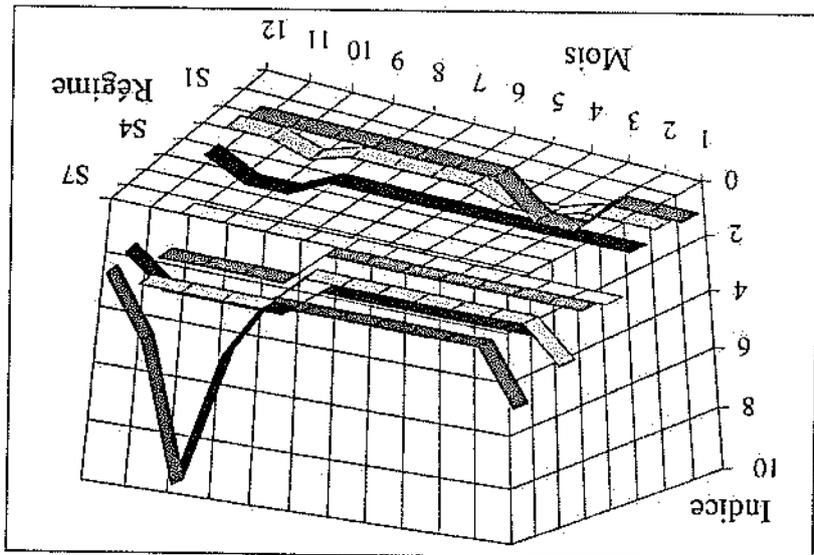


Figure 6.2.1 Typologie du rapport de l'inter-décile à la médiane par régime.

Pour les autres régimes, le rapport entre saisons extrêmes est compris entre 1,4 et 1,6.

6.2.2 Typologie de l'inter-quartile rapporté à la médiane par régime.

Comme le rapport de l'inter-décile rapporté à la médiane, l'inter-quartile rapporté à la médiane passe par un maximum à la fin de l'hiver.

Ce maximum est observé en avril et mai en régime glaciaire, de mars à juin en régime nivoglaciale. Pour les régimes à influence pluviale, c'est la fin de l'été et l'automne que ce rapport atteint son maximum.

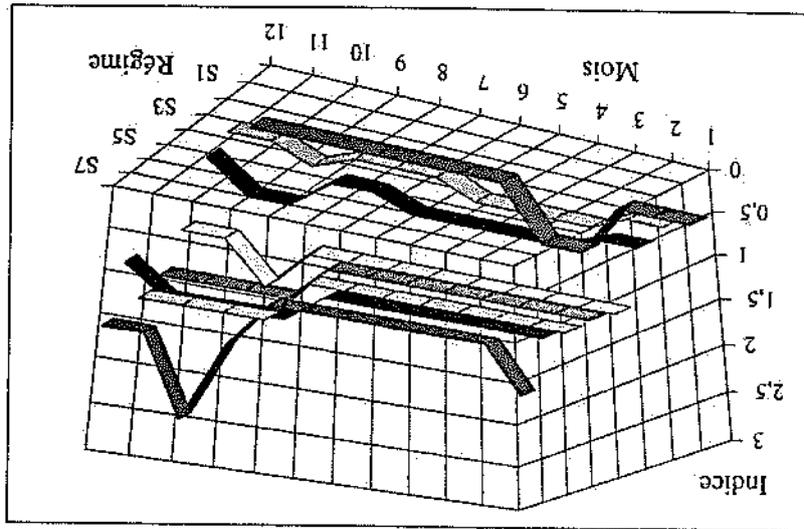


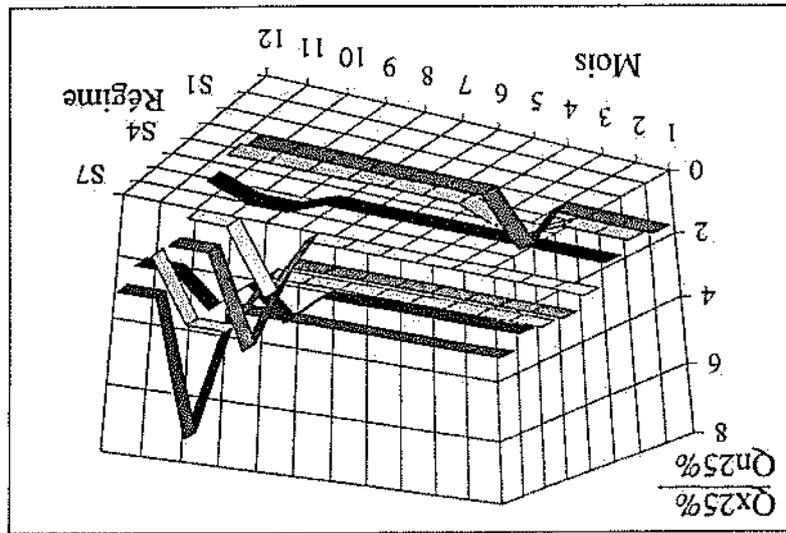
Figure 6.2.2 Typologie de l'inter-quartile rapporté à la médiane par régime.

Le coefficient de variation passe par un maximum au cours du cycle annuel à la fin de l'hiver, à la fin de l'automne pour les régimes à influence pluviale, au printemps pour les régimes glaciaires. De plus, il augmente du régime glaciaire au régime pluvial.

6.2.4 Typologie du coefficient de variation par saisons mensuelles et par régime.

Pour les régimes à influence pluviale (nivo-pluvial à pluvial avec ou sans influence cévenole), c'est au mois d'octobre que ce descripteur atteint son maximum.

Figure 6.2.3 Typologie du rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur.



Le nombre niveaux de saisons est de deux pour tous les régimes. Le rapport entre saisons extrêmes est compris entre 1,2 et 2,2 selon les régimes.

Le rapport $Qx\ 25\%/Qn\ 25\%$ ne distingue pas de saisons contrastées au cours du cycle hydrologique.

6.2.3 Typologie du rapport du quartile supérieur au quartile inférieur.

Comme pour le rapport de l'inter-décile à la médiane, les régimes à influence pluviale présentent un indice plus élevé que les régimes glaciaire, nivo-glaciaire et nival.

Pour l'ensemble des régimes, l'effet de la saison est assez faible, y compris pour le régime cévenole. Le rapport entre saisons extrêmes est compris entre 1,3 (régime pluvial sans influence cévenole) et 2,3 (régime cévenol). Cet indice ne différencie pas de saisons contrastées au cours du cycle hydrologique.

Selon les régimes, il existe :

- une saison en régime nivo-pluvial,
- deux saisons en régime glaciaire, nivo-glaciaire, nivo-pluvial, pluvial et pluvial sans influence cévenole,
- trois saisons en régime cévenol mais l'une des saisons ne dure qu'un mois, octobre.

Selon les régimes, il existe :

- un seul niveau de saison, en régime nivo-glaciaire et pluvial sans influence cévenole,
- deux niveaux de saisons en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cévenol,
- trois en régime glaciaire.

Comme le coefficient de variation, l'écart-type du logarithme des débits passe par un maximum à la fin de l'étage, d'avril à juin en régime glaciaire. C'est en avril et mai pour le régime nivo-glaciaire, à la fin de l'été ou à l'automne pour les régimes à influence pluviale que ce maximum est atteint. Ce descripteur augmente du régime nivo-glaciaire au régime pluvial.

6.2.5 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits par saisons mensuelles et par régime.

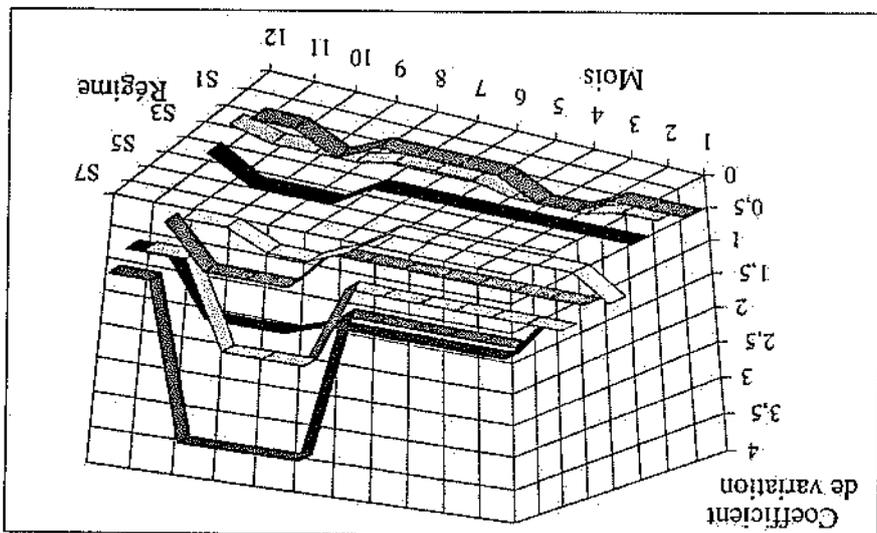
Le rapport entre saisons extrêmes varie de 1,4 en régime nivo-glaciaire à 1,9 en régime pluvial. Pour un même régime, le contraste saisonnier est assez faible, par rapport aux autres descripteurs.

La capacité du coefficient de variation à distinguer des saisons contrastées est limitée. Il ne rend pas compte des contraintes hydrologiques liées aux crues car il n'augmente pas en hautes eaux.

Selon les régimes, le nombre de saisons est de :

- trois pour les régimes nivo-pluvial et pluvial sans influence cévenole,
- deux saisons pour les autres régimes.

Figure 6.2.4 Typologie du coefficient de variation par régime.

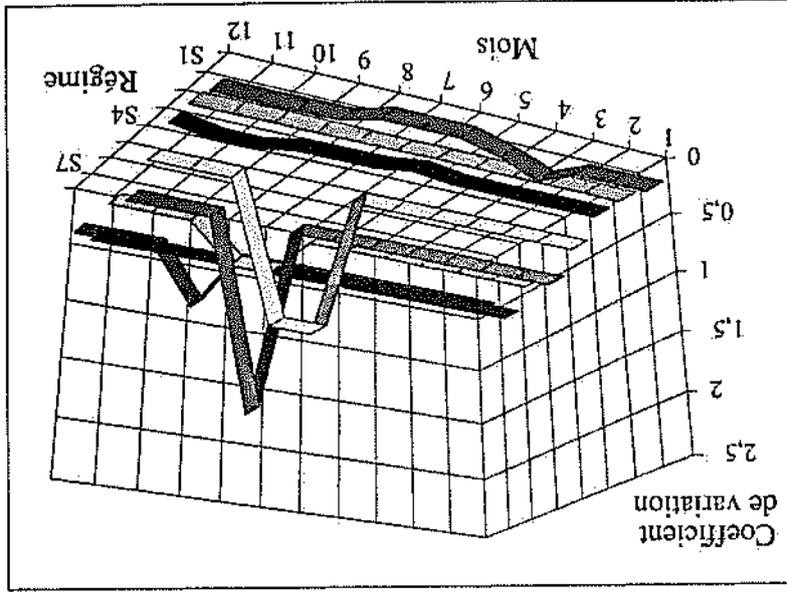


Selon les régimes, il existe :

- un niveau de saison, pour les régimes nivo-glaciaire et pluvial sans influence cévenole;
- deux niveaux de saisons, en régime nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cévenol.

Cependant, l'une des saisons ne dure qu'un à deux mois.

Figure 6.2.6 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits par régime.

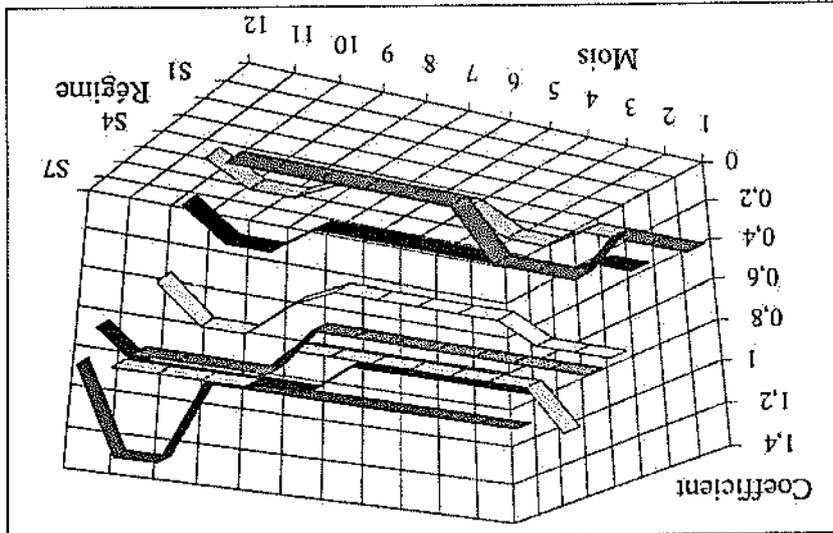


D'une façon générale, cet indice augmente du régime glaciaire au régime pluvial. Il augmente à la reprise des écoulements.

6.2.6 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits par régime.

Le rapport entre saisons extrêmes pour un régime donné est de 5,2 en régime nival mais il est compris entre 1,2 et 1,6 pour les autres régimes. L'écart-type du logarithme des débits ne définit pas des saisons très contrastées au cours du cycle hydrologique.

Figure 6.2.5 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits spécifiques par régime.

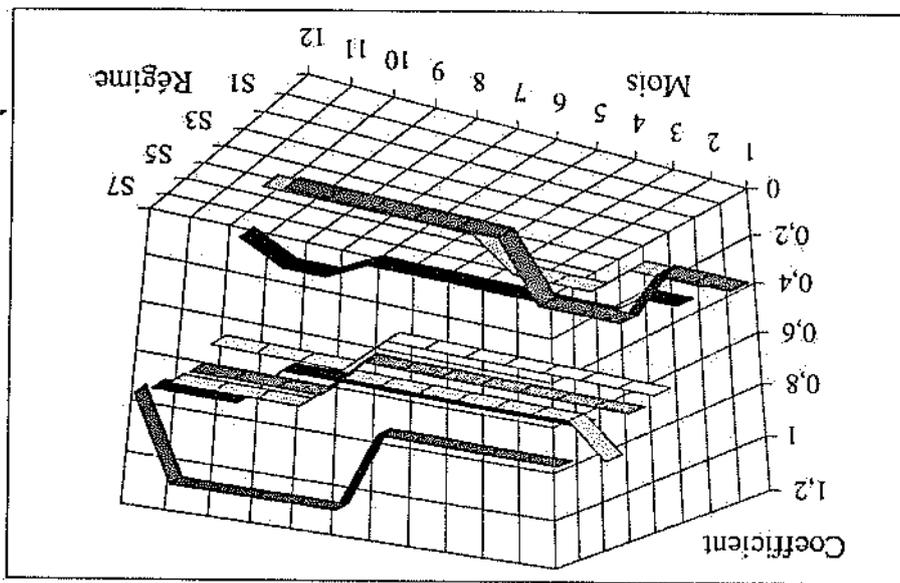


Ce descripteur passe par son maximum à la fin de l'étage. Il est atteint en avril et mai en régime glaciaire, en mars, octobre et novembre en régime nivo-glaciaire et d'août à novembre pour les régimes à influence pluviale.

6.2.8 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits traduits par saisons mensuelles et par régime.

Le rapport entre saisons extrêmes est modeste, il varie de 1,2 en régime pluvial à 1,6 en régime glaciaire. Ce descripteur ne décrit pas des saisons contrastées au cours de l'année, ce qui est un inconvénient. En effet, il ne différencie pas les crues qui évoluent au cours de l'année.

Figure 6.2.7 Typologie par régime de l'écart-type du logarithme des débits traduits.



ne dure que trois mois.
 Pour les régimes glaciaire, nivo-glaciaire et pluvial sans influence cévenole, l'une des saisons - deux niveaux de saisons pour les autres régimes.
 - trois niveaux de saisons en régime nival.
 Selon les régimes, il existe :

nivo-pluvial. Pour un régime donné, il prend son maximum à la fin de l'étage.
 Comme pour l'écart-type du logarithme des débits, ce descripteur augmente du régime nivo-glaciaire au régime pluvial. Cette augmentation est brutale du régime nival au régime

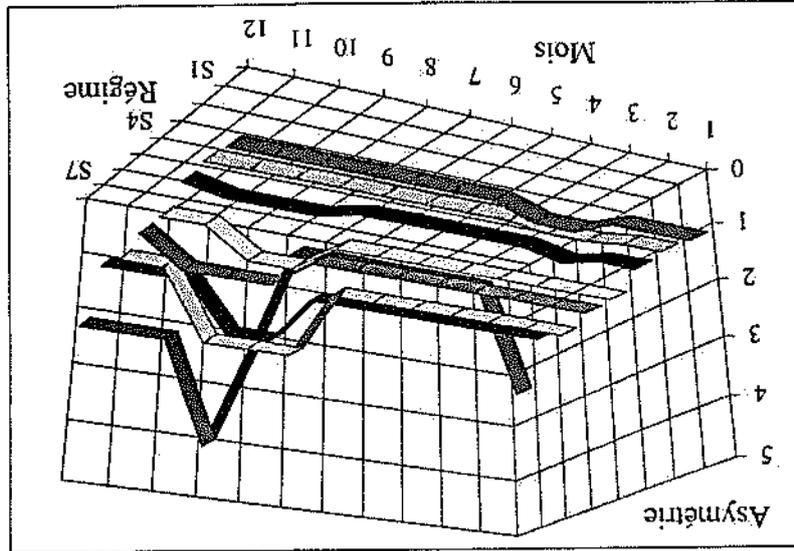
6.2.7 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits traduits par saisons mensuelles et par régime.

Le rapport entre saisons extrêmes varie selon les régimes. Il est de 4,6 en régime nivo-pluvial, 3,9 à 3,2 pour les régimes pluvio-nival et glaciaire mais compris entre 1 et 2,1 pour les autres régimes. Les saisons définies par ce descripteur sont plus contrastées qu'avec l'écart-type du logarithme des débits mais les saisons sont peu nombreuses.

- trois niveaux de saisons en régime glaciaire et nival mais l'une des saisons ne dure qu'un mois.

En régime nivo-glaciaire et nival, deux maxima se distinguent, l'un en mars et avril, l'autre de septembre à novembre.

Figure 6.2.9 Typologie du rapport de la moyenne à la médiane par régime.



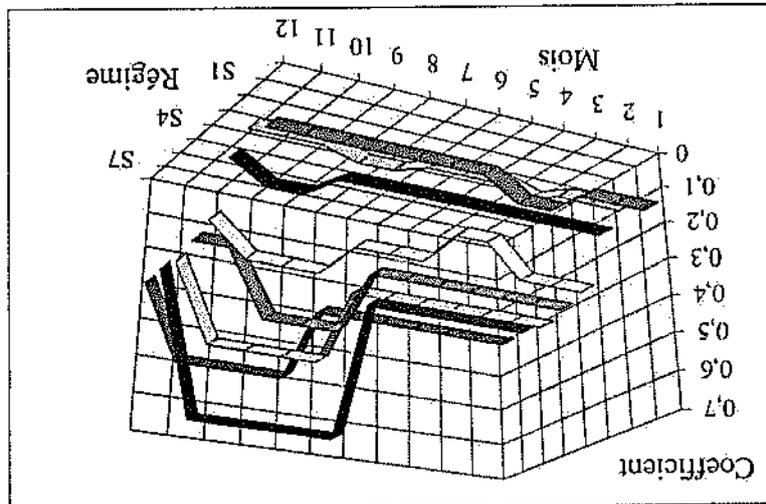
Ce descripteur passe par son maximum à la reprise des écoulements, à la fin de l'été ou à l'automne pour les régimes à influence pluviale, au printemps pour les régimes glaciaires.

6.2.9 Typologie de la moyenne rapportée à la médiane par saisons mensuelles et par régime.

Ce descripteur ne distingue pas de saisons contrastées au cours du cycle hydrologique car le rapport entre saisons extrêmes est compris entre 1,3 en régime nivo-glaciaire et 2,3 en régime pluvial sans influence cénocle.

Il existe 3 niveaux de saisons en régime nivo-pluvial et deux niveaux de saisons pour les autres régimes.

Figure 6.2.8 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits translatés.



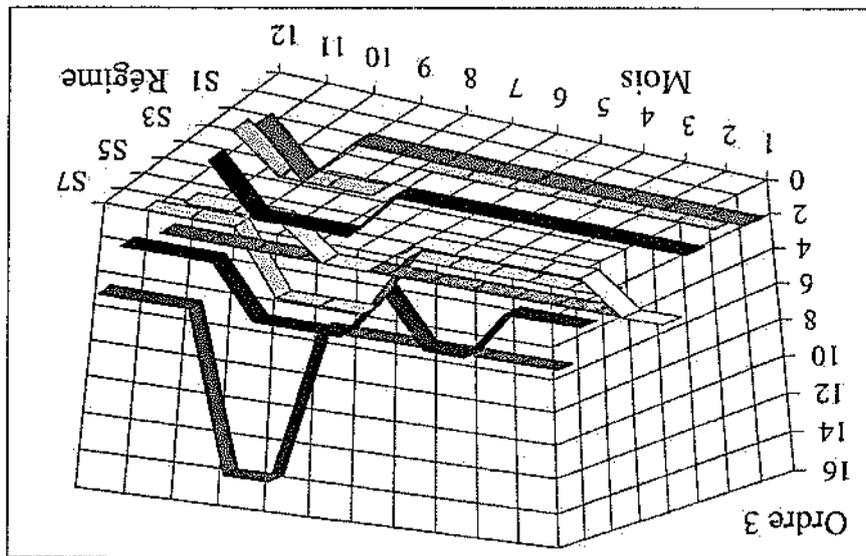
Le rapport entre saisons extrêmes est modeste, il varie de 1 à 2,6 selon les régimes. Ce descripteur ne distingue pas de saisons contrastées au cours du cycle annuel, ce qui est un inconvénient.

En régime glacière, l'une des saisons ne dure qu'un mois (octobre). En régime cénéol, en régime nivo-glaciaire, nival et pluvial, l'une des saisons ne dure que 3 mois.

L'effet de la saison est peu sensible en régime glacière et devient croissant avec l'influence de la pluie sur les écoulements. En effet, il existe :

- un niveau de saison en régime pluvio-nival,
- 2 niveaux de saisons pour les autres régimes.

Figure 6.2.10 Typologie du moment d'ordre 3 par régime.



Le moment d'ordre 3 augmente du régime glacière au régime pluvial. Par contre, il n'est pas particulièrement élevé lorsque les écoulements sont importants. C'est en régime cénéol que le moment d'ordre 3 est le plus fort (14 en juillet et août).

6.2.10 Typologie du moment d'ordre 3 par saisons mensuelles et par régime.

Le rapport entre saisons extrêmes est faible, il varie de 1,08 en régime nivo-glaciaire à 1,72 pour le régime pluvial. Seul le régime cénéol présente des saisons contrastées, ce rapport atteint 9,7, les mois de septembre et octobre ont un rapport moyenne sur médiane élevé. (annexe 6.3.2.1).

Pour ce descripteur, il existe :

- trois niveaux de saisons en régime cénéol,
- deux niveaux de saisons pour les autres régimes. Pour le régime glacière, nival, régime nivo-pluvial et pluvial sans influence cénéole, l'une des saisons dure deux mois continus. En régime nivo-glaciaire et nival, les deux niveaux de saisons sont découpés en 4 saisons discontinues.

Le nombre de saisons présente dans le tableau qui suit est le nombre de niveaux de saisons de ce régime. Au cours du cycle hydrologique, plusieurs mois peuvent présenter le même niveau de saisons sans être successifs.

Généralement, les descripteurs distinguent de deux ou trois niveaux de saisons pour un régime donné. Il n'y a pas de grosses différences entre les descripteurs mais certains rapports distinguent une saison d'un ou deux mois. Ce test permet d'évaluer la sensibilité des descripteurs aux distributions de fréquence des débits. Des descripteurs indiquant plusieurs niveaux de VH sont plus sensibles à ces distributions qu'un descripteur qui n'indique qu'un seul niveau de VH.

6.3.1 Nombre de niveaux de saisons par régime.

Dans ce paragraphe, le nombre de saisons définies par descripteur pour chaque régime est présenté. Il est important de savoir quel est le nombre de saisons de VH homogène pour chaque régime. Cela peut être un critère de choix possible parmi tous les descripteurs passés en revue depuis le début de ces recherches.

Ensuite, le rapport entre saisons de VH extrême a été calculé pour chaque régime car la VH évolue au cours du cycle hydrologique mais pas de la même façon selon le descripteur utilisé. Ce rapport peut être utilisé comme critère de choix de ou des descripteurs retenus en fin de recherche.

6.3 Synthèse du nombre de saisons et du rapport entre saisons extrêmes des descripteurs de la VH.

En conséquence, les rapports sans dimension sont peu intéressants pour nos recherches car ils sont insensibles aux distributions de débit.

En effet, le rapport entre saison de VH extrême est faible, compris entre 1,5 et 2, parfois 3. Ils passent par leur maximum à la fin de l'étage. La normalisation de ces descripteurs par la moyenne ou par la médiane ou par un débit classé (rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur) les rend insensibles aux distributions de fréquence des débits.

Ce paragraphe a été consacré à la typologie des descripteurs peu sensibles aux distributions de fréquence des débits. Ce sont des rapports sans dimension, ils sont plus ou moins comparables entre bassins versants. Ces descripteurs sont :

- le coefficient de variation,
- les descripteurs synthétiques utilisant le logarithme des débits, comme l'écart-type et le coefficient de variation du logarithme des débits transformés ou non,
- l'inter-décile ou l'inter-quartile rapporté à la médiane,
- le moment d'ordre 3,
- le rapport de la moyenne et de la médiane,
- le rapport du quartile supérieur rapporté au quartile inférieur.

6.2.11 Conclusion du paragraphe 6.2.

Cette fois, le nombre de saisons a été compté différemment. A chaque changement de niveau de saisons, recherché dans l'ordre chronologique, une saison a été comptée. Le nombre de changement de niveaux de saisons est plus important que dans le cas précédent car un niveau de saison donné peut se retrouver plusieurs fois au cours de l'année, de façon discontinue.

Le nombre de saisons discontinues est plus important pour les descripteurs comme les indices A et B, le gradex et la crue annuelle, écart-type des débits ou l'inter-décile et inter-quartile que pour les autres descripteurs. Ce premier groupe montre de 2,8 à 4,3 saisons en moyenne par régime contre 2,25 à 2,88 saisons pour les autres régimes. Par contre, les indices A et B ne distinguent que 2,75 et 3 saisons contre 3,25 et 2,88 pour le gradex des crues et Q0.

6.3.2 Recherche du nombre de changements de niveaux de saisons par régime et par descripteur.

Le nombre de saisons définies par chaque descripteur est un élément de choix du ou des descripteurs qui sont finalement retenus pour décrire la VH.

σ = Ecart-type; C.V., Coefficient de variation; Q, débit; Q + 1, débits translatés.

Tableau 6.3.1 Nombre de niveaux de saisons selon les descripteurs et le régime.

Indice/Régime	Glaciaire	Nivo-glaciaire	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-nival	Pluvial	Sans cévenol	Cévenol	Moyen
Indice A (VHP)	2	3	3	1	3	2	2	3	2,38
Indice B (VHD)	3	4	3	2	2	2	3	2	2,63
Gradex	2	3	3	1	3	2	2	3	2,38
Q0	3	3	3	2	2	2	3	2	2,5
Indice mensuel	3	3	3	3	3	3	3	4	3,17
Ecart-type	3	3	3	2	2	3	3	3	2,75
Inter-décile	3	3	3	2	2	2	2	3	2,5
Inter-quartile	3	3	3	2	2	2	2	3	2,5
Indice saisonnier	4	4	4	3	4	5	4	4	4
Coef variation	2	2	2	3	2	2	3	2	2,25
Moyenne/Médiane	2	2	2	2	2	2	2	3	2,13
Inter-décile/Médiane	2	2	2	1	2	2	2	3	2
Inter-quartile/Médiane	2	2	3	1	2	2	2	3	2,13
Ordre 3	2	2	2	2	1	2	2	2	1,88
σ Ln(Q)	2	2	3	2	2	2	2	2	2,25
σ Ln(Q+1)	2	2	3	2	2	2	2	2	2,13
C.V. Ln(Q)	3	1	3	2	2	2	1	2	2
C.V. Ln(Q+1)	2	2	2	2	2	2	2	2	2,13
Qx 25%/Qn 25%	2	2	2	2	2	2	2	2	2

- ceux qui présentent un rapport entre saisons de VH extrêmes faible, compris entre 1,6 et 2,5. Les rapports sont indiqués en italique. Les descripteurs sont le coefficient de variation, le rapport de la moyenne à la médiane, l'inter-décile ou l'inter-quartile rapporté à la médiane, le moment d'ordre 3 et les descripteurs utilisant le logarithme des débits, traduits ou

- ceux qui présentent un rapport entre saisons de VH extrêmes élevé, c'est le cas des indices A et B, du gradex des crues et de la crue annuelle, de l'écart-type des débits, de l'indice mensuel de distortion, de l'inter-décile et de l'inter-quartile et de l'indice saisonnier. Le rapport moyen de ces descripteurs entre saisons extrêmes varie de 3,6 à 9,4, ces chiffres sont indiqués en gras. Ces descripteurs distinguent des saisons plus contrastées que le gradex des crues hydrologique. L'indice A distingue des saisons plus contrastées que le gradex des crues (rapport moyen de 4,4 contre 3,6), comme l'indice B et la crue annuelle (rapport moyen de 9,4 contre 6,5). Ces descripteurs sont sensibles aux distributions de fréquence des débits.

Les descripteurs ont été regroupés en deux classes :

Le rapport entre saisons extrêmes est présenté pour chaque régime et pour chaque régime dans le tableau qui suit. C'est le rapport entre la saison présentant la VH maximale divisé par la saison présentant la VH minimale, même si ces saisons ne durent qu'un mois. Ce rapport est un moyen de tester la sensibilité des descripteurs aux distributions de fréquence des débits. Ce rapport est calculé pour chaque régime et pour chaque descripteur.

6.3.3 Rapport entre saisons extrêmes.

σ = Ecart-type; C.V., Coefficient de variation; Q, débit; Q + 1, débits traduits.

Tableau 6.3.2 Nombre de changements de niveaux de VH pour chaque régime.

Indice/régime	Glaciaire	Nivo-placiaire	Nival	Nivo-pluvial	Pluvial	Pluvio-nival	Pluvial	Sans événement	Cévenol	Moyen
Indice A	2	3	4	1	4	4	2	2	4	2,75
Indice B	4	5	4	2	2	2	2	3	2	3
Gradex	2	6	5	1	4	4	2	2	4	3,25
Crue annuelle	4	4	4	2	2	2	2	3	2	2,88
Indice mensuel	4	4	4	4	4	4	6	5	6	5,63
Indice saisonnier	6	6	6	4	6	6	7	6	5	5,75
Ecart-type	4	4	6	2	2	2	4	5	4	3,88
Inter-décile	4	4	6	2	2	2	2	2	5	3,38
Inter-quartile	4	4	6	2	2	2	2	2	4	3,25
Coef variation	4	4	4	2	4	2	2	3	2	2,88
Moyenne/Médiane	2	4	4	2	2	2	2	2	4	2,75
Inter-décile/Médiane	2	4	4	1	2	2	2	2	6	2,63
Inter-quartile/Médiane	2	4	4	1	2	2	2	2	4	2,63
Ordre 3	2	2	2	4	4	1	2	4	2	2,38
$\sigma_{\ln(Q)}$	2	4	4	4	4	2	2	2	2	2,75
$\sigma_{\ln(Q+1)}$	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2,25
C.V. $[\ln(Q)]$	4	1	4	2	2	2	2	1	2	2,25
C.V. $[\ln(Q+1)]$	2	4	2	4	2	2	2	2	2	2,25
C.V. $[\ln(Q+1)]$	2	4	2	4	2	2	2	2	2	2,5
$Q_{x 25\%}/Q_n 25\%$	2	2	2	2	2	2	2	4	2	2,13

Il faut également bien définir quelle est la prévisibilité qui est recherchée. En effet, rechercher la prévisibilité des crues peut se comprendre de plusieurs façons. Est-ce la prévisibilité des débits atteints qui est recherchée ou est-ce la prévisibilité du nombre de dépassements d'un seuil de débit par saison, seuil qui reste à définir ? Dans le premier cas, seuls les débits atteints sont considérés alors que dans le deuxième, la valeur des débits atteints n'est pas prise en compte. Dans le premier cas, des critères doivent être choisis pour définir

des débits spécifiques. Les mesures de Colwell permettent de savoir si un phénomène est périodique ou pas, comme indiqué en bibliographie (paragraphe 1.2.3.2). Cependant, Resh et al. (1988) travaillent avec tous les débits, et pas seulement ceux qui sont susceptibles d'être des perturbations. De plus, ils utilisent le logarithme des débits absolus, ce qui ne les rend pas comparables d'un bassin versant à l'autre. Les débits auraient été davantage comparables avec

indices A et B ne fournissent qu'une VH "moyenne" sur la durée d'une chronique. Les indices A et B ne permettent pas de savoir comment se répartissent les perturbations dans le temps. Les ΔQ ne permettent pas de savoir comment se répartissent les perturbations dans le temps et en fonction du stade de développement des espèces aquatiques. Cependant, la loi exponentielle appliquée aux

6.3.4 Un parallèle avec la notion de prévisibilité développée par Colwell (1974).

σ = Ecart-type; C.V., Coefficient de variation; Q, débit; Q + 1, débits translatés.

Tableau 6.3.3 Rapport entre saison de VH extrêmes pour chaque régime.

Indice/régime	Glaciaire	Nivo-glaciaire	Nival	Nivo-pluvial	Pluvial	Pluvio-nival	Pluvial	Sans événement	Moyen
Indice A	7,2	5,5	2,7	1	3,1	3,5	2,3	10	4,4
Indice B	20	20	4,5	1,7	3,2	6,9	8,9	9,8	9,4
Gradex	6,8	4	2,9	1	2,8	3,2	2,1	5,9	3,6
Q0	22	6	4,4	2	2,6	4,3	4,6	5,9	6,5
Indice mensuel	13	4,1	4,4	3,1	4,2	4,8	4,2	4,4	4,3
Indice saisonnier	12	4,8	5,3	2,4	4,9	4,9	4,3	6,9	5,7
Ecart-type	11	6,2	3,5	1,7	2,3	3,3	2,3	4	4,3
Inter-décile	11	4,2	4,2	1,7	2,2	3,4	2,9	6	4,5
Inter-quartile	13	4,6	4,9	2	2,5	3,9	3,1	5,8	5
Coef variation	1,6	1,4	1,7	1,8	1,6	1,9	1,6	2,8	1,8
Moyenne/Médiane	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,7	1,6	2,4	1,8
Inter-décile/Médiane	2,1	1,5	1,6	1	1,5	1,4	1,4	3,4	1,8
Inter-quartile/Médiane	2,1	1,5	1,7	1,4	1,4	1,4	1,3	2,3	1,6
Ordre 3	2,3	2,4	2,3	1,5	1	1,9	1,9	2,6	2
$\sigma \ln(Q)$	1,6	1,4	5,2	1,4	1,3	1,3	1,2	1,5	1,8
$\sigma \ln(Q+1)$	1,6	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4	1,3
C.V. $\ln(Q)$	3,2	1	2	4,6	3,9	1,8	1	2,1	2,5
C.V. $\ln(Q+1)$	1,4	1,3	1,4	2	1,6	1,7	2,3	1,7	1,7
Qx 25% / Qn 25%	1,8	1,4	1,3	1,4	1,8	1,7	1,3	2,4	1,7

non. Ces descripteurs ne distinguent pas de saisons contrastées au cours de l'année. Ce sont des indices d'asymétrie, ils sont peu sensibles aux distributions de fréquence des débits.

D'autres régimes présentent une VH prévisible par constance. C'est le cas de la VHpf moyenne nivo-pluvial, pour lequel un seul niveau de saison a été décelé au cours de l'année. La VHpf moyenne par mois est la même pour les 12 mois de l'année, $P = 1$, totale par constance.

6.3.4.2 Régimes prévisibles par constance.

Tableau 6.3.4.1 Exemple de régime prévisible par constance.

Rapport	Saison 1	Saison 2	Saison 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

La VH de certains régimes est prévisible par constance car l'effet saisonnier est très marqué. C'est le cas du régime cœvenol, $P = 1$, totale par constance.

6.3.4.1 Régimes prévisibles par constance.

A l'inverse, le fait d'observer un maximum de 3 saisons avec un rapport de 10 définit une prévisibilité totale par constance. Les niveaux de prévisibilité intermédiaires correspondent à un découpage en 2 ou 3 saisons avec des rapports entre saisons extrêmes compris entre 1 et 10. Selon les régimes, nous pouvons nous attendre à différentes prévisibilités de la VH. En effet, selon les régimes, de 1 à 3 niveaux de saisons ont été décelés avec un rapport entre saisons extrêmes compris entre 1 et 10. Les états peuvent être définis comme le rapport entre saison extrêmes et le nombre de saisons, le nombre de colonnes du tableau de constance. Les zones ombrées dans les tableaux correspondent au rapport observé selon les saisons.

Une alternative à ces choix arbitraires et en l'absence d'une question biologique précise (telle que caractéristique de débit à telle époque de l'année) consiste en l'utilisation des résultats obtenus au paragraphe 6.3. Si l'on retient les indices A et B comme descripteurs les plus sensibles de la VH, la combinaison du nombre de saisons et du rapport entre saisons de VH extrême peut être considéré comme un indice de prévisibilité. En effet, le fait de n'avoir qu'une saison en régime pluvio-nival pour l'indice A est assimilable à une prévisibilité totale de la VHpf par constance au cours de l'année.

l'intervalle de classe, ce qui permet de déterminer les différents états pris en compte. Enfin, il n'est pas possible de choisir un seuil de débit pouvant être une perturbation ou non pour le moment. La loi exponentielle permet de fixer une fréquence de débit ou de ΔQ (et donc un débit ou un ΔQ) à partir de laquelle ces débits ou ces ΔQ sont considérés comme des perturbations.

Tableau 6.3.4.3 Exemple de régime intermédiaire.

Rapport	Saison 1	Saison 2	Saison 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Les autres régimes sont en situation intermédiaires, ils peuvent présenter moins de 3 niveaux de VH et un rapport entre saison de VH extrême compris entre 1 et 10, où $0 < P < 1$, intermédiaire. C'est le cas du régime nivo-glaciaire, nival et pluvial.

6.3.4.3 Régimes intermédiaires.

Tableau 6.3.4.2 Exemple de régime prévisible par constance.

Rapport	Saison 1	Saison 2	Saison 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

6.4 Conclusion du chapitre 6.

Les descripteurs ont été regroupés en saison de VH homogène tout au long de ce chapitre. Deux grands groupes de descripteurs se distinguent.

- ceux qui sont sensibles aux distributions de fréquence des débits. Leur maximum est en hautes eaux, lorsque les distributions de fréquence des débits sont larges. À l'inverse, leur minimum est en basses eaux, lorsque les distributions de fréquence des débits sont étroites. Pour des distributions différentes, ils sont différents. C'est le cas du gradex des débits et de l'indice A, de l'écart-type, de l'inter-type, de l'inter-décile, de l'inter-quartile, de l'indice mensuel de distorsion et de l'indice saisonnier.

Ces descripteurs sont les plus intéressants pour nos recherches pour différencier les distributions de fréquence. Le rapport entre saison de VH la plus forte et la plus faible pour un régime donné est souvent supérieur à 2 ou 3, il atteint parfois 10 à 20.

- ceux qui sont peu sensibles aux distributions de fréquence. Ils ne changent pas peu avec les distributions de débit. C'est la normalisation qui les rend insensibles aux distributions de fréquence. Ce sont les indices d'asymétrie.

Ces descripteurs sont peu intéressants. Dans ce groupe, nous avons le coefficient de variation, les descripteurs utilisant le logarithme des débits, l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane, le rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur, du rapport de la moyenne et de la médiane et du moment d'ordre 3. Le rapport entre la saison la plus forte et la plus faible est faible par rapport au groupe précédent. Il n'atteint que 1,5, parfois 2. Ces descripteurs ne décèlent qu'assez peu de saisons au cours des 12 mois de l'année.

Les indices d'asymétrie ne paraissent pas intéressants pour la suite des recherches. Pour valider les deux groupes de descripteurs, des Analyses en Composantes Principales Normées sont réalisées. L'ACPn permet de savoir quel est le rôle des saisons et des mois sur la VH et si nous devons conserver ces classes pour décrire la VH, à l'aide des analyses intra et inter-classe.

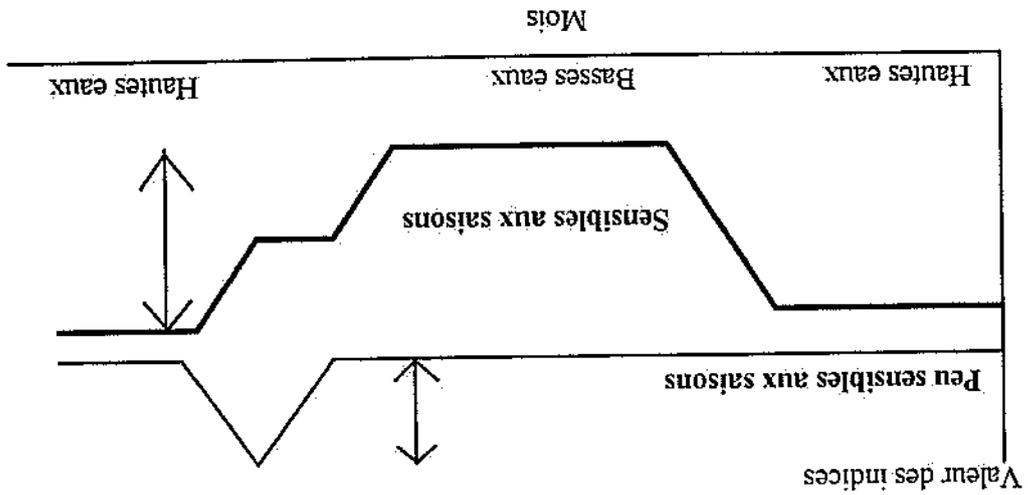


Figure 6.4 Regroupement des descripteurs de la VH selon leur sensibilité à la saison.

En résumé, les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence sont choisis de préférence.

Enfin, les recherches de la prévisibilité, de la constance et de la continuité de la VH par régime doivent être approfondies pour savoir si les perturbations sont cycliques ou non. Les mesures proposées par Colwell (1974) devraient permettre d'y répondre. D'une façon générale, la difficulté est de définir les états, qui sont définis de façon arbitraire, en utilisant la partie entière du logarithme des débits par exemple (Resh et al. (1988)). La pertinence biologique de la définition des états n'est jamais discutée. Comme la définition des états influence les résultats obtenus, il est primordial de bien choisir les états. Par contre, les saisons peuvent être prises comme étant celles définies dans ce chapitre (elles ne sont pas les mêmes pour chaque régime mais la VH y est homogène) ou comme étant la saison mensuelle.

Chapitre 7 - Sélection des descripteurs d'intérêt par analyse en composantes principales normée (ACPn)

Ce chapitre a deux objectifs :

- choisir le minimum de caractères à conserver pour décrire la VH, en distinguant la VHF et la VHP. Pour le moment, 19 caractères décrivent la VH.
- rechercher une éventuelle typologie de la VH, selon la classification des régimes proposée par Parde (1968). L'effet de la saison sur la VH est également recherché pour savoir si elles doivent être conservées.

Dans un premier temps, nous retiendrons le minimum de caractères pour décrire la VH. En effet, il est probablement inutile de garder les 19 caractères pour décrire la VH. L'ACPn peut être utilisée pour éliminer les caractères redondants et ne garder que les caractères qui expliquent le maximum de variance de l'échantillon.

Tous les caractères présentes sont des indicateurs de la forme des distributions de fréquence des débits ou variation de débits traités dans ce travail, à l'échelle de la saison mensuelle. La notion de classe dans les distributions de débits implique un choix de répartition arbitraire qui n'est pas fait en utilisant des descripteurs statistiques plus généraux et synthétiques. C'est là tout l'intérêt de ces caractères, mais en conservant les notions de VHF et de VHP qui présentent un intérêt pour la structuration des écosystèmes aquatiques. La forme des distributions de fréquence est liée aux notions de hautes et basses eaux.

Les distributions de fréquence représentent les classes de débits en fonction de leurs fréquences respectives (figure 7.0).

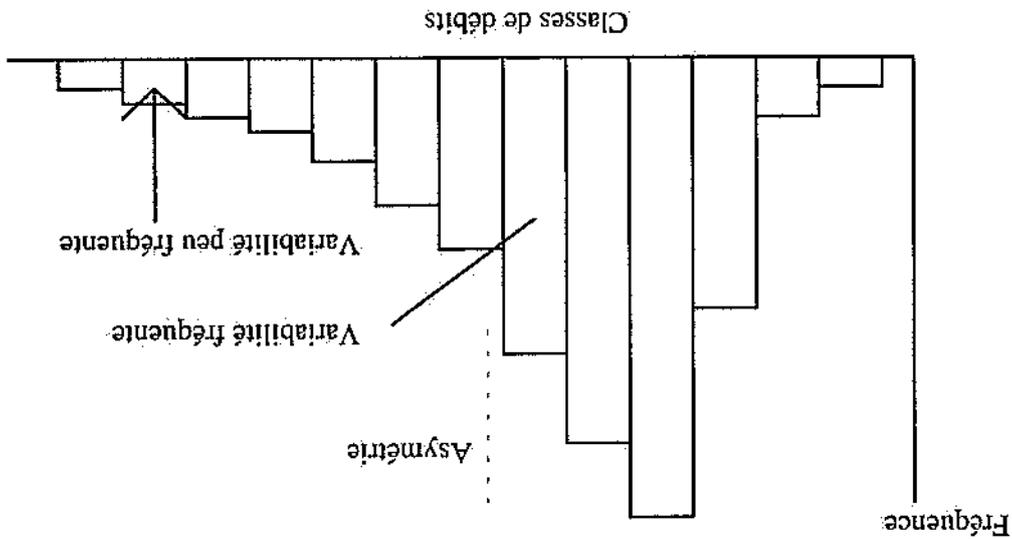


Figure 7.0 Exemple de distribution de fréquence de débit sur un cas théorique.

L'ACPn est réalisée sur les X_i .

- μ sa moyenne,
- σ l'écart-type de la variable,
- X_i est la variable,
- X_i' est la variable normée,

Où :

$$X_i' \rightarrow (X_i - \sigma) / \mu$$

Certains caractères évoluent de 0 à 2 ou 3 par exemple, c'est souvent le cas des indices d'asymétrie. D'autres varient de 0 à 100 ou 200, c'est le cas des variables comme le gradex des débits, la crue annuelle ou l'inter-décile (chapitre 6). La normalisation est réalisée de la façon suivante :

La normalisation de l'ACPn dimensionne les variables de façon à ce qu'elles deviennent comparables, même si leur variance est différente. En effet, l'ACPn est basée sur l'analyse de la variance.

Normalisation de l'ACP.

Dans un second temps, la pertinence des régimes et des mois est recherchée pour décrire la VH. Pour cela, des analyses inter et intra-classes sont réalisées, qui permettent de départager l'effet du régime et de la saison sur la VH. Ces analyses seront réalisées à l'aide des ACPn. Les classes seront les 12 mois de l'année et les régimes définis par Parde.

Cependant, il n'y a pas eu de validation statistique de ces groupes, ce ne sont pour le moment que des intuitions. L'ACPn permettra de valider ces groupes de descripteurs.

de distorsion.

- **les autres descripteurs** qui tendent à passer par un maximum en hautes eaux. Ils sont sensibles aux distributions de fréquence des débits. Pour ces raisons, ils sont plus intéressants que les coefficients d'asymétrie. Ce sont les indices A et B, le gradex des débits, la crue annuelle, l'écart-type, l'inter-quartile et l'inter-décile, l'indice saisonnier et l'indice mensuel

- **les coefficients d'asymétrie** qui passent par un maximum à la reprise des écoulements. Ces coefficients sont difficiles à interpréter et ne sont pas intéressants pour décrire les crues. En effet, ils sont semblables en hautes et basses eaux alors que les distributions de fréquence des débits ne sont pas du tout les mêmes. Ils sont donc peu sensibles aux distributions de fréquence et ne distinguent pas la VHF et la VHPF.

Dans les chapitres 5 et 6, deux groupes de variables ont été définis :

L'ACPn globale recherche les axes principaux du nuage de points constitué de 660 individus dans un espace à 19 dimensions. Le graphique des valeurs propres indique le nombre d'axes principaux et leur part en % de la variance expliquée pour chaque axe. Phippeau (1986) présente une note qui explique l'interprétation d'une ACP.

7.1 Constitution des principaux groupes de caractères. Élimination des descripteurs synthétiques utilisant le logarithme des débits.

Pour rechercher les effets saisonniers et du régime sur la VH, une matrice de 7 régimes, 12 mois par régime et 8 caractères est utilisée. Les valeurs des descripteurs seront celles obtenues à l'aide de la typologie de ces descripteurs, qui fait partie de l'analyse des caractères hydrologiques (chapitre 6). Les divers niveaux de VH par saisons (qui regroupent plusieurs mois successifs ou non) ont donc un sens statistique. Ces saisons ont été obtenues à l'aide de l'ANOVA. De plus, chaque régime sera représenté par 12 points, ce qui est facile à représenter dans le plan factoriel F1 F2.

La matrice de départ a une taille de 660 individus (55 stations, 12 mois par station) par 19 caractères (paragraphe 2.4). Une première ACPn est réalisée avec 19 caractères. Au fil des paragraphes, divers caractères seront écartés, d'autres ACPn seront réalisées avec de moins en moins de caractères. En tout, 3 ACPn seront réalisées pour savoir si la VHT et la VHPf peuvent être conservées pour décrire la VH en rivière.

Démarche suivie.

L'effet du régime sur la VH sera recherché à l'aide des 7 régimes synthétiques alors que l'effet saisonnier de la VH sera recherché à l'aide des 12 mois de l'année.

L'ACPn permet d'étudier les effets saisonniers et du régime sur les caractères hydrologiques. Le caractère saisonnier de la VH des régimes hydrologiques est dépendant du contexte géographique et (ou) de leur évolution au cours du cycle annuel. L'ACPn permet de doser les effets de ces composantes.

Recherche des effets saisonniers et du régime selon Parde (1968) sur la VH.

- la sensibilité aux distributions de fréquence des débits, afin de distinguer les hautes et les basses eaux,
 - leur signification, essentiellement liée à leur mode d'échantillonnage,
 - leur capacité d'être associée à une fréquence exprimée en année, pour se caler sur les cycles biologiques des poissons dans un premier temps,
 - la distinction de la VHT et de la VHPf.

Pour choisir les descripteurs qui seront retenus, l'ACPn en elle-même n'est pas suffisante. En effet, elle indiquera les groupes de caractères mais le choix des variables dans chaque groupe est indispensable. Les critères de choix des caractères seront :

Critères de choix des caractères de la VH.

L'ACP globale confirme l'existence des 2 groupes de descripteurs présentés aux chapitres 5 et 6.

Le rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur ($Q25 / Q75$) et le coefficient de variation du logarithme des débits (CVLN) n'expliquent que très peu de variance de l'échantillon. De plus, l'écart-type est proche de l'indice A et du gradex des débits car c'est une combinaison de la VHF et de la VHPf.

- le groupe 3 correspond à la VHPf, avec l'écart-type, le gradex des débits et l'indice A.

- l'axe F2 (34 %), qui représente la VHF, (groupe 2) avec des descripteurs comme l'indice B, l'inter-quartile et l'inter-décile, la crue annuelle, l'indice mensuel de distorsion et l'indice saisonnier. Les indices d'asymétrie contribuent peu à l'axe F2. Ils sont en opposition avec la VHF. La VHPf contribue peu à l'axe F2 mais elle n'est pas en opposition avec la VHF.

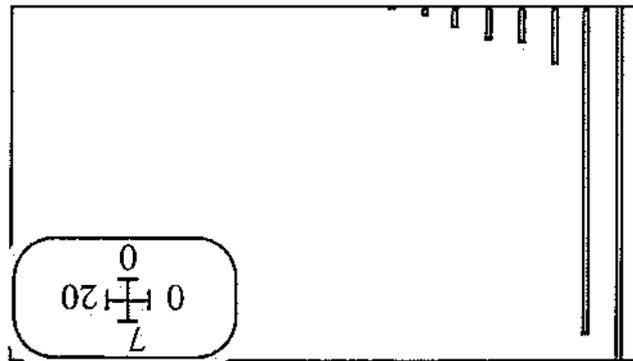
- l'axe F1 (36 %), qui regroupe les indices d'asymétrie, (groupe 1) comme le rapport de la moyenne à la médiane, le moment d'ordre 3, l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane, l'écart-type et le coefficient de variation. La VHPf (indice A, gradex des débits) et l'écart-type contribuent également à l'axe F1. La VHF ne contribue pratiquement pas à l'axe F1.

Le cercle de corrélation indique trois groupes de variables. Ces groupes sont encadrés.

7.1.2 Identification des groupes de caractères avec le cercle de corrélation.

Le cercle de corrélation est tracé avec les deux premiers axes.

Figure 7.1.1 Graphique des valeurs propres avec 19 caractères hydrologiques.



Les deux premiers axes se distinguent nettement des autres avec 70 % de la variance de l'échantillon. Ils sont retenus pour la suite de l'analyse.

Le graphique des valeurs propres montre deux axes principaux bien nets qui sont :

- l'axe F1, avec 36 % de la variance de l'échantillon,
- l'axe F2, avec 34 %.
- l'axe F3 représente 7 %.

7.1.1 Recherche des principaux groupes de descripteurs.

Une ACPn est réalisée avec les 15 caractères hydrologiques restants.

A partir de cette analyse, un premier tri des caractères est réalisé. Comme le logarithme écrase les débits les plus forts par rapport aux autres, les 4 caractères qui utilisent sont écartés.

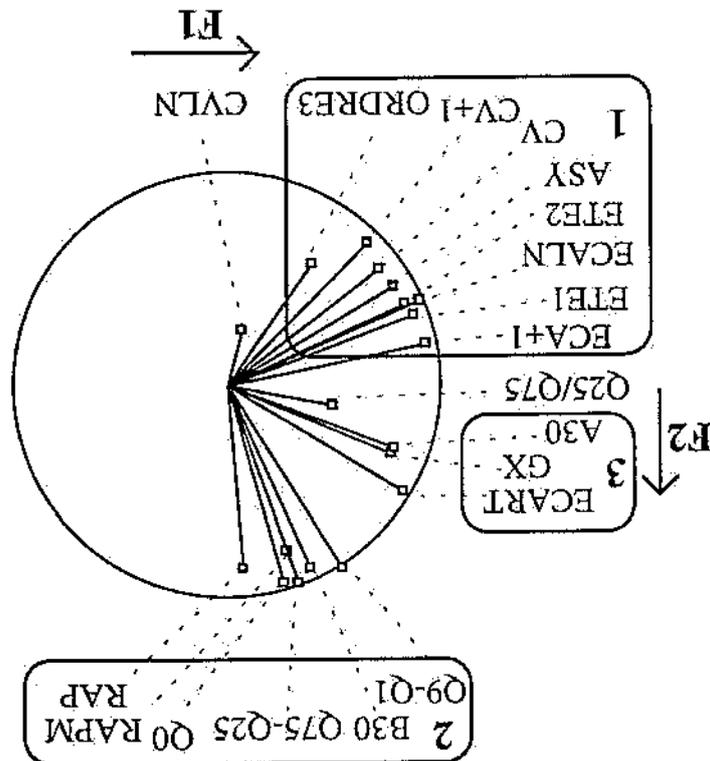
La VH peut être décrite à l'aide de trois variables qui sont, dans l'ordre d'importance décroissant :

- un indice d'asymétrie (moment d'ordre 3, coefficient de variation, rapport de la moyenne à la médiane et rapport de l'inter-quartile ou de l'inter-décile à la médiane),
- un descripteur de la VHF (inter-décile, indice B, inter-quartile, crue annuelle, indice mensuel de distortion, indice saisonnier),
- un descripteur de la VHPf (grades des débits ou indice A). Ce groupe de variables contribue plus à l'axe F1 qu'à l'axe F2.

7.1.3 Conclusion.

L'asymétrie et la VHF caractérisent les distributions de fréquence, elles expliquent une grande part de la variance de l'échantillon. Par contre, la VHPf y contribue assez peu. Cependant, l'ACPn différencie la VHF et la VHPf, qui sont indépendantes (chapitre 4).

Figure 7.1.2 Cercle de corrélation sur les axes F1 et F2 pour 19 descripteurs de la VH.



- le troisième groupe est la VHP.

- l'axe F2 (32 %) dominé par les indices d'asymétrie (groupe 1). La VHP et la VHF contribuent très peu à cet axe. Les variables les plus proches de l'axe F2 sont le rapport de la moyenne et de la médiane (ASY) et le coefficient de variation (CV).

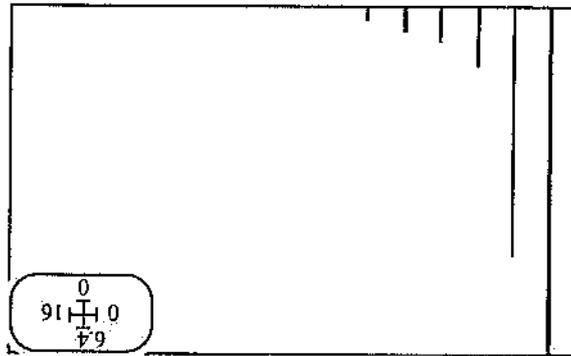
- l'axe F1 (41 %) dominé par la VHF (groupe 2). L'inter-décile est la variable la plus proche de l'axe F1. La VHP contribue un peu à cet axe. Les indices d'asymétrie ne participent pas du tout à l'axe F1.

Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes montre :

7.2.2 Identification des groupes de caractères avec le cercle de corrélation.

Les deux premiers axes expliquent 73 % de la variance de l'échantillon. Les deux axes principaux sont donc bien nets. Le troisième axe explique 8% de la variance et n'est pas conservé dans l'analyse. Le cercle de corrélation est réalisé à partir des 2 premiers axes.

Figure 7.2.1 Graphique des valeurs propres de l'ACPn sur 15 variables hydrologiques.



- 43 % de la variance de l'échantillon des valeurs pour le premier axe,
- 31 % pour le second axe,
- 8 % pour le troisième axe,

Les axes principaux expliquent :

7.2.1 Recherche des principaux axes de l'ACPn.

L'ACPn est réalisée sur les 15 caractères hydrologiques qui ne sont pas calculés avec le logarithme des débits.

7.2 Constitution des groupes de caractères avec 15 caractères hydrologiques. Elimination des indices d'asymétrie.

A l'inverse, le régime nivo-glaciaire, nival et pluvial présentent une faible VH. Le régime pluvio-nival présente une VH intermédiaire aux autres régimes.

Le régime glaciaire (1), nivo-pluvial (4) et cévenol (7) sont ceux qui présentent la plus forte VH car la VHF et la VHPf sont mélangées. Le régime glaciaire se caractérise par sa forte VHF alors que le régime nivo-pluvial par ses fortes VH et le régime cévenol par sa forte VHPf.

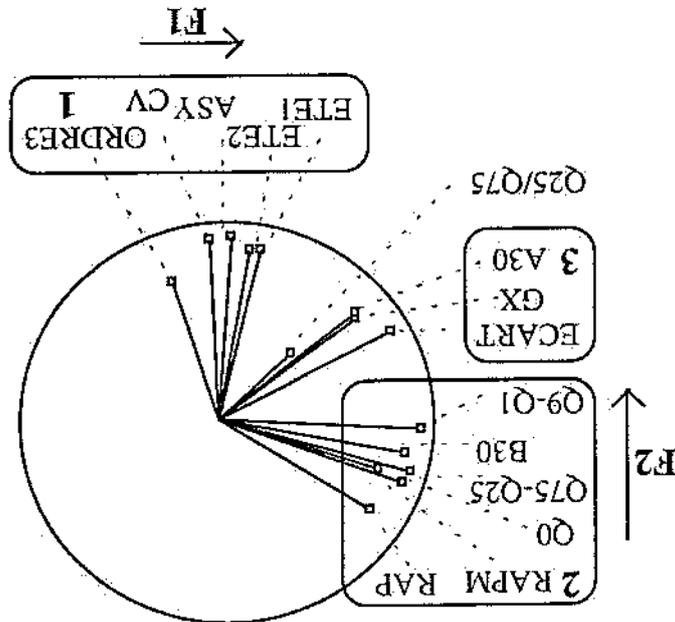
Les centres de gravité sont calculés à partir des n * 12 points par régime (n stations par régime et 12 mois par station). Chaque segment de droite relie le centre de gravité d'un régime donné à un point donné de ce régime, d'où une étoile pour chaque régime. Naturellement, plus un régime comporte de stations hydrométriques, plus l'étoile comporte de branches.

La position des centres de gravité de chaque régime dans le plan F1 F2 permet de les situer les uns par rapport aux autres, en fonction de la VHF (axe F1) et de l'asymétrie des distributions de fréquence (axe F2). Pour chaque régime, de 4 à 11 stations hydrométriques sont disponibles.

7.2.3 Position respective des 7 régimes dans le plan factoriel F1 F2.

Le cercle de corrélation montre 3 groupes de variables, mais l'ordre d'importance est changé par rapport au paragraphe précédent. Les indices d'asymétrie passent après la VHF. Par contre, la VHPf joue encore peu de rôle par rapport aux indices d'asymétrie et à la VHF qui contribue aux deux axes principaux.

Figure 7.2.2 Cercle de corrélation selon les deux premiers axes de l'ACPn.



Les régimes présentant la plus forte VH sont, dans l'ordre décroissant :

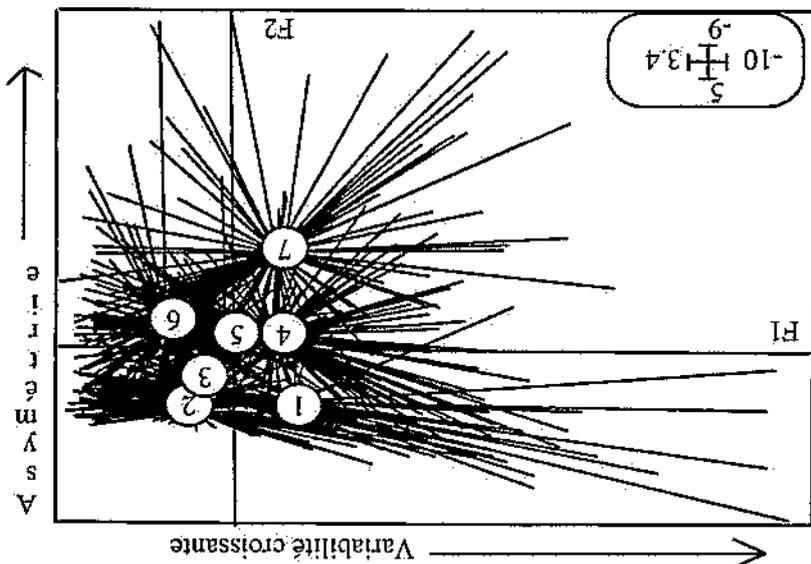
- le régime cèvenol (7). L'asymétrie de ce régime et sa VH évolue fortement au cours du cycle hydrologique.
- le régime glaciaire (1) pour sa gamme étendue de VH. L'asymétrie des débits reste faible tout au long de l'année, elle évolue peu au cours de l'année, malgré une forte évolution des distributions de fréquences de débits.
- le régime nivo-pluvial (4) présente à la fois une forte VH et une forte asymétrie. En effet, son ellipse est positionnée sur les deux axes à la fois mais elle est moins grande que celle du régime cèvenol. Cette forte VH est un mélange de VHF et de VHP.
- le régime pluvio-nival présente une faible asymétrie et une faible VH par rapport aux régimes précédents. Son ellipse a une surface inférieure à celle des régimes précédents.

La distinction des 7 régimes dans le plan factoriel F1 F2 est réalisée avec des ellipses de dispersion regroupant 90% des points de chaque régime. Elles sont également construites à partir des n stations par 12 mois pour chaque régime. Cette représentation visualise l'aire d'évolution des régimes les uns par rapport aux autres sans tenir compte des points extrêmes moins représentatifs du régime considéré. Le sens de l'allongement de l'ellipse indique la tendance générale du régime au cours des 12 saisons mensuelles. C'est un élément de typologie des régimes.

7.2.4 Distinction des 7 régimes dans le plan factoriel.

Sur l'axe F2, les régimes présentent une asymétrie d'autant plus forte que les écoulements sont alimentés par les pluies. Les régimes glaciaire, nivo-glaciaire et nival présentent une faible asymétrie. Les régimes nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cèvenol se caractérisent par une augmentation de l'asymétrie des débits.

Figure 7.2.3 Représentation des centres de gravité des régimes dans le plan factoriel F1 F2.



En conséquence, une ACPn est réalisée en mettant de côté les caractères d'asymétrie. Il ne reste plus que 9 caractères décrivant la VH.

Les indices d'asymétrie constituent un axe principal mais ils sont peu intéressants pour nos recherches. Ils mélangent la VHF et la VHPf, ils sont peu sensibles aux distributions de fréquence des débits. Ils seront éliminés dans le traitement suivant.

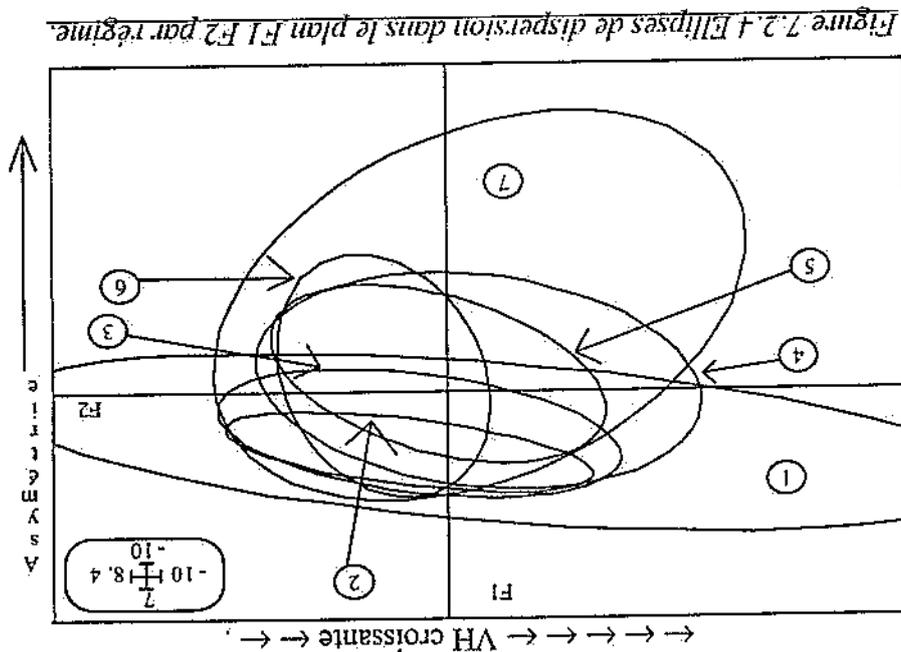
Les régimes se différencient par la VH et leur asymétrie. La VH est élevée en régime glaciaire, nivo-pluvial et cévenol alors que l'asymétrie augmente lorsque la part de la pluie augmente dans les écoulements, du régime glaciaire au régime cévenol. Cependant, le plan factoriel F1 F2 ne distingue pas la VHF et la VHPf.

La VH peut être décrite avec 3 variables non redondantes qui sont la VHF, un indice d'asymétrie et la VHPf.

7.2.5 Conclusion.

D'une façon générale, l'asymétrie des débits augmente du régime glaciaire au régime pluvial, surtout en régime cévenol et elle évolue d'autant plus au cours de l'année que les écoulements sont alimentés par les pluies.

Par contre, la VH décroît du régime glaciaire et cévenol, puis nivo-pluvial, nival, nivo-glaciaire et pluvial. A ce stade d'exploration, il n'est pas possible de distinguer la VHF et la VHPf.



- les régimes nivo-glaciaire et nival ont une ellipse sensiblement équivalente, mais plutôt orientée sur l'axe de la VHF. L'ellipse du régime nivo-glaciaire est incluse dans celle du régime nival, elle même incluse dans celle du régime glaciaire.
- le régime pluvial présente la plus petite ellipse, sa VH est faible, elle évolue peu au cours du cycle annuel. Elle est plutôt orientée sur l'axe de l'asymétrie.

7.3 Distinction de la Vht et de la Vhpf avec 9 caractères hydrologiques.

Cette fois, l'ACPn est réalisée sur les 9 variables qui ne sont pas des indices d'asymétrie et qui ne sont pas calculées à partir du logarithme des débits. Les variables situées sur l'axe F2 de l'ACPn globale ont été retirées ainsi que le rapport $Q_x 25\% / Q_n 25\%$ qui n'exprime aucune tendance.

Les 9 variables restantes sont le gradex des débits, la crue annuelle, les indices A et B, l'inter-décile et l'inter-quartile, l'indice mensuel de distorsion, l'indice saisonnier et l'écart-type.

7.3.1 Recherche des axes principaux de l'ACPn sans les indices d'asymétrie.

Les axes principaux expliquent :

- 69 % de la variance de l'échantillon pour l'axe F1,
- 21 % pour l'axe F2,
- 6 % pour l'axe F3.

Les deux premiers axes expliquent 90 % de la variance et sont largement représentatifs de la variance de l'échantillon. L'axe F1 domine largement l'ACP, le nuage de points a une dimension principale. Le troisième axe n'est pas significatif (6 % de la variance).

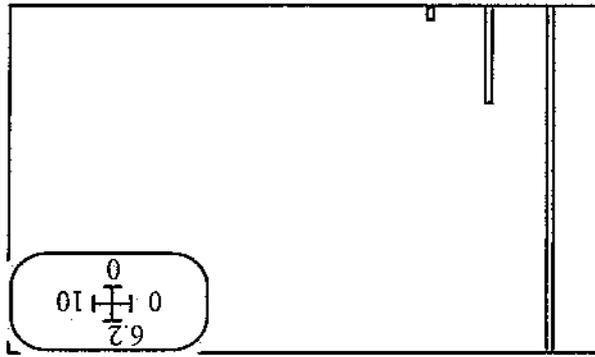


Figure 7.3.1 Graphique des valeurs propres de l'ACPn effectuée sur 9 caractères hydrologiques.

Le cercle de corrélation est tracé autour des deux premiers axes.

Les régimes pluvio-nival (5) et pluvial (6) présentent une VHF et une VHPF assez faibles. Le régime nivo-pluvial (4), présente une VHF et une VHPF assez fortes. Les régimes glaciaire (1), nivo-glaciaire (2) et nival (3) se caractérisent par une faible VHPF. L'axe F1 est dominé par la VHF alors que l'axe F2 est dominé par la VHPF. Les régimes s'organisent également dans ce plan factoriel (figure 7.3.3).

Cette fois, les centres de gravité des régimes sont placés dans le plan F1 F2 mais avec 9 variables hydrologiques.

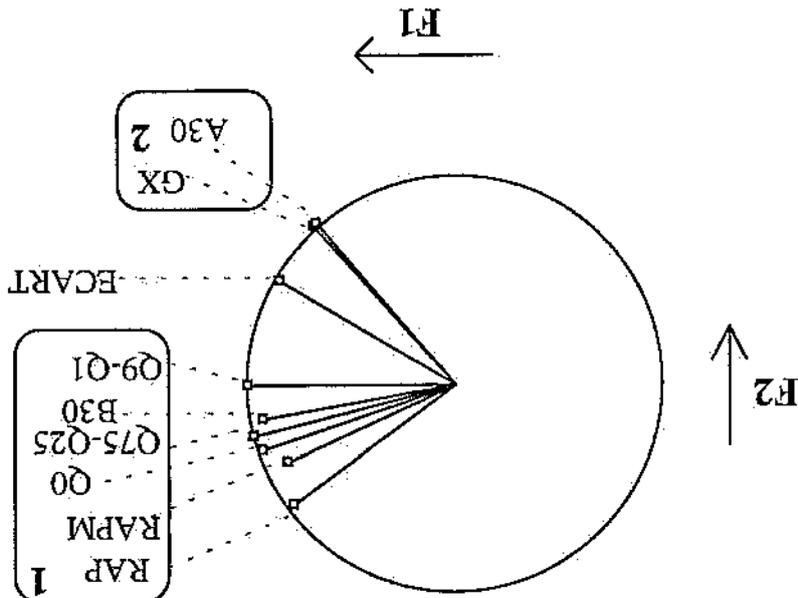
7.3.3 Position respective des régimes dans le plan factoriel F1 F2.

- l'axe F2 (21 %) est dominé par la VHPF (groupe 2) mais aussi par l'indice mensuel de distorsion (RAP). La VHPF est en opposition avec cet indice. La VHPF ne constitue pas un axe très fort par rapport à la VHF malgré leur indépendance. Le coefficient de détermination de la régression entre la VHF et la VHPF est de 0,21 pour les 660 individus.

- l'axe F1 (69 %) est dominé par la VHF, (groupe 1) notamment par l'inter-décile qui est situé sur cet axe.

Le cercle de corrélation indique que :

Figure 7.3.2 Cercle de corrélation de l'ACPn réalisée avec la VHF et la VHPF.



Le cercle de corrélation est tracé avec les 9 variables restantes et sur les deux premiers axes.

7.3.2 Distinction de la VHF et de la VHPF avec le cercle de corrélation.

Constatation importante : tous les régimes présentent une surface commune, qui correspond pratiquement au régime pluvial. Cette période correspond probablement aux

variance de l'échantillon grâce au régime cénéol.

Enfin, le régime cénéol (7) est le régime qui présente la plus forte VHPF. Elle évolue fortement au cours de l'année. L'axe de la VHPF représente une part non négligeable de la

Le régime pluvial présente une faible, tout au long du cycle annuel.

Le régime pluvio-nival est orienté sur les deux axes à la fois, la VHF et la VHPF évoluent de la même façon sur les 12 mois de l'année. Cependant, ces VH sont assez faibles par rapport au régime nivo-pluvial.

Le régime nivo-pluvial (4) est situé sur les axes de la VHF et de la VHPF. La VH de ce régime évolue grandement au cours du cycle hydrologique mais la VHF évolue moins qu'en régime glaciaire.

Les régimes nivo-glaciaire (2) et nival (3) sont orientés sur l'axe de la VHF mais leur ellipse est moins étendue qu'en régime glaciaire. La VHF évolue moins qu'en régime glaciaire au cours du cycle hydrologique.

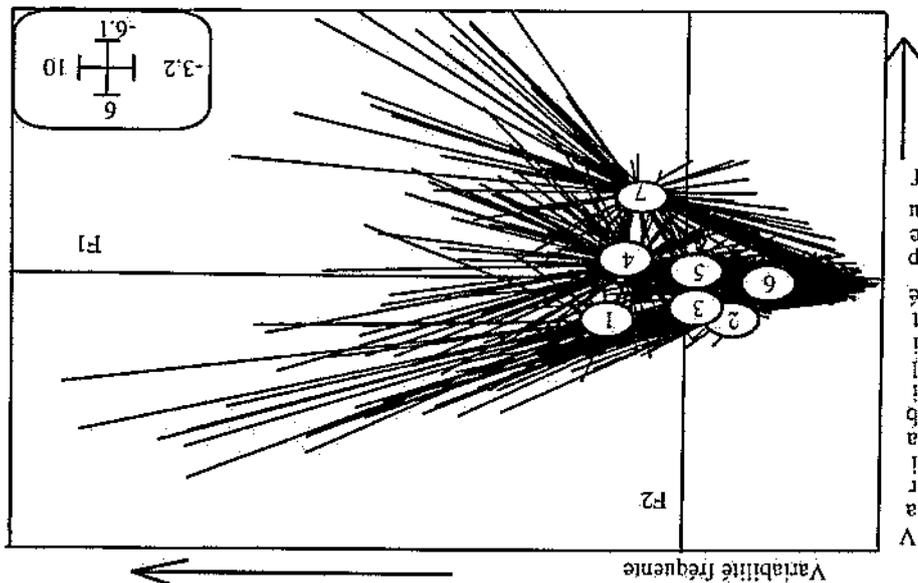
Le régime glaciaire (1) se caractérise par une grande ellipse, dont l'axe dominant est sur l'axe de la VHF. La VHF de ce régime évolue grandement au cours du cycle hydrologique.

La forme et la position des ellipses (90% des points) sont différentes selon les régimes (figure 7.3.4).

7.3.4 Distinction des 7 régimes dans le plan factoriel F1 F2.

Le régime cénéol (7) se distingue nettement des autres régimes par une forte VHPF.

Figure 7.3.3 Position des centres de gravité des régimes dans le plan F1 F2 avec 9 variables hydrologiques.



Des différences entre espèces piscicoles entre les divers régimes peuvent s'expliquer en partie par la VH mais il est bien évident que d'autres facteurs jouent également un rôle. Il s'agit, par exemple, de la période des hautes et basses eaux, de la température des eaux selon la saison. La turbidité de l'eau est importante et durable en régime glaciaire, nivo-glaciaire ou nival lors de la fonte nivale ou glaciaire, ce qui limite certainement la photosynthèse à une période où les jours sont longs, et donc la chaîne alimentaire.

- la VHF structure les écosystèmes aquatiques à long terme
- la VHP structure les écosystèmes aquatiques à court terme.

des EBC car :

Des résultats précédents, nous pouvons proposer une interprétation pour la structuration

Enfin, le régime pluvial présente la plus faible VH.

Les trois régimes suivants sont les régimes nival et pluvio-nival puis nivo-glaciaire qui présentent une VHF et une VHP intermédiaires. Le régime nivo-glaciaire présente la VH la plus stable, elle reste faible au cours des saisons.

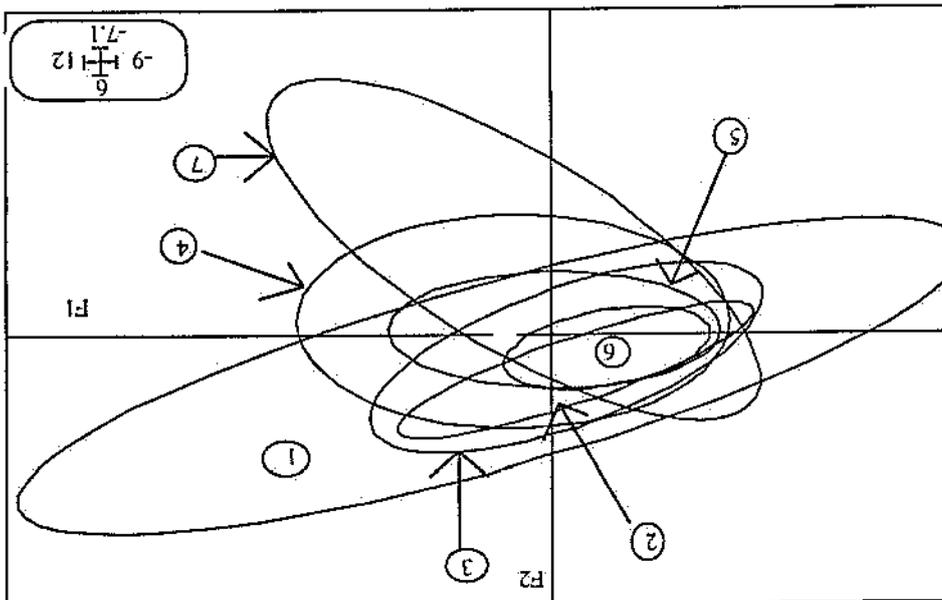
- le régime glaciaire à cause de sa forte VHF,
- le régime nivo-pluvial à cause de la VHF et de la VHP,
- le régime cévenol à cause de la VHP.

Les trois régimes présentant la plus forte VH sont :

A l'aide des ellipses de dispersion, les régimes sont classés selon leur gamme de VH, en fonction de leur VHF et de leur VHP.

Les trois régimes présentant la plus forte VH sont :

Figure 7.3.4 Ellipses de dispersion par régime dans le plan factoriel F1 F2.



étages, qui se caractérisent par une faible VH (chapitre 6). Cependant, les étages se produisent à diverses périodes de l'année selon les régimes.

- l'indice B ou ΔQ annual pour la VHF,

Dans les 3 ACPn réalisées, seuls les deux premiers axes sont significatifs. La VHF est décrite à l'aide de deux caractères qui sont :

Tous ces caractères ne permettent pas de distinguer la VHF et la VHPF car ils sont calculés avec tous les débits.

- l'écart-type car c'est une combinaison de la VHF et de la VHPF ainsi que le rapport du quartile supérieur au quartile inférieur car il explique peu de variance de l'échantillon.

- les coefficients d'asymétrie car ils ne sont pas sensibles aux distributions de fréquence.

- les 4 descripteurs qui utilisent le logarithme des débits. L'utilisation du logarithme écrase les forts débits. Ils représentent mal les crues et sont peu sensibles aux distributions de fréquence.

- les 4 descripteurs qui utilisent le logarithme des débits. L'utilisation du logarithme écrase les forts débits. Ils représentent mal les crues et sont peu sensibles aux distributions de fréquence.

- les 4 descripteurs qui utilisent le logarithme des débits. L'utilisation du logarithme écrase les forts débits. Ils représentent mal les crues et sont peu sensibles aux distributions de fréquence.

7.4 Conclusion partielle du chapitre 7.

Cette partie a été consacrée au choix des variables qui sont finalement retenues pour décrire la VHF à l'aide d'une ACPn.

Au départ, 19 caractères décrivant la VHF sont disponibles mais les caractères suivants sont éliminés :

- l'indice B ou ΔQ annual pour la VHF,

- l'indice A, l'intérêt de la VHF est de tenir du contexte hydrologique dans lequel se produisent les crues. L'indice A est préféré au gradex des débits. L'indice A est retenu comme descripteur de la VHPF.

- l'indice B est à choisir de préférence à la crue annuelle car il est calculé en tenant compte des conditions passées de débit. La crue annuelle n'indique rien sur le contexte des débits des jours précédents. Compte tenu de ces remarques, l'indice B est retenu comme descripteur de la VHF.

- l'indice B est à choisir de préférence à la crue annuelle car il est calculé en tenant compte des conditions passées de débit. La crue annuelle n'indique rien sur le contexte des débits des jours précédents. Compte tenu de ces remarques, l'indice B est retenu comme descripteur de la VHF.

- l'indice B est à choisir de préférence à la crue annuelle car il est calculé en tenant compte des conditions passées de débit. La crue annuelle n'indique rien sur le contexte des débits des jours précédents. Compte tenu de ces remarques, l'indice B est retenu comme descripteur de la VHF.

- l'indice B est à choisir de préférence à la crue annuelle car il est calculé en tenant compte des conditions passées de débit. La crue annuelle n'indique rien sur le contexte des débits des jours précédents. Compte tenu de ces remarques, l'indice B est retenu comme descripteur de la VHF.

- l'indice B est à choisir de préférence à la crue annuelle car il est calculé en tenant compte des conditions passées de débit. La crue annuelle n'indique rien sur le contexte des débits des jours précédents. Compte tenu de ces remarques, l'indice B est retenu comme descripteur de la VHF.

7.3.5 Conclusion.

La VHF peut donc se décrire à l'aide de deux variables interprétables qui sont :

L'inertie totale du tableau brut se décompose de façon additive entre l'inertie du tableau centré par classe (analyse intra-classe) et l'inertie du tableau des moyennes (analyse inter-classe) (Dolédéc et Chessel, 1989).

Pour éliminer un effet, les valeurs brutes sont centrées par rapport à la moyenne de leur classe. L'analyse du tableau centré par classe permet d'ordonner les individus par rapport à la moyenne de leur classe. C'est l'analyse intra-classe.

Pour montrer un effet (saisonnier, régime...), les valeurs brutes d'un groupe sont résumées par leur moyenne. L'analyse des moyennes par groupe permet de visualiser les différences entre les centres de gravité des classes. C'est l'analyse inter-classe.

Toutes ces analyses sont réalisées à l'aide du logiciel ADE (Chessel et Dolédéc, 1993). La recherche des effets spatio-temporels peut être réalisée grâce aux analyses multivariées inter et intra-classe (Dolédéc et Chessel, 1989). Le principe de ces analyses réside dans la transformation du tableau de départ dont les lignes sont organisées en plusieurs groupes correspondant aux modalités de l'effet à tester. Les lignes sont regroupées par régime pour l'effet du régime ou par mois pour l'effet temporel.

Principe de l'analyse intra et inter-classe.

Nous ne savons pas non plus si la VH des caractères est plus forte à l'intérieur des régimes ou des mois (analyse intra-classe) ou entre les régimes et les mois (analyse inter-classe). Nous y répondons dans cette partie. L'ACPn inter et intra-classe permet de répondre à ces questions.

Dans ce paragraphe, nous chercherons à savoir si la VH évolue en fonction du temps et de sa position géographique. En effet, la VH évolue dans le temps et l'espace mais nous ne savons quel est l'effet dominant. Il s'agit de savoir si le découpage de l'année en saisons et si la distinction des régimes (Parde, 1968) présente un intérêt pour décrire la VH.

7.5 Recherche de l'effet de la saison et du régime sur la VH.

Enfin, tous les régimes présentent une aire commune, qui correspond à l'ellipse du régime pluvial. Cette partie commune correspond probablement aux étages, qui se caractérisent par une faible VH (chapitre 6).

- le régime pluvial présente la plus faible VH. Son ellipse de dispersion est entièrement contenue dans celles des autres régimes.

- les régimes nivo-glaciaire, nival et pluvio-nival. L'ellipse du régime nivo-glaciaire est contenue dans celle du régime nival, elle même contenue dans celle du régime glaciaire.

- les régimes glaciaire, cœvenol et nivo-pluvial. Le régime glaciaire présente une forte VH qui évolue de façon importante au cours de l'année alors que c'est la VHpf qui évolue fortement en régime cœvenol. Le régime nivo-pluvial présente une forte VH.

Enfin, une classification des régimes (Parde) par VH décroissante peut être proposée à l'aide de la VHf et de la VHpf. Par ordre de VH décroissante, nous avons :

- l'indice A pour la VHpf.

Le troisième axe n'est pas significatif, il n'est conservé dans l'analyse.

- l'axe F3 8 %

- l'axe F2 21 %

- l'axe F1 représente 63 % de la variance de l'échantillon,

Le graphique des valeurs propres montre que l'axe F1 est nettement dominant.

7.5.1.1 Le graphique des valeurs propres.

L'ACPn globale permet de vérifier que les principaux axes sont les mêmes qu'avec les 9 caractères et les 55 stations séparées.

7.5.1 ACPn globale sur les caractéristiques des 7 régimes.

Les caractères retenus sont les moyennes par saison, telles que définies au chapitre 6. L'intérêt d'utiliser les saisons définies aux chapitres 6 est la représentativité statistique contrôlée des caractères et des saisons. Ainsi, un caractère donné pour un régime peut avoir la même valeur plusieurs mois, successifs ou non.

- les 12 mois de chaque régime sont suivis dans le plan factoriel F1 F2, ce qui est plus simple si un régime donné est représenté par 12 valeurs (une par mois) que s'il est représenté par 12 * n points, n étant le nombre de stations par régime. Cela permet de savoir quelles sont les saisons de forte et de faible VH par régime.

- le nombre de stations par régime étant dépendant du régime, certains régimes auraient été sur-représentés au détriment des autres, ce qui peut tirer le nuage de l'ACPn dans un sens ou dans l'autre.

Les 55 stations choisies au départ sont regroupées par régime car :

La matrice utilisée dans cette partie sera différente de celle utilisée jusqu'à présent. Elle comportera les 7 régimes (glaciaire à cévenol), 12 mois par régime (janvier à décembre) et 8 caractères restants (indices A et B, gradex des débits, crue annuelle, indice mensuel de distorsion, indice saisonnier, inter-décile et inter-quartile). Les dimensions de la matrice sont de 84 lignes (7 régimes, 12 mois par régime) par 8 caractères. En effet, la majorité des caractères a été supprimée pour des raisons déjà évoquées.

Naturellement, une ACPn globale est indispensable pour préciser les axes principaux de cette ACPn avant de réaliser les ACPn intra et inter-classe.

- les 7 régimes (glaciaire, nivo-glaciaire, nival, nivo-pluvial, pluvio-nival, pluvial et cévenol) pour apprécier l'effet du régime sur la VH.

- les 12 mois de l'année pour apprécier l'effet saisonnier sur la VH.

Cette recherche est effectuée avec l'ACPn où les classes seront :

La représentation de la première valeur propre des diverses analyses sur un graphique permet de classer le rôle du mois et du régime dans la VH. Ce graphique synthétisera les résultats obtenus dans le paragraphe 7.5.

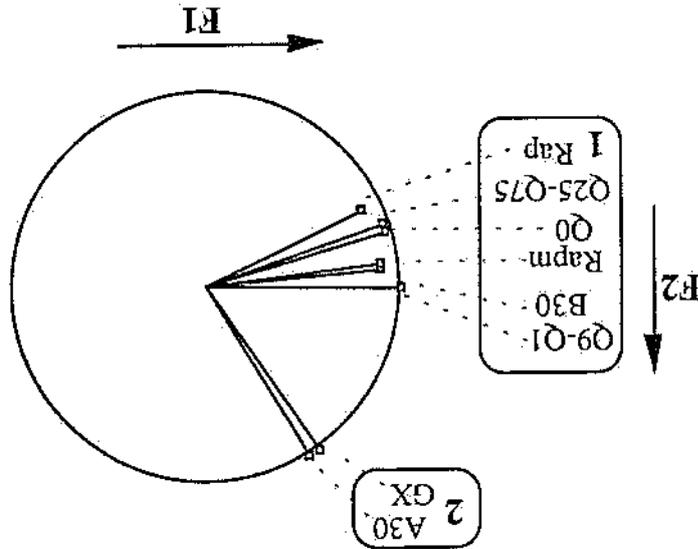
Il est donc possible de quantifier l'influence d'un effet (saisonnier ou régime par exemple) par rapport à la VH totale.

Le centre de gravité de chaque régime est relié avec les points à l'aide d'un segment de droite. Pour un régime donné, des segments de droite peuvent se superposer car certains mois présentent la même VH. Ainsi, les étoiles ne présentent pas forcément 12 branches.

7.5.1.3 Représentation des 7 régimes dans le plan F1 F2.

A présent, la position respective des régimes dans le plan F1 F2 va être recherchée. Comme il ne reste plus que 12 points par régime, il n'est pas intéressant d'utiliser les ellipses de dispersion. Seuls les points et le centre de gravité de chaque régime sont utilisés pour cette représentation.

Figure 7.5.1.2 Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes.



- l'axe F2, qui représente la VHF (groupe 2) alors que la VHF n'y participe pas.
- l'axe F1, qui représente la VHF (groupe 1). La VHF contribue très peu à cet axe.

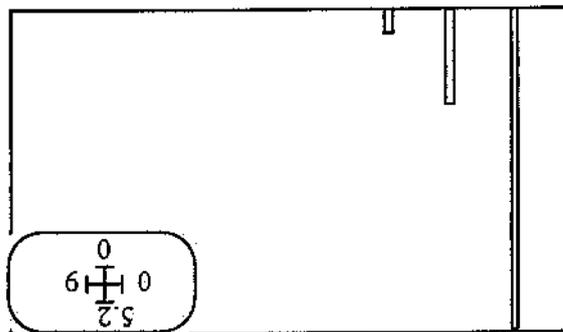
Les axes principaux sont :

Nous retrouvons les axes principaux définis au paragraphe 7.3.

7.5.1.2 Identification des groupes de caractères sur les régimes synthétiques selon les deux premiers axes.

L'inertie totale du nuage de points a une valeur de 8. En effet, la variance des caractères est prise égale à un pour chaque caractère dans une ACPn (Philippeau, 1986; Dolédec et Chesnel, 1989) et 8 caractères sont utilisés. L'inertie du nuage de points sert à départager l'effet du régime et de la saison.

Figure 7.5.1.1 Le graphique des valeurs propres pour 7 régimes et 8 variables hydrologiques.



La représentation qui suit permet de suivre les 7 régimes au cours de l'année. Elle est réalisée dans le plan factoriel F1 F2, l'axe F1 étant l'axe de la VHF et F2 l'axe de la VHP. Ainsi, la position de chaque mois et de chaque régime est connue dans le plan F1 F2, ce que ne permet pas la figure précédente. Un plan représente un régime. Les plans sont à la même échelle, pour comparer facilement les régimes.

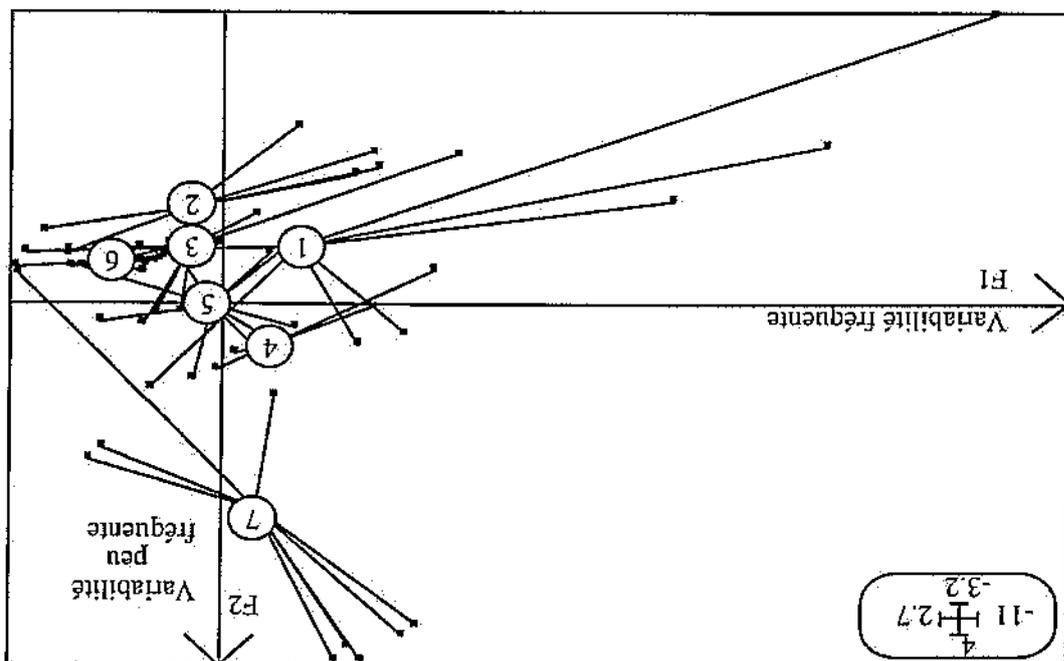
7.5.1.4 Parcours de chaque régime dans le plan F1 F2 au cours des saisons.

- le régime pluvial présente une faible VH tout au long de l'année,
- le régime nivo-pluvial se caractérise par une forte VH mais elle évolue peu au cours des saisons,
- la VHP est particulièrement forte en régime cévenol et l'effet saison est très marqué. Ensuite, ce sont les régimes nivo-pluvial et pluvio-nival qui présentent la plus forte VHP mais l'effet saison est peu marqué.
- l'effet de la saison sur la VH est très forte en régime glacière et cévenol, il décroît en régime nivo-glacière et nival.

Les régimes peuvent être classés par VH décroissante de la même façon qu'au paragraphe 7.3. Les éléments essentiels suivants sont retenus :

Signification des numéros de régime : 1, glacière; 2 nivo-glacière; 3 nival; 4 nivo-pluvial; 5 pluvio-nival; 6 pluvial et 7 cévenol.

Figure 7.5.1.5 Représentation des régimes dans le plan F1 F2



L'effet de la saison sur la VHF et la VHPF est recherché. La saison de base est le mois, mais les mois ont été regroupés lorsque leur VH sont les mêmes, au sens statistique du terme. Des

7.5.2 Recherche de l'effet temporel sur la VH.

Le chemin suivi par la VHF et la VHPF n'est pas le même selon les régimes, il y a opposition des régimes alimentés par la fonte d'un stock de neige ou de glace et ceux qui sont alimentés par les pluies.

Seuls les régimes glaciaire et nivale se présentent différemment. Au début de l'étage (septembre, octobre et novembre) la VHPF augmente alors que la VHF décroît. Pour ces régimes, la VHPF passe par un maximum au début de l'étage. Cet effet est net en régime glaciaire.

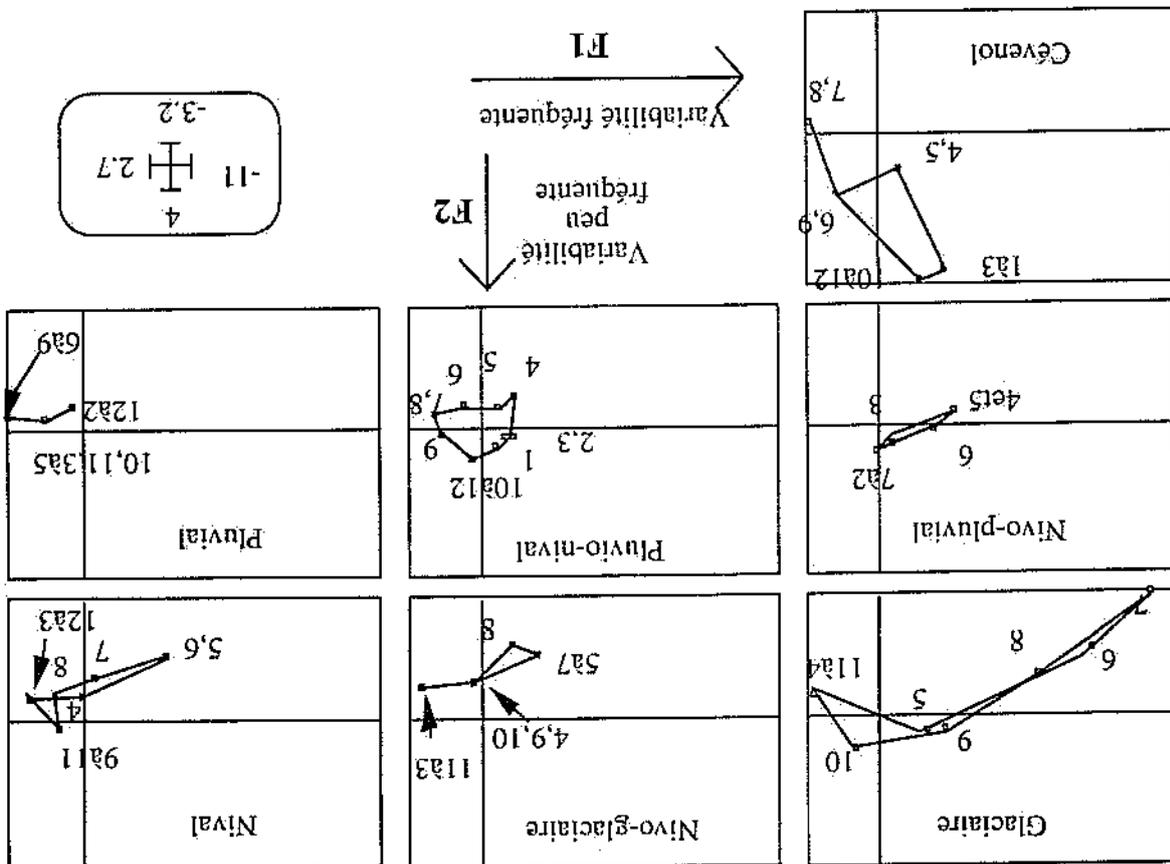
À la reprise des écoulements, la VH augmente, puis la VHPF culmine alors que la VHF continue d'augmenter. Ensuite, en période de hautes eaux, la VHF culmine à son tour alors que la VHPF baisse. Au début de l'étage, la VHF baisse à son tour alors que la VHPF ne baisse plus.

La période des hautes eaux présente la plus forte VH d'un régime donc mais elle dépend beaucoup du régime. En régime pluvial, la VH est très faible par rapport aux autres régimes, en particulier glaciaire ou cévenol.

Cette représentation confirme que les mois d'étage sont ceux qui présentent la plus faible VH, quel que soit le régime. Ainsi, les régimes glaciaire, nivo-glaciaire et nivale présentent une faible VH de novembre à mars ou avril alors que les régimes à influence pluviale présentent une faible VH de mai ou juin à septembre.

Les mois sont codés 1 pour janvier jusqu'à 12 pour décembre. Lorsque plusieurs mois sont situés au même endroit, la saison est codée mois "12 à 3" par exemple. Cela signifie que les mois de décembre, janvier, février et mars constituent une saison de VH homogène.

Figure 7.5.1.4 Trace de chaque régime dans le plan F1 F2.



- l'axe F1 représente la VHF (groupe 1). La VHF ne contribue pas à cet axe.
- l'axe F2 représente la VHP (groupe 2).

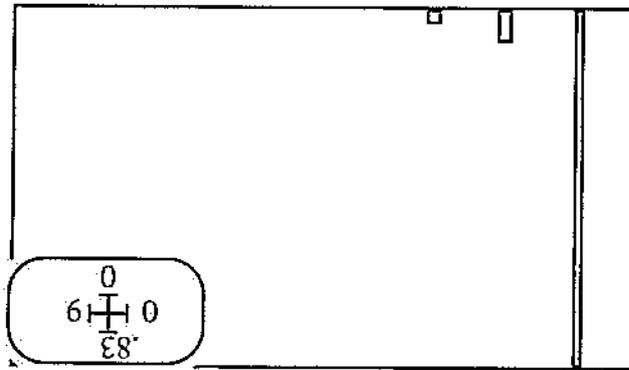
Les points représentant les variables sont proches du centre du cercle car l'inertie du nuage de points est faible.

7.5.2.1.2 Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes.

L'inertie du nuage de point est de 1,03 soit 12,5 % (1,03 / 8) de l'inertie totale du nuage de points. L'analyse inter-mois explicite peu l'inertie du nuage de points de l'ACPn. La VH moyenne 7 régimes d'un mois donné dépend peu de ce mois. Le décalage de hautes et basses eaux selon le régime explicite que la VH moyenne par mois change peu d'un mois à l'autre.

- l'axe F1 explicite 80 % de la variance de l'échantillon.
- l'axe F2 explicite 10 %.
- l'axe F3 explicite 7 %.

Figure 7.5.2.1.1 Le graphique des valeurs propres de l'ACPn inter-mois.



Le graphique des valeurs propres montre que la variance de l'échantillon est essentiellement expliquée par un axe principal.

Le graphique des valeurs propres de l'ACPn inter-mois.

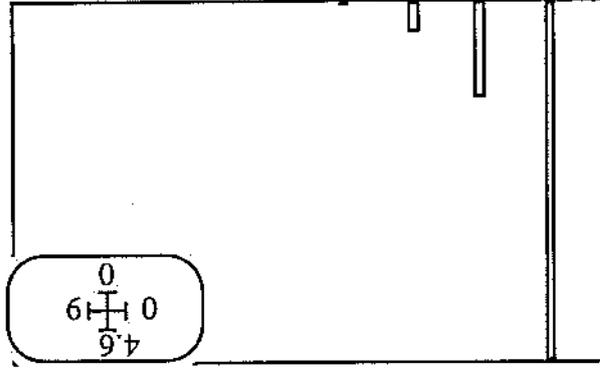
Dans cette analyse, l'effet du mois sur la VH est recherché, tous régimes mélangés. L'ACPn est réalisée sur une matrice de 12 mois par 8 caractères car l'ACPn travaille sur les centres de gravité des 12 mois. Les centres de gravité des 12 nuages sont les moyennes des 7 points constituant les caractères de chaque régime.

7.5.2.1 Recherche de l'effet mois sur la VH (analyse inter-mois).

saisons de VH homogène sont définies, plusieurs mois, successifs ou non pouvant avoir la même VH. Ces saisons ont été définies au chapitre 6.

Les deux premiers axes expliquent 85 % de la variance de l'échantillon.

Figure 7.5.2.2.1 Le graphique des valeurs propres de l'ACPn intra-mois.



- l'axe F1 représente 65 % de la variance de l'échantillon,
- l'axe F2 20 %,
- l'axe F3 8 %.

Le graphique des valeurs propres montre un axe principal.

Le graphique des valeurs propres de l'ACPn intra-mois.

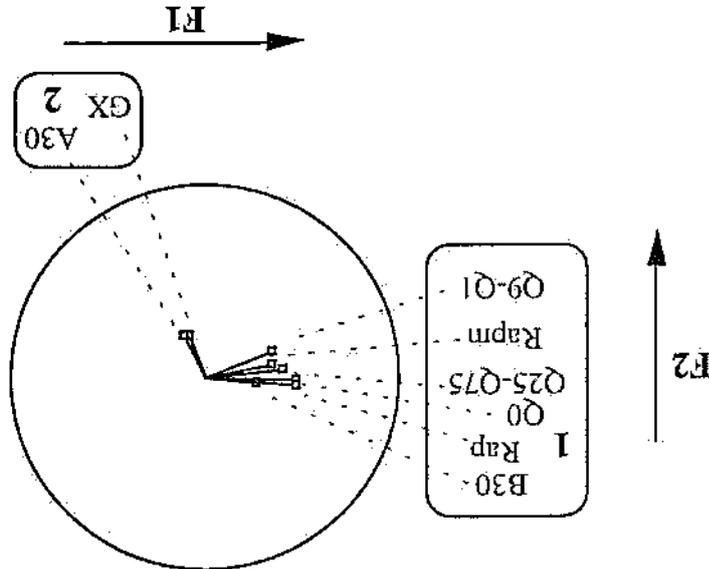
Cette fois, l'effet du régime à l'intérieur des mois est recherché. L'ACPn travaille avec une matrice de 7 régimes, 12 mois * 8 caractères. Chaque sous nuage (un nuage par mois) est constitué des 7 points disponibles, un point pour chaque régime. Les caractères sont centrés normés par rapport à la moyenne de leur sous nuage respectif.

mois).

7.5.2.2 Recherche de l'effet régime à l'intérieur des mois (analyse intra-

C'est la VHT qui différencie le mieux les mois entre eux (80 % de la variance de l'échantillon sur l'axe F1). En effet, elle est particulièrement forte en régime cèvenol d'octobre à mars alors qu'elle n'est pas très forte les autres mois. La VHPf moyenne change d'un mois à l'autre.

Figure 7.5.2.1.3 Cercle de corrélation selon les axes F1 F2 de l'ACPn inter-mois.



Les deux premiers axes expliquent 93 % de la variance de l'échantillon.

- l'axe F1 représente 62 % de la variance de l'échantillon,
- l'axe F2, 31 %,
- l'axe F3 4 %.

7.5.3.1 Le graphique des valeurs propres de l'ACPn inter-régime.

Cette fois, nous recherchons à savoir si la VH moyenne des régimes est différente d'un régime à l'autre. L'ACPn travaillée avec une matrice de 7 régimes par 8 caractères. En effet, elle travaille avec la moyenne des caractères des 7 régimes. L'ACPn cherche les axes d'inertie des centres de gravité des 7 régimes.

7.5.3.1 Recherche de l'effet du régime sur la VH (analyse inter-régime).

Les régimes découlements sont ceux définis par Pardé. Ils sont définis par un contexte climatique et géographique et sont basés sur les débits moyens mensuels inter-annuels.

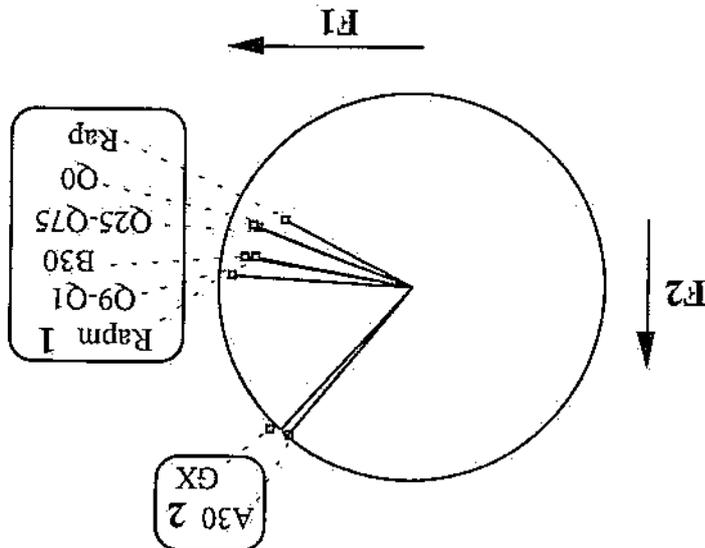
7.5.3 Recherche de l'effet du régime sur la VH.

C'est également la VH qui différencie le mieux les régimes à l'intérieur d'un mois à cause de la forte VHf du régime glacière pendant les mois de juin à septembre.

- l'axe F1 représente la VHf (groupe 1). La VHf participe également à cet axe sans le dominer.
- l'axe F2 représente la VHp (groupe 2) alors que la VHf n'y participe pas.

La signification des deux premiers axes de l'analyse intra-mois est la suivante :

Figure 7.5.2.2 Cercle de corrélation selon les axes F1 et F2 de l'ACPn intra-mois.



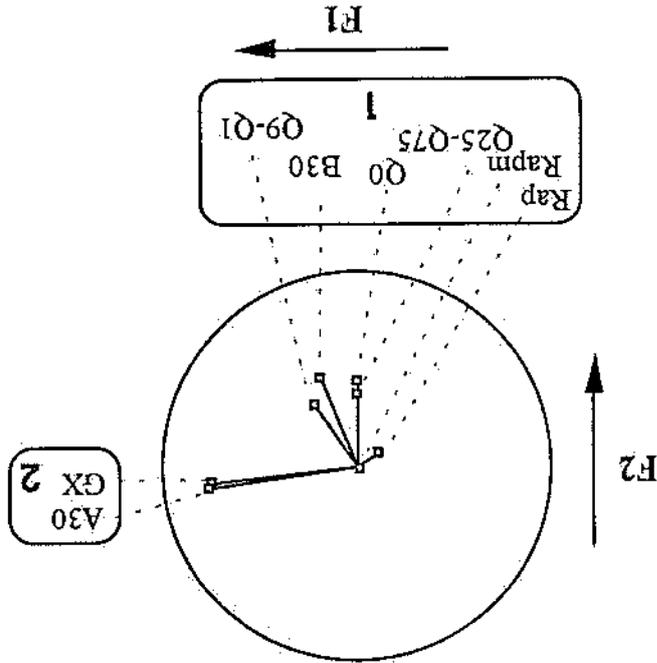
Le cercle de corrélation est tracé selon les deux premiers axes.

7.5.2.2.2 Le cercle de corrélation de l'ACPn intra-mois.

L'inertie du nuage de points est de 6,97 soit 87,5 % (6,97 / 8) de l'inertie totale du nuage de points. L'analyse intra-mois explique la plus grande part de l'inertie du nuage de points. La VH d'un mois donné est fortement liée au régime d'écoulement.

En effet, l'axe F1 représente la VHPf (groupe 2) alors que l'axe F2 représente la VHF (groupe 1). Entre régime, c'est la VHPf qui explique la plus grande part de variance et qui constitue l'axe principal. Cela s'explique par la forte VHPf en régime cévenol pour les mois d'octobre à mars.

Figure 7.5.3.1.2 Cercle de corrélation selon les axes F1 et F2 de l'ACPn inter-régime.



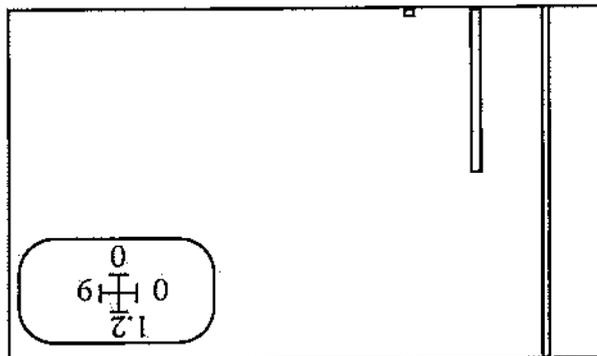
Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes montre que le rôle de la VHF et de la VHPf est inverse.

7.5.3.1.2 Cercle de corrélation de l'ACPn inter-régime.

La VH moyenne par régime prise sur les 12 mois diffère peu d'un régime à l'autre, à cause de l'effet de moyenne. La VH moyenne de chaque régime ne permet pas de les distinguer mais la moyenne n'apporte aucune information de la VH au cours des saisons, à l'intérieur de chaque régime. Pourtant, cette information est importante pour une approche biologique de la VH à cause de la succession des stades biologiques des diverses espèces.

L'inertie du nuage de points de l'analyse inter-régime est de 1,92 soit 24 % (1,92 / 8) de l'inertie totale du nuage de points. L'analyse inter-régime explique peu de variance du nuage de points.

Figure 7.5.3.1.1 Graphie des valeurs propres de l'ACPn inter-régime.



7.5.3.2 Recherche de l'effet mois à l'intérieur d'un régime (analyse intra-régime),

L'effet du mois à l'intérieur d'un régime donné est recherché. L'ACPn intra-régime cherche les axes d'inertie communs aux 7 sous nuages, un sous nuage représentant un régime. Elle montre la VH des caractères à l'intérieur d'une classe donnée.

7.5.3.2.1 Le graphique des valeurs propres de l'ACPn intra-régime.

La variance de l'échantillon est essentiellement expliquée par l'axe F1. L'axe F1 explique 76 % de la variance de l'échantillon,

- l'axe F2, 11 %
- l'axe F3, 7 %.

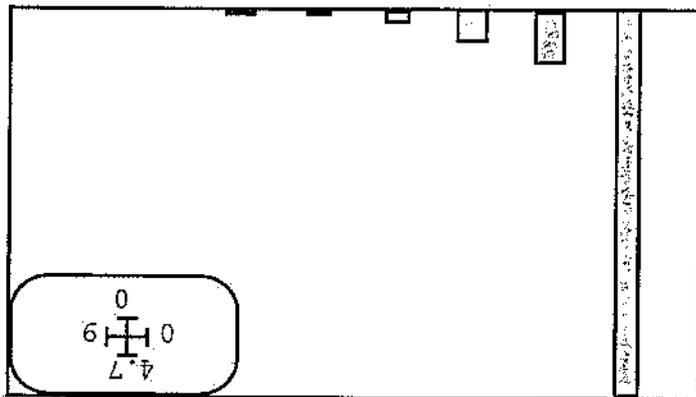


Figure 7.5.3.2.1 Graphique des valeurs propres de l'ACPn intra-régime.

L'inertie du nuage de points de l'analyse intra-régime est de 6,08 soit 76 % (6,08 / 8) de l'inertie du nuage de points. L'analyse intra-régime explique la plus grande partie de l'inertie du nuage de points. La VH évolue plus au cours des saisons mensuelles pour un régime qu'entre les régimes. Ce résultat signifie que la production des caractères de la VH selon les régimes définis par Parde conserve une VH intrinsèque cohérente avec la notion de régime.

7.5.3.2.2 Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes.

Les deux premiers axes représentent :

- l'axe F1 (groupe 1) représente la VH alors que la VHpf participe peu à cet axe.
 - l'axe F2 représente la VHpf (groupe 2) alors que la VH ne participe pas à cet axe.
- C'est la VH qui évolue le plus à l'intérieur d'un régime donné car elle constitue l'axe F1 de l'ACPn intra-régime.

Dans les deux cas, l'analyse intra-classe explique la plus grande part de l'inertie du nuage de points. La VH est donc plus forte à l'intérieur des classes qu'entre les classes.

L'analyse inter-régime n'explique que 24 % de l'inertie du nuage de points alors que l'analyse intra-régime explique 76 % de cette inertie. La variance des caractères est donc essentiellement due à la VH à l'intérieur d'un régime donné.

% de la VH dû à l'effet intra-régime = 76 % (6,07 / 8).
 % de la VH dû à l'effet inter-régime = 24 % (1,93 / 8).

7.5.4.2 Part de l'analyse intra et inter-classe dans l'effet régime.

L'analyse inter-mois n'explique que 13 % de l'inertie du nuage de points alors que l'analyse intra-mois en explique 87 %. La VH est donc plus forte à l'intérieur des saisons mensuelles qu'entre saisons mensuelles.

% de la VH dû à l'effet intra-mois = 87 % (6,97 / 8).
 % de la VH dû à l'effet inter-mois = 13 % (1,03 / 8).

7.5.4.1 Part de l'analyse intra et inter-classe dans l'effet saisons mensuelles.

L'inertie inter et intra-classe a été indiquée pour chaque analyse.

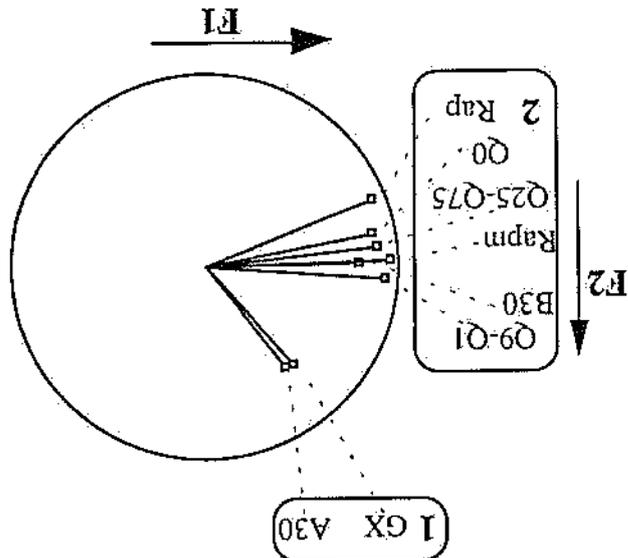
Où l'inertie totale est l'inertie du nuage de points. Pour une ACPn, l'inertie est égale au nombre de caractères, 8 dans notre exemple.

$$\text{Inertie totale} = \text{inertie inter-classe} + \text{inertie intra-classe.}$$

Pour savoir quelle est la part de l'inertie du nuage de points due à l'analyse intra et inter-classe, il suffit de calculer la part de chaque analyse selon la formule suivante :

7.5.4 Part de l'effet saisonnier et de l'effet du régime dans la VH.

Figure 7.5.3.2.2 Cercle de corrélation de l'ACPn intra-régime selon les deux premiers axes.



Les caractères de la VHF et de la VHFp sont mieux distingués en considérant la notion de saisons mensuelles qu'en considérant leur appartenance aux régimes de Paré. Le régime confirme cependant une dépendance certaine de ces caractères vis à vis des régimes.

7.5.4.3 Classification des effets mois et régime sur la VH avec les premières valeurs propres de chaque analyse réalisée.

La représentation des premières valeurs propres par analyse est proposée par Dolédec et Chesnel (1993). Elle permet de classer par ordre d'importance les effets saisons mensuelles et régime sur la VH des caractères et les effets intra et inter-classe.

Les différences entre classes (analyse inter-régime et inter-mois) sont faibles alors que la VH à l'intérieur d'une classe donnée (analyse intra-régime et intra-mois) est forte. Cela s'explique car les régimes présentent une VH qui évolue au cours des saisons.

Quand tous les régimes sont mélangés, les différences entre régimes et entre mois, sont masquées par l'effet de moyenne.

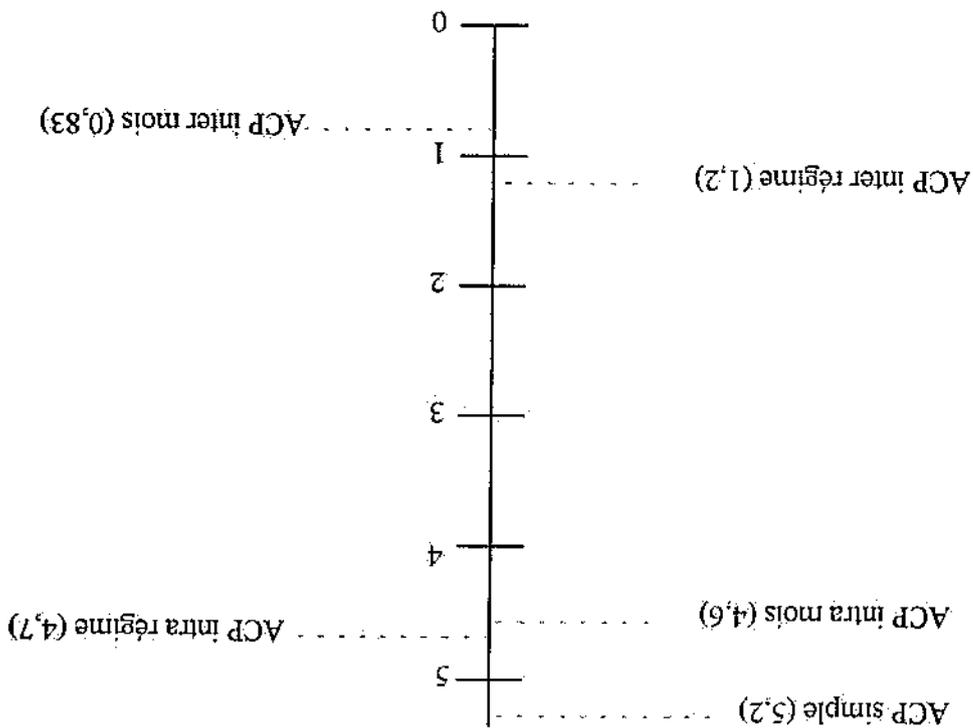


Figure 7.5.4.3 Premières valeurs propres de chaque analyse réalisée. (Valeur propre du premier facteur d'analyse).

En janvier, la VH est forte en régime à influence pluviale alors qu'elle est faible en régime à influence glaciale ou nivale. En juillet, c'est l'inverse. Ce sont les régimes à influence pluviale ou nivale qui présentent la plus forte VH alors que les régimes à influence pluviale sont à l'étalement et présentent une faible VH. Le même effet se reproduit pour chacun des 12 mois et pour chaque régime.

Par contre, à l'intérieur d'une classe donnée (un régime ou un mois), la VH dépend fortement du mois considéré pour un régime et du régime pour un mois donné. C'est ce que montre l'analyse intra-classe.

La variance de l'échantillon est auant due à l'effet du régime qu'à l'effet saisonnier et que cette VH est plus forte à l'intérieur d'une classe qu'entre les classes.

7.6 Conclusion du paragraphe 7.5.

Les effets saisons et régimes ont été recherchés sur la VHF et sur la VHPf à l'aide d'une analyse en composantes principales intra et inter-classe.

L'élimination des facteurs temps et régimes (analyse inter-classe) entraîne une forte perte de variance de l'échantillon à cause de l'effet de moyenne. Seule 24 % de l'inertie du nuage de points est expliquée par l'analyse inter-régime et 13 % dans l'analyse inter-mois. Cette baisse de la variance est due à l'effet de moyenne. La VH moyenne d'un régime ou d'un mois ne change pas beaucoup d'un régime ou d'un mois à l'autre.

Par contre, la VH change beaucoup au cours des 12 mois de l'année pour un régime donné (analyse intra-classe). En effet, 76 % de l'inertie du nuage de points est contenue dans l'analyse intra-régime et 87 % dans l'analyse intra-mois. La VH d'un mois donné est très liée au régime et la VH d'un régime donné est très liée au mois considéré.

Il est donc important de bien distinguer les différents régimes et les saisons mensuelles pour décrire la VH en rivière. La connaissance du mois ou du régime n'est pas suffisante, les deux informations sont nécessaires pour connaître la VH.

La VHPf est un élément essentiel pour décrire la VH. Elle ressort comme l'axe principal dans l'analyse inter-régime. Elle permet de différencier les régimes entre eux, à cause du régime cèvenol. Il faut conserver un descripteur de la VHPf pour décrire la VH.

Cependant, la VHF ressort comme axe principal de l'ACPn dans les analyses inter et intra-mois et intra-régime.

Les régimes n'ont pas la même VH au cours des saisons. Ils se différencient nettement les uns des autres, surtout les régimes glaciaire et cévenol. Les régimes et les saisons sont à conserver pour décrire la VH car elle évolue aussi bien à l'intérieur d'un mois donné à cause des régimes mais également à l'intérieur d'un régime à cause des saisons.

La VH peut donc expliquer, au moins en partie, des différences entre les EBC selon les régimes. Cependant, il ne faut pas négliger d'autres facteurs, comme la température de l'eau. En régime glaciaire, l'eau est froide toute l'année alors qu'elle se réchauffe sensiblement lété en régime pluvial. La température de l'eau conditionne la reproduction des espèces piscicoles.

VH du régime pluvial est inférieure à la VH moyenne de tous les régimes, toute l'année.

- le régime pluvial présente une faible VH. Elle évolue peu au cours des saisons. La des saisons, sans que l'une ou l'autre des VH soit plus marquée.
- le régime pluvio-nival a une VHF et une VHPf qui évoluent assez peu au cours également au cours des saisons, mais moins qu'en régime glaciaire.
- les régimes nivo-glaciaire et nival sont plutôt orientés sur la VHF. Elle évolue peu au cours des saisons.
- le régime nivo-pluvial se caractérise par une VH forte toute l'année, mais elle que c'est la VHPf qui évolue au cours des saisons en régime cévenol.
- le régime glaciaire a une VHF qui évolue beaucoup au cours des saisons alors

Les régimes mensuels, définis par Parde (1968), peuvent être classés par VH décroissante :

Ces quatre variables sont sensibles aux distributions de fréquence des débits et elles permettent de distinguer la VHF et la VHPf. Ces variables sont associées à une fréquence exprimée en années. C'est avantage par rapport aux autres variables.

Les indices d'asymétrie constituent un axe principal mais ils ne sont pas conservés car ils sont insensibles aux distributions de fréquence des débits. Pour des distributions différentes, ils peuvent présenter des valeurs similaires, ce qui est un inconvénient pour montrer la VH due aux crues.

Le gradex des débits et la crue annuelle sont également intéressants mais ils sont calculés à partir des débits. Les débits des jours précédents ne sont pas pris en compte, c'est un inconvénient d'après les références bibliographiques.

- l'indice A pour la VHPf,
- l'indice B pour la VHF.

L'Analyse en Composantes Principales a permis de choisir les variables retenues pour décrire la VH. La VH peut être décrite à l'aide de deux variables principales qui distinguent la VHF et la VHPf. Ces variables sont :

7.7 Conclusion du chapitre 7.

Cependant, seule la typologie de la VH selon les régimes de Parde (1968) a été recherchée. D'autres typologies pourraient être recherchées, en regroupant les stations ayant une VH comparable au cours de l'année. De plus, il existe d'autres classifications des régimes hydrologiques, pour lesquels une typologie de la VH pourrait également être testée.

A présent, l'effet d'échelle spatial est recherché sur les nouvelles variables avant de proposer une ébauche de régionalisation de la VH à l'échelle du bassin versant de la Loire. En effet, un rapprochement entre la VH et les EEC justifie de régionaliser la VH, qui n'est pas connue en tout point et les EEC ne sont pas toujours connus en des points jaugés. Nous rechercherons les facteurs qui influencent la VH, à partir d'un échantillon de 123 stations hydrométriques, d'une surface allant de 33 à 115 000 km². Ces grands bassins versants seront également utilisés pour rechercher l'effet d'échelle spatiale sur la VH.

Enfin, les ΔQ distinguent la VHF et la VHP, ce que confirme l'ACP. Pour ces raisons, les ΔQ sont retenus pour distinguer ces VH. Enfin, les régimes et les saisons doivent être conservés pour décrire la VH, pour une prise en compte des EEC. Si les régimes et les mois ne se distinguent pas par leur VH moyenne, ils se distinguent par leur VH intrinsèque. C'est ce que montrent les ACP intra et inter-classe.

Les ΔQ sont sensibles aux distributions de fréquence des débits. En effet, ils passent par leur maximum en hautes eaux et par leur minimum en basses eaux. Le rapport entre la saison de VH maximale et de VH minimale pour un régime donné est élevé. De forts ΔQ rendent compte de fortes variations de débit, qui peuvent être préjudiciables aux EEC. C'est une différence importante par rapport à d'autres descripteurs utilisés pour décrire la VH, comme le rapport de la moyenne et de la médiane, de tous les descripteurs utilisant le logarithme des débits ou du moment d'ordre 3.

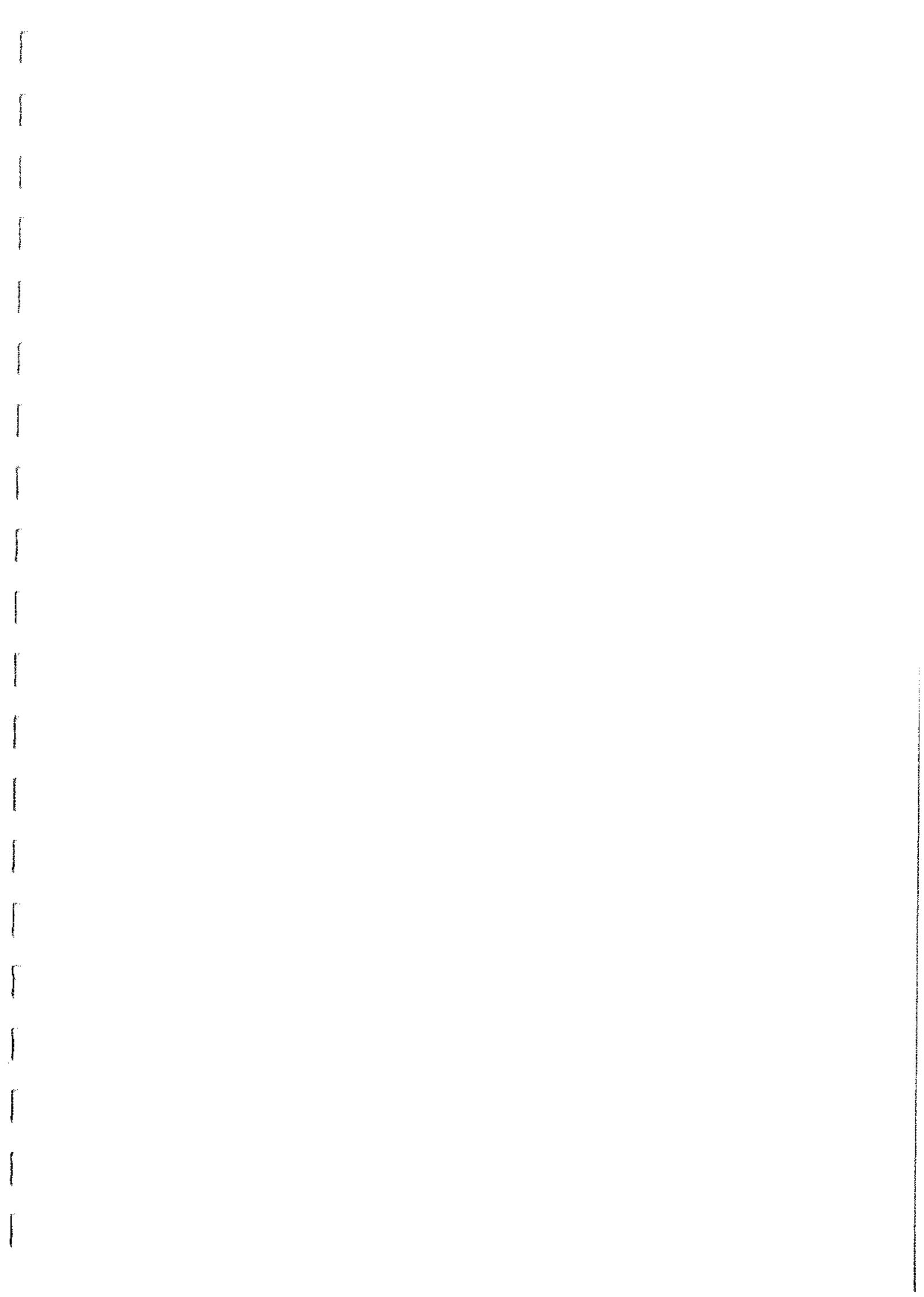
Les ΔQ sont différents des descripteurs existant en bibliographie, ils peuvent être conservés pour décrire la VH. Seuls l'inter-décile et l'inter-quartile se rapprochent de la VHF, telle que nous la définissons mais ils ne permettent pas de décrire la VHP. Le gradex des débits et la VHP sont plus ou moins redondants mais les débits ne tiennent pas compte des débits passés, ce que font les ΔQ .

La VHP est peu sensible à la mémoire M prise en compte pour le calcul des ΔQ alors que la VHF y est sensible. Le choix de la mémoire M devra être précisé lorsqu'un lien entre les écosystèmes aquatiques et la VH sera recherché. De même, les ΔQ doivent être échantillonnées avec un écart de date de 3 jours pour des bassins versants d'une surface inférieure à 2 000 km² alors qu'un écart de date de 10 jours est recommandé pour des bassins versants d'une taille supérieure à 6 000 km².

- l'indice A pour la VHP,
- l'indice B pour la VHF.

Cette partie a été consacrée à l'élaboration des nouvelles variables proposées pour décrire la VH, à partir des données bibliographiques. La bibliographie suggère de distinguer la VHF et la VHP. Ces nouvelles variables sont les ΔQ . Ce sont des variables à mémoire. En effet, les ΔQ se calculent comme étant la différence entre le débit d'un jour donné et la médiane des débits des 30 jours précédents. Avec la loi exponentielle, les ΔQ les plus élevés se synthétisent avec deux indices qui sont :

Conclusion de la partie II.



**PARTIE III - ELEMENTS DE
REGIONALISATION DE LA VH**

RECOUVREMENT DE LA VILLE
LIVRE III - ELEMENTS DE

Dans le dernier chapitre, une comparaison de la VH est proposée sur 4 grandes régions hydrologiques, à l'échelle du bassin versant de la Loire. Ces régions hydrologiques ont été définies par Wasson *et al.* (1993). C'est un début de recherche de cohérence spatiale de la VH.

La recherche de l'effet d'échelle spatiale sur la VH sera également effectuée sur le bassin versant de la Loire, sur un échantillon de 123 stations hydrométriques. Les écoulements sont peu ou pas influencés par les activités humaines sur les stations d'une surface inférieure à 2 000 km².

L'effet d'échelle spatiale est recherché sur le Rhône et la Loire car ce sont de grands bassins versants, d'une surface voisine de 100 000 km². Sur de tels bassins versants, les crues sont atténuées par le laminage hydrologique et hydraulique. Ces surfaces correspondent à celles ou Horwitz (1978) et Richards (1989 et 1990) observent un effet d'échelle spatiale sur la VH. Par contre, ces fleuves ont des écoulements plus ou moins artificiels, ce qui peut modifier la VH.

Dans un premier temps, nous chercherons à quantifier l'effet d'échelle spatiale sur la VH sur les 55 stations de référence, réparties du régime glaciaire au régime nival. La surface de ces bassins versants varie de 45 à 2 170 km². Ensuite, cet effet est approché au travers d'un exemple de bassins versants emboîtés, sur la Durançe, à l'amont du Lac de Serre-Ponçon.

géologie par exemple.

- la connaissance des facteurs qui influencent la VH, comme le relief, le climat, la hiérarchie, et la recherche d'une certaine cohérence de la VH,

- le regroupement de cours d'eau qui est réalisé à l'aide d'une classification d'échelle spatiale.

l'augmentation de la surface des bassins versants atténue la VH, ce qui est qualifié d'effet

- l'effet d'échelle spatiale. Horwitz (1978) et Richard (1989 et 1990) observent que comparable d'un bassin versant à l'autre.

- le pas de temps sur les débits. Les débits journaliers sont choisis, la VH est donc d'un bassin versant à l'autre.

- la normalisation de la VH, avec les débits spécifiques qui la rendent comparable

La régionalisation de la VH pose plusieurs difficultés qui sont :

disponibles en des sites connus.

Après avoir retenu l'indice A pour décrire la VHPf et l'indice B pour la VHF, quelques éléments sommaires de régionalisation des ΔQ sont proposés. La régionalisation de la VH permet de passer de cours d'eau dont la VH est connue à des cours d'eau dont la VH est inconnue. Cette étape est indispensable car les données hydrobiologiques ne sont pas toujours disponibles en des sites connus.

Introduction de la partie III.

Chapitre 8 - Effet d'échelle spatiale sur la VH

L'effet d'échelle spatiale est recherché sur les indices A et B qui sont retenus pour différencier la VHF et la VHP. Cependant, nous rechercherons également l'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion car c'est un nouveau descripteur de la VH.

8.1 Effet de la surface sur la VHF et sur la VHP sur l'échantillon des 55 stations hydrométriques.

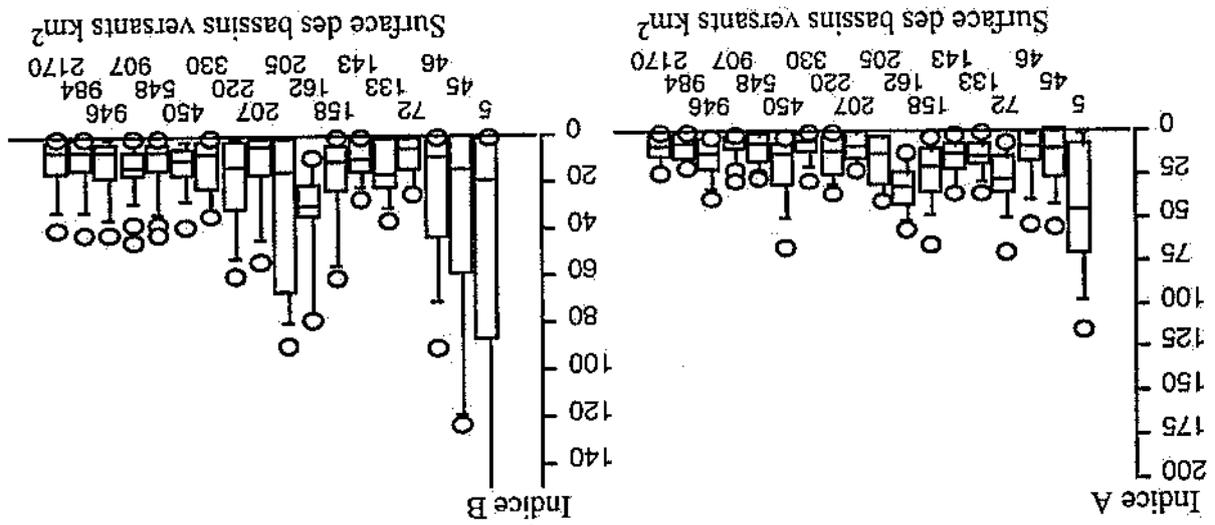
Ces 55 stations sont les stations de référence utilisées tout au long de ces recherches. La surface des bassins versants varie de 5 à 2 170 km². Les cours d'eau sont regroupés selon le mode d'alimentation des écoulements.

- régime glaciaire à nival,
- régime nivo-pluvial et pluvio-nival,
- régime pluvial.

Chaque bassin versant est représenté par 12 valeurs de VHP et 12 valeurs de VHF (approche mensuelle de la VH). Les graphes en boîte ont été choisis pour rendre compte de la dispersion de la VHF et de la VHP pour chaque station, qui sera repérée par sa surface.

8.1.1 Effet de la surface sur les indices A et B en régime glaciaire à nival.

L'effet d'échelle spatiale est perceptible sur la VHF et la VHP maximales. Elles décroissent des plus petits bassins versants vers les plus grands.



En effet, les plus grands bassins versants ont une taille de 250 km². Les caractéristiques des bassins versants comme la géologie, la forme des bassins versants... dominent l'effet d'échelle spatial, dans cette gamme de surface seulement.

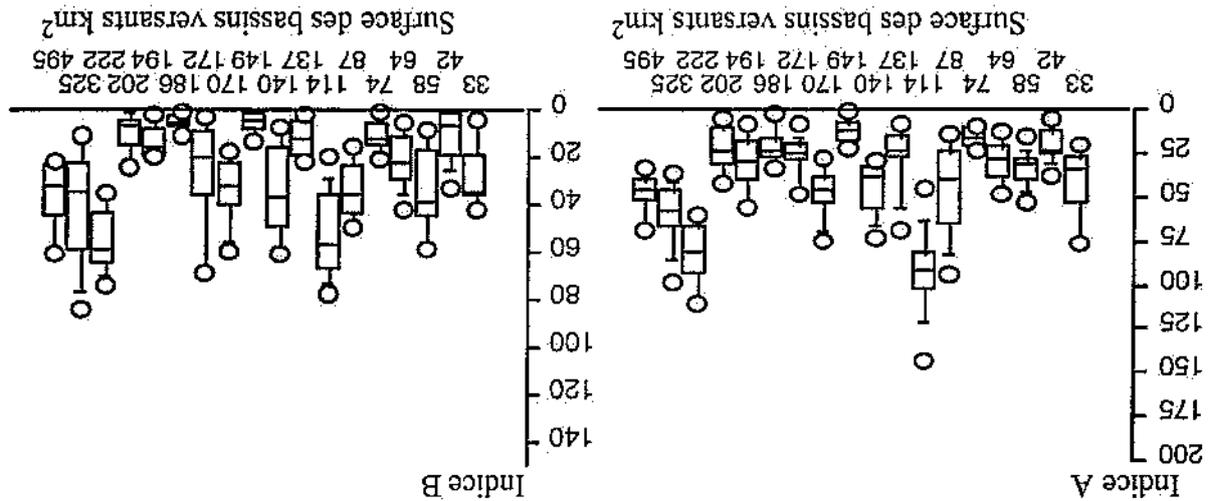
Pour ces bassins versants, l'effet d'échelle spatiale n'est pas perceptible sur la VHF et sur la VHPF extrêmes.

8.1.3 Effet de la surface sur les indices A et B en régime pluvial.

En régime nivo-pluvial, les 3 plus grands bassins versants (taille supérieure à 210 km²) présentent une VHF et une VHPF décroissante avec la surface. Cependant, l'effet d'échelle spatiale n'est perçu qu'avec 3 bassins, ce n'est pas significatif.

La VHF et la VHPF dépendent beaucoup du bassin versant et du régime mais peu de la surface. C'est en régime pluvio-nival que la VHF et la VHPF minimales sont les plus fortes. C'est le cas des bassins versants d'une surface de 114, 140, 170, 222, 325 et 425 km².

Figure 8.1.2 Effet d'échelle spatiale sur la VHF en régime nivo-pluvial et pluvio-nival.



L'effet d'échelle sur la VHPF et sur la VHF n'est pas net, la taille des bassins versants n'atteint que 500 km².

8.1.2 Effet de la surface sur les indices A et B en régime nivo-pluvial et pluvio-nival.

Les bassins versants en régime glaciaire ont des surfaces de 5, 45, 46 et 205 km². Ils présentent également une forte dispersion de cet indice au cours de l'année par rapport aux autres régimes mais 3 d'entre eux sont les plus petits bassins versants.

Par contre, il n'y a pas d'effet d'échelle spatiale sur la VHF et sur la VHPF minimales. Elles sont nulles ou très faibles au moins un mois par an.

La VHF maximale diminue également pour des surfaces inférieures à 300 km². Ensuite, elle se stabilise avec l'augmentation de la surface.

L'intérêt de disposer de plusieurs bassins versants emboîtés est de suivre l'évolution de la VHF et de la VHPF le long d'un cours d'eau, de l'amont vers l'aval. C'est une façon de chercher quel est l'effet d'échelle spatiale sur la VH sur un même bassin versant.

Le cas retenu est celui de la Durance, à l'amont d'Embrun, pour ne pas subir l'influence de la retenue de Serre-Fongon. Ce cours d'eau est situé dans le département des Hautes-Alpes et son régime est de type nival. Les débits maximaux mensuels se situent aux mois de mai et juin. L'étiage est bien marqué de décembre à mars. Les bassins versants emboîtés ont une surface allant de 207 à 2 170 km². La Durance a été retenue car c'est un bassin versant pour lequel plusieurs conditions sont remplies :

8.2 Cas des bassins versants emboîtés sur la Durance.

La surface des bassins versants de référence est trop faible pour percevoir l'effet d'échelle spatiale, sauf dans le cas de régime nival et pour la VHF et la VHPF maximales. En effet, Horwitz, 1978 et Richards (1989) travaillent avec des bassins versants d'une surface de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés.

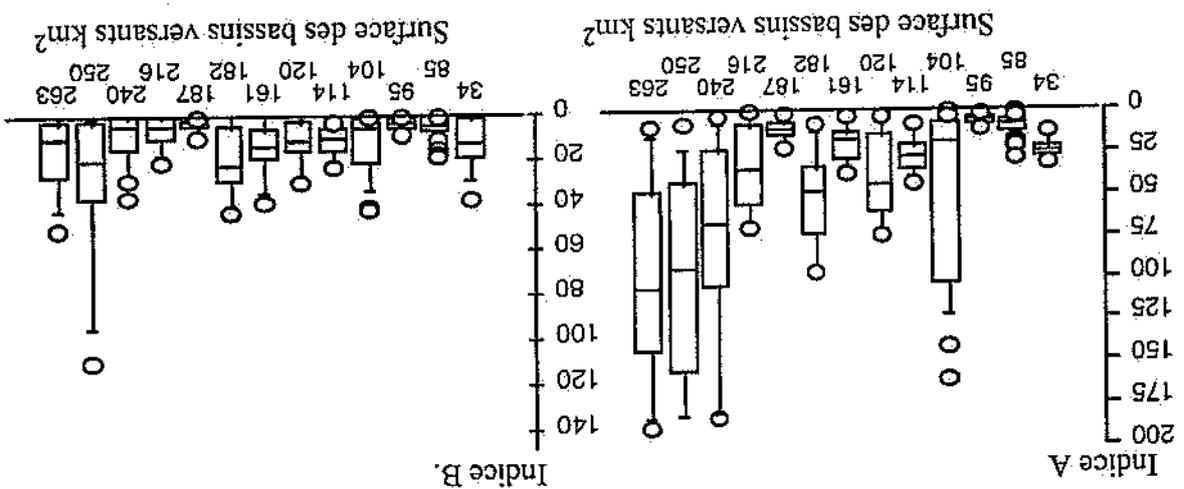
Pour des surfaces de quelques centaines de km², la VH est très dépendante du bassin versant considéré. Si la VH est un facteur important régulant le nombre d'espèces piscicoles dans un cours d'eau, ce nombre devrait être très lié au cours d'eau. Dans le cas contraire, la VH n'est pas le facteur abiotique principal qui régit le nombre d'espèces piscicoles.

stations hydrométriques.

8.1.4 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur la VH pour les 55

La VHF et la VHPF minimales sont égales ou voisines de zéro pour toutes les stations hydrométriques. La dispersion de la VHPF au cours de l'année dépend plus du régime (avec ou sans influence évenole) que de la surface.

Figure 8.1.3 Effet d'échelle spatiale sur la VH en régime pluvial.

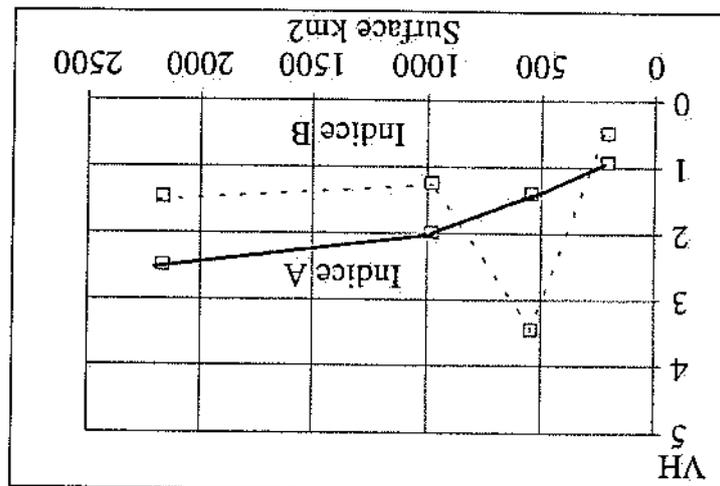


Les 4 stations qui présentent la plus forte VHPF correspondent à 4 stations à influence évenole. Trois de ces stations correspondent aux plus grandes surfaces de bassin versant, ce qui porte à croire que la VH augmente avec la surface.

Cependant, seule une petite partie du bassin versant est concernée par ces pluies hivernales car son altitude est élevée. Ces pluies provoquent de petites crues, mais seulement sur la partie aval du bassin versant, d'où une faible VH, croissante avec la surface.

L'indice atteint un maximum de 3,5 pour la station de 548 km² à cause d'un petit barrage sur un affluent de la Durance à Briançon. Ce barrage a un effet sur la VHF seulement, et en basses eaux. Des prises d'eau ont lieu régulièrement, elles sont visibles sur l'hydrogramme.

Figure 8.2.1 Indices de VH en basses eaux sur la Durance (décembre à mars).



La VH et la VHF augmentent légèrement de l'amont vers l'aval. En effet, la station hydrométrique la plus élevée se situe à 1 300 m d'altitude alors que la station hydrométrique la plus basse est à 780 m. Plus les stations hydrométriques sont basses, plus les pluies hivernales sont marquées sur les écoulements de ce cours d'eau.

La VH est une moyenne de la VHF et de la VHF pour les mois de décembre à mars. Cette période correspond à l'étage en régime nival.

8.2.1 Effet de la surface sur la VH de la Durance en basses eaux.

La période des hautes eaux (forte VH) et la période des basses eaux (faible VH) sont distinguées pour savoir si l'effet d'échelle spatiale est le même.

Le froid hivernal qui permet la formation d'un stock de neige l'hiver.

précipitations annuelles. L'une des grandes caractéristiques du climat sur ce bassin versant est

- le climat de la région est assez homogène, notamment au point de vue des points, sur le même cours d'eau.
- quatre bassins versants sont emboîtés. Ces descripteurs sont suivis en divers et sont au pas de temps journalier.
- les chroniques de données sont assez longues, elles ont une durée de 30 à 55 ans

activités anthropiques sur les écoulements sont plutôt réduites dans cette région,

rive gauche de la Durance, à la hauteur de Briançon (volume ?). D'une façon générale, les sensiblement le régime d'écoulement naturel. Un petit barrage est installé sur l'un des affluents d'Embrun, il n'existe pas de retenues d'eau d'un volume susceptible de perturber l'amont d'Embrun, il n'existe pas de retenues d'eau d'un volume susceptible de perturber

- les aménagements hydrauliques ne modifient pas ou peu les écoulements. A

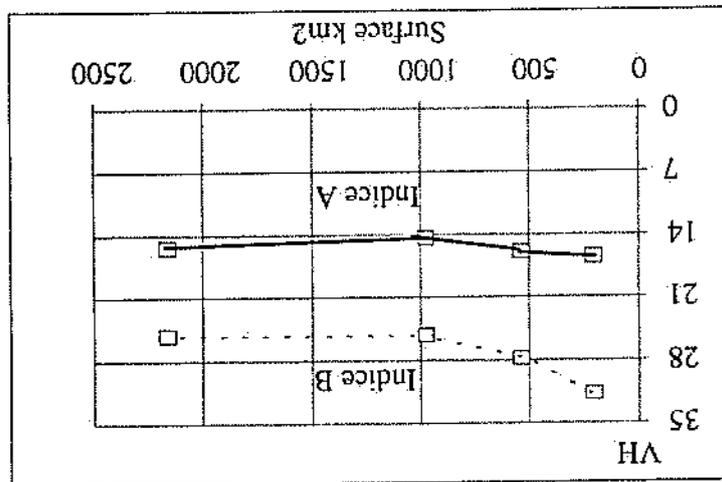
Plus un bassin versant est grand, plus le risque d'avoir des activités anthropiques susceptibles de modifier les écoulements est grand. C'est le cas du Rhône qui est une succession de seuils, correspondant à une centrale hydroélectrique. De plus, les écoulements du Rhône sont artificialisés par le Lac Léman, qui atténue les débits extrêmes.

Compte tenu des résultats précédents, il faut modéliser l'effet d'échelle spatiale sur de plus grands bassins versants. Des bassins versants de plusieurs dizaines de milliers de km² sont utilisés pour percevoir un effet d'échelle spatiale. Malgré les influences anthropiques sur les écoulements, l'effet d'échelle spatiale est modélisé sur le Rhône (96 500 km²) et la Loire (115 000 km²).

8.3 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur la VH à partir de grands bassins versants sur le Rhône et la Loire.

L'effet d'échelle spatiale sur la VH est faible en hautes eaux sur la Durance à l'amont du barrage de Serre-Ponçon car le plus grand bassin versant a une surface de 2 170 km² seulement. Une telle surface ne permet pas d'appréhender l'effet d'échelle spatiale sur la VH, à cause de la géologie, du relief, ou de la forme des bassins versants.

Figure 8.2.2 Effet d'échelle spatiale sur les indices de VH sur la Durance (mai à août).



L'effet de la surface est plus important sur la VHF que sur la VHP, l'effet d'échelle spatiale est hydrométriques pendant la période des hautes eaux. Pour la VHP, l'effet d'échelle spatiale est peu marqué.

La VH est calculée comme une moyenne de la VH calculée sur les mois de mai à août. Cette période correspond à la fonte nivale.

8.2.2 Effet de la surface sur la VH de la Durance en hautes eaux (mai à août).

En basses eaux, l'effet d'échelle spatiale sur la VHF et la VHP n'est pas net, la surface maximale des bassins versants emboîtés étant de 2 170 km².

Les écoulements de la Loire paraissent moins artificialisés que ceux de Rhône. La Loire n'est pas une succession de seuils et elle n'est pas l'exutoire d'un grand lac. Elle a un bassin versant d'une surface de 115 000 km².

La VHF et la VHPF ont été calculées par saison mensuelle. Cependant, comme il s'agit de grands bassins versants, l'écart de date minimum retenu pour échantillonner les ΔQ a été pris égal à 10 jours (chapitre 4). Des indices A et B moyens ont été calculés pour rendre compte de la VH :

- des hautes eaux. La VHF et la VHPF moyennes ont été calculées sur les mois de janvier à avril pour la Loire et le Rhône.
- des basses eaux. La VHF et la VHPF moyennes ont été calculées sur les mois de juillet à octobre pour les deux bassins versants. Les mêmes mois ont été conservés pour les deux bassins versants bien que le Rhône soit alimenté par la neige au printemps.

Les chroniques journalières utilisées sont issues de la Banque de données HYDRO. Pour le Rhône, elles ont une durée de 23 ans (1970 à 1992) sauf pour le Rhône à GIVORS (51 500 km²) qui a une durée de 72 ans. Pour la Loire, deux chroniques (La Loire à BLOIS 38 300 km² et à MONTJEAN 115 000 km²) ont une longueur de 90 et 99 ans. Les autres chroniques ont une longueur de 10 à 20 ans, en général sur la période de 1970 à 1990.

Les corrélations entre la VH et la surface proposées par Horwitz (1978) et Richard (1989 et 1990) sont des fonctions puissance, de la forme :

$$\text{Indice} = C * S^D$$

Où :

C est le paramètre de position,
D est le paramètre d'échelle spatial,
S est la surface du bassin versant en km²,
* signifie la multiplication.

Les coefficients C et D sont à ajuster. L'intervalle de confiance à 95% de C et D et l'écart-type des résidus selon la variable dépendante et le coefficient de détermination sont fournis pour juger de la qualité des corrélations.

8.3.1 Effet de la surface sur la VHF et la VHPF en hautes eaux sur le Rhône et la Loire (janvier à avril).

L'effet de la surface est important sur la VHF et la VHPF pour ces deux cours d'eau, mais il dépend du cours d'eau.

Le Rhône présente une VH toujours supérieure à celle de la Loire à surface égale, y compris pour des bassins versants d'une taille inférieure à 15 000 km². La faible VHPF sur le Rhône pour les bassins versants inférieurs à cette surface s'explique par la présence du lac Léman et des centrales hydroélectriques. La VHPF passe par un maximum à la station "le Rhône à St CLAIR, 19 900 km²" puis l'effet de l'échelle spatiale provoque une décroissance de la VH.

En hautes eaux, l'effet d'échelle spatiale sur la VH est net sur le Rhône et la Loire mais il n'est pas le même sur ces deux cours d'eau. Même pour des bassins versants d'une surface de 100 000 km², l'effet du régime, de la géologie, du relief... sur la VH ne doit pas être négligé.

La VHF présente un facteur d'échelle (valeur D) voisin de -0,6 pour le Rhône et la Loire. La VHF présente un facteur d'échelle plus fort sur la Loire que sur le Rhône (D est égal à -0,234 sur le Rhône contre -0,505 sur la Loire).

(*) Pour le Rhône, le modèle est calé sur les 4 stations aval.

la Loire.

Tableau 8.3.1 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et la VHPF de janvier à avril sur le Rhône et la Loire.

Cours d'eau	Indice	Ln C	D	R ²	σ des résidus selon l'indice A ou B
Rhône (*)	Indice A	6,63±0,40	-0,390±0,032	0,99	1,04
Rhône	Indice B	7,75±0,39	-0,469±0,036	0,66	1,04
Loire	Indice A	7,69±1,64	-0,559±0,157	0,64	1,53
Loire	Indice B	9,27±4,65	-0,849±0,440	0,38	2,84

Le coefficient D et le logarithme népérien de C et leur intervalle de confiance à 95% sont indiqués dans le tableau 8.3.1. S est la surface du bassin versant en km².

$$\text{Indice A ou B} = C * S^D$$

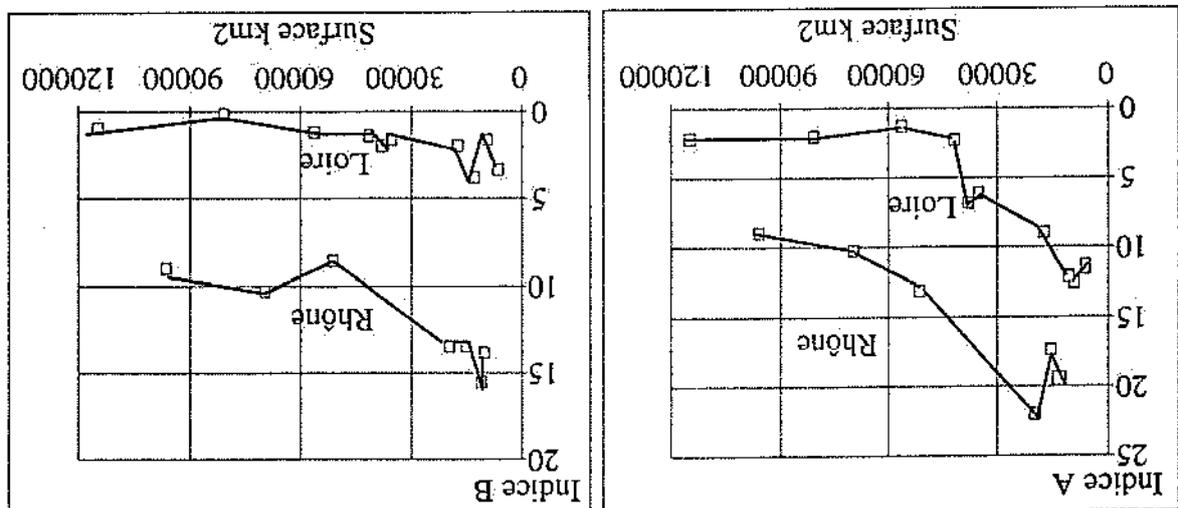
Ces modèles sont de la forme :

proposé pour chaque cours d'eau.

Comme la Loire et le Rhône ne présentent pas le même effet d'échelle spatial, un modèle est

janvier à avril.

Figure 8.3.1 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et sur la VHPF sur le Rhône et la Loire de



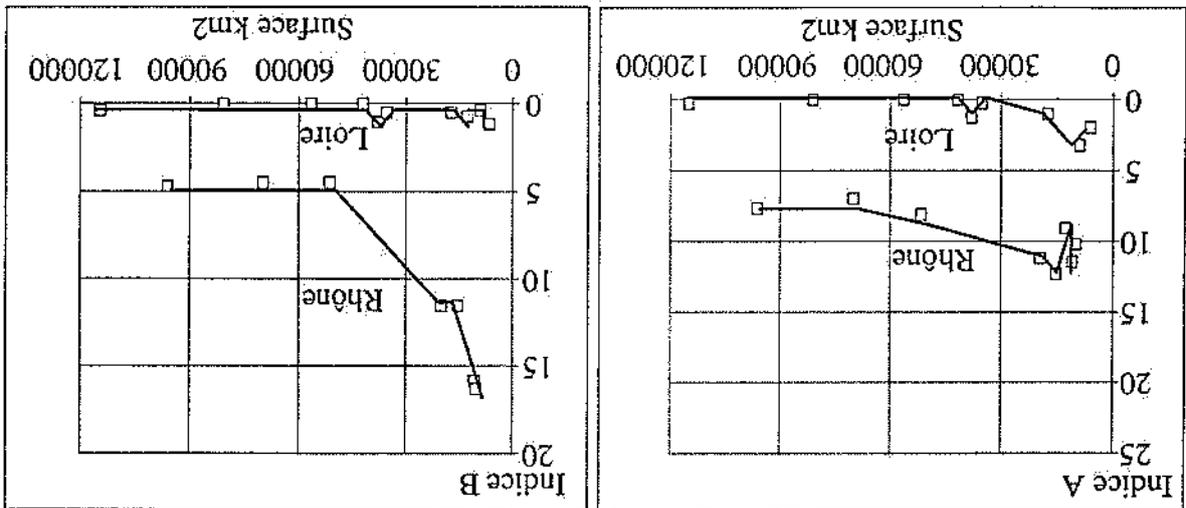
En basses eaux (juillet à octobre), l'effet d'échelle spatiale est net pour ces deux bassins versants, mais il est différent d'un bassin à l'autre.

Tableau 8.3.2 Effet d'échelle spatiale sur les indices A et B sur le Rhône et la Loire de juillet à octobre.

Cours d'eau	Indice	Ln C	D	R ²	σ des résidus selon l'indice A ou B
Rhône	Indice A	3,87±0,55	-0,17±0,054	0,68	1,13
Rhône	Indice B	7,93±0,52	-0,537±0,050	0,96	1,12
Loire	Indice A	11,9±3,66	-1,15±0,35	0,69	2,28
Loire	Indice B	4,29±1,55	-0,48±0,15	0,59	1,53

Les modèles ne sont pas ajustés avec la VH nulle car il s'agit de modèles multiplicatifs.

Figure 8.3.2 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et la VHP sur le Rhône et la Loire de juillet à octobre.



La VHP est atténuée par le Lac Léman et les barrages hydroélectriques pour les petites stations du Rhône alors que la VHF est peu affectée. En effet, elle décroît rapidement de l'amont vers l'aval pour se stabiliser pour les bassins versants d'une surface supérieure à 50 000 km². La VH est très faible sur la Loire, pour des surfaces supérieures à 20 000 km².

Les indices calculés sont une moyenne des 4 valeurs observées du mois de juillet au mois d'octobre. La VH est plus forte sur le Rhône que sur la Loire.

8.3.2 Effet de la surface sur la VHT et la VHP en basses eaux sur le Rhône et la Loire.

L'effet d'échelle spatiale sur les indices A et B est illustré par le graphique 8.4.1 où sont représentés :

- la forte dispersion des indices A et B pour les bassins versants d'une surface inférieure à 4 000 km²;

8.4.1 Effet d'échelle spatiale sur des bassins versants de la Loire en hautes eaux (janvier à avril).

Cette distinction amène à inclure le mois d'octobre dans la période des basses eaux, ce qui n'est pas exact pour les deux bassins versants sous influence cévenole. Comme seuls deux bassins versants sont sous influence cévenole, le mois d'octobre est conservé comme étant un mois présentant une faible VH.

- la période des hautes eaux. Les indices A et B ont été calculés comme la moyenne des indices A et B observés pour chaque bassin versant de janvier à avril,

- la période des basses eaux. Les indices A et B ont été calculés comme la moyenne des indices A et B observés pour chaque bassin versant de juillet à octobre.

Les indices A et B ont été calculés par saison mensuelle sur chaque bassin versant. Deux cas ont été considérés :

de 8 à 99 ans pour une durée moyenne de 24 ans.

La surface des bassins versants varie de 33 à 115 000 km². Cependant, 82 bassins versants ont une surface inférieure à 1 000 km² alors que 12 d'entre eux ont une surface supérieure à 10 000 km². Les chroniques sont au pas de temps journalier et ont une longueur

de 8 à 99 ans pour une durée moyenne de 24 ans.

Sur le bassin versant de la Loire, 123 bassins versants ont été sélectionnés, en régime peu perturbé par les activités humaines. En effet, le choix de stations hydrométriques est vaste et l'influence de la neige sur les écoulements moyens mensuels est limitée à quelques bassins versants, comme la Loire à RIBUARD (62 km²) ou l'Allier à LAVALLETTE (394 km²). Dans l'ensemble, le régime dominant le bassin versant de la Loire est de type pluvial. L'influence du régime sur la VH est donc très faible pour ce bassin versant.

Les données hydrométriques du bassin versant de la Loire sont utilisées car la VH de ce bassin versant est régionalisée au chapitre 10.

8.4 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur 123 stations hydrométriques sur le bassin versant de la Loire.

Le Rhône et la Loire ont des VH très différentes. Le Rhône présente la plus forte VH, en toutes saisons, pour des surfaces de bassin versant comparables. D'une façon générale, la Loire présente une très faible VH pour des surfaces supérieures à 20 à 30 000 km². Pour de grands bassins versants, la VH dépend également du bassin versant. Elle dépend également du régime, de la géologie, de la pente du bassin versant ou de sa forme. Sur le linéaire de ces cours d'eau, la surface et la VH sont plus ou moins corrélés.

8.3.3 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur le linéaire du Rhône et de la Loire.

Les modèles sont inexploitable, à cause de la dispersion des indices A et B pour les petites surfaces. Ces coefficients de détermination sont voisins de ceux qui sont présentes par Horwitz, (1978) et Richard (1989 et 1990).

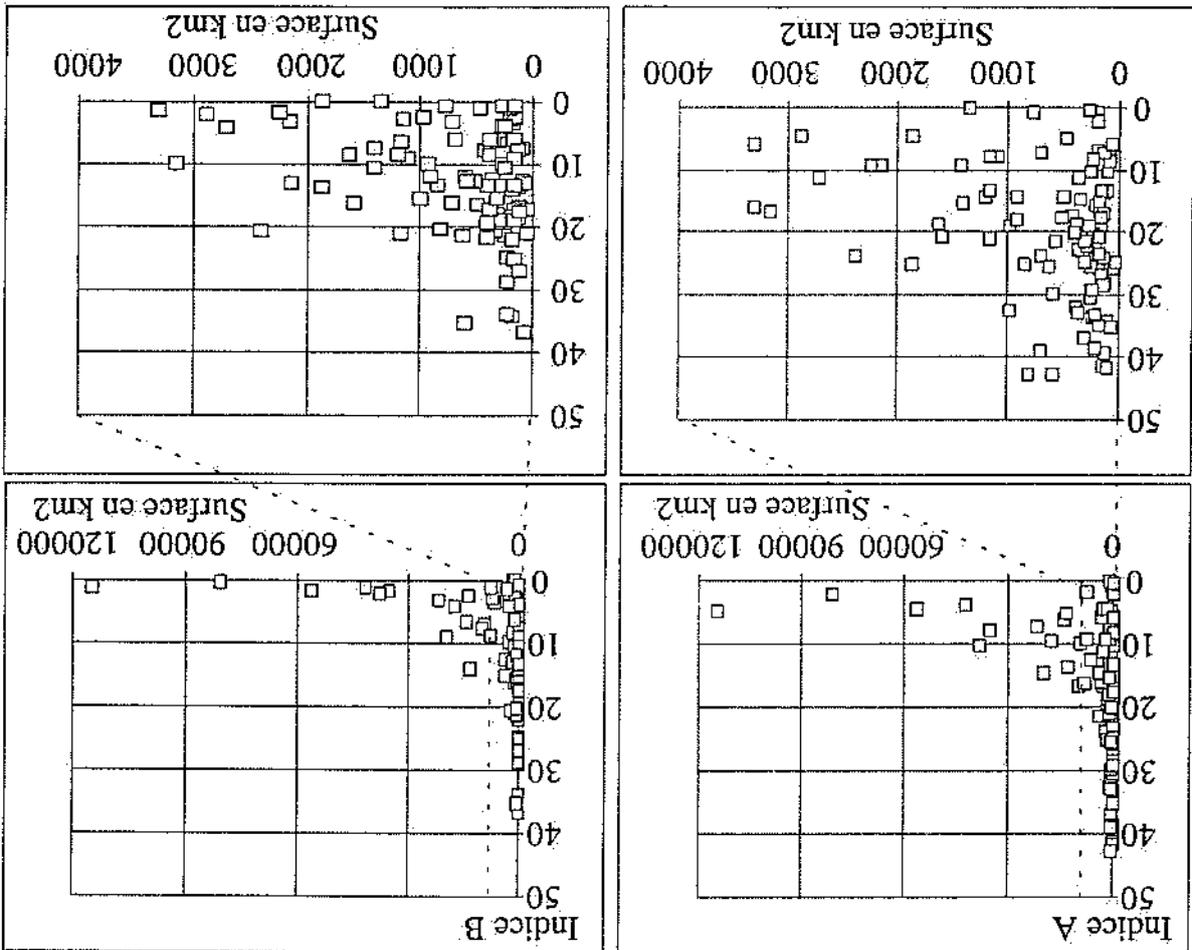
Indice B = $e^{(3,96 \pm 0,35)*S(-0,293 \pm 0,051)}$ avec $R^2 = 0,21$ et σ des résidus selon B de 2,54.

Indice A = $e^{(4,067 \pm 0,291)*S(-0,268 \pm 0,043)}$ avec $R^2 = 0,16$ et σ des résidus selon A de 2,29.

Les équations liant les indices A et B avec la surface sont les suivantes :

Pour des surfaces inférieures à 4 000 km², la VHF et la VHPF sont très dépendantes du bassin versant concerné mais elles s'homogénéisent pour des surfaces supérieures à 30 000 km². Pour ces surfaces, un seul bassin versant est concerné à chaque fois, ce sont des stations situées sur le linéaire de la Loire.

Figure 8.4.1 Effet d'échelle spatiale sur la VH sur des bassins versants de la Loire en hautes eaux (janvier à avril).



- l'effet d'échelle spatiale sur l'ensemble des bassins versants utilisés.

8.4.2 Effet d'échelle spatiale sur des bassins versants de la Loire en basses eaux (juillet à octobre).

La représentation de l'effet d'échelle spatiale en basses eaux est la même que celle des hautes eaux.

- pour les bassins versants d'une surface inférieure à 4 000 km²,
- puis pour l'ensemble des 123 stations hydrométriques.

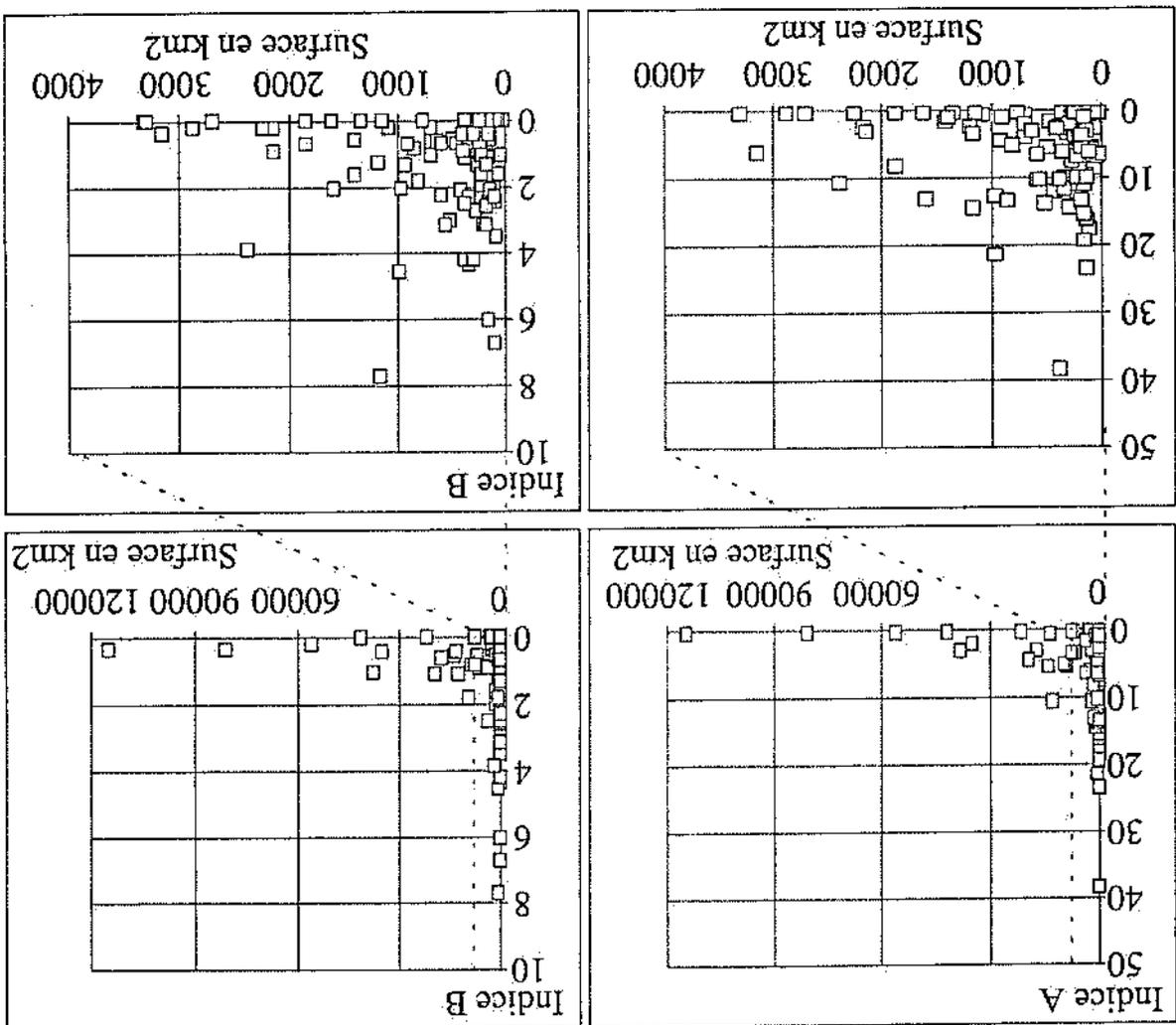


Figure 8.4.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH pour des bassins versants de la Loire en basses eaux (juillet à octobre).

Pour des surfaces inférieures à quelques milliers de km², la VH est très liée au bassin versant alors qu'elle s'hétérogénéise pour des surfaces supérieures à 30 000 km². Cependant, plus les surfaces sont importantes, moins les observations sont nombreuses. Pour ces surfaces, il ne reste plus qu'une seule observation pour une surface donnée. Ces stations sont situées sur le linéaire de la Loire.

Les équations liant les indices A et B avec la surface sont les suivantes :

Indice A = $e^{(3,28 \pm 0,48) * S^{(-0,97 \pm 0,071)}}$ avec $R^2 = 0,19$ et σ des résidus selon A de 2,94.

En effet, cet indice est peu dispersé pour les stations de 72, 133 et 143 km². Cet indice est plus dispersé au cours des saisons sur des stations ayant un plus grand bassin versant. Cependant, ces trois stations ont un régime nivo-glaciaire et nival pour lesquels la tendance saisonnière des débits médians mensuels est moins forte qu'en régime glaciaire.

Cette dispersion diminue quand la surface augmente. Pour cette gamme de surface, les maxima sont sensibles à l'effet d'échelle spatial.

Les stations les plus petites présentent une forte dispersion de cet indice au cours de l'année.

8.5.1 Régime glaciaire à nival.

Chaque station est représentée par 12 points, synthétisés dans un graphique en boîte, avec la surface en abscisse.

- le régime pluvial.
 - les régimes nivo-pluvial et pluvio-nival.
 - les régimes à influence glaciaire et nival.
- Comme pour les indices A et B, les régimes seront regroupés en 3 catégories :

8.5 Recherche de l'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion avec les 55 stations hydrométriques de référence.

Les modèles proposés sont inexploitable. Pour régionaliser la VH sur un grand bassin versant, d'autres facteurs doivent être pris en compte.

D'une façon générale, la VH décroît lorsque la surface croît. Cependant, la VH est très liée au bassin versant pour les petites surfaces. De petits bassins versants peuvent présenter une faible VH, comme de grands bassins versants. Par contre, seuls les petits bassins versants peuvent présenter une forte VH.

8.4.3 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur les ΔQ des 123 bassins versants de la Loire.

Les modèles ne sont pas exploitables, les corrélations entre la surface et la VH ne sont pas bonnes.

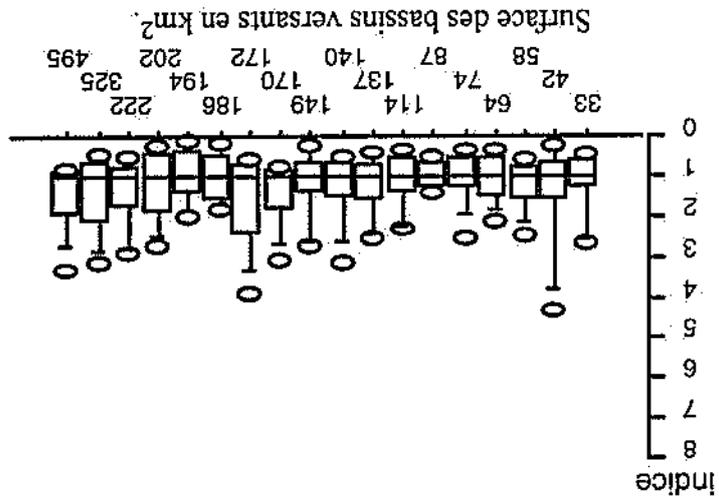
Indice B = $e^{(1,63 \pm 0,35) * S^{(-0,268 \pm 0,043)}}$ avec $R^2 = 0,17$ et σ des résidus selon B de 2,29.

En régime pluvial, la dispersion de l'indice mensuel de distorsion n'est pas affectée par l'effet d'échelle spatiale dans cette gamme de surface.

8.5.3 Régime pluvial.

Le plus grand bassin versant n'a qu'une surface de 495 km², ce qui n'est pas suffisant pour percevoir l'effet d'échelle spatiale.

Figure 8.5.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion.

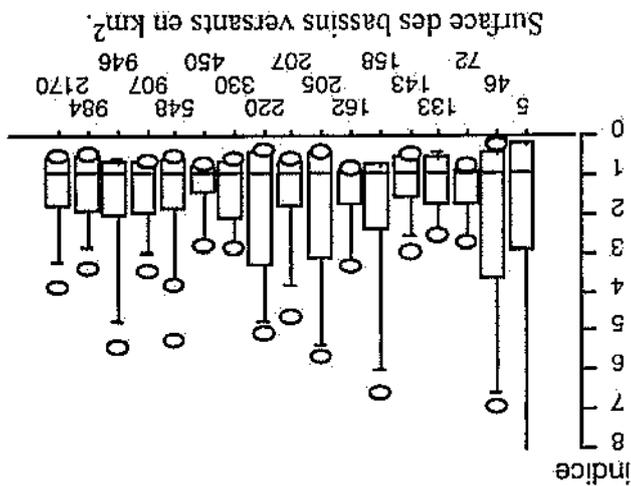


L'effet d'échelle spatiale n'est pas net pour ces régimes et ces surfaces. La dispersion des extrêmes observés pour chaque station est sensiblement la même pour tous ces bassins versants.

8.5.2 Régime nivo-pluvial et pluvio-nival.

au régime nival.

Figure 8.5.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion du régime glaciaire



En hautes eaux, l'indice mensuel de distorsion dépend fortement des bassins versants, pour des surfaces inférieures à 4 000 km².

8.6.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux (janvier à avril).

L'effet d'échelle spatiale est représenté pour l'ensemble des bassins versants et pour les surfaces inférieures à 10 000 km².

Comme pour les indices A et B, l'effet d'échelle spatiale est recherché sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux puis en basses eaux qui est calculé comme la moyenne :

- des mois de janvier à avril pour les hautes eaux,
- des mois de juillet à octobre pour les basses eaux.

8.6 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion sur les 123 stations hydrométriques de la Loire.

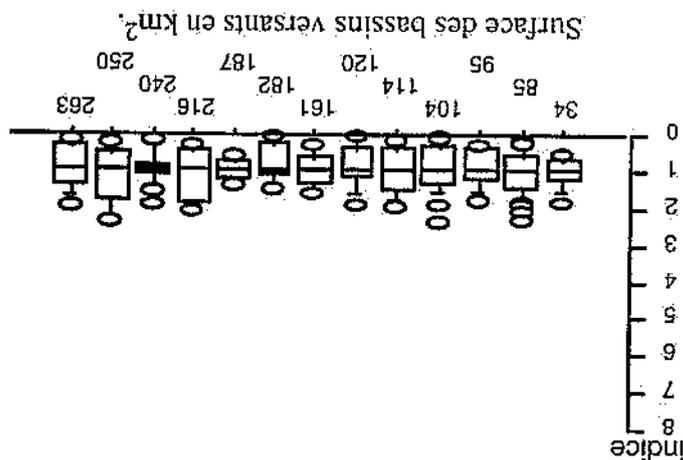
Cet effet est recherché sur de plus grands bassins versants dans le paragraphe suivant. L'indice mensuel de distorsion est également lié au bassin versant, pour des surfaces inférieures à 2 000 km².

L'effet d'échelle spatiale n'est pas net sur l'indice mensuel de distorsion car la surface des bassins versants utilisés est trop petite. Seuls les maxima de l'indice mensuel de distorsion décroissent avec la surface, pour des bassins versants de plusieurs centaines de km². Les caractéristiques du bassin versant dominant l'effet d'échelle spatiale pour de telles surfaces.

8.5.4 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion.

Les surfaces considérées sont trop faibles pour percevoir un effet d'échelle spatiale sur cet indice. Cette fois, le régime cévenol, représenté par les trois plus grandes stations, ne se distingue pas du régime pluvial sans influence cévenole.

Figure 8.5.3 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en régime pluvial.



En basses eaux, l'indice mensuel de distorsion est compris entre 0 et 0,8. Pour des surfaces inférieures à 10 000 km², il dépend beaucoup du bassin versant. Par contre, il tend vers 0,5 pour des bassins versants d'une taille supérieure à 30 000 km², à cause de l'effet d'échelle spatiale et des barrages qui soutiennent les étiages. Les grands bassins versants ont une position intermédiaire par rapport aux petits bassins versants.

8.6.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux.

En hautes eaux, l'indice mensuel de distorsion dépend fortement du bassin versant pour des surfaces inférieures à 4 000 km². Il tend vers deux pour des surfaces supérieures. Dans les deux cas, les modèles sont inexploitable. L'effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion ne se modélise pas sur cet échantillon de bassins versants.

$$\text{Indice mensuel} = (-5,406 \cdot 10^{-5} \pm 3,28 \cdot 10^{-5}) \cdot S + 2,27 \pm 0,0898 \text{ avec } R^2 = 0,02.$$

- pour un modèle linéaire.

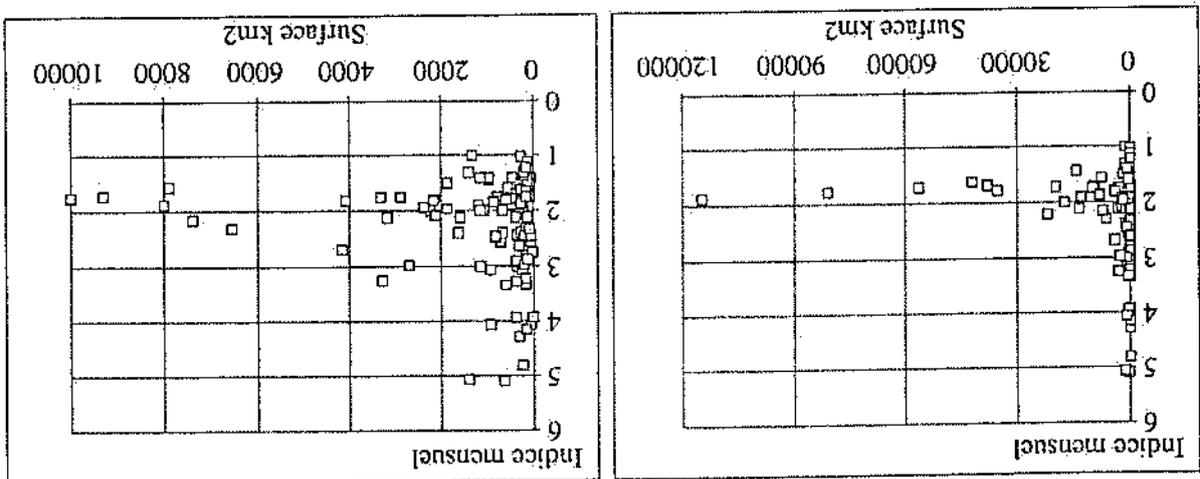
$$\text{Indice mensuel} = e^{(0,898 \pm 0,145) \cdot S(-0,027 \pm 0,022)} \text{ avec } R^2 = 0,01 \text{ et un } \sigma \text{ des résidus selon l'indice mensuel de } 1,399.$$

- pour un modèle multiplicatif.

La relation entre l'indice mensuel de distorsion et la surface est la suivante :

Cet indice varie de 1 à 5 selon les bassins versants. Cet indice tend vers 2 pour les grands bassins versants, jusqu'à 115 000 km².

Figure 8.6.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux (janvier à avril).



Dans les deux cas, les modèles sont inexplorables. En basses eaux, l'indice mensuel de distorsion est très dépendant du bassin versant pour des surfaces inférieures à 4 000 km². Il tend vers 0,5 des surfaces supérieures.

Indice mensuel = $(-6,202 \cdot 10^{-7} \pm 1,78 \cdot 10^{-5}) \cdot S + 0,428 \pm 0,048$ avec $R^2 = 0,00$ et un σ des résidus selon A de 0,45.

- pour un modèle linéaire.

Indice mensuel = $e^{(0,225 \pm 1,23) \cdot S(0,077 \pm 0,032)}$ avec $R^2 = 0,05$ et un σ des résidus selon A de 0,486.

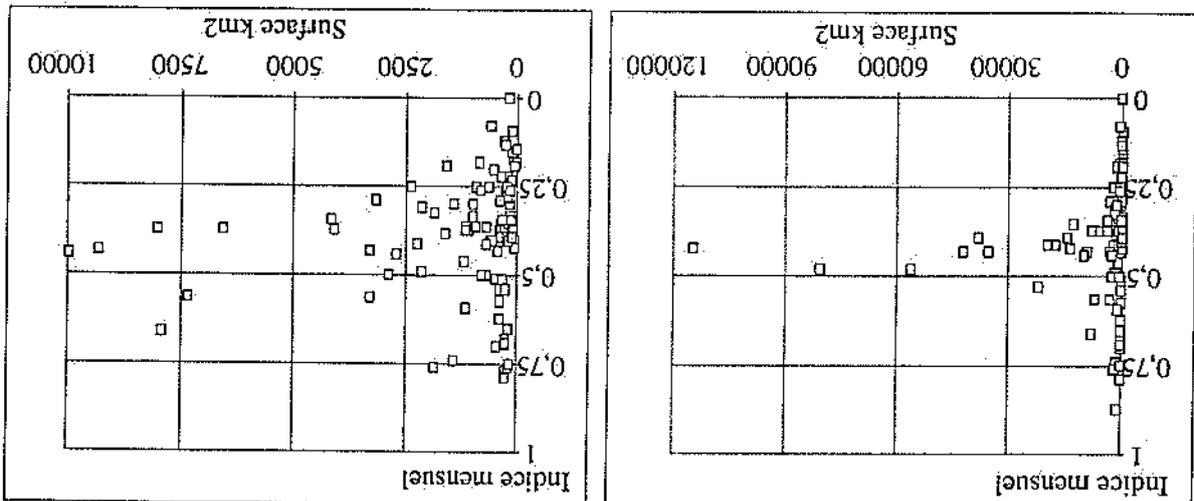
- pour un modèle multiplicatif.

suites :

Les relations entre indice mensuel de distorsion et la surface des bassins versants sont les

(juillet à octobre).

Figure 8.6.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux



À présent, nous passons au chapitre 9 où une cohérence spatiale de la VH est recherchée sur le bassin versant de la Loire. La cohérence spatiale est recherchée sur de grandes régions hydrologiques, définies par ailleurs, essentiellement à l'aide du climat, du relief et de la géologie.

Enfin, si la VH est le seul facteur expliquant le nombre d'espèces piscicoles, ce nombre devrait être très dépendant du cours d'eau pour des surfaces inférieures à quelques milliers de kilomètres carrés. Pourtant, le nombre d'espèces augmente avec la surface (Changaux et Pont, 1994). La richesse piscicole ne dépend donc pas que de la seule VH. D'autres facteurs sont à considérer.

À terme, il est intéressant de corréler la richesse spécifique en espèces à l'échelle d'un grand bassin versant à la VH qui limite la diversité piscicole. Dans le cas du bassin versant du Rhône, la surface des bassins versants d'une surface comprise entre 1 000 et 2 000 km² représente 40% de la surface totale du bassin versant.

L'effet du régime, de la géologie, du climat... n'est pas négligeable, même pour des surfaces de plusieurs dizaines de milliers de km². L'effet d'échelle spatiale ne peut pas être modélisé pour tous les bassins versants à partir de ces exemples.

L'indice mensuel de distorsion est voisin de 2 en hautes eaux et de 0,5 en basses eaux sur le linéaire de la Loire, pour des surfaces supérieures à 30 000 km². Pour des surfaces inférieures à 4 000 km², il est très dépendant du bassin versant.

La VH, la VHP et l'indice mensuel de distorsion dépendent fortement du bassin versant pour des surfaces inférieures à quelques milliers de km². Pour de plus grands bassins versants, l'effet d'échelle spatiale tempère la VH, mais elle dépend encore du bassin versant considéré.

- un échantillon de 123 stations situées sur le bassin versant de la Loire, d'une surface allant de 33 à 115 000 km². Pour les bassins versants d'une surface inférieure à quelques milliers de km², la VH est fortement corrélée au bassin versant.

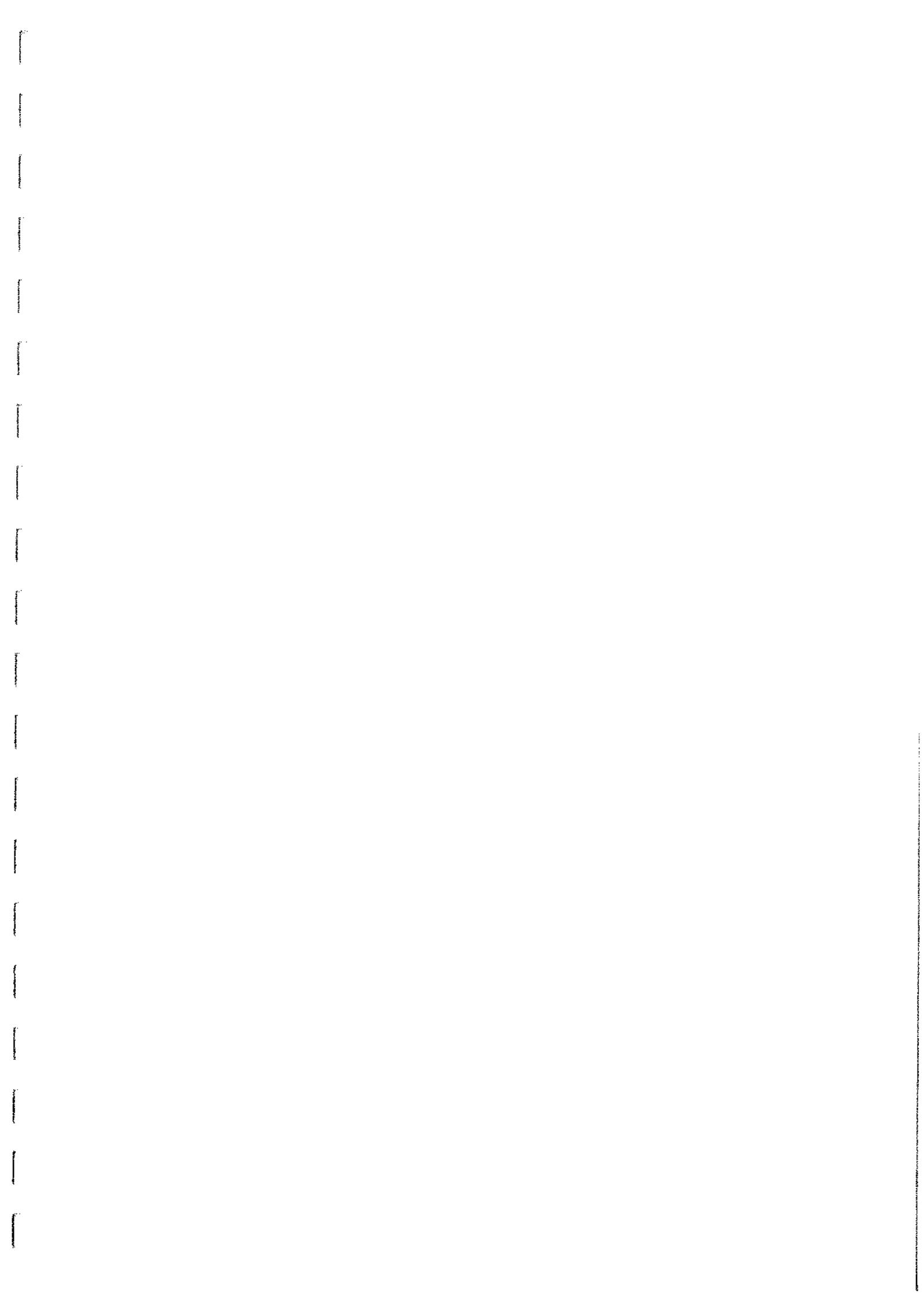
- le linéaire du Rhône et de la Loire, où il existe un effet d'échelle spatiale en hautes et basses eaux. Cet effet est différent selon le bassin versant, le rôle des facteurs physiques n'est pas négligeable. Le Rhône présente une VH plus importante que la Loire à surface égale mais il présente un régime complexe.

- 4 bassins versants emboîtés sur la Durance, pour lesquels l'effet d'échelle spatiale n'est pas net car le plus grand bassin versant n'a qu'une surface de 2 170 km².

- les 55 stations de référence, pour lesquelles l'effet d'échelle spatiale n'est pas perceptible, sauf pour la VHP maximale, du régime glaciaire au régime nival.

L'effet d'échelle spatiale sur la VH a été recherché avec :

8.7 Conclusion sur l'effet d'échelle spatiale sur la VH.



Enfin, l'effet de la géologie et du débit spécifique sur la VH est testé. La géologie et le débit spécifique cartographient bien. De plus, grâce au Système d'Information Géographique de la Loire, le gradex des pluies journalières, la pluie annuelle PA, l'altitude par maille et un indice de relief ont été calculés pour les bassins versants d'une surface inférieure à 3 000 km². Cela permettra de préciser la ou les variables qui influencent la VH, avec des régressions linéaires multiples. Les données du SIG Loire avec une maille kilométrique ne sont disponibles que depuis quelques mois, ce qui n'a pas permis d'approfondir la régionalisation de la VH ni d'en établir des cartes.

Dans ce chapitre, des éléments de régionalisation de la VH sont recherchés. Ce sont :

- la comparaison de la VH entre hydro-écotéion, en hautes et basses eaux,
- la comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-écotéion,
- la comparaison des débits médians entre hydro-écotéion. En effet, les débits médians représentent les débits fréquents.

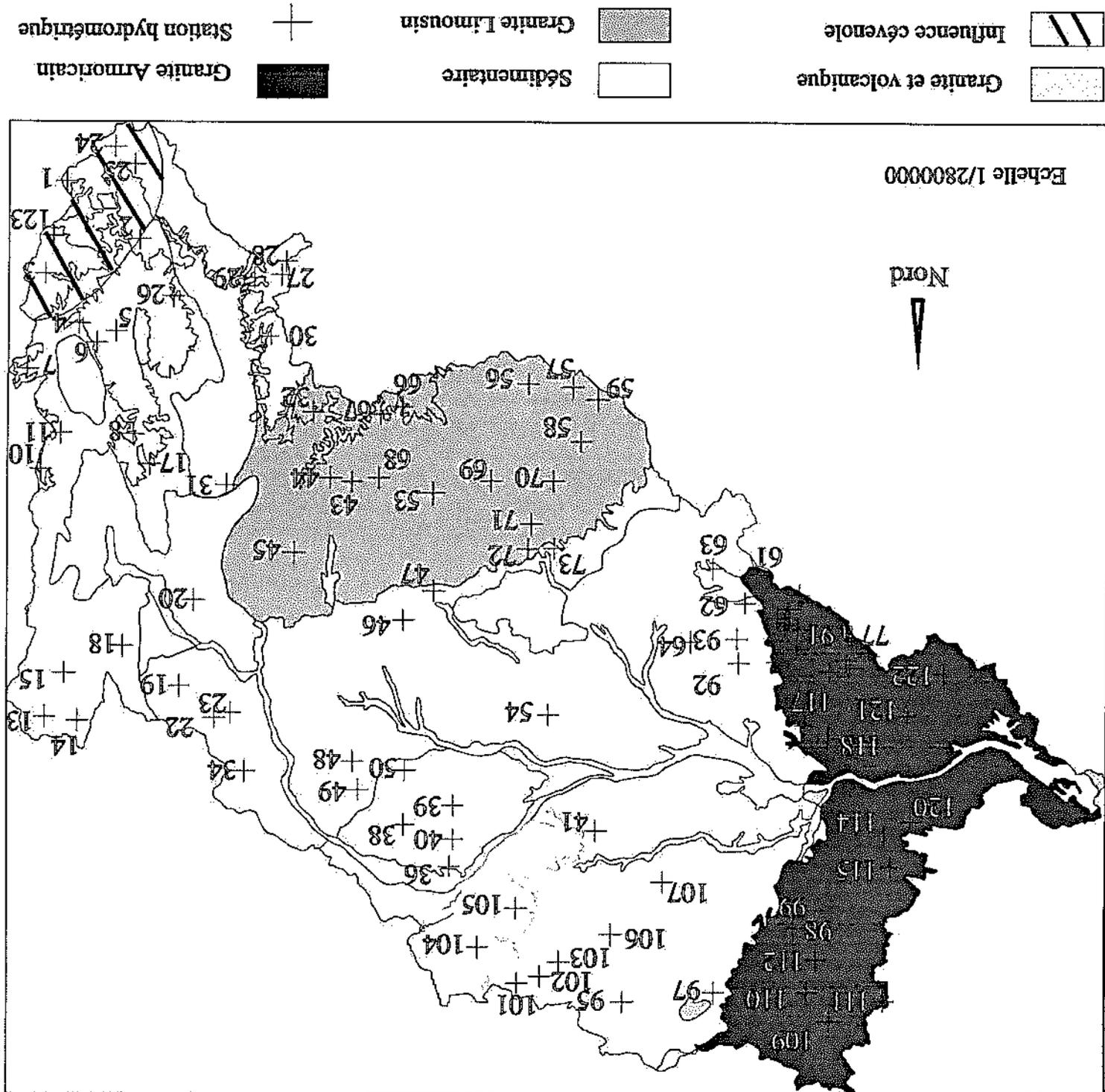
Le bassin versant de la Loire couvre 115 000 km². Il est situé entièrement en France. Le régime d'écoulement dominant est le régime pluvial, avec une influence océanique de plus en plus marquée de l'amont vers l'aval. L'influence nivale sur les débits moyens mensuels se limite à quelques bassins versants à l'amont de la Loire, comme la Loire à RIEUTORD (62 km²) ou l'Allier à LAVALLETTE (394 km²).

La pertinence des hydro-écotéions pour exprimer le fonctionnement écologique des systèmes d'eaux courantes nécessite de vérifier leur homogénéité pour certains descripteurs hydrologiques. Parmi ceux-ci, il est souhaitable d'inclure les variables écohydrologiques développées au cours de ce travail. Selon le degré d'homogénéité de nos descripteurs dans ces hydro-écotéions, ils pourraient être retenus comme variables de régionalisation. La régionalisation de la VH sur la Loire fait l'objet d'un rapport préliminaire (Ivot et *all.*, 1995).

Dans le cadre d'une convention entre le Ministère de l'Environnement et différents organismes, le bassin versant de la Loire a fait l'objet d'un découpage en hydro-écotéions. L'objectif est d'intégrer à terme cette information dans les critères devant aboutir à la vocation future des rivières de ce bassin, ceci dans la logique des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE).

Chapitre 9 - Liaison entre les caractéristiques de la VHT et de la VHP et le découpage en hydro-écotéions du bassin versant de la Loire

Figure 9.1.1 Carte des 4 grandes hydro-écorégions sur le bassin versant de la Loire et position des centres de gravité des bassins versants d'une surface inférieure à 3 000 km².



Ces données de débits ont été choisies au pas de temps journalier pour des raisons informatiques, compromis de finesse de temps et de disponibilité des données. De plus, le débit moyen journalier rend bien compte de la dynamique des écoulements pour des bassins

versants sont répartis sur tout le bassin de la Loire. En tout, 123 bassins versants ont été retenus, d'une surface allant de 300 à 110 000 km², dont les écoulements sont de préférence non-influencés par des aménagements. Les bassins

9.1.2 Choix des stations hydrométriques et du pas de temps des débits.

Les hydro-écorigions et les stations hydrométriques sont représentées sur la figure 9.1.1. Elles seront notées 1, 2, 3 et 4 respectivement sur les graphiques en boîte.

celui des régions granite et limousin. Elle est notée "armoricain".
modestes, le relief est plus marqué que celui de la région sédimentaire mais moins marqué que faibles que le granite limousin et des altitudes plus faibles. Bien que les altitudes soient hydro-écorigion repose également sur un socle granitique, mais avec des pluies annuelles plus Sevre Nantaise, la petite Maine, la Mayenne et une partie de la rive droite de la Sarthe. Cette - le Granite Armorican. Cette hydro-écorigion correspond au Layon, la

fortes. Elle est appelée "limousin".
granitique, elle a un climat de moyenne montagne et des contraintes de relief moyennes à assez Creuse, de la Gartempe et de la partie amont du Cher. Cette écorigion repose sur un socle - le Granite Limousin. Il s'agit de la Vienne à l'amont d'Ingrandes, de la

précipitations annuelles plus faibles que la précédente. Le relief est peu marqué.
"sédimentaire". Cette région repose sur des sédiments, elle a un climat de plaine et des également la Limagne et la plaine du Forez. Cette hydro-écorigion est appelée Loir, du Clain, de la partie aval de la Vienne et de la rive gauche de la Sarthe. Elle comprend - la partie du bassin versant de la Loire qui repose sur les sédiments. Il s'agit de la partie de la Loire à l'aval du Bec d'Allier, de la Sologne, du Cher, de l'Indre, du

relief marqué, elle a un climat de montagne.
le Livradois Forez. Elle est appelée écorigion "granite et volcanique". Cette région a un massifs granitiques et volcaniques du Cantal, des Monts Dore, du Velay, les Monts du Forez et d'effondrement exchues (Limagne, Plaine du Forez). Cette hydro-écorigion rassemble les - le haut du bassin versant de la Loire, à l'amont du Bec d'Allier, plaines

Les 4 grandes hydro-écorigions sur le bassin versant de la Loire sont :

écorigions.

9.1.1 Découpage du bassin versant de la Loire en 4 grandes hydro-

Le bassin versant de la Loire est divisé en 4 grandes hydro-écorigions. Ces hydro-écorigions ont été définies avec des variables rassemblées par les géographes de St Etienne et le laboratoire de "Biologie des écosystèmes aquatiques" du CEMAGREF de Lyon. Elles présentent une certaine homogénéité de relief, de géologie et de climat (Wasson *et al.*, 1993).

9.1 Méthode de travail.

La comparaison de la VHT et de la VHPF moyenne entre hydro-écocorégion a été effectuée avec l'ANOVA. La VH moyenne de chaque hydro-écocorégion a été comparée à celle des 3 autres hydro-écocorégions pour savoir si des différences de VH existent ou non entre hydro-écocorégion, au sens statistique du terme. La VH est mesurée avec les indices A et B et l'indice mensuel de distorsion. Les débits médians entre hydro-écocorégions sont également comparés car ils sont faciles d'accès et représentatifs des débits fréquents.

La VH moyenne par période atténue l'effet d'un mois particulier sur la comparaison de la VH. Elle correspond à des saisons de VH homogène. Les différences entre hydro-écocorégion en seront d'autant plus significatives.

- la période des basses eaux, qui va de juillet à octobre. La VH est la VH moyenne des mois de juillet, août, septembre et octobre.

- la période des hautes eaux, qui va de janvier à avril. La VH est la VH moyenne de janvier, février, mars et avril.

La VH entre hydro-écocorégions est comparée selon deux périodes :

9.2.1 Comparaison de la VHT et VHPF entre hydro-écocorégion.

La VH est mesurée avec l'indice A pour la VHPF et avec l'indice B pour la VHT.

9.2 Comparaison de la VH entre hydro-écocorégion.

Enfin, 8 stations hydrométriques ont une surface supérieure à 20 000 km², elles appartiennent souvent à plusieurs hydro-écocorégions.

- 26 stations en hydro-écocorégion granite et volcanique,
- 39 stations en hydro-écocorégion sédimentaire,
- 21 stations en hydro-écocorégion limousin,
- 29 stations en hydro-écocorégion armoricain,

La répartition des stations hydrométriques d'une surface inférieure à 20 000 km² est la suivante :

Tableau 9.1.2 Répartition des bassins versants par hydro-écocorégion et par surface.

Surface km ²	Granite et volcanique (1)	Sédimentaire (2)	Limousin (3)	Armoricain (4)
< 1 000	22	23	12	23
1 000 à 3 000	0	9	5	4
3 à 10 000	3	3	3	2
10 à 20 000	1	4	1	0

versants d'une surface de quelques centaines de km². Ces bassins versants se répartissent comme suit, par hydro-écocorégion et par surface :

En hautes eaux, deux groupes d'hydro-écotéions se distinguent :
 - l'hydro-écotéion sédimentaire présente la plus faible VH.
 - les 3 autres hydro-écotéions présentent une VH et une VHPF voisines. En hautes eaux, ces hydro-écotéions (granite et volcanique, limousin et armoricain) présentent une VH et une VHPF moyennes assez homogènes.

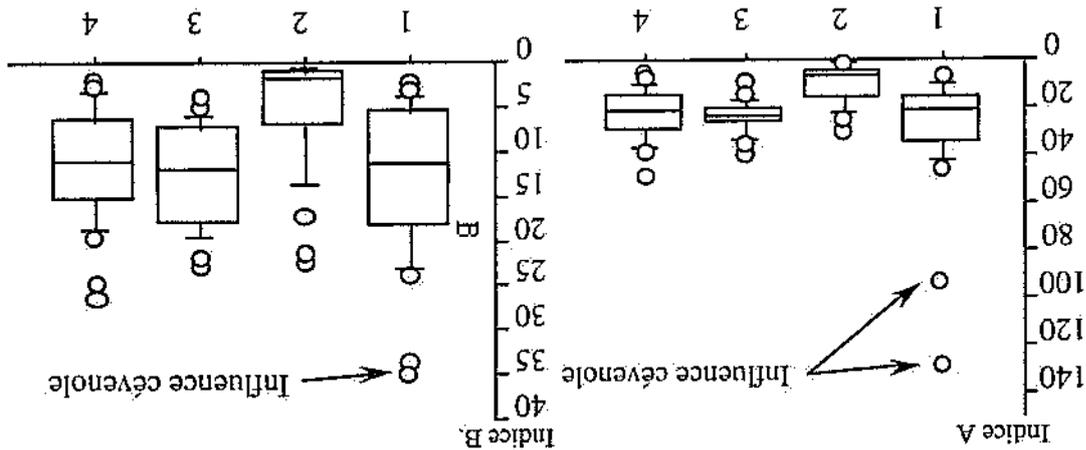
Tableau 9.2.1.1 Valeurs de P des comparaisons de la VH entre hydro-écotéion.

Comparaison des hydro-écotéions	Hautes eaux indice A	Hautes eaux indice B
Volcan et sédimentaire	0,0001	0,0001
Volcan et limousin	0,407	0,956
Volcan et armoricain	0,202	0,383
Sédimentaire et limousin	0,0001	<0,0001
Sédimentaire et armoricain	0,0001	0,0001
Limousin et armoricain	0,703	0,4396

Le tableau qui suit regroupe les valeurs de P, issues de l'ANOVA, où est comparée la VH des hydro-écotéions.

L'influence évenole est bien marquée (hydro-écotéion granite et volcanique) sur deux bassins versants (la Loire à RIEUTORD, 62 km² et l'Ailier à LAVALETTE 394 km²) qui présentent une VH très forte par rapport aux autres bassins versants.
 Les hydro-écotéions Limousin, Granite et Armoricain sont sur des substrats géologiques plus imperméables, d'où un ruissellement plus important, propice à générer des crues.

Figure 9.2.1.1 VHPF (A) et VHPF (B) par hydro-écotéion sur le bassin versant de la Loire de janvier à avril.



L'hydro-écotéion sédimentaire présente une VH plus faible que les 3 hydro-écotéions précédentes. La probabilité que l'hydro-écotéion sédimentaire ait la même moyenne que les autres hydro-écotéions est inférieure à 5%. Au sens statistique du terme, l'hydro-écotéion sédimentaire se distingue des 3 hydro-écotéions par une faible VH en période de hautes eaux, à cause de la perméabilité des sols qui tempère les crues et par le faible relief.

La VH et la VHPF sont assez homogènes entre les hydro-écotéions granite et volcanique, limousin et armoricain.

9.2.1.1 Comparaison de la VH en hautes eaux entre hydro-écotéions.

9.2.1.2 Comparaison de la VH en basses eaux entre hydro-écotopes

Cette période s'étend de juillet à octobre. C'est la période des étages, plus ou moins prononcés selon les lieux et les années.

Cette fois, les hydro-écotopes granité et volcanique et limousin ont une VH semblable et plus élevée que celle des hydro-écotopes sédimentaire et armoricain. Cela s'explique par :

- la géologie pour l'hydro-écotopes sédimentaire et armoricain,
- le granite armoricain reçoit moins de précipitations que les hydro-écotopes granité et volcanique et limousin alors que l'évaporation est plus forte en hydro-écotopes armoricain qu'en hydro-écotopes granité et volcanique et limousin, situés à des altitudes plus élevées.

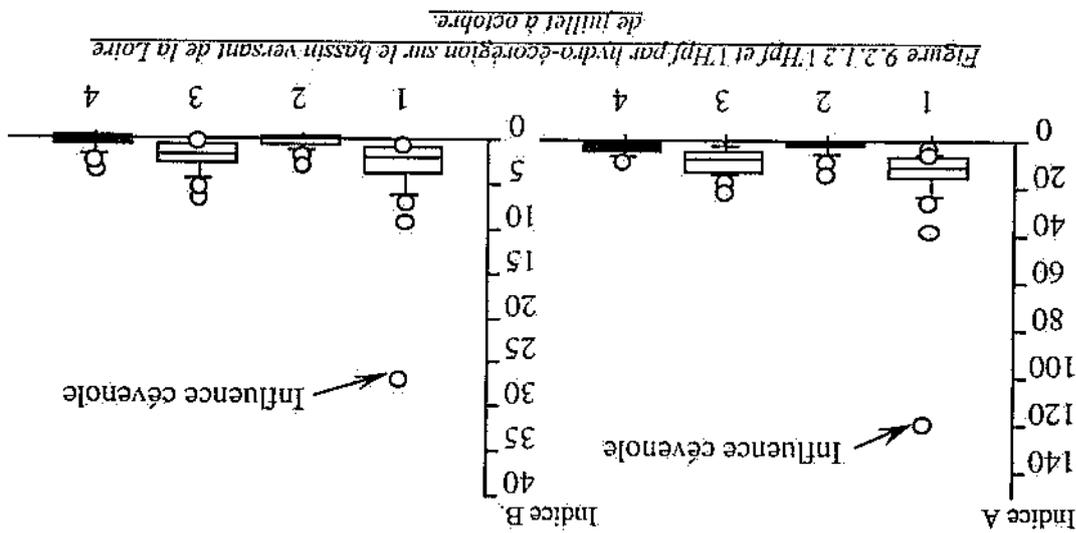


Figure 9.2.1.3 VHP et VHP par hydro-écotopes sur le bassin versant de la Loire de juillet à octobre.

La forte VH de l'hydro-écotopes granité et volcanique est liée à l'influence cénocle et au mois d'octobre qui est considéré, à tort, comme un mois de faible VH pour deux bassins versants (la Loire à RIEUTORD et l'Allier à LAVALLETTE).

Tableau 9.2.1.2 Valeurs de P des comparaisons des VH entre hydro-écotopes.

Comparaison des hydro-écotopes	Basses eaux	Indice A	Indice B
Volcan et sédimentaire	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Volcan et limousin	0,0134	0,0134	0,0813
Volcan et armoricain	0,0001	0,0001	< 0,0001
Sédimentaire et limousin	0,0174	0,0174	0,0074
Sédimentaire et armoricain	0,754	0,754	0,806
Limousin et armoricain	0,055	0,055	0,0244

En basses eaux, trois groupes d'hydro-écotopes sont définis. En VH croissante, nous avons :

- les hydro-écotopes sédimentaire et armoricain ont une VH moyenne semblable et faible ($P = 75\%$ pour la VHP et $P = 80\%$ pour la VH). L'hypothèse d'une même VH est retenue.
- l'hydro-écotopes limousin qui a une VH intermédiaire.
- l'hydro-écotopes granité et volcanique qui présente la plus forte VH moyenne, en partie à cause de l'influence cénocle.

9.2.1.3 Conclusion de la comparaison de la VH par hydro-écotone.

Divers groupes d'hydro-écotones sont définis selon les saisons (hautes ou basses eaux).

Les hydro-écotones granité et volcanique, limousin et armoricain présentent une VH assez homogène en hautes eaux. En basses eaux, l'hydro-écotone armoricain a une faible VH, comparable à celle de l'hydro-écotone sédimentaire.

L'hydro-écotone armoricain présente une VH forte en hautes eaux, comparable aux hydro-écotones granité et volcanique et limousin et une très faible VH en basses eaux (juillet à octobre). La VH évolue de façon importante sur cette hydro-écotone au cours de l'année.

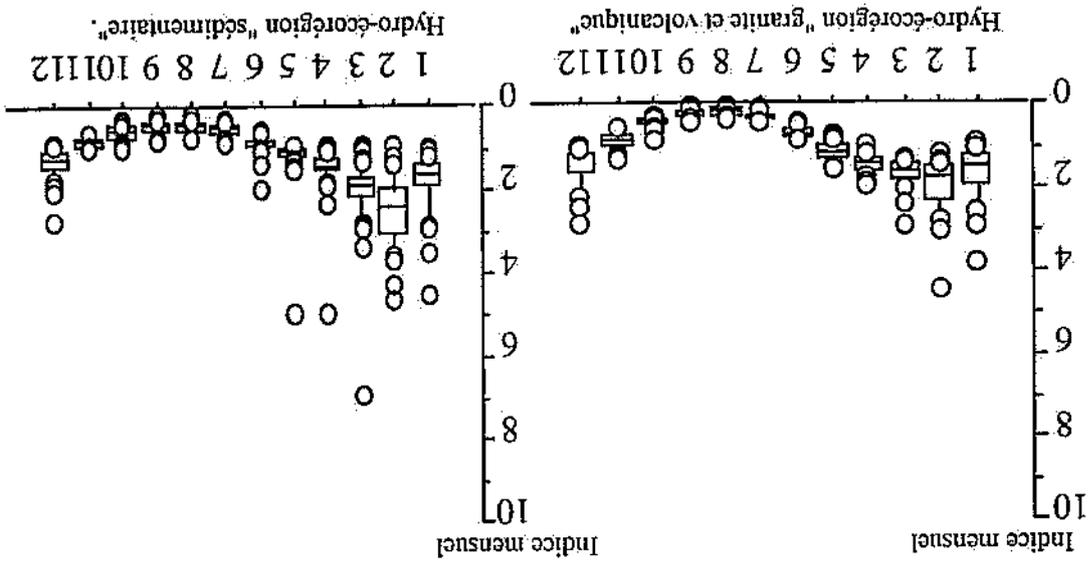
L'hydro-écotone sédimentaire présente une faible VH tout au long de l'année, à l'opposé des autres hydro-écotones. Enfin, l'influence cénomane est présente sur le bassin versant de la Loire. Elle ne concerne que deux bassins versants, situés en tête du bassin versant de la Loire.

9.2.2 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-écotone.

Cet indice vise à décrire l'évolution des débits médians au cours de l'année. C'est le rapport du débit médian mensuel inter-annuel et du débit médian annuel inter-annuel.

9.2.2.1 Evolution saisonnière de l'indice mensuel de distorsion selon l'hydro-écotone.

L'évolution saisonnière de l'indice mensuel de distorsion est un aperçu des extrêmes pris par cet indice au cours de l'année et de leur localisation dans le temps.



C'est l'hydro-écocorrection armoricain qui présente l'indice mensuel de distorsion le plus fort de janvier à avril. Les trois autres hydro-écocorrections présentent un indice voisin pour cette saison de l'année.

eaux

Comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-écocorrection en hautes

L'indice mensuel de distorsion moyen par hydro-écocorrection sera comparé à l'indice mensuel moyen des trois autres hydro-écocorrections.
La comparaison de l'indice mensuel de distorsion sera réalisée pour les mois de janvier à avril pour les hautes eaux et de juillet à octobre pour les basses eaux.

écocorrection.

9.2.2.2 Comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-

En basses eaux, ce rapport est plus fort sur les hydro-écocorrections granite et volcanique, sédimentaire et limousin que sur l'hydro-écocorrection armoricain, ce qui traduit des étages moins intenses.

Les trois autres hydro-écocorrections ont un indice mensuel de distorsion assez homogène. Les débits médians des hautes eaux s'écartent moins du débit médian inter-annuel que sur l'hydro-écocorrection armoricain.
assez faibles et de l'évaporation qui est assez élevée.

L'évolution saisonnière de l'indice mensuel de distorsion est importante sur l'hydro-écocorrection armoricain. Les débits fréquents de janvier à mars sont élevés par rapport à la médiane annuelle des débits. En février, la médiane de cet indice est de 4,2 alors qu'elle n'est que de 2 à 2,3 pour les autres hydro-écocorrections. L'été se caractérise par des débits médians très faibles, à cause des pluies qui sont assez faibles et de l'évaporation qui est assez élevée.

Pour toutes les hydro-écocorrections, l'indice mensuel de distorsion passe par son maximum en février, ce qui est logique pour un régime pluvial en climat tempéré. C'est en août et septembre qu'il passe par son minimum à cause de la sécheresse estivale qui limite les écoulements.

Figure 9.2.2.1 Indice mensuel de distorsion par hydro-écocorrection et par saisons mensuelles sur le bassin versant de la Loire.

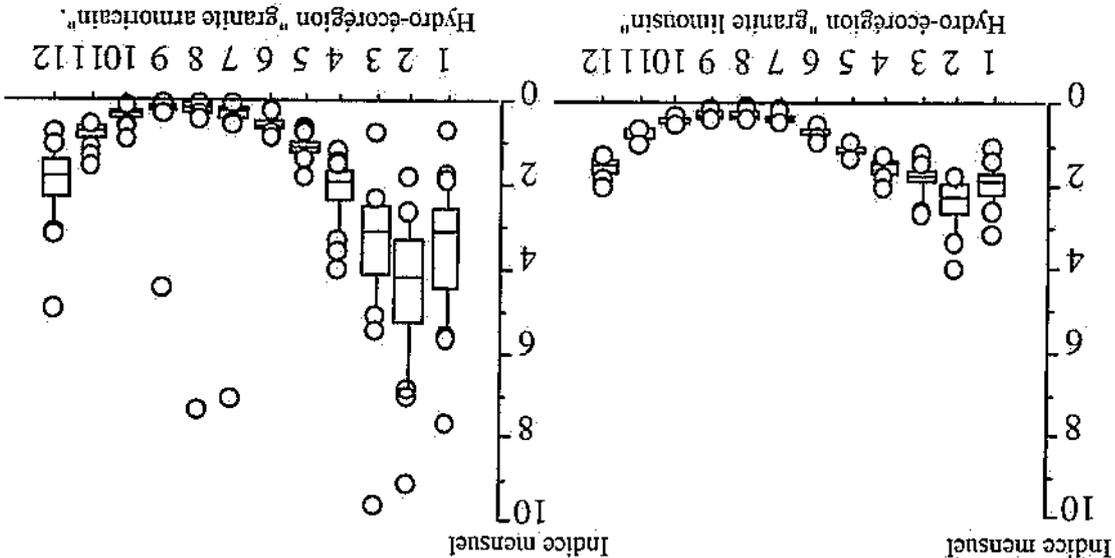
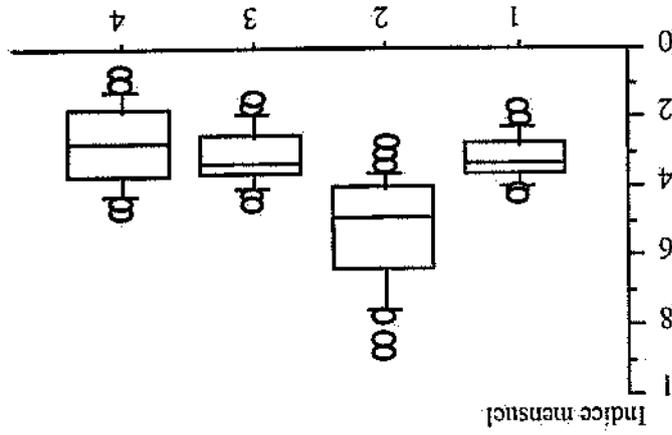


Figure 9.2.2.2 Indice mensuel de distorsion par hydro-écoulement de janvier à avril.



Cette période s'étend de juillet à octobre. En basses eaux, c'est l'hydro-écoulement sédimentaire qui présente l'indice mensuel de distorsion le plus élevé à cause du soutien d'étiage dû aux aquifères. Les trois autres hydro-écoulements présentent un indice mensuel de distorsion assez homogène.

aux.

Comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydro-écoulement en basses

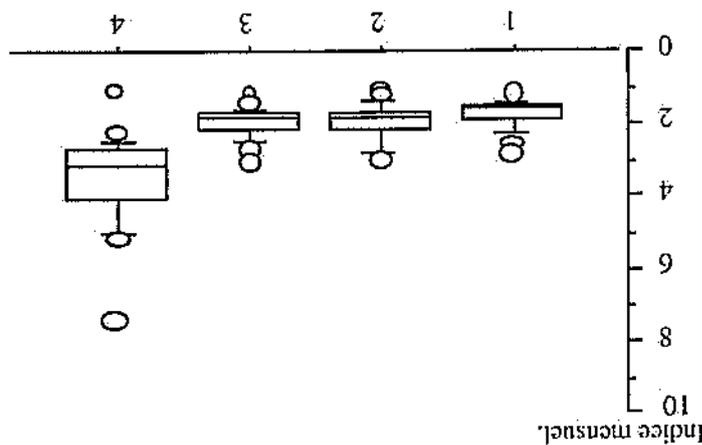
L'hydro-écoulement armoricain se distingue des autres hydro-écoulements par un fort indice mensuel de distorsion.

Tableau 9.2.2.2.1 Valeurs de P entre hydro-écoulement pour l'indice mensuel de distorsion.

Hydro-écoulements	P en hautes eaux
Volcanique et sédimentaire.	0,157
Volcanique et limousin.	0,509
Volcanique et armoricain.	< 0,0001
Sédimentaire et limousin.	0,5652
Sédimentaire et armoricain.	< 0,0001
Limousin et armoricain.	< 0,0001

Par contre, l'hydro-écoulement armoricain présente une forte dispersion de cet indice par rapport aux autres hydro-écoulements.

Figure 9.2.2.2.1 Indice mensuel de distorsion par hydro-écoulement de janvier à avril.



Les valeurs de P confirment ce qui est pressenti en figure précédente.

Hydro-écotopes	P en basses eaux
Volcanique et sédimentaire.	0,071
Volcanique et limousin.	0,96
Volcanique et armoricain.	0,32
Sédimentaire et limousin.	0,086
Sédimentaire et armoricain.	0,0473
Limousin et armoricain.	0,329

Tableau 9.2.2.2 Valeurs de P pour la comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydroécotopes.

Deux groupes d'hydro-écotopes peuvent être constitués :
 - l'hydro-écotopie sédimentaire présente un fort indice mensuel de distorsion en basses eaux.
 - les trois autres hydro-écotopes présentent un indice mensuel de distorsion comparable.

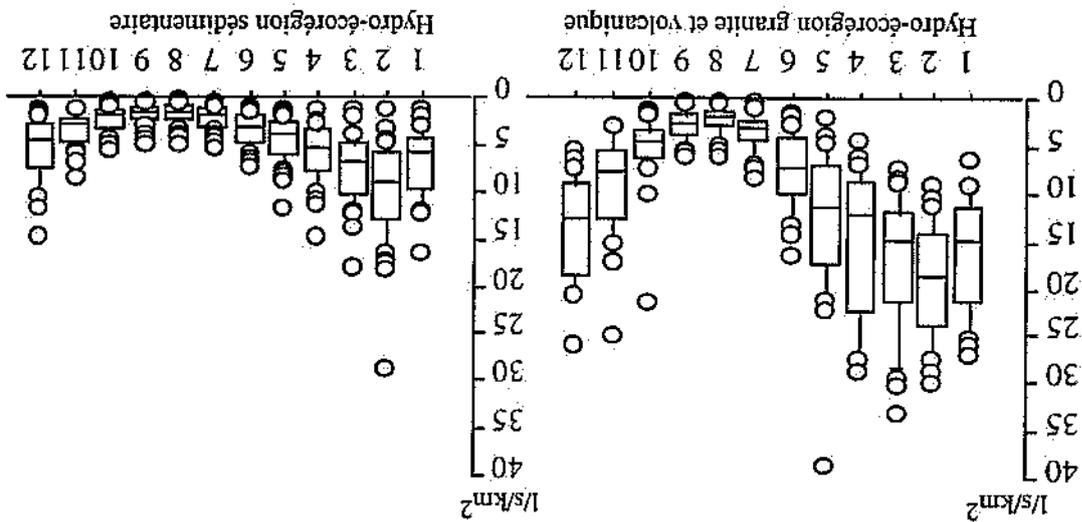
L'hydro-écotopie sédimentaire présente une faible évolution de l'indice mensuel de distorsion au cours de l'année alors que l'hydro-écotopie armoricain a une forte évolution de cet indice. Les hydro-écotopes limousin et volcanique sont dans une situation intermédiaire.

9.2.3 Comparaison des débits médians mensuels entre hydro-écotopes.

Le débit médian mensuel représente les débits fréquents car la dispersion des débits autour du débit médian est faible (paragraphe 2.1.2).

9.2.3.1 Description sommaire des débits médians saisonniers par hydro-écotopie.

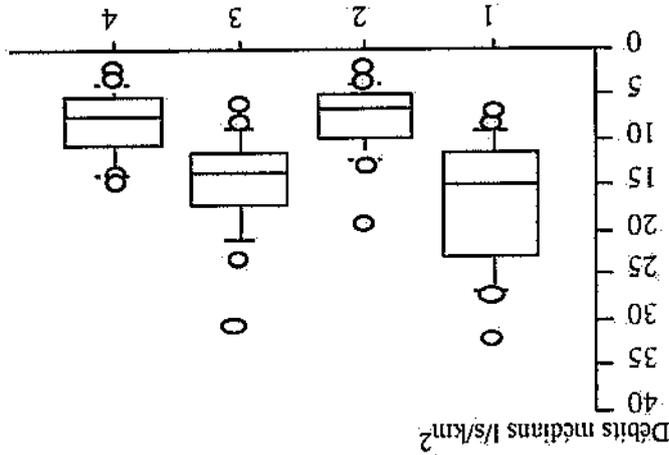
L'avantage de travailler avec les débits médians par rapport à l'indice mensuel de distorsion est de ne pas travailler avec un rapport qui dépend du débit médian inter-annuel. Les débits médians ont été calculés en débits spécifiques pour être comparables d'un bassin versant à l'autre (l/s/km²).



Les débits médians sont élevés de janvier à avril sur l'hydro-écocorégon granité et volcanique mais ils sont très liés au bassin versant. La médiane des débits médians en hautes eaux est de 15 l/s/km² pour cette hydro-écocorégon.

Pour l'hydro-écocorégon limousin, la médiane des débits médians est de 14 l/s/km², elle est assez élevée par rapport aux hydro-écocorégons sédimentaire et armoricain.

Figure 9.2.3.2 Débits médians par hydro-écocorégon de janvier à avril sur le bassin versant de la Loire.



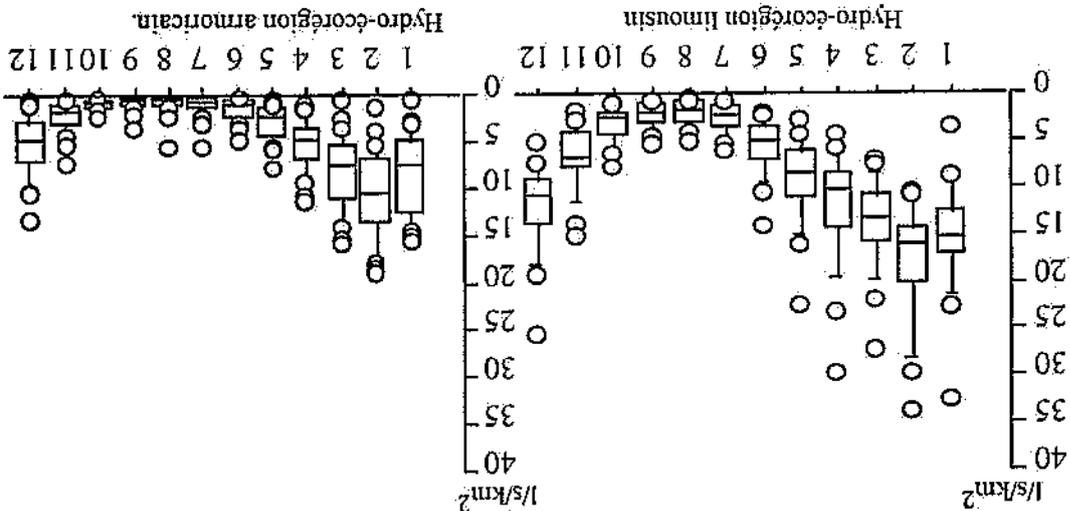
Cette période s'étend de janvier à avril.

9.2.3.2 Comparaison des débits médians en hautes eaux entre hydro-écocorégon.

Dans l'hydro-écocorégon granité et volcanique, les médianes d'août se maintiennent aux alentours de 2 l/s/km² et remontent dès le mois de septembre. Dans l'hydro-écocorégon armoricain, les débits médians mensuels de juillet et août sont très faibles, inférieurs à 1 l/s/km². Les débits médians remontent sensiblement qu'en novembre. Ces faibles débits médians sont liés aux faibles étages de l'hydro-écocorégon 4. Ils sont marqués et prolongés, à la différence de ceux des autres hydro-écocorégons.

Les débits médians mensuels les plus élevés se produisent en février pour les 4 hydro-écocorégons, ce qui n'est pas étonnant pour des régimes essentiellement alimentés par les pluies. C'est en juillet et août que les débits médians mensuels sont les plus faibles.

Figure 9.2.3.1 Débits médians mensuels par hydro-écocorégon sur le bassin versant de la Loire.



Les hydro-écotones sédimentaire et armoricain présentent une médiane des débits médians en hautes eaux voisines, de 7 à 8 l/s/km². Ce sont les faibles précipitations qui expliquent ces faibles débits médians pour l'hydro-écotone armoricain et la recharge des aquifères sur l'hydro-écotone sédimentaire.

Tableau 9.2.3.2 Valeurs de P des comparaisons du débit médian en hautes eaux et du débit médian inter-annuel par hydro-écotone.

Hydro-écotones	P en hautes eaux	P des Médianes annuelles
Volcan et sédimentaire	< 0,0001	0,0001
Volcanique et limousin	0,1463	0,0133
Volcan et armoricain	< 0,0001	0,0001
Sédimentaire et limousin	< 0,0001	0,0001
Sédimentaire et armoricain	0,519	0,078
Limousin et armoricain	> 0,0001	0,0001

Deux groupes d'hydro-écotones se forment :

- les hydro-écotones granite et volcanique et limousin présentent les débits médians les plus forts, 15 l/s/km², avec P = 0,15,
- les hydro-écotones sédimentaire et armoricain. Elles ont des débits médians voisins de 7 l/s/km², avec P = 0,52.

En hautes eaux, les hydro-écotones sédimentaire et armoricain sont statistiquement différentes des hydro-écotones granite et volcanique (P < 0,0001).

9.2.3.3 Comparaison des débits médians entre hydro-écotones en basses eaux.

De juillet à septembre, les débits médians sont faibles, 2 à 3 l/s/km², sur les hydro-écotones granite et volcanique, sédimentaire et limousin.

L'hydro-écotone armoricain se distingue des autres hydro-écotones par des débits médians très faibles, inférieurs à 1 l/s/km². Les étiages sont donc prononcés sur l'hydro-écotone armoricain et ils se prolongent jusqu'en octobre inclus, à la différence des autres hydro-écotones.

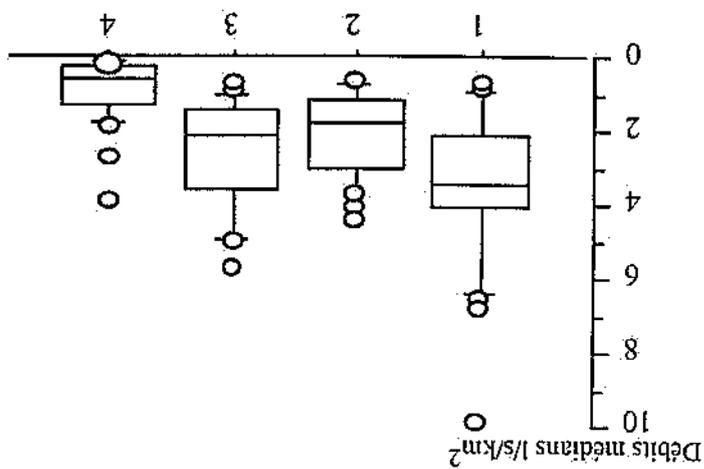


Figure 9.2.3.3 Débits médians en l/s/km² par hydro-écotone de juillet à octobre sur le bassin versant de la Loire.

Les facteurs disponibles sont au nombre de 12 et se répartissent de la façon suivante :

- les facteurs topographiques, comme la pente, le relief (écart-type des altitudes moyennes par maille kilométrique pour chaque bassin), les altitudes extrêmes de chaque bassin versant, et l'altitude moyenne.
- les facteurs climatiques, comme la pluie moyenne inter-annuelle, le gradex des pluies journalières moyen et maximal pour chaque bassin versant. Les données climatiques sont disponibles selon des mailles kilométriques.
- la surface topographique des bassins versants.

Les informations qui ont été recueillies pour les bassins d'une surface inférieure à 3 000 km² sont les suivantes (Breil et Malafosse, 1996):

A l'aide du Système d'Information Géographique Loire, diverses caractéristiques des bassins versants ont été récupérées. Le SIG Loire a des mailles carrées de 1 km de côté. Par contre, seuls les bassins versants d'une surface inférieure à 3 000 km² ont été digitalisés. En effet, c'est la surface à partir de laquelle l'effet d'échelle spatiale commence à dominer les caractéristiques des bassins versants. Le gradex des pluies journalières n'est pas calculable sur grands bassins versants à cause de l'effet d'échelle spatiale, avec les données disponibles. De plus grands bassins versants appartiennent souvent à plusieurs hydro-écotétons.

9.3 Recherche de l'effet de différentes caractéristiques des bassins versants sur la VH.

Les débits médians en basses eaux sont très faibles sur l'hydro-écotéon armoricain, les étiages sont marqués. Cette information est masquée par l'indice mensuel de distorsion qui est calculé avec la médiane annuelle qui est également plus faible sur l'hydro-écotéon armoricain que sur les autres hydro-écotétons.

En basses eaux, trois groupes d'hydro-écotétons se distinguent :

- l'hydro-écotéon granite et volcanique présente le débit médian le plus élevé (3,5 l/s/km²).
- les hydro-écotétons sédimentaire et limousin présentent un débit médian voisin (2 l/s/km²) mais ce groupe n'est pas très homogène car $P = 0,17$.
- l'hydro-écotéon armoricain présente un faible débit médian (< 1 l/s/km²) est statistiquement différent des autres hydro-écotétons. En effet, cette hydro-écotéon est située sur un substrat peu favorable aux aquifères en région de plaine où les précipitations sont faibles et l'évaporation est forte.

Tableau 9.2.3.3 Valeurs de P des comparaisons du débit médian en basses eaux et du débit médian inter-annuel entre hydro-écotéon

Hydro-écotétons	P en basses eaux	P de la médiane annuelle
Volcan et sédimentaire	< 0,0001	0,0001
Volcanique et limousin	0,0293	0,0133
Volcan et armoricain	0,0001	0,0001
Sédimentaire et limousin	0,17	0,0001
Sédimentaire et armoricain	0,006	0,078
Limousin et armoricain	0,0001	0,0001

Les valeurs de P proposées par l'ANOVA sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

- des facteurs de ruissellement, comme la géologie, la présence ou non d'aquifères et les débits spécifiques inter-annuels d'été et d'hiver.

En premier lieu, des relations entre la VH et les premiers facteurs disponibles supposés explicatifs sont recherchées. Ces facteurs sont la géologie, le débit spécifique et la surface. Depuis, les autres facteurs sont disponibles et font l'objet de régressions linéaires multiples, avec les premiers facteurs explicatifs au paragraphe 9.3.5.

9.3.1 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPF en hautes et basses eaux.

La géologie est celle publiée par le BRGM en 1980. Elle sera notée avec un indice qui varie de 0 (substrat imperméable, comme le granite) à 100 (substrat perméable, comme le sédimentaire). Lorsque les substrats imperméables et perméables représentent une part plus ou moins importante du bassin versant, l'indice est compris entre 0 et 100. Ainsi, la géologie d'un bassin versant situé à 40% sur une zone granitique ou schisteuse mais à 60% sur une zone sédimentaire sera affecté d'un indice 60. Cet indice ne distingue pas le sable de l'argile, bien qu'ayant des comportements hydrologiques différents. C'est un inconvénient important.

La recherche de l'effet de la géologie sur la VH se fera par catégorie de bassins versants, qui sont :

- tous les bassins versants,
- les bassins versants d'une surface inférieure à 1 000 km², pour réduire l'effet d'échelle spatiale,
- les bassins versants d'une surface inférieure à 1 000 km² sans le cénovol pour la VHPF, pour s'affranchir de la forte VHPF observée sur deux bassins versants.

9.3.1.1 Effet de la géologie sur la VH en hautes eaux.

L'effet de la géologie sur la VH n'est pas net en hautes eaux. Pour une géologie donnée, la VH est très variable.

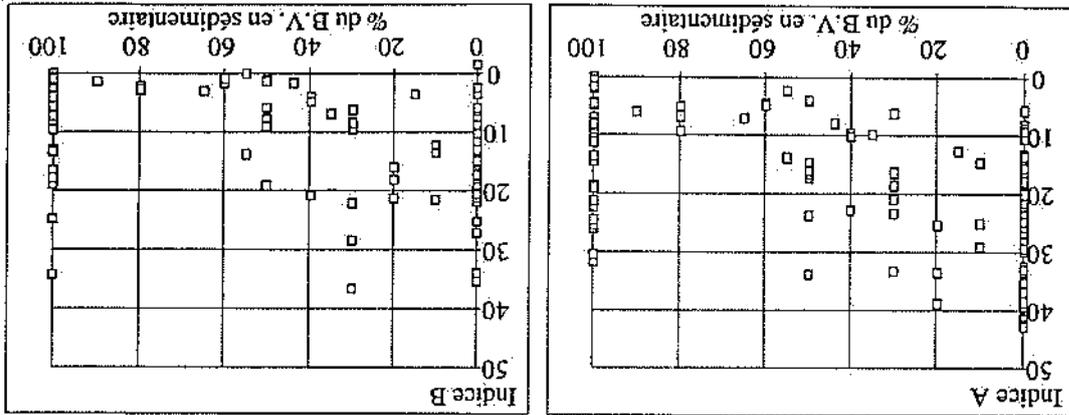


Figure 9.3.1.1 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPF en hautes eaux.

Les corrélations qui lient la VHF ou la VHPF avec la géologie sont les suivantes :

Indice A ou B = C * géologie + D avec le coefficient de détermination R² et l'écart-type σ des résidus selon l'indice A ou B.

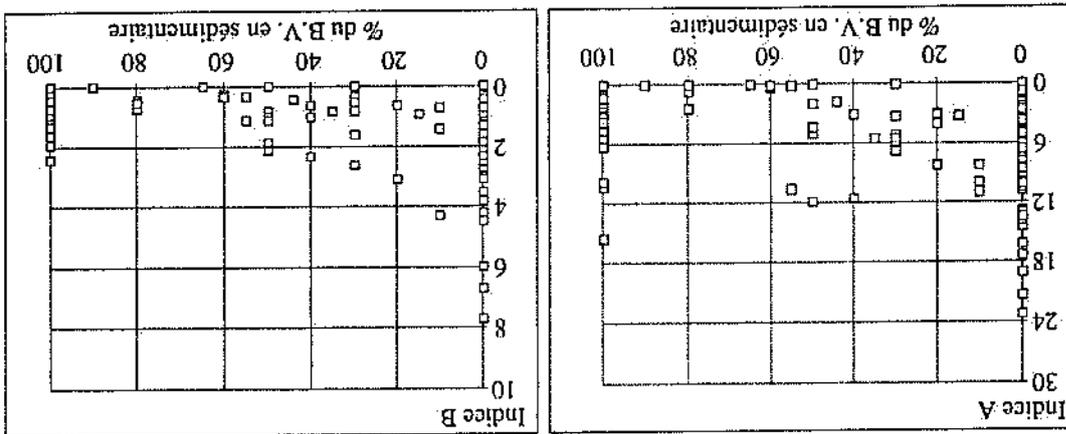
Les corrélations entre la géologie et la VH sont inutiles. Les coefficients de détermination sont très faibles. La géologie ne suffit pas à expliquer la VH en hautes eaux. L'effet de la géologie sur la VH n'est pas net en basses eaux. Pour une géologie donnée, la VH est très variable.

Tableau 9.3.1.1 Effet de la géologie sur la VHT et sur la VHP par catégorie de bassins versants en hautes eaux.

Indice A	Indice C	Indice D	R ²	σ résidus
Tous B.V.	-0,164	26,9	0,14	17,6
< 1 000 km ²	-0,144	29,9	0,09	20,4
cévenol	-0,107	25,4	0,19	9,73
Indice B	Indice C	Indice D	R ²	σ résidus
Tous B.V.	-0,079	13,9	0,14	8,40
> 1 000 km ²	-0,053	14,7	0,06	9,4

Chapitre 9 - Liaison entre les caractéristiques de la VHT et de la VHP et le découpage en hydroécovégétation des bassins versants de la Loire

Figure 9.3.1.2 Effet de la géologie sur la VHT et sur la VHP en basses eaux.



Les corrélations recherchées entre la géologie et la VH sont du même modèle qu'en hautes eaux.

Tableau 9.3.1.2 Effet de la géologie sur la VHT et sur la VHP par catégorie de bassins versants en basses eaux.

Indice A	Indice C	Indice D	R ²	σ résidus
Tous B.V.	-0,065	8,86	0,06	11,1
< 1 000 km ²	-0,053	9,70	0,03	13,4
sans cévenol	-0,051	8,33	0,12	6,19
Indice B	Indice C	Indice D	R ²	σ résidus
Tous B.V.	-0,017	2,21	0,07	2,74
> 1 000 km ²	-0,014	2,37	0,04	3,23

La géologie ne suffit pas à expliquer la VH. La VH dépend également d'autres facteurs, comme le relief ou le climat.

9.3.2 Corrélation entre le débit spécifique et la VH en hautes eaux.

Le débit spécifique est une donnée facile d'accès qui se cartographie plus ou moins bien. Les débits spécifiques et la VH sont des moyennes sur les mois de janvier à avril.

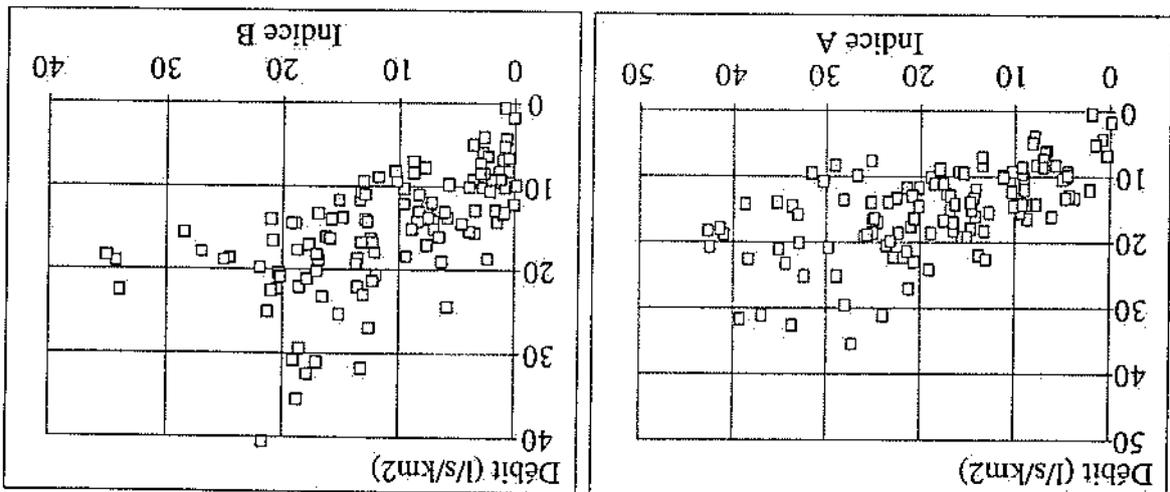


Figure 9.3.1 Comparaison entre le débit spécifique et la VH.

Les corrélations entre les indices A et B et le débit spécifique sont les suivantes :

Pour les 123 stations :

Indice A = $1,47 \pm 0,12$ * (débit spécifique) - $2,97 \pm 2,11$

avec $R^2 = 0,55$ et l'écart-type des résidus selon A de 10,2.

Indice B = $0,692 \pm 0,073$ * (débit spécifique) + $0,613 \pm 1,28$

avec $R^2 = 0,43$ et l'écart-type des résidus selon B de 6,35.

Pour les 121 stations sans influence évenole et pour l'indice A :

Indice A = $0,975 \pm 0,12$ * (débit) + $3,84 \pm 1,94$

avec $R^2 = 0,37$ et l'écart-type des résidus selon y de 8,54.

Le débit spécifique expliqué en partie la VH. Cependant, la VH ne peut pas être déduite à partir du débit spécifique.

9.3.3 Corrélation entre la VH, la géologie, le débit spécifique et la surface.

La corrélation entre la VH, la géologie, le débit spécifique (débit) et la surface (surf) est appréciée avec une corrélation multiple pour la VHPf et la VHF, en hautes eaux. Une telle corrélation permettrait de déduire la VH à partir de ces trois informations. Elles sont de la forme :

Indice A = $11,34 \pm 2,70 - 0,059 \pm 0,02$ (géologie) + $0,705 \pm 0,134$ (débit) - $0,0027 \pm 0,0006$ (surf).

avec $R^2 = 0,48$.

La corrélation proposée entre la géologie et l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux est exploitable. La géologie à elle seule ne suffit pas à expliquer les différences observées entre bassins versants.

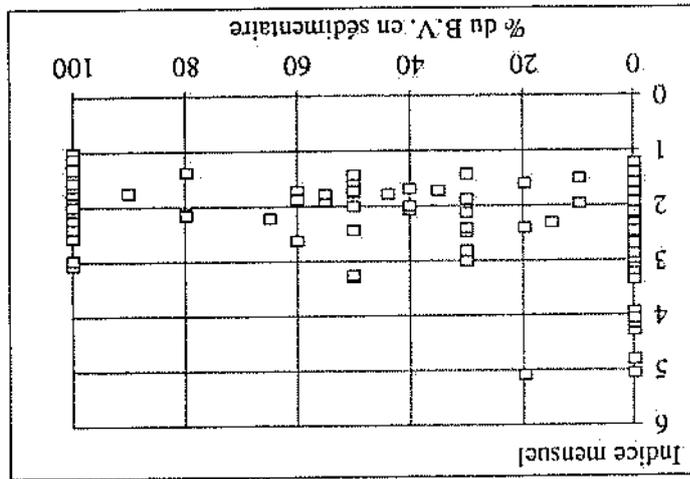
Indice mensuel = $-0,0017 * (\text{géologie}) + 2,49$
 avec $R^2 < 0,01$ et l'écart-type des résidus selon y de 1,42.

Pour les 80 bassins versants d'une surface inférieure à $1\ 000\ \text{km}^2$, la corrélation devient :

Indice mensuel = $-0,0036 * (\text{géologie}) + 2,44$
 avec $R^2 = 0,015$ et l'écart-type des résidus selon y de 1,23.

La corrélation entre l'indice mensuel de distorsion et la géologie est la suivante :

Figure 9.3.3.1 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux.



L'effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux n'est pas nul.

eaux (janvier à avril).

9.3.4.1 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en hautes

La géologie des bassins versants a été appréciée de la même façon pour l'indice mensuel de distorsion et les indices A et B. Pour réduire de l'effet d'échelle spatiale, nous considérons :

- tous les bassins versants, quelle que soit leur surface,
- les bassins versants d'une surface inférieure à $1\ 000\ \text{km}^2$.

9.3.4 Recherche de l'effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion.

Les corrélations multiples ne sont pas très bonnes, les coefficients de détermination sont voisins de 0,50. Les coefficients de détermination sont voisins de ceux obtenus avec les débits spécifiques. La connaissance de la géologie et de la surface n'améliore pas les modèles liant ces caractéristiques et la VH.

avec $R^2 = 0,49$.

Indice B = $3,49 \pm 1,77 - 0,026 \pm 0,015 (\text{géologie}) + 0,595 \pm 0,082 (\text{débit}) - 0,0018 \pm 0,0005 (\text{surf})$.

9.3.4.2 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux (juillet à octobre).

La figure suivante représente le lien entre la géologie et l'indice mensuel de distorsion en basses eaux.

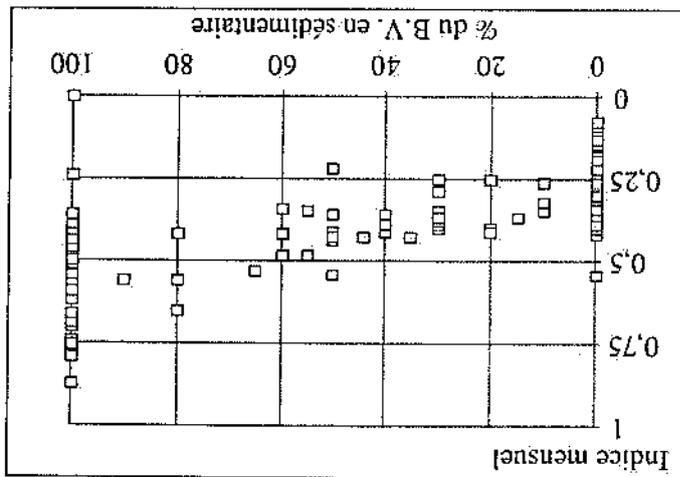


Figure 9.3.3.2 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux.

La corrélation entre l'indice mensuel de distorsion et la géologie est la suivante :

Indice mensuel = $0,0017 * (\text{géologie}) + 0,357$
avec $R^2 = 0,028$ et l'écart-type des résidus selon y de 0,44.

Pour les 80 bassins versants d'une surface inférieure à $1\ 000\ \text{km}^2$, la corrélation devient :

Indice mensuel = $0,0015 * (\text{géologie}) + 0,371$
avec $R^2 = 0,013$ et l'écart-type des résidus selon y de 0,534.

L'indice mensuel de distorsion et la géologie ne sont pas corrélés, tant en hautes qu'en basses eaux. Pour une géologie donnée, il dépend trop du bassin versant considéré.

9.3.5 Recherche de facteurs explicatifs de la VH.

La recherche des facteurs explicatifs de la VH est réalisée par hydro-écorégion. La période des hautes eaux (janvier à avril) est distinguée de la période des basses eaux (juillet à octobre). Les facteurs explicatifs sont recherchés à partir des régressions linéaires multiples pas à pas entre la VH et les caractéristiques des bassins versants. Ces régressions permettent de ne conserver que les variables qui contribuent, de manière indépendante, à expliquer une partie de la variance observée de l'échantillon des coefficients A et B. Les facteurs explicatifs sont classés par catégorie (physiques, climatiques, géologiques, et découlement).

Les facteurs les plus significatifs sont classés dans l'ordre d'importance. 1+ signifie que la corrélation est fortement positive alors que 1- signifie que la corrélation est fortement négative. Un 2+ indique que la corrélation est positive, mais moins que le 1+ (Breil et Malafosse, 1996).

9.3.5.1 Recherche de facteurs explicatifs de la VH en hautes eaux.

En hautes eaux, les variables significatives sont les indiquées dans le tableau 9.3.5.1 par des croix.

La même opération est répétée pour les mois de juillet à octobre. Le débit spécifique est le débit spécifique moyen des mois de juillet à octobre.

En basses eaux, la VH est assez fortement corrélée aux facteurs supposés comme explicatifs, sauf dans l'hydro-corrégion granite et volcanique. Le débit spécifique d'hiver apparaît comme facteur prépondérant dans 4 cas sur 8. Le débit spécifique de la période juillet à octobre n'est pas souvent corrélé à la VH qu'une seule fois sur 8. Les facteurs explicatifs changent considérablement d'une hydro-corrégion à l'autre. De plus, les corrélations sont mauvaises pour l'hydro-corrégion "granite et volcanique".

9.3.5.2 Recherche de facteurs explicatifs de la VH en basses eaux.

Les coefficients de détermination sont plus ou moins élevés selon les hydro-corrégions. La VH dépend de nombreux facteurs. Les facteurs qui influencent la VH dépendent beaucoup de l'hydro-corrégion considérée. C'est pour l'hydro-corrégion granite armoricain que la connaissance des facteurs explicatifs renseigne le mieux sur la VH.

Ce sont les variables d'écoulement comme le débit spécifique qui ressortent le plus souvent et qui expliquent la plus grande part de la variance des échantillons. Le débit spécifique d'hiver apparaît souvent comme facteur explicatif prépondérant. Il apparaît dans 5 cas sur 8 alors que le débit spécifique d'été apparaît comme facteur explicatif en région sédimentaire, en liaison avec la capacité de stockage en eau des aquifères.

Tableau 9.3.5.1 Variables influant la VH selon les hydro-corrégions en hautes eaux.

Variables	Indice A	Indice B	R ²	Nombre de stations								
Ecorrégions	Indice A	Indice B	0,70	20								
Granite et volcanique											0,77	20
Sédimentaire											0,51	27
Limousin											0,80	27
Granite armoricain											0,92	13
Altitude moyenne											0,89	13
Relief											0,58	14
Pente moyenne												
Altitudes extrêmes												
PA moyenne												
Gradex PJ												
Gradex maximal P												
Surface												
Nappe												
Géologie												
Q spécifique Hiver												
Q spécifique Été												

Ecoréions	Granite et volcanique		Sédimentaire		Limousin		Granite armoricain	
	Indice A	Indice B	Indice A	Indice B	Indice A	Indice B	Indice A	Indice B
Altitude moyenne		2+		4+			2+	1+
Relief		3-		4+				
Pente moyenne			3+		2-			
Altitudes extrêmes			2-					
PA moyenne		1+						
Gradex Pj								
Gradex maximal Pj								
Surface					2-			
Géologie								
Nappe							1-	
Q spécifique Hiver	1+		1+					
Q spécifique Eté						1+		
R ²	0,33	0,29	0,61	0,70	0,83	0,80	0,87	0,73
Nombre de stations	20	20	27	27	13	13	14	14

Tableau 9.3.5.2 Variables influant la TH selon les hydro-écocoréions en basses eaux.

Dans tous les cas, le gradex des pluies journalière n'apparaît pas, probablement à cause du gradex maximal observé pour chaque bassin versant. En effet, ces deux gradex sont fortement corrélés ($R^2 \equiv 0,66$).

Comme pour les hautes eaux, ce sont les variables liées aux écoulements qui expliquent au mieux la VH. En effet, le débit spécifique apparaît souvent comme le facteur explicatif le plus corré à la VH.

Cependant, les coefficients de détermination sont faibles en hydro-écocoréion granite et volcanique. Il n'est pas possible de régionaliser la VH sur cette hydro-écocoréion, l'imprécision du modèle est trop grande pour qu'il soit opérationnel.

Le débit spécifique est une donnée facile d'accès, et plus ou moins bien cartographiable. Il dépend en grande partie des précipitations annuelles mais aussi de la géologie. Dans le cas du bassin versant de la Loire, les débits spécifiques annuels sont très faibles (1 l/s/km^2) dans la Beauce, bien que les précipitations annuelles soient de 5 à 600 mm.

Enfin, la VH est plus ou moins corrélée aux variables d'écoulement, notamment au débit spécifique mais peu à la géologie ni à la surface. L'indice géologique utilisé dans ces recherches ne distingue pas les sables des argiles, c'est un inconvénient. D'autres facteurs interviennent dans la VH.

- l'hydro-écoulement armoricain présente une forte VH en période des hautes eaux mais une tendance saisonnière marquée des débits médians, de la VHF et de la VHP. Les écoulements subis par les écosystèmes changent beaucoup au cours du cycle hydrologique. La VH de cette hydro-écoulement est donc prévisible par contingence.

- les hydro-écoulements granitiques et volcaniques présentent une VH plus forte que l'hydro-écoulement sédimentaire en crue et des débits médians qui évoluent davantage au cours de l'année.

- l'hydro-écoulement sédimentaire est celle où la VH est la plus faible, tant en crue qu'en débits médians au cours du cycle hydrologique. L'évolution saisonnière de la VHF, de la VHP, des débits médians et de l'indice mensuel de distorsion est assez faible. La VH est donc prévisible par constance au cours des saisons.

Au point de vue contrainte hydrologique croissante, une première classification des hydro-écoulements peut être proposée :

L'hydro-écoulement armoricain se distingue des autres hydro-écoulements par :

- une VH voisine des hydro-écoulements granitiques et volcaniques, et limousin,
- des étiages plus prononcés et plus longs que ceux des autres hydro-écoulements. En effet, le soutien des étiages est faible car les aquifères sont peu nombreux et les pluies annuelles sont plus faibles que celles observées sur les hydro-écoulements granitiques et volcaniques et limousin.

Par contre, l'hydro-écoulement sédimentaire se distingue par :

- des étiages moins marqués et des débits médians de juillet à octobre plus forts que ceux de l'hydro-écoulement armoricain. Les débits médians de juillet à octobre sont assez proches de ceux qui sont observés sur les hydro-écoulements granitiques et volcaniques, et limousin, malgré des précipitations annuelles plus faibles. C'est le soutien des étiages par les aquifères qui explique cette différence.

Les hydro-écoulements granitiques et volcaniques et limousin présentent une VH, une distorsion mensuelle des débits et des débits médians mensuels semblables.

9.4 Conclusion sur les liaisons entre les caractéristiques de la VH et le découpage en hydro-écoulements sur le bassin versant de la Loire.

Enfin, la VH se régionalise plus ou moins bien selon le niveau de variance expliquée par les modèles. Au seuil de 50%, la VH se régionalise dans pratiquement tous les cas alors que les possibilités de régionalisation sont plus limitées si le seuil est choisi à 75%. Les possibilités de régionalisation dépendent donc du niveau de précision demandé.

En effet, la VH dépend de bien de facteurs non cartographiques, comme la forme des bassins versants. De plus, l'indice géologique utilisé dans ces recherches ne rend pas correctement compte de la perméabilité des sols car il ne distingue pas les argiles des sables par exemple.

D'autres facteurs pourraient être pris en compte, comme la surface boisée, les surfaces agricoles ou les terres labourables. Ces facteurs étaient disponibles, mais avec des mailles de 10×10 km soit 100 km^2 , ce qui est trop grand pour être opérationnel sur des bassins versants d'une surface voisine de quelques centaines de km^2 . En conséquence, ces facteurs n'ont pas été utilisés.

Conclusion de la partie III.

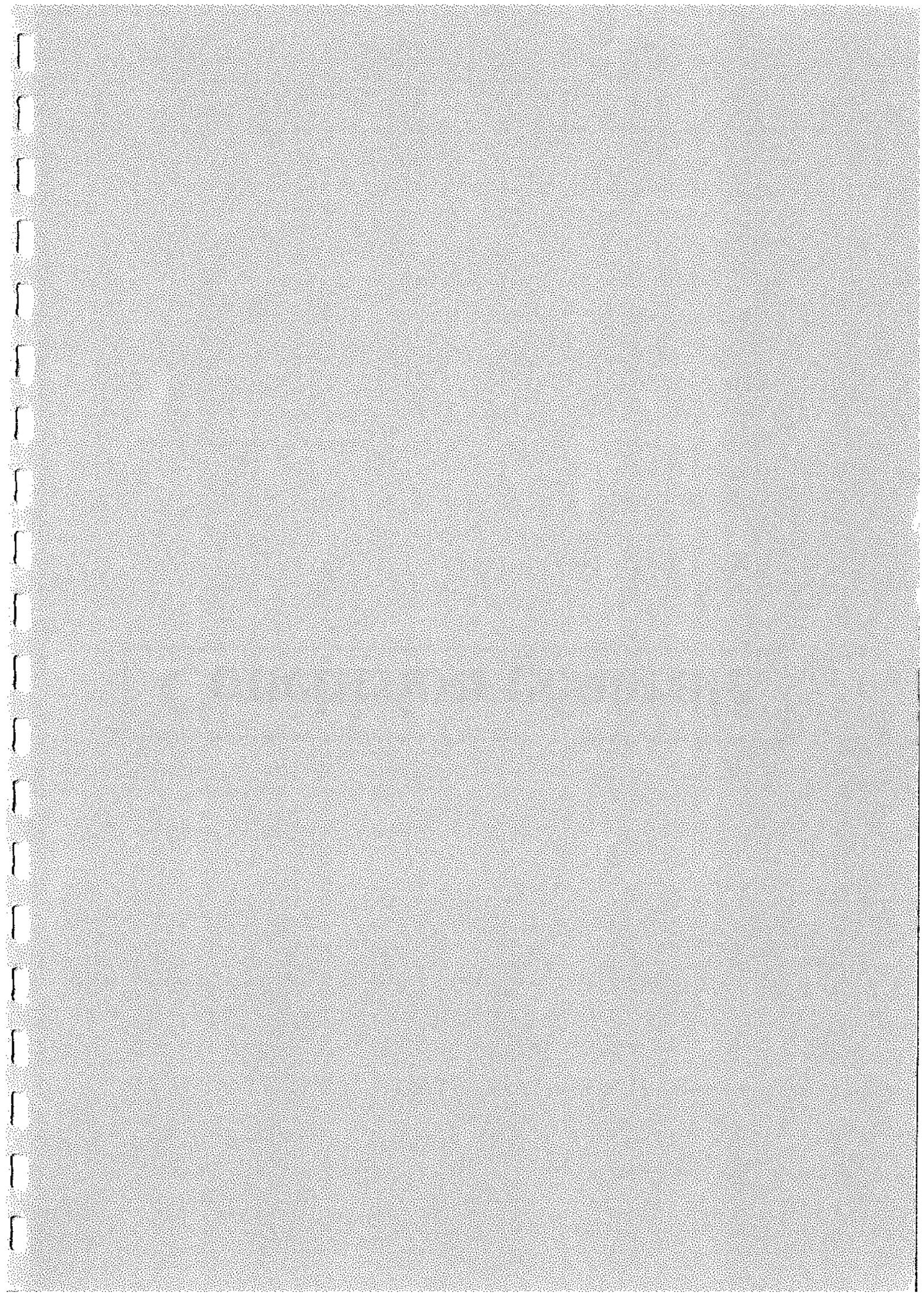
La partie III a été consacrée à la régionalisation de la VH, qui passe par la recherche de l'effet d'échelle spatiale. Cet effet est important pour des bassins versants d'une taille supérieure à 2 000 ou 3 000 km². Pour des surfaces intérieures, les caractéristiques de bassin comme la géologie, le relief ou la forme du bassin dominent l'effet d'échelle spatiale. Cependant, pour des bassins versants comme le Rhône ou la Loire, la VH n'est pas la même, à surface comparable. En effet, les caractéristiques de chaque bassin expliquent ces différences. Pour un bassin versant donné, la VH diminue d'amont en aval.

Pour le moment, des cartes de la VH n'ont pas été proposées sur le bassin versant de la Loire car les caractéristiques de bassin versant dont nous disposons ne permettent pas d'élaborer des modèles de VH fiables. Parmi les facteurs expliquant la VH, seul le débit spécifique permet de relier la VH à des caractéristiques de bassin de façon relativement fiable.

Par contre, la VH n'est pas la même selon les grandes hydro-écovégétations et elle n'évolue pas de la même façon au cours de l'année. Une classification des hydro-écovégétations a été proposée, selon une VH croissante. Les recherches de régionalisation de la VH à l'échelle de grands bassins versants comme la Loire ou le Rhône doivent être poursuivies.

La régionalisation de la VH est possible sur le bassin versant de la Loire, selon le niveau de précision souhaité, même avec les 12 variables disponibles et opérationnelles. Pour améliorer les modèles de régionalisation, il est souhaitable d'utiliser des variables décrivant l'occupation des sols (bois, terres labourables, prairies...) et des facteurs climatiques (nombre de jours de pluie dépassant un seuil...).

Conclusion générale



Pour le moment, la limite en probabilité entre les VH est choisie comme étant égale à un an pour tenir compte de la longévité des espèces piscicoles et de la longueur des chroniques de débits disponibles. Cette limite est facilement quantifiable avec la loi exponentielle. D'autres limites peuvent être choisies et quantifiées, selon les espèces considérées.

Les indices A et B sont les paramètres de distribution, a priori exponentielle, des ΔQ susceptibles de perturber les EEC. De plus, pour tenir compte des cycles biologiques des espèces aquatiques, la VH a été décrite par saison mensuelle, pour en suivre l'évolution au cours de l'année. Ceci nous a conduit à structurer l'affichage des résultats selon les régimes de débits mensuels traditionnels, tels que définis par Parde (1968).

- l'indice A, paramètre d'échelle des ΔQ qui caractérise la VHPf,
- l'indice B, paramètre de position des ΔQ qui caractérise la VHF.

Ce sont :
Les ΔQ se synthétisent à l'aide de deux paramètres, calculés à partir de la loi exponentielle.

la loi exponentielle permet de définir et de quantifier ces VH.
hydrologique fréquente (VHF) et de variabilité hydrologique peu fréquente (VHPf). Les ΔQ et débits plus importants ne laissent pas l'EEC y revenir. Ceci distingue la notion de variabilité par rapport à une référence en pouvant revenir à l'état antérieur. A l'inverse, des écarts de (1983), Blandin et Lamotte (1985) supposent que les EEC supportent un certain écart de débit mémoire des débits passés, elles sont notées ΔQ . Resh *et al.* (1988), Stanford et Ward est choisie comme la médiane glissante des 30 jours précédents. Elles véhiculent une Les nouvelles variables sont une différence de débit par rapport à une référence qui

ceci écart de débit soit supérieur à deux écarts-types. Cette limite est arbitraire.
perturbation comme un écart de débit par rapport à une référence, et à condition que la perturbation proposée par Resh *et al.* (1988). Resh *et al.* (1988) définissent la Ainsi, de nouvelles variables sont proposées pour décrire la VH, en utilisant la définition de

une crue.
jours car elle correspond au temps que mettent les algues à reconstituer leur population après mémoire M des nouvelles variables proposées dans ces recherches est prise comme égale à 30 d'une éventuelle mémoire des EEC aux débits et perturbations passées. Pour le moment, la dynamique des êtres vivants. Les descripteurs classiques de la VH ne tiennent pas compte la conçus pour le dimensionnement d'ouvrage d'art par exemple. Ils ne prennent pas en compte la courante (EEC). Il existe de nombreux descripteurs de la VH, issus des statistiques. Ils sont montrent que la variabilité hydrologique (VH) participe à l'équilibre des Ecosystèmes en eau Les nombreuses recherches effectuées sur le rôle des facteurs abiotiques dans les EEC

Conclusion générale

Les ΔQ ont été testés sur un échantillon de 55 stations hydrométriques. Les cours d'eau ont des régimes simples ou mixtes, allant du régime glaciaire au régime pluvial, pour vérifier leur sensibilité au régime.

Une fois que les ΔQ sont définis et synthétisés, leur sensibilité à leur méthode de calcul et d'échantillonnage a été vérifiée. Nous avons recherché :

- la sensibilité des ΔQ à la mémoire M prise en compte comme référence. La mémoire M peut être choisie. Ainsi, les ΔQ calculés par rapport à une médiane glissante de 3, 7 et 30 jours sont comparés. Il en ressort que :
 - la VHF diminue pour des mémoires M de 3 et 7 jours par rapport à celle calculée avec une mémoire M de 30 jours.
 - la VHPF est peu sensible à la mémoire M car les ΔQ décennaux y sont peu sensibles.
- Le choix de la mémoire dépend des espèces considérées. Il faut un mois, après une crue importante, aux algues pour reconstituer leur population, de 3 à 4 mois pour les invertébrés et de 3 à 4 ans pour les truites.
- la sensibilité des ΔQ à la méthode d'échantillonnage. Le calcul des indices A et B repose sur l'échantillonnage des ΔQ séparés par un écart de date minimum de 3 jours. Des écarts de date de 6 jours sur des bassins versants de 2 000 km² et de 10 et 20 jours sur des bassins versants d'une surface comprise entre 6 000 et 115 000 km² sont testés.

Il en ressort que :

- les ΔQ peuvent être échantillonnées avec un écart de date de 3 jours sur les petits bassins versants (surface < 2 000 km²). En effet, un tel écart de date permet de décrire la borne supérieure de la VHF et assurer l'indépendance des ΔQ décennaux.
- les ΔQ doivent être échantillonnées avec un écart de date de 10 jours sur les grands bassins versants (6 000 km² < surface < 115 000 km²), pour définir la borne supérieure de la VHF et assurer l'indépendance des ΔQ décennaux.

Ensuite, les ΔQ ont été comparés aux débits pour s'assurer de leur indépendance. La VHPF se rapproche du gradex des débits alors que la VHF est indépendante des débits.

Les ΔQ ont également été comparés aux autres descripteurs de la VH, qui ont été calculés et pour chaque mois, pour chaque station. Ils sont regroupés en deux classes.

- les rapports adimensionnels, comme le rapport de la moyenne et de la médiane, le moment d'ordre 3, le coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne), les étendues de débit rapportées à la médiane, l'écart type du logarithme des débits transformés ou non. Ces descripteurs et les ΔQ sont totalement indépendants.
- les autres descripteurs, qui sont l'écart type, l'inter quartile et l'inter décile. La VHF est plus ou moins corrélée à l'inter-quartile et à l'inter-décile mais ils ne décrivent pas la VHPF. L'écart-type mélange la VHF et la VHPF.

Comme les ΔQ définissent la VHI et la VHPF, ils sont plus intéressants que les descripteurs synthétiques classiques de la VH.

Enfin, les régimes et les saisons doivent être conservés pour décrire la VH car elle change beaucoup d'un régime à l'autre et d'une saison à l'autre. Les régimes sont classés par ordre de VH décroissante grâce à l'ACPn.

Les ΔQ sont conservés pour décrire la VH car :

- ils sont sensibles aux distributions de fréquence des débits, alors que les indices d'asymétrie ne le sont pas,
- ils décrivent à la fois la VHF et la VHPf alors que l'inter-décile, l'inter-quartile ne le font pas,
- la loi exponentielle quantifie la limite entre les ΔQ fréquents et peu fréquents à cause de leur mode d'échantillonnage,
- les ΔQ sont associés à une fréquence exprimée en année, ce qui n'est pas le cas des indices d'asymétrie.

La VH se décompose en VHF et en VHPf, qui ne sont pas corrélées lorsque tous les régimes sont considérés.

Les indices d'asymétrie et les descripteurs utilisant le logarithme des débits sont éliminés. Ils ne sont pas sensibles aux distributions de fréquence des débits, ils ne permettent pas d'attribuer une fréquence de dépassement d'un seuil de débit et ils ne décrivent ni la VHF ni la VHPf.

- les indices d'asymétrie,
- la VHF,
- la VHPf.

Ensuite, les descripteurs de la VH sont traités avec une Analyse en Composante Principales Normée (ACPn) et des critères de choix. L'ACPn définit trois groupes de descripteurs qui sont :

- les descripteurs sensibles aux distributions de fréquence des débits. Ils passent par un maximum en hautes eaux, lorsque les distributions sont larges. Ces descripteurs décrivent bien les crues, c'est ce qui est recherché. Les débits, les ΔQ , l'inter-décile, l'inter-quartile et l'écart-type présentent un rapport entre saison de VH extrêmes pour un régime donné élevé, compris entre 1 et 20.

- les descripteurs peu sensibles aux distributions de fréquence des débits. Ce sont les rapports adimensionnels. Ils passent par un maximum lors de la reprise des écoulements, d'août à octobre en régime à influence pluvial, en avril, mai et juin pour les régimes à influence glaciaire ou nivale. Ils présentent les mêmes valeurs en hautes et basses eaux alors que les distributions de fréquence ne sont pas les mêmes. Ces descripteurs présentent également un rapport entre saison de VH extrêmes pour un régime donné faible, compris entre 1 et 3.

Ce regroupement sépare les descripteurs en deux classes.

Ensuite, les mois présentant la même VH sont regroupés par régime pour définir des saisons de VH homogène. Selon les régimes et les descripteurs, de un à quatre niveaux de saisons ont été mis en évidence. Le découpage de l'année hydrologique en différentes saisons présente un grand intérêt pour décrire la VH. En effet, la VH évolue au cours de l'année, ce qui est d'une importance capitale pour les EEC en raison des stades biologiques (ponte, émergence...) qui se produisent à des périodes bien précises.

Pour des travaux futurs, il faut choisir la mémoire M à prendre en compte pour calculer les ΔQ . En effet, la VHF dépend en partie de la mémoire M. Ce choix devra être précisé avec

Perspectives.

Par contre, le relief, la géologie, les pentes ou le climat sont mal connus à l'échelle du bassin versant de la Loire. Un modèle régional de la VH ne peut donc pas être proposé, au stade actuel, pour la calculer en tout point.

La VH est statistiquement très dépendante de l'hydro-écovégétation définie, elle varie différemment au cours de l'année selon l'hydro-écovégétation considérée. Des peuplements aquatiques différents selon les hydro-écovégétations pourraient être liés à la VH. Les facteurs du milieu, comme le Ph de l'eau, la morphologie du lit des cours d'eau ou l'occupation du sol ne doivent pas être négligés pour autant.

La cohérence spatiale de la VH est recherchée sur le bassin versant de la Loire, où 4 grandes hydro-écovégétations sont définies, avec, essentiellement, la géologie, le climat et le relief.

Malgré les recherches effectuées sur l'effet d'échelle spatiale sur la VH, il n'existe pas de modèles simples reliant la VH et la surface.

L'effet d'échelle spatiale se manifeste pour les ΔQ mais pour des surfaces de bassin versant supérieures à 1 000 à 2 000 km². Pour des surfaces inférieures, ce sont les caractéristiques physiques des bassins versants qui dominent l'effet d'échelle spatiale. En effet, la VH est très dépendante du bassin versant considéré. De petits bassins versants peuvent présenter une faible VH, comme de grands bassins versants. Mais seuls les petits bassins versants peuvent avoir une forte VH. Comme le nombre d'espèces piscicoles est limité en partie par la VH, le nombre d'espèces est faible à l'amont des bassins versants et il s'élève de l'amont vers l'aval. Les bassins versants d'une surface inférieure à 2 000 km² représentent une grande superficie d'un grand bassin versant comme le Rhône ou la Loire. Il faut approfondir les facteurs physiques qui influencent la VH, ce qui permettrait une régionalisation de la VH sur les petits bassins versants (taille inférieure à 2 ou 3 000 km²) et donc d'une grande surface sur un grand bassin versant.

La régionalisation des ΔQ est indispensable pour corréler la VH et les EEC. En effet, les données hydrométriques ne sont pas toujours disponibles sur les mêmes cours d'eau que les données biologiques. La régionalisation de la VH passe par :

- l'utilisation d'un même pas de temps des débits, qui est pris égal à un jour,
- la standardisation de la VH, ce qui est réalisé par l'utilisation des débits spécifiques,
- la recherche de l'effet d'échelle spatiale,
- la recherche de la cohérence spatiale de la VH.

La connaissance des facteurs qui influence la VH, comme le relief ou la géologie.

La régionalisation des ΔQ est indispensable pour corréler la VH et les EEC. En effet, les données hydrométriques ne sont pas toujours disponibles sur les mêmes cours d'eau que les données biologiques. La régionalisation de la VH passe par :

- le régime pluvial a la plus faible VH.
- le rapport aux régimes précédents,
- le régime nival, pluvio-nival puis nivo-glacière. Ils présentent une VH assez faible
- le régime nivo-pluvial présente une forte VH,
- le régime glaciaire se caractérise par une forte VHF alors que le régime évenol se distingue par sa forte VHF.

les hydrobiologistes. Il pourrait dépendre des espèces considérées. Ainsi, les ΔQ devront être notés avec la mémoire M, prise comme référence.

Pour le moment, les nouveaux descripteurs n'ont pas été confrontés aux données biologiques. La validation biologique des nouveaux descripteurs est indispensable pour la suite des recherches. Pour valider ces descripteurs, la régionalisation de la VH est indispensable à l'échelle de grands bassins versants comme le Rhône ou la Loire. En effet, les données biologiques sont rarement disponibles sur des cours d'eau pour lesquels il existe des données hydrologiques. Une connaissance régionale de la VH et des écosystèmes en eau courante à l'échelle de grands bassins versants permettrait de rapprocher les données biologiques et hydrobiologiques.

Cependant, la régionalisation de la VH nécessite d'identifier les facteurs qui influencent la VH et d'en avoir une connaissance à une échelle très fine. Ces facteurs doivent être les moins nombreux possible et cartographiables. Un modèle liant VH et facteurs de VH comportant trop de variables ne serait pas intéressant car peu exploitable. Les données actuelles sur la Loire ne permettent pas d'établir un modèle régional de la VH, faute de caractéristiques suffisamment disponibles dans les domaines physiographiques et hydroclimatiques.

La loi exponentielle n'indique pas si les perturbations sont cycliques ou non. En effet, les écosystèmes aquatiques pourraient s'accommoder plus facilement de perturbations de type crue est donc indispensable. L'indice B est la borne supérieure de la VH, en moyenne, sur plusieurs années. Nous ne savons pas si ce ΔQ est dépassé une et une seule fois par an ou pas. Sur 10 ans, il peut être dépassé certaines années une ou plusieurs fois et pas d'autres années. C'est un inconvénient. La loi exponentielle appliquée aux ΔQ ou aux débits a ses limites, mais elle a été conçue pour le dimensionnement d'ouvrages.

Les mesures de Colwell (1974) devraient permettre de répondre à une telle question, en considérant, par exemple, le nombre de dépassements d'un seuil de débit par saison (pouvant regrouper plusieurs mois) et par cycle (pouvant regrouper plusieurs années).

Enfin, comme la crue annuelle est très approximativement égale au débit atteint ou dépassé 15% des jours (note Q_x 15%), il serait intéressant de savoir quelle est la répartition dans le temps de ces dépassements de seuils de débit ou de ΔQ . En effet, la durée de dépassement de certains débits est également importante pour les BEC. Il est probable que les seuils de ΔQ soient dépassés peu de temps mais fréquemment pour certains régimes et moins souvent mais plus longtemps pour d'autres. Des recherches pourraient être entreprises dans ce sens. Elles rejoignent des recherches en cours, sur des modèles synthétiques Xdf (Gala, 1988 et 1990; Prudhomme, 1995) et de Renouvellement (Lang, 1995 a).

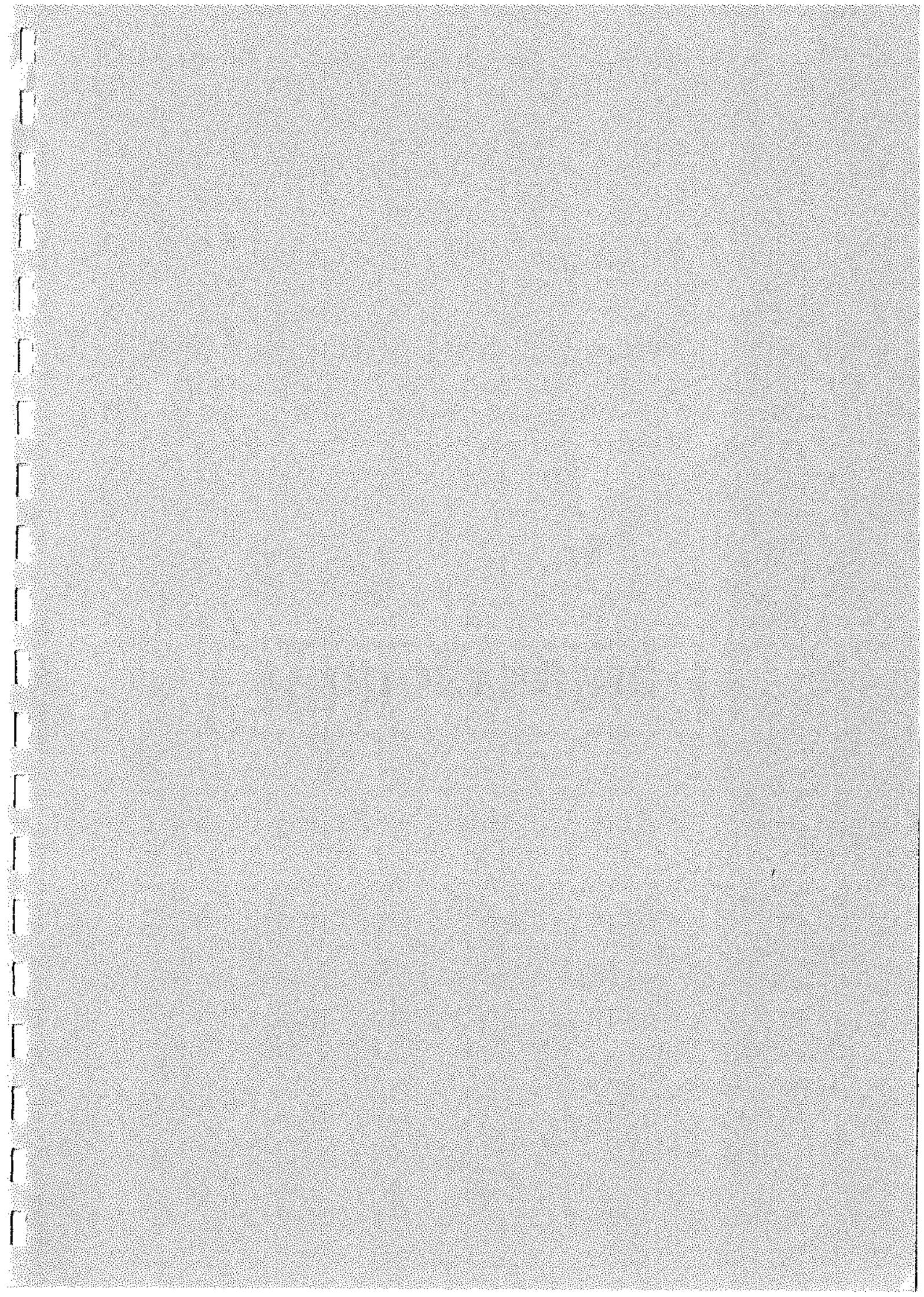
Le cas des étiages n'a pas été abordé. Pourtant, ils peuvent être une contrainte hydrologique considérable par restriction de l'espace vital, augmentation de la température de l'eau, diminution de la teneur en oxygène dissout. Les étiages sévères sont nuisibles aux écosystèmes aquatiques par :

- leur durée. Un faible débit qui dure quelques jours est mieux supporté qu'un même débit qui se prolonge des semaines ou des mois,
- le débit atteint. Un étiage nul est très contraignant pour les écosystèmes en eau courante, même s'il ne dure qu'un jour ou deux.

De plus, les modèles Qdt existent également en étiage (Mercier, 1996). Ces recherches ont été réalisées sur 76 bassins versants d'une surface inférieure à 2 000 km² sur le bassin versant de la Loire et ont abouti à 4 modèles d'étiages (Force, Vaubarlet, Saint-Floret et Ménétréol). Les débits sont au pas de temps journalier, peu ou pas influencés par les activités humaines. Les descripteurs locaux sont le volume cumulé minimal d'une durée d'un jour et d'une période de retour de deux ans (VCN(2,1)) et la durée caractéristique d'étiage De. Le VCN(2,1) est le descripteur de production alors que De est le descripteur de transfert. Ces modèles pourraient être utilisés pour caractériser les étiages sur divers types d'écoulements et d'en réaliser une typologie.

En résumé ultime, ces recherches ont l'ambition d'avoir lancé le concept d'écart de débit, noté ΔQ_{mp} , comme variable complémentaire d'analyse et de synthèse de la variabilité hydrologique, dans la perspective de participer à la modélisation des EBC.

Bibliographie



Liste des articles et ouvrages cités

1. Babak Naghavi, Fang Xin Yu (1991). Generalised skew coefficients of annual floods for Louisiana streams. Water Resources Bulletin. American Water Resources Association. 27-2, 209-216.
2. Baril D., Roche B., Le Baron M., Cattaneo-Berrebi G., Beaudou D., Berrebi P. (1994) Recolonisation d'un habitat détruit : compétition entre truites sauvages et domestiques en Corse. Communication orale Pir Poisson 6, 7 et 8 décembre 1994, Villeurbanne.
3. Blandin P., Lamotte M. (1985). Fondements rationnels de l'aménagement d'un territoire. Paris, Masson.
4. Bois P. (1980) Hydrologie Générale. ENSHMG. Institut National Polytechnique de Grenoble. 175 p.
5. Boulon E. (1995). Relations entre caractéristiques hydrologiques et morphologiques des rivières à travers l'analyse des débits de plein bord. Application à 9 cours d'eau du bassin de la Loire. Rapport de DEA. 60 p + annexes.
6. Burin D. (1995). Caractérisation de la variabilité hydrologique en Bretagne. Mémoire de fin d'étude de Diplôme d'Agronomie Approfondie. Option Physique des Surfaces naturelles et Génie hydrologiques. 31 p + annexes.
7. Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (1980). Carte géologique de la France et de la marge continentale à l'échelle de 1/1 500 000. Notice explicative 102 p.
8. Caine N. (1992). Modulation of the diurnal streamflow response by the seasonal snowcover of an alpine basin in the Journal of Hydrology 137; 245-260.
9. Capra H., Breil P., Souchon Y. (1995). Un nouvel outil pour interpréter l'intensité et la durée des variations de l'habitat du poisson, Regulated rivers : research & management, vol.10, n°2-4, 281-289.
10. Centre Technique du Génie Rural des Eaux et Forêts CTGERF (1979). Division Hydrologie-Hydraulique. Analyse des pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes météorologiques Fascicule 1 : texte 47 p, Fascicule 2 : annexes, tableaux de résultats 66 p.
11. Changeux T. (1995). Structure du peuplement piscicole à l'échelle d'un grand bassin européen : organisation longitudinale, influence de la pente et tendance régionale. Bulletin Français de pêche piscicole 337 / 338 / 339 : 63-74.

12. **Changeux T., Pont D.** (1992). URA CNRS 1451. Université Cl. Bernard, Arles, France. Poster 232 at the 6th European Ecological Congress, Marseille (France) 7-12 september 1992.
13. **Changeux T., Pont D.** (1994). Ichthyogeographic regions and watershed size in the French river Rhône network. 16 p + annexes.
14. **Chessel D., Dolédec S.** (1993). ADE version 3.6. Hypercard stacks and Quickbasic microsoft programme library for the analyse of environmental data. URA CNRS 1451, Umi. LYON I, 43 Bd 11 novembre 1918 F-69622 Villeurbanne.
15. **Cohen P.** (1994) La variabilité hydrologique comme facteur structurant les communautés animales lotiques. Rapport bibliographique de DEA. Analyse et modélisation des systèmes biologiques. CEMAGREF Groupement de Lyon, Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques, Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative. 31 p.
16. **Colwell R.K.** (1974). Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. *Ecology*, 55, 1148-1153.
17. **Copp D.** (1991). Monthly runoff distribution related to bassin geography. *Water resources bulletin*. American Water resources association. 27, n°2, 177-188.
18. **CTGREF, SRAE, DIAME, SH**, 1980-1982 : Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE, Information Technique N°38-2 (juin 1980) Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX.
19. **Delucchi C.M.** (1988). Comparison of community structure among streams with different temporal flow regimes. *Canadian Journal of Zoology*, 66, 579-586.
20. **Dolédec S. et Chessel D.** (1989). Rythme saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. II. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecologica. Oecologica generalis*, 10, 207-232.
21. **Dolédec S. Chessel D.** (1992) Programmation ADE. Analyse multivariées et expression graphique des données environnementales. Version 3.6 Ordination linéaire. *Ecologie des Eaux douces et des grands fleuves*. 100 p. URA CNRS 1451. Université Claude Bernard Lyon I. 69622 Villeurbanne Cédex.
22. **Edouard J.L., Vivian H.** (1984) Une hydrologie naturelle dans les Alpes du Nord ? Les nouveaux paramètres de l'hydrologie alpine : les aménagements hydroélectriques. Fascicule 1924 n° 23; p 165-188.
23. **Gala G.** (1988) Abaques Débits-durées-Fréquences sur la Sèvre Nantaise, Région Pays de Loire, CEMAGREF Lyon.
24. **Gala G.** (1990). Modèles descriptifs synthétiques des connaissances régionales en crues : représentativité spatiale et domaine de validation. CEMAGREF, division hydrologie-hydraulique. 24 p.

25. Galéa G., Prudhomme C. (1993) Characterization of large scale variations in rivers flow behavior with reference to hydrological macro - regionalisation. Technische Universität Braunschweig (Allemagne), FRIEND Conference, 11-15 octobre, AISH n°221.
26. Galéa G., Prudhomme C. (1994) Notion de base, concepts et philosophie de la recherche à l'origine des modèles QdF. Soumis à la revue des Sciences de l'eau (juillet 1995). CEMAGREF, groupement de Lyon. Division Hydrologie-Hydraulique. 18 p.
27. Haines A.T., Finlayson B.L., Mc Mahon T.A. (1988). A Global Classification of River Regimes in Applied Geography. Vol 8 p. 255-272.
28. Hérouin E., Breil P., Albert M.B. (1994). Quelles approches pour synthétiser le fonctionnement physique des écosystèmes d'eaux courantes ? Cemagref Lyon. 15 p.
29. Heydarizadeh M. (1993) : Déformation des modèles Débits-durées-Fréquence QdF dans un bassin avec échanges nappe rivière actifs ou activables. DEA MMGE. Université Joseph Fourier de Grenoble I, octobre 1993.
30. Horwitz R.J (1978). Temporal Variability Patterns and the Distributional Patterns of Stream Fishes in Ecological Monographs. 48, 307-321.
31. Hugues J.M.R. (1987). Hydrological characteristics and classification of Tasmanian rivers. Australian Geographical Studies, 25, 61-84.
32. Hugues J.M.R. and James B. (1989) Hydrological Regionalisation of Streams in Victoria, Australia, with Implication for Stream Ecology, 40, 303-326.
33. Huston (1979). A general hypothesis of species diversity. The American Naturalist, 113, 81-101.
34. Ivo J.M., Philippe M., Galéa G., Prudhomme C., Oberlin G., Breil P., Malafosse A., Belliard J., Andriamaheta H., Malavoï J.R., Jolliveau T., Wasson J.G., (1995). Approche écosystémique du bassin de la Loire. Phase II : rapport préliminaire. Etat d'avancement de l'étude. Convention n°S/94, 100 p.
35. Jowett I.G., Richardson J (1989). Effects of a severe flood on instream habitat and trout populations in seven New-Zeland rivers in New-Zeland. Journal of Marine and Freshwater Research, 23, 11-17.
36. Jowett I.G. Duncan M.J. (1990). Flow variability in New-Zeland rivers and its relationship to in-stream habitat and biota in New-Zeland. Journal of Marine and Freshwater Research, 24, 305-317.
37. Kaabi A. (1994). Régionalisation des étiages dans le Nord Ouest de l'Algérie. Thèse de Doctorat. CEMAGREF Lyon, Division hydrologie Hydraulique, Université Joseph Fourier, Grenoble. Ecole Doctorale de Mécanique. 201 p + annexes.
38. Kayanfar M. (1995). Crues rares et extrêmes : quelques développements autour du modèle AGREGEE : recherches sur l'amélioration de l'option progressive. Tests à l'échelle

Alpine et Méditerranéenne. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, Cemagref Lyon, 243p.

39. Kessler J. Chambraud A. (1986). La météo de la France. Tous les climats localités par localité. Editions J.C. Lattes. 312 p.

40. Lang M. (1995 a). Les chroniques en hydrologie : Modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnelles et orientées-objet. Traitement de base et intervalles de confiance des quantiles de crues, techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier Grenoble, Cemagref Lyon, mai 1995, 296 p.

41. Lang M. (1995 b). Comparaison des modes d'échantillonnage par sélection du maximum annuel et des valeurs supérieures à un seuil. Méthodes statistiques et bayésiennes en hydrologie. Conférence internationale en l'honneur de Jacques Bernier, UNESCO, Paris, 11-13 septembre 1995, 23 p.

42. Leroy Pott N. and Ward J.V. (1989). Implication of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure : A Regional Analysis of Streamflow Patterns. Canadian Journal Fisheries Aquatic Science, 46, 1805-1818.

43. Leroy Pott N. (1992). Why disturbance in streams. Journal of North American Benthological Society, 11, 86-92.

44. Malavoi J.R., Souchon Y. (1992). Hydrologie dynamique hydro-écologique des cours d'eau. Revue des Sciences de l'eau, 5, 247-261.

45. Margoum M. (1992). Estimation des crues rares et extrêmes. Le modèle AGREGEE. Coception et premières validations. Thèse de Doctorat en Hydrologie. 252 p + annexes. Cemagref Lyon, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

46. Margoum M., Oberlin G., Lang M., Weigartner R., 1994. Estimation des crues rares et extrêmes : principe du modèle AGREGEE. Hydrologie continentale, vol 9 (1), p 83-98.

47. Martin E. (1992). Hydrologie adaptée à la typologie des écosystèmes d'eau courante. Mémoire de DEA, Institut de Géographie Alpine. 71 P + annexes.

48. Mercier G.X. (1996). Transposition du concept QdF crue à la régionalisation des régimes d'étiage du bassin versant de la Loire. Rapport intermédiaire Convention n° 5/94. Ministère de l'Environnement. 54 p.

49. Michel C. (1982). Extrapolation par la méthode du gradex. Note interne KG 03 mai 82, CEMAGREF-Antony, Div Hydrologie.

50. Michel C., Oberlin G. (1987) Seuil d'application de la méthode du GRADEX CEMAGREF. Antony, Div Hydrologie-Hydraulique / La Houille Blanche n°3-1987.

51. Mimitkou M. et Kaemali S. (1985). Regionalization of flow duration characteristics. Journal of Hydrology, 82, 77-91. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

52. Ministère de l'Environnement, (1993). Guide de l'utilisation de la Banque HYDRO, Décembre 1993.
53. Naghavi B., Xin Yu F. (1991). Generalized skew coefficient of annual floods for Louisiana streams in Water Resources, Bulletin American Water Resources Association Vol 27, NO.2, 209-216.
54. O'Brien J.S. (1987). A case study of minimum streamflow for fishery habitat in the Yampa River. In thorne C.R., Bathurst J.C., Hey R.D. (Eds.), Sediment transport in gravel-bed rivers. 921-964. John Wiley Sons Ltd.
55. Osborne L.L. Wiley M.J. (1992). Influence of Tributaries Spatial on the structure of Warmwater Fish Communities. Canadian Journal Fish. Aquat. Sci. Vol. 49, 671-681.
56. Pardé M. (1968). Fleuves et rivières. Edition A. Collin, 5ème ed. 241 p.
57. Petit F. et C. Daxhelet (1989). Détermination du débit à pleins bord et de se récurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25, 69-84.
58. Petit F., Paquet A. Mabillet G. et Franchimont C. (1994). Variation de la récurrence du débit à pleins bords des rivières en relation avec la lithologie de leur bassin versant et les caractéristiques de leur lit. Dossier de la revue de géographie Alpine N° 12, 157-161.
59. Philippeau G. (1986). Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ? STATTEC. Institut Technique des Céréales et de Fourrages. 63 p.
60. Pickett S.T.A., White P.S., (1985). Natural disturbance and patch dynamics : an introduction. In Pickett S.T.A. (Eds.), The ecology of disturbance and patch dynamics, 3-13. New York : Academic Press.
61. Pont D., De Mérona & Boet P. (1993). PIR "Facteurs de l'environnement utilisation de l'espace structuration spatio-temporelle des peuplements piscicoles". Signification des échelles spatio-temporelles dans la variabilité des peuplements piscicoles des grands cours d'eau. CNRS-URA, ORSTOM DEC, CEMAGREF, INRA Département d'Hydrologie, Muséum d'Histoire Naturelle. Rapport d'étape 2ème année.
62. Pont D., Belliard J., Boet P., Changeux T., Oberdorff T., Ombredane D (1995). Analyse de la richesse piscicole de quatre ensembles hydrographiques français. Bulletin Français de pêche piscicole 337 / 338 / 339 : 75-81.
63. Power M.R., Stout R.J., Custing C.E., Harper P.P., Hauer F.R., Matthews W.J., Moyle P.B., Statzner B. Wais De Badgen I.R. (1988). Biotic and abiotic controls in river and stream communities. Journal of North American Benthological Society, 7, 456-479.
64. Prudhomme C. (1995). Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie : application à la régionalisation des crues en Europe Alpine et Méditerranéenne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, Cemagref Lyon 397 p.

65. Resh V.H., Brown A.V., Covich A.P., Gurtz M.E., Li H.W., Minshall G.W., Reice S.R., Sheldon A.T., Wallace J.B., Wissmar R.C. (1988). The role of disturbance in stream ecology. *Journal of North American Benthological Society*, 7, 433-455.
66. Richards P. (1989). Measure of flow variability for great lakes tributaries. Water Quality Laboratory Heidelberg College 310 E. Market Street Tiffin, Ohio 44883 USA.
67. Richards P. (1990). Measures of flow variability and a new flow-based classification of great lakes tributaries. Water Quality Laboratory Heidelberg College 310 E. Market Street Tiffin, Ohio 44883 USA. *Journal Great Lakes Res.* 16(1), 53-70.
68. Segrist, D.M., et R. Gard. (1972). Effects of floods on trouts in logged and unlogged areas of Great Smoky Mountains National Park. *Hydrobiologia* 102 : 99-111.
69. Shannon C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Techn. J.* July and October.
70. Shannon C.E. and Weaver W. (1949). The mathematical Theory of communication. University of Illinois Press, Urbana, III, 117 p.
71. Sourisseau J., (1995). Représentativité spatiale des modèles QdF; application à la régionalisation des régimes de crue du bassin versant de la Loire. Mémoire de cycle Post Gradex en hydrologie IATE DGR EPFL (Lausanne) Cemagref Lyon. Décembre 1995.
72. Stalnaker C.B., Milhous R.T., Bovee K.D. (1989). Hydrology and hydraulics applied to fishery management in large rivers. In D. D.P. (Ed), *International large river symposium*, 106, 13-30. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.
73. Stanford J.A., Ward J.V. (1983). Insect species diversity as a function of environmental variability and disturbance in stream systems. In Barnes J.R. Minshall G.W. (Eds.), *Stream Ecology*, 265-278. New York : Plenum Press.
74. Statzner B., Higl B. (1986). Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns. *Freshwater Biology* 16, 127-139.
75. Stearn S.C. (1981). On measuring fluctuating environments : Predictability, constancy, and contingency. *Ecologie*, 62, 185-199.
76. Turcotte D.L., L. Greene (1993) A scale-invariant approach to flood-frequency analysis. *Stochastic Hydrology Hydrology* 7, 33-40.
77. Tyus H.M. (1992). An instream flow philosophy for recovering endangered Colorado river fishes. *Rivers*, 3, 27-36.
78. Valentin S. (1994). Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques. Effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivières. Etudes de cas (Ance du Nord et Fontaulière) et approche expérimentales. Thèse de Doctorat.

CERMAGREFF Lyon, Division Biologie des Ecosystemes Aquatiques, Université Claude Bernard Lyon I. 255 p + annexes.

79. Ward J.V., Stanford J.A. (1983). The intermediate-disturbance hypothesis : an explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems. In Fontaine T.D., Bartell S.M. (Eds.), Dynamics of lotic ecosystems. Ann Arbor, Michigan : Ann Arbor Science. 347-356

80. Ward J.V. (1989) The four-dimensional nature of lotic ecosystems. Journal of North American Benthological Society, 8, 2-8.

81. Wasson J.G. (1989) Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes : I. Revue critique de quelques approches existantes. Bulletin d'Ecologie, 20, 109-127.

82. Wasson J. G., Bethemont J., Degorce J N., Dupuis B., Jolliveau T (1993). Approche écosystémique du bassin de la Loire. Eléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. 113 p + nombreuses planches et annexes.

83. Wonnacott T, Wonnacott R. (1991) 4ème édition. Statistiques. Economie, gestion, sciences, médecine (avec exercices d'application). 920 p.

Articles et communication affichée présentés en cours de thèse

1. Breil P. Malafosse A. (1993). Etude exploratoire de la variabilité des régimes hydrologiques : application aux besoins hydrobiologiques. Acte du colloque de Braunschweig, 7p.

2. Breil P. Malafosse A. (1994). Essai de typologie hydroécologique des écoulements en rivière, Vingt troisièmes Journées de l'hydraulique, 14-16 septembre 1994, Nîmes, Société Hydrotechnique de France, 309-314.

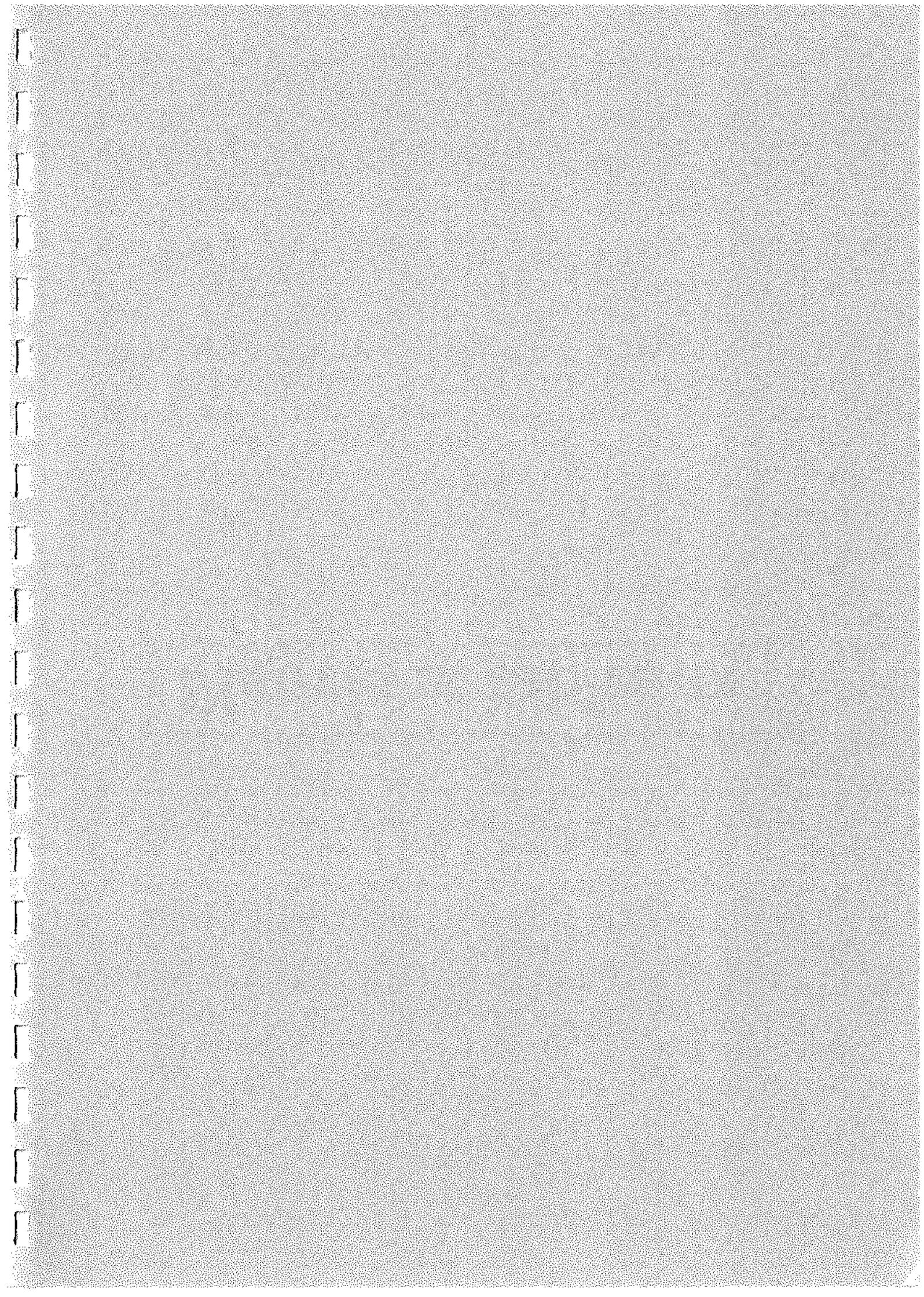
3. Breil P. Malafosse A. (1994). Hydroécologie et hydrologie : introduction de la dimension temporelle dans la compréhension fonctionnelle des écosystèmes d'eau courante. Présenté au Symposium International "Relations entre le poisson et son habitat" Villeurbanne, 8-10 décembre 1994.

4. Breil P. Malafosse A. (1994). Etude exploratoire de la variabilité des régimes hydrologiques : application aux besoins hydrobiologiques. 2nd international conference on FRIEND Flow regimes from international experimental and network data, Braunschweig, DEU, 11-15 october 1993 IASH publication, n° 221.

5. Breil P. Malafosse A. (1996). Typologie et variabilité écohydrologique des régimes d'écoulement en rivière. Convention 5/54. Etude Loire II. Rapport intermédiaire numéro 2. 13 juin 1996. 11 p + annexes.

6. Malafosse A. Breil P. (1993) Recherche d'une typologie des cours d'eau du bassin versant de la Loire à l'usage de l'hydrobiologie. Présenté à St Pée sur Nivelle (8 septembre 1993). Non publié.

Figures et tableaux



Liste des figures

5	Figure 1.0 Modèle conceptuel de l'écosystème en eau courante (Wasson, 1989, revu par Malafosse, 1993).....
6	Figure 1.1 Nombre d'espèces piscicoles en fonction de la surface sur le bassin versant du Rhône à partir des données de Changeux et Pont (1994).....
11	Figure 1.1.3.1 Notion de perturbation d'après Stanford et Ward (1983).....
12	Figure 1.1.3.2 Représentation schématique des domaines de fluctuation et de stabilisation d'un écosystème (Blandin et Lamotte, 1985).....
12	Figure 1.1.3.3 Conditions hydrologiques fréquentes et peu fréquentes selon Resh et al. (1988).....
12	Figure 1.1.5 Effet des perturbations sur la biomasse d'un écosystème (d'après Huston, 1979).....
13	Figure 1.2.2.8 Exemple d'ajustement des débits avec la période de retour sur la Veyre à LENT et calcul du gradex des débits G_x et de la crue annuelle Q_0 (mars).....
22	Figure 1.2.3 Illustration des notions de prévisibilité, constance et contingence sur les débits maximaux mensuels de trois rivières nord-américaines (d'après Resh et al., 1988).....
24	Figure 1.3.1 Cycle annuel de la Truite Fario en France.....
27	Figure 1.4.1.2.1 Effet d'échelle spatiale sur la VH selon Richards (1989 et 1990).....
29	Figure 1.4.1.2.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH selon Horvitz (1978).....
30	Figure 2.2.1 Variance autour de la médiane mensuelle pour les débits compris entre Q_x 20% et Q_n 20% par régime.....
37	Figure 2.1.2.3 Isoquantiles de débits journaliers sur un exemple.....
38	Figure 2.1.2.4 Débits médians mensuels sur 30 stations hydrométriques en écoulement naturel en régime pluvial.....
39	Figure 2.3.2 La Roizonne à la ROCHELETTE, 72 km ² , régime nival, mois d'août.....
41	Figure 3.1.1.2 Surface des bassins versants et précipitations annuelles par régime mensuel.....
54	Figure 3.1.1.3.1 Débits mensuels inter-annuels en régime glaciaire (Bois, 1980).....
55	Figure 3.1.1.3.2 Débits mensuels inter-annuels en régime nivo-glaciaire (Bois, 1980).....
55	Figure 3.1.1.3.3 Débits mensuels inter-annuels en régime nival (Bois, 1980).....
56	Figure 3.1.1.3.4 Débits mensuels inter-annuels en régime pluvio-nival (Bois, 1980).....
56	Figure 3.1.1.3.5 Débits mensuels inter-annuels en régime pluvio-nival (Bois, 1980).....
57	Figure 3.1.1.3.6 Débits mensuels inter-annuels en régime pluvio-nival (Bois, 1980).....
58	Figure 3.1.3.2 Exemples de chroniques non stationnaires.....
60	Figure 3.1.3.3 Exemples de chroniques stationnaires.....
61	Figure 3.1.4.1 Graphe en boîte.....
63	Figure 3.1.4.1 Graphe en boîte.....

119	Figure 6.1.1.1.1 VHT et VHTf en régime glaciaire.
114	Figure 6.1.1.1.2 VHT et VHTf en régime nivo-glaciaire.
115	Figure 6.1.1.1.3 VHT et VHTf en régime nival.
116	Figure 6.1.1.1.4 VHT et VHTf en régime nivo-pluvial.
116	Figure 6.1.1.1.5 VHT et VHTf en régime pluvio-nival.
117	Figure 6.1.1.1.6 VHT et VHTf en régime pluvial.
118	Figure 6.1.1.1.7 VHT et VHTf en régime pluvial.
118	Figure 6.1.1.1.8 VHT et VHTf en régime cévenol.
108	les débits classes.
104	Figure 5.5 Comparaison des caractéristiques de l'indice B et de $\Delta Q[10]$ avec classes.
104	Figure 5.4.0.1 Comparaison des crues annuelles et décennales avec les débits sur la Dordogne à St SAUVES D'AUVERGNE (187 km ² , régime pluvio-nival).
104	Figure 5.4.0 Comparaison des débits classés avec les crues annuelles et décennales par régime.
102	Figure 5.3.2 Comparaison de l'indice saisonnier et de l'indice mensuel de distorsion
91	Figure 4.3 Comparaison des caractéristiques de crue et de ΔQ .
87	avec les indices A et B calculés avec un critère de 6 jours.
85	Figure 4.2.1 Comparaison des indices A et B calculés avec un critère de 3 jours calculés avec M = 30 jours sur 17 grands bassins versants.
84	Figure 4.1.4.3 Comparaison de A et de B calculés avec M = 3 jours et A et B différents ΔQ classés.
83	Tableau 4.1.4.2 Influence de la mémoire glissante de M jours sur les valeurs de
81	Figure 4.1.3 Effet d'une mémoire M de 7 et 30 jours sur les indices A et B.
80	exemple.
80	Figure 4.1.2.2 Débit et médiane glissante sur 3 jours et chronique de ΔQ sur un de ΔQ sur un exemple.
80	Figure 4.1.2.1 Débit et médiane glissante des débits sur 30 jours puis chronique
74	LES ALPES (option 4 de VARY).
73	Figure 3.2.2 Exemple d'indice mensuel de distorsion sur l'Issole à St ANDRE ALPES).
72	Figure 3.2.1 Débits médians inter-annuels mensuels (L'Issole à St ANDRE LES VARY).
71	Figure 3.2.1.3 Evolution des ajustements des pics de ΔQ sur les mois de janvier, mai et juillet sur l'Isère à VAL D'ISÈRE (46 km ² , régime glaciaire) (option 7 de retour (option 7 de VARY).
68	Figure 3.2.1.2 Exemple d'ajustement de ΔQ (ΔQ) en fonction de la période de CHAMBON (option 3 de VARY).
67	Figure 3.2.1.1 Isoquantiles journaliers de ΔQ sur la Romanche au LAC 114 km ² (option 0 de VARY).
67	Figure 3.2.1.2 Exemple de chronique de ΔQ journaliers (le Rhins à Amplepuis des débits sur 30 jours.
67	Figure 3.2.1.1 Exemple de chronique journalière de débit et de médiane glissante

120	Figure 6.1.2.1 Typologie de la VHF par régime.
121	Figure 6.1.2.2 Typologie de la VHF par régime.
122	Figure 6.1.2.1 Typologie du gradex par régime.
123	Figure 6.1.2.2 Typologie de la crue annuelle par régime.
124	Figure 6.1.3.1.1 Indice mensuel de distorsion en régime glaciaire.
124	Figure 6.1.3.1.2 Indice mensuel de distorsion en régime nivo-glaciaire.
125	Figure 6.1.3.1.3 Indice mensuel de distorsion en régime nival.
125	Figure 6.1.3.1.4 Indice mensuel de distorsion en régime nivo-pluvial.
126	Figure 6.1.3.1.5 Indice mensuel de distorsion en régime pluvio-nival.
126	Figure 6.1.3.1.6 Indice mensuel de distorsion en régime pluvial.
127	Figure 6.1.3.3 Typologie de l'indice mensuel de distorsion par régime.
128	Figure 6.1.4 Typologie de l'écart-type des débits par régime.
129	Figure 6.1.5 Typologie de l'inter-décile par régime.
130	Figure 6.1.6 Typologie de l'inter-quartile par régime.
131	Figure 6.1.7 Typologie de l'indice saisonnier par régime.
132	Figure 6.2.1 Typologie du rapport de l'inter-décile à la médiane par régime.
133	Figure 6.2.2 Typologie de l'inter-quartile rapporté à la médiane par régime.
134	Figure 6.2.3 Typologie du rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur.
134	Figure 6.2.4 Typologie du coefficient de variation par régime.
134	Figure 6.2.5 Typologie de l'écart-type du logarithme des débits par régime.
135	Figure 6.2.6 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits par régime.
136	Figure 6.2.7 Typologie par régime de l'écart-type du logarithme des débits
137	translatés.
137	Figure 6.2.8 Typologie du coefficient de variation du logarithme des débits
137	translatés.
138	Figure 6.2.9 Typologie du rapport de la moyenne à la médiane par régime.
139	Figure 6.2.10 Typologie du moment d'ordre 3 par régime.
145	Figure 6.4 Regroupement des descripteurs de la VH selon leur sensibilité à la saison.
147	Figure 7.0 Exemple de distribution de fréquence de débit sur un cas théorique.
150	Figure 7.1.1 Graphes des valeurs propres avec 19 caractères hydrologiques.
151	Figure 7.1.2 Cercle de corrélation sur les axes F1 et F2 pour 19 descripteurs de la VH.
152	Figure 7.2.1 Graphes des valeurs propres de l'ACPn sur 15 variables hydrologiques.
153	Figure 7.2.2 Cercle de corrélation selon les deux premiers axes de l'ACPn.
154	Figure 7.2.3 Représentation des centres de gravité des régimes dans le plan factoriel F1 F2.
155	Figure 7.2.4 Ellipses de dispersion dans le plan F1 F2 par régime.
156	Figure 7.3.1 Graphes des valeurs propres de l'ACPn effectuée sur 9 caractères hydrologiques.
157	Figure 7.3.2 Cercle de corrélation de l'ACPn réalisée avec la VHF et la VHP.
158	Figure 7.3.3 Position des centres de gravité des régimes dans le plan F1 F2 avec 9 variables hydrologiques.
159	Figure 7.3.4 Ellipses de dispersion par régime dans le plan factoriel F1 F2.

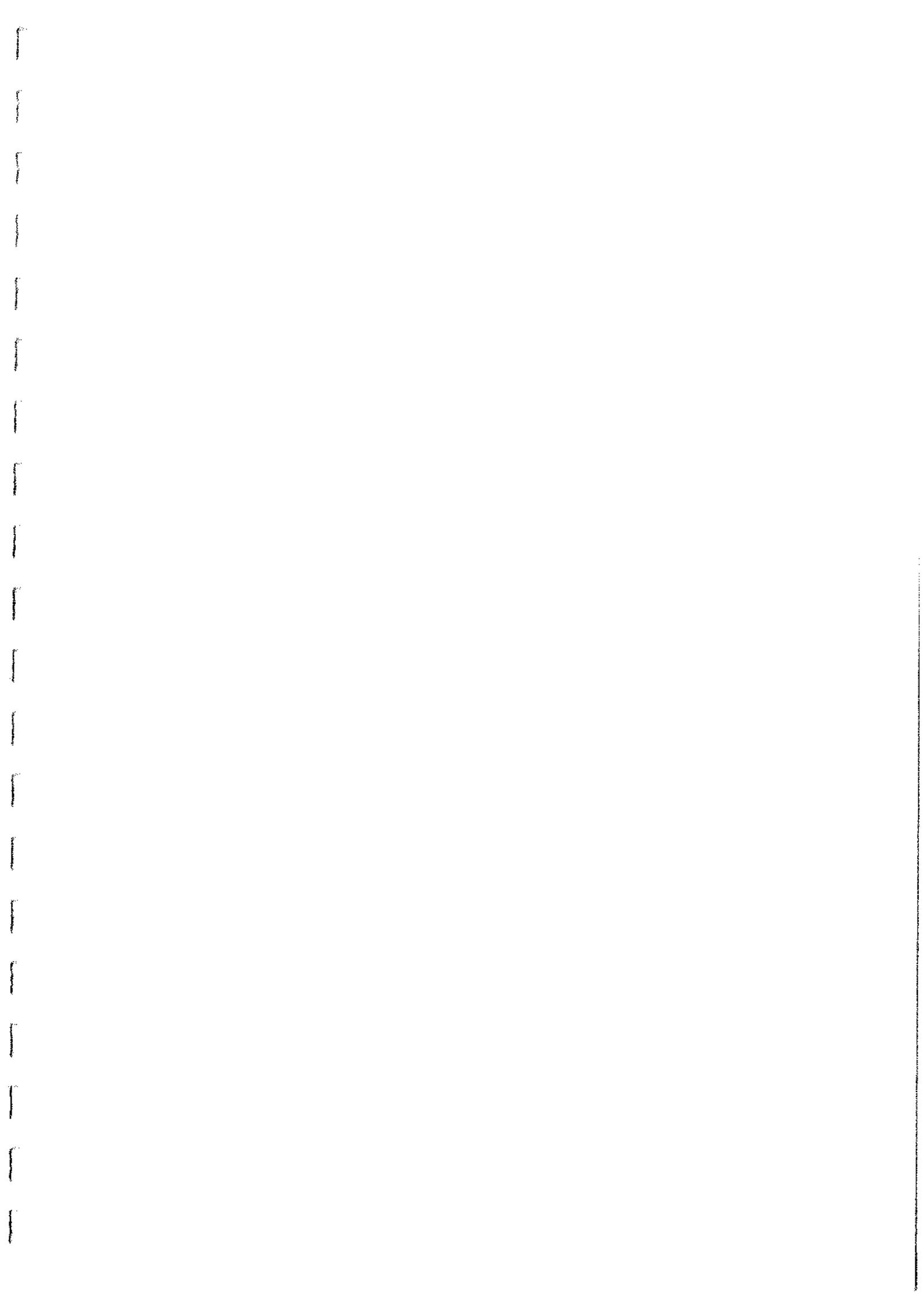
163	Figure 7.5.1.1 Le graphe des valeurs propres pour 7 régimes et 8 variables hydrologiques.	163
163	Figure 7.5.1.2 Le cercle de corrélation selon les deux premiers axes.	163
164	Figure 7.5.1.3 Représentation des régimes dans le plan F1 F2.	164
165	Figure 7.5.1.4 Tracé de chaque régime dans le plan F1 F2.	165
166	Figure 7.5.2.1.1 Le graphe des valeurs propres de l'ACPn inter-mois.	166
167	Figure 7.5.2.1.2 Cercle de corrélation selon les axes F1 F2 de l'ACPn inter-mois.	167
167	Figure 7.5.2.2.1 Le graphe des valeurs propres de l'ACPn intra-mois.	167
168	Figure 7.5.2.2.2 Cercle de corrélation selon les axes F1 et F2 de l'ACPn intra-mois.	168
169	Figure 7.5.3.1.1 Graphe des valeurs propres de l'ACPn inter-régime.	169
169	Figure 7.5.3.1.2 Cercle de corrélation selon les axes F1 et F2 de l'ACPn inter-régime.	169
169	Figure 7.5.3.2.1 Graphe des valeurs propres de l'ACPn intra-régime.	170
170	Figure 7.5.3.2.2 Cercle de corrélation de l'ACPn intra-régime selon les deux premiers axes.	171
171	Figure 7.5.4.3 Premières valeurs propres de chaque analyse réalisée. (Valeur propre du premier facteur d'analyse).	172
183	Figure 8.1.1 Effet d'échelle spatiale sur la VH en régime glaciaire, nivo-glaciaire et nival.	183
184	Figure 8.1.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH en régime nivo-pluvial et pluvio-nival.	184
185	Figure 8.1.3 Effet d'échelle spatiale sur la VH en régime pluvial.	185
186	Figure 8.2.1 Indices de VH en basses eaux sur la Durance (décembre à mars).	186
187	Figure 8.2.2 Effet d'échelle spatiale sur les indices de VH sur la Durance (mai à août).	187
189	Figure 8.3.1 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et sur la VHPf sur le Rhône et la Loire de janvier à avril.	189
190	Figure 8.3.2 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et la VHPf sur le Rhône et la Loire de juillet à octobre.	190
192	Figure 8.4.1 Effet d'échelle spatiale sur la VH sur des bassins versants de la Loire en hautes eaux (janvier à avril).	192
193	Figure 8.4.2 Effet d'échelle spatiale sur la VH pour des bassins versants de la Loire en basses eaux (juillet à octobre).	193
195	Figure 8.5.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion du régime glaciaire au régime nival.	195
195	Figure 8.5.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion.	195
196	Figure 8.5.3 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en régime pluvial.	196
197	Figure 8.6.1 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux (janvier à avril).	197
198	Figure 8.6.2 Effet d'échelle spatiale sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux (juillet à octobre).	198
202	Figure 9.1.1 Carte des 4 grandes hydro-écorégions sur le bassin versant de la Loire et position des centres de gravité des bassins versants d'une surface inférieure à 3 000 km ² .	202

205	Figure 9.2.1.1 VHPf (A) et VHPf (B) par hydro-écoulement sur le bassin versant de la Loire de janvier à avril.
206	Figure 9.2.1.2 VHPf et VHPf par hydro-écoulement sur le bassin versant de la Loire de juillet à octobre.
208	Figure 9.2.1 Indice mensuel de distorsion par hydro-écoulement et par saisons mensuelles sur le bassin versant de la Loire.
209	Figure 9.2.2.1 Indice mensuel de distorsion par hydro-écoulement de janvier à avril.
209	Figure 9.2.2.2 Indice mensuel de distorsion par hydro-écoulement de janvier à avril.
211	Figure 9.2.3.1 Débits médians mensuels par hydro-écoulement sur le bassin versant de la Loire.
211	Figure 9.2.3.2 Débits médians par hydro-écoulement de janvier à avril sur le bassin versant de la Loire.
212	Figure 9.2.3.3 Débits médians en l/s/km ² par hydro-écoulement de juillet à octobre sur le bassin versant de la Loire.
215	Figure 9.3.1.1 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPf en hautes eaux.
215	Figure 9.3.1.2 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPf en basses eaux.
216	Figure 9.3.1 Comparaison entre le débit spécifique et la VH.
218	Figure 9.3.3.1 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en hautes eaux.
218	Figure 9.3.3.2 Effet de la géologie sur l'indice mensuel de distorsion en basses eaux.

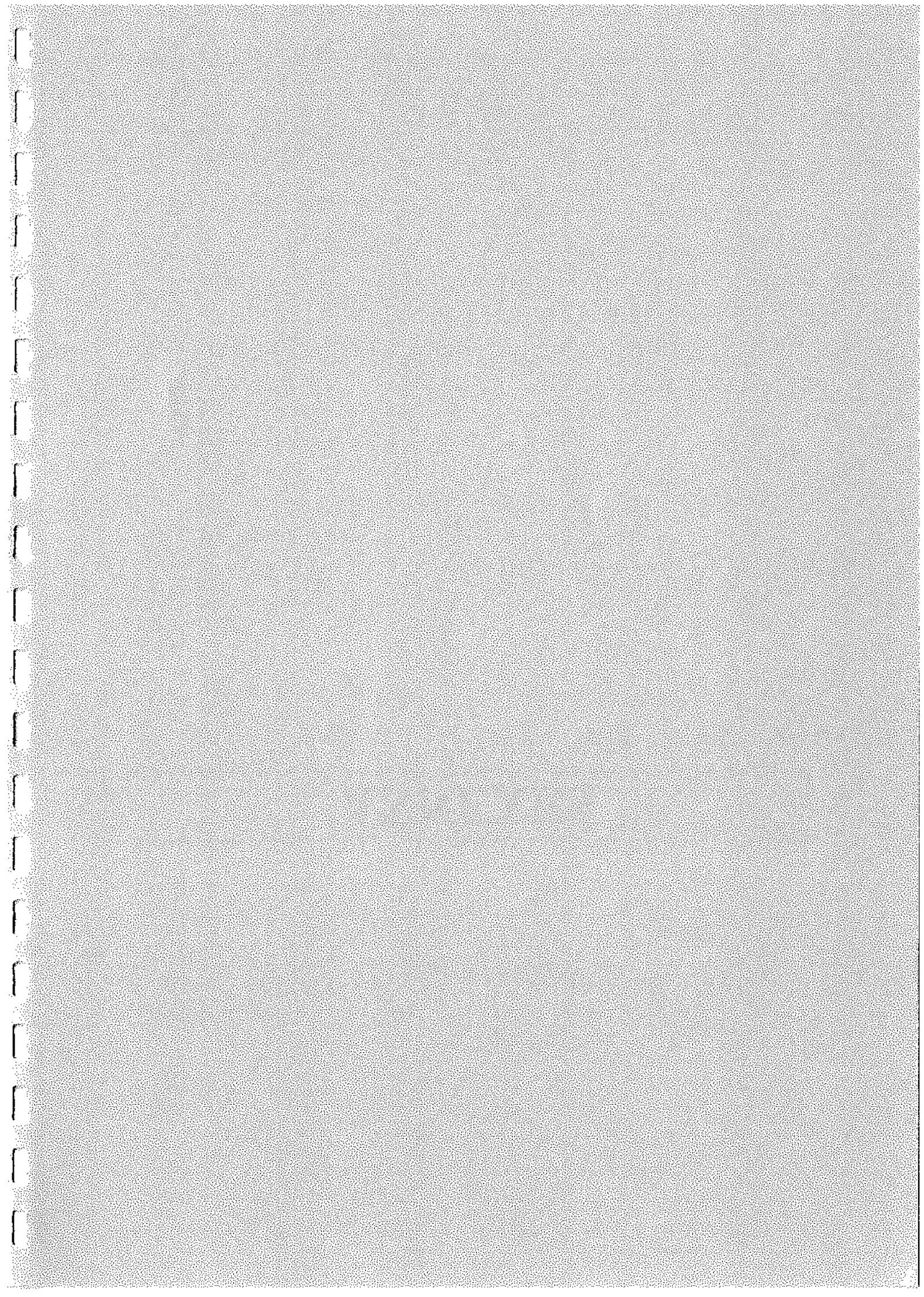
Liste des tableaux

Tableau 3.1.1.1 Classification des régimes hydrologiques (Edouard et Vivian (1984))	53
Tableau 3.1.4 Exemple de matrice de 55 stations, 12 mois par station et de 19 variables utilisées dans la recherche de descripteurs.	62
Tableau 4.1.3 : Influence de la mémoire glissante de M jours sur les différentes caractéristiques de ΔQ .	81
Tableau 4.1.4.1 : Influence de la mémoire glissante de M jours sur les valeurs de différentes caractéristiques des ΔQ .	83
Tableau 4.1.4.2 Influence de la mémoire glissante de M jours sur les valeurs de différents ΔQ classés.	84
Tableau 4.2.1 Influence du critère d'échantillonnage pour différentes caractéristiques des ΔQ calculées avec $M = 30$ jours et pour des bassins versants de moins de 2 000 km ² .	88
Tableau 4.2.2 Effet de la mémoire M sur les indices A et B et ΔQ [10] pour $M = 3$ et 10 jours.	89
Tableau 4.3 Comparaison des caractéristiques de crue avec les caractéristiques de ΔQ .	91
Tableau 5.1 Coefficients de détermination entre les indices A et B, l'écart-type, l'inter-décile et l'inter-quartile.	96
Tableau 5.2.1.1 Coefficients de détermination entre le coefficient de variation et le rapport de la moyenne et de la médiane avec les indices A et B.	98
Tableau 5.2.1.2 Coefficients de détermination entre l'inter-décile et l'inter-quartile rapportés à la médiane et le rapport du quartile supérieur et du quartile inférieur avec les indices A et B.	98
Tableau 5.2.1.3 Coefficients de détermination entre le moment d'ordre 3 et l'indice saisonnier avec les indices A et B.	98
Tableau 5.2.2.1 Coefficient de détermination entre des descripteurs utilisant le logarithme des débits et les indices A et B.	99
Tableau 5.2.2.2 Coefficient de détermination entre des descripteurs utilisant le logarithme des débits traduits et les indices A et B.	100
Tableau 5.3.1 Comparaison de la crue annuelle et de $Q[10]$ avec les débits classes.	101
Tableau 5.3.2 Corrélation entre l'indice saisonnier et l'indice mensuel de distorsion par régime.	102
Tableau 5.4.0 Comparaison de la crue annuelle et de $Q[10]$ avec les débits classes.	105
Tableau 5.4.3 Comparaison du gradex des débits avec deux différences de débits classes.	106
Tableau 5.5 Comparaison de l'indice B et de $\Delta Q[10]$ avec les débits classes.	108
Tableau 5.6 Comparisons entre les débits, les ΔQ et les débits classes.	110

140	Tableau 6.3.1 Nombre de niveaux de saisons selon les descripteurs et le régime.
141	Tableau 6.3.2 Nombre de changements de niveaux de VH pour chaque régime.
142	Tableau 6.3.3 Rapport entre saison de VH extrêmes pour chaque régime.
143	Tableau 6.3.4.1 Exemple de régime prévisible par contigence.
144	Tableau 6.3.4.2 Exemple de régime prévisible par constance.
144	Tableau 6.3.4.3 Exemple de régime intermédiaire.
189	Tableau 8.3.1 Effet d'échelle spatiale sur la VHF et la VHPF de janvier à avril sur le Rhône et la Loire.
190	Tableau 8.3.2 Effet d'échelle spatiale sur les indices A et B sur le Rhône et la Loire de juillet à octobre.
204	Tableau 9.1.2 Répartition des bassins versants par hydro-écocoréon et par surface.
205	Tableau 9.2.1.1 Valeurs de P des comparaisons de la VH entre hydro-écocoréon.
206	Tableau 9.2.1.2 Valeurs de P des comparaisons des VH entre hydro-écocoréons.
209	Tableau 9.2.2.1 Valeurs de P entre hydro-écocoréon pour l'indice mensuel de distorsion.
210	Tableau 9.2.2.2 Valeurs de P pour la comparaison de l'indice mensuel de distorsion entre hydroécocoréon.
212	Tableau 9.2.3.2 Valeurs de P des comparaisons du débit médian en hautes eaux et du débit médian inter-annuel par hydro-écocoréon.
213	Tableau 9.2.3.3 Valeurs de P des comparaisons du débit médian en basses eaux et du débit médian inter-annuel entre hydro-écocoréon.
215	Tableau 9.3.1.1 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPF par catégorie de bassins versants en hautes eaux.
215	Tableau 9.3.1.2 Effet de la géologie sur la VHF et sur la VHPF par catégorie de bassins versants en basses eaux.
219	Tableau 9.3.5.1 Variables influant la VH selon les hydro-écocoréons en hautes eaux.
220	Tableau 9.3.5.2 Variables influant la VH selon les hydro-écocoréons en basses eaux.



ANNEXES



LISTE DES ANNEXES

- Annexe 2.2.1 Rapport de la somme des carrés des écarts à la médiane des Q_x 20% aux Q_n 20% sur la somme totale des carrés des écarts à la médiane.
- Annexe 3.3.1.2 Liste des bassins versants et principales caractéristiques.
- Annexe 5.4.1 Comparaison de la crue annuelle avec les débits classés.
- Annexe 5.4.2 Comparaison de la crue décennale avec les débits classés.
- Annexe 5.5.1 Comparaison de l'indice B avec les débits classés.
- Annexe 5.5.2 Comparaison de ΔQ décennal avec les débits classés.
- Annexe 6 Valeur moyenne des descripteurs par mois et par régime.
- Annexe 6.1.2.1 Gradex des débits par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.1.2.2 Crue annuelle par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.1.4 Ecart-type des débits par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.1.5 Inter-décile par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.1.6 Inter-quartile par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.1.7 Indice saisonnier par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.1 Inter-décile rapporté à la médiane par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.2 Inter-quartile rapporté à la médiane par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.3 Rapport Q_x 25% sur Q_n 25% par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.4 Coefficient de variation par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.5 Ecart-type du logarithme des débits par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.6 Coefficient de variation du logarithme des débits par régime et par saisons mensuelles.
- Annexe 6.2.7 Ecart-type du logarithme des débits traduits par régime et par saisons mensuelles.

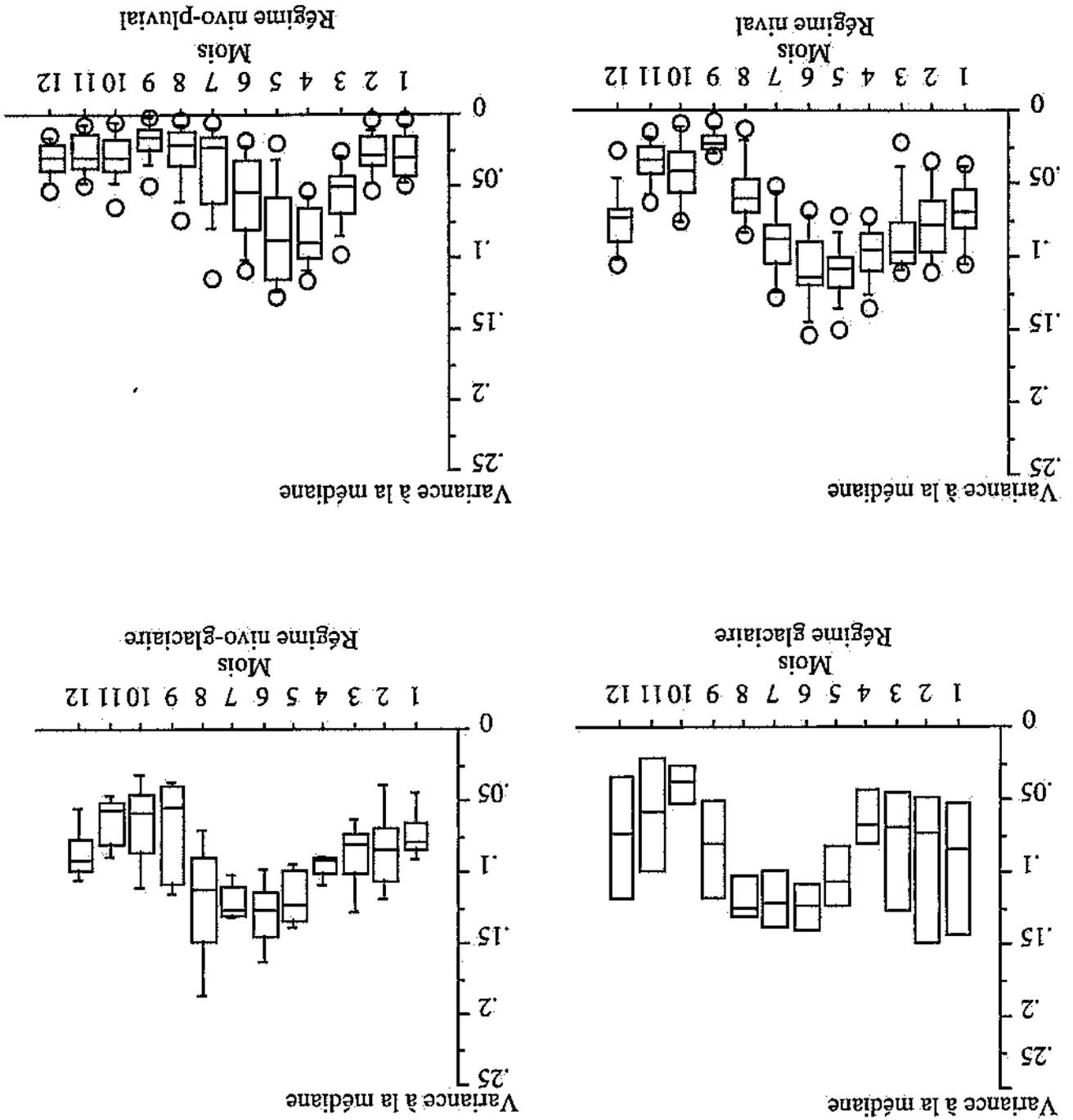
Annexe 6.2.8 Coefficient de variation du logarithme des débits traduits par régime et par saisons mensuelles.

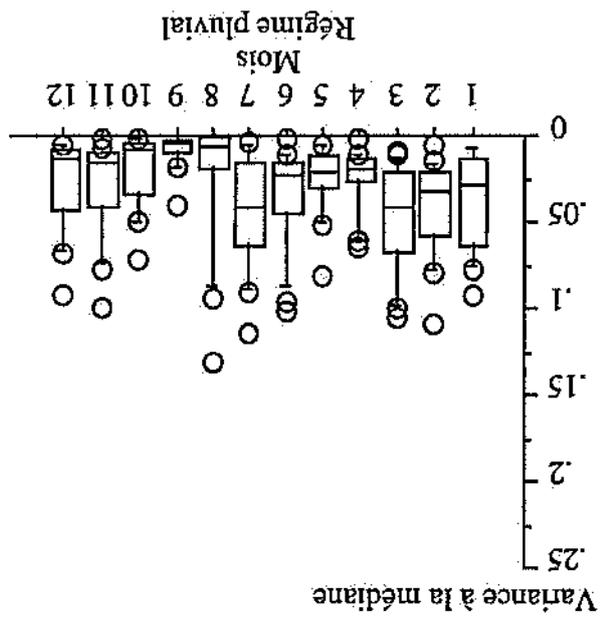
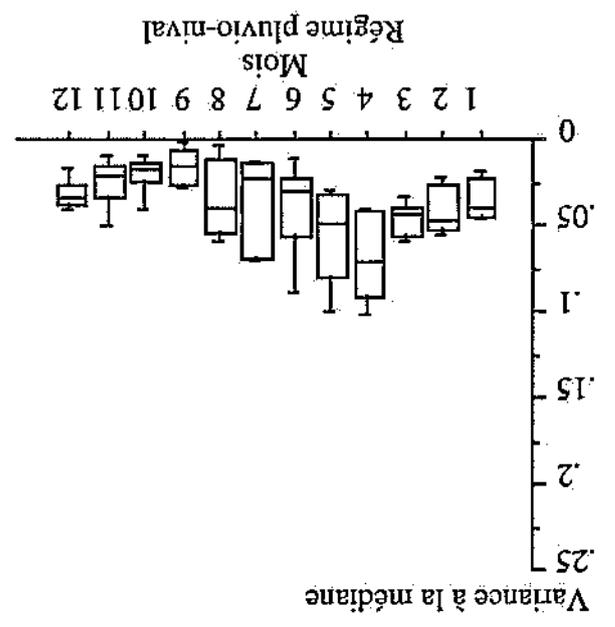
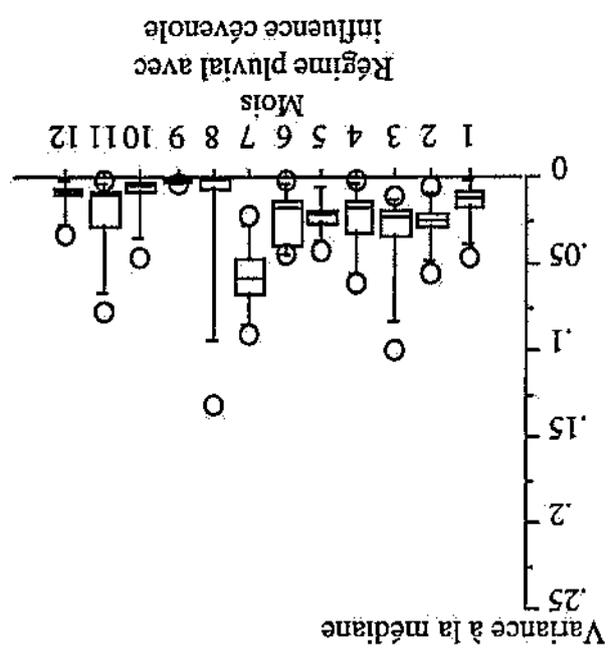
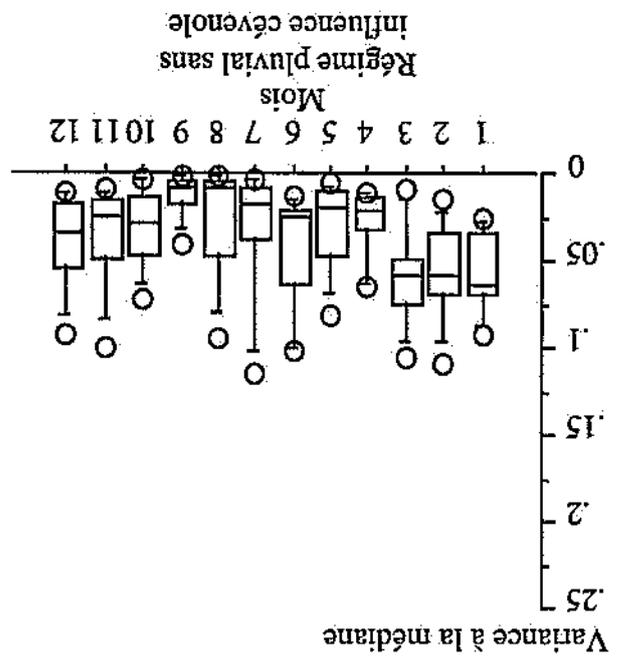
Annexe 6.2.9 Coefficient d'asymétrie des débits par régime et par saisons mensuelles.

Annexe 6.2.10 Moment d'ordre 3 des débits par régime et par saisons mensuelles.

Annexe 9 Liste des stations hydrométriques utilisées sur la Loire.

Annexe 221 VARIANCE À LA MÉDIANE DES DÉBITS
COMPRIS ENTRE QX20 % ET QX 80 %





Principales caractéristiques des bassins versants		du régime glaciaire au régime pluvial.										
Code hydro	Nom du cours d'eau + station	Altitude	Maxi	Mini	nartité	m3/s	/an	PA	S km2	Ans	Régime glaciaire	
											Station	Seuil
W000001	Isère à VAL D'ISERE	3605	1850	oui	6.3	3.3	1500	46	41			
V000201	Arve AU PONT DES FAVRANDS	4807	1010	oui	43	3.2	2100	205	42			
W100601	Avérole à AVEROLE	3752	2020	oui	10	2	1600	46	11			
O010511	Nesle DE CAP LONG	3210	2000	non	1.7	2.4	2000	5	37			
Régime nivo-glaciaire												
W271401	Romanche au LAC CHAMBON	3983	1040	oui	18	3.1	1250	220	41			
W211401	Sévérasse à VILLAR LOUBIERE	3669	1030	non	14	3.2	1300	133	22			
W011001	Isère à MOUTTERS NATUREL	3816	475	oui	80	2.3	1150	907	35			
W022401	Doron de Bozel à VIGNOTAN	3855	630	non	32	2.7	1400	330	43			
X013001	Durance à ROCHE DE RAME	4102	940	oui	80	2.6	1100	984	41			
W011001	Isère à MOUTTERS MODIFIÉ	3816	475	oui	60	2.2	1050	907	35			
Régime nivai												
V031401	Drance d'Abon à VACHERESSE	800	800	oui	30	3.4	1800	162	10			
Y622402	Tinée à BANCAIRON	3031	450	oui	37	3.1	1150	450	51			
W233521	Roizonne à LA ROCLETTE	2857	950	oui	7	3.2	1500	72	64			
W231401	Bonne à PT DE BATTANT	3564	650	oui	12	3	1200	143	33			
X001001	Durance à LA VACHETTE	3003	1320	oui	18	2.6	1000	207	23			
X010001	Durance à BRIANCON AVAL	3663	1200	oui	45	2.4	1050	548	29			
X031001	Durance à CLAPIERE (EMBRUN)	4102	790	oui	150	2.7	1000	2170	27			
X043401	Ubaye à BARCELONNETTE	3410	1130	oui	50	2.5	900	548	69			
X045401	Ubaye à ROCHE ROUSSE	3410	900	oui	80	2.5	850	946	29			
X200203	Verdon à COLMARS	3051	1230	oui	17	2.9	1100	158	13			
Régime nivo-pluvial												
W301501	Vence au PONT DE LOULE	2082	275	oui	8	2.7	1650	64	29			
V122501	Filière à ARGONAY	2004	450	oui	32	2.7	1600	140	15			
W331501	Méaudret à MEAUDRE	1655	1000	non	4.1	2.8	1550	74	16			
V151501	Guers Vif à ST CHRISTOPHE	2045	410	oui	30	3.1	1850	114	21			
W300501	Furon à ENGINS	1901	850	oui	4.2	3.2	1350	33	19			
W221502	Souloise au PT DE LA BAUME	2759	910	oui	6	3.2	1150	149	15			
W221503	Souloise à ST ETIENNE DEVOLUY	2709	1275	non	2.7	3.1	1150	42	12			
V121401	Fier à DINGY	2616	530	non	60	8.9	1700	222	69			
X211401	Issolle à ST ANDRE LES ALPES	2403	890	non	11.5	2.4	950	137	63			
V032501	Drance à MORZINE	2464	950	oui	9	2.1	1700	170	21			
V033401	Les Drance à BIOGES	2464	525	non	30	2.6	1500	495	34			
W275501	L'Eau Doile à PERNIERE	3464	715	oui	30	2	1700	172	36			
V014401	Gifre à TANINGES	3099	620	oui	80	2.1	2000	325	41			

Annexe 5.4.1 Comparaison de la crue annuelle avec des débits classés

Comparaison de la crue annuelle et de Qx 10%.

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus Q0
Régime	0,990±0,019	-9,51±2,27	0,98	11,4
Glaciaire	0,922±0,020	-3,37±1,19	0,97	5,57
Nivo-glaciaire	0,800±0,029	-4,29±1,73	0,87	11,2
Nival	0,957±0,019	-5,59±1,38	0,94	9,51
Nivo-pluvial	0,880±0,028	-2,71±1,55	0,94	6,94
Pluvial	0,584±0,026	0,413±1,22	0,72	11,1

Tableau 5.4.1.1 Comparaison de la crue annuelle avec Qx 10% par régime.

Comparaison de la crue annuelle et de Qx 20%.

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus Q0
Régime	1,18±0,022	7,79±2,17	0,98	11,1
Glaciaire	1,08±0,019	-3,53±0,994	0,98	4,65
Nivo-glaciaire	0,98±0,032	-3,21±1,51	0,89	9,92
Nival	1,20±0,023	1,48±1,24	0,95	9,36
Nivo-pluvial	1,21±0,045	-0,16±1,72	0,92	7,97
Pluvial	0,97±0,041	0,05±1,18	0,74	10,7

Tableau 5.4.1.2 Comparaison de la crue annuelle avec Qx 20% par régime.

Comparaison de la crue annuelle et de Qx 25%.

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus Q0
Régime	1,25±0,025	-6,87±2,29	0,98	11,6
Glaciaire	1,15±0,019	-3,37±0,923	0,98	4,34
Nivo-glaciaire	1,05±0,034	-2,61±1,50	0,89	9,93
Nival	1,29±0,029	4,26±1,41	0,93	10,9
Nivo-pluvial	1,34±0,056	0,85±1,85	0,91	8,69
Pluvial	1,15±0,050	0,07±1,22	0,72	11,1

Tableau 5.4.1.3 Comparaison de la crue annuelle avec Qx 25% par régime.

Ces corrélations sont plus ou moins faibles selon les régimes et les débits classés considérés. Comme les coefficients directs de régression changent d'un régime à l'autre, il n'est pas conseillé de calculer la crue annuelle à partir des débits classés.

Annexe 5.4.2 Comparaison de la crue décennale avec les débits classés

Comparaison entre la crue décennale et le Qx 3%.

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus Q10
Pluvial	1,75±0,043	-6,90±4,38	0,89	41,8
Pluvio-nival	1,02±0,085	32,5±8,12	0,71	34,8
Nivo-pluvial	1,37±0,051	16,5±6,22	0,82	32,9
Nival	1,02±0,049	14,7±4,19	0,79	25,8
Nivo-glaciaire	1,21±0,031	1,71±2,29	0,96	10,4
Glaciaire	1,26±0,050	0,998±7,74	0,93	38,3

Tableau 5.4.2.1 Comparaison de la crue décennale avec Qx 3% par régime.

Comparaison entre la crue décennale et le Qx 5%.

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus Q10
Pluvial	2,41±0,068	-9,56±5,05	0,86	47,7
Pluvio-nival	1,28±0,099	33,1±7,54	0,74	32,9
Nivo-pluvial	1,60±0,068	24,7±6,60	0,78	42,8
Nival	1,11±0,060	18,8±4,52	0,74	28,5
Nivo-glaciaire	1,31±0,039	2,57±2,60	0,94	11,8
Glaciaire	1,41±0,057	2,19±7,66	0,93	38,1

Tableau 5.4.2.2 Comparaison de la crue décennale avec Qx 5% par régime.

Ces corrélations sont plus ou moins faibles selon les régimes et les débits classés considérés. Comme les coefficients directs de régression changent d'un régime à l'autre, il n'est pas conseillé pas de calculer la crue décennale à partir des débits classés.

Annexe 5.5.1 Comparaison de l'indice B avec les débits classes

Comparaison de l'indice B et Qx 40%:

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus B
Glaciaire	0,765±	-2,56±	0,85	18,5
Nivo-glaciaire	0,519±	-3,12±	0,76	6,64
Nival	0,603±	-3,28±	0,73	8,17
Nivo-pluvial	0,663±	10,0±	0,57	13,9
Pluvio-nival	0,916±	1,89±	0,77	7,64
Pluvial	1,04±	-1,61±	0,57	9,27

Comparaison de l'indice B avec Qx 45%:

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus B
Glaciaire	0,796±	-1,95±	0,84	19,0
Nivo-glaciaire	0,544±	-3,07±	0,75	6,75
Nival	0,632±	-3,09±	0,72	8,32
Nivo-pluvial	0,689±	10,9±	0,55	14,2
Pluvio-nival	0,984±	2,32±	0,77	7,75
Pluvial	1,14±	-1,43±	0,55	9,50

Comparaison de l'indice B avec Qn 40%:

Régime	Coefficient	Coefficient D	R ²	σ résidus B
Glaciaire	0,876±0,061	-1,32±3,84	0,82	19,9
Nivo-glaciaire	0,589±0,045	-2,81±1,55	0,71	7,25
Nival	0,706±0,042	-2,91±1,28	0,70	8,59
Nivo-pluvial	0,745±0,054	12,2±1,73	0,51	14,8
Pluvio-nival	1,14±0,085	2,89±1,58	0,76	7,96
Pluvial	1,36±0,097	-0,96±1,14	0,49	10,1

Comparaison de l'indice B avec Qn 45%:

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus B
Glaciaire	0,923±0,066	-0,916±3,96	0,80	20,5
Nivo-glaciaire	0,612±0,049	-2,63±1,60	0,69	7,45
Nival	0,742±0,046	-2,73±1,31	0,69	8,75
Nivo-pluvial	0,773±0,064	12,9±1,75	0,49	15,2
Pluvio-nival	1,22±0,093	3,22±1,59	0,76	8,07
Pluvial	1,46±0,112	-0,378±1,18	0,46	10,4

Il est fortement déconseillé de calculer l'indice B avec les débits classes.

Annexe 5.5.2 Comparaison de ΔQ décennal avec des débits classés

Comparaison de ΔQ décennal avec Q_x 1%

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus ΔQ 10
Glaciaire	0,693±0,045	-5,96±8,81	0,83	42,4
Nivo-glaciaire	0,639±0,032	-6,89±2,85	0,85	12,5
Nival	0,582±0,028	1,97±3,27	0,78	19,9
Nivo-pluvial	0,750±0,033	6,68±6,21	0,76	38,4
Pluvio-nival	0,526±0,054	25,9±8,08	0,61	32,9
Pluvial	0,755±0,025	1,89±4,92	0,82	49,6

Comparaison de ΔQ décennal avec Q_x 3%

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus ΔQ 10
Glaciaire	0,841±0,058	-0,190±8,93	0,82	44,2
Nivo-glaciaire	0,724±0,041	-3,89±3,04	0,81	13,8
Nival	0,696±0,050	8,95±4,28	0,62	26,5
Nivo-pluvial	1,08±0,057	15,3±6,94	0,69	43,8
Pluvio-nival	0,824±0,072	26,9±6,89	0,69	29,5
Pluvial	1,60±0,043	-13,6±4,48	0,87	42,7

Comparaison de ΔQ décennal avec Q_x 10%

Régime	Coefficient C	Coefficient D	R ²	σ résidus ΔQ 10
Glaciaire	1,05±0,086	5,83±10,0	0,76	50,3
Nivo-glaciaire	0,833±0,059	-0,140±3,55	0,73	16,5
Nival	0,830±0,082	17,5±4,92	0,46	31,4
Nivo-pluvial	1,35±0,113	45,5±8,26	0,48	57,2
Pluvio-nival	1,37±0,126	31,7±6,81	0,67	30,5
Pluvial	3,21±0,151	-8,37±7,20	0,69	65,8

Ces corrélations sont plus ou moins fiables selon les régimes et les débits classés considérés. Comme les coefficients directeurs des droites de régression changent d'un régime à l'autre, il n'est pas conseillé de calculer ΔQ décennal à partir des débits classés.

Valeur moyenne des descripteurs par mois et par régime

Moyenne, écart-typé et coefficient de variation de chaque descripteur par régime

Rapport entre saison extrêmes pour chaque descripteur.

Indice A (paragraphe 6.1.1.1)

Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève	Cévenol
1	5,77	3,85	10,60	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
2	5,77	3,85	10,60	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
3	5,77	3,85	10,60	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
4	5,77	21,10	22,00	43,10	24,30	55,60	18,10	50,70
5	41,30	21,10	22,00	43,10	24,30	55,60	18,10	50,70
6	41,30	21,10	22,00	43,10	24,30	55,60	18,10	50,70
7	41,30	14,40	10,60	43,10	13,60	15,80	7,84	10,80
8	41,30	14,40	10,60	43,10	13,60	15,80	7,84	10,80
9	41,30	14,40	28,90	43,10	24,30	15,80	7,84	50,70
10	41,30	14,40	28,90	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
11	5,77	14,40	28,90	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
12	5,77	3,85	10,60	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
Moyen	23,54	12,56	18,03	43,10	31,67	42,33	15,54	72,70
Ecart	18,55	6,76	8,20	0,00	12,07	20,08	4,79	39,64
C.V.	0,79	0,54	0,46	0,00	0,38	0,47	0,31	0,55
Maxi	41,30	21,10	28,90	43,10	42,60	55,60	18,10	108,00
Mini	5,77	3,85	10,60	43,10	13,60	15,80	7,84	10,80
Rapp	7,16	5,48	2,73	1,00	3,13	3,52	2,31	10,00

Indice B (paragraphe 6.1.1.2)

Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève	Cévenol
1	4,96	1,96	7,04	23,90	22,90	16,10	11,80	22,10
2	4,96	1,96	7,04	23,90	22,90	16,10	11,80	22,10
3	4,96	1,96	7,04	23,90	22,90	16,10	11,80	22,10
4	4,96	11,90	19,90	40,90	22,90	16,10	7,14	22,10
5	46,90	39,50	31,50	40,90	22,90	16,10	7,14	22,10
6	99,40	39,50	31,50	40,90	7,23	2,33	7,14	2,25
7	99,40	22,40	22,40	23,90	7,23	2,33	1,33	2,25
8	99,40	22,40	22,40	23,90	7,23	2,33	1,33	2,25
9	46,90	11,90	19,90	23,90	7,23	2,33	1,33	2,25
10	4,96	11,90	19,90	23,90	7,23	16,10	11,80	22,10
11	4,96	1,96	7,04	23,90	22,90	16,10	11,80	22,10
12	4,96	1,96	7,04	23,90	22,90	16,10	11,80	22,10
Moyen	35,56	14,11	16,89	28,15	16,37	11,51	8,02	15,48
Ecart	42,45	14,21	9,46	7,94	8,18	6,95	4,55	10,01
C.V.	1,19	1,01	0,56	0,28	0,50	0,60	0,57	0,65
Maxi	99,40	39,50	31,50	40,90	22,90	16,10	11,80	22,10
Mini	4,96	1,96	7,04	23,90	7,23	2,33	1,33	2,25
Rapp	20,04	20,15	4,47	1,71	3,17	6,91	8,87	9,82

Grades des débits (paragraphe 6.1.2.1)																	
Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvial	Sans cève	Cévenol										
1	7,31	6,24	9,99	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
2	7,31	6,24	9,99	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
3	7,31	6,24	9,99	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
4	7,31	15,10	20,20	44,90	29,50	58,90	19,40	55,70									
5	49,70	24,90	29,40	44,90	29,50	58,90	19,40	55,70									
6	49,70	24,90	29,40	44,90	15,70	18,20	9,21	55,70									
7	49,70	24,90	29,40	44,90	15,70	18,20	9,21	9,38									
8	49,70	15,10	20,20	44,90	15,70	18,20	9,21	9,38									
9	49,70	24,90	29,40	44,90	29,50	58,90	19,40	55,70									
10	49,70	24,90	29,40	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
11	7,31	15,10	29,40	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
12	7,31	6,24	9,99	44,90	44,50	58,90	19,40	113,00									
Moyen	28,51	16,23	21,40	44,90	33,55	45,33	16,00	76,63									
Ecart	22,14	8,19	8,75	0,00	12,62	20,53	5,14	41,58									
C.V.	0,78	0,50	0,41	0,00	0,38	0,45	0,32	0,54									
Maxi	49,70	24,90	29,40	44,90	44,50	58,90	19,40	55,70									
Mini	7,31	6,24	9,99	44,90	15,70	18,20	9,21	9,38									
Rapp	6,80	3,99	2,94	1,00	2,83	3,24	2,11	5,94									
Crue annuelle (paragraphe 6.1.2.2)																	
Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvial	Sans cève	Cévenol										
1	8,73	14,00	16,70	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
2	8,73	14,00	16,70	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
3	8,73	14,00	16,70	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
4	8,73	34,30	28,00	84,00	42,60	29,30	17,50	36,70									
5	65,20	84,10	72,70	84,00	42,60	29,30	17,50	36,70									
6	195,00	84,10	72,70	84,00	42,60	6,75	17,50	6,23									
7	195,00	84,10	72,70	41,80	16,30	6,75	5,20	6,23									
8	195,00	84,10	28,00	41,80	16,30	6,75	5,20	6,23									
9	65,20	34,30	28,00	41,80	16,30	6,75	5,20	6,23									
10	65,20	34,30	28,00	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
11	8,73	14,00	28,00	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
12	8,73	14,00	16,70	41,80	42,60	29,30	23,70	36,70									
Moyen	69,42	42,44	35,41	52,35	36,03	21,78	17,53	26,54									
Ecart	80,90	32,10	23,38	19,71	12,28	11,38	8,02	15,37									
C.V.	1,17	0,76	0,66	0,38	0,34	0,52	0,46	0,58									
Maxi	195,00	84,10	72,70	84,00	42,60	29,30	23,70	36,70									
Mini	8,73	14,00	16,70	41,80	16,30	6,75	5,20	6,23									
Rapp	22,34	6,01	4,35	2,01	2,61	4,34	4,56	5,89									

Mois		Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève	Cévenol
Inter-décile (paragraphe 6.1.5)									
1	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
2	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
3	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
4	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
5	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
6	156,20	65,60	76,30	71,60	20,90	8,58	9,09	12,50	12,50
7	156,20	65,60	76,30	71,60	20,90	8,58	9,09	12,50	12,50
8	89,20	43,10	17,90	42,30	20,90	8,58	9,09	12,50	12,50
9	89,20	43,10	17,90	42,30	20,90	8,58	9,09	12,50	12,50
10	14,10	43,10	38,60	42,30	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
11	14,10	15,80	38,60	42,30	46,10	28,90	26,50	51,90	51,90
12	14,10	15,80	17,90	42,30	46,10	28,90	26,50	51,90	51,90
Moyen									
	56,56	37,35	34,53	49,63	37,70	22,13	20,70	46,30	46,30
Ecart	58,06	20,84	22,17	13,69	12,71	10,25	8,78	26,47	26,47
C.V.	1,03	0,56	0,64	0,28	0,34	0,46	0,42	0,57	0,57
Maxi	156,20	65,80	76,30	71,60	46,10	28,90	26,50	74,50	74,50
Mini	14,10	15,80	17,90	42,30	20,90	8,58	9,09	12,50	12,50
Rapp	11,08	4,16	4,26	1,69	2,21	3,37	2,92	5,96	5,96
Inter-quartile (paragraphe 6.1.6)									
1	6,31	7,61	8,10	17,40	20,70	17,10	11,40	29,40	29,40
2	6,31	7,61	8,10	17,40	20,70	17,10	11,40	29,40	29,40
3	6,31	7,61	8,10	17,40	20,70	17,10	11,40	29,40	29,40
4	6,31	22,40	18,80	35,10	20,70	17,10	11,40	20,10	20,10
5	45,90	34,90	39,70	35,10	20,70	17,10	11,40	20,10	20,10
6	81,60	34,90	39,70	35,10	8,32	4,35	3,70	5,08	5,08
7	81,60	34,90	18,80	17,40	8,32	4,35	3,70	5,08	5,08
8	45,90	22,40	18,80	17,40	8,32	4,35	3,70	5,08	5,08
9	45,90	22,40	18,80	17,40	8,32	4,35	3,70	5,08	5,08
10	6,31	22,40	18,80	17,40	20,70	17,10	11,40	20,10	20,10
11	6,31	7,61	8,10	17,40	20,70	17,10	11,40	20,10	20,10
12	6,31	7,61	8,10	17,40	20,70	17,10	11,40	20,10	20,10
Moyen									
	28,76	19,36	17,83	21,83	16,57	12,85	8,83	17,42	17,42
Ecart	30,73	11,41	11,54	8,27	6,25	6,43	3,88	9,59	9,59
C.V.	1,07	0,59	0,65	0,38	0,38	0,50	0,44	0,55	0,55
Maxi	81,60	34,90	39,70	35,10	20,70	17,10	11,40	29,40	29,40
Mini	6,31	7,61	8,10	17,40	8,32	4,35	3,70	5,08	5,08
Rapp	12,93	4,59	4,90	2,02	2,49	3,93	3,08	5,79	5,79

Mois		Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève	Cévenol
Indice saisonnier (paragraphe 6.1.7)									
1	0,12	0,44	0,44	0,75	1,21	1,33	1,33	1,29	1,53
2	0,12	0,44	0,44	0,75	1,57	1,57	1,72	1,7	1,53
3	0,12	0,44	0,44	1,19	1,57	1,33	1,29	1,29	1,53
4	0,12	0,8	1,21	1,79	1,57	1,33	1,29	1,21	1,21
5	0,77	1,63	2,3	1,79	1,21	1,19	1,29	1,21	1,21
6	1,7	2,11	2,3	1,19	0,79	0,75	0,75	0,48	0,48
7	2,63	2,11	1,21	0,75	0,32	0,35	0,39	0,22	0,22
8	2,63	1,63	0,44	0,75	0,32	0,35	0,39	0,22	0,22
9	1,7	0,8	0,44	0,75	0,32	0,35	0,39	0,48	0,48
10	0,77	0,8	0,75	0,75	0,79	0,75	0,75	1,21	1,21
11	0,12	0,8	0,75	0,75	1,21	1,19	1,29	1,21	1,21
12	0,12	0,44	0,44	0,75	1,21	1,19	1,29	1,21	1,21
Moyen	0,91	1,04	0,93	1,00	1,01	0,99	1,01	1,00	1,00
Ecart	1,01	0,65	0,72	0,42	0,51	0,47	0,46	0,50	0,50
C.V.	1,11	0,63	0,77	0,42	0,50	0,48	0,46	0,50	0,50
Maxi	2,63	2,11	2,30	1,79	1,57	1,72	1,70	1,53	1,53
Mini	0,12	0,44	0,44	0,75	1,21	0,35	0,39	0,22	0,22
Rap	21,92	4,80	5,23	2,39	1,30	4,91	4,36	6,95	6,95
Inter-décile rapporté à la médiane (paragraphe 6.2.1)									
1	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	4,51	2,62	5,06	2,89
2	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
3	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
4	2,38	1,31	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
5	2,38	1,31	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
6	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
7	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
8	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
9	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	4,51	3,72	5,06	5,06
10	1,11	1,31	1,95	2,75	3,79	4,51	3,72	9,81	9,81
11	1,11	0,86	1,95	2,75	3,79	4,51	3,72	5,06	5,06
12	1,11	0,86	1,25	2,75	3,79	4,51	2,62	2,89	2,89
Moyen	1,32	0,97	1,37	2,75	2,94	3,73	2,99	4,01	4,01
Ecart	0,51	0,21	0,28	0,00	0,65	0,68	0,55	2,14	2,14
C.V.	0,39	0,22	0,21	0,00	0,22	0,18	0,19	0,53	0,53
Maxi	2,38	1,31	1,95	2,75	3,79	4,51	3,72	9,81	9,81
Mini	1,11	0,86	1,25	2,75	2,51	3,17	2,62	2,89	2,89
Rapp	2,14	1,52	1,56	1,00	1,51	1,42	1,42	3,39	3,39

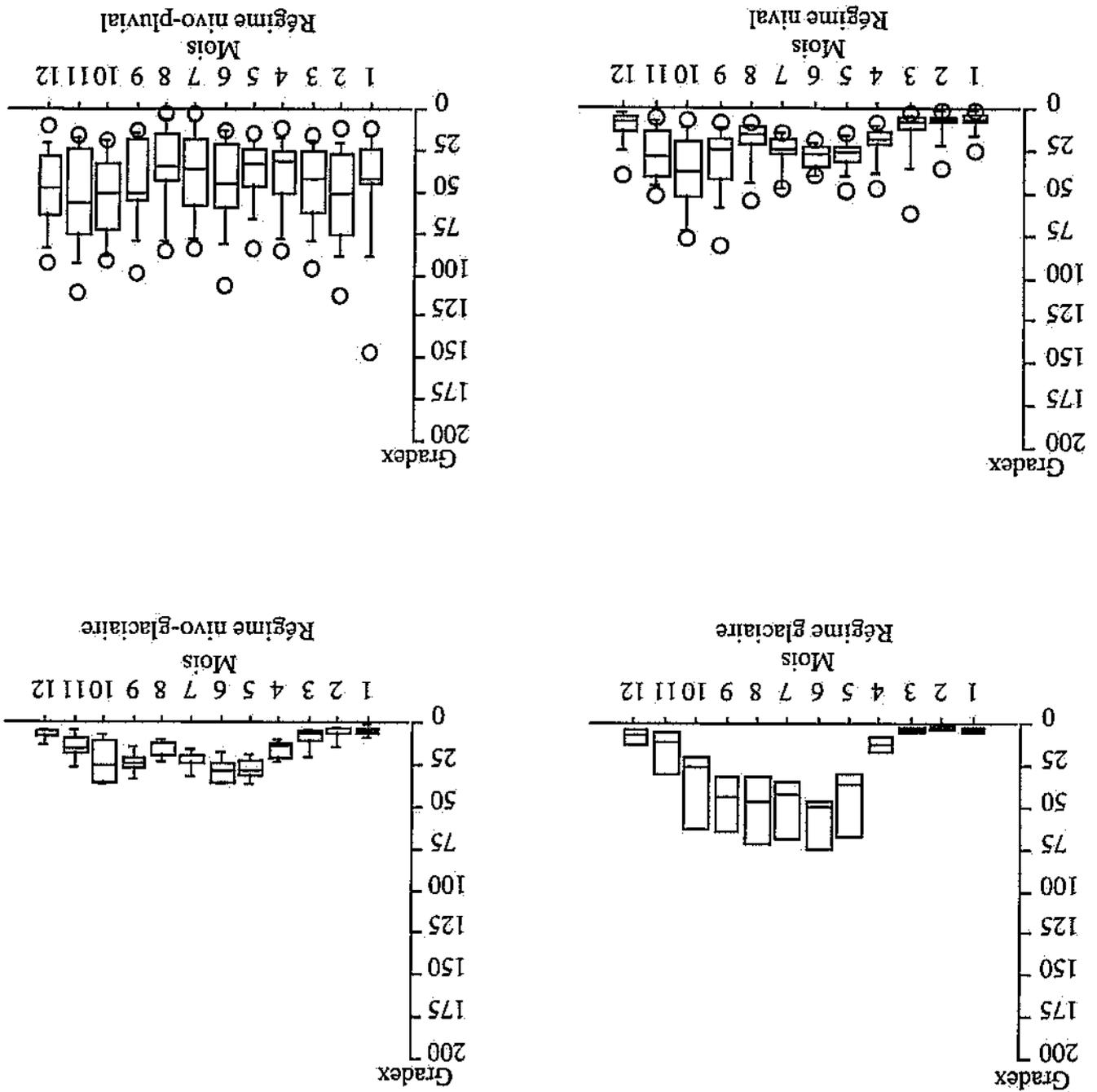
Mois		Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvia	Pluio-niva	Pluvial	Sans cève	Cévenol
Inter-quartile rapporté à la médiane (paragraphe 6.2.2)									
1	0,53	0,41	0,52	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
2	0,53	0,41	0,52	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
3	0,53	0,59	0,69	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
4	1,13	0,59	0,69	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
5	1,13	0,59	0,69	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
6	0,53	0,59	0,69	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
7	0,53	0,41	0,69	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
8	0,53	0,41	0,52	1,17	1,12	1,14	1,14	1,42	1,12
9	0,53	0,41	0,52	1,17	1,52	1,63	1,63	1,42	1,68
10	0,53	0,59	0,86	1,61	1,52	1,63	1,63	1,42	2,57
11	0,53	0,41	0,86	1,17	1,52	1,63	1,63	1,42	1,68
12	0,53	0,41	0,52	1,17	1,52	1,63	1,63	1,09	1,68
Moyen	0,63	0,49	0,65	1,21	1,25	1,30	1,30	0,17	1,43
Ecart	0,24	0,10	0,13	0,13	0,20	0,25	0,25	0,17	0,46
C.V.	0,38	0,20	0,20	0,11	0,16	0,19	0,19	0,14	0,33
Maxi	1,13	0,59	0,86	1,61	1,52	1,63	1,63	1,42	2,57
Mini	0,53	0,41	0,52	1,17	1,12	1,14	1,14	1,09	1,12
Rapp	2,12	1,46	1,65	1,38	1,36	1,43	1,43	1,30	2,29
Coefficient de variation (paragraphe 6.2.4)									
1	0,48	0,33	0,51	1,26	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
2	0,48	0,33	0,51	1,26	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
3	0,48	0,47	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
4	0,77	0,47	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
5	0,77	0,47	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
6	0,48	0,33	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
7	0,48	0,33	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,73	1,28
8	0,48	0,33	0,51	1,26	1,10	2,59	2,59	1,73	3,58
9	0,48	0,47	0,87	1,52	1,72	2,59	2,59	1,73	3,58
10	0,77	0,47	0,87	1,52	1,72	2,59	2,59	1,73	3,58
11	0,48	0,47	0,87	1,26	1,72	1,33	1,33	1,10	1,94
12	0,48	0,33	0,51	1,26	1,10	1,33	1,33	1,10	1,94
Moyen	0,55	0,40	0,60	1,14	1,26	1,65	1,65	1,31	2,02
Ecart	0,13	0,07	0,17	0,27	0,29	0,59	0,59	0,32	1,03
C.V.	0,24	0,18	0,28	0,23	0,23	0,36	0,36	0,24	0,51
Maxi	0,77	0,47	0,87	1,52	1,72	2,59	2,59	1,73	3,58
Mini	0,48	0,33	0,51	0,87	1,10	1,33	1,33	1,10	1,28
Rapp	1,60	1,41	1,71	1,75	1,56	1,95	1,95	1,57	2,80

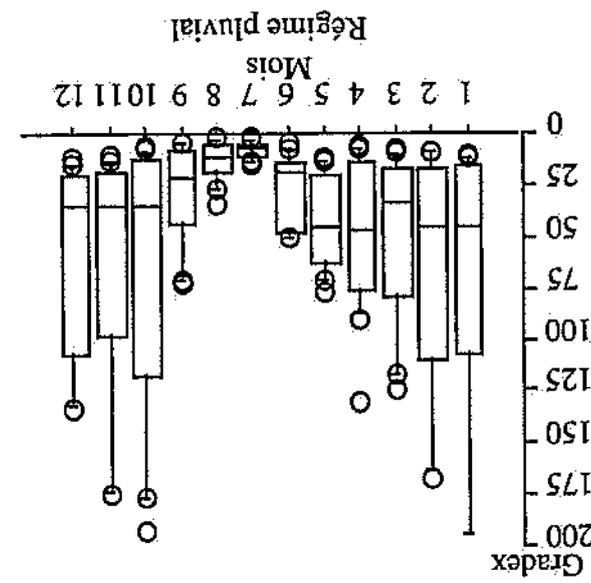
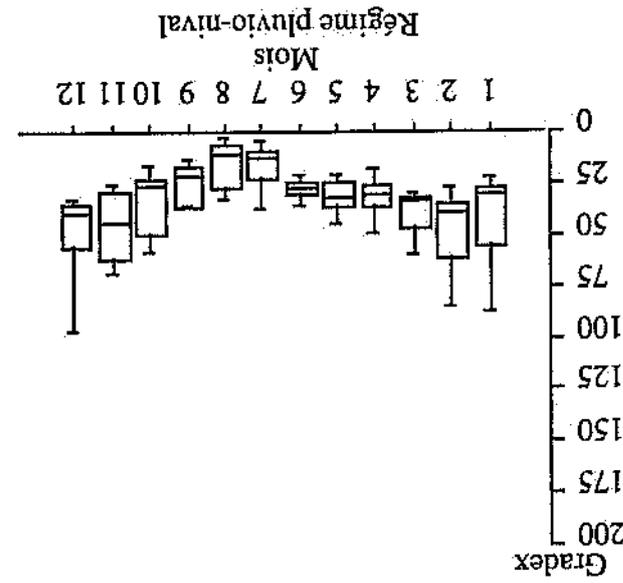
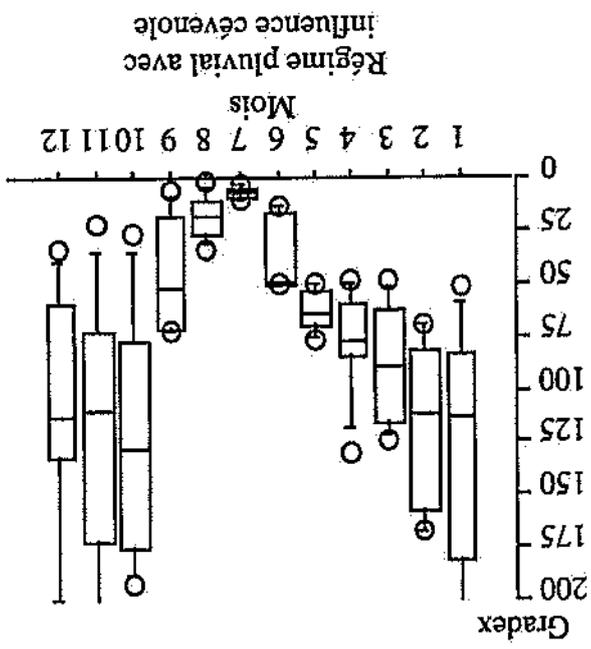
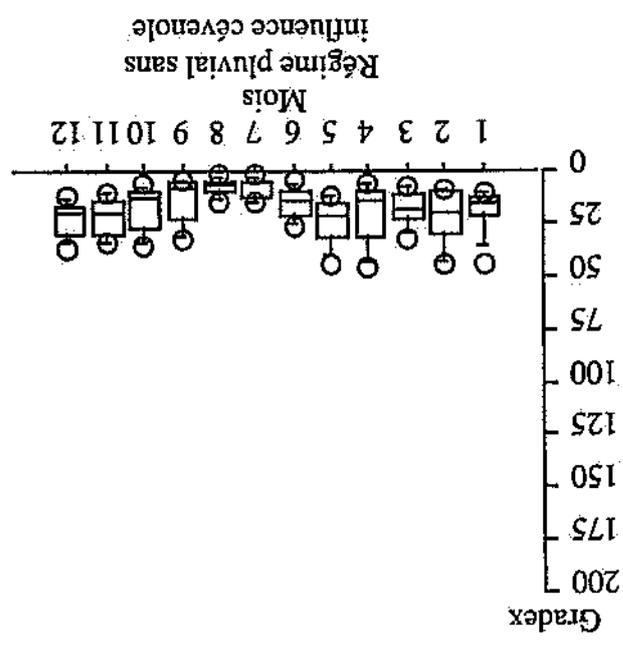
Ecart-typé du logarithme des débits		(paragraphe 6.2.5)		Ecart-typé du logarithme des débits		(paragraphe 6.2.6)	
Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-nival	Pluvial	Sans cève
1	0,41	0,31	0,12	0,77	0,79	1,04	0,79
2	0,41	0,31	0,12	0,77	0,79	0,83	0,79
3	0,41	0,31	0,47	0,77	0,79	0,83	0,79
4	0,66	0,42	0,47	0,66	0,79	0,83	0,79
5	0,66	0,42	0,47	0,66	0,79	0,83	0,79
6	0,66	0,31	0,47	0,66	0,79	0,83	0,79
7	0,41	0,31	0,47	0,66	0,79	0,83	0,95
8	0,41	0,31	0,47	0,66	0,79	0,83	0,95
9	0,41	0,31	0,47	0,77	1,04	1,04	0,95
10	0,41	0,42	0,62	0,93	1,04	1,04	0,95
11	0,41	0,42	0,62	0,93	1,04	1,04	0,95
12	0,41	0,31	0,47	0,77	1,04	1,04	0,79
Moyen	0,48	0,35	0,43	0,75	0,88	0,92	0,86
Ecart	0,12	0,06	0,13	0,10	0,12	0,11	0,09
C.V.	0,24	0,16	0,30	0,14	0,14	0,12	0,10
Maxi	0,66	0,42	0,62	0,93	0,79	1,04	0,95
Mini	0,41	0,31	0,12	0,66	1,04	0,83	0,79
Rapp	1,60	1,35	5,17	1,41	0,76	1,25	1,21
1	0,19	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
2	0,19	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
3	0,19	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
4	0,33	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
5	0,19	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
6	0,10	0,15	0,11	0,33	0,54	0,44	0,62
7	0,10	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
8	0,10	0,15	0,16	1,52	0,54	0,76	0,62
9	0,19	0,15	0,16	1,52	2,13	0,76	0,62
10	0,19	0,15	0,22	0,33	0,54	0,44	0,62
11	0,19	0,15	0,22	0,33	0,54	0,44	0,62
12	0,19	0,15	0,16	0,33	0,54	0,44	0,62
Moyen	0,18	0,15	0,16	0,53	0,67	0,49	0,62
Ecart	0,06	0,00	0,03	0,48	0,48	0,13	0,00
C.V.	0,36	0,00	0,19	0,91	0,71	0,27	0,00
Maxi	0,33	0,15	0,22	1,52	2,13	0,76	0,62
Mini	0,10	0,15	0,11	0,33	0,54	0,44	0,62
Rapp	3,24	1,00	1,98	4,59	3,94	1,75	1,00

Coefficient de variation du logarithme néperien des débits spécifiques translatés							
(paragraphe 6.2.8)							
Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève
Cévenol							
1	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
2	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
3	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
4	0,20	0,13	0,14	0,18	0,29	0,32	0,30
5	0,20	0,10	0,14	0,18	0,29	0,32	0,30
6	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
7	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
8	0,14	0,13	0,14	0,27	0,47	0,52	0,69
9	0,14	0,13	0,14	0,36	0,47	0,52	0,69
10	0,14	0,10	0,20	0,36	0,47	0,52	0,69
11	0,14	0,10	0,20	0,36	0,29	0,52	0,69
12	0,14	0,10	0,14	0,27	0,29	0,32	0,30
Moyen	0,15	0,11	0,15	0,28	0,34	0,38	0,46
Ecart	0,02	0,01	0,02	0,06	0,08	0,10	0,20
C.V.	0,17	0,13	0,16	0,22	0,24	0,27	0,43
Maxi	0,20	0,13	0,20	0,36	0,47	0,52	0,69
Mini	0,14	0,10	0,14	0,18	0,29	0,32	0,30
Rapp	1,44	1,29	1,44	1,98	1,59	1,66	2,27
Ecart-type du logarithme des débits translatés (paragraphe 6.2.7)							
Mois	Glaciaire	Nivo-glac	Nival	Nivo-pluvial	Pluvio-niva	Pluvial	Sans cève
Cévenol							
1	0,39	0,31	0,34	0,66	0,69	0,84	0,65
2	0,39	0,31	0,34	0,66	0,69	0,70	0,65
3	0,39	0,31	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
4	0,62	0,44	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
5	0,62	0,44	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
6	0,62	0,44	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
7	0,39	0,31	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
8	0,39	0,31	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
9	0,39	0,31	0,45	0,80	0,85	0,84	0,65
10	0,39	0,31	0,53	0,80	0,85	0,84	0,81
11	0,39	0,31	0,53	0,80	0,85	0,84	0,81
12	0,39	0,31	0,45	0,80	0,85	0,84	0,81
Moyen	0,45	0,34	0,44	0,71	0,74	0,76	0,69
Ecart	0,11	0,06	0,05	0,07	0,08	0,07	0,07
C.V.	0,24	0,17	0,11	0,10	0,11	0,09	0,11
Maxi	0,62	0,44	0,53	0,80	0,85	0,84	0,81
Mini	0,39	0,31	0,45	0,66	0,69	0,70	0,65
Rapp	1,60	1,40	1,19	1,22	1,23	1,20	1,24

ANNEXE 6.1.2.1 GRADEX DES DEBITS PAR RÉGIME

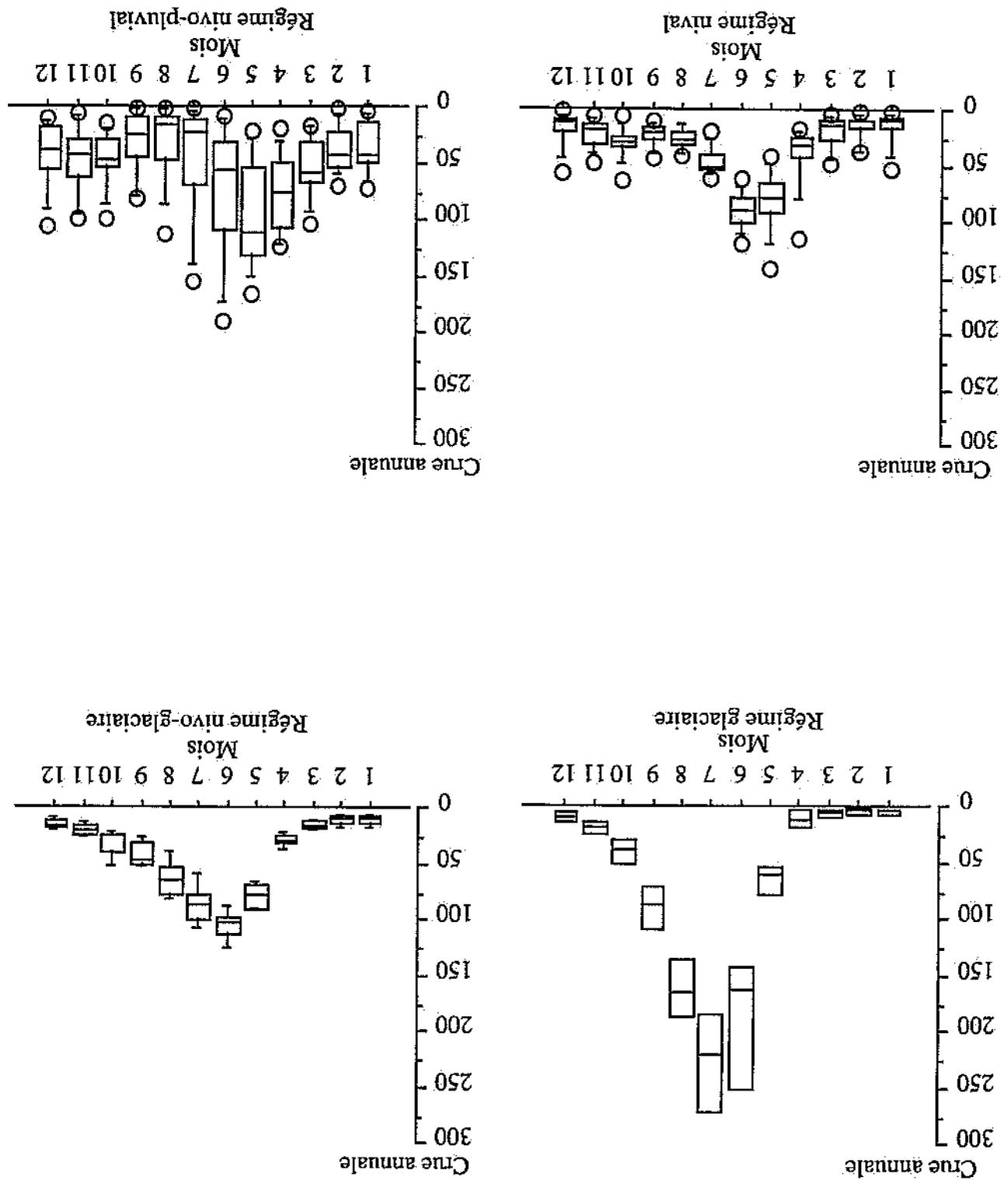
Le gradex des débits exprime un potentiel de crue pour des périodes de retour supérieures à l'année. Les crues ont été calculées en débits spécifiques, ce qui rend comparables les gradex des débits.

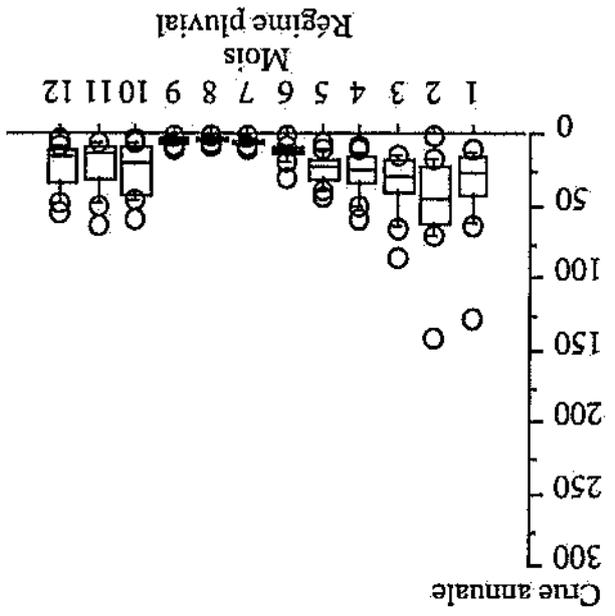
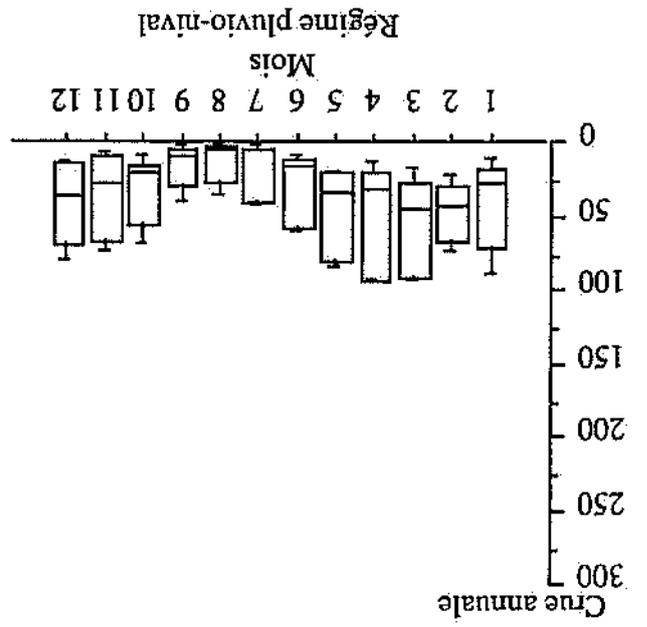
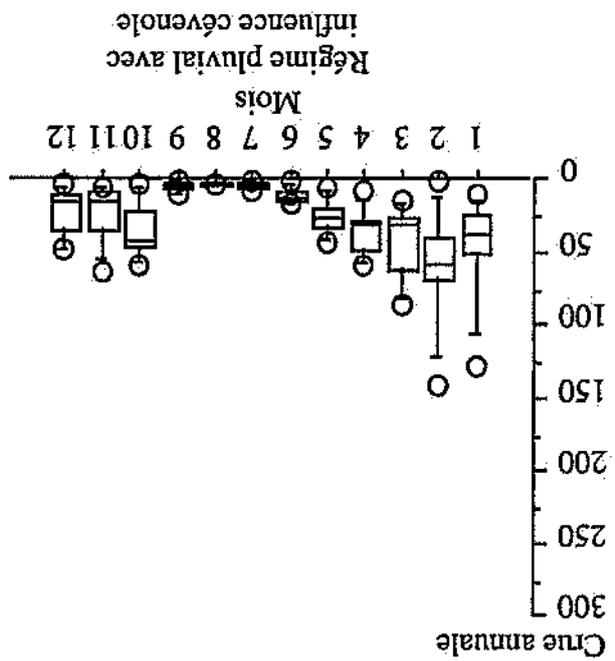
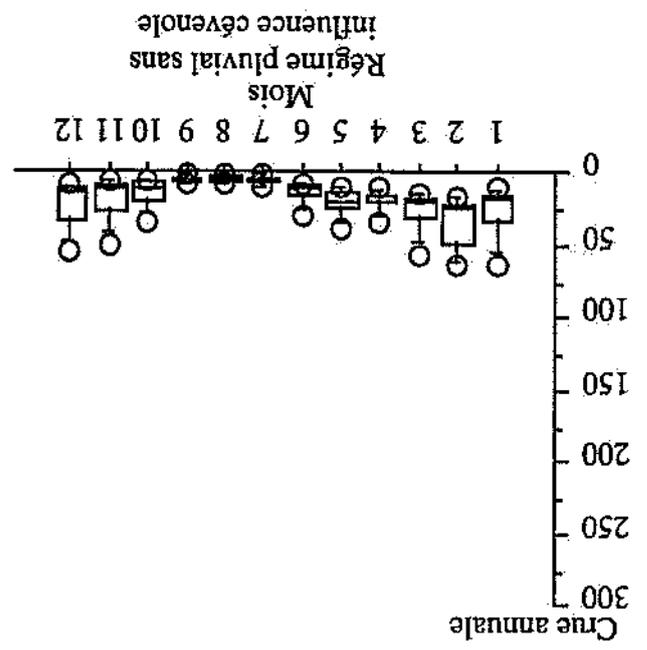




ANNEXE 6.1.2.2 CRUE ANNUALE PAR REGIME ET PAR MOIS

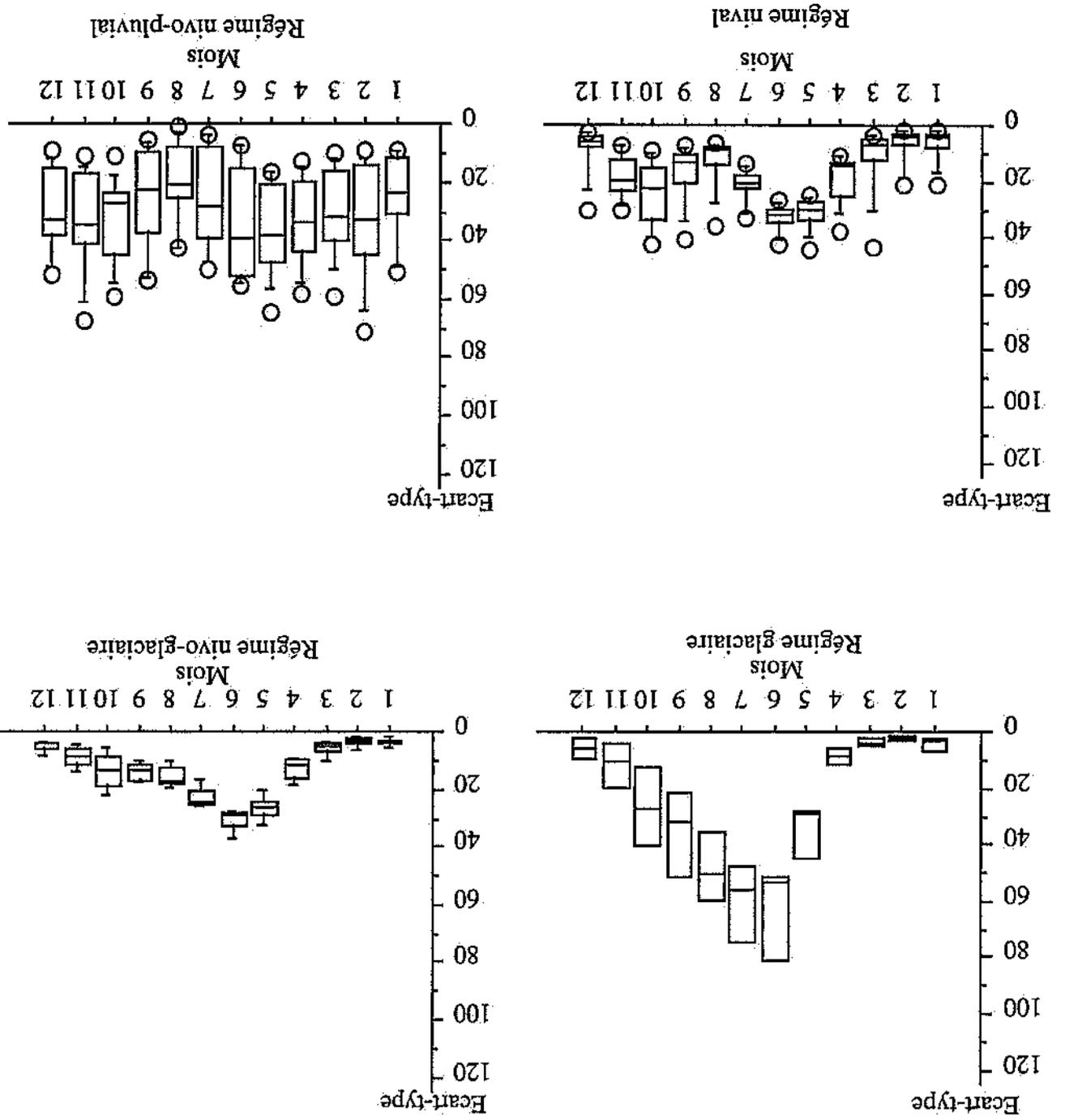
Il s'agit de la crue de période de retour moyenne un an par régime et par mois
 Les valeurs de crue sont exprimées en l/s/km²

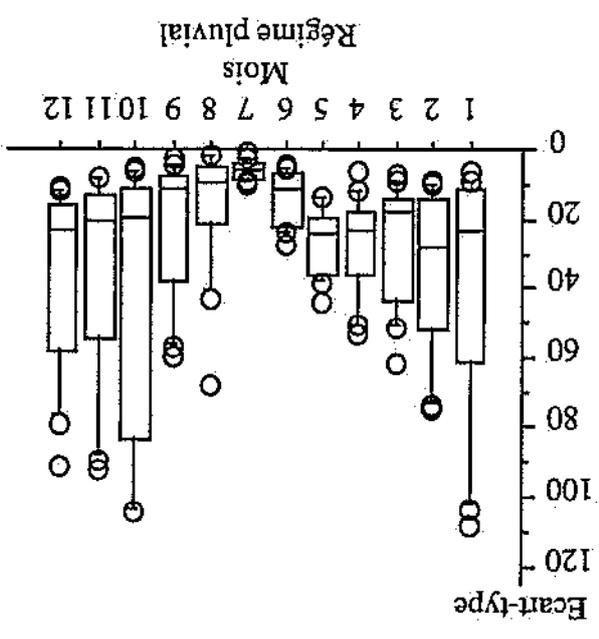
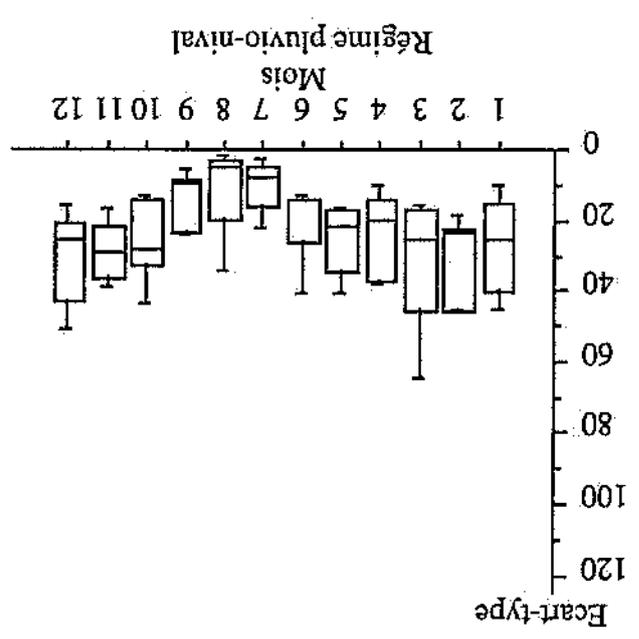
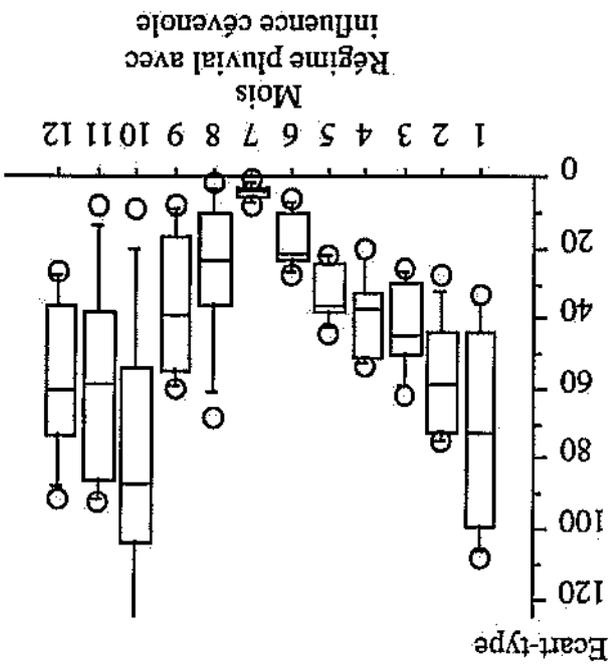
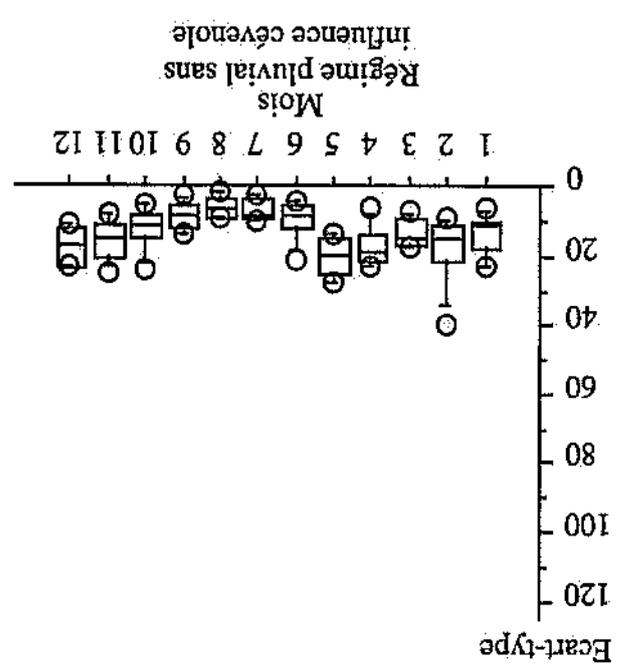




ANNEXE 6.1.4 ECART-TYPE DES DÉBITS PAR RÉGIME

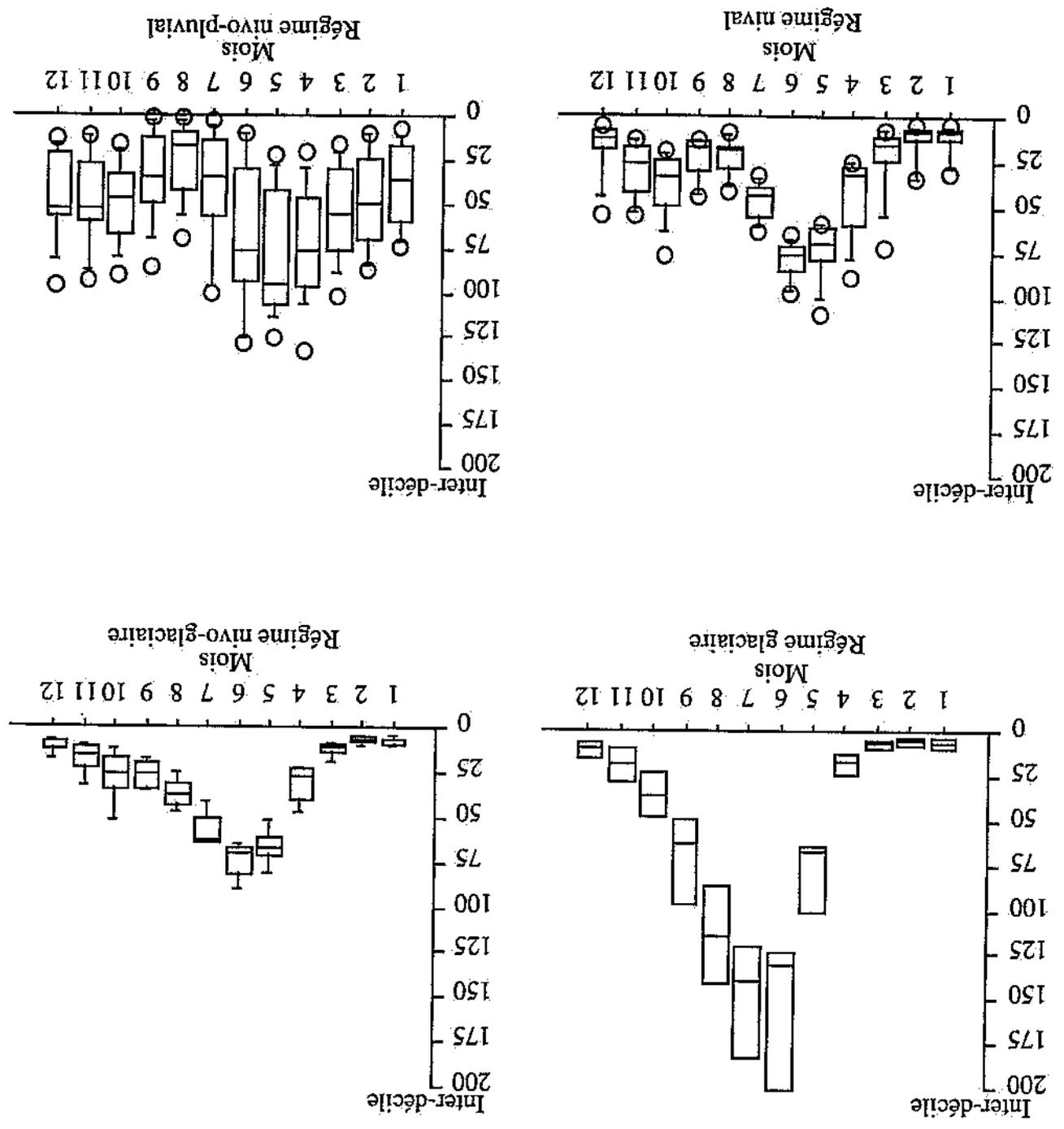
Ces écarts-types ont été calculés à partir des débits spécifiques l/s/km²

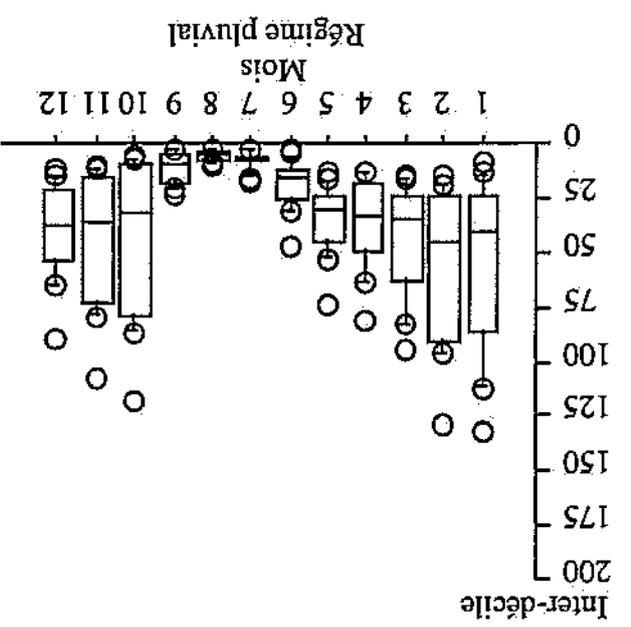
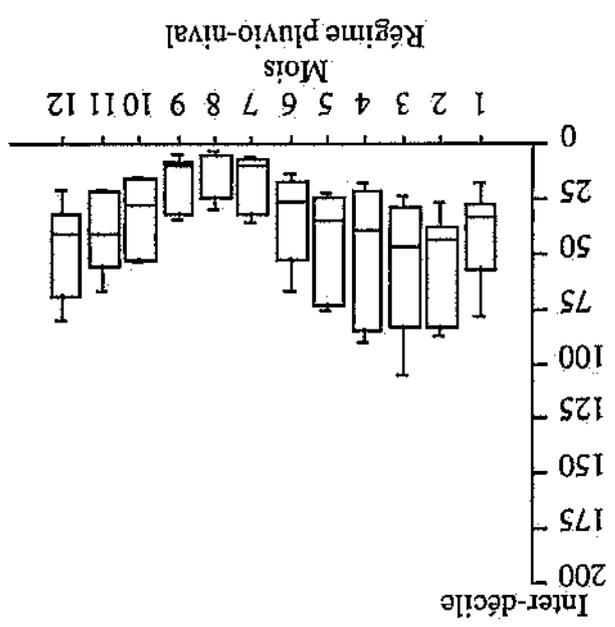
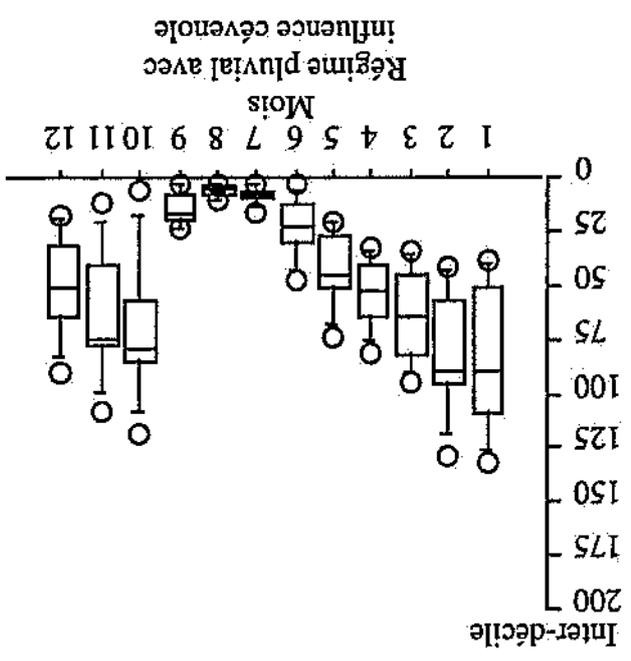
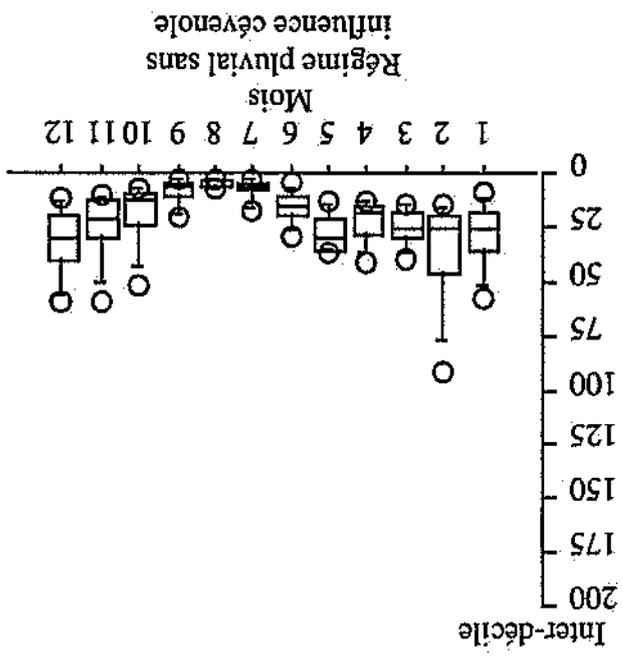




ANNEXE 6.1.5 ETENDUE DE DÉBIT ENTRE Qx10 ET QN10

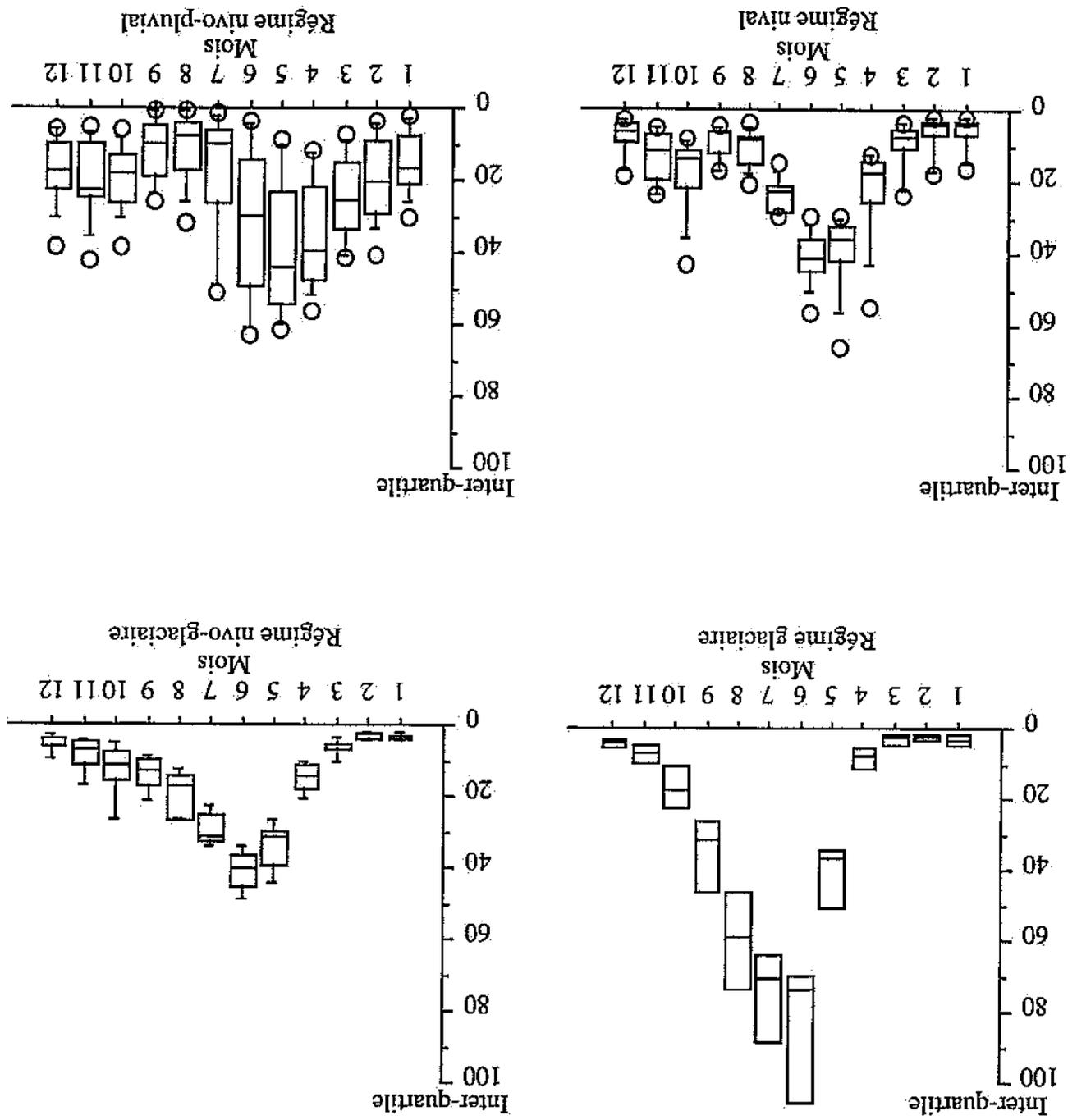
Les inter-déciles de débits sont calculés comme la différence entre le Qx10 et le QN10. Ils sont exprimés en débits spécifiques (l/s/km²).

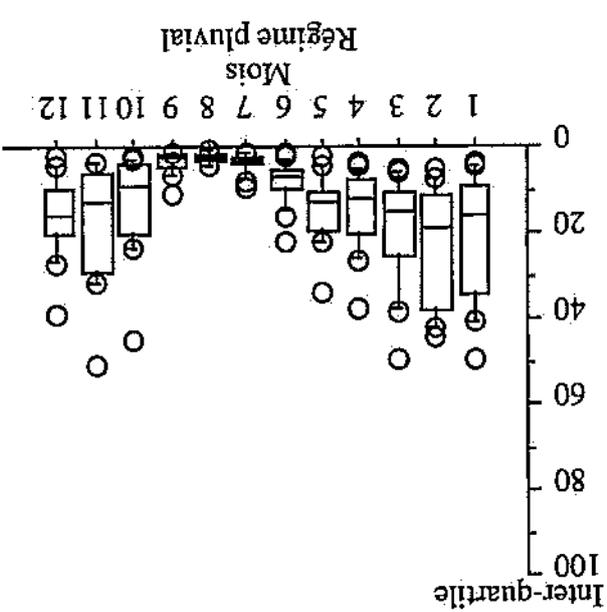
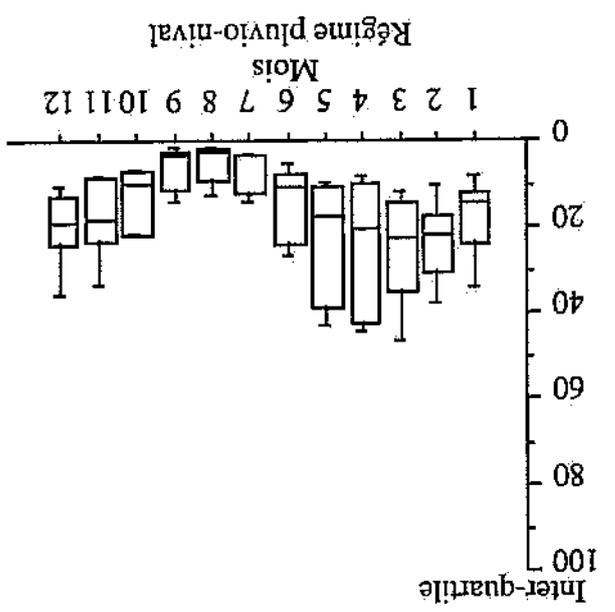
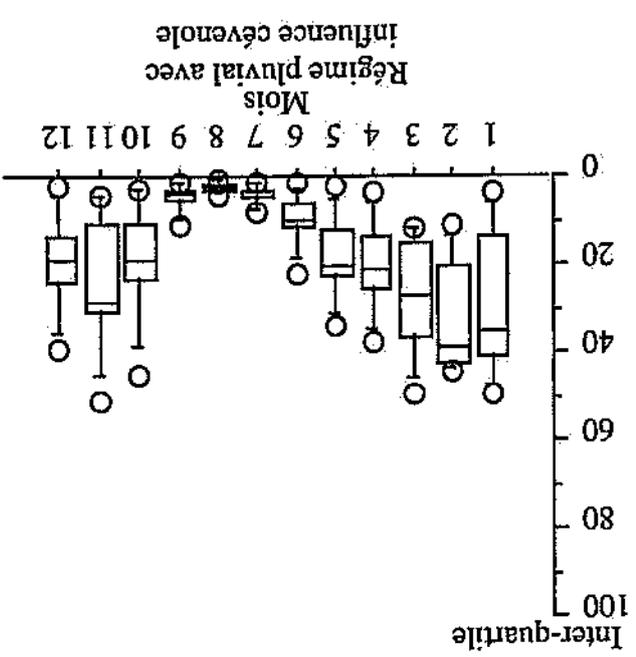
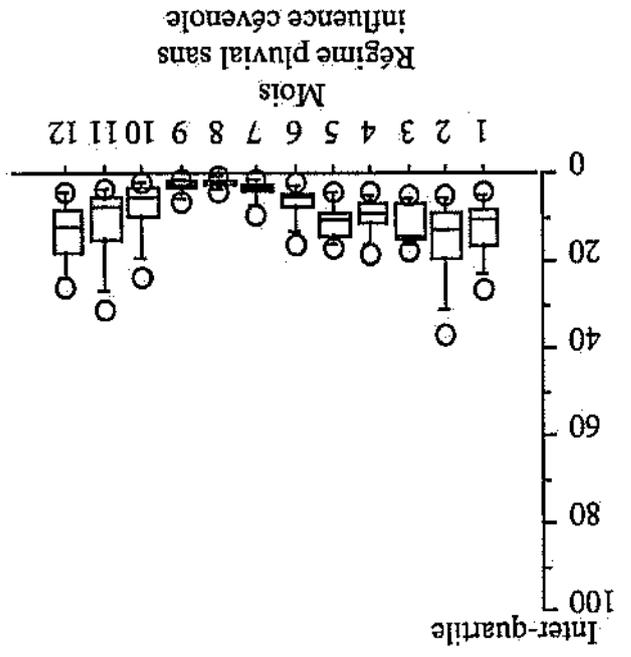




ANNEXE 6.1.6 INTER-QUARTILE DE DEBITS PAR RÉGIME

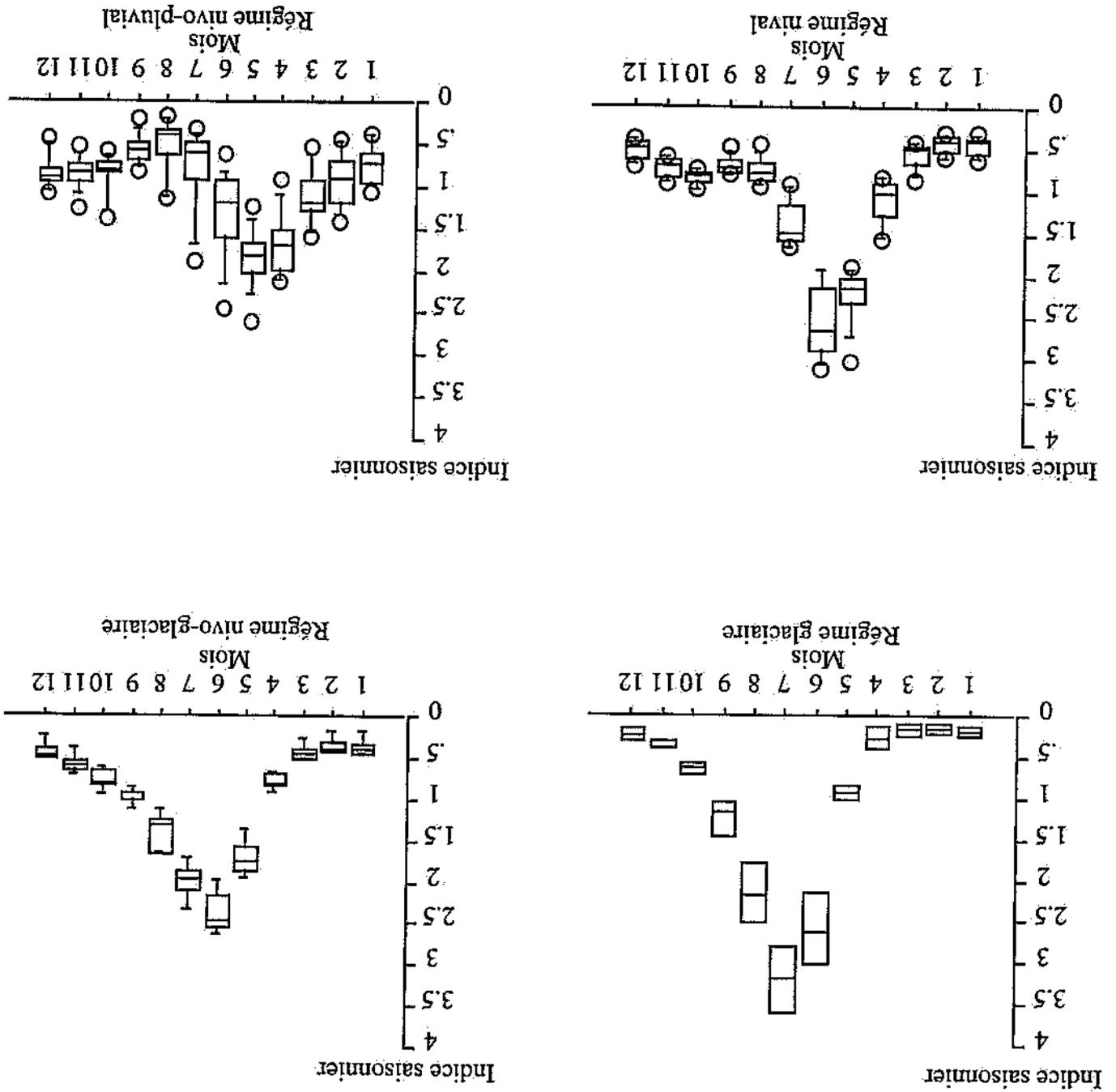
Les inter-quartiles de débits sont calculés comme étant la différence entre le Qx25 et le Qx75. Ils sont exprimés en débits spécifiques (l/s/km²).

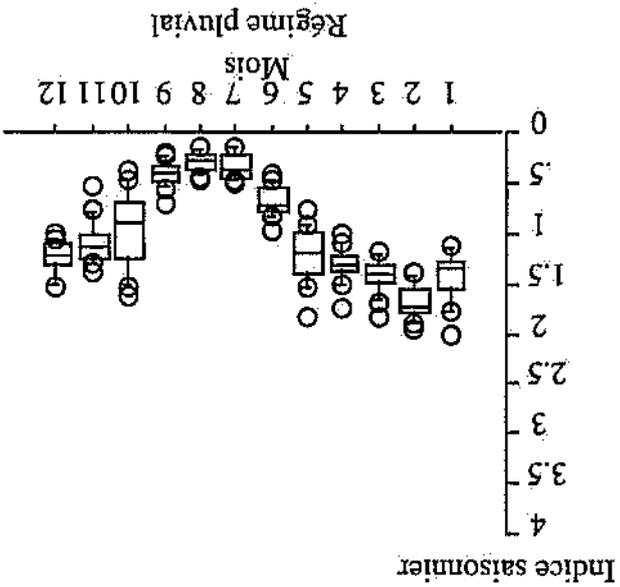
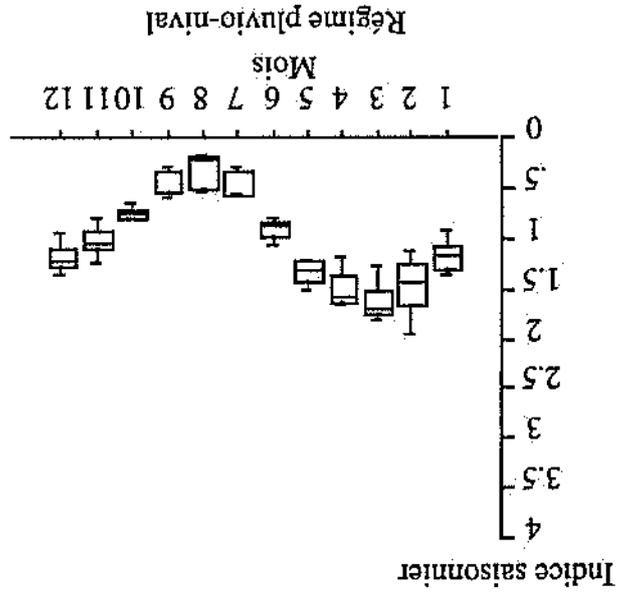
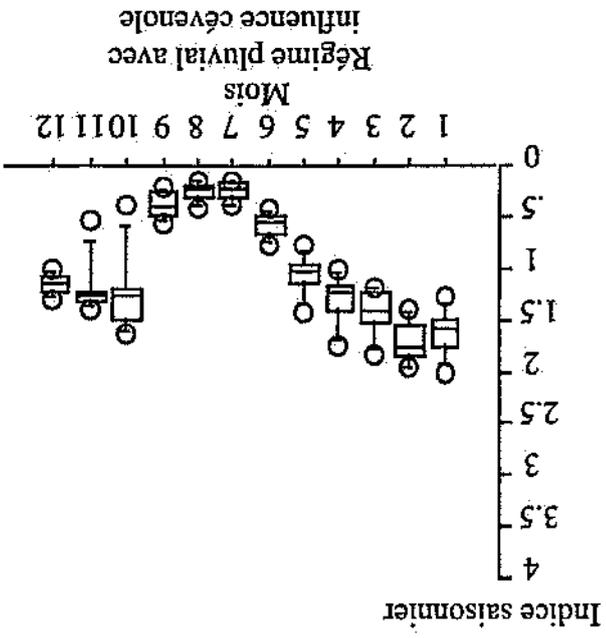
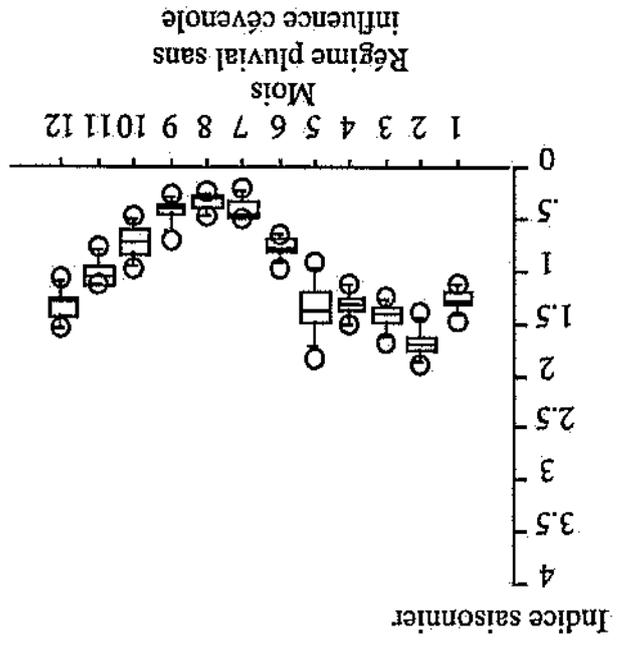




ANNEXE 6.1.7 INDICE SAISONNIER (PARDE, 1968)

Cet indice est le rapport de la moyenne mensuelle inter annuelle et de la moyenne inter annuelle

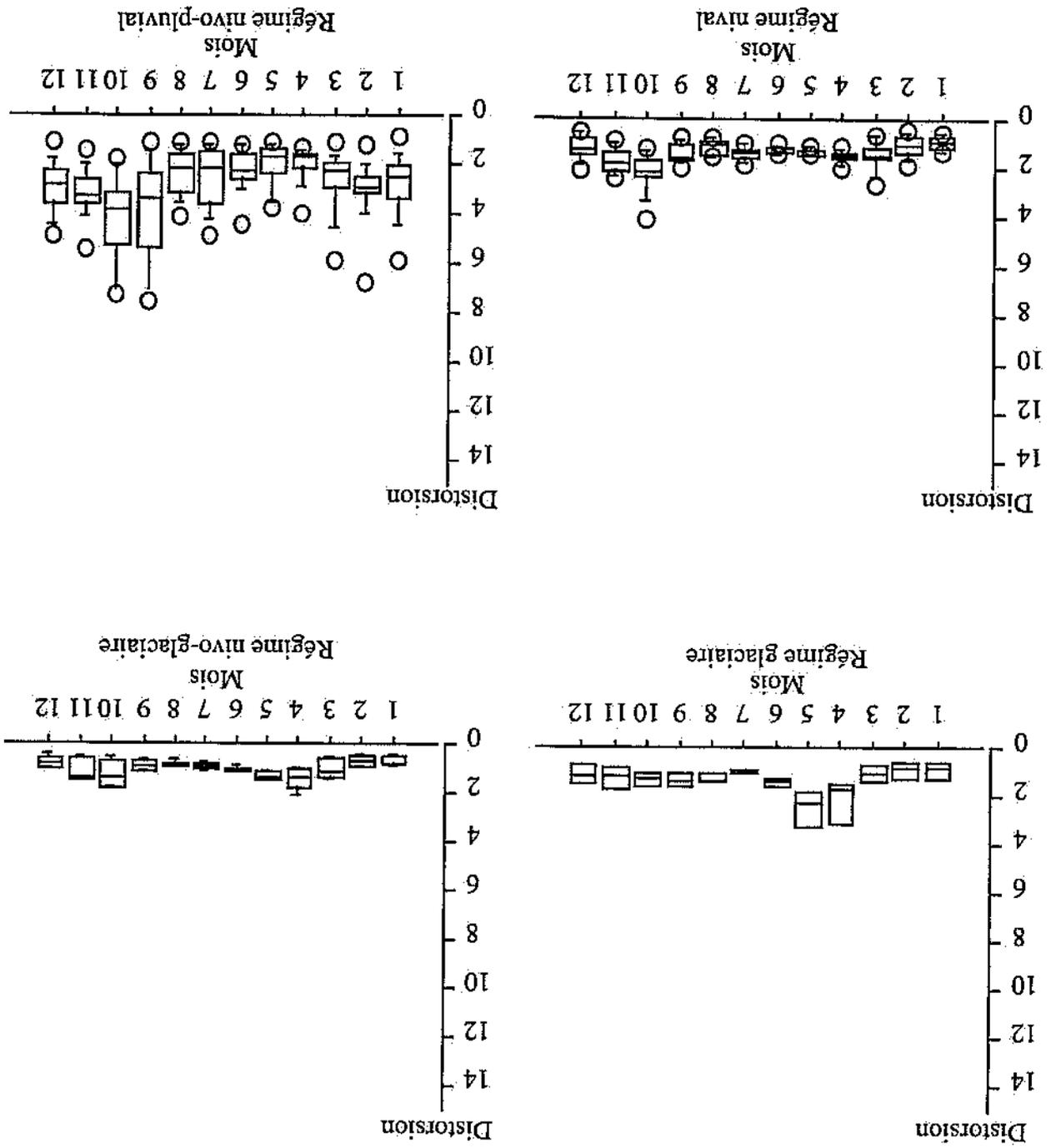


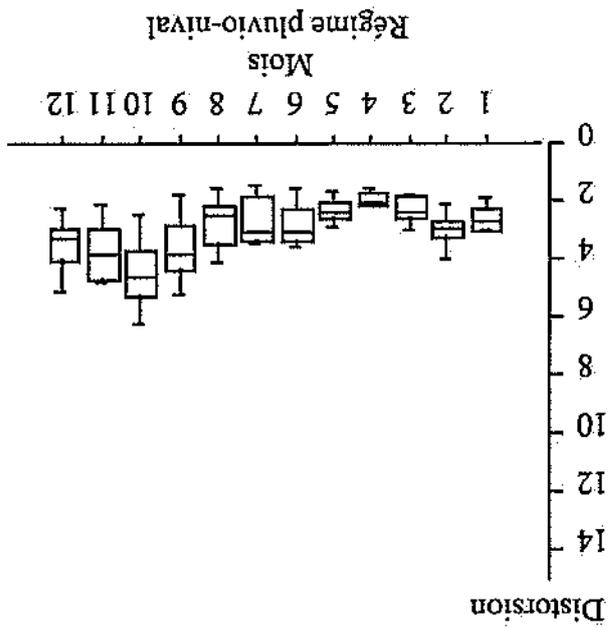
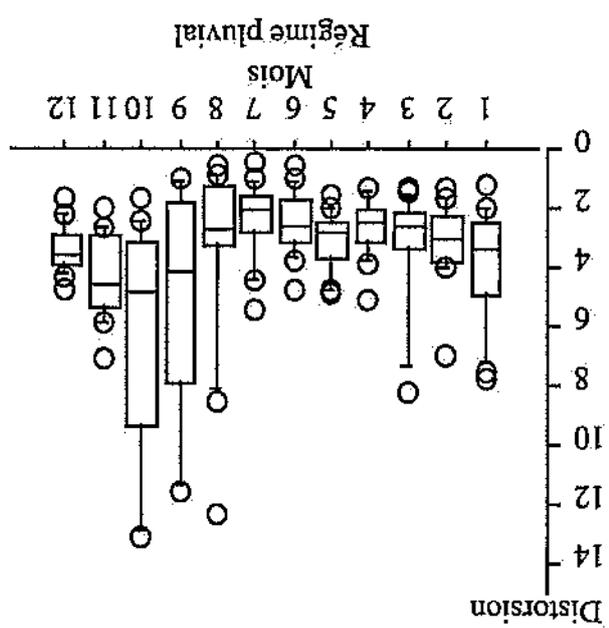
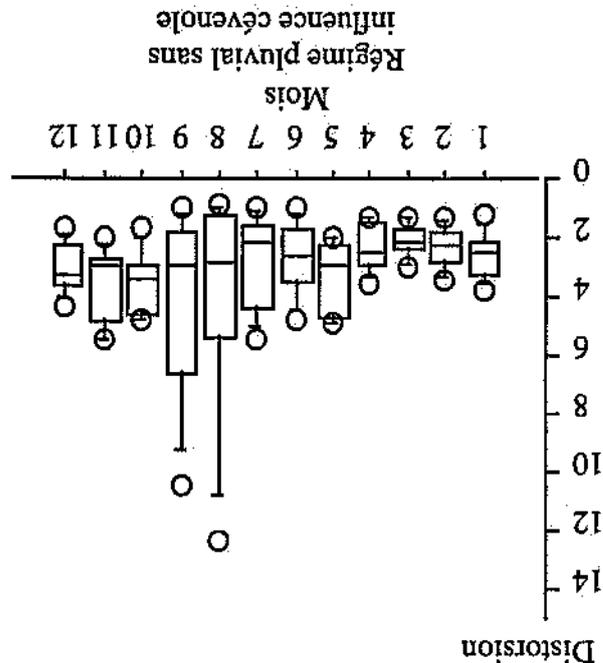
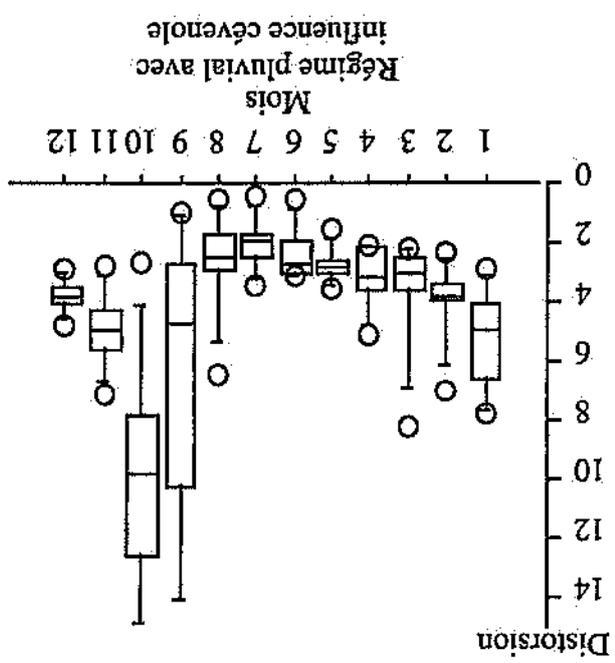


ANNEXE 6.2.1 DISTORSION DU RÉGIME GLACIAIRE AU RÉGIME PLUVIAL

Cet indice est la différence de $(Q_{x10} - Q_{n10})$ rapportée à la médiane

$$\text{Distorsion} = (Q_{x10} - Q_{n10}) / Q50$$

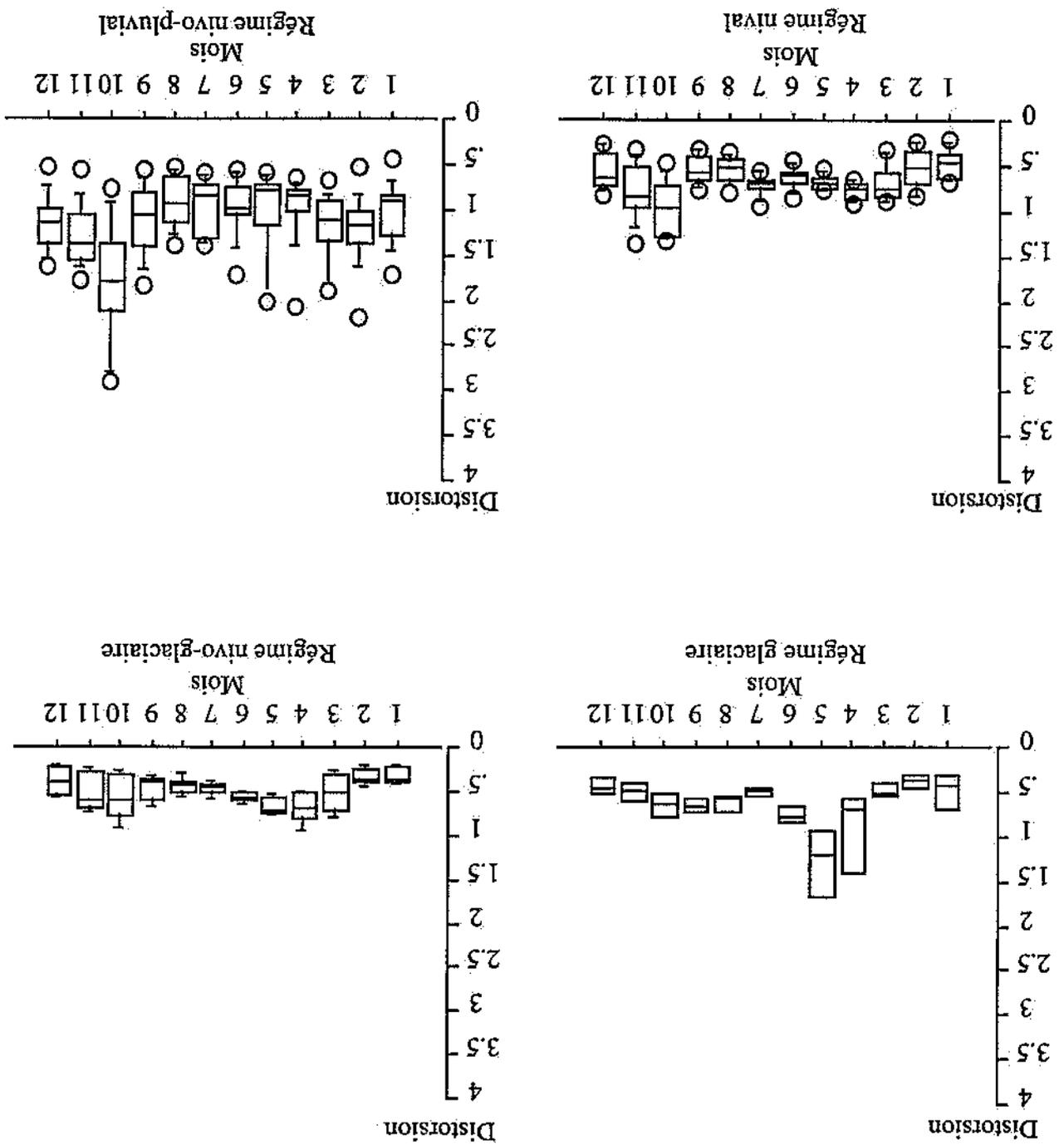


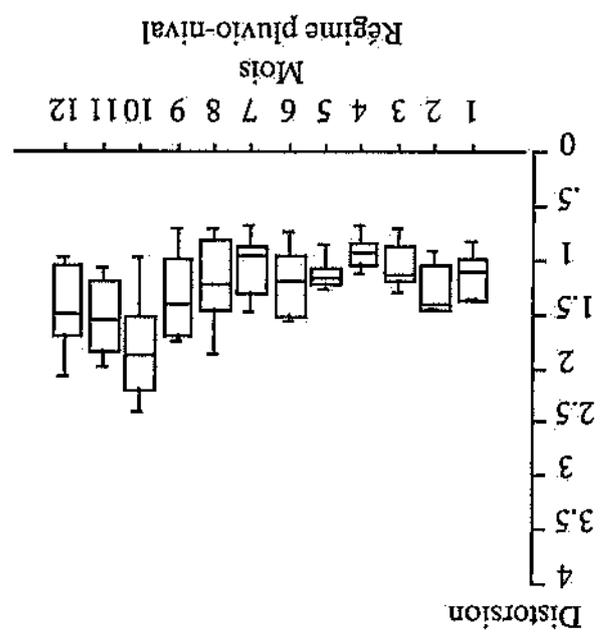
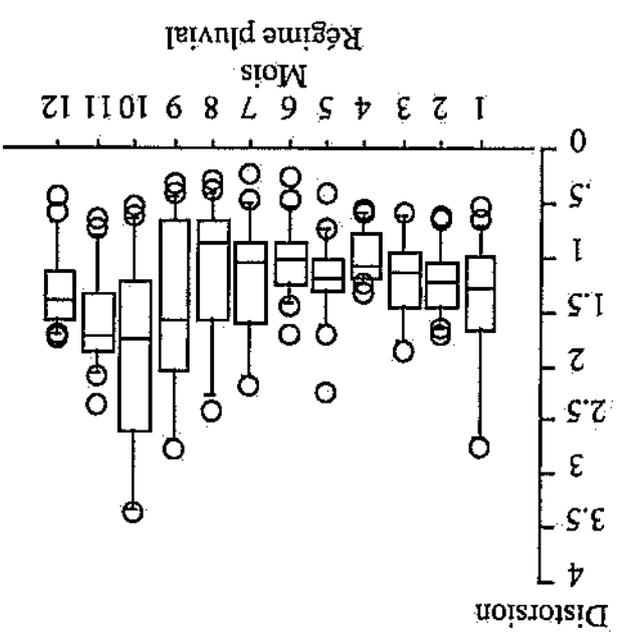
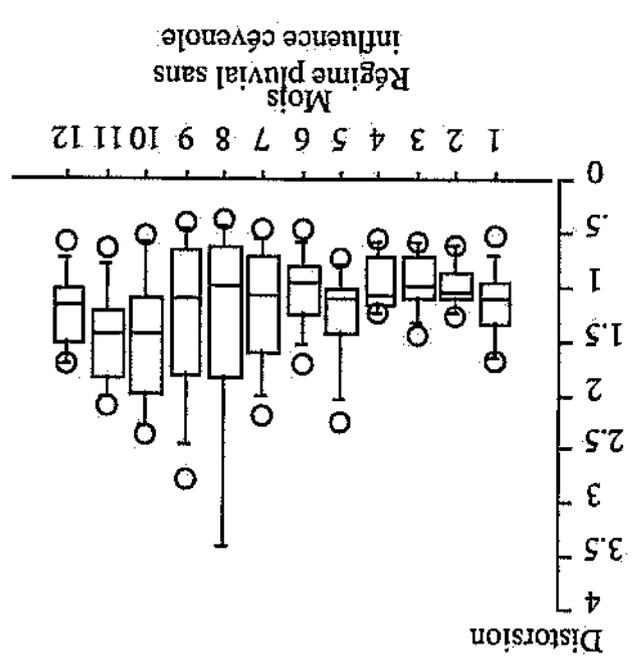
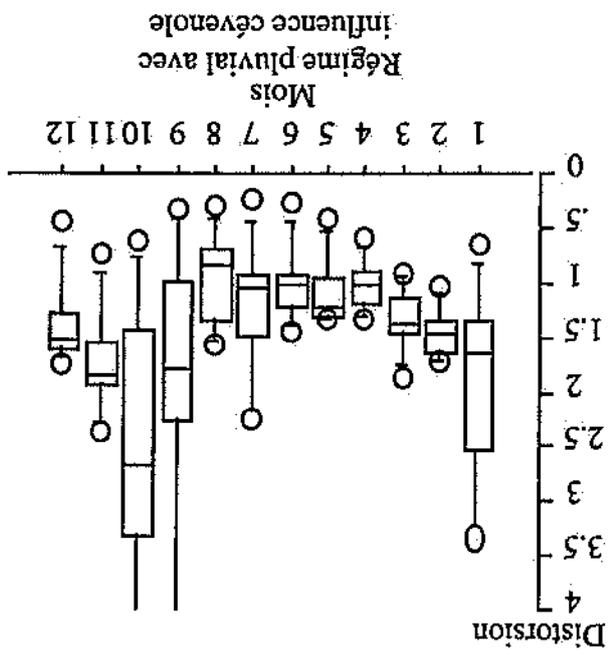


ANNEXE 6.2 INDICE DE DISTORSION PAR RÉGIME

Cet indice est la différence $Q_{x25}-Q_{n25}$ rapportée à la médiane des débits

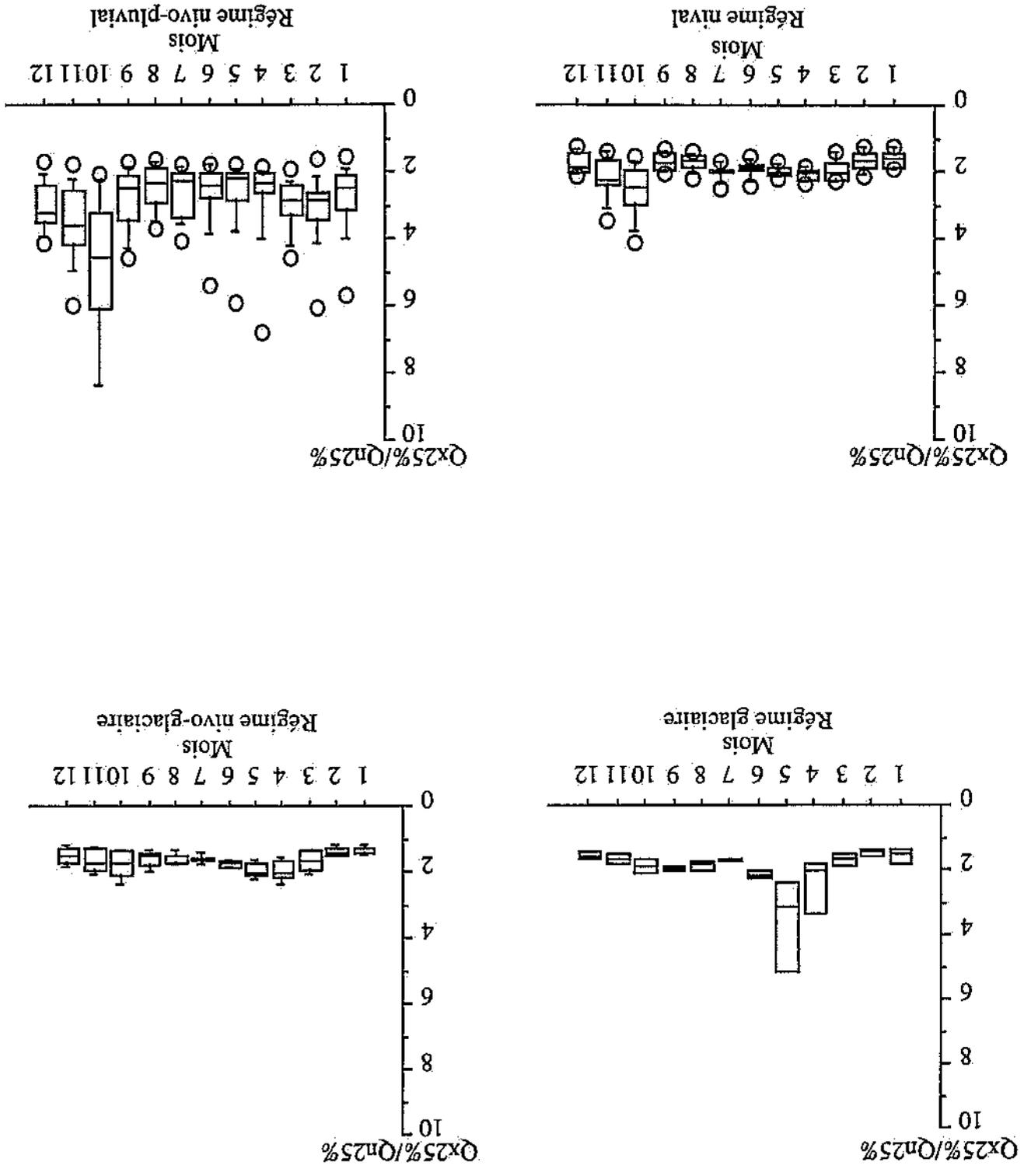
$$\text{Distorsion} = (Q_{x25} - Q_{n25}) / Q_{50}$$

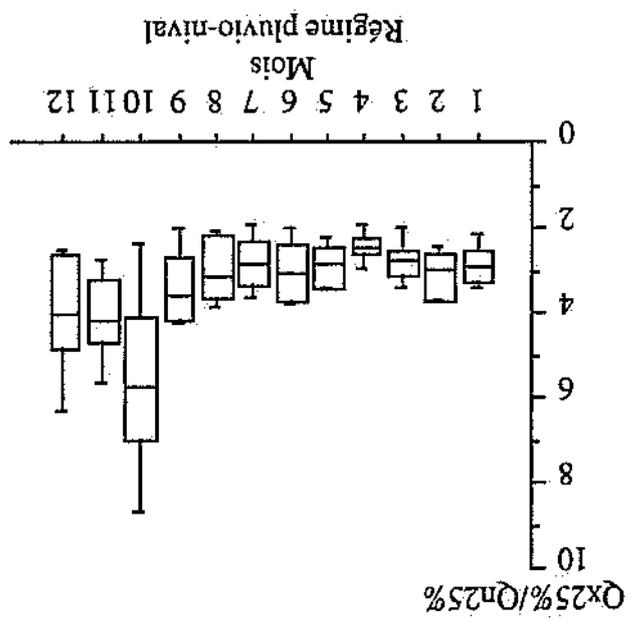
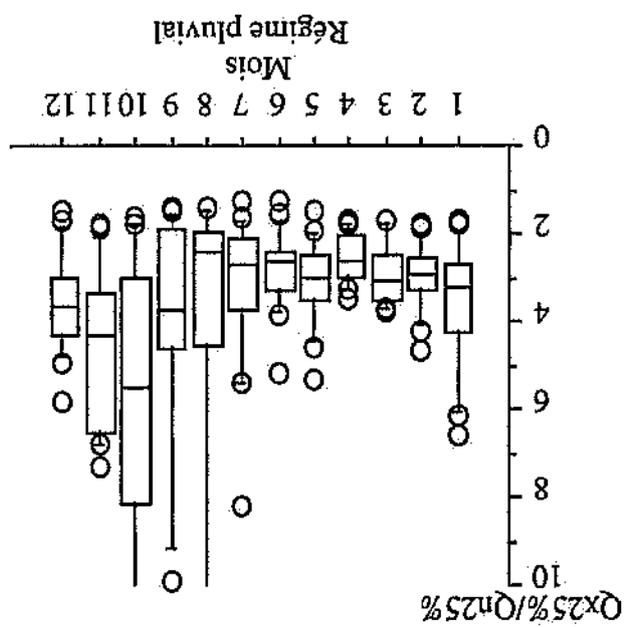
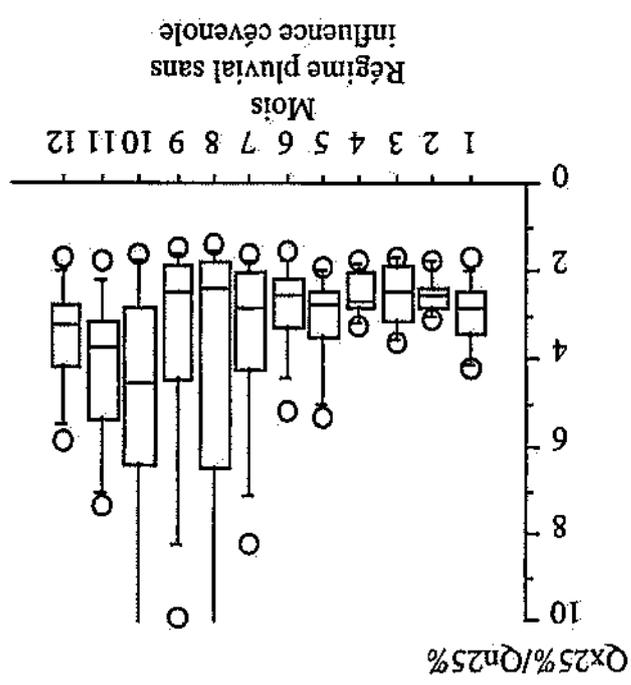
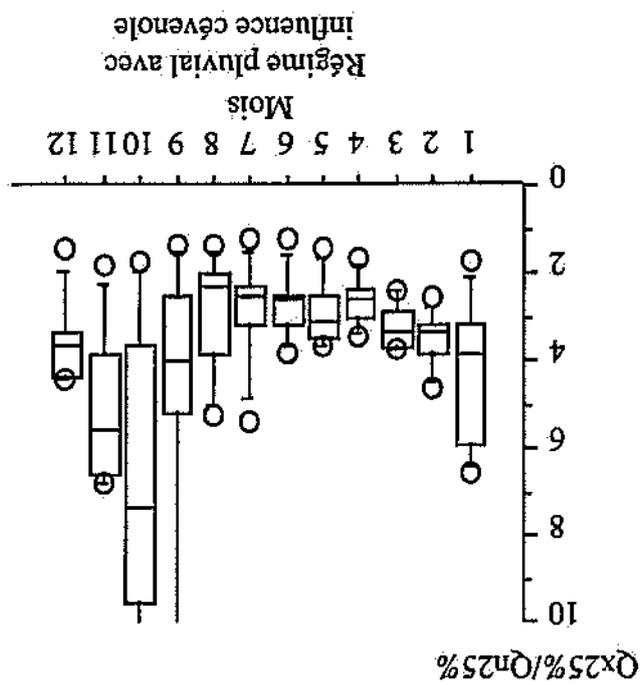




ANNEXE 6.2.3 RAPPORT DU QUARTILE SUPÉRIEUR ET DU QUARTILE INFÉRIEUR PAR RÉGIME

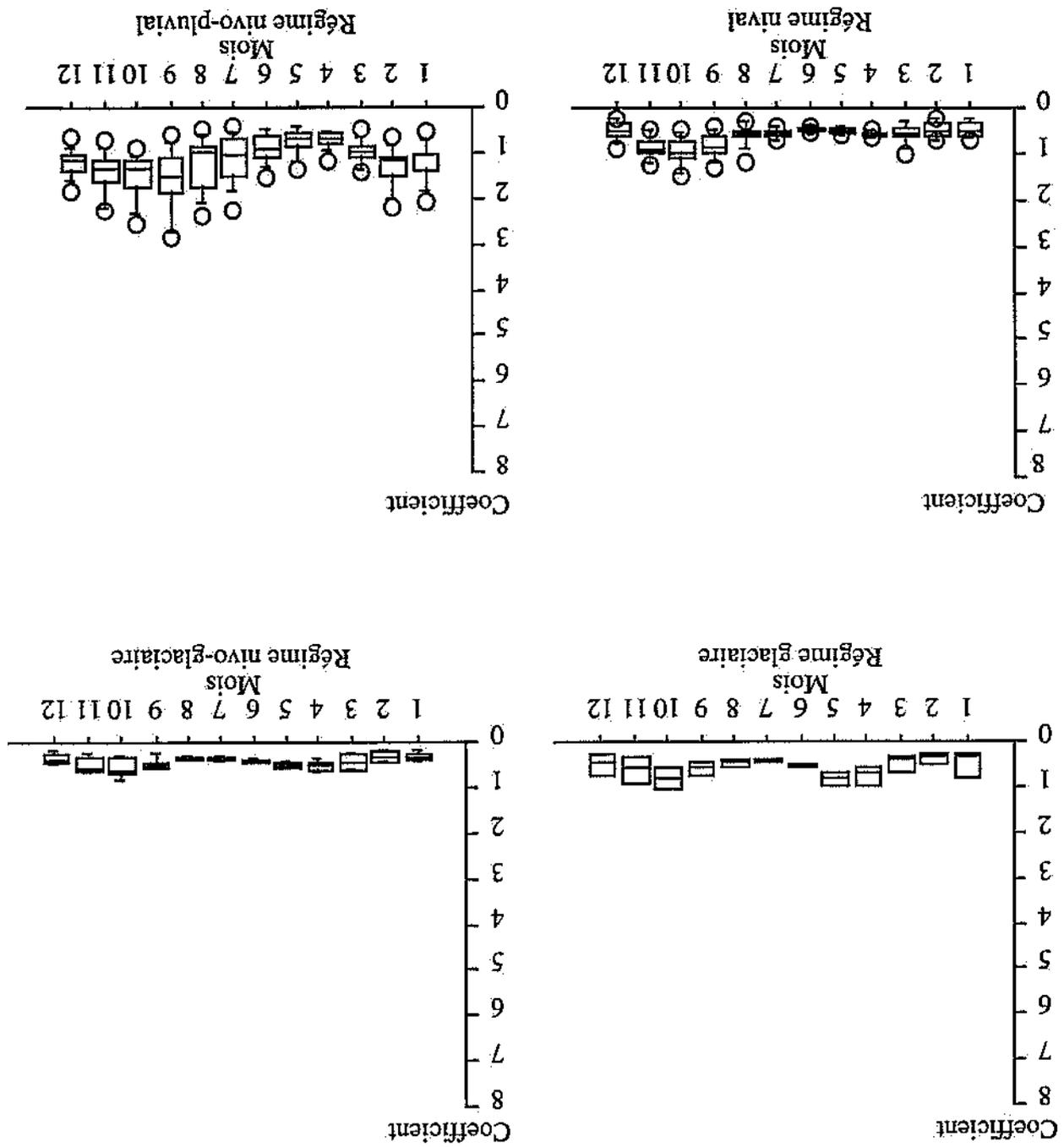
Le rapport est égal à $Qx\ 25\% / Qn\ 25\%$

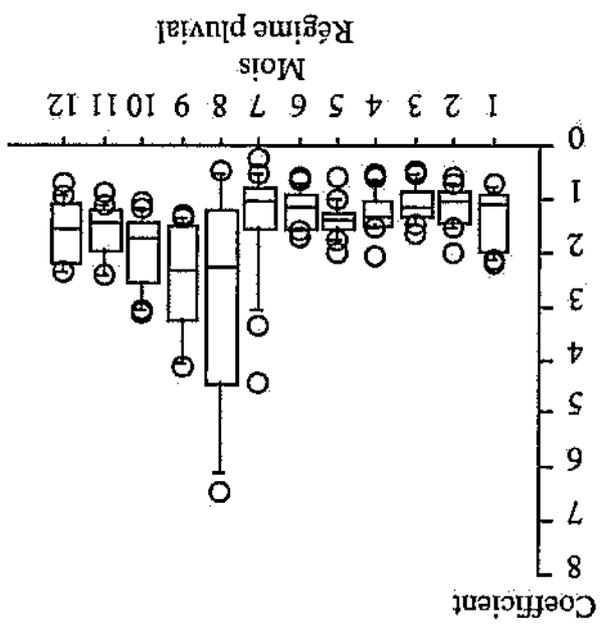
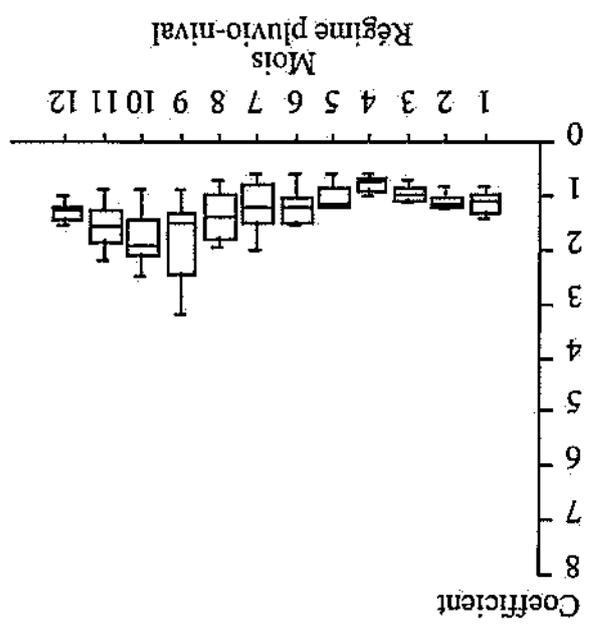
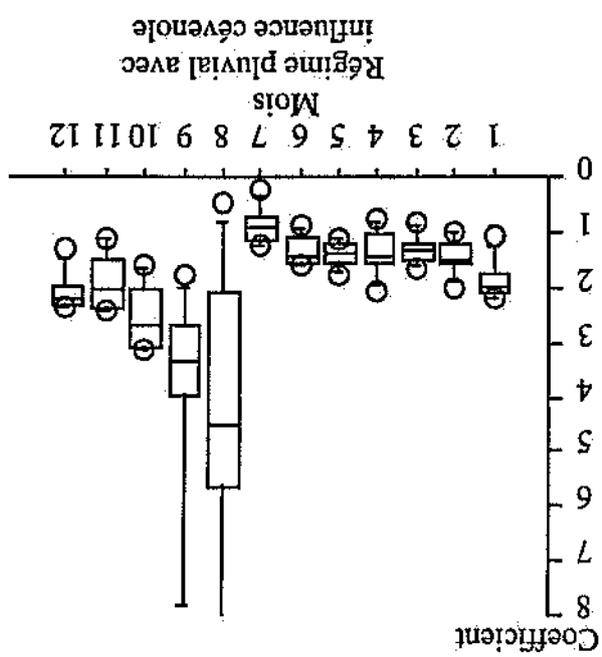
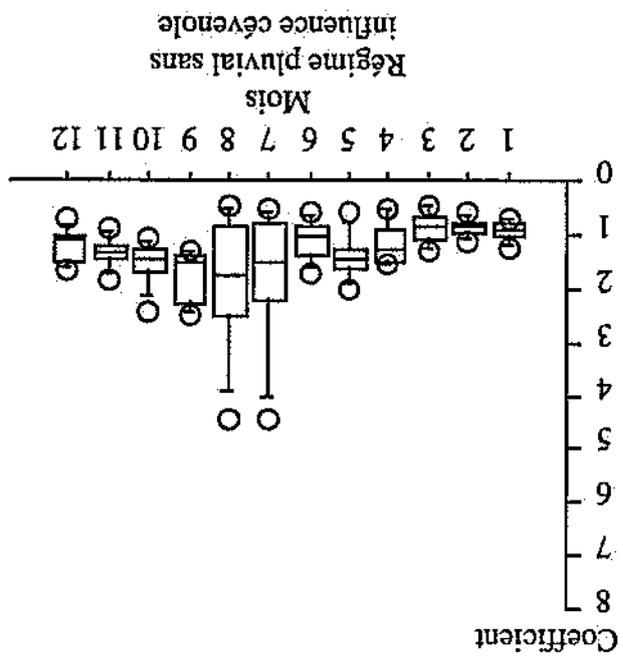




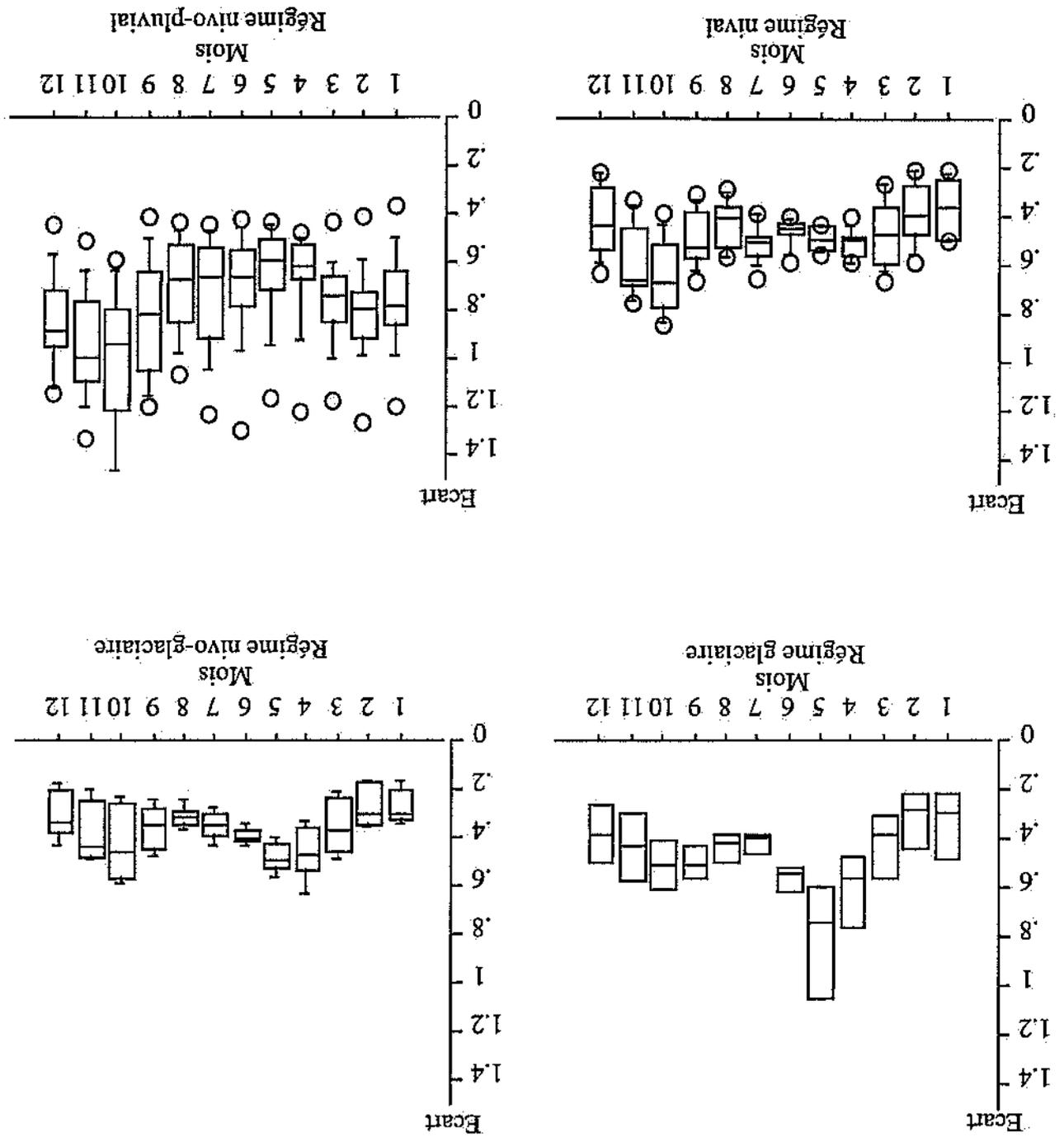
ANNEXE 6.2.4 COEFFICIENT DE VARIATION PAR RÉGIME

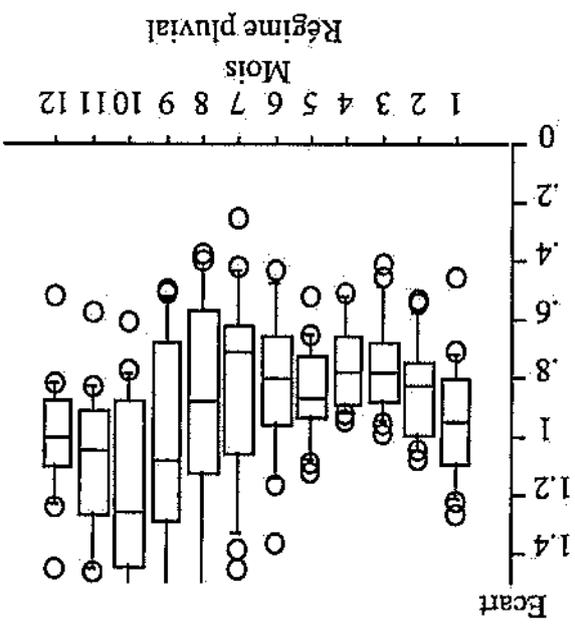
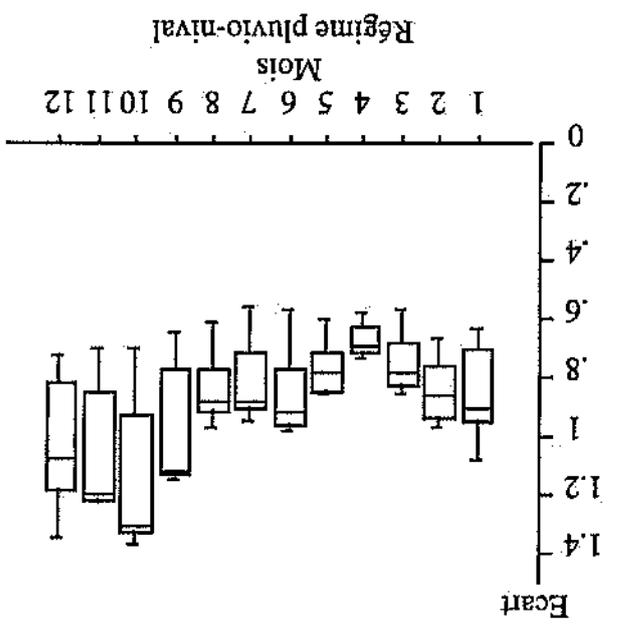
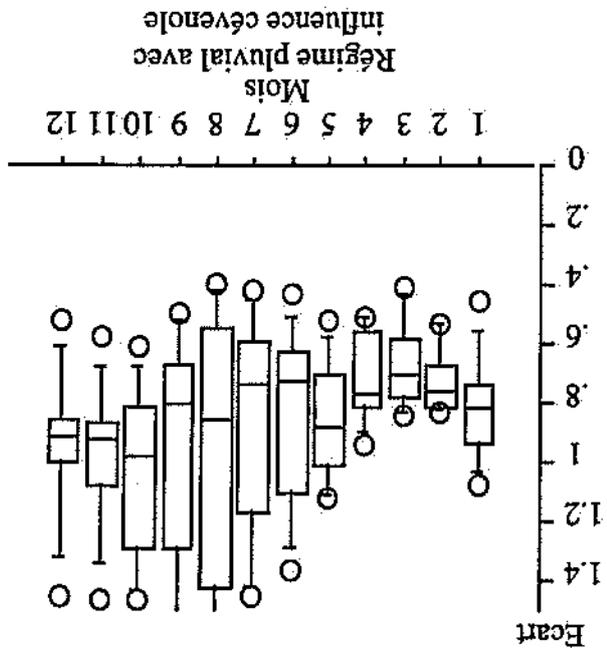
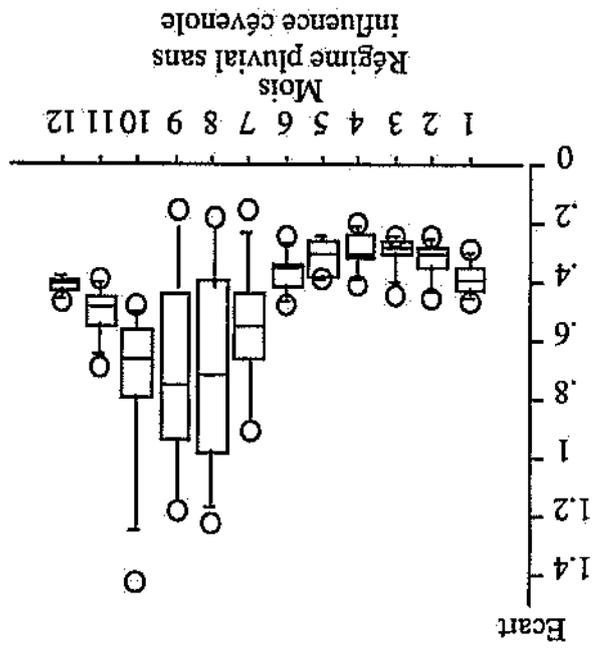
Ce coefficient est calculé comme étant l'écart-type des débits rapporté à la moyenne
 Coefficient = Ecart-type / moyenne





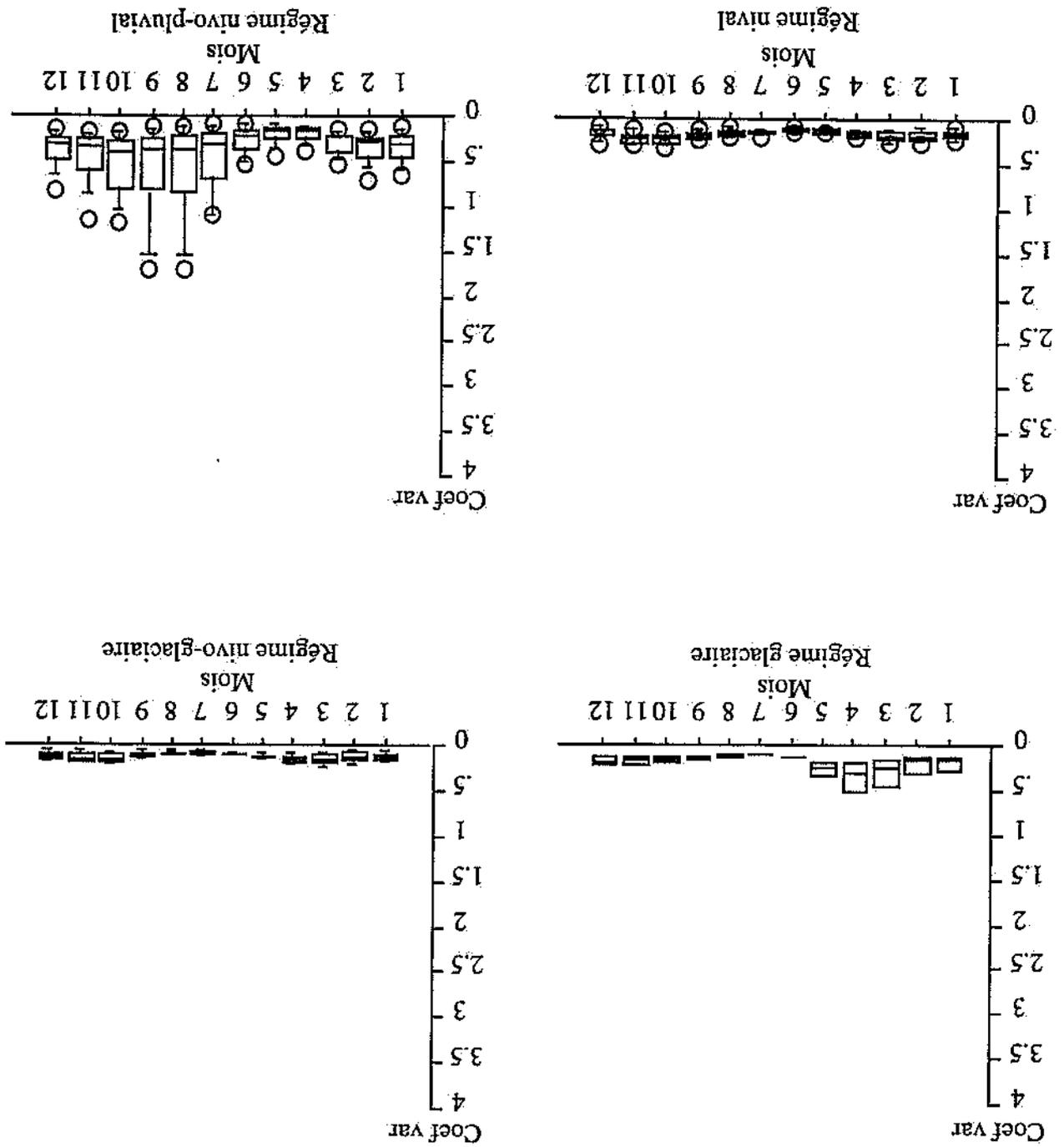
ANEXE 6.2.5 ECART-TYPE DU LOGARITHME DES DÉBITS
SPÉCIFIQUES PAR RÉGIME

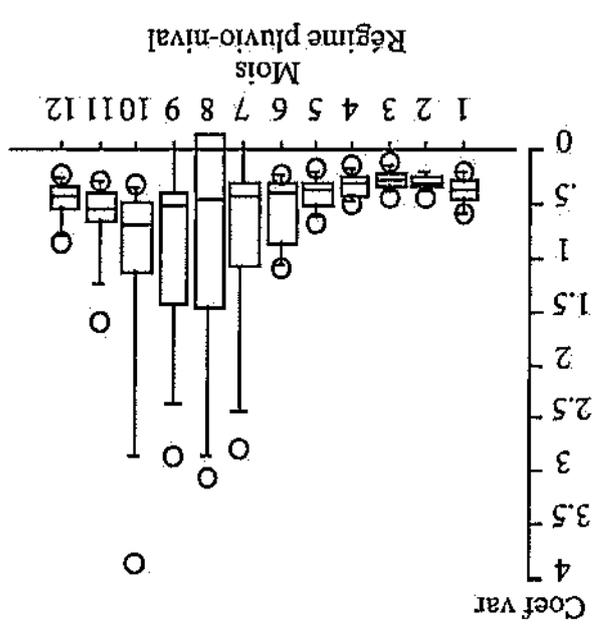
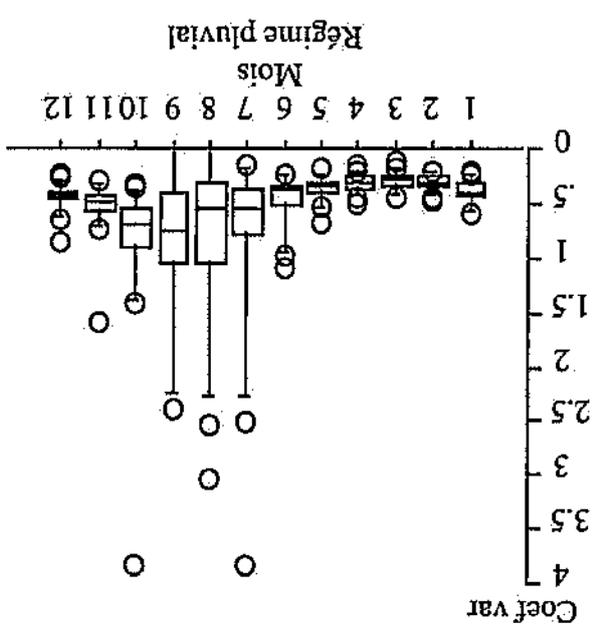
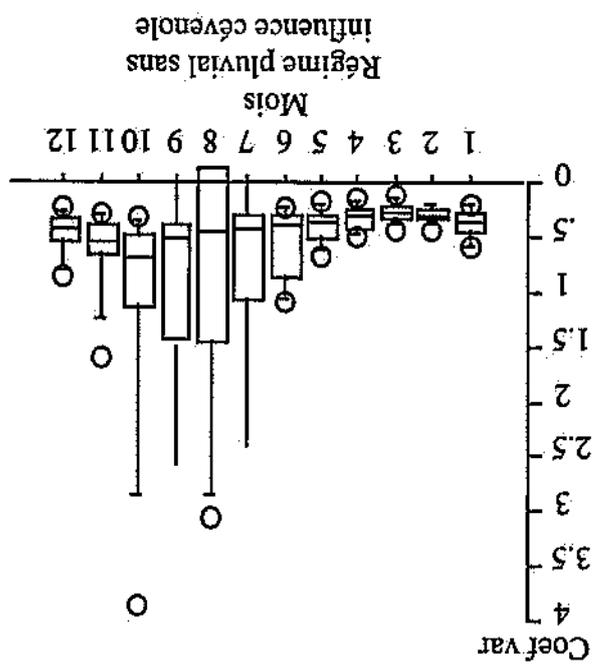
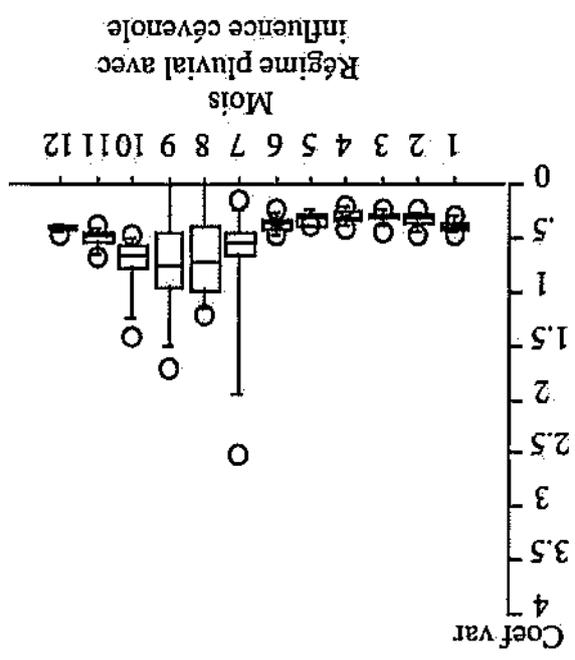




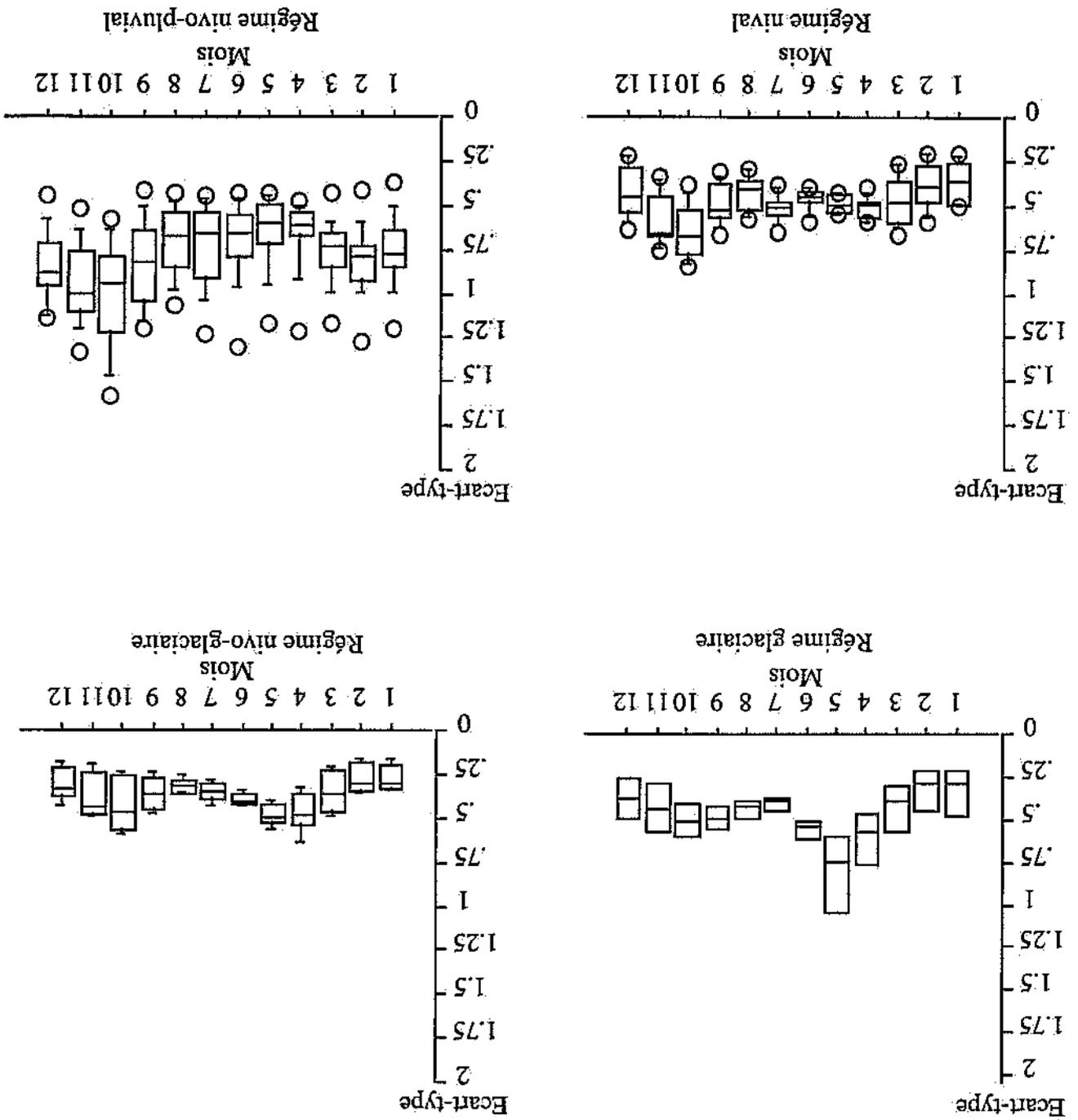
ANNEXE 6.2.6 COEFFICIENT DE VARIATION DU LOGARITHME DES DÉBITS SPÉCIFIQUES

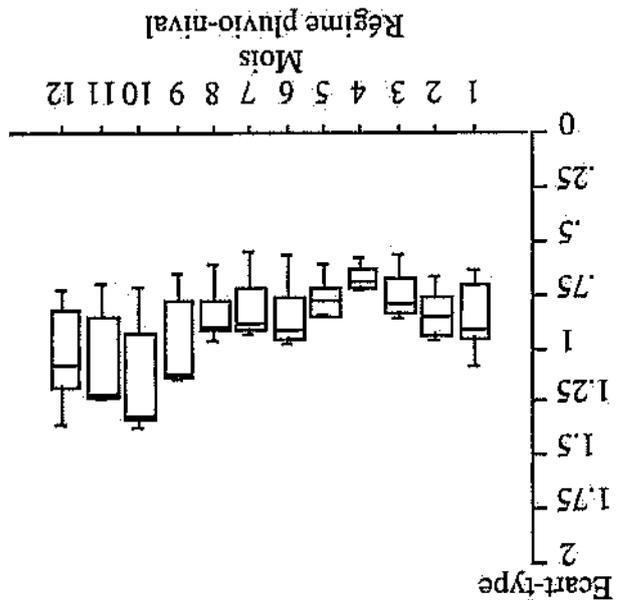
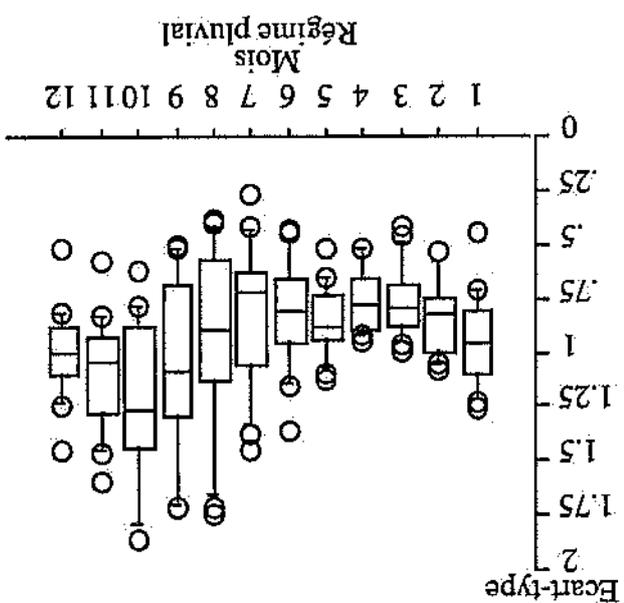
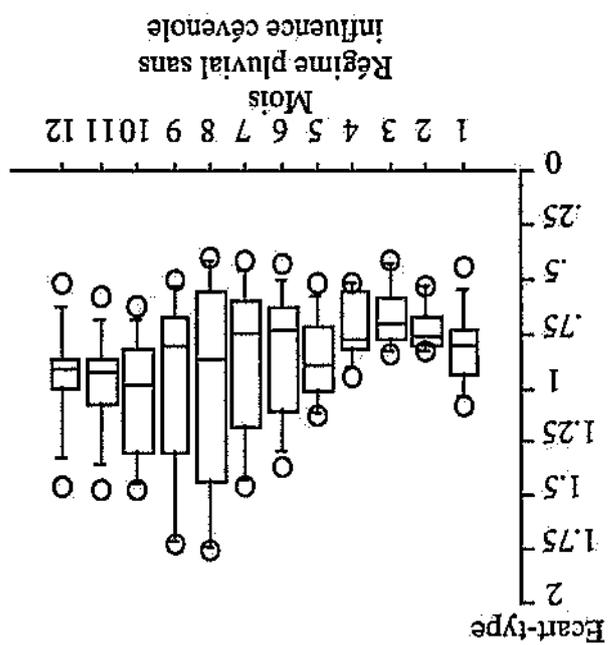
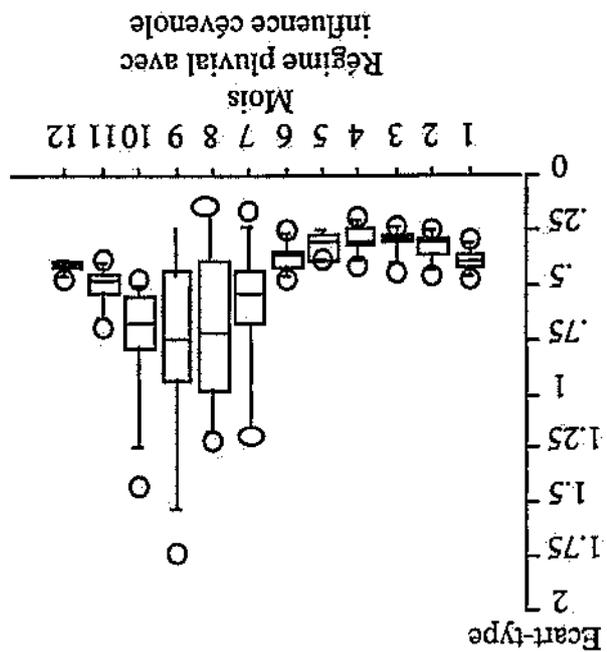
Coef var = (Ecart-type du log des débits spécifiques) / moyenne du log des débits spécifiques)





ANNEXE 6.2.7 ECART-TYPE DU LOGARITHME DES DÉBITS SPÉCIFIQUES
 TRANSLATÉS (HORWITZ, 1978)

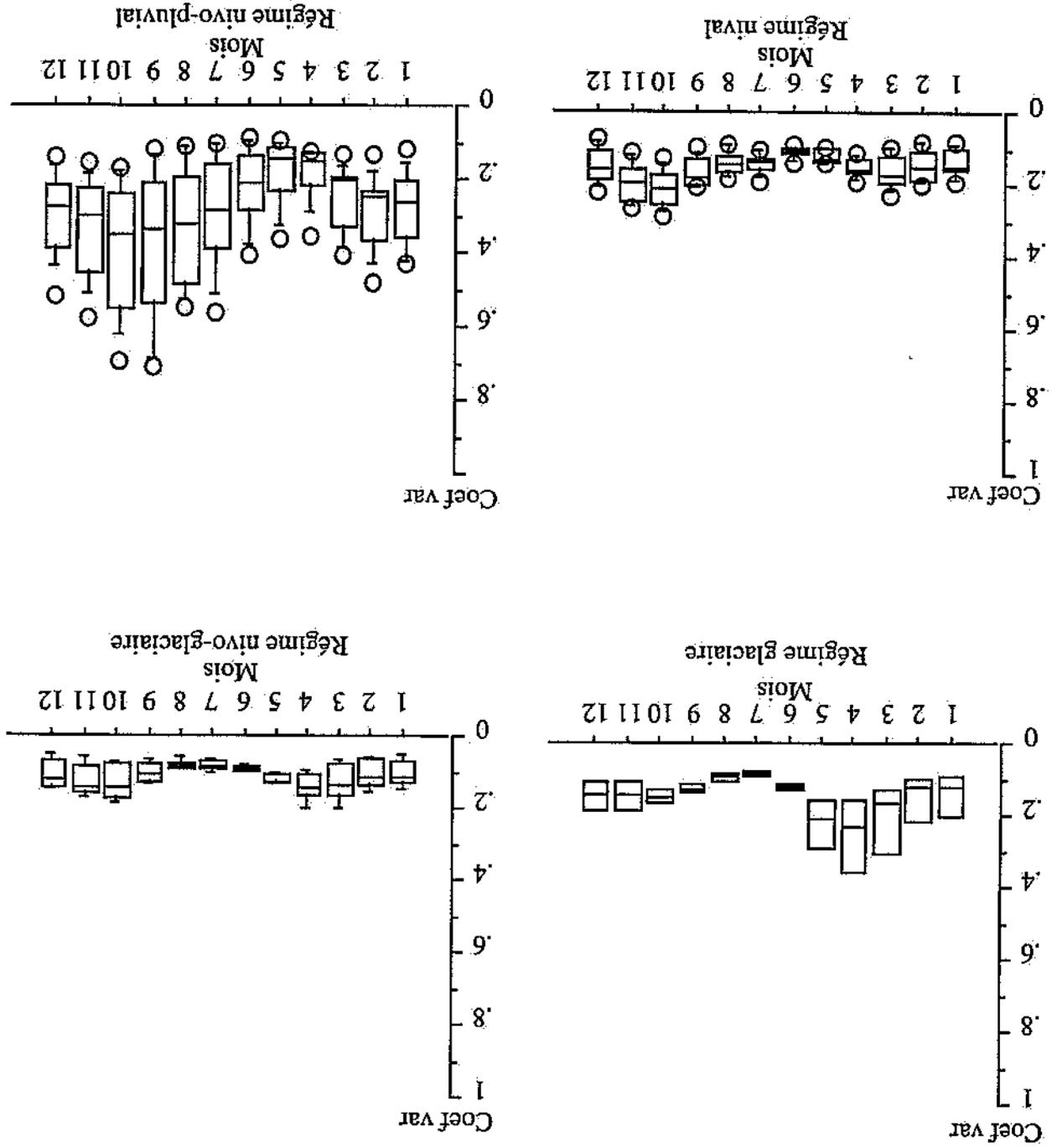


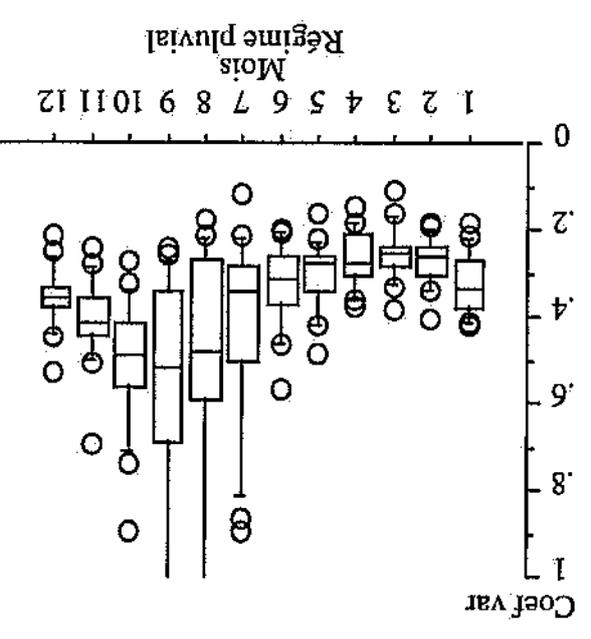
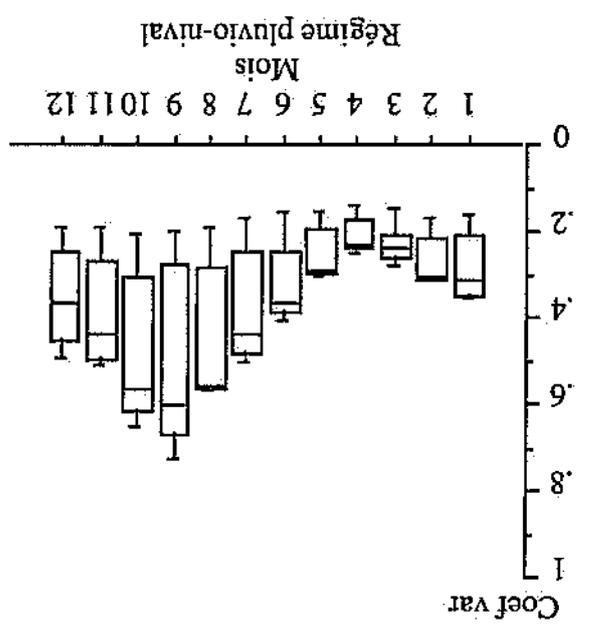
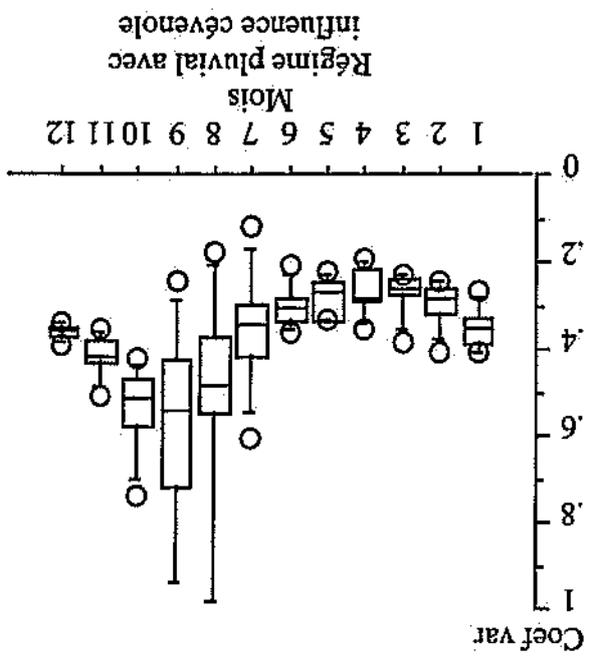
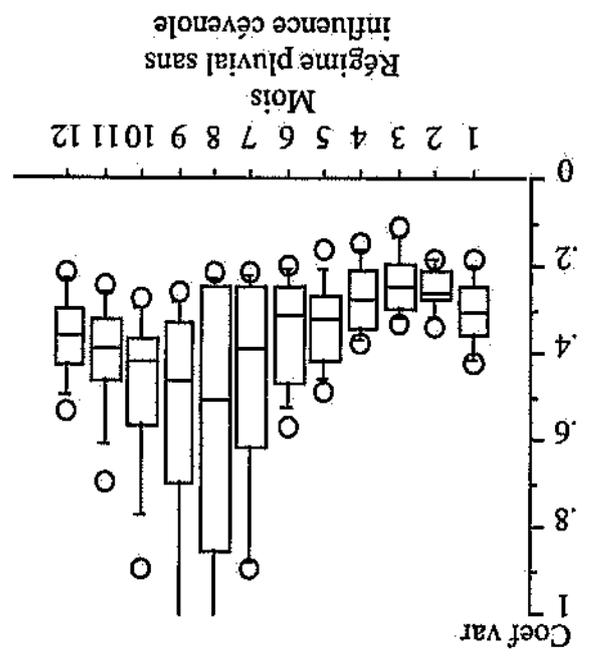


ANNEXE 6.2.8 COEFFICIENT DE VARIATION DES DÉBITS SPECIFIQUES TRANSLATÉS

Le calcul de ce coefficient de variation a porté sur les débits spécifiques (l/s/km²)

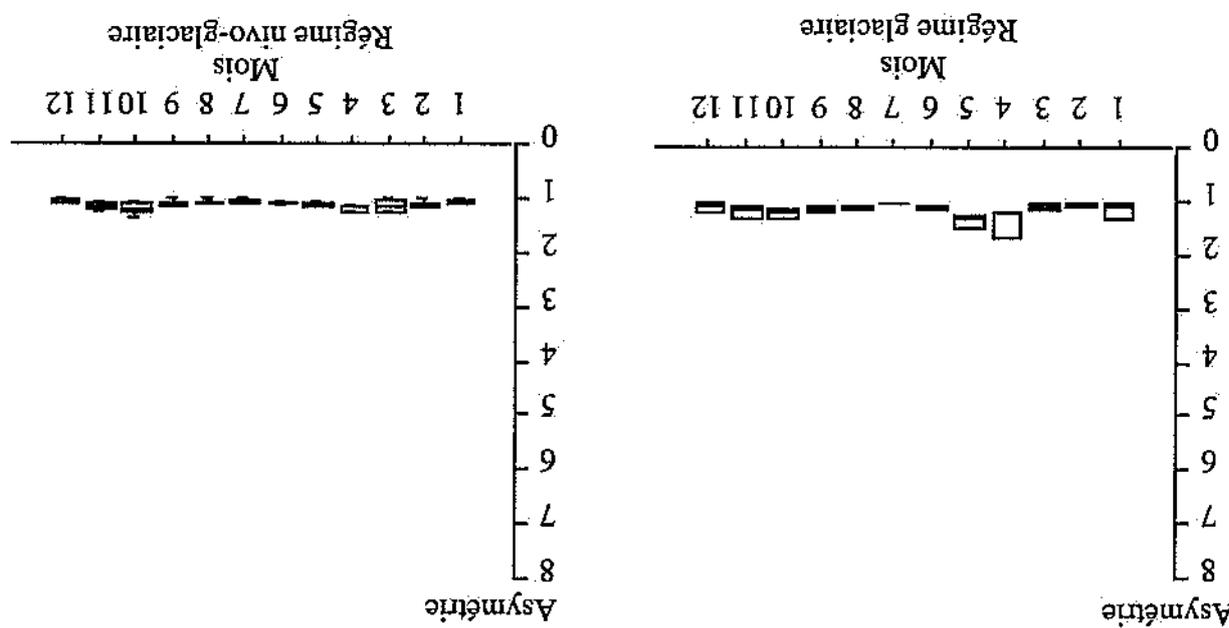
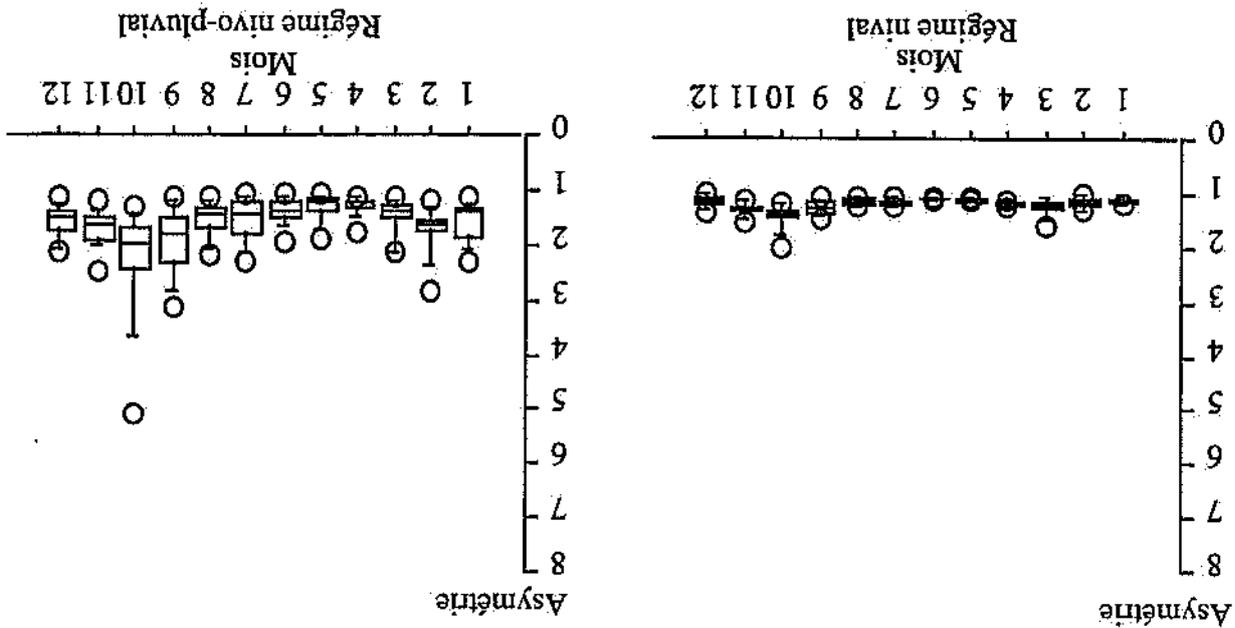
$$\text{Coef Var} = (\text{Ecart-type du log des débits spécifiques} + 1) / (\text{moyenne du log des débits} + 1)$$

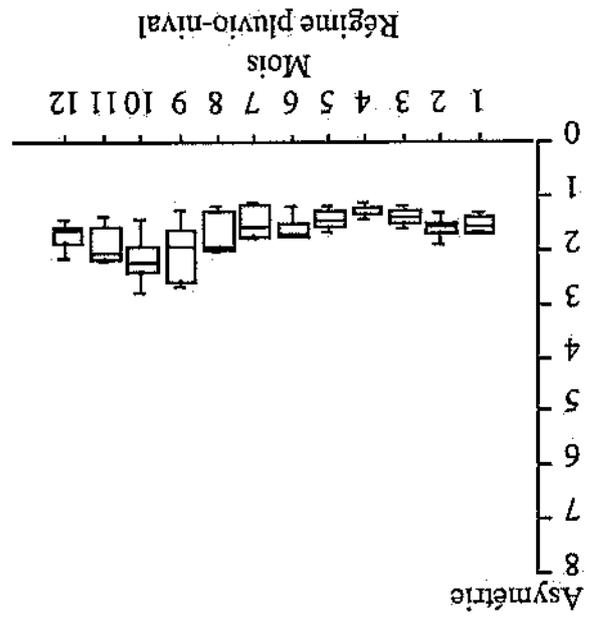
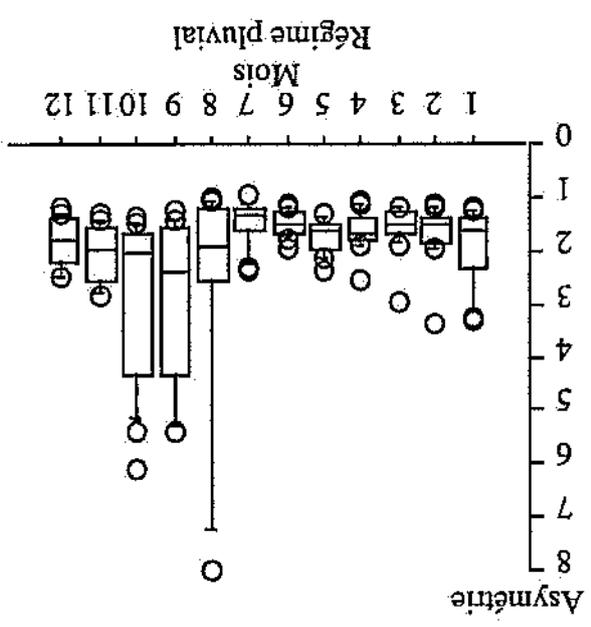
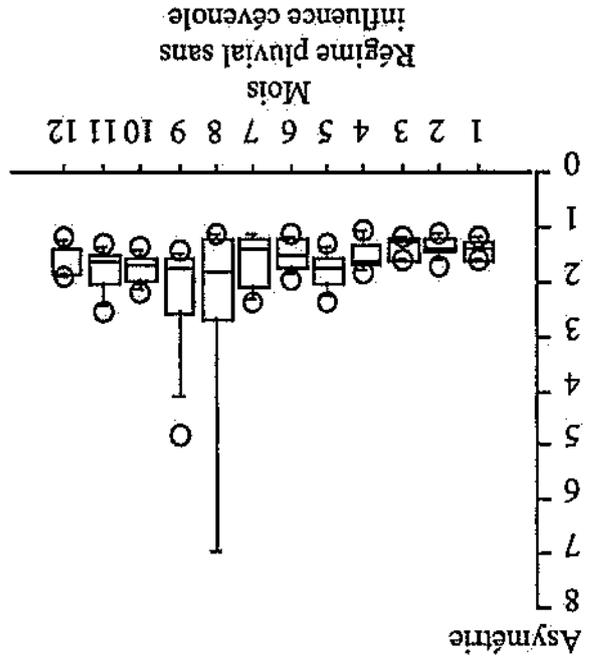
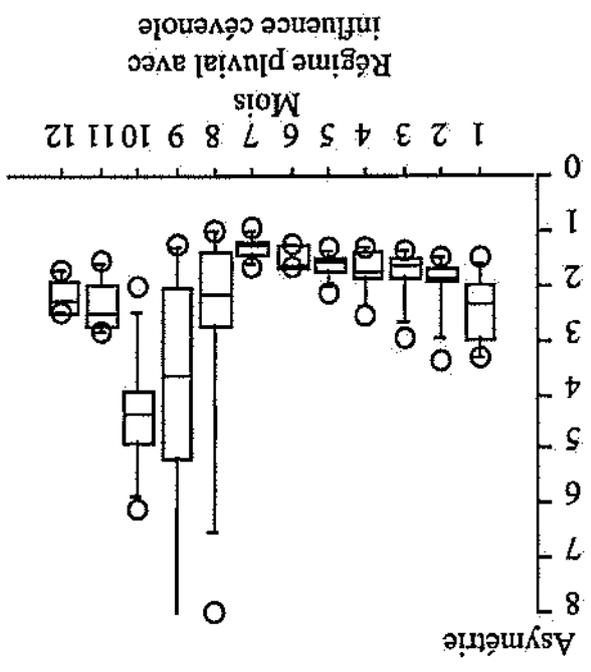




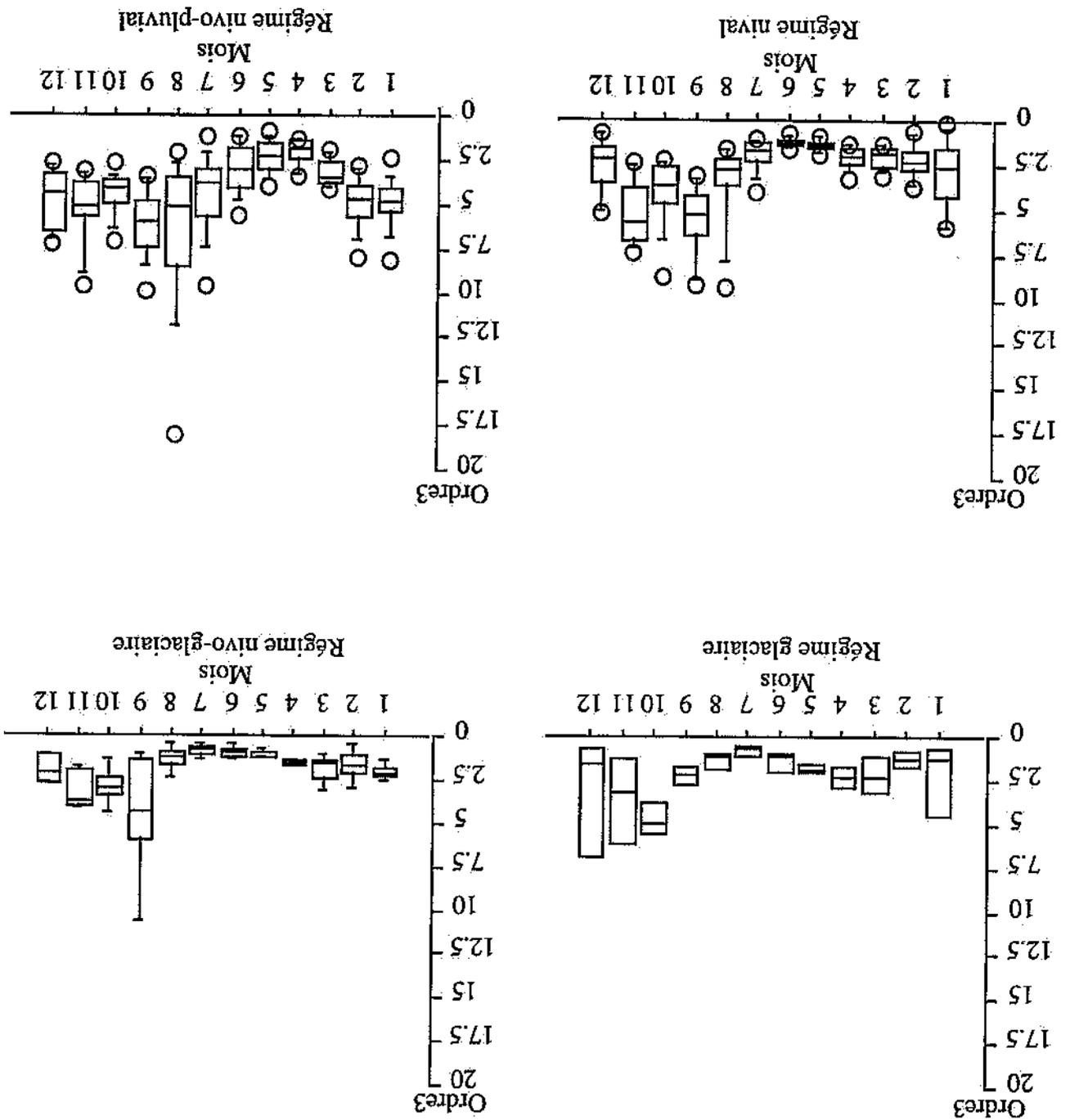
ANNEXE 6.2.9 COEFFICIENT D'ASYMETRIE PAR REGIME

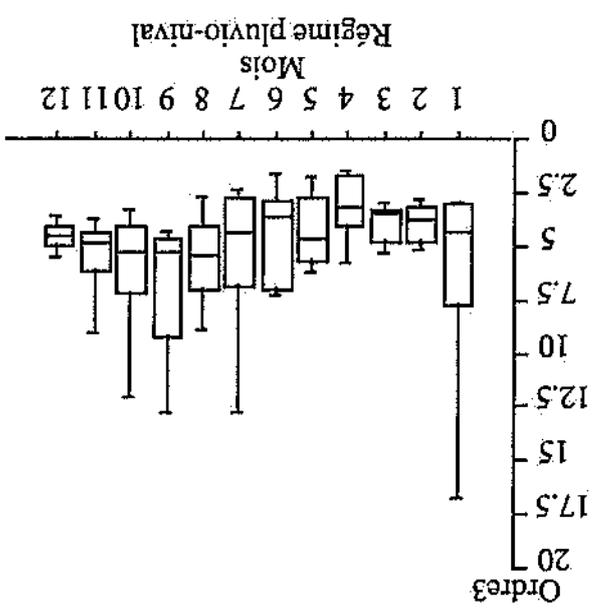
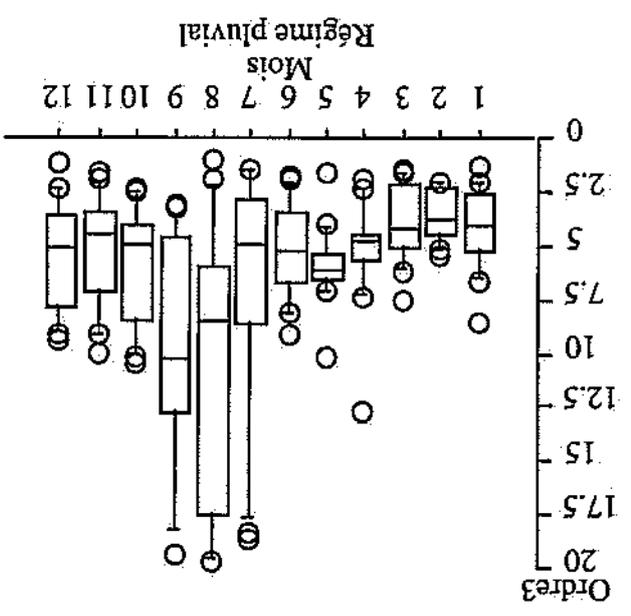
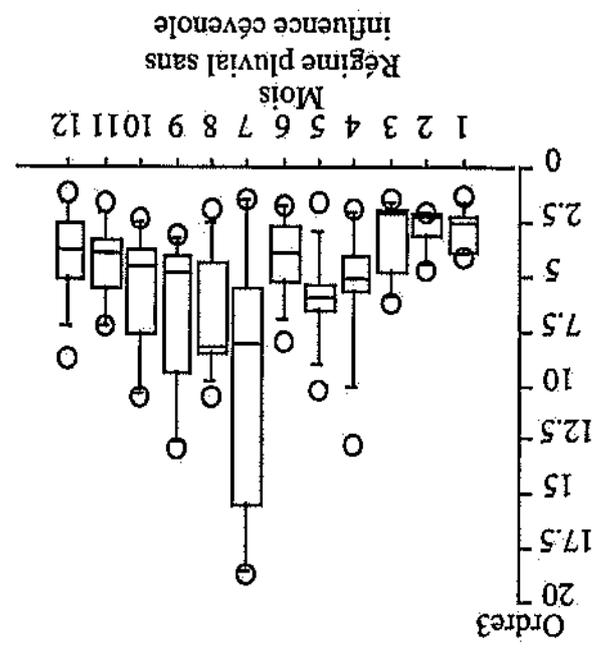
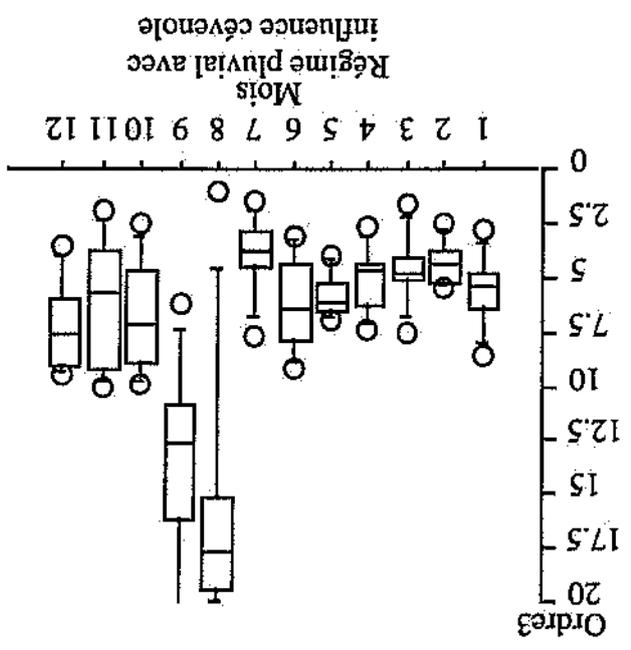
Ce coefficient est le rapport de la moyenne par la médiane des débits
 Asymétrie = moyenne / médiane





ANNEXE 6.2.10 MOMENT D'ORDRE 3 PAR REGIME





Code hydro	Nom de la station	Cours d'eau	Surface	Ans	Relief	Écolog	Pluie	Eco
	Principales caractéristiques des stations hydrométriques utilisées sur la Loire.							
K0010010	RIEUTORD	Loire	62	21	5	30	1600	1
K0253010	CHADRAC (BORNE)	Borne Occidentale	428	15	5	50	800	1
K0454010	VAUBARLET (STE-SIGOLÈNE)	Dunères	228	20	5	0	1000	1
K0523010	LAPRAT	Aance du Nord	354	43	5	10	800	1
K0624510	LE BLEB	Bonson	104	18	2	0	750	1
K0643110	VERRINES	Mare	95	17	3	0	1000	1
K0673310	MOULIN BRÛLE	Coise	181	19	3	0	800	1
K0813010	CHATEAU D'AIX (GRESOL)	Aix	174	16	4	0	750	1
K0910010	VILLEREST	Loire	6580	20	4	15	850	1
K0943010	AMPLERUIS	Reims	114	13	3	0	1100	1
K0974010	NEAUX	Gand	85	12	2	0	820	1
K1180010	DIGOIN	Loire	9310	13	3	35	800	1
K1211810	VOUDENAY	Arroux	244	16	2	50	750	1
K1273110	PRE CHARMOY	Ternin	257	22	2	10	900	1
K1391810	LE VERDIER	Arroux	3170	13	2	30	900	1
K1440010	GILLY	Loire	13000	16	3	55	800	2
K1503010	CHATEL MONTAGNE	Besbre	135	43	5	0	1100	1
K1753110	CERCY LA TOUR	AÛne	338	20	3	40	850	1
K1764010	MONTIGNY SUR CANNE	Canne	178	18	3	100	850	2
K1833010	ST-GERMAIN CHASSENAY	Acollin	384	11	2	100	750	2
K1930010	NEVERS	Loire	17600	16	2	40	800	2
K1956010	POISSON	Nievre d'Arzembovy	224	20	2	100	820	2
K1963010	URZY	Nievre	501	10	2	100	850	2
K2070810	LAVALLETTE	Allier	394	25	4	0	1200	1
K2210810	MONISTROL D'ALLIER	Allier	988	43	4	0	1000	1
K2363010	PAULHAGUET	Senouire	155	13	4	0	700	1
K2514010	PT DU VERNET (OURSAC)	Allanche	157	13	3	0	1200	1
K2523010	JOURSAC LE VIALARD	Alagnon	310	13	5	0	1400	1
K2593010	LEMPDES	Alagnon	984	13	4	0	850	1
K2654010	SAINT-FLORET	Coize d'Issore	216	13	5	20	1000	1
K3153010	LORIGES	Andelat	210	20	2	80	650	2
K3292010	PT DU BOUCHET (MIREMON)	Stoule	1170	9	4	0	1000	3
K3650810	PONT DU GUETTIN (CUFFY)	Allier	14300	11	3	30	800	1
K4094010	VILLIERS SUR NOHAIN	Nohain	473	18	1	100	830	2
K4180010	GIEN	Loire	35500	16	1	100	650	2
K4443010	LAILLY EN VAL	Ardox	155	24	3	44	800	2
K4470010	BLOIS	Loire	38300	93	3	40	800	2
K4552210	CHAMMONT SUR THARON	Beuvron	371	8	1	100	680	2
K4672210	MOULIN PEZET (CHEVERNE)	Beuvron	1100	11	1	100	680	2
K4783010	VINEUIL	Cosson	702	10	1	100	700	2
K4873110	VILLEDOMER	Brenne	263	22	1	100	700	2
K4900010	TOURS	Loire	42100	16	2	50	770	2
K5090910	CHAMBONCHARD	Cher	517	50	3	0	850	3
K5183010	EVAux	Tardes	854	53	3	0	900	3
K5200910	TEILLET-ARGENTY	Cher	1600	43	2	0	850	3
K5383010	PONT DE LA ROCHE	Aumance	928	17	2	100	800	2
K6192410	MEREAU	Arnon	2160	8	1	100	750	2
K6373020	MENETREOL	Petite Sauldre	318	15	1	100	770	2

R6402510	SABRIS	Saoudre	1200	19	1	100	750	2
R6492510	SELLES SUR CHER	Saoudre	2250	16	1	100	720	2
R6720910	SAVONNIERES	Cher	13700	15	2	80	750	2
K6830010	LA CHAPELLE SUR LOIRE	Loire	56500	11	2	60	750	2
K7202610	ARDENTES	Indre	697	14	3	50	750	3
K7433030	GENTILE	Indrois	396	12	1	100	700	2
K7542610	MARNAY (LIGNIERES)	Indre	3280	9	1	90	720	2
L0563010	CHAMBON VEYRINAS	Briance	597	19	4	0	950	3
L0624010	MOULIN JAPAUD	Aixelle	152	21	4	0	1100	3
L0813010	PONT DU DEROT	Glane	288	22	4	0	950	3
L0914010	ROCHECHOUART	Gorre	192	21	4	0	920	3
L0920610	PONT DE PILAS	Vienne	4100	24	3	0	1200	3
L2253010	PONT DE CLOUB	Vonne	320	21	2	60	850	4
L2443010	PONT DE ROCHECOURBE	Auxance	262	21	2	100	800	2
L2501610	DISSAY	Clain	2890	15	1	100	750	2
L3123010	PONT DE BESSS	Envigne	242	20	1	100	600	2
L3200610	INGRANDES	Vienne	10000	25	3	50	900	3
L4010710	FELLETIN	Creuse	165	26	4	0	1100	3
L4033010	AUBUSSON	Rozelle	186	25	4	0	1100	3
L4530710	EGUZON	Creuse	2400	64	4	0	1000	3
L5101810	BESSNES	Gartempe	570	25	2	0	1000	3
L5411810	MONTMORILLON	Gartempe	1870	29	2	10	900	3
L5511910	PRISSAC	Anglin	225	10	2	30	950	3
L5623010	IOUAC	Benatze	190	10	2	30	900	3
L5741910	MERIGNY	Anglin	1630	15	1	30	800	3
L6020710	LEUGNY	Creuse	8020	21	2	30	850	3
L7000610	NOUATRE	Vienne	19900	28	2	50	830	3
L8000010	MONTSORBAU/SAUMUR	Loire	81100	14	1	55	800	2
L8122120	CHATILLON SUR THOUET	Thouet	223	8	1	0	850	4
L8122130	MOULIN DE REMUE	Thouet	377	7	1	0	950	4
L8134020	PUY TERRIER	Cebren	162	8	1	0	730	4
L8142110	ST GENEROUX	Thouet	701	17	1	20	750	4
L8144010	PONT DE LA BORDE	Vielle	33	16	2	0	650	4
L8134010	ORFEUILLE	Cebren	116	6	2	0	900	4
L8134030	LE CHAMP DES BALASTIES	Cebren	68	6	2	0	750	4
L8203010	LA ROCHELETTE	Thouet	140	6	1	0	800	4
L8213010	LUZAY	Thouaret	308	19	2	0	1000	4
L8232110	ORVINES	Thouet	1170	6	1	30	750	4
L8303010	TOUCHE AU PORT	Argenton	81	3	1	0	800	4
L8303020	PONT FERON	Argent	61	15	1	0	800	4
L8307310	LES AUBIERS	Scie	42	12	1	0	720	4
L8343010	MOULIN BERNARD	Argenton	634	22	2	20	700	4
L8503010	MOULIN DE RETOURNAY	Dive du Nord	201	20	1	100	600	2
L8523010	LA MOTTE BOURBON (RN)	Canal de la Dive	785	11	1	100	600	2
L8602110	PT DE CHACE	Thouet	3310	13	2	50	700	4
M0250610	NEUVILLE SUR SARTHE	Sarthe	2720	10	4	50	830	4
M0401510	LES AIEUX	Huisne	1420	11	2	100	700	2
M0421510	LA PECARDIERE	Huisne	1890	8	2	100	700	2
M0583010	MOULIN LE PIVOT (D43)	Végre	360	12	2	50	750	2
M0633010	LAUBINIÈRE (D136)	Erve	380	18	2	0	800	2
M0653110	BOUSSAY D306	Vaige	233	11	2	0	800	2
M0680610	BEEFFES (ST-DENIS D'AN)	Sarthe	7380	12	2	80	750	2

Glossaire

Principaux sigles utilisés dans ce manuscrit.

ANOVA : Analyse de la variance (Logiciel STATVIEW sur Mac).

ACP_n : Analyse en composantes principales normée.

ΔQ : Différence de débit entre le débit d'un jour donné et la médiane glissante des débits sur 30 jours.

$\Delta Q_{[10]}$: Différence de débit de période de retour 10 ans.

E.F.C : Ecosystèmes d'Eau Courante.

Gradex : Gradient exponentiel des débits journaliers.

Indice A : Accroissement des ΔQ avec la période de retour.

Indice B : Borne supérieure des ΔQ fréquents.

Mémoire M : Durée de référence servant au calcul des ΔQ . Des durées de 3, 7, 10, 20 et 30 jours sont testées dans ces recherches.

Q_n a % : Débit classé par ordre croissant dépassé a % des jours.

Q_0 : Crue annuelle ($T = 1$ an).

$Q_{[10]}$: Crue de période de retour moyenne 10 ans.

Q_x b % : Débit classé par ordre décroissant non atteint b % des jours.

QDF : Débit durée fréquence. Dans ce travail, les débits et les ΔQ sont journaliers.

T : période de retour en années.

T_x : période de retour lorsqu'un seul maximum de débit est échantillonné par saison ou par année. Les périodes de retour proposées dans ces recherches correspondent à des T_x .

T_s : période de retour lorsqu'un seuil de débit est dépassé.

V.H : Variabilité hydrologique.

VHF : Variabilité hydrologique fréquente.

VHPF : Variabilité hydrologique peu fréquente.

