

CONSEIL
SCIENTIFIQUE
DU COMITE DE BASSIN
RHONE
MEDITERRANEE
CORSE



**DÉTERMINANTS HYDROLOGIQUES
DE CARACTÉRISATION
DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE
DES COURS D'EAU**

Octobre 2000

Comité de Bassin

rhône méditerranée corse

**CONSEIL SCIENTIFIQUE
COMITE DE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE**

**Déterminants hydrologiques de caractérisation
du fonctionnement physique des cours d'eau**

Travaux du Groupe d'Experts « Hydrologie et Ecosystème Fluvial », composé de Messieurs

- Claude AMOROS
- Bernard CHASTAN
- Bernard CHOCAT
- Pierre CHAUVE
- Jean-Luc. PEIRY

et partiellement

- Philippe BOIS
- Pierrick GIVONE
- Guy OBERLIN

Sous la Présidence de Daniel DUBAND

Novembre 2000

Table des Matières

TABLE DES MATIÈRES	2
PREAMBULE	4
1. DESCRIPTION DES RÉGIMES : PRINCIPES ET MÉTHODOLOGIE	5
1.1 Notion de régime hydrologique.....	5
1.2 Méthodes de caractérisation du régime hydrologique.....	6
1.3 Critères pour le choix des indicateurs.....	7
2. PROPOSITIONS DE DESCRIPTEURS	8
2.1 Liste des descripteurs utilisables.....	8
2.2 Premiers éléments de quantification.....	9
2.3 Choix des descripteurs en fonction du contexte : quelques orientations.....	9
3 CONCLUSION ET SUITES À DONNER.....	10
ANNEXES.....	11
ANNEXE 1 : DESCRIPTION DES REGIMES : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	12
1. LES CLASSIFICATIONS DE TYPE PARDÉ	13
1.1. La classification de Lvovich (1938)	13
1.2. La classification de Pardé.....	13
1.3. Les classifications scandinaves et de la zone FRIEND	15
2. LES MODÈLES DE SYNTHÈSE DÉVELOPPÉS PAR EDF.....	16
2.1. Régime des débits selon la saison	16
2.2. Modèle Tempétiage	17
3. MÉTHODES PARTICULIÈRES.....	17
3.1. Méthodes probabilistes	17
3.2. Courbes de débits classés.....	17
4. LES MODÈLES DE SYNTHÈSE PRENANT EN COMPTE LA DURÉE DE LA CRUE : COURBES DÉBIT-DURÉE- FRÉQUENCE (QdF).....	17
4.1. Courbes Débit-Durée-Fréquence (QdF).....	18
EN CRUE :	20
EN ÉTIAGE :	20
5. NOTIONS DE VARIABILITÉ ET DE STATIONNARITÉ DU RÉGIME	24
5.1. Variabilité du régime	24
5.2. Stationnarité du régime.....	24
CONCLUSION DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	25
ANNEXE 1.1 : MODELES DE SYNTHESE DEVELOPPES PAR EDF REPARTITION DES DEBITS SELON L'EPOQUE DE L'ANNEE	26
ANNEXE 2 : LISTE DES DESCRIPTEURS PROPOSES PAR LE GROUPE DE TRAVAIL	27
BASSIN VERSANT.....	28
RÉGIME HYDROLOGIQUE	28
ÉVÉNEMENTS RARES	28
NAPPES PHRÉATIQUES	28
AUTRES DONNÉES CARACTÉRISTIQUES.....	29
DEGRÉ D'ARTIFICIALISATION OU D'ANTHROPISATION.....	29
ANNEXE 3 : DESCRIPTION DES REGIMES : APPLICATION A 6 BASSINS VERSANTS TESTS	30
1. INTRODUCTION	31
2. LES DONNÉES DISPONIBLES UTILISÉES	31
2.1. Topographie.....	31
2.2. Hydrographie.....	32
2.3. Hydrologie	32
2.4. Cartographie.....	32

3. OBTENTION DES DESCRIPTEURS : LES TRAITEMENTS RÉALISÉS.....	33
3.1. Description du bassin versant.....	33
3.2. Description du régime hydrologique.....	34
3.3. Description des événements rares.....	35
3.4. Description de la nappe phréatique.....	37
3.5. Description du degré d'artificialisation ou d'anthropisation.....	37
3.6. Autres descripteurs.....	38
4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	38
4.1. Description du bassin versant.....	38
4.2. Description du régime hydrologique.....	40
4.3. Description des événements rares.....	41
4.4. Description de la nappe phréatique.....	44
4.5. Description du degré d'artificialisation ou d'anthropisation.....	45
4.6. Autres descripteurs.....	45
ANNEXE 3.1 : LOCALISATION DES BASSINS VERSANTS TESTS	47
ANNEXE 3.2 : IMAGES DES BASSINS VERSANTS D'ETUDE : RELIEF ET CHEVELU HYDROGRAPHIQUE.....	48
ANNEXE 3.3 : ANALYSE DES CRUES : SAISONALITE	49
ANNEXE 3.4 : ANALYSE DES CRUES : AJUSTEMENT D'UNE LOI EXPOTENTIELLE SUR LES OBSERVATION QUANTILES DE DISTRIBUTION THEORIQUE	50
ANNEXE 3.5 : ANALYSE DES ETIAGES : COURBES QDF ET DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGE.....	51
ANNEXE 3.6 : ANALYSE DES ETIAGES : COURBES DE TARISSEMENT.....	52
ANNEXE 4 : FICHES-RESUME DES DESCRIPTEURS DES BASSINS VERSANTS	53
ANNEXE 5 : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

PREAMBULE

Le bassin Rhône Méditerranée Corse présente une diversité et une variabilité exceptionnelles de régimes hydrologiques (du régime pluvial méditerranéen au régime pluvial océanique, auxquels s'ajoutent toutes les combinaisons avec le régime nival... jusqu'au régime glaciaire). Les variations saisonnières ou l'irrégularité des étiages et des crues se répercutent sur le fonctionnement biologique et physique des cours d'eau, et à chaque régime hydrologique particulier doit correspondre un mode de gestion adapté. Mais la caractérisation d'un régime hydrologique est extrêmement complexe, et il est très difficile de résumer en quelques chiffres la variabilité d'un débit qui dépend de facteurs aussi variés que la nature géologique du bassin, l'altitude, la saison, les aléas climatiques et l'influence anthropique.

Gestionnaires aussi bien que scientifiques se heurtent fréquemment à cette complexité, ce qui a motivé la saisine par le Comité de Bassin de son Conseil Scientifique, et la mobilisation, en son sein, d'un groupe d'experts. Une réflexion de fond à caractère pluridisciplinaire, menée sur deux années, a permis d'identifier des paramètres synthétiques qui puissent rendre compte de la diversité des situations rencontrées sur les cours d'eau du bassin.

Les résultats obtenus ont d'ores et déjà été utilisés dans le cadre de la réflexion sur les objectifs de quantité préconisée par le SDAGE. Ils ont également été intégrés dans les études nationales en cours concernant la définition d'un Système d'Evaluation de la Qualité Physique des cours d'eau (SEQ Milieu Physique). Ce travail de défrichage sur un sujet d'actualité nouveau et particulièrement complexe constitue donc déjà une contribution significative aux réflexions et aux travaux menés par ailleurs. Il sera également mis à profit dans le cadre des études thématiques menées par les groupes de travail chargés du suivi du SDAGE et par les groupes techniques en charge des études inter-bassins. Il restera à en assurer la déclinaison au regard de la variété des contextes et des problématiques posés, et des mesures opérationnelles de gestion à mettre en place. Partant de considérations théoriques et encore très générales, il conviendra donc d'intégrer et de développer plus spécifiquement d'autres aspects, non encore abordés (liés à l'occupation des sols par exemple), nécessaires à la définition d'objectifs quantitatifs pertinents et réalistes.

L'objectif assigné au Groupe de Travail « Hydrologie et Ecosystème Fluvial » était de proposer une **description à base hydrologique du fonctionnement des cours d'eau du Bassin Rhône-Méditerranée-Corse**, pour la définition d'objectifs de quantité préconisés par le SDAGE, en s'appuyant sur des critères quantitatifs dépassant les approches géographiques et géomorphologiques classiques de type plutôt qualitatives.

La démarche consistait à :

1. identifier des descripteurs quantitatifs pertinents de l'hydrologie des cours d'eau, selon le type de cours d'eau considéré, par sélection de débits et des régimes caractéristiques,
2. estimer les valeurs ou les plages de valeurs des descripteurs sélectionnés traduisant un « bon » fonctionnement et les écarts aux références de débits significatifs en terme de fonctionnement
 - physique
 - biologique.

Dans cette première phase de réflexion, le groupe de travail s'est attaché à **élaborer, à dire d'expert, une liste de descripteurs** hydrologiques qui lui semblent pertinents. Cette liste a fait l'objet d'une analyse fine et d'une **application à six cours d'eau** du Bassin RMC, essentiellement sur des chroniques historiques de débits moyens journaliers. Ce travail a donné lieu à une vacation de quelques mois au sein du CEMAGREF Lyon – Division Hydrologie Hydraulique financée par l'Agence de l'Eau avec un co-encadrement de membres du groupe de travail.

Il a permis d'amorcer la deuxième phase de réflexion relative à la quantification des descripteurs et d'en dégager quelques principes méthodologiques qui, consolidés par les travaux menés par ailleurs à l'échelle nationale, pourront déboucher à terme sur un référentiel opérationnel.

1. Description des régimes : Principes et méthodologie

1.1 Notion de régime hydrologique

Il faut en préalable bien s'entendre sur la définition de la notion de régime hydrologique des rivières et des fleuves pour en assurer une bonne caractérisation. Le bassin versant d'un cours d'eau est soumis au cycle des saisons. Sous l'influence de cette pulsation climatique, plus élaborée en zone tempérée, le débit d'eau dans la rivière va évoluer au cours du temps, et pendant chaque saison en fonction d'éléments météorologiques, selon les précipitations (pluie-neige) spatio-temporelles, l'infiltration, les températures de l'air, l'évaporation, les nappes phréatiques....

S'intéresser au régime hydrologique de la rivière, s'interroger sur la probabilité d'occurrence d'un débit à une date donnée, c'est étudier la variation des débits, des écoulements, selon la saison dans l'année et au cours des années (définition EDF-CEMAGREF).

L'information de base, lorsqu'on étudie un cours d'eau, est une série chronologique continue dans une section donnée de la variable X (débit déduit du niveau d'eau d'après la courbe de tarage étalonnée par des jaugeages, en $m^3/s = m^2 \times m/s$, produit d'une surface par une vitesse) ; le seul niveau, extrêmement tributaire des évolutions de la morphologie de la rivière dans le temps, ne peut servir de référence.

Cette fonction du temps X(t) peut se présenter ainsi :

$$X(t) = \underbrace{T(t) + S(t)}_{①} + \underbrace{D(t) + U(t)}_{②}$$

① : la composante à long terme (ou tendance) T(t), la composante saisonnière S(t), la composante diurne D(t), constituent les composantes déterministes, en régime non affecté par les influences anthropiques ;

② : $U(t)$ constitue la composante aléatoire, sachant qu'une modélisation linéaire de ce terme peut être représentée selon la géomorphologie et la surface du bassin, par tout ou partie du développement suivant :

$$U(t) = \sum_{i=1}^p \alpha_i U(t-i) + \sum_{i=1}^a \beta_i V(t-i) + \sum_{i=0}^v \delta_i \varepsilon(t-i)$$

(a) (b) (c)

- (a) : représente l'inertie (tarissement)
- (b) : représente les influence externes (pluie, neige....)
- (c) : représente l'écart résiduel, le bruit et l'incertitude.

Déscription des données débit à différentes échelles de temps

- *au pas temps annuel :*

$$X(t) = T(t) + U(t)$$

On admet, dans l'état actuel des connaissances que $T(t) \neq 0$, pour les 100 à 150 dernières années. Bien que l'on estime le climat à peu près stable depuis 3 000 ans, il n'est pas stationnaire. On a pu observer le réchauffement au Moyen Âge (de + 1° annuel) et le refroidissement durant le petit âge glaciaire (- 1° annuel), avec leurs conséquences sur les pluies, donc les débits.

On constate des séquences d'années sèches et des séquences d'années humides mais sans aucune régularité d'alternance, avec des crues rares qui apparaissent en bouquet¹.

- *Au pas de temps mensuel, décadaire, hebdomadaire, journalier :*

$$X(t) = S(t) + U(t)$$

La composante saisonnière $S(t)$ est essentiellement induite par la rotation de la terre autour du soleil ; $S(t)$ peut concerner la moyenne, l'écart type, le coefficient de dissymétrie, les coefficients de corrélation des débits successifs.

- *Au pas de temps inférieur au jour, horaire par exemple :*

$$X(t) = S(t) + D(t) + U(t)$$

La composante diurne $D(t)$ (rotation de la terre sur elle même) est bien observée en période de fusion nivale et glaciaire, ainsi que pour certains phénomènes météorologiques convectifs (orages).

1.2 Méthodes de caractérisation du régime hydrologique

Elle ne sont pas nombreuses dans la littérature scientifique internationale, et les outils peu utilisés.

Le travail de recherche bibliographique réalisé dans le cadre de la vacation commandée au CEMAGREF par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse (présenté en annexe 1) en effectue un inventaire assez exhaustif :

- *classification de Lyovich (1938), classification de Pardé (1955)* évoquée 30 ans plus tôt dans ses travaux, et qui ont inspiré des *classifications scandinaves (1979)* et de *la zone Friend (1993)* plus récentes ; tous ces travaux ont été effectués sur les débits moyens mensuels, d'après des chroniques de plusieurs années ;
- *modèles de synthèse avec fréquences empiriques* selon la date dans l'année calendaire avec repérage des valeurs extrêmes de crue et d'étiage respectivement supérieures et inférieures à l'événement décennal mensuel, sur des données de débits moyens journaliers ou moyens hebdomadaires (1970 à EDF/DTG)

¹ Fluctuation de Joseph et de Noé – Mandelbrot : « Formes nouvelles du hasard dans les sciences », conférence au Collège de France – 1973.

- *modèles de synthèse* prenant en compte la *durée de la crue et de l'étiage*, dont les logiciels ont la possibilité de tenir compte de la saisonnalisation, du type Débit-durée-Fréquence ou QdF, extrapolés à des fréquences un peu rares (développés par le CEMAGREF de Lyon depuis 1990) ;

Remarque : même si elles répondent à des problématiques différentes, on peut citer les méthodes de calcul des probabilités de crue maximale annuelle (débit de pointe, volume, hydrogramme) du type GRADEX, AGREGEE, les méthodes d'estimation du risque d'étiage annuel rare (débit minimum, volume minimum pendant certaines durées....) du type modèles QdF (CEMAGREF) et Tempétiage (EDF-LNH), ainsi que les courbes des débits classés (moyens journaliers) annuelle, ou par saison. Ces dernières fournissent des pourcentages de débit inférieurs à telle valeur, et non des fréquences au sens probabiliste, car elles intègrent l'autocorrélation élevée des débits successifs, et dans le calcul annuel, le mélange des saisons.

Ces méthodes fournissent des éléments complémentaires de connaissance d'un régime hydrologique.

Le groupe de travail propose de retenir la **méthode EDF** (régime saisonnier des débits moyens journaliers ou hebdomadaires) et la **méthode QdF du CEMAGREF**, qui apparaissent comme **les plus intéressantes** dans le cadre de ses réflexions. Elles permettent en effet de considérer de façon synthétique les événements extrêmes (crues-étiages) aussi bien que les événements courants selon la saison (en faisant évoluer QdF dans cette perspective). De plus, elles prennent en compte la durée des phénomènes et permettent d'intégrer les variations journalières de débit, ainsi que les écarts aux valeurs moyennes de paramètres caractéristiques.

On notera que la méthode QdF est particulièrement adaptée aux critères représentatifs des étiages dans chaque bassin versant de rivière.

1.3 Critères pour le choix des indicateurs

a. Importance de la notion de seuil

De façon générale, dans le domaine de l'hydrologie, les membres du groupe soulignent le besoin – la nécessité – d'établir une liaison entre d'une part les processus qui se traduisent surtout par des volumes (ou débits) et obéissent à des lois physiques, et d'autre part la demande sociale et biologique (le milieu, avec des aspects physiques inclus dans la dynamique fluviale) qui s'exprime actuellement le plus souvent en terme de seuils.

Par voie de conséquence, **les indicateurs retenus devront être à la fois sensibles pour la caractérisation de phénomènes et significatifs par rapport à la demande sociale.**

b. Echelles de temps

Les échelles de temps à considérer apparaissent comme un point clé dans la recherche de descripteurs². En effet il sera nécessaire, pour caractériser l'impact de l'hydrologie sur le fonctionnement physique et biologique local des cours d'eau, de considérer des événements très brefs aussi bien que des variations d'amplitude saisonnière. Pour la biologie, la variabilité interannuelle des débits a également beaucoup d'importance.

c. Diversité des phénomènes

Il apparaît nécessaire de **prendre en compte une gamme très large d'intensité des phénomènes :** situations courantes aussi bien que situations rares et extrêmes (étiages-crues), tenant compte de la variabilité temporelle des débits naturels et des aléas d'échantillonnage (liés à la durée d'observations).

² Sachant que plus la discrétisation est fine, plus la dépendance des valeurs consécutives est élevée.

d. Critères de faisabilité

Le groupe met l'accent sur les critères de faisabilité – précision – robustesse et validation – pérennité des mesures ; ces aspects doivent guider le choix des descripteurs afin de permettre une application opérationnelle des résultats obtenus.

2. Propositions de descripteurs

2.1 Liste des descripteurs utilisables

A partir d'une liste complète (citée en annexe 2), une première sélection des descripteurs les plus pertinents a été effectuée par le groupe de travail. Les descripteurs sélectionnés sont de deux types :

- les descripteurs « Toile de fond », qui sont des caractéristiques du bassin versant indépendantes de toute influence anthropique,
- les descripteurs sensibles à une variation, d'origine naturelle ou anthropique.

Descripteurs « Toile de fond »
Surface géographique
Surface hydrologique (karst, captages)
Chevelu hydrographique
Morphométrie
Hypsométrie BV
Géologie BV
Végétation BV
Précipitations
Température
Descripteurs sensibles à une variation
Module – coefficient de variation
Régime type Pardé
Régime type EDF
Crues QdF
Crue morphogène
Crue Q10 à Q100 (maxi instantanés)
Crue > 100 ans
Etiage QMNA
Etiage VCN3
Courbe de tarissement
Nappes
Circulation karst
Bilan hydrologique (inter annuel)
Courbe de Q classés (année et saison), éventuellement

L'annexe 3 présente des exemples d'application de ces descripteurs à quelques bassins versants tests. L'un des objectifs de ce travail est d'apprécier les moyens nécessaires pour obtenir les descripteurs proposés par le groupe de travail.

On peut en tirer plusieurs enseignements :

- L'acquisition des descripteurs du bassin versant est facilitée par l'utilisation d'un **modèle numérique** de terrain. Des procédures de traitement sont alors facilement mises en place et permettent de décrire la morphométrie et le réseau hydrographique du bassin. Les données de végétation et de géologie sont acquises à partir de cartes accessibles facilement.

- La **base de données HYDRO** permet d'acquérir les chroniques de débit à pas de temps journalier pour la majorité des bassins versants. Le traitement de ces chroniques permet de connaître les caractéristiques du régime hydrologique et des étiages. Pour les crues, les chroniques de débit à pas de temps variable renseignent sur les débits de pointe ; malheureusement elles ne sont pas souvent disponibles sur la banque HYDRO.
- **L'Atlas du bassin Rhône-Méditerranée-Corse** donne la description de la nappe phréatique et du degré d'artificialisation ou d'anthropisation.
- **Certains descripteurs n'ont pu être acquis**, en particulier ceux nécessitant la connaissance des précipitations ou de la géométrie du cours d'eau (vitesse ou hauteur d'eau). Pour le premier point, la difficulté ne provient certes pas du manque de données, la banque PLUVIO permettant l'acquisition des chroniques de pluie sur un grand nombre de postes de mesure. Par contre, la spatialisation des précipitations, c'est à dire le passage de mesures ponctuelles à une valeur de pluie pour tout un bassin, n'a pas été réalisée car elle nécessite un important travail. L'acquisition des descripteurs de vitesse et de hauteur en crue ou en étiage nécessite par exemple la connaissance de la courbe de tarage des stations hydrométriques. Ces données sont en général conservées par le gestionnaire du bassin et difficilement accessibles.

2.2 Premiers éléments de quantification

Les valeurs des descripteurs calculés pour chacun des six cours d'eau ayant fait l'objet du test d'application sont résumées en annexe 4. Ces premiers éléments de quantification donnent une description précise du régime hydrologique des cours d'eau considérés. Les valeurs obtenues mettent en évidence la **diversité des situations** entre les différents cours d'eau du bassin.

Bien que la demande des biologistes et géomorphologues ait guidé le choix des descripteurs, il s'agit pour le moment d'une **réponse purement hydrologique**. Seule l'exploitation de ces résultats par d'autres disciplines permettra de sélectionner les plus pertinents au regard des enjeux, et si besoin de se tourner à nouveau vers l'hydrologue pour affiner la demande.

2.3 Choix des descripteurs en fonction du contexte : quelques orientations

Les premières réflexions du groupe de travail ont permis d'envisager l'utilisation d'un double crible pour sélectionner les descripteurs les plus pertinents vis à vis du fonctionnement physique et biologique du milieu.

La sélection des descripteurs pourrait se faire :

- par grand critère ou fonction du cours d'eau :

- fonction ressources en eau,
- aptitude à la vie aquatique (notamment la vie piscicole),
- connectivité,
- potentiel de régénération.

- par type d'action anthropique auquel les descripteurs sont sensibles :

Les types d'actions anthropiques considérés sont les suivants :

- pompes-prélèvements,
- dérivation,
- stockage (barrage-réservoir),
- imperméabilisation du bassin versant,
- endiguement, recalibrage, curage....,

- ouvrage en travers ou au fils de l'eau (seuils),
- extraction de matériaux,
- restitutions (éclusées).

Cette réflexion constitue un préalable à la seconde phase de ce travail : estimer les valeurs ou les plages de valeurs des descripteurs sélectionnés traduisant un « bon » fonctionnement et les écarts aux références de débits significatifs en terme de fonctionnement des cours d'eau.

3 Conclusion et suites à donner

La réflexion relative à l'incidence de l'hydrologie sur les milieux physiques et biologiques, permettant d'aboutir à des recommandations concernant les valeurs de ces descripteurs qui traduisent un bon fonctionnement écologique, reste à poursuivre. Par ailleurs la liste actuelle est pour l'instant essentiellement hydrologique. Elle appelle une liste complémentaire de descripteurs hydrauliques, interface entre l'hydrologie et les habitats, essentielle pour évaluer la qualité physique des cours d'eau (débits de plein bord, largeur au miroir, profondeurs maximales, aires des sections de plein bord, descripteurs de champs de vitesses, etc.).

Le travail mené par le groupe d'experts du Comité Scientifique, s'il peut déjà servir d'appui aux travaux plus directement opérationnels déjà engagés, devra nécessairement trouver des prolongements dans le cadre des programmes de recherche en cours et à venir sur ce thème.

ANNEXES

ANNEXE 1 :

DESCRIPTION DES REGIMES :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Les classifications de type Pardé

Les premières classifications des régimes hydrologiques ont été développées par Lvovich (1938) en URSS puis Pardé (1955) en France. La classification de Pardé a inspiré de nombreuses autres (Arnell et al., 1993a et 1993b ; Haines et al., 1988 ; Krasovskaia et al., 1993 ; Oberlin et al., 1993) souvent plus fines et plus précises notamment en raison des nouvelles capacités de calcul offertes par le développement de l'informatique. Ces classifications sont de toute façon toutes basées sur l'hypothèse que la variation temporelle de l'écoulement dépend essentiellement de deux facteurs :

- 1-l'influence du régime climatique et surtout de la distribution saisonnière de la pluie et de l'évaporation, de l'arrivée et de la fonte des neiges, etc. ;
- 2-l'influence physiographique du bassin versant : présence ou absence d'aquifères, de marais, de lacs.

Ces classifications du régime des cours d'eau sont effectuées sur la base d'une analyse fine d'un nombre important d'hydrogrammes annuels et les résultats sont généralement présentés sous forme de cartes sur lesquelles figurent les hydrogrammes caractéristiques obtenus. Ces classifications recouvrent pour certaines le monde entier alors que d'autres sont adaptées localement.

Nous présentons ci-dessous ces classifications, les données nécessaires ainsi que leur traitement.

1.1. La classification de Lvovich (1938)

La classification de Lvovich est le développement d'une classification plus récente (sans doute la première) présentée par Voeikov en 1884 (Arnell et al., 1993a). Elle distingue le régime hydrologique en fonction de la provenance des écoulements (neige, pluie, glacier ou eau souterraine) et de la distribution saisonnière du débit. Pour chaque source d'écoulement et pour chaque saison, trois graduations sont définies. On parvient ainsi à la définition de 144 régimes ! Lvovich note toutefois que seulement 38 régimes sont observés ; ils ont été généralisés en 12 types essentiels, applicables au monde entier.

1.2. La classification de Pardé

La classification de Pardé est elle aussi globale, basée sur l'origine des écoulements et la répartition du débit au cours de l'année. Trois principaux types de régimes sont distingués : les régimes simples, les régimes complexes originels et les régimes complexes changeants.

Les cinq régimes simples sont ceux qui ont seulement deux saisons hydrologiques, l'une des hautes eaux et l'autre des basses eaux, et principalement une source d'écoulement.

Les régimes complexes originels ont plusieurs phases hydrologiques, représentant les contributions de différentes sources à l'écoulement (fonte des neiges et pluie, par exemple).

Les régimes complexes changeants regroupent les rivières affectées par des influences diverses dans différentes parties du bassin. Cette troisième catégorie inclue la plupart des grands fleuves. Le Rhin en est un bon exemple : la partie supérieure du bassin est dominée par des écoulements provenant de la fonte des neiges alors que les pluies alimentent la partie inférieure.

Ces trois types principaux de régimes sont divisés en sous-groupes dépendant de la distribution des périodes de hautes et basses eaux. Le tableau 1 présente les différents régimes obtenus par Pardé.

Régimes simples	Glaciaire Nival de montagne Nival de plaine Pluvial-océanique Pluvial-tropical
Régimes complexes originels	Nival de transition Nivo-pluvial Pluvio-nival Pluvial-équatorial
Régimes complexes changeant	

Tableau 1 : Définition des régimes selon la classification de Pardé. D'après Pardé (1955).

L'application aux rivières françaises de cette classification y a apporté quelques modifications. Le tableau 2 présente les caractéristiques des régimes hydrologiques retenus.

Régimes hydrologiques		Caractéristiques essentielles	Exemples
Surtout pluies	Pluvial océanique	Hautes eaux de saison froide ; basses eaux de saison chaude (maximum de janvier à mars, minimum de août à septembre) Deux saisons hydrologiques.	<i>Plaines sédimentaires</i> (Seine, Meuse) <i>Façades océaniques</i> (Blavet, basse Loire) <i>Pleine de l'Est</i> (Saône)
	Pluvial méditerranéen	Hautes eaux de saison froide ; basses eaux d'été. Des étiages sévères. Type géographique très limité.	<i>Basse-Provence, Maures, Esterel</i> (Arc, Argens)
Pluie et neige	Pluvio-nival	Les deux modes d'alimentation de l'écoulement sont sensibles. Cependant prédominance de l'alimentation pluviale. Hautes eaux d'hiver et de printemps ; basses eaux d'été	<i>Jura, Massif Central</i> (Ain, Doubs, Tarn à Albi, Lot à Cahors) <i>Cévennes</i> (Ardèche à Vallon) <i>Pyrénées</i> (la Nive)
	Nivo-pluvial	Rôle accru de la neige dans l'écoulement. Pénurie d'hiver (rétention nivale), gonflement printanier (fonte des neiges), basses eaux de fin d'été (rôle de l'évaporation), recrudescence automnale à caractère pluvial.	<i>Préalpes</i> (Fier, Chéran, Guiers, Bourne, Asse, Bléone, Verdon) <i>Pyrénées</i> (Bas Gave d'Oloron à Oloron, Bas Gave d'Ossau)
	Nival atténué	Le rôle de la neige devient important. Il se combine cependant encore largement avec celui des pluies.	<i>Alpes</i> (Drac au Sautet) <i>Pyrénées</i> (Neste, Pique, Salat, Ariège, Haute Garonne, etc.)
	Nival majeur	Le rôle de la neige devient majeur. D'où glissement des hautes eaux sur la fin du printemps ou l'été (mai à juillet)	<i>Alpes</i> (Haute Durance et ses tributaires, Isère après Bourg Saint Maurice)
Neige et glace	Glaciaire	Intervention de l'englacement des bassins versants. Les glaciers prennent une importance majeure, dès lors que leur surface occupe au moins 15 à 20% de celle des bassins versants. Report des hautes eaux sur l'été.	<i>Alpes</i> (Arve à Chamonix, les Arveyron, l'émissaire du glacier du Bionnassay, etc.)

Tableau 2 : Les régimes hydrologiques en France (D'après Pardé, légèrement modifié).

L'analyse de l'appartenance d'un cours d'eau à l'une des catégories définies au tableau 2 s'effectue à partir de l'étude de l'évolution au cours de l'année des coefficients mensuels de débit, c'est à dire le rapport de chaque moyenne mensuelle au module (débit annuel). Elle nécessite donc la connaissance des débits mensuels sur une chronique longue de plusieurs années.

1.3. Les classifications scandinaves et de la zone FRIEND

Une classification des régimes hydrologiques en Scandinavie a été établie en 1979 par le Groupe de Travail Scandinave sur les Régimes Hydrologiques (Gottschalk et al., 1979). Cette classification a été élargie dans le cadre du programme de recherche FRIEND initié par l'UNESCO, afin de décrire aussi les régimes hydrologiques de l'Europe de l'Ouest et du Sud (Arnell et al., 1993a). Cette classification est robuste. Elle définit les régimes en fonction du moment d'occurrence des débits maximum et minimum. Les types de régimes de cette classification sont résumés dans les tableaux 3 et 4.

En Europe du Nord, treize régimes hydrologiques ont été déclarés pertinents. Pour cette classification, Krasovskaia et al. (1993) conseillent d'utiliser des séries de mesures relativement longues, pour s'affranchir le plus possible de l'instabilité climatique qui peut exister à court terme.

Oberlin et Oancea (1993) ont adaptés cette classification et n'ont finalement retenus que 9 types de régimes.

Ces deux classifications indiquent la variabilité mensuelle des écoulements que l'on peut rencontrer en Europe.

Classe	Définition
<u>Classes de hautes eaux H</u>	
H1	Les deux débits mensuels les plus forts compris entre Avril et Août.
H1m	Les deux débits mensuels les plus forts compris entre Avril et Août, altitude du bassin supérieure à 500m.
H2	Débit mensuel maximal entre Mars et Août, le second ou le troisième plus fort débit mensuel entre Septembre et Novembre.
H3	Les deux débits mensuels les plus forts entre Septembre et Mars.
H3se	Débit mensuel maximal en Janvier ou Février, le second plus fort débit mensuel en Novembre ou Décembre (et vice versa).
<u>Classes de basses eaux L</u>	
L1	Les deux débits mensuels les plus faibles compris entre Janvier et Avril.
L2	Débit mensuel minimal entre Janvier et Avril, le second plus faible débit mensuel entre Mai et Août.
L3	Les deux débits mensuels les plus faibles compris entre Juin et Septembre.
HOL0	Ecart entre les débits mensuels maximum et minimum inférieur à 10%.

Tableau 3 : Définition des classes de régime de hautes (H) et basses (L) eaux. D'après Arnell et al. (1993a).

En croisant les critères d'occurrence des hautes et basses eaux, on définit plusieurs classes de régimes (Tab. 4).

		H					
		0	1	1m	2	3	3se
L	0	indéfini					
	1		nord-scandinave	montagneux	nord-continental	atlantique-continental	sud-européen continental
	2		continental nord-scandinave	montagneux transitoire	sud-continental		
	3		continental baltique		baltique	atlantique	sud-européen

Tableau 4 : Les types de régimes de la région FRIEND. D'après Arnell et al. (1993a).

Compte tenu des critères retenus, la classification d'un cours d'eau s'effectue à partir de la connaissance des débits mensuels sur une chronique longue de plusieurs années.

A partir de ces classifications, des études de régionalisation des régimes ont été effectuées. Elles ont eu pour principal objectif de cartographier les régimes des cours d'eau à l'échelle européenne.

2. Les modèles de synthèse développés par EDF

2.1. Régime des débits selon la saison

A partir de la connaissance de la distribution de fréquence empirique des débits moyens journaliers (respectivement moyens hebdomadaires) selon la date dans l'année calendaire, le service Hydrométéorologique (et ultérieurement Ressources en Eau) de la Division Technique Générale d'EDF a développé un modèle de synthèse de l'hydrologie des cours d'eau (DUBAND-GUILLOT 1965-1975).

Le principe est d'étudier la répartition des débits moyens journaliers (resp. hebdo.) enregistrés à l'exutoire d'un bassin versant selon l'époque ou la saison de l'année (pour n années observées, avec $n > 20$), et de regrouper sur un seul graphe - les quantiles remarquables (10%, 25%, 50%, 75%, 90%) des débits moyens journaliers (classés dans l'ordre croissant Q_i affectés de la fréquence $2i-1/2n$) - la valeur dépassée en moyenne 1 année sur 10 par le débit journalier le plus fort du mois (QJXM10) - toutes les valeurs des débits moyens journaliers ayant dépassé la valeur décennale, et sur les graphiques en coordonnées logarithmiques de débit, on représente systématiquement le débit d'étiage décennal de chacun des 12 mois ainsi que les débits inférieurs à la valeur décennale, avec le millésime.

On a choisi de faire une « coupe » échantillonnée tous les 10 jours, 5-15-25 de chaque mois, soit 36 distributions pour l'année pour tenir compte de la valeur élevée de la corrélation entre débits successifs, qui diminue entre débits séparés de 10 jours. On a également vérifié, sur des longues séries pluviométriques et des longues séries de débits moyens journaliers, qu'il n'y avait pas de singularités à des dates particulières dans l'année, ni pendant quelques jours avoisinant ces dates.

Des techniques de lissage des quantiles pour une distribution empirique à une date donnée ont été utilisées, ainsi qu'un lissage par méthode spline associée aux moindres carrés pour les quantiles de même nom. On a pris soin d'assurer la continuité des quantiles entre la fin du mois de décembre et le début du mois de janvier.

L'avantage de ces graphes est qu'il propose une vision très claire de l'hydrologie d'un cours d'eau et en particulier de l'évolution annuelle du débit, tout en intégrant les événements rares d'étiage et de crue.

En résumé, une analyse synthétique du régime des débits moyens journaliers pour un cours d'eau devrait comporter :

- La représentation de la chronologie des débits moyens annuels en fonction de l'année sur la période d'observation,
- Le chevelu des débits moyens journaliers (hydrogrammes annuels) entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre,
- Les courbes quantiliques, ou coupes de la fonction aléatoire débit selon l'époque dans l'année calendaire,
- Les valeurs décennales pour, respectivement, le débit journalier le plus fort de chaque mois QMJMAX - le débit journalier le faible de chaque mois QMJMIN, avec les valeurs millésimées qui sont respectivement les plus fortes observées supérieures à QMJMAX - les plus faibles observées inférieures à QMJMIN,
- Le corrélogramme des débits moyens journaliers successifs, pour chaque saison.

Des exemples sont donnés en annexe 1.1 :

- Pour les débits moyens annuels du Rhône au Teil (70 140 Km²) et les débits moyens journaliers.
- Pour les débits moyens journaliers de la Durance à Serre-Ponçon (3 580 Km²), régime nivo-pluvial et les débits moyens hebdomadaires.
- Pour les débits moyens journaliers de la Romanche au Chambon (220 Km²), régime nival.

2.2. Modèle Tempétiage

Au Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF à Chatou, un programme informatique, appelé Tempétiage a été développé (Miquel, Tiercelin, al 1978). Il permet d'estimer les risques d'occurrence des étiages à partir de quelques dizaines d'années de débits journaliers.

Ce programme effectue pour les indicateurs d'étiage choisis (débits moyens mensuels, débit minimum mensuel, débits moyens mobiles minima....) le dépouillement, la probabilisation des données. Le résultat se présente sous la forme de courbes débits-durées-fréquences).

3. Méthodes particulières

3.1. Méthodes probabilistes

Ces méthodes ne définissent pas le régime d'un cours d'eau, mais en éclairent certains aspects.

Elles permettent de calculer une estimation de la probabilité de dépassement pour un débit Q soit en crue, soit en étiage. Les données nécessaires sont les chroniques historiques de débit, pouvant être à pas de temps variable (instantané, journalier, hebdomadaire, mensuel....).

Pour analyser les fréquences de crue ou d'étiage, les étapes de travail sont les suivantes :

- Constitution de l'échantillon avec appartenance à une même population statistique – échantillon homogène – existence d'une distribution statistique décrivant le comportement de la population avec sélection des maxima annuels (crues) ou minima annuels (étiage), ou sélection des valeurs sup-seuil en vérifiant leur indépendance ;
- Choix d'une distribution de fréquence empirique, on classe les valeurs de l'échantillon de taille n , dans l'ordre croissant ou décroissant, affectée d'une fréquence cumulée empirique de type $F_i = i-a/n+b$, où i représente le rang de classement, et les paramètres a et b caractérisent la formule « appropriée » selon leur valeur numérique ;
- Calage de la distribution de fréquence, on ajuste sur ces coordonnées une distribution probabiliste théorique (loi Normale-Log/ Normale-Pearson-Gumbel....) les paramètres de ces « lois » étant ajustés sur les observations par la méthode des moments ou du maximum de vraisemblance ; des méthodes s'appuyant sur les distributions de pluie ou non pluie permettent des extrapolations à des fréquences rares (GRADEX, AGREGE,...).

3.2. Courbes de débits classés

Ce ne sont pas des estimations probabilistes, car les débits journaliers classés correspondent aux débits dépassés pendant un pourcentage du temps d'enregistrement. Les courbes débits classés donnent une vision concise de la variabilité hydrologique d'un bassin versant, et fournissent une information essentielle pour la gestion de la ressource en eau » (Dingman, 1978), ces courbes sont obtenues en classant les débits mesurés instantanés, généralement journaliers, par ordre décroissant, sans tenir compte des saisons et de la dépendance temporelle, on calcule alors le pourcentage de temps pendant lequel ils ont été dépassés dans toute la chronique des mesures.

4. Les modèles de synthèse prenant en compte la durée de la crue : Courbes Débit-Durée-Fréquence (QdF)

Les modèles de synthèse proposés par l'hydrologie statistique décrivent le régime hydrologique en terme probabilistes, le plus souvent ne s'intéressant qu'à un seul type de variables (débits de pointe, débits journaliers ou mensuels). Or il est clair que la complexité et la richesse du régime hydrologique sont en partie dues à sa variabilité temporelle ; faisant partie intégrante des chroniques de débits, la dimension de temps ne peut être négligée sans qu'une partie de l'information ne soit perdue. Il est par conséquent apparu fondamental à certains chercheurs d'introduire cette notion de durée dans les modèles de synthèse afin qu'ils constituent un résumé représentatif du régime hydrologique du bassin versant.

Ces nouveaux modèles de synthèse prennent en compte la durée de la crue (ou de l'étiage). Cette approche multidurée est peu développée actuellement, mais on trouve quelques exemples dans la littérature d'auteurs qui traitent des débits de différentes durées pour améliorer la détermination des crues de projet.

4.1. Courbes Débit-Durée-Fréquence (QdF)

Depuis quelques années, de nouvelles méthodes reliant les débits à la fois aux durées et aux fréquences sont développées.

Sherwood (1994) s'est par exemple intéressé aux débits moyens de durées et de fréquences différentes pour essayer de répondre aux exigences des aménageurs mieux que ne le font les seuls débits de pointe ou les hydrogrammes de projet. Il a choisi d'ajuster des lois Log-Pearson 3 sur des séries de débits simulés, puis d'établir des équations de régression reliant les quantiles de débit de 6 durées et 6 fréquences différentes à des caractéristiques locales des bassins versants. Il obtient ainsi 36 équations liant la surface, la pluie moyenne annuelle et un coefficient d'artificialisation du bassin. Ces équations permettent de calculer ces différents quantiles de débit sur des bassins versants non jaugés.

Balocki et Burges (1994) étudient des débits-volumes de durées différentes en calant une distribution de fréquence sur les différentes séries d'échantillon, mais ils n'établissent aucune relation mathématique entre les différentes distributions.

Depuis quelques années, le CEMAGREF a développé des modèles Débits-Durées-Fréquence afin de caractériser les régimes hydrologiques. Ces modèles simples à caler et faciles à utiliser permettent globalement de procéder à une analyse fréquentielle des crues et des étiages sur un bassin versant donné et de produire une relation analytique entre débits (en un point donné) et durées (de quelques heures à plusieurs dizaines de jours selon la taille du bassin versant considéré), ceci pour n'importe quelle fréquence souhaitée (de l'annuelle à la millennale par exemple).

Les méthodes QdF permettent aux auteurs de produire des hydrogrammes de synthèse. Ces hydrogrammes ne sont pas liés à un événement réel passé mais sont construits pour être représentatifs du régime des crues. Leur particularité est d'être monofréquence, c'est à dire que chacun des débits de l'hydrogramme dépassé pour une certaine durée a la même fréquence d'occurrence. Leur intérêt est lié à la simulation hydraulique dans un cours d'eau, qui montre la réponse de ce cours d'eau à toute la variabilité du régime hydrologique auquel il est soumis, en ne simulant qu'un nombre minimum de scénari.

Nous présentons ici de manière succincte la méthode QdF développée au CEMAGREF. Le lecteur désirant plus d'informations se reportera aux nombreuses publications traitant complètement la méthode, par exemple au mémoire de thèse de Prudhomme (1995).

Les variables d'étude :

Les variables retenues pour caractériser le régime hydrologique d'un bassin versant sont :

- le *débit moyen amené pendant la durée d* ou « *débit-volume* » : l'intégration de l'hydrogramme continu $Q(t)$ sur une durée continue d permet d'obtenir le volume d'eau écoulé pendant cette durée et d'en déduire le débit moyen correspondant. Il est noté V pour rappeler que c'est une intégrale ;
- le « *débit-seuil* » : cette variable correspond à une notion de débit qui est toujours dépassé (ou qui ne l'est jamais) pendant une durée continue d . Elle est notée Q .

La figure 2 donne une représentation de ces deux variables. Conformément à la notation en vigueur au CEMAGREF (Oberlin, 1992), on note :

VCd : le débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée d ;

QCd : le débit seuil (Q) Caractéristique continûment dépassé (ou non passé) sur une durée d .

Le premier débit, homogène à un volume à la constante de temps près, est proche de la géophysique des écoulements et répond à des questions de gestion des ressources en eau (le volume des hautes eaux par exemple étant un volume de ressource autant qu'un facteur d'aléa).

Le second débit a une forte pertinence quant aux questions touchant à la sensibilité des milieux (de la mise en eau de zones d'intérêt biologique aux mises en péril des personnes et des biens pour le cas des hautes eaux).

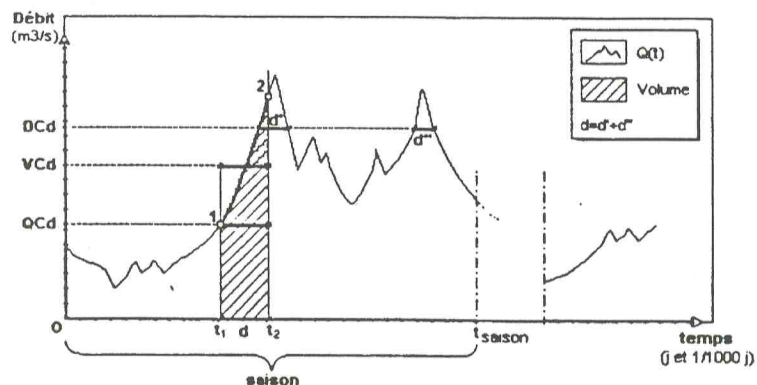


Figure 2 : Représentation des variables caractéristiques du régime. D'après CEMAGREF, 1996.

Pour étudier le régime hydrologique d'un bassin versant, on s'intéresse plus particulièrement aux hautes et moyennes eaux (les crues) et aux basses eaux (les étiages). Les variables d'études sont :

en crue (Fig. 3a) :

VCXd : débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d, maXimal dans la saison ;

QCXd : débit seuil (Q) Caractéristique continûment dépassé sur une durée d, maXimal dans la saison.

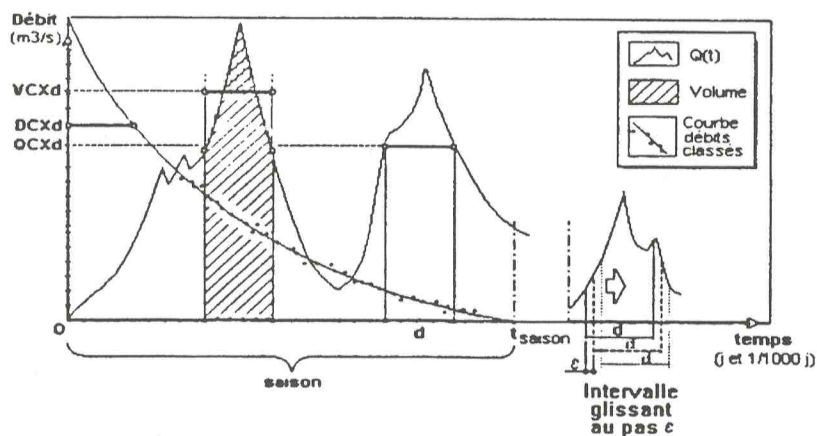


Figure 3a : Définition des variables caractéristiques du régime des crues. D'après CEMAGREF, 1996.

en étiage (Fig. 3b) :

VCNd : débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d, miNimal dans la saison ;

QCNd : débit seuil (Q) Caractéristique continûment non dépassé sur une durée d, miNimal dans la saison.

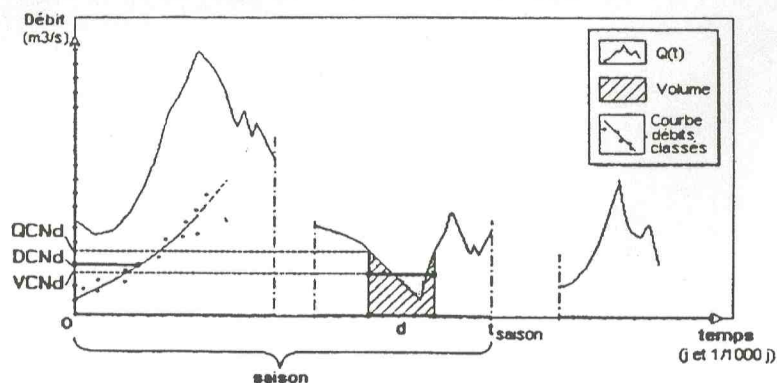


Figure 3b : Définition des variables caractéristiques du régime des étiages. D'après CEMAGREF, 1996.

Technique d'échantillonnage des débits caractéristiques de périodes continues d'écoulement :

Les débits caractéristiques de périodes continues d'écoulement peuvent être échantillonnés soit à partir d'une chronique de débit $Q(t)$ continue (appelée chronique de débit à pas de temps variable), soit journalière.

La technique d'échantillonnage procède du balayage de tout l'hydrogramme. Ce balayage, obtenu grâce au déplacement d'un intervalle mobile de durée d , permet de déterminer n périodes de durée d . La portion de l'hydrogramme, correspondant à chaque période fournit un débit-seuil (QCd) minimum et un débit-seuil maximum ainsi que le débit moyen (VCd) résultant de son intégration entre les instants t_1 et t_2 .

L'échantillonnage peut alors s'effectuer selon les méthodes dites des maximum annuels ou bien des sup-seuil (cf § méthodes probabilistes).

Quantiles de débits caractéristiques de périodes continues d'écoulement :

A partir des échantillons de QCXd, VCXd, QCNd et VCNd ainsi obtenus, on va associer à une valeur particulière de la variable hydrologique étudiée une période de retour T exprimée en années. Ce quantile traduit simplement qu'une certaine valeur de la variable hydrologique est susceptible d'être atteinte ou dépassée, en un site donné, avec une probabilité d'occurrence qui est en moyenne d'une fois toutes les T années.

L'expression des sigles antérieurs en termes de quantiles devient :

en crue :

VCX(T,d) : quantile de débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d , maXimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

QCX(T,d) : quantile de débit seuil (Q) Caractéristique continûment dépassé sur une durée d , maXimal dans la saison, de période moyenne de retour T .

en étiage :

VCN(T,d) : quantile de débit moyen (Volume) Caractéristique sur une durée continue d , miNimal dans la saison, de période moyenne de retour T ;

QCN(T,d) : quantile de débit seuil (Q) Caractéristique continûment non dépassé sur une durée d , miNimal dans la saison, de période moyenne de retour T .

Les quantiles sont déterminés selon des méthodes probabilistes classiques. Les n valeurs de l'échantillon sont rangées par ordre croissant ou décroissant et on associe à chaque débit caractéristique de rang i sa fréquence empirique. Le report des couples (débit-fréquence empirique) sur un graphe adapté permet de visualiser la distribution de fréquence et d'ajuster une loi de probabilité théorique. Cette courbe théorique ainsi définie permet d'obtenir, pour différentes valeurs de T , les quantiles de débits caractéristiques de durée d donnée. Ces quantiles concernent essentiellement le domaine des fréquences observables. Au delà, pour des fréquences moyennes à rares, la forme théorique peut être extrapolée par plusieurs méthodes : extrapolation simple, Gradex progressif, Gradex esthétique ou Gradex brutal (cf. figure 4). La forme dite esthétique du gradex des pluies maximales (Michel, 1982) est privilégiée. Cette forme a une tendance asymptotique vers le gradex des pluies maximales.

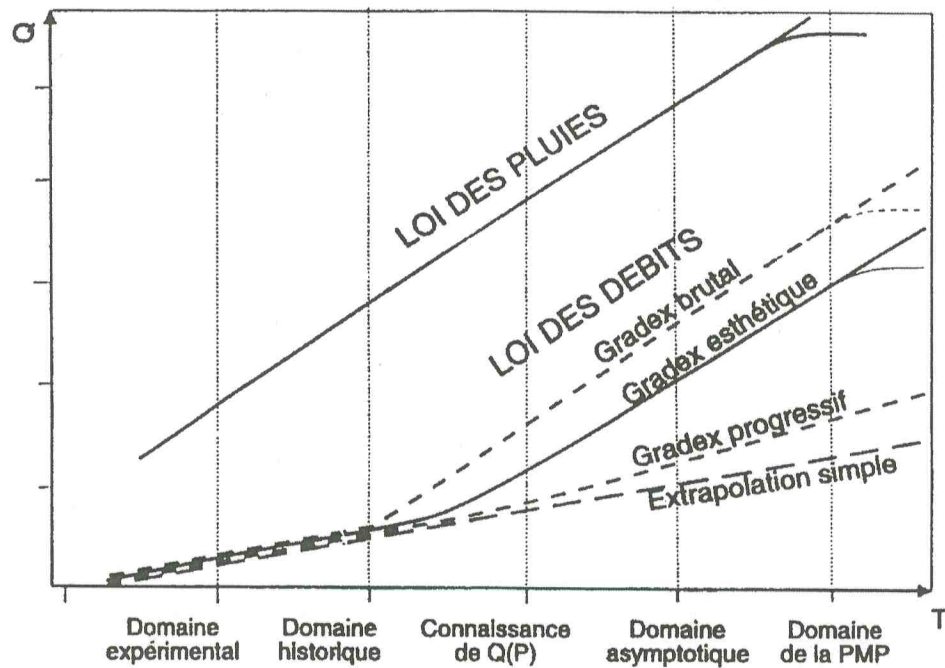


Figure 4 : Estimation des quantiles rares.

Courbes QdF (débit-durée-fréquence) d'un bassin versant observé :

La représentation ordonnée des quantiles $Q(T, d)$ de même période de retour T , en fonction de la durée d , permet d'obtenir un faisceau cohérent de courbes monofréquence QdF qui donne une vision à la fois synthétique et représentative du régime hydrologique en crue ou en étiage d'un bassin versant. Cette représentation QdF de la diversité des écoulements d'un bassin versant constitue une source d'information de base, commode d'utilisation, pour les besoins de l'hydrologie opérationnelle. La figure 5 présente des exemples de graphes regroupant les courbes QdF.

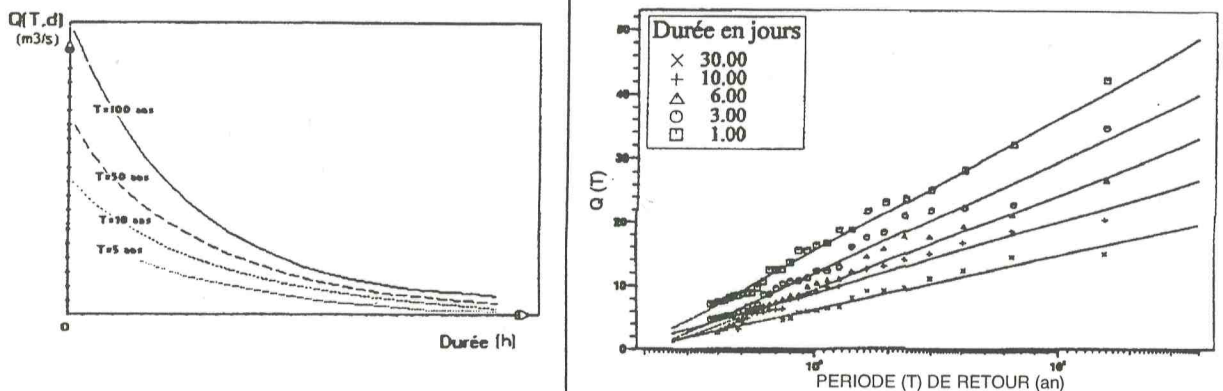


Figure 5 : Courbes QdF. D'après CEMAGREF, 1996.

Normalisation des courbes QdF - Modélisation QdF :

Les études effectuées par le CEMAGREF sur les courbes QdF ont montré qu'il est possible de les normer et d'obtenir des **modèles de synthèse QdF de référence** tant en crue qu'en étiage. Le principe de la normalisation de la distribution de fréquence rend possible la transposition de cette distribution sur un site différent du lieu de calage, et en particulier l'estimation de quantiles de crue sur un bassin versant non jaugé. Pour les courbes QdF à trois variables débit, durée et fréquence, deux normes sont nécessaires.

En crue, la normalisation des courbes QdF en ordonnées par le débit instantané maximal annuel décennal ($Q(T,d)/QIXA10$) et en abscisses par la durée caractéristique de crue (d/D^3) du bassin est apparue comme la plus pertinente. Cette normalisation permet une formulation mathématique des courbes QdF. A partir de la détermination des courbes QdF normées sur plusieurs bassins, trois modèles de référence ont été retenus, ils définissent trois comportements hydrologiques bien différenciés :

- *Le modèle de Vandenesse* (bassin versant de la Dragne à Vandenesse, 115 km²) : il caractérise un régime hydrologique en crue soutenu sur les fréquences observables. Les événements exceptionnels sont peu différents des événements rares et les crues sont plus volumineuses que pointues ;
- *Le modèle de Florac* (bassin versant de la Mimente à Florac, 125km²) : il définit un régime d'écoulement rapide, avec un certain stockage des pluies. Cela conduit à des événements très courants différents des événements moyens, eux-mêmes très différents des événements rares. Les crues sont pointues, peu volumineuses, mais s'inscrivent dans la durée (restitution du stockage pendant les crues) ;
- *Le modèle de Soyans* (bassin versant du Roubion à Soyans, 186 km²) : il définit un régime d'écoulement rapide, mais avec un très faible stockage sur le bassin versant. Les événements exceptionnels sont très différents des événements moyens, les crues étant très pointues. Ce type de régime caractérise des bassins versants très rapides, peu perméables à imperméables. La rapidité des crues conduit à des crues pointues, peu volumineuses.

En étiage, la normalisation des courbes QdF s'effectue en ordonnées par le quantile de débit-volume (moyen) Caractéristique sur une durée continue de 1 jour, de période moyenne de retour égale à 2 ans $VCN(T=2ans, d=1jour)$ et en abscisses par la durée caractéristique d'étiage De^4 du bassin. Cette normalisation permet aussi une formulation mathématique des courbes QdF en étiage. Dans ce cas, quatre modèles de référence ont été retenus :

- *Le modèle de Force* ;
- *Le modèle de Vaubarlet* ;
- *Le modèle de Saint Floret* ;
- *Le modèle de Ménétréol*.

Ils définissent des comportements hydrologiques allant d'un régime d'étiage peu soutenu, c'est à dire ayant un tarissement rapide (modèle de Force), vers un régime d'étiage bien soutenu (modèle de Ménétréol, tarissement lent).

³ A partir d'une chronique d'observations de débit, on considère les crues les plus fortes et on relève pour chacune d'elles son débit de pointe Q_s ainsi que la durée ds de dépassement de $Q_s/2$. A partir de ces couples (ds, Q_s), portés sur un graphe, on détermine pour chaque classe de débit Q_s la valeur médiane de ds . D est la valeur de la courbe médiane conditionnelle des ds pour le QIXA10.

⁴ De est déduite de l'analyse des courbes de tarissement décrites selon l'équation de Maillet :

$$Q(t) = Q(t_0) \cdot \exp(-\alpha \cdot (t - t_0))$$

où $Q(t)$ est le débit à l'instant t ,

$Q(t_0)$ est le débit à l'instant t_0 ,

et α une constante qui correspond à l'inverse d'un temps.

A partir de la chronique de débit journalier, sont sélectionnés des épisodes (i) de tarissement, pour chacun desquels est calculé α_i par la relation :

$$\alpha_i = \frac{1}{(t - t_0)} \cdot \ln \left(\frac{Q(t_0)}{Q(t)} \right)$$

La durée caractéristique d'étiage est telle que $De = 1/\alpha_{\text{médian}}$.

L'usage opérationnel des modèles QdF en crue et en étiage, en un site quelconque observé ou non, implique le choix du modèle ainsi que l'estimation des descripteurs locaux (QIXA10, D, VNC(2,1), De) du régime hydrologique.

En crue, pour déterminer le modèle QdF représentatif du bassin versant étudié, on reporte sur le graphe de la figure 6 les couples (d/D , $Gp/QIXA10$) (où Gp est le gradex des pluies de durée d) du bassin versant considéré pour plusieurs valeurs de d , et selon leur position dans l'une des trois parties délimitées par les deux courbes tracées, le bassin versant appartient à l'une ou l'autre des familles hydrologiques.

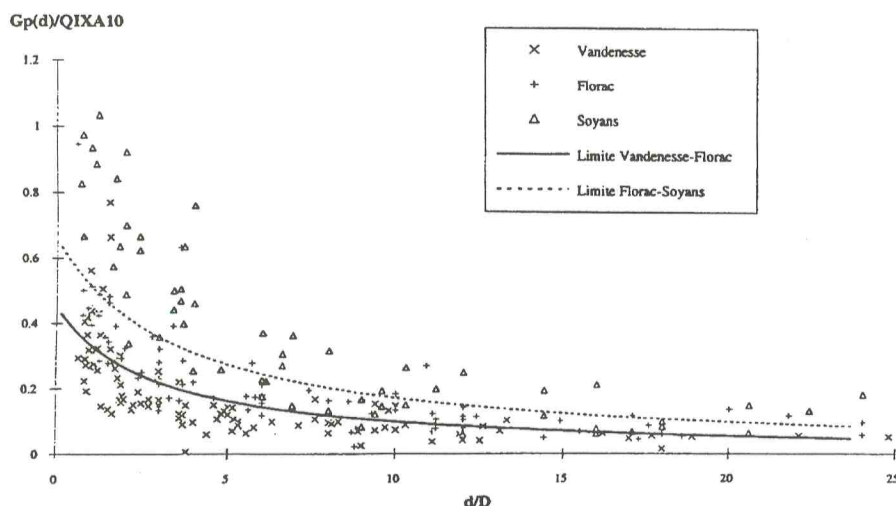


Figure 6 : Critère de choix du modèle QdF de crue représentatif du bassin versant étudié.

En étiage, le critère de choix du modèle QdF représentatif du bassin versant étudié est l'écart-type de l'échantillon de débit-volume journalier d'étiage annuel (cf. figure 7).

S (écart-type)	Régime d'étiage peu soutenu
1	Modèle de Force
0.8	Modèle de Vaubarlet
0.54	Modèle de Saint-Floret
0.4	Modèle de Ménétréol
	Régime d'étiage bien soutenu

Figure 7 : Critère de choix du modèle QdF d'étiage représentatif du bassin versant étudié.

Les modèles QdF ont été validés sur de nombreux bassins versants français mais aussi de Roumanie (cf bibliographie). Ils ont montré une grande robustesse.

5. Notions de variabilité et de stationnarité du régime

5.1. Variabilité du régime

L'étude de la variabilité du régime permet de répondre à la question suivante : quelle probabilité a-t-on d'identifier chaque année la même variation saisonnière des écoulements ?

Plusieurs études concernant la variabilité des régimes définis par la classification scandinave (Krasovskaia et al., 1993, Krasovskaia, 1995) ont en effet montré que :

- une série donnée de débits peut se situer dans différentes classes de régimes selon les années (et ce à cause de la variabilité climatique) ;
- les régimes définis à partir des variations des moyennes mensuelles ne coïncident pas avec le régime qui apparaît le plus fréquemment quand chaque année est étudiée séparément. Cette déviation peut atteindre jusqu'à 45% des cas.

Krasovskaia a donc proposé une approche fondée sur le concept d'entropie qui permet de caractériser objectivement la variabilité d'un régime. Le principe consiste à définir un index d'instabilité dont la valeur augmente lorsque la probabilité d'occurrence d'un certain type de régime pour un bassin versant donné diminue. A partir de la valeur de cet index, on est alors capable de dire si le régime est stable ou non.

Les études ont montré que la variabilité du régime des cours d'eau peut être mise en évidence par cette technique. Sous conditions de stationnarité, la stabilité des régimes dépend du régime lui-même : un régime pluvial est en général moins stable qu'un régime nival, car il dépend beaucoup de la variabilité climatique.

5.2. Stationnarité du régime

La méthode QdF a été appliquée sur le bassin versant roumain du Riul Negru et a mis en évidence l'influence des travaux qui ont été faits sur le bassin, spécialement les endiguements le long de la rivière principale et de ses affluents (Pretorian et al., 1997).

Les chroniques de débits de valeurs maximales indépendantes supérieures à un seuil donné ont été analysées en VCXd et en QCXd pour les quatre stations hydrométriques que compte le bassin versant du Riul Negru. Elles ont été divisées en deux parties : avant (1954-1978) et après travaux (1979-1993). En complément, une analyse des pluies maximales de la station météorologique du bassin a permis de calculer le gradex des pluies sur différentes durées. Des tests de stationnarité ont montré que les pluies sont stationnaires sur la période d'observation (1954-1993) ce qui n'est pas le cas pour les débits.

Déduites de l'analyse probabiliste des événements hydrologiques les plus forts, en VXCd et QCXd, et des chroniques pluviométriques, les courbes QdF ont été construites et renseignent sur le régime hydrologique avant et après travaux. L'étude a montré que les descripteurs varient en fonction de la période (avant et après travaux) et l'influence des travaux a pu alors clairement être mise en évidence et quantifiée (cf. tableau 5). La non-stationnarité du régime ainsi démontrée découle des travaux d'endiguement et de régularisation alors que les influences climatiques ont une faible contribution.

Station	Avant travaux			Après travaux		
	D(h)	QIXA10 (m ³ /s)	Modèle	D(h)	QIXA10 (m ³ /s)	Modèle
TINOASA	39	32.4	SOYANS	22	94.9	SOYANS
RUSENI	30	70.2	SOYANS	30	82.9	SOYANS
BOROSNEUL MARE	20	76.4	FLORAC	18	121.3	FLORAC
RECI	60	147.3	SOYANS	50	338.6	SOYANS

Tableau 5 : Les modèles QdF du Riul Negru avant et après travaux. D'après Pretorian et al., 1997.

Conclusion de l'étude bibliographique

Les études à base hydrologique des régimes des cours d'eau s'inscrivent selon quatre axes (figure 8) :

- description physiographique du bassin versant ;
- description du climat ;
- analyse en durée ;
- analyse en fréquence.

La physiographie et le climat sont supposés stationnaires. Les analyses en durée et en fréquence permettent de synthétiser la variabilité du système. La description idéale du régime des cours d'eau aura une composante selon chacun des axes.

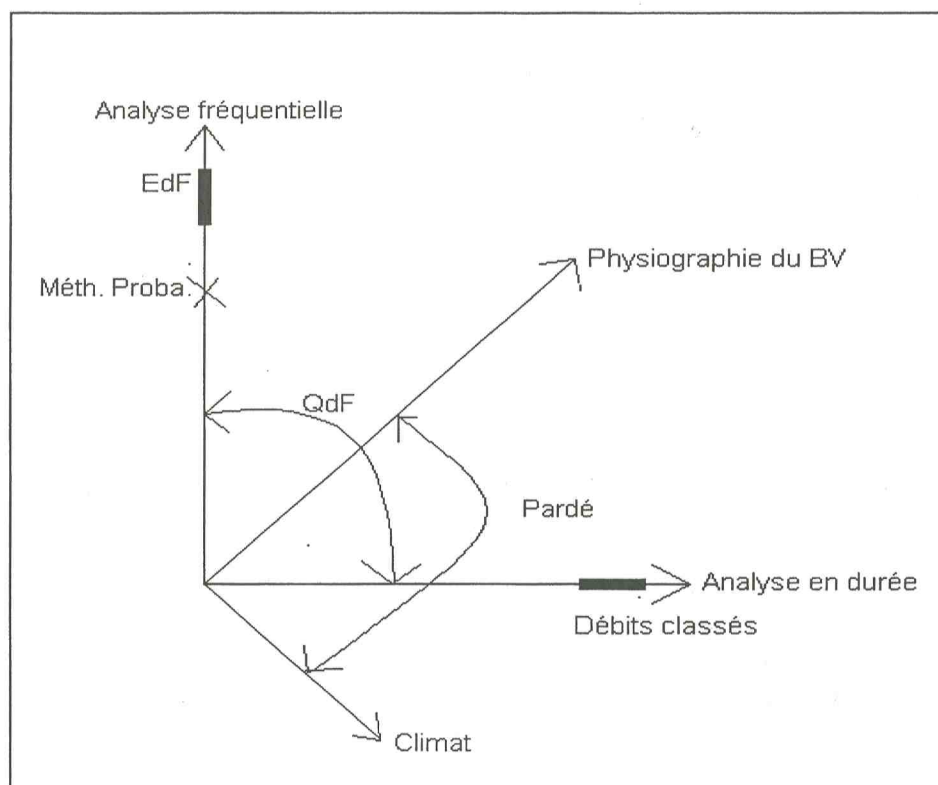
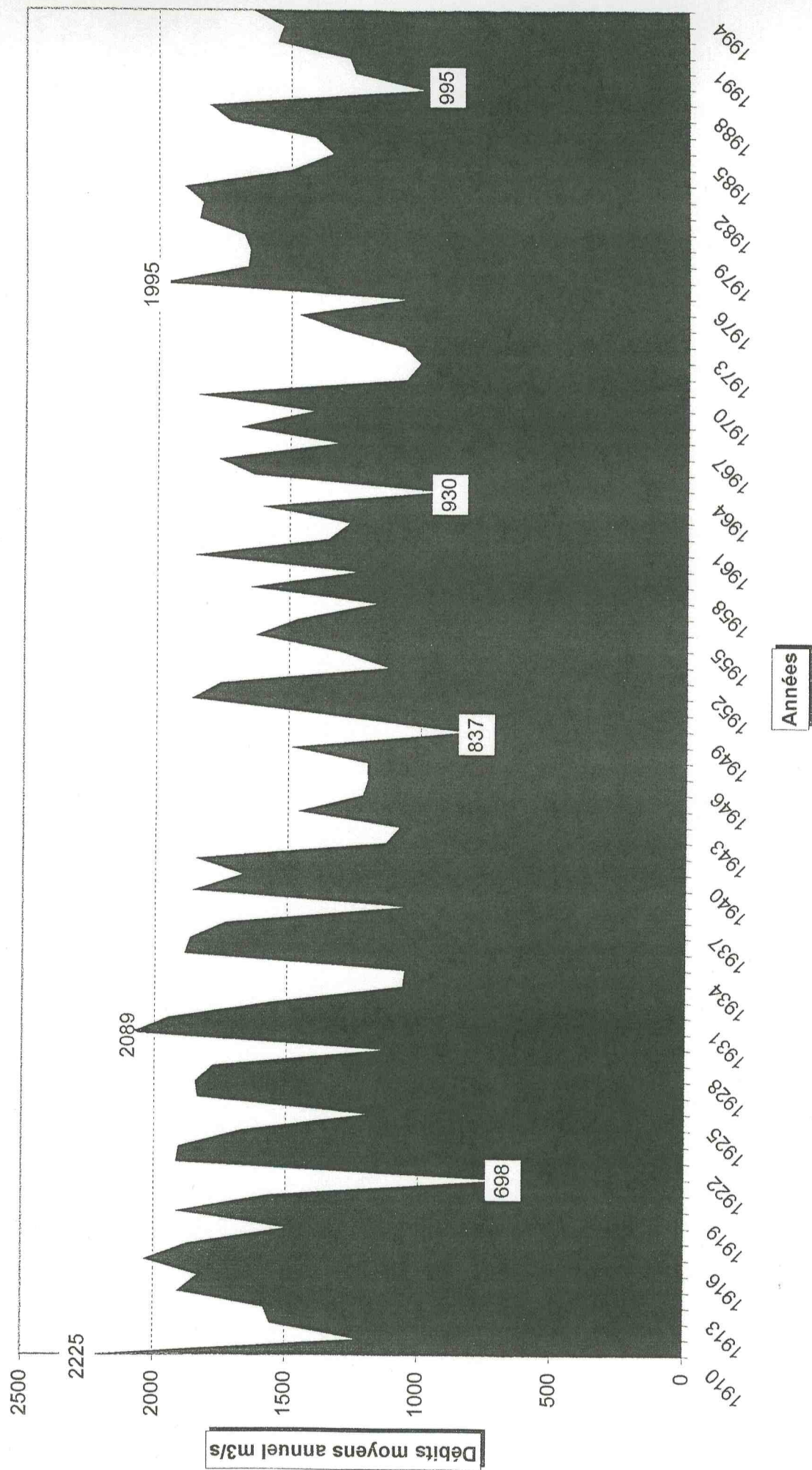


Figure 8 : Synthèse des méthodes de caractérisation des régimes des cours d'eau.

ANNEXE 1.1 :

MODELES DE SYNTHESE DEVELOPPES PAR EDF
REPARTITION DES DEBITS SELON L'EPOQUE DE L'ANNEE

Rhône au Teil (70140 km²)

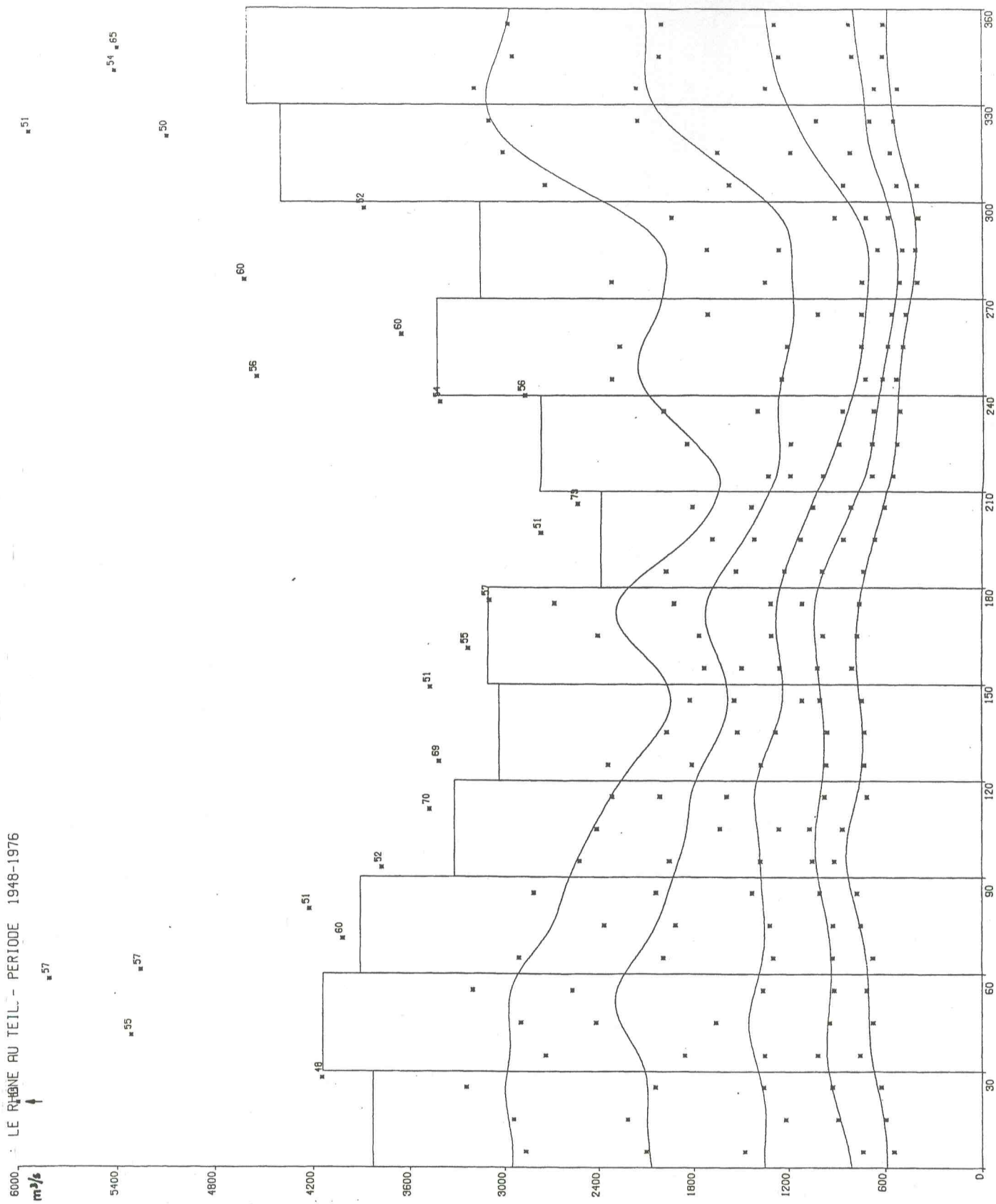


DEBITS MOYENS JOURNALIERS (PERIODE 1948-1976)

Rhone AU TEIL.

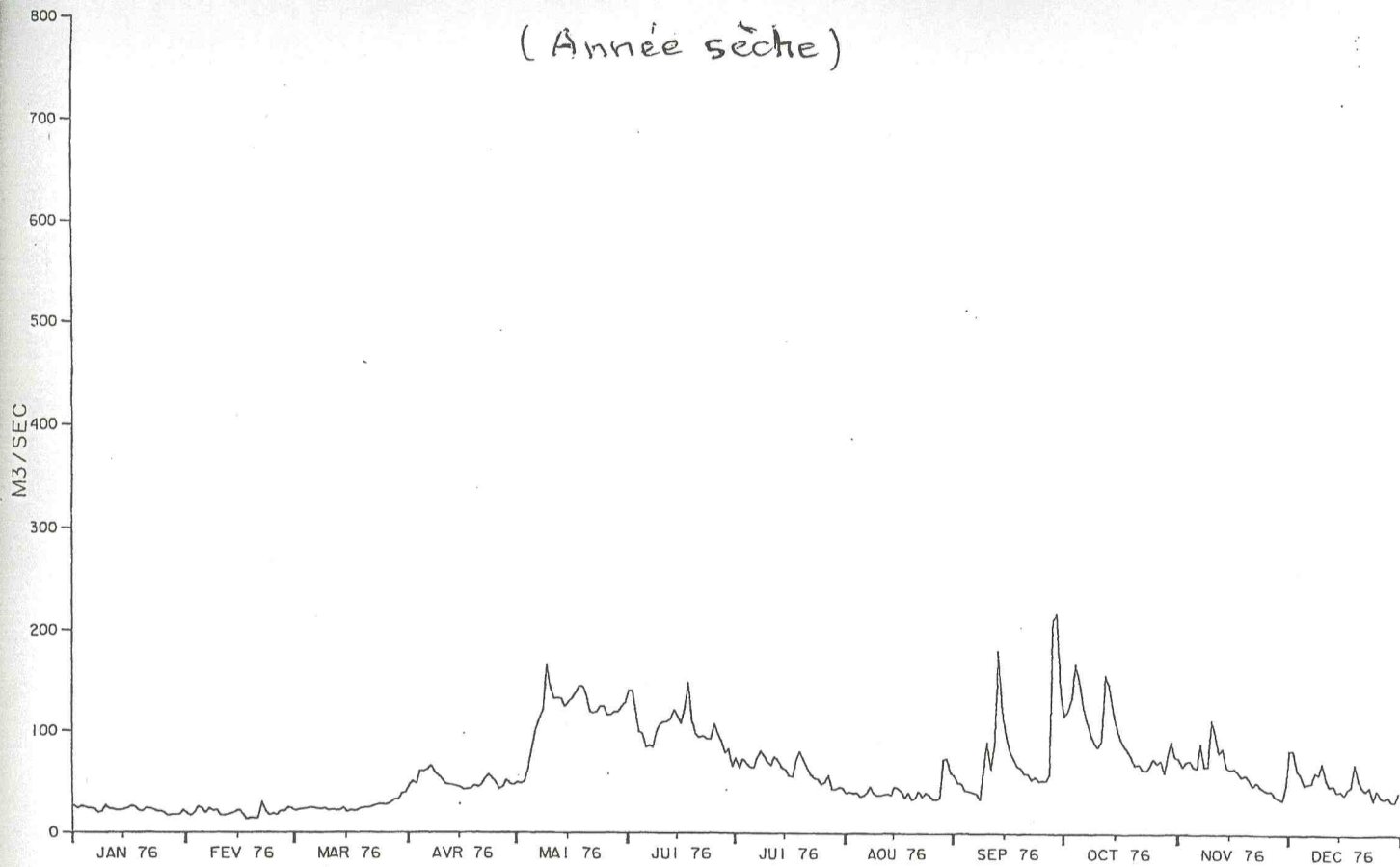


LE RHONE AU TEIL - PERIODE 1948-1976



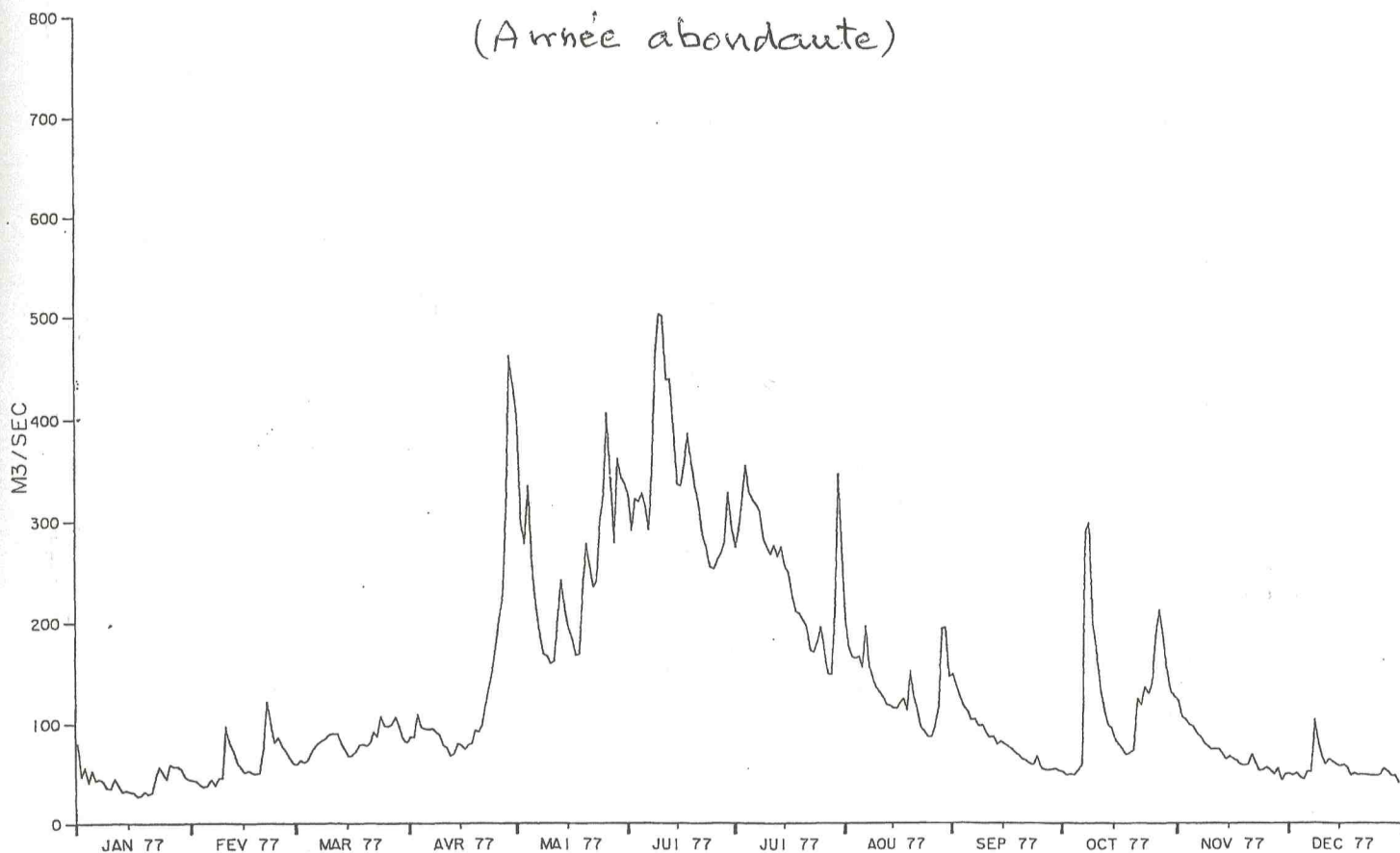
LA DURANCE A SERRE PONCON
DEBITS MOYENS JOURNALIERS

(Année sèche)



LA DURANCE A SERRE PONCON
DEBITS MOYENS JOURNALIERS

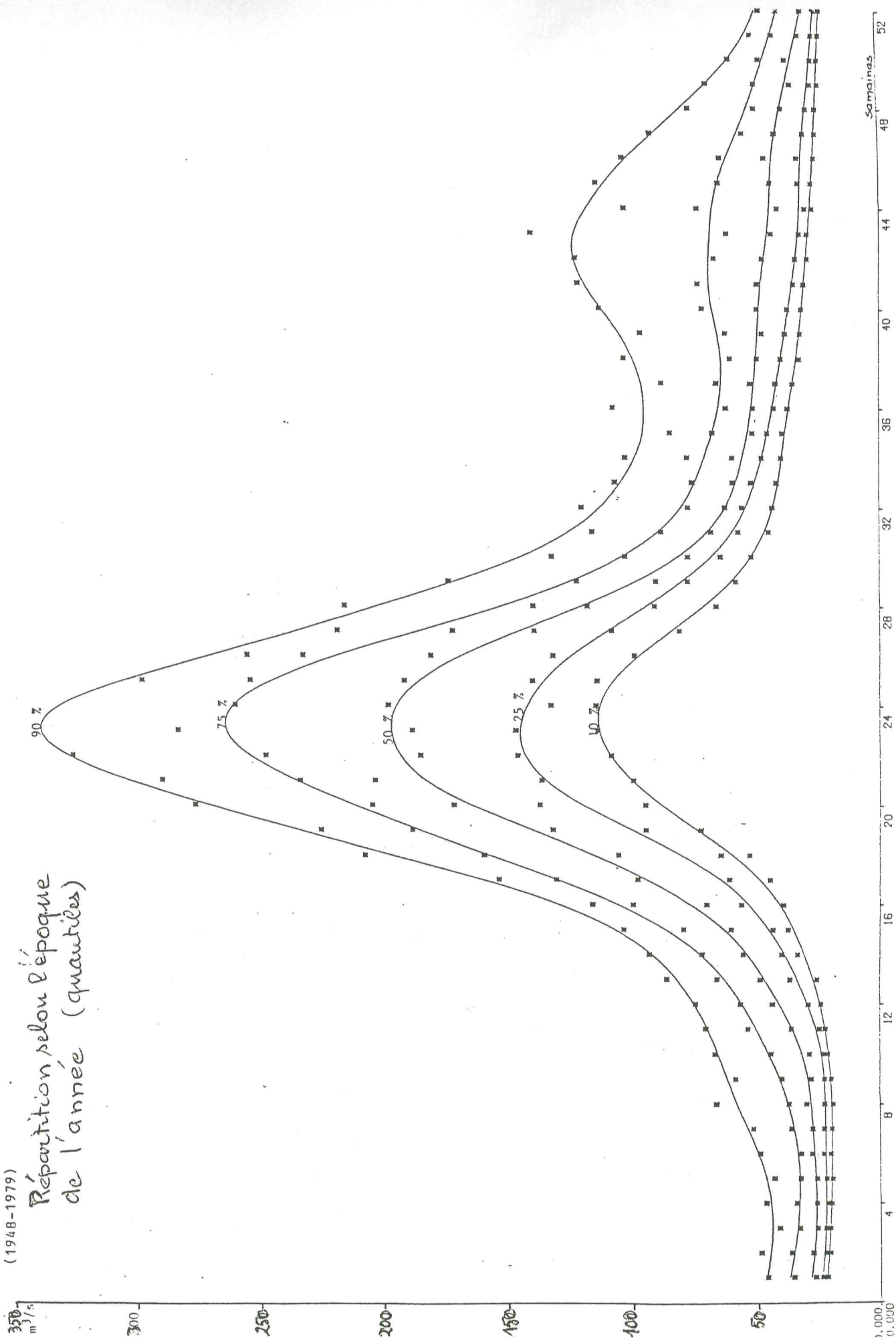
(Année abondante)



DEBITS MOYENS HEBDOMADAIRES DE LA DURANCE A SERRE PONCON

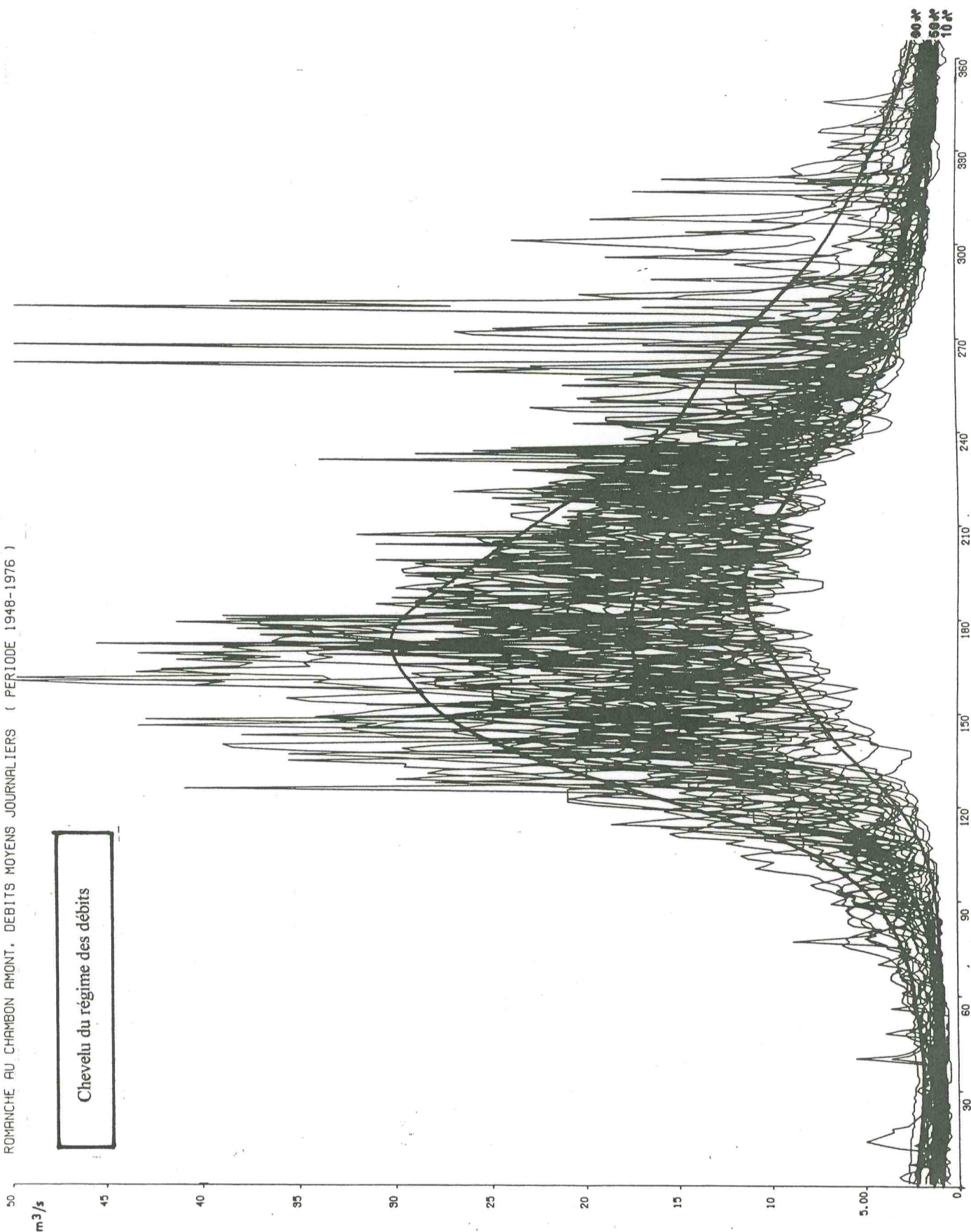
(1948-1979)

Répartition selon l'époque
de l'année (quantiles)



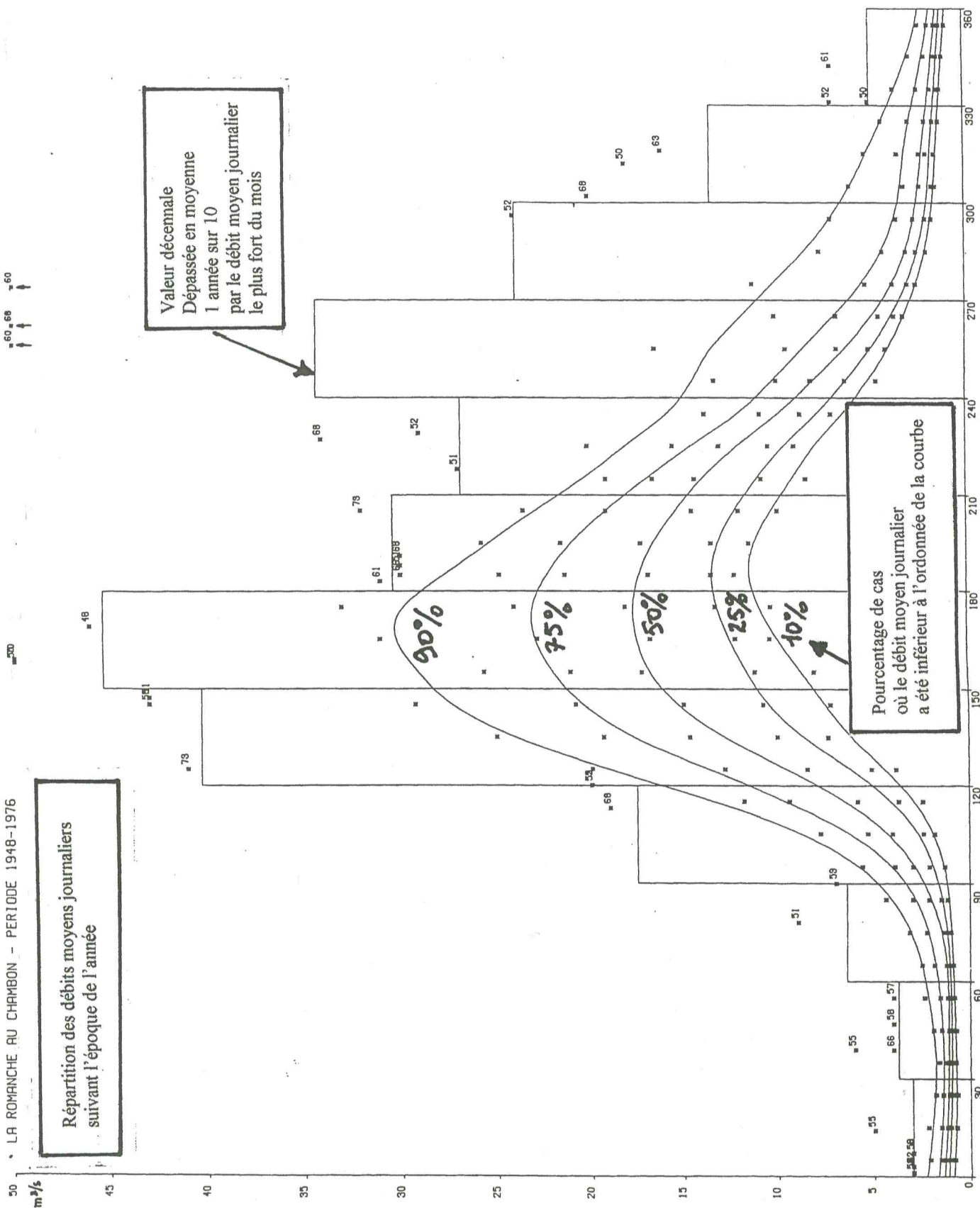
ROMANCHE AU CHAMON AMONT. DEBITS MOYENS JOURNALIERS (PERIODE 1948-1976)

Chevelu du régime des débits



Valeur décennale
Dépassée en moyenne
1 année sur 10
par le débit moyen journalier
le plus fort du mois

Pourcentage de cas
où le débit moyen journalier
a été inférieur à l'ordonnée de la courbe



ANNEXE 2 :

LISTE DES DESCRIPTEURS PROPOSES PAR LE GROUPE

DE TRAVAIL

Bassin versant

Surface du BV

- géographique
- hydrologique

Affluents d'amont en aval

- chevelu hydrographique
- coefficient de drainage
- indices adaptés

Géologie

- superficielle
- structures géologiques principales (granit, karst, terrain en décomposition)

Altitudes

- courbe hypsométrique (4 ou 5 points)

Forme du BV

- indices adaptés faisant intervenir la longueur et la largeur

Végétation

- type de végétation
- étagement de la végétation
- surface du BV au-dessus de la surface végétalisée (%)

Régime hydrologique

Régime

- glaciaire
- nival
- pluvionival
- pluvial
 - océanique
 - méditerranéen
 - mixte

Débits annuels

- débit moyen annuel
- coefficient de variation des débits interannuels (rapport de l'écart type à la moyenne)
- amplitude de variation du débit annuel (maximum et minimum observés)

Débits saisonniers

- indices (quantiles de distribution empirique traduisant la répartition saisonnière de l'importance ou la faiblesse des débits moyens journaliers ainsi que leur variabilité au cours d'une même saison (avec étiages, crues décennales mensuelles)

Evénements rares

Crues

- débit décennal Q10 (pointe et volume en 24h)
- débit centennal Q100 (pointe et volume en 24h)
- gradient de risque (Q100/Q10) (pointe)
- médiane de la durée caractéristique de crues supérieures à la crue quinquennale
- vitesse moyenne dans la section à l'exutoire du BV pour la crue

décennale

- fréquence de crue à partir de laquelle il y a débordement du lit mineur vers le lit majeur
- surface débordée dans ce cas
- occurrence ou non de variations brutales non naturelles (chasses, éclusées)

Etiages

- débit caractéristique (lequel?)
- durée caractéristique continue
- étiage décennal
- profondeur en étiage, à l'exutoire du BV
- vitesse moyenne pour l'étiage quinquennal
- vitesse moyenne pour l'étiage décennal
- coefficient de tarissement moyen

Nappes phréatiques

Interaction nappe- rivière

- importance
- sens

Nappe alluviale

- existence
- importance relative

Volume de réserve souterraine connectable à la rivière

Epaisseur moyenne des sédiments

Nappe de versants (existence)

Circulation karstique

Pertes

Autres données caractéristiques

Précipitations spatiales reçues sur le BV

- précipitation moyenne interannuelle
- variabilité interannuelle
min. et max. observés sur même
période que débits

Gradex des pluies journalières maximales annuelles
ponctuelles dans le BV

- moyenne
- amplitude

Courbe des débits moyens journaliers classés à l'échelle
interannuelle avec débits caractéristiques

Relations débit seuil-durée-fréquence

Température de l'eau à l'exutoire du BV

- T° moyenne interannuelle
- T° moyenne mensuelle
- amplitude hiver-été
- écart-type des T° moyennes
- écart-type des T° journalières en janvier
- écart-type des T° journalières en juillet

Température de l'air

- T° moyenne interannuelle dans le BV
- T° moyennes mensuelles

Degré d'artificialisation ou d'anthropisation

Inventaire des ouvrages

- digues
- seuils
- barrages

Qualité du débit en rivière

- naturel
- influencé
- artificiel

Inventaire des bassins périurbains

- surface

Existence de pompages

- rivière
- nappe alluviale

Imperméabilisation (importance relative)

Qualité des eaux (descripteurs simples ?)

ANNEXE 3 :

DESCRIPTION DES REGIMES :

APPLICATION A 6 BASSINS VERSANTS TESTS

1. Introduction

Dans l'objectif de proposer une description à base hydrologique du fonctionnement des cours d'eau, le groupe de travail a constitué une liste des descripteurs hydrologiques (cf. annexe 2) qui lui semblent pertinents pour fonder cette typologie. Cette liste prend en compte les débits mesurés à l'exutoire d'un bassin versant et leurs caractéristiques mais aussi la description du bassin versant dans son ensemble. Elle n'est ni exhaustive, ni définitive et pourra être complétée, modifiée en fonction de redondances ainsi que de son adéquation aux objectifs recherchés.

La liste comprend des descripteurs :

- de la physiographie du bassin versant,
- du régime hydrologique au sens de Pardé,
- des événements rares : crues et étiages,
- de la nappe phréatique,
- du degré d'artificialisation ou d'anthropisation,
- d'autres caractéristiques : précipitations, température de l'eau et de l'air, etc.

Pour cadrer ces descripteurs sur un plan scientifique et technique, 8 bassins versants tests du bassin RMC ont été sélectionnés par D. Duband et P. Givone :

- La Saône à Lechatelet (11700km²);
- L'Ain à Chalain (560km²);
- L'Ardèche à Sauze Saint Martin (2230km²);
- La Romanche au Chambon (220km²);
- La Durance à Briançon (548km²);
- Le Var à la Mescla (1830km²);
- L'Aude à Axat (435km²);
- L'Arveyron à Bois du Bouchet (78km²).

Leur localisation est précisée en annexe 3.1.

Ce panel est supposé représentatif des différentes typologies de régimes que l'on peut rencontrer sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Le cadrage, scientifique et technique, des descripteurs proposés, par l'application aux bassins versants tests, doit aussi permettre d'apprécier les moyens nécessaires pour obtenir ces descripteurs et d'évaluer leur pertinence pour élaborer une typologie à base hydrologique du fonctionnement des bassins versants et pour qualifier ce fonctionnement.

2. Les données disponibles utilisées

2.1. Topographie

Le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN à maille 100m mis à disposition par l'Agence de l'Eau dans le cadre d'une étude concernant la synthèse descriptive quantifiée de la ressource en eau superficielle dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse a aussi été utilisé pour la présente étude avec l'accord de l'Agence.

Le Service Géologique des Etats-Unis d'Amérique (USGS) a mis à disposition de tous, sur Internet, différents fichiers topographiques dont un jeu fort intéressant de données à 30 secondes d'arc couvrant désormais l'ensemble des terres émergées. Du fichier couvrant l'Europe de l'Ouest, Etienne Leblois du CEMAGREF a extrait la partie concernant la France et l'a reéchantillonnée de manière à avoir une approximation de modèle numérique de terrain à maille kilométrique selon le système Lambert.

2.2. Hydrographie

Pour les besoins de l'étude précédemment citée, l'Agence de l'Eau avait aussi fourni au CEMAGREF le contenu de la couche « hydrographie linéaire » de son système d'information géographique. Cette couche est très détaillée et est apparue à l'usage d'un niveau trop fin. Ce réseau hydrographique a donc été croisé avec celui des cartes IGN à l'échelle 1/100 000, recouvrant les bassins versants étudiés.

2.3. Hydrologie

a - Débits journaliers de la base HYDRO

Les chroniques de débits journaliers de tous les bassins versants sauf ceux de l'Aude à Axat et de l'Arveyron à Bois du Bouchet ont été extraites de la base nationale HYDRO, à l'Agence de l'Eau. Ces chroniques ne sont pas disponibles pour les deux bassins versants cités ci-dessus.

b - Débits à pas de temps variable de la base HYDRO

Les chroniques de débits à pas de temps variable pour les bassins de la Saône à Lechatelet et de l'Ardèche à Sauze Saint Martin ont également été extraites de la base HYDRO, à l'Agence de l'Eau. Ces chroniques ne sont pas disponibles pour les autres bassins versants.

c - Débits fournis par EDF

Le Service Ressources en Eau de la Direction Technique Générale d'EdF a soutenu cette étude et a fourni les chroniques de débits journaliers des bassins de l'Aude à Axat et de l'Arveyron à Bois du Bouchet. Ces données nous sont malheureusement parvenues très tardivement et n'ont pu être traitées dans le temps imparti. Pour cette raison, ces deux bassins versants ont été retirés du panel des bassins tests.

2.4. Cartographie

Plusieurs atlas ont été utilisés :

- Les Atlas de géographie Bordas et Hatier comprennent en particulier la carte géologique de la France à l'échelle 1/5 000 000 et des cartes régionales, en particulier France Sud et Bassin Parisien, Région du Nord et de l'Est, de couverture végétale au 1/4 000 000 ;
- L'Atlas climatique de la France, édité par la Direction de la Météorologie du Ministère des Transports (1987), contient les cartes de hauteurs moyennes mensuelles et annuelles des précipitations et celles des températures de l'air ;
- L'Atlas des eaux souterraines de la France, édité par la DATAR et le BRGM, comprend pour chaque région, une carte générale des eaux souterraines et des cartes de nappes profondes et de domaine karstique ;
- L'Atlas du bassin Rhône-Méditerranée-Corse comprend, pour les 29 territoires délimités par le SDAGE, 7 cartes thématiques :
 - Qualité des eaux superficielles et sources de pollution ;
 - Etat physique des milieux aquatiques superficiels, origine des perturbations ;
 - Eaux souterraines ;
 - Faune, flore, écosystèmes remarquables ;
 - Thermalisme, tourisme, loisirs liés à l'eau ;
 - Risques liés à l'eau ;
 - Contexte institutionnel.

Les cartes de végétation à l'échelle 1/200 000, éditées par le CNRS, et disponibles au CEMAGREF (n°48 (Annecy), 59 (amont Avignon), 60 (Gap) et 66 (aval Avignon)), ont été utilisées.

3. Obtention des descripteurs : les traitements réalisés

3.1. Description du bassin versant

La **surface géographique** des bassins versants est disponible sur la base de données HYDRO. A partir des coordonnées Lambert de l'exutoire du bassin versant, cette surface peut aussi être calculée à partir du MNT du bassin RMC. En effet, des programmes informatiques, élaborés par Etienne Leblois au CEMAGREF, permettent de délimiter le bassin versant de tout point et d'en calculer la superficie. Les valeurs de surface, obtenues dans les deux cas, ne sont pas significativement différentes.

La **surface hydrologique** n'est précisée dans aucune base de donnée. Elle est différente de la surface géographique principalement pour les bassins karstiques, mais son appréciation est difficile.

Le **chevelu hydrographique** du bassin est donné par la couche « hydrographie linéaire » du système d'information géographique de l'Agence de l'Eau. Cette couche est très détaillée et est apparue à l'usage d'un niveau trop fin. Ce réseau hydrographique a donc été réduit en ne conservant que les cours d'eau présents sur les cartes IGN à l'échelle 1/100 000. Il est important de noter que si une carte à échelle plus fine est utilisée, le réseau hydrographique s'étendra plus. Pour le bassin de la Saône à Lechatelet, le réseau hydrographique numérisé est extrêmement complexe et dense sur certaines parties du bassin. Le réseau hydrographique qui a été conservé est celui représenté sur l'Atlas du bassin RMC. Ce réseau est réduit par rapport au « véritable » réseau. La longueur du réseau hydrographique ainsi que les descripteurs qui en découlent ne peuvent être comparés avec celles des autres bassins d'étude.

En superposant le modèle numérique de terrain du bassin versant considéré avec le chevelu hydrographique, on obtient une image du bassin versant. Un curvimétrage permet de déduire le périmètre du bassin versant et la longueur du chevelu hydrographique.

Les **descripteurs de la « morphométrie »** du bassin retenus sont les suivants :

- la surface du bassin, S ;
- la longueur des cours d'eau, Lc ;
- le coefficient de drainage, Cd ($Cd=Lc/S$) ;
- le périmètre du bassin versant, P ;
- l'indice de Gravelius, Ig, qui est représentatif de la compacité du bassin versant :

$$Ig = \frac{\text{Périmètre BV}}{\text{Périmètre cercle de même surface}} = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S}}$$

Ig est de l'ordre de 1 si le bassin est compact et augmente si le bassin est allongé.

- la longueur L et la largeur l du rectangle équivalent : le rectangle équivalent est celui qui a même surface et même périmètre que le bassin versant.

Remarque : les longueurs dépendent de l'échelle à laquelle est faite la mesure et des études scientifiques ont prouvé que ces longueurs ne sont pas bornées : si l'échelle diminue, la longueur tendra vers l'infini. Par contre, les mesures de surface tendent vers une valeur finie lorsque l'échelle diminue. C'est pourquoi, nous préconisons des descripteurs du bassin versant basés sur des mesures de surface et non sur des mesures de longueur.

La connaissance du MNT d'un bassin versant permet de définir facilement la **courbe hypsométrique**, qui représente l'altitude dominée par un pourcentage donné de la surface du bassin versant. Pour une altitude choisie, il suffit de calculer le nombre de mailles du MNT dont l'altitude est supérieure à l'altitude considérée et de ramener ce nombre de mailles au nombre total de mailles que comprend le bassin versant.

La lourdeur de manutention du MNT à 100 mètres fourni par l'Agence de l'Eau a fait que l'on s'est contenté de délimiter le contour des bassins versants d'étude à partir du MNT à maille kilométrique. Ce contour a été plaqué sur l'image du bassin versant avec résolution à 100m. et c'est à partir de cette définition du bassin versant qu'a été déterminée la courbe hypsométrique. La courbe hypsométrique est relativement robuste puisqu'elle est

obtenue à partir d'un calcul de surface et non de longueurs. Elle renseigne sur le relief du bassin versant, qui sera plus ou moins marqué. Elle renseigne aussi sur la végétation dans la mesure où celle-ci s'étage en fonction de l'altitude.

La **géologie** du bassin versant a été déterminée par la lecture des cartes géologiques regroupées dans les Atlas de géographie Bordas et Hatier.

La **végétation** a été déterminée par la lecture des cartes de végétation au 1/200 000 éditées par le CNRS disponibles pour les bassins de l'Ardèche à Sauze Saint Martin (cartes n°59 et 66), de la Romanche au Chambon et de la Durance à Briançon (carte n°60) et par lecture des cartes de végétation de l'Atlas géographique Bordas pour les autres bassins versants.

Notons que la cartographie de la végétation est bien développée du fait du rôle privilégié que tient la partie formée des végétaux supérieurs au sein de la plupart des écosystèmes. Cet ensemble des plantes vasculaires fournit en effet un modèle, ou tout au moins une approche, permettant d'aborder d'une manière simple l'étude d'écosystèmes qui seraient d'une complexité inextricable si l'on devait tenir compte de tous les rapports entre les éléments vivants et le milieu, du simple fait déjà du nombre des espèces.

Une notion fondamentale relative à l'étude de la végétation est le dynamisme des groupements. Lorsque la végétation échappe à l'action humaine, elle présente en général une transformation spontanée qui tend vers un état boisé, dont la composition dépend des facteurs écologiques du milieu. L'état final est appelé le Climax. Nous avons retenu cet état comme descripteur de la végétation du bassin versant.

3.2. Description du régime hydrologique

La description du régime hydrologique des bassins versants a visé à extraire des chroniques à pas de temps journalier les descripteurs des débits annuels et des douze débits mensuels.

La période d'analyse des bassins versants doit être suffisamment longue pour s'affranchir des éventuelles instabilités climatiques, et commune pour tous les bassins afin de pouvoir les comparer. Les chroniques extraites de la base de données HYDRO (tableau 6) sont longues de 28 à 30 ans, couvrant la période allant de 1966 à 1995. Peu de lacunes y sont recensées.

Bassin	Dates de début et fin de la chronique	Longueur de la chronique	Remarques
Saône à Lechatelet	1966-1995	30 ans	
Ain à Chalais	1966-1993	28 ans	
Ardèche à Sauze St Martin	1966-1995	30 ans	lacunes
Romanche au Chambon	1966-1993	28 ans	
Durance à Briançon	1966-1993	28 ans	lacunes
Var à la Mescla	1966-1993	28 ans	

Tableau 6 : Descriptions des chroniques de débit journalier extraites de la banque HYDRO.

Le **débit interannuel**, aussi dénommé module de la rivière, a été calculé. Il est une caractérisation de la ressource en eau du bassin versant. L'écart-type du débit annuel donne une idée de la variabilité interannuelle des écoulements.

L'étude des **débits moyens mensuels** donne une idée de l'évolution saisonnière de la ressource en eau du bassin. Elle permet aussi de définir le **régime de Pardé** auquel appartient le bassin.

Les **crues** ont été analysées selon **la saison**. Pour chaque mois de l'année, ont été extraites, des chroniques à pas de temps journalier de la base HYDRO, les valeurs maximales du débit Q (échantillonnage du maximum sur la saison, ici le mois) et ce pour plusieurs durées. Les échantillons de débit ainsi obtenus ont été traités statistiquement. L'ajustement d'une loi de Gumbel sur l'échantillon permet d'obtenir les différents quantiles de distribution théorique. Les résultats obtenus permettent par exemple de connaître la saison ou le mois qui représente le plus de risque en terme de crue.

3.3. Description des événements rares

a - Description des crues

L'analyse hydrologique des crues a reposé sur l'utilisation de la chaîne de traitement QdF développée au CEMAGREF.

Les **variables de différentes durées** d utilisées dans l'analyse sont : VCXd (débit-volume caractéristique sur une durée continue), QCXd (débit-seuil caractéristique sur une durée continue) et QIX (débit instantané maximal).

La mise en œuvre opérationnelle de l'étude hydrologique des crues implique le passage par certaines phases :

- l'échantillonnage des variables VCXd et QCXd ainsi que l'analyse de la stationnarité du processus et donc de l'homogénéité et de l'indépendance des événements ;
- l'ajustement des variables VCXd, QCXd et QIX pour diverses périodes de retour T ;
- l'analyse des crues dans le but d'estimer la durée caractéristique de crue du bassin versant ;
- la construction des abaques QdF et le choix du modèle QdF de référence.

La technique d'échantillonnage (Lang, 1995) relève de l'extraction des chroniques d'observations de valeurs maximales supérieures à un seuil donné (sup-seuils), en satisfaisant les hypothèses de stationnarité-homogénéité, d'indépendance des événements et de la loi de Poisson. Il faut définir un seuil S et repérer les épisodes de crue supérieurs à celui-ci. Un épisode commence lorsque la valeur de la chronique dépasse le seuil S et finit lorsqu'elle repasse sous le seuil. On retient la valeur maximum de chaque épisode. On utilise ensuite la méthode du renouvellement pour passer de la loi de probabilité des valeurs sup-seuil à la loi de probabilité des maxima annuels. La méthode du renouvellement consiste à étudier les processus des crues, et donc la loi de probabilité.

Pour la durée continue égale à 30 jours, la technique d'échantillonnage retenue est celle du maximum annuel.

Les débits instantanés des bassins de la Romanche au Chambon et de la Durance à Briançon ont été extraits des chroniques à pas de temps journaliers de la base HYDRO. En effet, dans ces fichiers, pour chaque mois, la valeur instantanée maximale y est répertoriée. L'indépendance des événements a été vérifiée par visualisation des chroniques.

Dans le tableau 7, sont présentés les modes d'échantillonnage, et le cas échéant les valeurs de seuils qui ont été prises en compte pour l'échantillonnage des variables VCXd, QCXd et QIX en respectant le plus possible les hypothèses mentionnées.

Bassin	Variable	instantané	1j	3j	6j	10j	30j
Saône à Lechatelet	VCX		500	500	400	350	maxi annuel
	QCX	620	500	400	300	250	idem
Ain à Chalain	VCX		170	130	100	50	
	QCX	pas de donnée	160	80	50	18	
Ardèche à Sauze St Martin	VCX		460	420	270	200	maxi annuel
	QCX	720	500	250	140	80	idem
Romanche au Chambon	VCX		30	25	18	16	
	QCX	max inst. Mensuel	23	17	12	13	
Durance à Briançon	VCX		34	22	18	17	maxi annuel
	QCX	max inst mensuel	34	19	14	9	idem
Var à la Mescla	VCX		130	90	50		
	QCX	pas de donnée	130	65	50		

Tableau 7 : Techniques d'échantillonnage et les seuils de débits retenus en m³/s.

L'**ajustement** des débits VCX, QIX et QCX est réalisé avec une loi exponentielle.

L'**extrapolation** des débits VCX, QIX et QCX n'a pas été réalisée. En effet, pour extrapoler les débits aux périodes de retour supérieures à $2.n_a$ (n_a nombre d'années d'observation), il est nécessaire d'utiliser un modèle du type Gradex ou Agrégé. Ces modèles nécessitent la connaissance des précipitations. Sur la banque de données PLUVIO, un grand nombre de points de mesure de la pluie sont disponibles. Mais il est nécessaire de traiter ces données et en particulier de les spatialiser ou de définir un poste représentatif afin de déterminer les

caractéristiques des précipitations reçues sur le bassin. Cela nécessite un travail important, qui n'a pu être mené dans le cadre de cette étude, compte tenu en particulier de la taille des bassins d'étude.

Le traitement des chroniques de débit donne les quantiles théoriques en VCX, QIX et QCX pour plusieurs durées continues, et pour les périodes de retour observables (l'ajustement est considéré comme valable jusqu'à $T=2.n_a$, n_a étant le nombre d'années d'observation).

En suivant l'organigramme de la méthode QdF, l'étape suivante dans le déroulement de l'étude hydrologique des crues est la modélisation du bassin versant local par un des modèles régionaux, c'est à dire **le choix d'un modèle QdF de référence représentatif pour le site étudié**. Cette étape a été réalisée sur les bassins de la Saône à Lechatelet et de l'Ardèche à Sauze Saint Martin pour lesquels nous disposons des chroniques de débit à pas de temps variable nous permettant d'estimer les descripteurs locaux (QIXA10 et D) du régime hydrologique des crues. Pour les crues les plus fortes, on relève le débit de pointe Q_s ainsi que la durée ds de dépassement de $Q_s/2$. La durée caractéristique de crue D est assimilée à la valeur médiane conditionnelle de l'échantillon des couples (ds , Q_s) pour le débit instantané maximal annuel décennal (QIXA10). Le choix du modèle de référence a été effectué par validation graphique.

b - Description des étiages

L'analyse hydrologique des étiages a aussi reposé sur l'utilisation de la chaîne de traitement QdF développée au CEMAGREF. L'étude fréquentielle des étiages s'effectue à partir des chroniques de débit journalier.

Les **variables de différentes durées** d utilisées dans l'analyse sont : VCNd (débit-volume caractéristique sur une durée continue) et QCNd (débit-seuil caractéristique sur une durée continue).

La mise en œuvre opérationnelle de l'étude hydrologique des étiages implique le passage par certaines phases :

- l'échantillonnage des variables VCNd et QCNd ;
- l'ajustement des variables VCNd et QCNd ;
- l'analyse des étiages dans le but d'estimer la durée caractéristique d'étiage du bassin versant ;
- la construction des abaques QdF et le choix du modèle QdF de référence.

La technique d'échantillonnage retenue est celle du minimum sur la saison, ici l'année.

La loi Log-Normale à deux paramètres, d'utilisation fréquente en étiage (Kaabi, 1994) présente pour les différents échantillons constitués sur les bassins versants étudiés une adéquation acceptable, consolidée par l'approche multi-durées ($d=1, 2, 5, 10, 20, 30$ jours) des caractéristiques de débit. Les distributions expérimentales et théoriques se visualisent sur un graphe $\ln(Q)=f(U_{\text{gauss}})$.

Pour $U_{\text{gauss}} > 0$, nous avons la branche des débits d'étiage en années humides et pour $U_{\text{gauss}} < 0$, celle des débits d'étiage en années sèches. Les quantiles $Q(T,d)$ correspondants se définissent alors comme suit :

Sur la branche sèche ($U_{\text{gauss}} < 0$), le $Q(T,d)$ est le **quantile de durée d au-dessous duquel on descendra en moyenne une fois tous les T ans**

Sur la branche humide ($U_{\text{gauss}} > 0$), le $Q(T,d)$ est le **quantile de durée d qui sera dépassé en moyenne une fois tous les T ans**.

Ce traitement des chroniques de débit donne les quantiles théoriques en VCN et QCN pour plusieurs durées continues, et pour les périodes de retour observables. De chaque échantillon, ont été extraits la moyenne et l'écart-type des logarithmes népériens des valeurs, en vue d'un ajustement à la loi Log-Normale, et les 5 quantiles suivants (les valeurs F correspondent à la fonction de répartition) :

- le quantile décennal sec, pour $F=0.1$: sous-passé en moyenne une année sur dix,
- le quantile quinquennal sec, pour $F=0.2$: sous-passé en moyenne une année sur cinq,
- le quantile médian, pour $F=0.5$: sous-passé mais aussi dépassé en moyenne une année sur deux,
- le quantile quinquennal humide, pour $F=0.8$: dépassé en moyenne une année sur cinq,
- le quantile décennal humide, pour $F=0.9$: dépassé en moyenne une année sur dix.

L'analyse des courbes de tarissement a été effectuée pour chacun des bassins versants étudiés. Le tarissement d'une rivière s'effectue, en général, selon une décroissance exponentielle représentative de la vidange du réservoir souterrain. Cette vidange s'écrit :

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

α est une constante appelée le coefficient de Maillet. Il est l'inverse d'un temps.

Pour chaque bassin versant étudié, une courbe de tarissement par année a été sélectionnée. A partir de chaque courbe de tarissement, la valeur de α est calculée (ajustement d'une fonction logarithmique sur la courbe $Q(t)$). Ces valeurs fluctuant d'une année sur l'autre de façon relativement importante, les valeurs moyenne et médiane de $1/\alpha$ sont retenues pour chaque bassin versant ($1/\alpha$ étant un temps, sa lecture est plus aisée), renseignant sur la capacité des aquifères à soutenir les étiages.

La dernière étape de l'étude hydrologique des étiages est la modélisation du bassin versant local par un des modèles régionaux, c'est à dire **le choix d'un modèle QdF de référence représentatif pour le site étudié**. C'est l'écart-type de l'échantillon de débit-volume journalier d'étiage annuel VCN($d=1$ jour) (en log) qui sert de critère de choix de la famille hydrologique représentative du bassin versant étudié (cf. figure 7).

Les abaques du modèle de référence représentatif pour le site étudié étant les courbes QdF ($Q=VCNd$ ou $QCNd$) normalisées en abscisses par la durée caractéristique d'étiage De (médiane de l'inverse du coefficient de Maillet) et en ordonnées par VCN($T=2$ ans, $d=1$ jour), elles sont dénormées par les valeurs de De et VCN($T=2$ ans, $d=1$ jour) du bassin d'étude. Les courbes QdF déduites du modèle sont alors comparées avec celles déduites des observations.

3.4. Description de la nappe phréatique

La carte n°3 de l'Atlas du bassin Rhône-Méditerranée-Corse renseigne sur les eaux souterraines des bassins versants. Y sont cartographiés :

- la nature géologique des terrains composant les systèmes aquifères ainsi que leur productivité ;
- les principales sources et résurgences ;
- les prélèvements effectués.

L'Atlas des eaux souterraines de la France présente :

- les nappes d'eau souterraine et en particulier leur nature géologique ;
- le domaine karstique, les réseaux aquifères et les rivières souterraines.

La lecture de ces deux sources d'information renseigne sur l'existence ou non d'une nappe alluviale, d'une nappe de versant, de circulations karstiques ou de pertes et d'une interaction nappe-rivière. Aucune donnée quantitative n'est accessible sur ces cartes.

3.5. Description du degré d'artificialisation ou d'anthropisation

La carte n°2 de l'Atlas du bassin Rhône-Méditerranée-Corse indique l'état physique des milieux aquatiques superficiels ainsi que l'origine des perturbations. Les principaux ouvrages et aménagements (barrage, seuil, centrale nucléaire, usine hydroélectrique, extraction de granulats, etc.) ainsi que les prélèvements y sont répertoriés. Les causes de perturbation du fonctionnement physique des cours d'eau sont indiquées.

La lecture de cette carte pour chacun des bassins versants d'étude a permis de déterminer qualitativement le degré d'artificialisation du bassin.

3.6. Autres descripteurs

Les **courbes de débit classé** ont été obtenues à partir des chroniques de débit journalier extraites de la base de données HYDRO. Ces débits ont été classés par ordre croissant et le pourcentage de temps pendant lequel le débit est inférieur à un débit donné a été calculé.

Une estimation des **précipitations spatiales reçues sur le bassin** a été obtenue par lecture de la carte des hauteurs moyennes annuelles de précipitations de l'Atlas climatique de la France.

L'Atlas climatique de la France contient aussi pour l'année moyenne et pour chaque mois, quatre planches indiquant la répartition de la moyenne des **températures de l'air**, minimales quotidiennes, maximales quotidiennes, quotidiennes et quotidiennes réduites au niveau de la mer.

4. Présentation des résultats

4.1. Description du bassin versant

Les planches 1 à 8 de l'annexe 3.2 présentent les images de bassin versant obtenues en superposant le modèle numérique de terrain à 100m (relief) avec le chevelu hydrographique. Le tableau 8 présente les valeurs des descripteurs de la morphométrie du bassin.

Bassin	S (km ²)	Lc (km)	Cd (km ⁻¹)	P (km)	Ig	rectg. L (m)	équiv. l (m)
Saône à Lechatelet	11700	2221	0.19	618	1.61	264.6	44.2
Ain à Chalain	650	245	0.38	123.6	1.37	48.5	13.4
Ardèche à Sauze St Martin	2240	1344	0.60	219	1.31	82.9	27.0
Romanche au Chambon	220	170	0.77	70.5	1.34	27.1	8.1
Durance à Briançon	548	402	0.73	152.5	1.84	68.4	8.0
Var à la Mescla	1830	1068	0.58	190.7	1.26	69.1	26.5

Tableau 8 : Descripteurs de la « morphométrie » du bassin versant.

(S est la superficie, Lc la longueur des cours d'eau, Cd le coefficient de drainage, P le périmètre du bassin, Ig l'indice de Gravelius et L et l les longueurs et largeurs du rectangle équivalent).

Les courbes hypsométriques de chacun des bassins versants sont regroupées sur la figure 8. Géologie et végétation des bassins sont présentées dans le tableau 9.

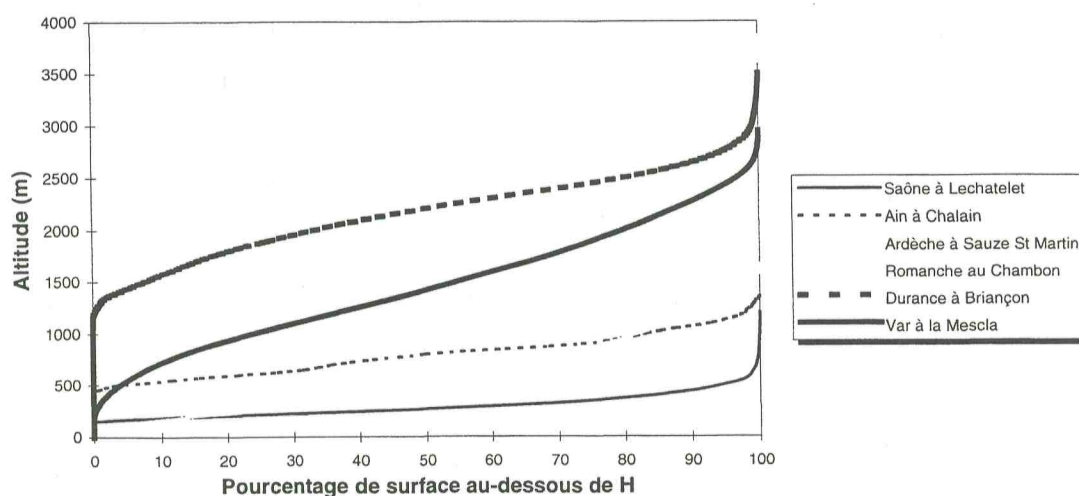


Figure 8 : Courbes hypsométriques des bassins versants d'étude.

Le bassin de la Saône à Lechatelet est le bassin le plus grand du panel. Il a une forme allongée. Sur certaines parties karstiques du bassin, le réseau hydrographique est quasi inexistant alors que sur d'autres parties, il est bien développé. Le relief n'est pas marqué. La végétation est formée principalement de forêts de feuillus.

Le bassin de l'Ain à Chalain, de forme plutôt rectangulaire, a un réseau hydrographique peu développé à cause des formations géologiques karstiques qui le composent. Les écoulements ont principalement lieu dans le sol. Bien que l'altitude moyenne soit supérieure à celle de la Saône à Lechatelet, le relief est lui aussi peu marqué.

Le bassin de l'Ardèche à Sauze Saint Martin est relativement compact avec un réseau hydrographique bien développé, en particulier à l'amont du bassin. La gamme d'altitude est étendue mais l'élévation est régulière. La végétation est différenciée selon l'altitude avec au sud et à l'aval des formations plutôt méditerranéennes alors qu'à l'amont on trouve des forêts de feuillus.

Le bassin de la Romanche au Chambon est caractérisé par son caractère montagneux. Le réseau hydrographique est dissymétrique principalement développé sur le versant sud du bassin, le versant nord ayant un relief très marqué. L'altitude est élevée. La végétation est étagée selon l'altitude.

La Durance à Briançon est attenante au bassin de la Romanche au Chambon. Le bassin a une forme allongée. Le réseau hydrographique est linéaire. L'altitude est élevée et la végétation est en étage, des glaciers occupant certaines parties amont du bassin.

Le bassin du Var à la Mescla est très compact avec un réseau hydrographique très développé. La gamme d'altitudes est très grande, le relief étant très marqué (gorges). La végétation est de type méditerranéen à l'aval et alpin à l'amont.

Bassin	Géologie	Type de végétation
Saône à Lechatelet	<i>superficielle</i> : calcaire et craie, alluvions fluviales, argiles sédimentaires. <i>structure</i> : calcaires fissurés, karst du Jurassique.	- Forêts de feuillus septentrionaux - Prairies - Labours
Ain à Chalain	<i>superficielle</i> : calcaire et craie. <i>structure</i> : calcaires fissurés, karst du Jurassique	- Forêts de feuillus septentrionaux - Labours
Ardèche à Sauze St Martin	<i>superficielle</i> : calcaire et craie, roche cristalline et volcanique, sols de montagne. <i>structure</i> : socle cristallin (granit), marnes, calcaires.	- A l'aval : chêne vert, chêne pubescent méditerranéen - A l'amont : chêne vert le long des cours d'eau, chêne pubescent, pin sylvestre, châtaignier, hêtre et sapin en allant vers l'ouest.
Romanche au Chambon	<i>superficielle</i> : sols de montagne. <i>structure</i> : granit, calcaire, grès, marnes.	- Pin sylvestre - Mélèze surtout sur les versants sud - Etages alpin, nival et glacière selon l'altitude
Durance à Briançon	<i>superficielle</i> : sols de montagne. <i>structure</i> : calcaires, marnes, grès, argiles.	- Série montagnarde à pin sylvestre le long des cours d'eau - Mélèze - Etage alpin - Glaciers
Var à la Mescla	<i>superficielle</i> : sols de montagne, sols méditerranéens, calcaire et craie. <i>structure</i> : granit, calcaires, grès.	- Etage alpin - Maquis, garrigue

Tableau 9 : Géologie et végétation des bassins versants étudiés.

4.2. Description du régime hydrologique

Le tableau 10 présente les valeurs des descripteurs du régime hydrologique retenus par les membres du groupe de travail. La figure 9 regroupe les graphes d'évolution des débits mensuels ramenés au débit interannuel pour chacun des bassins versants d'étude.

L'annexe 3.3 présente les résultats de l'étude de la saisonnalité des crues. Chaque planche regroupe l'évolution des crues décennales mensuelles au cours de l'année pour plusieurs durées (1j, 2j, 5j, 10, 20j et 30j) et celle des crues mensuelles de 1 jour pour plusieurs périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans). Les deux graphes circulaires permettent de visualiser la saison ou le mois qui est à risque en terme de crue. La survenue d'un épisode de crue, entraînant d'éventuelles inondations, a du point de vue de l'agriculture ou de la faune par exemple des implications différentes selon la période où il intervient.

Bassin	Régime de Pardé	Débit annuel		Cv	Amplitude de variation			
		(m ³ /s)	(l/s/km ²)		Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qmin (l/s/km ²)	Qmax (l/s/km ²)
Saône à Lechatelet	Pluvial-océanique	158.9	13.58	0.32	61.42	265.2	5.25	22.67
Ain à Chalain	Pluvio-nival	28.0	43.01	0.23	16.13	43.38	24.81	66.74
Ardèche à Sauze St Martin	Pluvio-nival	63.4	28.31	0.36	23.58	124.9	10.53	55.76
Romanche au Chambon	Nival	7.4	33.51	0.16	5.15	9.66	23.43	43.91
Durance à Briançon	Nivo/Nivo-pluvial	14.6	26.68	0.21	9.40	23.27	17.15	42.46
Var à la Mescla	Nivo-pluvial	36.6	20.00	0.29	18.22	70.25	9.96	38.39

Tableau 10 : Descripteurs du régime hydrologique des cours d'eau (Cv est le coefficient de variation des débits interannuels (écart-type/moyenne)).

La Saône à Lechatelet est de type pluvial-océanique avec des hautes eaux en hiver et les étiages en été. La dynamique du bassin est « molle » avec peu de différences entre les crues de 1 jour et 2 jours. Le risque de crues est le plus fort en hiver (décembre, janvier, février). Le débit annuel, ramené à la surface du bassin, est faible, mais les variations sont fortes, dépendant sans doute principalement des variations climatiques.

L'Ain à Chalain est de type pluvio-nival avec des hautes eaux intervenant en fin d'hiver et début de printemps. Les basses eaux ont lieu l'été. La période de plus fort risque de crue se situe entre novembre et mars. Le débit annuel, ramené à la surface du bassin, est fort.

L'Ardèche à Sauze Saint Martin est caractérisée principalement par son type cévenol, avec des crues de courtes durées (1 à 2 jours) mais très fortes qui interviennent en octobre éventuellement novembre. Les variations de débit, à l'échelle annuelle, sont très fortes, dues à la variation climatique : occurrence ou non d'un épisode cévenol.

La Romanche au Chambon est de type nival, avec les basses eaux en hiver et les hautes eaux, dues à la fonte des neiges, au printemps (mai, juin). Pour les fréquences rares, apparaissent des crues d'automne générées par des pluies importantes. Les variations de débit, à l'échelle annuelle, sont faibles, du fait de l'action régulatrice des précipitations neigeuses.

La Durance à Briançon est de type nivo/nivo-pluvial, avec des hautes eaux au printemps mais aussi, dans une moindre mesure, à l'automne.

Le Var à la Mescla est de type nivo-pluvial, avec des crues intervenant au printemps, à la fonte des neiges et à l'automne. A l'échelle saisonnière, les crues de fréquence rare sont les plus fortes en octobre. Le débit interannuel, ramené à la surface du bassin, est faible. Mais l'amplitude de variation est relativement forte.

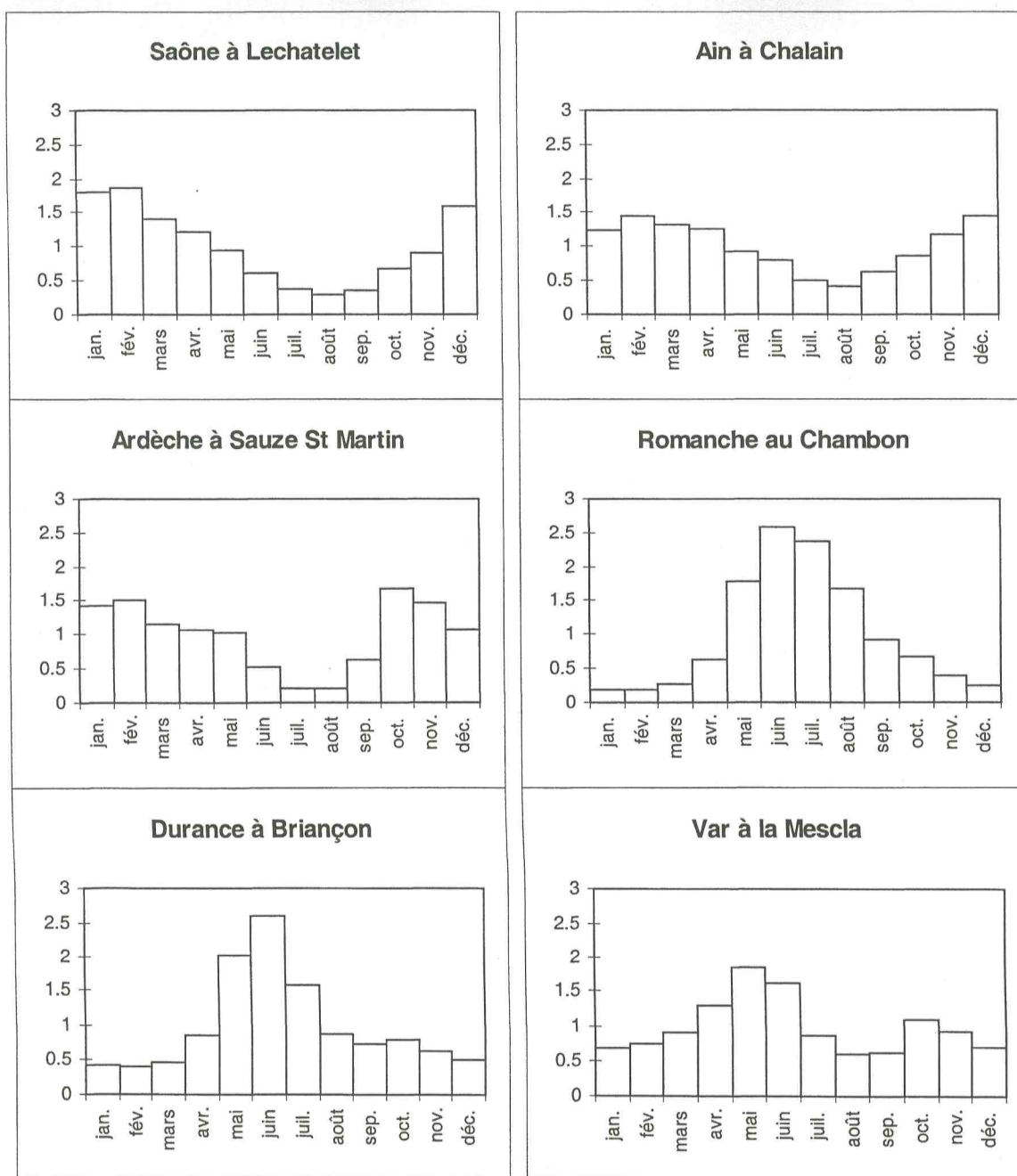


Figure 9 : Evolution des coefficients de débit sur les bassins versants étudiés.

4.3. Description des événements rares

Description des crues

Les quantiles théoriques en VCN et QCN pour plusieurs durées d ont été calculés pour chacun des bassins versants. Les résultats sont regroupés en annexe 3.4. Les valeurs du débit décennal en pointe et en volume sur 24h sont les suivantes :

Q10 (m3/s)	Pointe	Volume sur 24h
La Saône à Lechatelet	1265	1275
L'Ain à Chalais	**	321
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	***	***
La Romanche au Chambon	78	54
La Durance à Briançon	117	102
Le Var à la Mescla	**	380

Les débits de pointe atteints sur le bassin de l'Ardèche à Sauze Saint Martin sont très importants.

Les courbes QdF paramétrées par la durée obtenues pour le bassin de la Saône à Lechatelet sont très resserrées, indiquant une dynamique de crue « molle ».

Pour l'Ardèche à Sauze Saint Martin, l'évolution des débits instantanés et dépassés pendant un jour est différente de celle obtenue pour les durées supérieures. On retrouve la dynamique rapide de ce bassin.

Pour les bassins de la Saône à Lechatelet et de l'Ardèche à Sauze Saint Martin, dont nous disposons des chroniques de débit à pas de temps variable, une modélisation QdF a été effectuée (cf. annexe 3.5). Rappelons que cette modélisation QdF nécessite la connaissance de deux paramètres locaux représentatifs du bassin d'étude, le débit de pointe décennal QIXA10 et la durée caractéristique de crue D_c . Le choix du modèle de synthèse a été effectué par validation graphique : ne connaissant les valeurs des gradex de pluies sur ces deux bassins versants, nous avons retenu le modèle de synthèse QdF qui restitue le mieux les quantiles de distribution théorique observés. Le tableau 11 regroupe les valeurs des paramètres locaux et le modèle auquel se rapporte chacun des bassins. Y figure aussi la valeur de D_c , médiane de la durée caractéristique des crues supérieures à la crue quinquennale, descripteur demandé par le groupe de travail. La dynamique rapide du bassin de l'Ardèche à Sauze Saint Martin donne une durée caractéristique de crue très faible (10 heures) alors qu'elle est très importante sur la Saône à Lechatelet (250 heures). Le modèle de synthèse de Vandenesse, généralement représentatif d'un régime en crue soutenu, restitue le mieux les quantiles observés sur le bassin de la Saône à Lechatelet. Le bassin de l'Ardèche à Sauze Saint Martin est le mieux représenté par le modèle de Soyans qui définit un régime d'écoulement rapide. Ces résultats sont conformes aux observations que nous avons déjà faites. Il est dommage de ne pas avoir pu appliquer, faute de données, cette modélisation QdF aux autres bassins versants tests.

Bassin	QIXA10 (m3/s)	D_c (h)	Modèle QdF	D_c (h)
La Saône à Lechatelet	1265	250	Vandenesse	338
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	****	10	Soyans	12.8

Tableau 11 : Descripteurs locaux des bassins dans la modélisation QdF.

Description des étiages

L'annexe 3.6 regroupe les traitements réalisés pour la description des étiages : ajustement, étude du tarissement, modélisation QdF.

L'écartement des courbes QdF en étiage paramétrées par la durée, renseignent sur la dynamique du tarissement. Lorsque les courbes sont très resserrées, cela signifie que la saison d'étiage est longue. On obtient ce comportement pour les rivières de type nival (Romanche, Durance, Var) mais aussi pour l'Ardèche qui a principalement une saison des pluies, l'automne.

Le traitement des chroniques de débit par la chaîne QdF-étiage permet d'obtenir les quantiles de distribution théorique des débits d'étiage. Les tableaux 12 et 13 regroupent les valeurs des débits d'étiage quinquennal et décennal sec pour différentes durées.

	La Saône à Lechatelet		L'Ain à Chalain		L'Ardèche à Sauze Saint Martin		La Romanche au Chambon		La Durance à Briançon		Le Var à La Mescla	
Durée (jour)	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN
1	13,3	13,3	2,05	2,05	2,75	2,75	0,774	0,773	3,75	3,75	9,29	9,28
2	16,2	15,3	2,21	2,15	2,93	2,88	0,801	0,793	4,64	4,25	10,1	9,76
5	20,8	18,3	2,44	2,27	3,15	3,04	0,841	0,816	4,94	4,63	10,8	10,4
10	23,8	20	2,74	2,41	3,79	3,23	0,927	0,851	5,14	4,76	11,3	10,8
20	27,4	22,1	3,38	2,64	4,89	3,59	1,03	0,909	5,3	4,88	12,1	11,1
30	29,6	23,1	4,21	2,89	5,57	3,88	1,13	0,947	5,42	4,9	12,8	11,3

Tableau 12 : Valeurs des débits (en m³/s) d'étiage quinquennal sec pris comme débit caractéristique d'étiage.

	La Saône à Lechatelet		L'Ain à Chalain		L'Ardèche à Sauze Saint Martin		La Romanche au Chambon		La Durance à Briançon		Le Var à La Mescla	
Durée (jour)	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN	QCN	VCN
1	10.8	10.8	1.77	1.77	2.06	2.06	0.695	0.695	3.48	3.48	8.17	8.17
2	13.6	12.8	1.92	1.86	2.22	2.17	0.721	0.713	4.30	3.95	9.03	8.69
5	18.1	15.7	2.11	1.97	2.38	2.30	0.754	0.732	4.62	4.33	9.81	9.45
10	20.9	17.3	2.33	2.07	2.89	2.45	0.842	0.769	4.83	4.46	10.3	9.79
20	23.9	19.2	2.69	2.22	3.76	2.74	0.941	0.827	4.98	4.58	10.9	10.1
30	25.1	20	3.2	2.4	4.18	2.97	1.040	0.867	5.09	4.60	11.4	10.2

Tableau 13 : Valeurs des débits (en m³/s) d'étiage décennal sec.

L'analyse des courbes de tarissement et le calcul du coefficient de Maillet permet de connaître la valeur du coefficient de tarissement moyen (tableau 14). Le graphe de la figure 10 indique la variabilité du coefficient de tarissement. On constate que pour les rivières nivales, l'amplitude de variation est faible, alors qu'elle est grande pour les rivières de type pluvial.

	La Saône à Lechatelet	L'Ain à Chalain	L'Ardèche à Sauze Saint Martin	La Romanche au Chambon	La Durance à Briançon	Le Var à La Mescla
α moyen	0.080	0.097	0.077	0.031	0.041	0.020
α médian	0.065	0.083	0.056	0.026	0.035	0.019

Tableau 14 : Coefficient de tarissement moyen et médian (unité : 1/jours).

Coefficient de tarissement

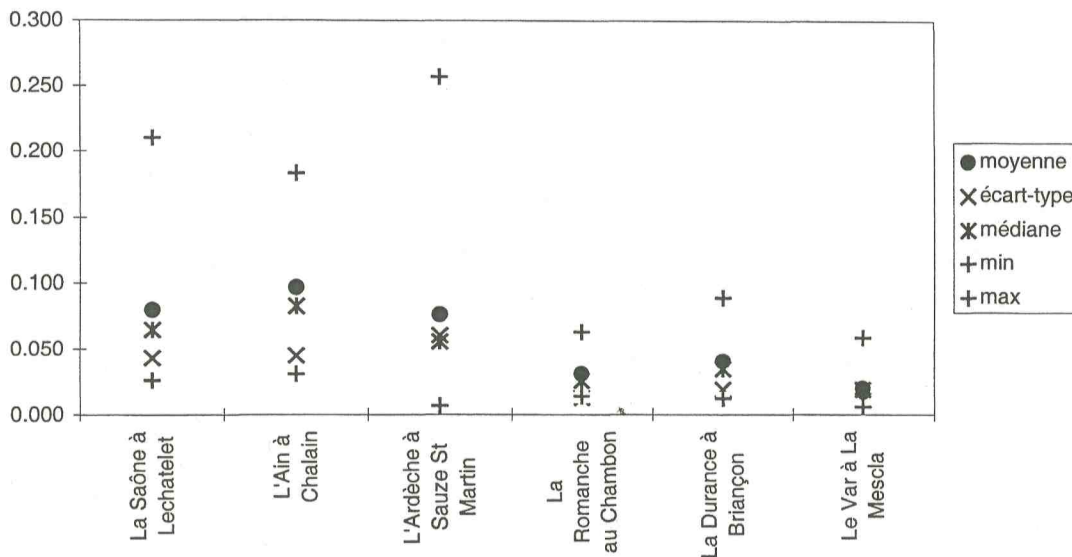


Figure 10 : Variabilité du coefficient de tarissement.

La modélisation QdF nécessite la connaissance de l'écart-type de l'échantillon de débit-volume journalier d'étiage annuel s pour déterminer le modèle de référence auquel se rapporte le bassin d'étude et celle du débit caractéristique d'étiage VCN(T=2ans, d=1jour) et de la durée caractéristique d'étiage D_e pour dénormer le modèle de référence et ainsi obtenir les courbes QdF du bassin d'étude (tableau 15). Ces courbes ainsi obtenues ont été comparées avec celles obtenues par l'analyse complète des chroniques de débit journalier.

Pour la Saône à Lechatelet, les quantiles sont bien restitués par le modèle de Saint Floret pour les débits inférieurs à 50m³/s. Au-delà (fréquence rare en année humide et durées importantes), les débits modélisés sont sous-estimés.

Pour l'Ain à Chalain, le modèle de Ménétreol restitue bien les débits d'étiage inférieurs à 5m³/s. Au-delà, les quantiles modélisés sont sur-estimés.

Pour l'Ardèche à Sauze Saint Martin, la cohérence entre les quantiles de distribution théorique et ceux modélisés par le modèle de Vaubarlet est très bonne.

La Romanche au Chambon et la Durance à Briançon se rapportent au modèle de Ménétreol. Une nette tendance à la sur-estimation des débits faibles et à la sous-estimation des forts débits d'étiage est décelée. Cela est sans doute dû au fait que ces deux rivières sont de type nival, alors qu'aucun des 4 modèles de référence retenus par la méthode QdF ne correspond à ce type. Par ailleurs, dans le cas de rivières nivales, le coefficient de tarissement ne représente pas la vidange d'un réservoir souterrain.

Pour le bassin du Var à la Mescla, le modèle de Ménétreol est aussi retenu. Dans une moindre mesure, on retrouve le comportement précédent, atténué sans doute par le caractère nivo-pluvial du bassin.

En règle générale, la similitude des courbes QdF calculées et modélisées est bonne et valide bien la méthode QdF. Les résultats obtenus poussent toutefois à améliorer la modélisation dans le cas de rivières nivales.

	La Saône à Lechatelet	L'Ain à Chalain	L'Ardèche à Sauze Saint Martin	La Romanche au Chambon	La Durance à Briançon	Le Var à La Mescla
<i>s</i>	0.476	0.330	0.654	0.246	0.169	0.292
Modèle QdF	ST FLORET	MENETREOL	VAUBARLET	MENETREOL	MENETREOL	MENETREOL
VCN(2,1)	19.9	2.7	4.8	0.95	4.3	11.9
De	15.3	12	17.8	38.7	28.8	53.2

Tableau 15 : Variables nécessaires à la modélisation QdF en étiage.

4.4. Description de la nappe phréatique

La description qualitative de la nappe phréatique est présentée au tableau 16.

Bassin	Nappe phréatique : principales caractéristiques
La Saône à Lechatelet	- nappe d'alluvions d'accompagnement de la Saône et de ses affluents, généralement soutenue par les rivières ; - circulation karstique : résurgence, sources de karst, pertes.
L'Ain à Chalain	- pas de nappe alluviale ; - circulation karstique très importante avec écoulements de surface quasiment inexistant, sources peu nombreuses mais à débit le plus souvent élevé, pertes des cours d'eau de surface et résurgence de rivières souterraines.
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	- pas de nappe alluviale ; - pas de circulation karstique ; - existence de nappes perchées très limitées.
La Romanche au Chambon	- pas de nappe alluviale ; - pas de circulation karstique ; - réseau aquifère, le plus souvent perché , des massifs calcaires plissés ou fracturés.
La Durance à Briançon	- pas de nappe alluviale ; - pas de circulation karstique ; - nappes ou réseaux aquifères locaux et compartimentés dans les séries plissées à alternance de couches perméables et imperméables (réserves limitées).
Le Var à la Mescla	- pas de nappe alluviale ; - réseaux aquifères étendus ou localisés des plateaux calcaires karstiques ; - nappes profondes captives possibles ; - zone de paléokarsts profonds .

Tableau 16 : Description de la nappe phréatique.

4.5. Description du degré d'artificialisation ou d'anthropisation

Le degré d'anthropisation ou d'artificialisation est décrit par l'importance des ouvrages, aménagements et prélèvements effectués sur le cours d'eau et dans la nappe (tableau 17).

Bassin	Prélèvements	Ouvrages, Aménagements
La Saône à Lechatelet	- agricoles pour les besoins de l'irrigation.	- barrages, seuils ; - microcentrales ; - extraction de granulats dans le lit majeur ; - digues, recalibrage.
L'Ain à Chalain	- pour l'hydroélectricité.	- barrage, seuils ; - microcentrales, usines hydroélectriques.
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	- agricoles pour les besoins de l'irrigation ; - pour l'hydroélectricité.	- barrages, seuils. - microcentrales et usines hydroélectriques.
La Romanche au Chambon		- barrage du Chambon (51M de m3).
La Durance à Briançon	- pour les canons à neige ; - agricoles pour les besoins de l'agriculture.	- barrage, seuils ; - microcentrales.
Le Var à la Mescla	- pour les canons à neige ; - pour l'agriculture.	- barrages, seuils ; - microcentrales, usines hydroélectriques ; - extraction de granulats dans le lit majeur.

Tableau 17 : Description du degré d'artificialisation ou d'anthropisation des bassins.

4.6. Autres descripteurs

Les **courbes de débit classé** sont présentées figure 11. Elles renseignent sur l'amplitude de variation des débits enregistrés sur le bassin versant. Leur forme plus ou moins « creuse » donne une indication sur la dynamique du bassin : un bassin avec des crues exceptionnelles très différentes des crues moyennes aura une courbe de débits classés très creuse. C'est ce que l'on constate pour l'Ardèche à Sauze Saint Martin et le Var à la Mescla.

Les **précipitations moyennes interannuelles** reçues sur le bassin versant lues sur l'Atlas climatique de la France sont :

La Saône à Lechatelet	800 mm
L'Ain à Chalain	1500 mm
L'Ardèche à Sauze Saint Martin	1200 mm
La Romanche au Chambon	1200 mm
La Durance à Briançon	1000 mm
Le Var à la Mescla	900 mm

Il est important de noter que ces valeurs sont des indications qui donnent l'ordre de grandeur des précipitations totales reçues sur le bassin versant.

Les **températures de l'air** moyennes interannuelles et moyennes mensuelles sont regroupées dans le tableau 18. Il s'agit de statistiques sur les températures quotidiennes (définies comme étant la moyenne des températures minimales et maximales). Pour les bassins à fort gradient d'altitude (Romanche et Durance), ces données ne sont pas disponibles.

Bassin	Jan.	Fév.	Ma.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep..	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
Saône à Lechatelet	1	2	6	9.5	14	17	19	18	15	10.5	5	1.5	10
Ain à Chalain	0	2	5	9.5	13	15	17	17	14	10	4.5	1	8
Ardèche à Sauze ..	2	2.5	5	9	12	15	18	17	14	9.5	5	0	10
Var à la Mescla	4	3	7	12	13	18	20	19	18	13	7	3	11

Tableau 18 : Températures de l'air.

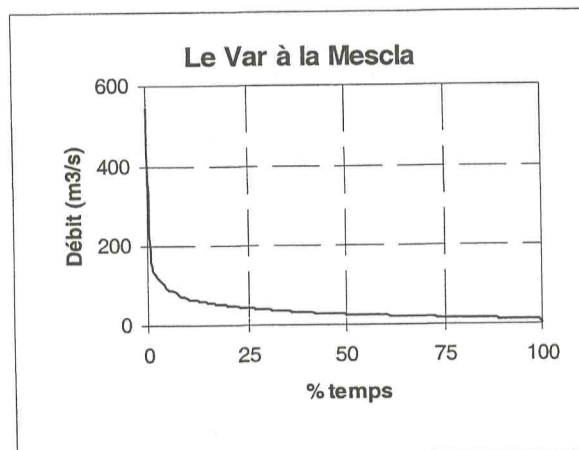
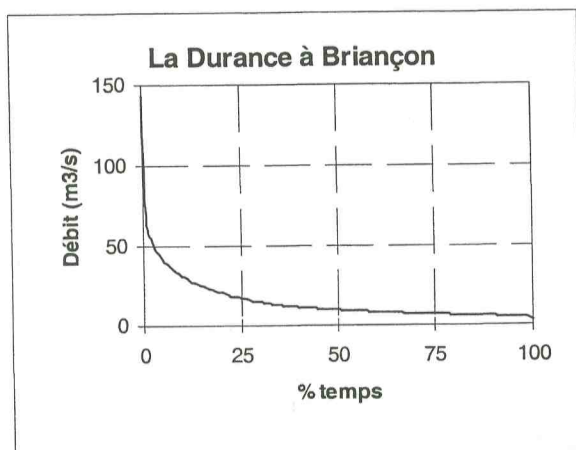
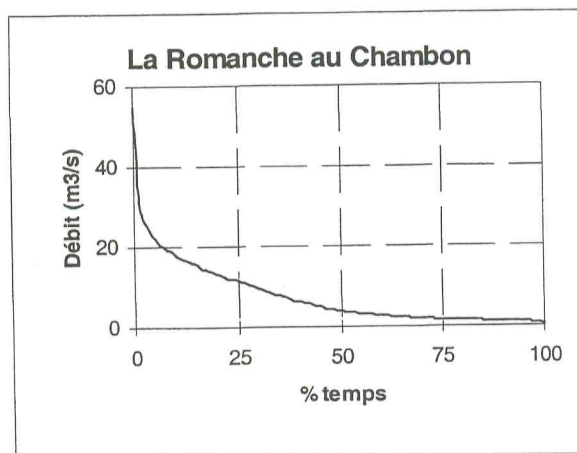
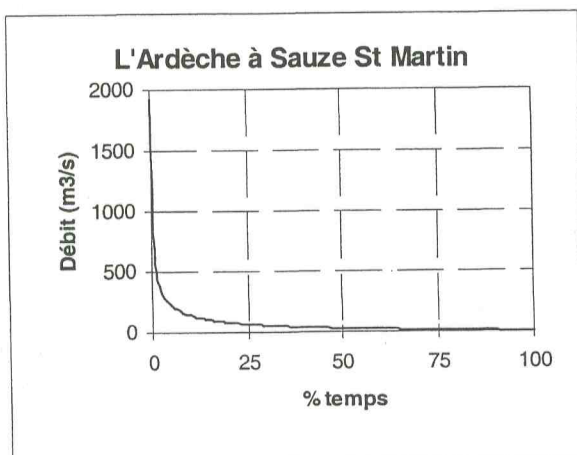
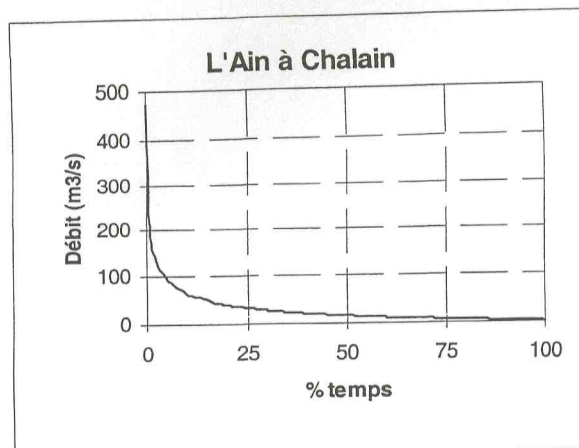
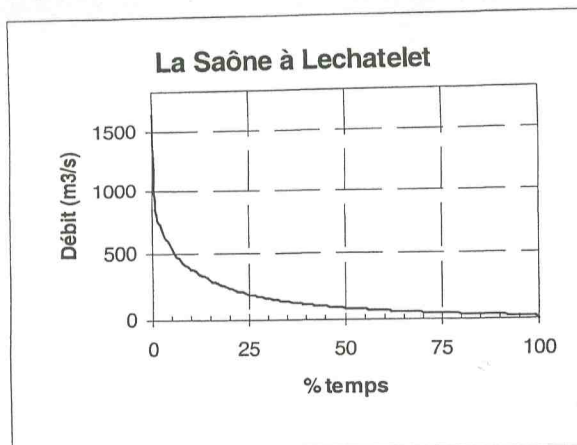
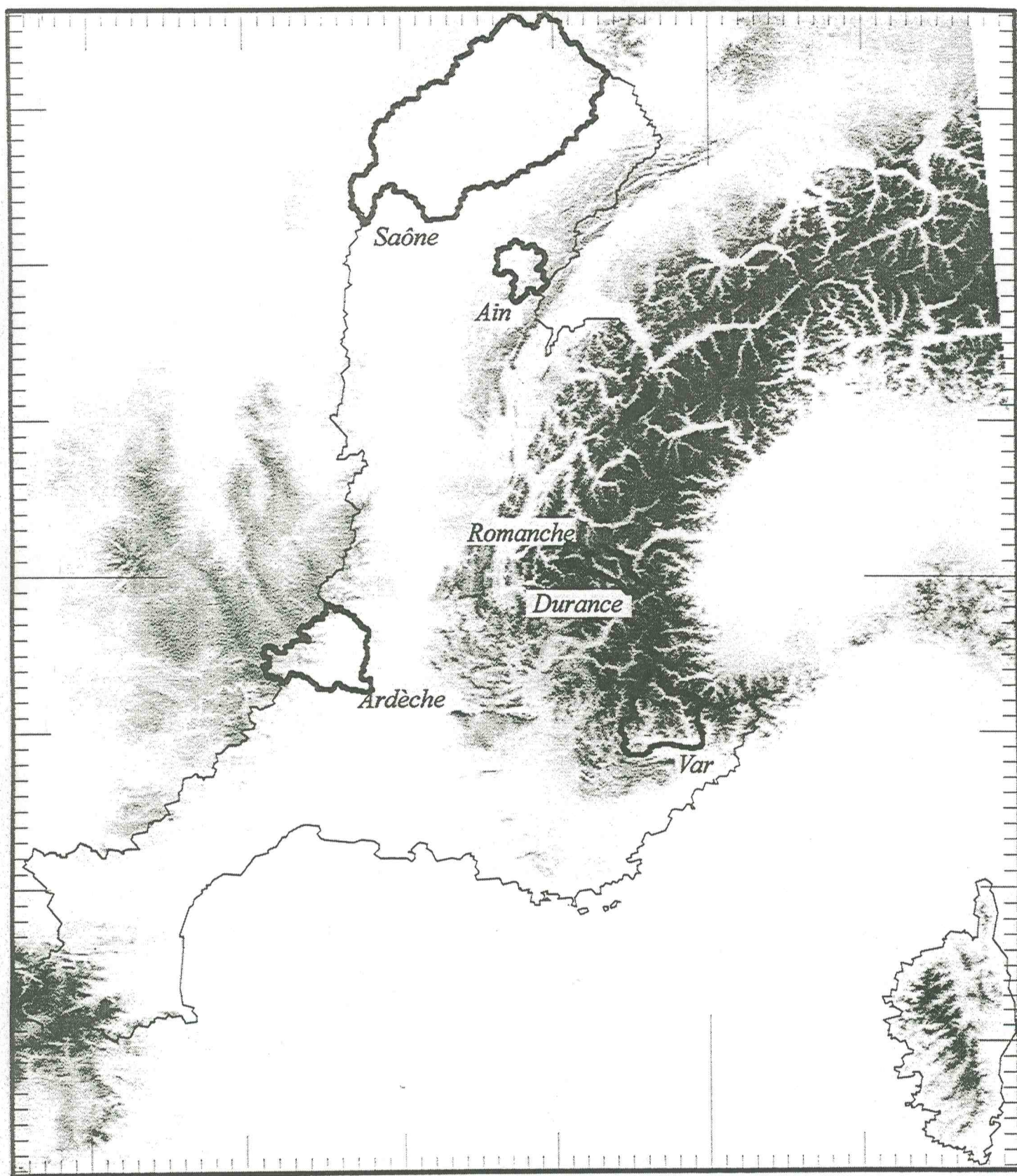


Figure 11 : Courbes des débits classés.

ANNEXE 3.1 :

LOCALISATION DES BASSINS VERSANTS TESTS



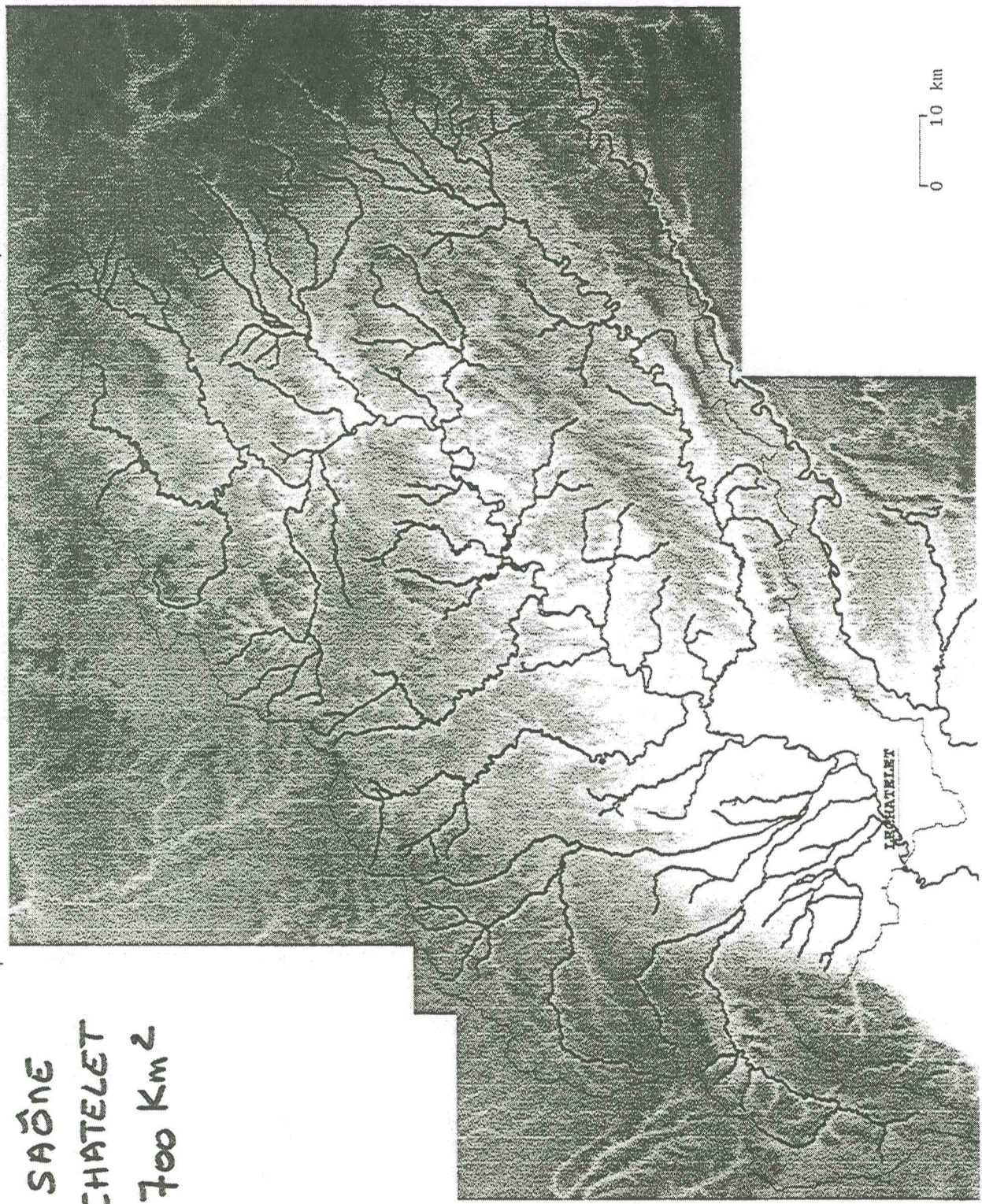
Localisation des bassins versants étudiés

ANNEXE 3.2 :

IMAGES DES BASSINS VERSANTS D'ETUDE : RELIEF ET

CHEVELU HYDROGRAPHIQUE

LA SAÔNE
au CHATELET
11700 Km²



0 10 km

2300.

800.

900. (Coordonnées Lambert2)

La Romanche au Chambon

Surface=220km²

Périmètre du BV=70.5km

Longueur du réseau hydrographique=169.9km

10 km

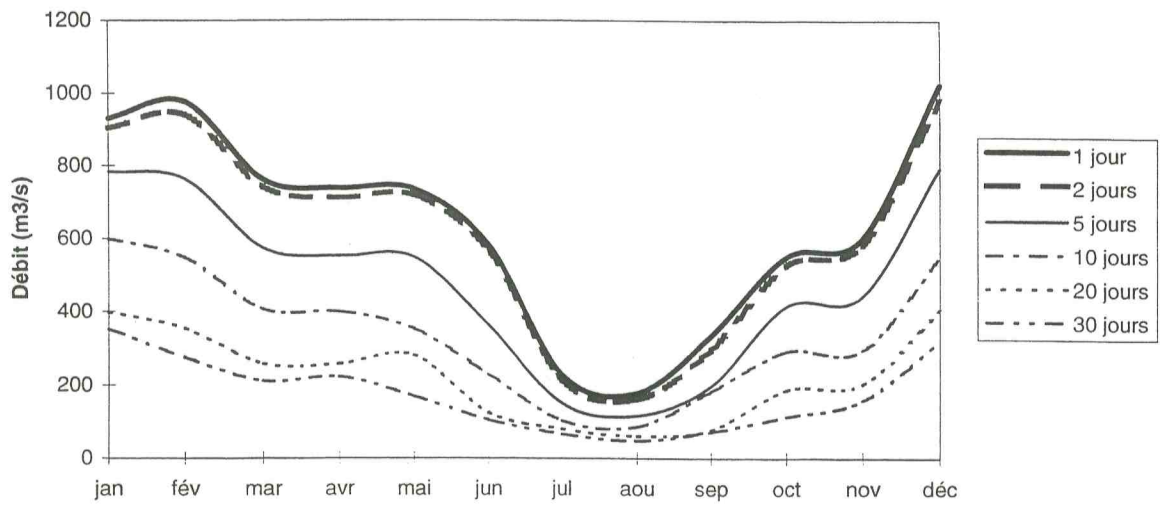


ANNEXE 3.3 :

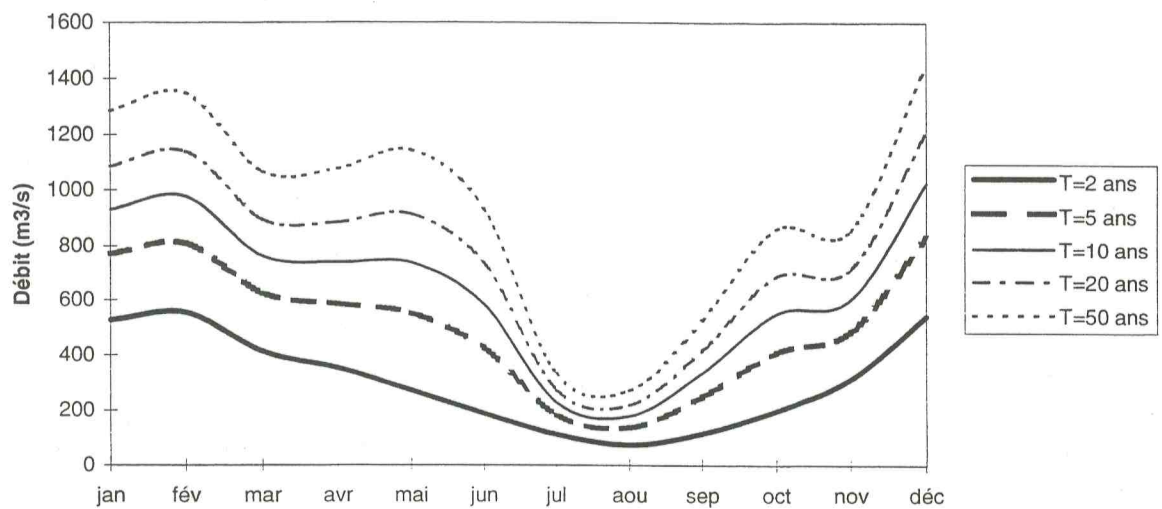
ANALYSE DES CRUES : SAISONALITE

La Saône à Lechatelet

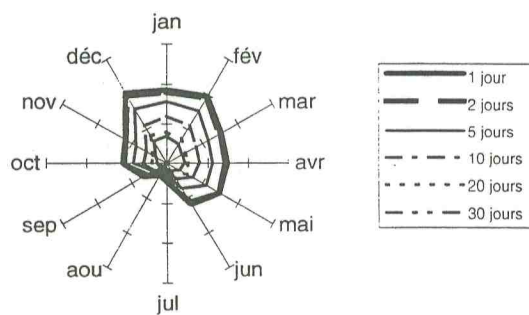
Crues décennales mensuelles



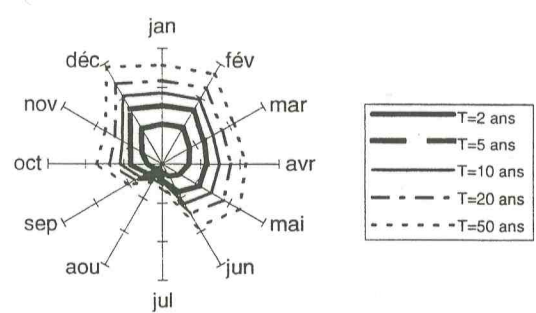
Crues de 1 jour



Crues mensuelles décennales

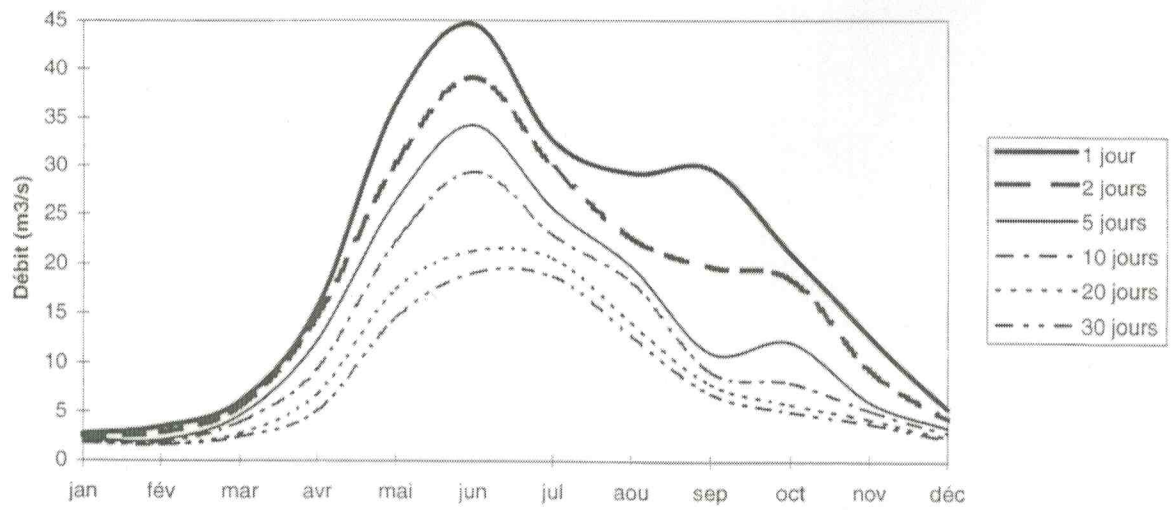


Crues de 1 jour

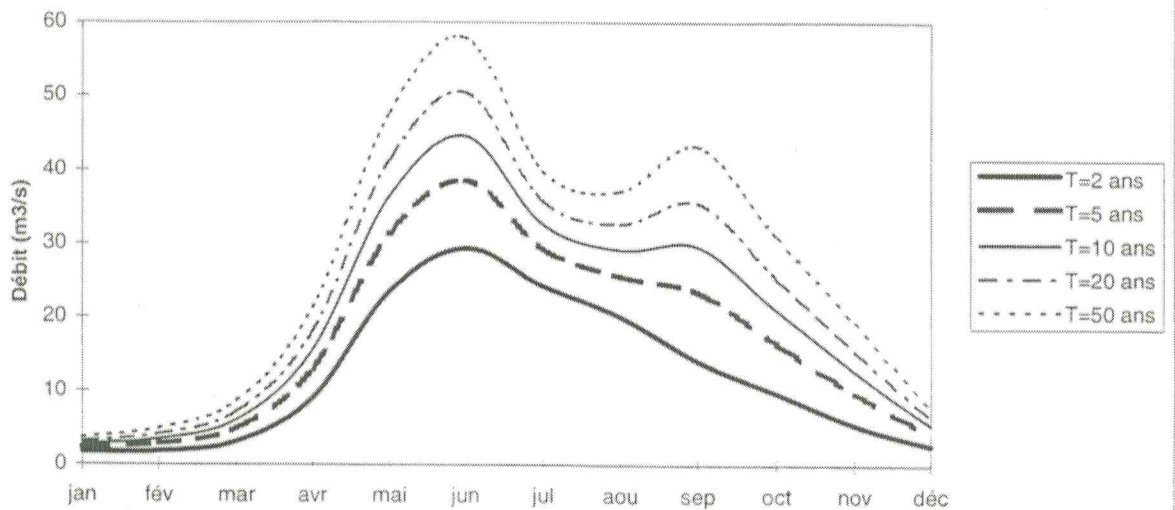


La Romanche au Chambon

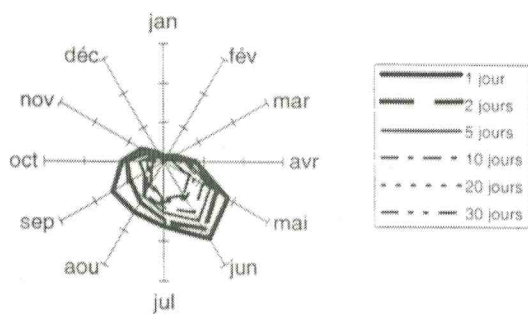
Crues décennales mensuelles



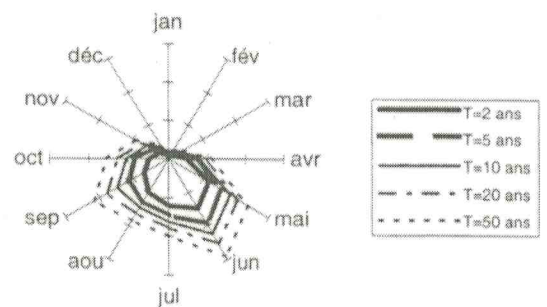
Crues de 1 jour



Crues mensuelles décennales



Crues de 1 jour



ANNEXE 3.4 :

ANALYSE DES CRUES : AJUSTEMENT D'UNE LOI

EXPOTENTIELLE SUR LES OBSERVATION

QUANTILES DE DISTRIBUTION THEORIQUE

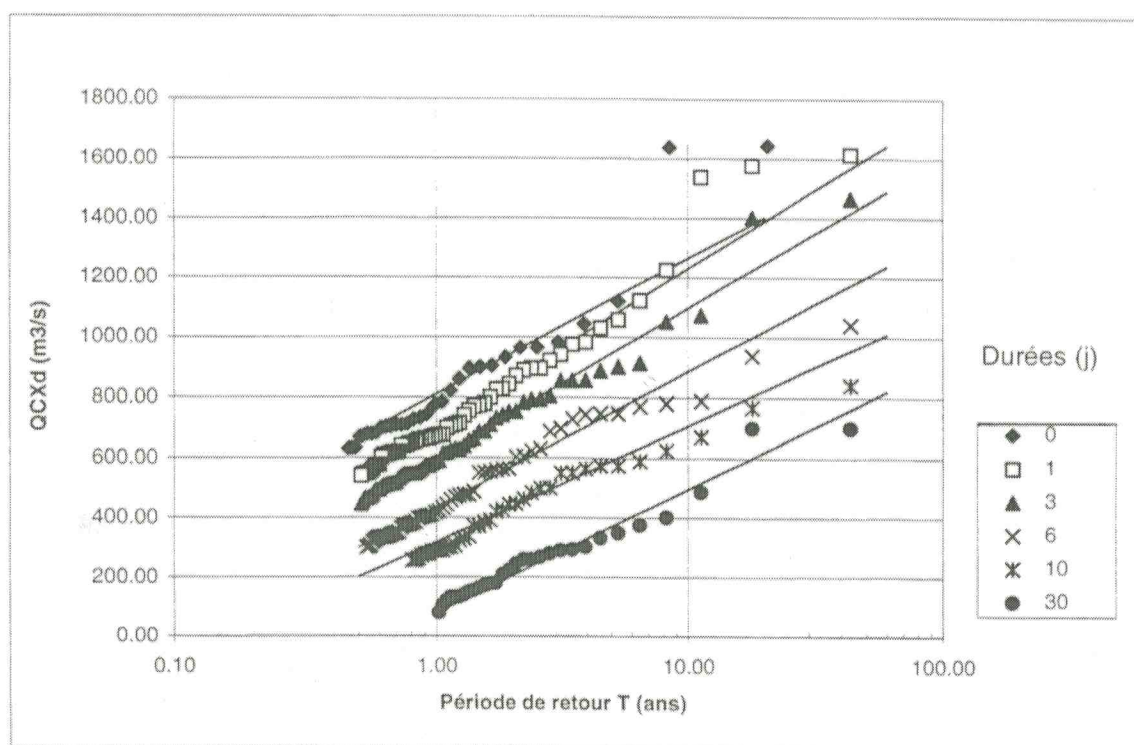
Bassin versant de la Saône à Lechatelet (11700 km²)

Paramètres des lois de distribution des QCXd (m³/s) :

d(j)	0	1	3	6	10	30
Gq(d)	197.46	230.12	218.31	195.64	168.65	180.98
P(d)	810.28057	699.50	594.72	435.67	318.87	79.50

Tableau des quantiles de QCXd (m³/s) :

	Période de retour T (an)						
d(j)	0.50	1	2	5	10	20	60
0	673.41	810.28	947.15	1128.08	1264.95	1401.82	
1	540.00	699.50	859.01	1069.86	1229.37	1388.87	1641.68
3	443.40	594.72	746.04	946.07	1097.39	1248.71	1488.55
6	300.06	435.67	571.27	750.53	886.14	1021.74	1236.67
10	201.97	318.87	435.77	590.30	707.20	824.11	1009.39
30		79.50	204.95	370.78	496.23	621.68	820.51



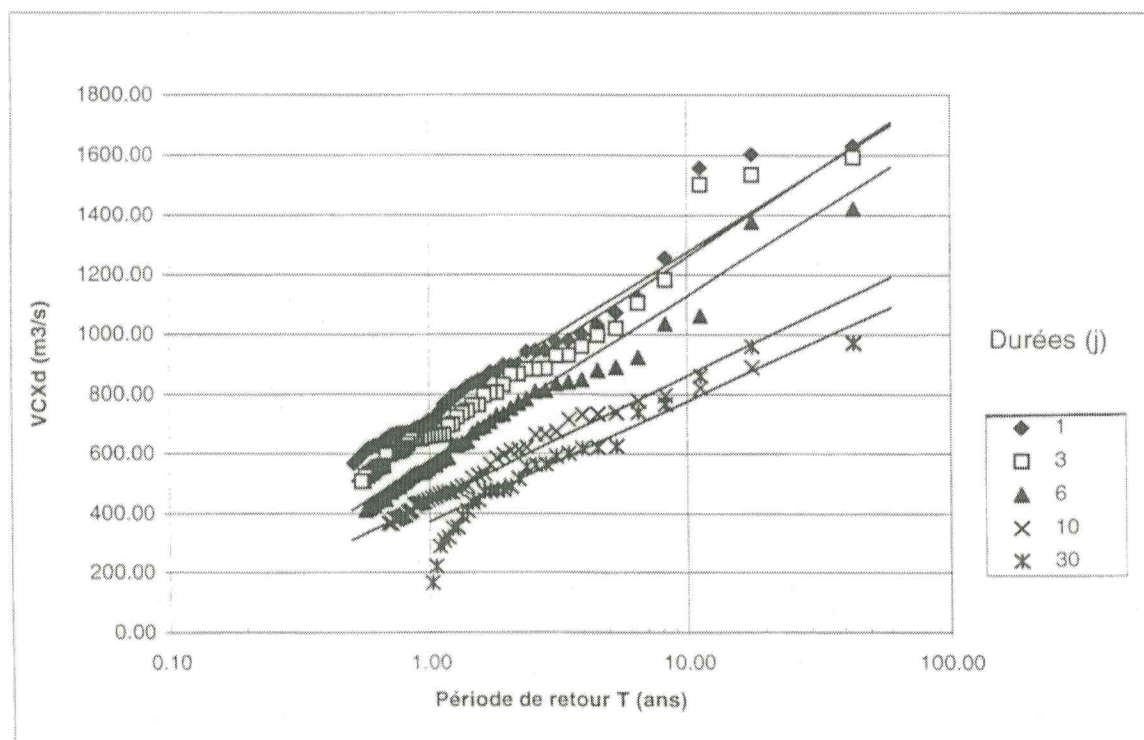
Bassin versant de la Saône à Lechatelet (11700 km²)

Paramètres des lois de distribution des VCXd (m³/s) :

d(j)	1	3	6	10	30
Gq(d)	236.14	250.69	240.15	184.45	175.36
P(d)	731.18	680.95	576.41	437.39	373.13

Tableau des quantiles de VCXd (m³/s) :

d(j)	Période de retour T (an)						
	0.50	1	2	5	10	20	60
1	567.50	731.18	894.86	1111.24	1274.92	1438.61	1698.04
3	507.19	680.95	854.71	1084.41	1258.18	1431.94	1707.35
6	409.95	576.41	742.86	962.91	1129.36	1295.82	1559.65
10	309.54	437.39	565.25	734.26	862.11	989.97	1192.61
30		373.13	494.68	655.36	776.90	898.45	1091.10



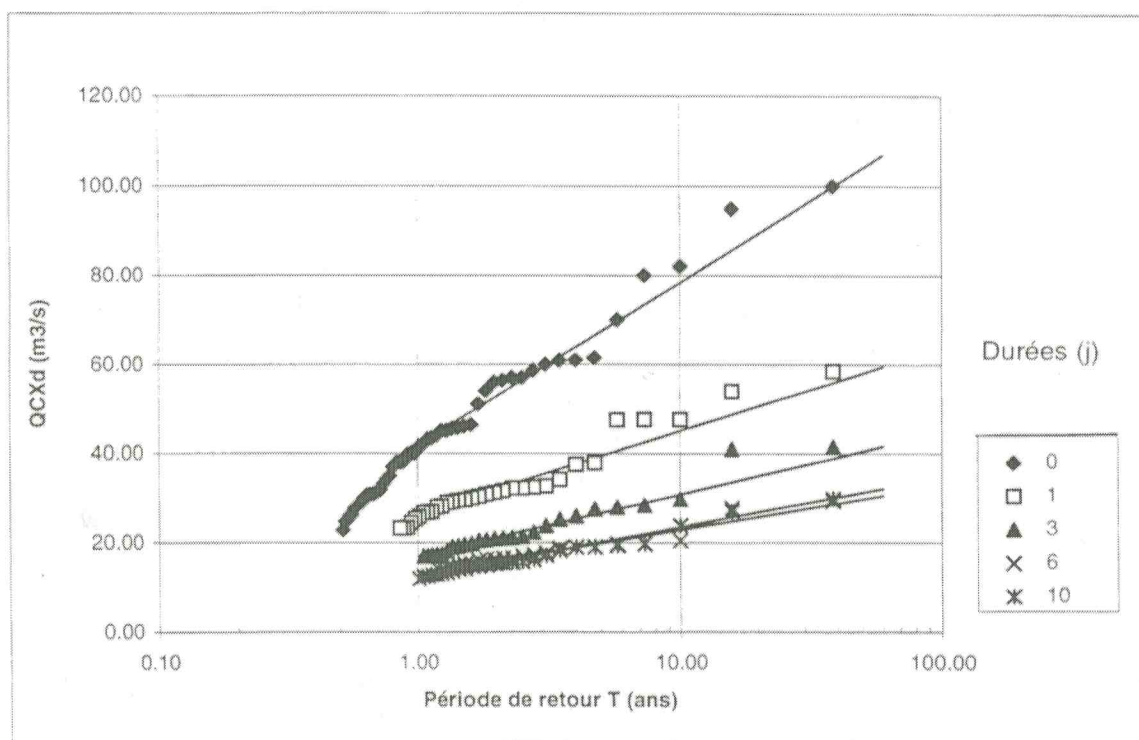
Bassin versant de la Romanche au Chambon (220 km²)

Paramètres des lois de distribution des QCXd (m³/s) :

d(j)	0	1	3	6	10	30
Gq(d)	15.95	8.06	6.02	4.84	4.31	-
P(d)	41.64	26.46	16.95	12.39	12.90	-

Tableau des quantiles de QCXd (m³/s) :

d(j)	Période de retour T (an)					
	1	2	5	10	20	60
0	41.64	52.69	67.30	78.35	89.41	106.93
1	26.46	32.05	39.44	45.03	50.62	59.48
3	16.95	21.13	26.64	30.82	35.00	41.61
6	12.39	15.74	20.17	23.52	26.87	32.19
10	12.90	15.89	19.85	22.84	25.83	30.57
30						



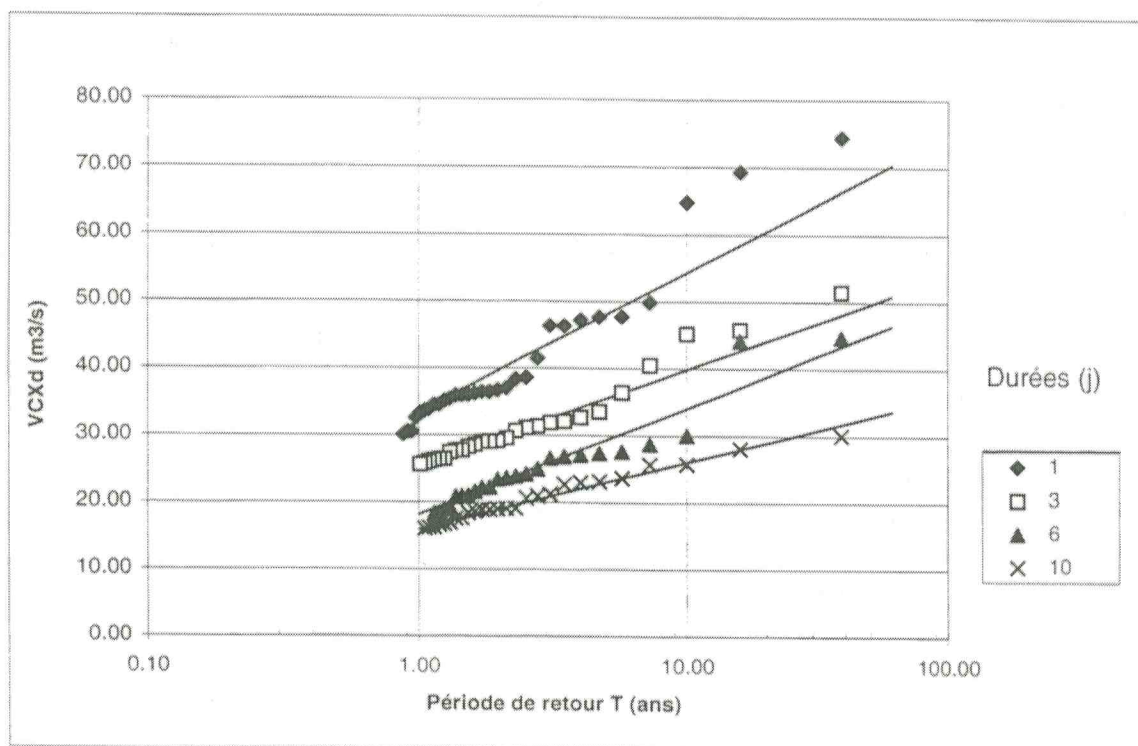
Bassin versant de la Romanche au Chambon (220 km²)

Paramètres des lois de distribution des VCXd (m³/s) :

d(j)	1	3	6	10	30
Gq(d)	9.00	6.16	6.89	4.35	-
P(d)	33.50	25.64	18.19	15.95	-

Tableau des quantiles de VCXd (m³/s) :

d(j)	Période de retour T (an)					
	1	2	5	10	20	60
1	33.50	39.74	47.98	54.22	60.46	70.34
3	25.64	29.90	35.55	39.81	44.08	50.84
6	18.19	22.97	29.28	34.06	38.84	46.41
10	15.95	18.97	22.95	25.96	28.98	33.75
30						

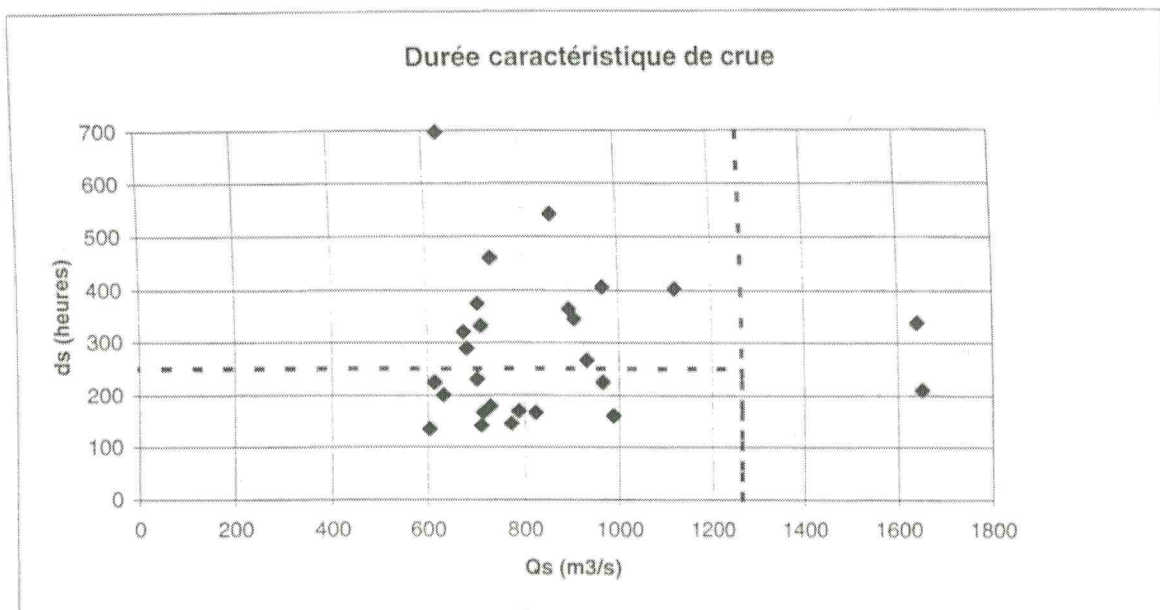


La Saône à Lechatelet

STATION NUMERO 21142001

Caractéristiques

D	QIXA10	S
(h)	(m ³ /s)	(km ²)
250.00	1264.95	11700.00



La Saône à Lechatelet

STATION NUMERO 21142001

D	QIXA10	S
(h)	(m³/s)	(km²)
250.00	1264.95	11700.00

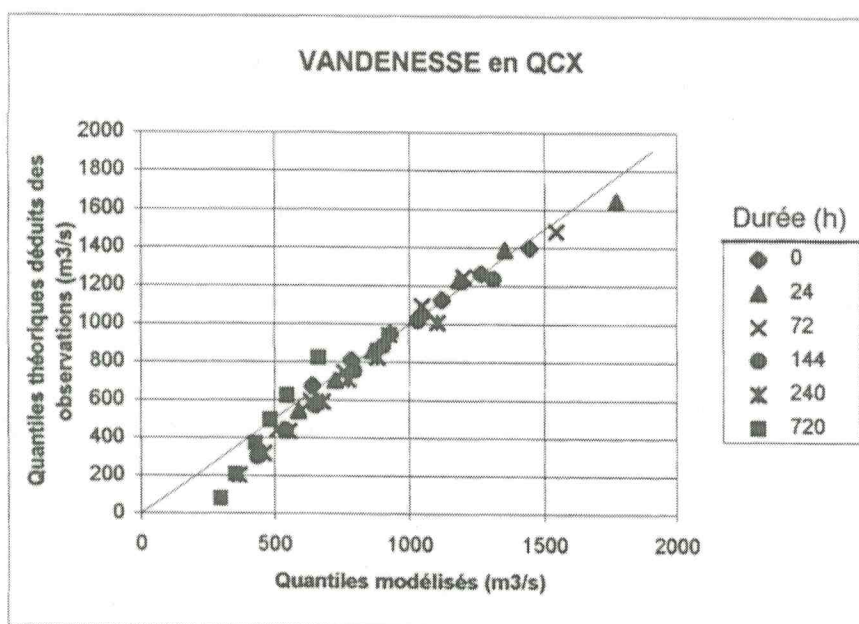
D'après le modèle de **VANDENESSE**

Tableau en QCX

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
3.97	6.48	0.01	1.91	1.91	0.097	3.674	1.774	0.013

d(h)	T1 0.5	T2 1	T3 2	T4 5	T5 10	T6 20	T7 60
0	640.901 673.412	784.976 810.281	929.052 947.149	1119.510 1128.080	1263.586 1264.948	1446.475 1401.817	1909.695 -
24	590.407 539.999	726.967 699.504	863.527 859.009	1044.049 1069.863	1180.609 1229.368	1351.381 1388.872	1767.374 1641.682
72	513.108 443.400	636.890 594.719	760.672 746.039	924.303 946.072	1048.085 1097.391	1199.123 1248.711	1545.613 1488.546
144	434.144 300.06	542.926 435.67	651.708 571.27	795.510 750.53	904.292 886.14	1033.432 1021.74	1311.840 1236.67
240	366.630 201.965	460.596 318.867	554.563 435.768	678.780 590.303	772.746 707.205	881.466 824.106	1103.508 1009.391
720	235.676 -	293.390 79.500	351.104 204.948	427.397 370.781	485.111 496.230	548.213 621.678	663.929 820.508

modèle (réf. eau)
théorique (ajusté/obs)



La Saône à Lechatelet

STATION NUMERO 21142001

D	QIXA10	S
(h)	(m³/s)	(km²)
250.00	1264.95	11700.00

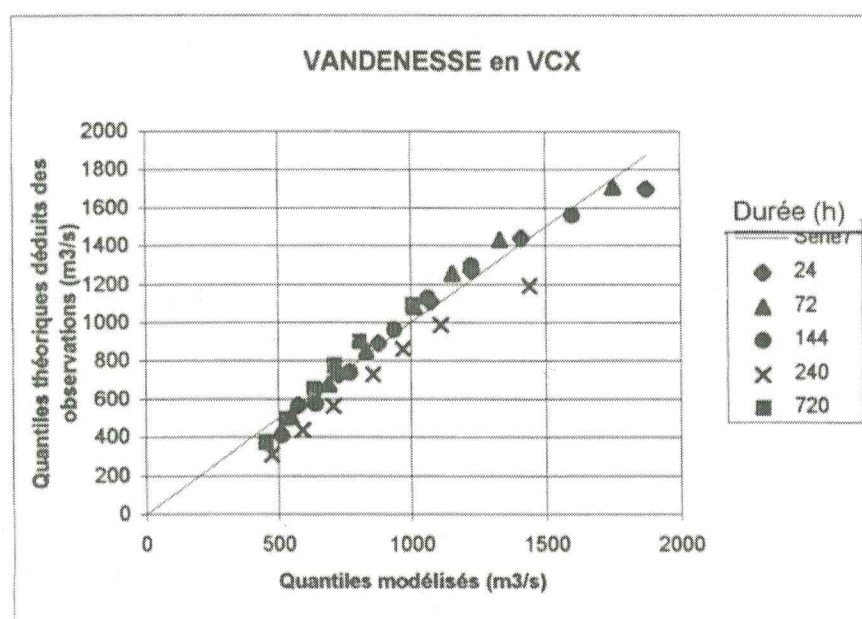
D'après le modèle de **VANDENESSE**

Tableau en VCX

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
2.635	6.19	0.016	1.045	2.385	0.172	1.083	1.75	0

d(h)	T1 0.5	T2 1	T3 2	T4 5	T5 10	T6 20	T7 60
24	576.424 567.499	726.539 731.181	876.653 894.864	1075.094 1111.240	1225.209 1274.923	1413.297 1438.605	1873.746 1698.036
72	548.313 507.185	688.519 680.948	828.726 854.711	1014.069 1084.413	1154.276 1258.176	1329.097 1431.939	1751.824 1707.346
144	513.283 409.950	641.067 576.406	768.850 742.863	937.771 962.906	1065.555 1129.362	1223.876 1295.818	1600.683 1559.645
240	476.327 309.54	590.910 437.39	705.494 565.25	856.964 734.26	971.548 862.11	1112.493 989.97	1442.100 1192.61
720	374.393 -	452.055 373.133	529.718 494.680	632.382 655.356	710.044 776.903	803.198 898.450	1008.658 1091.097

modèle de référence
théorique (ajusté/obs.)

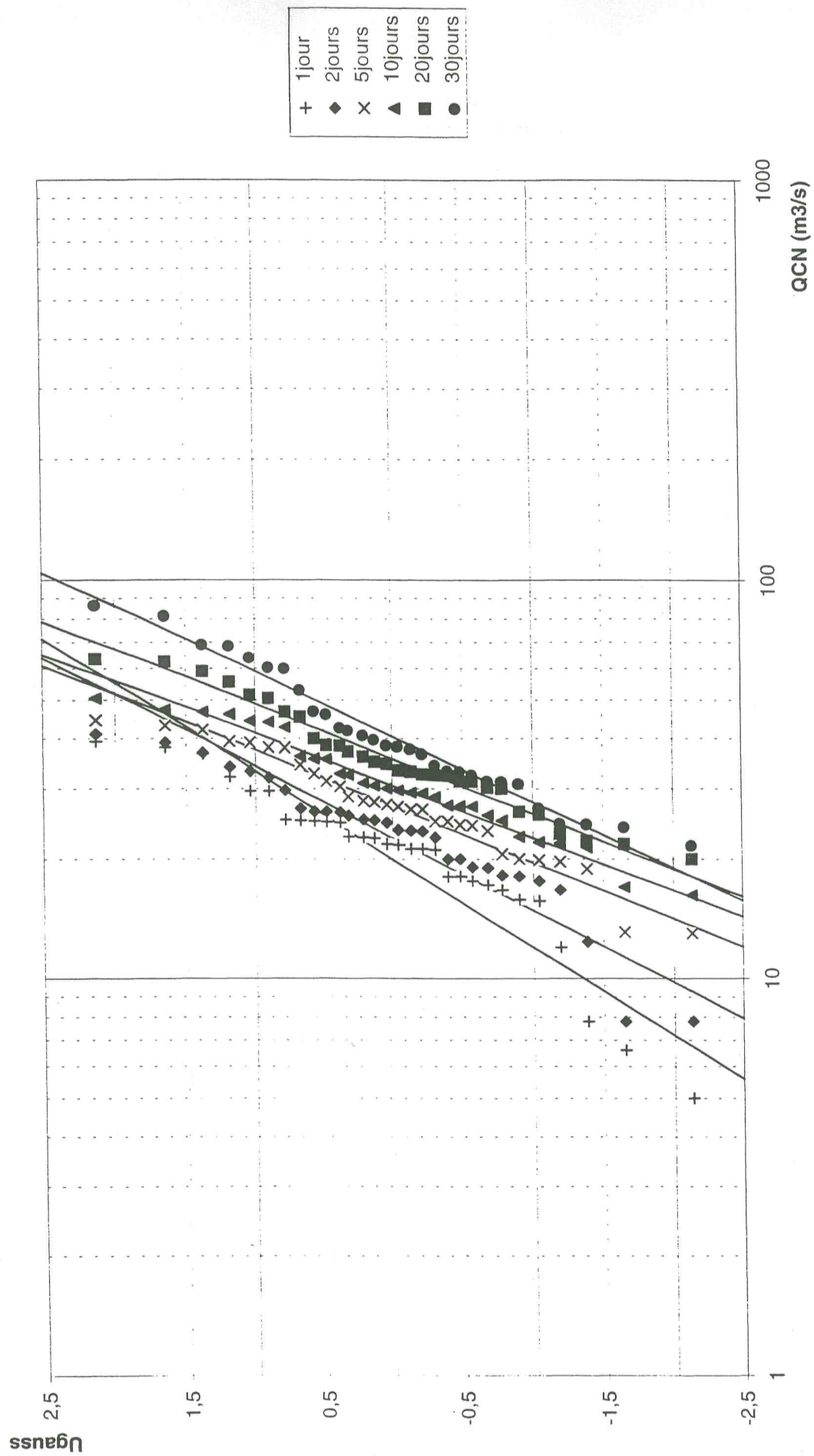


ANNEXE 3.5 :

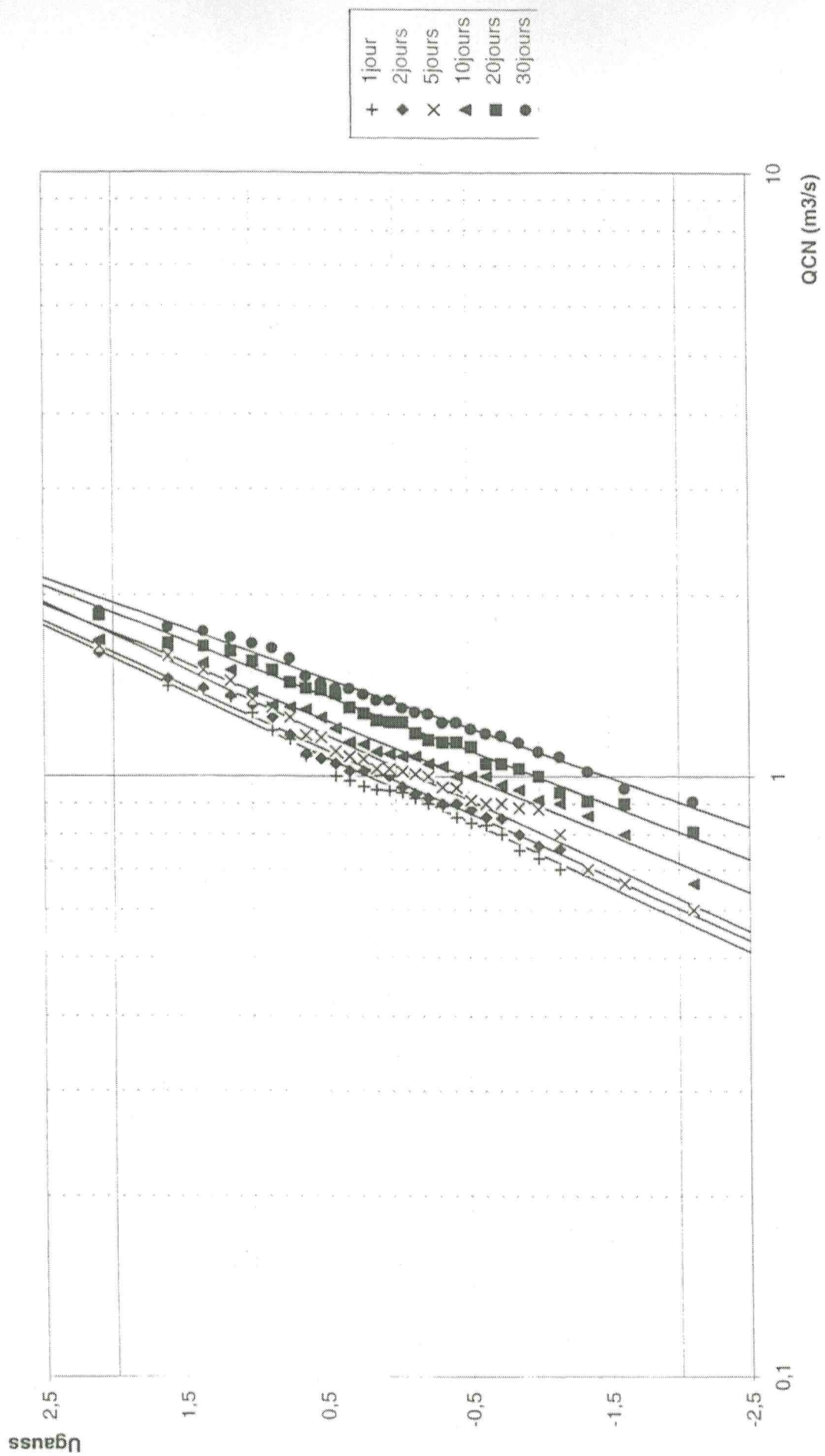
ANALYSE DES ETIAGES : COURBES QDF

ET DEBITS CARACTERISTIQUES D'ETIAGE

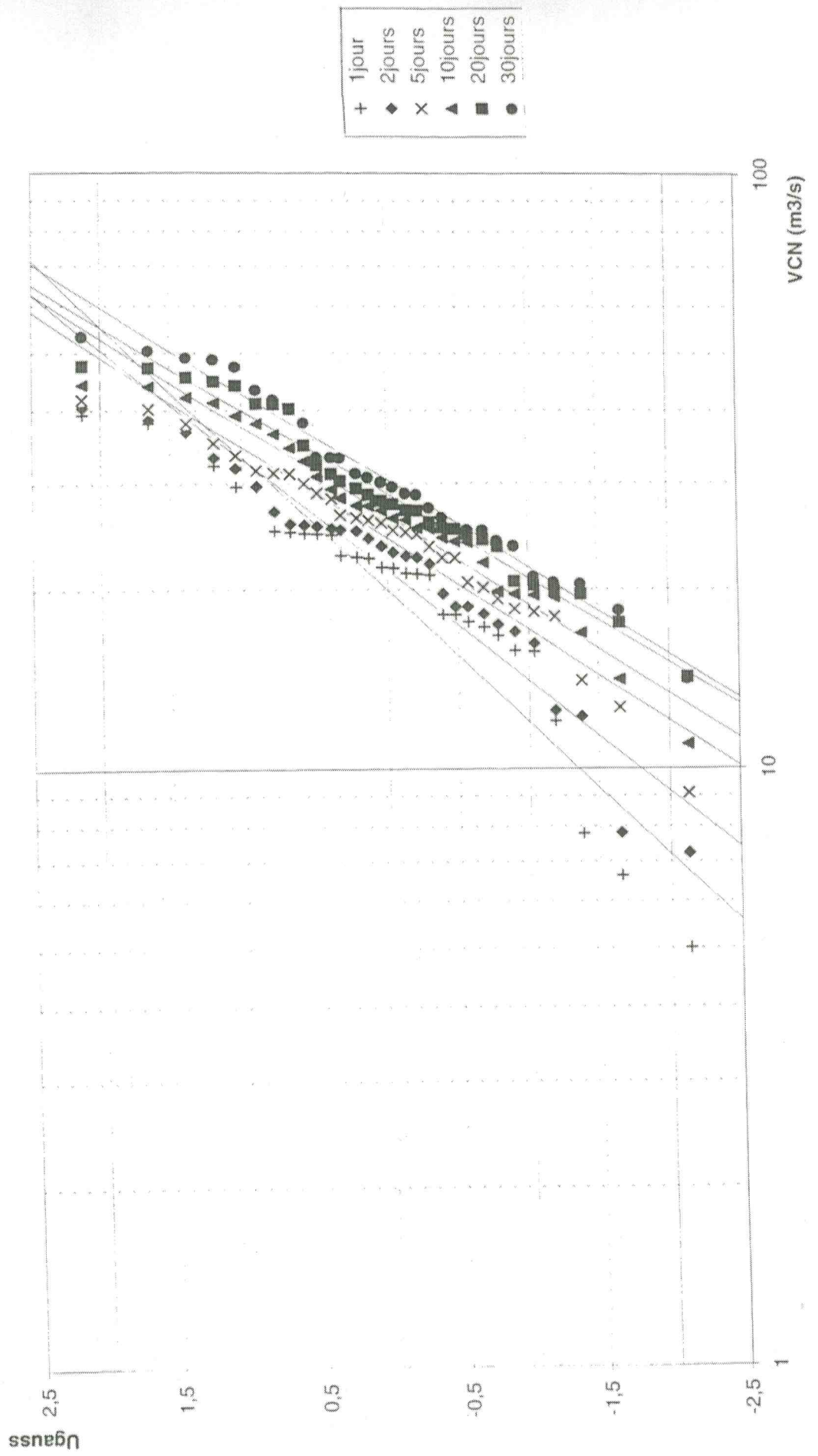
La Saône à Lechatelet



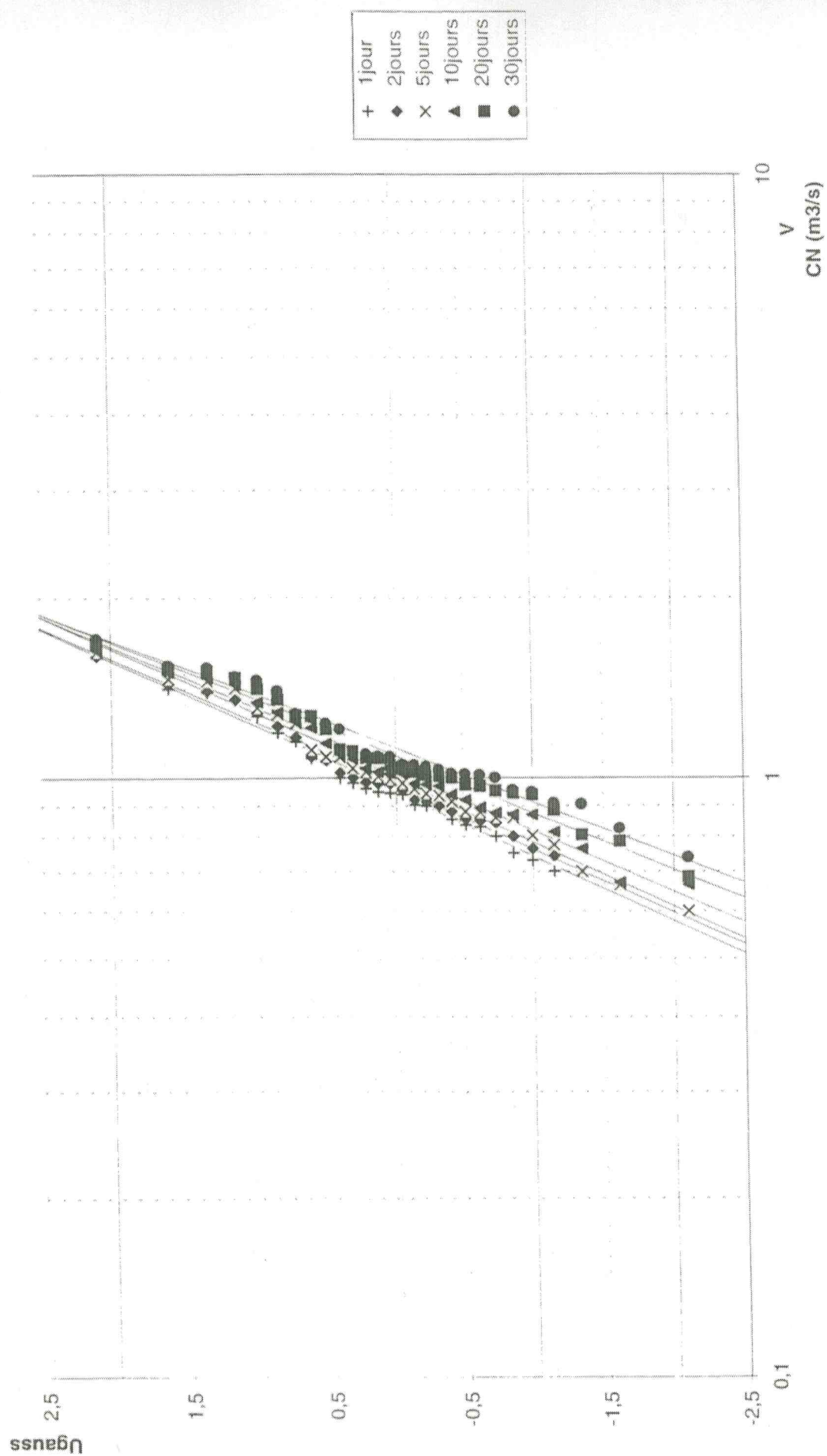
La Romanche au Chambon



La Saône à Lechatelet



La Romanche au Chambon



Données

DEBITS D'ETIAGE CARACTERISTIQUES

Etiage décennal humide (F=0.9)

Durée (jour)	Saône à Lechatelet		Ain à Chalaïn		Ardèche à Sauze St M		Romanche au Chamb		Durance à Briançon		Var à La Mescia	
	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)
1	36,7	36,7	4,12	4,12	11	11	1,31	1,31	5,37	5,37	17,3	17,2
2	37,3	36,3	4,33	4,23	11,3	11,2	1,34	1,32	6,05	6,68	17	17,1
5	40,7	37,6	4,89	4,46	12,3	11,6	1,42	1,37	6,45	6,79	17,3	16,9
10	44,7	40,9	6,04	4,96	14,1	12,2	1,47	1,39	6,47	6,9	18,2	17,3
20	53,1	43,3	10,3	6,1	17,2	13,1	1,6	1,43	7,13	7,13	20,1	18
30	65,1	46,5	15,8	7,21	22,2	14,2	1,69	1,45	7,29	7,29	22,3	18,7

Etiage décennal sec (F=0.1)

Durée (jour)	Saône à Lechatelet		Ain à Chalaïn		Ardèche à Sauze St M		Romanche au Chamb		Durance à Briançon		Var à La Mescia	
	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)
1	10,8	10,8	1,77	1,77	2,06	2,06	0,695	0,695	3,48	3,48	8,17	8,17
2	13,6	12,8	1,92	1,86	2,17	2,17	0,713	0,713	3,95	4,3	9,03	8,69
5	18,1	15,7	2,11	1,97	2,38	2,3	0,754	0,732	4,33	4,62	9,81	9,45
10	20,9	17,3	2,33	2,07	2,89	2,45	0,842	0,769	4,46	4,83	10,3	9,79
20	23,9	19,2	2,69	2,22	3,76	2,74	0,941	0,827	4,58	4,98	10,9	10,1
30	25,1	20	3,2	2,4	4,18	2,97	1,04	0,867	4,6	5,09	11,4	10,2

Données

Etiage quinquennal sec (F=0.2)

Durée (jour)	Saône à Lechatelet		Ain à Chalais		Ardèche à Sauze St M		Romanche au Chamb		Durance à Briançon		Var à La Mescla	
	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)
1	13,3	13,3	2,05	2,05	2,75	2,75	0,774	0,773	3,75	3,75	9,29	9,28
2	16,2	15,3	2,21	2,15	2,88	2,93	0,801	0,793	4,25	4,64	10,1	9,76
5	20,8	18,3	2,44	2,27	3,04	3,15	0,841	0,816	4,63	4,94	10,8	10,4
10	23,8	20	2,74	2,41	3,23	3,79	0,927	0,851	4,76	5,14	11,3	10,8
20	27,4	22,1	3,38	2,64	3,59	4,89	1,03	0,909	4,88	5,3	12,1	11,1
30	29,6	23,1	4,21	2,89	3,88	5,57	1,13	0,947	4,9	5,42	12,8	11,3

Etiage médian (F=0.5)

Durée (jour)	Saône à Lechatelet		Ain à Chalais		Ardèche à Sauze St M		Romanche au Chamb		Durance à Briançon		Var à La Mescla	
	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)
1	19,9	19,9	2,7	2,7	4,77	4,77	0,952	0,952	4,32	4,32	11,9	11,9
2	22,5	21,5	2,89	2,81	4,94	5,01	1,2	0,971	4,89	5,36	12,4	12,2
5	27,1	24,3	3,21	2,96	5,17	5,41	1,04	1	5,28	5,6	13	12,6
10	30,5	26,6	3,75	3,21	5,48	6,38	1,11	1,04	5,37	5,78	13,7	13
20	35,6	28,9	5,26	3,68	6	8,05	1,23	1,09	5,5	5,96	14,8	13,5
30	40,4	30,5	7,12	4,15	6,5	9,63	1,33	1,12	5,54	6,1	16	13,8

Etiage quinquennal humide (F=0.8)

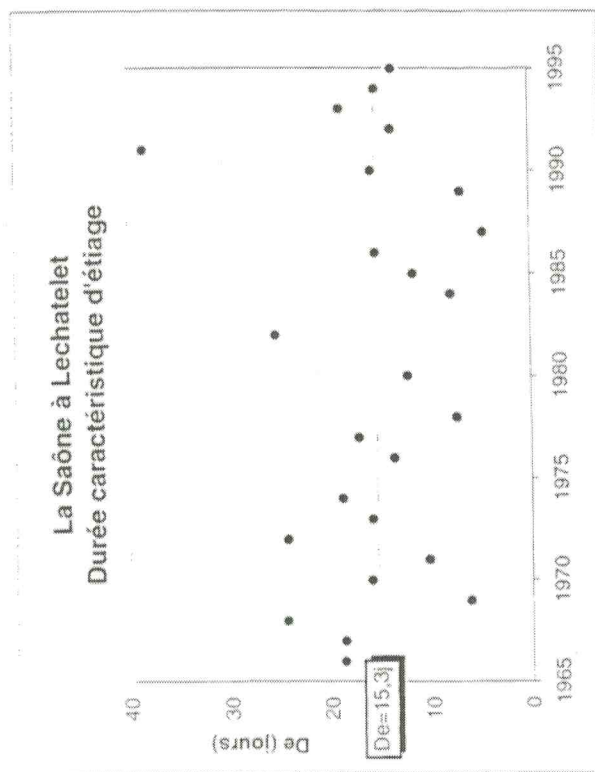
Durée (jour)	Saône à Lechatelet		Ain à Chalais		Ardèche à Sauze St M		Romanche au Chamb		Durance à Briançon		Var à La Mescla	
	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)	QCN (m3/s)	VCN (m3/s)
1	29,7	29,7	3,57	3,57	8,27	8,27	1,17	1,17	4,98	4,98	15,2	15,2
2	31,3	30,3	3,77	3,67	8,48	8,56	1,2	1,19	5,62	6,19	15,3	15,2
5	35,4	32,4	4,23	3,87	8,8	9,28	1,28	1,23	6,02	6,35	15,7	15,3
10	39,2	35,2	5,13	4,27	9,29	10,73	1,33	1,26	6,07	6,49	16,5	15,7
20	46,3	37,7	8,18	5,12	10,03	13,25	1,46	1,3	6,2	6,7	18,1	16,3
30	55,3	40,2	12	5,96	10,86	16,62	1,55	1,33	6,26	6,86	19,9	16,8

ANNEXE 3.6 :
ANALYSE DES ETIAGES : COURBES DE TARISSEMENT

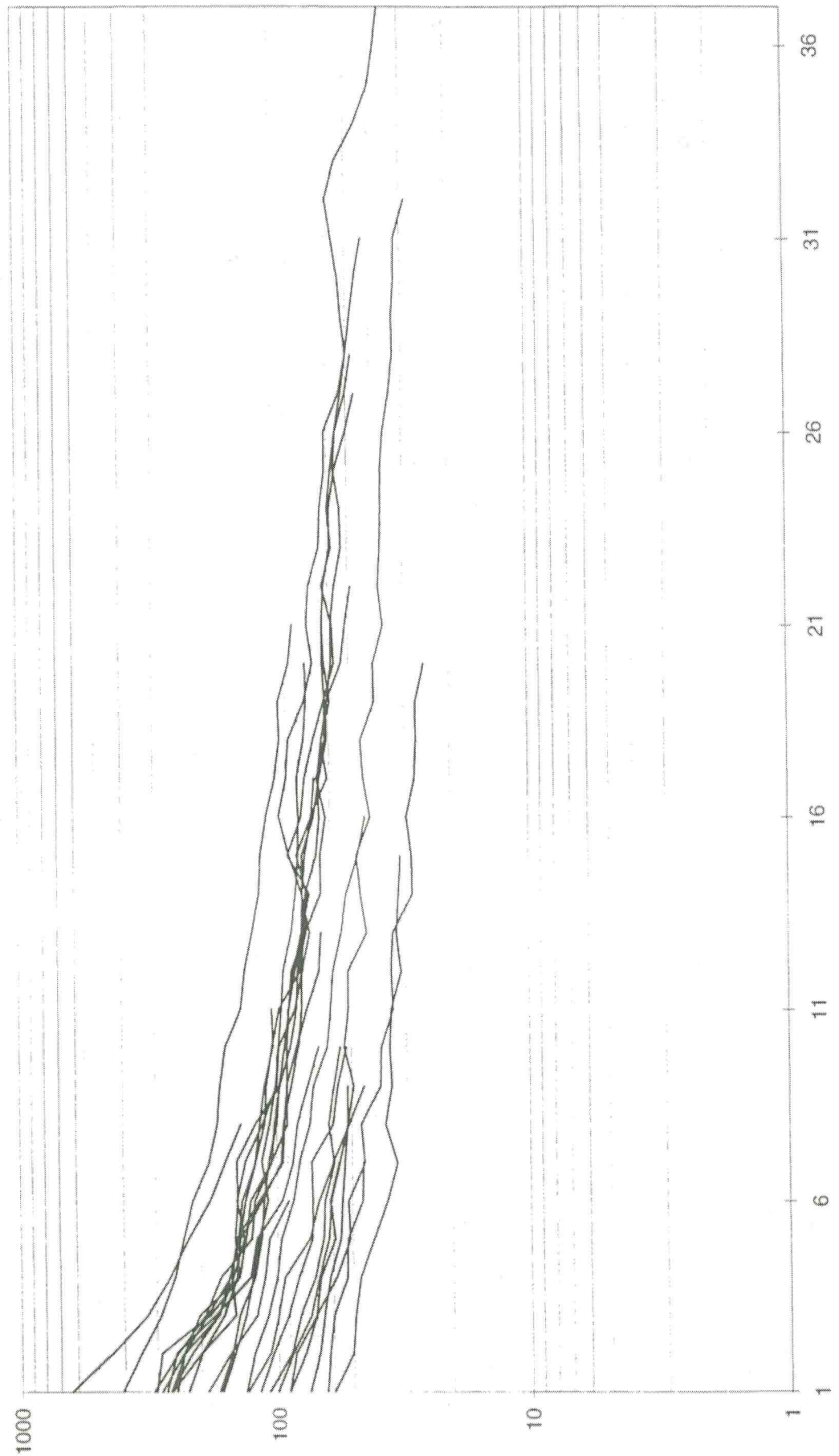
Analyse des courbes de tarissement

La Saône à Lechatelet

année	alpha	1/alpha	Durée		Coefficient	
			Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
1966	0,05349	18,6950832	15,651771	7,30843217	0,07982992	0,04322975
1967	0,05366	18,6358554				
1968	0,04096	24,4140625				
1969	0,15980219	6,25773634				
1970	0,06279937	15,9237254				
1971	0,0970296	10,3061339				
1972	0,04115995	24,2954602				
1973	0,06310227	15,8472913				
1974	0,05311015	18,8287933				
1976	0,07320387	13,6604793				
1977	0,05827447	17,1601736				
1978	0,13272105	7,53459998				
1980	0,08150132	12,2697402				
1982	0,03938985	25,3872477				
1984	0,1249363	8,0040789				
1985	0,08581896	11,652437				
1986	0,0651822	15,3416114				
1987	0,21045545	4,75159949				
1989	0,14352689	6,96733565				
1990	0,06376106	15,6835545				
1991	0,02600668	38,4516633				
1992	0,07302705	13,6935557				
1993	0,05325281	18,7783516				
1994	0,06576421	15,2058388				
1995	0,07381236	13,5478657				



La Saône à Lechatelet 1966-95 Tarissement



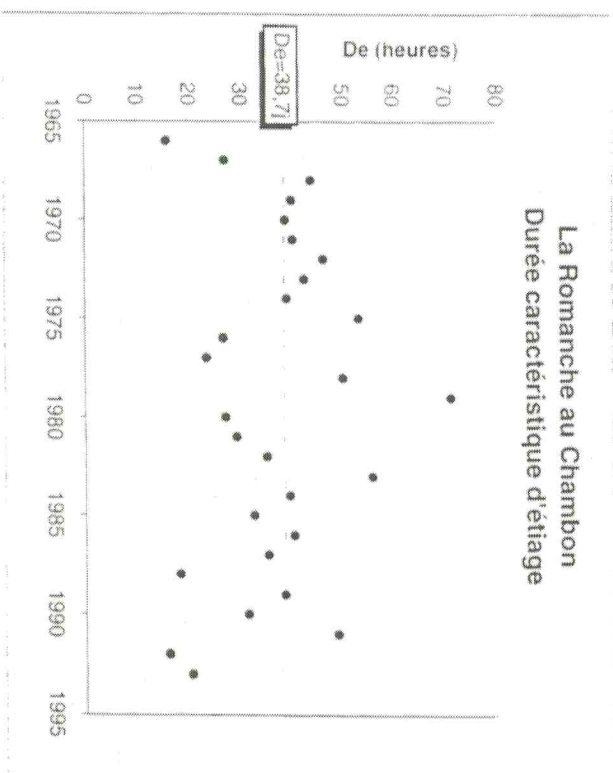
Analyse des courbes de tarissement

La Romanche au Chambron

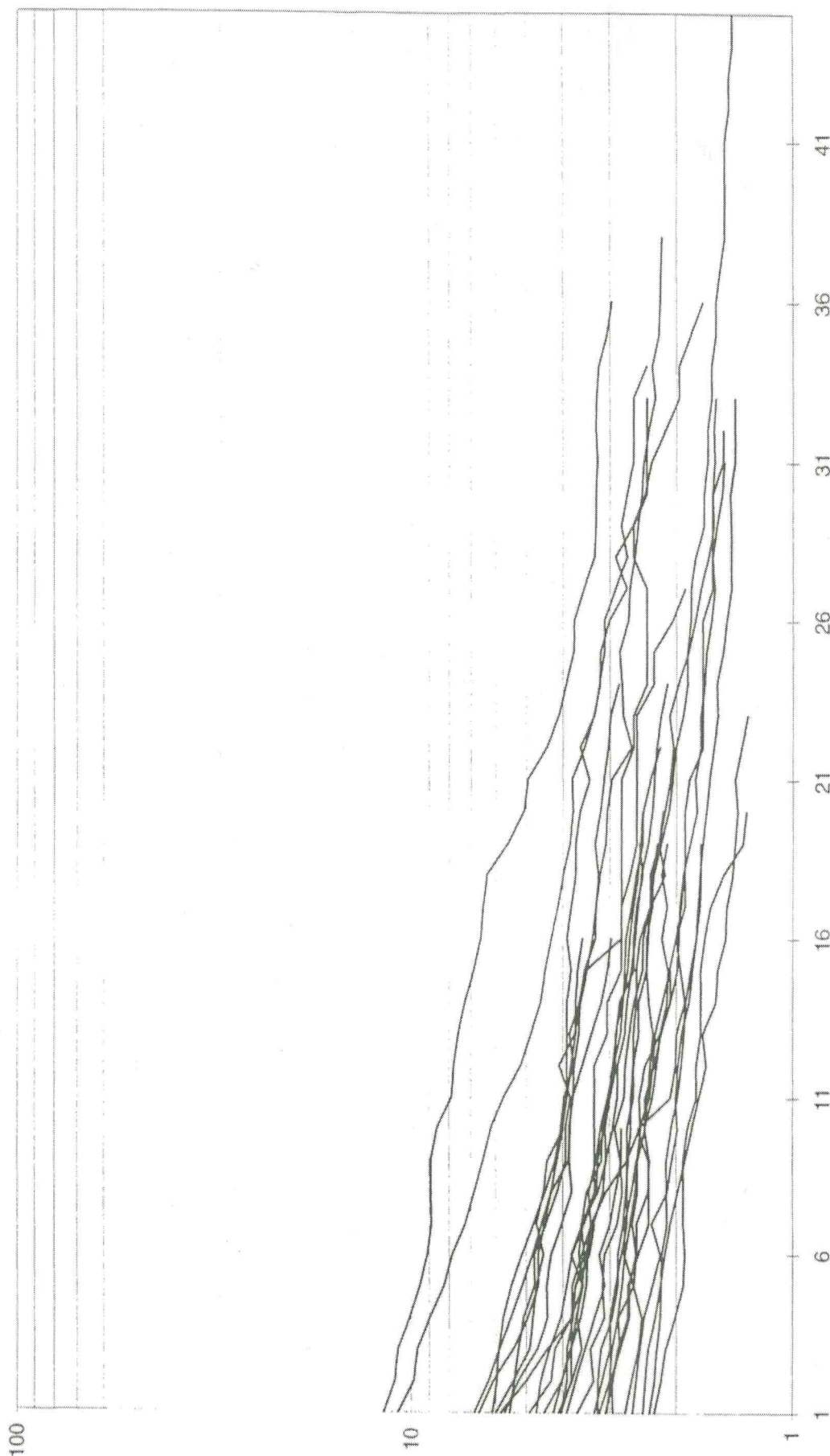
Durée

Coefficient

année	alpha	1/alpha	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
1966	0,06365604	15,7094286	36,6579913	12,8450487	0,03124541	0,0129657
1967	0,03713728	26,9271208	Médiane		Médiane	
1968	0,02275135	43,9534336	38,6794838		0,02585367	
1969	0,02496619	40,054165				
1970	0,02578738	38,7786578				
1971	0,0247809	40,3536611				
1972	0,02157765	46,344249				
1973	0,0234758	42,5970528				
1974	0,02562032	39,0315229				
1975	0,01880639	53,173422				
1976	0,03754539	26,6344284				
1977	0,04277329	23,3790773				
1978	0,01996542	50,0866013				
1979	0,01404407	71,2044086				
1980	0,03698681	27,0366663				
1981	0,03436904	29,0959541				
1982	0,02850232	35,0848691				
1983	0,01791954	55,8050134				
1984	0,02523514	39,6272815				
1985	0,03076478	32,5046974				
1986	0,0247389	40,4221686				
1987	0,02832568	35,303648				
1988	0,05525093	18,0992423				
1989	0,02591996	38,5803098				
1990	0,03190044	31,3475349				
1991	0,0204371	48,9306109				
1992	0,06253659	15,9906378				
1993	0,04909688	20,3678945				
1994						
1995						



La Romanche au Chambon 1966-93 Tarissement



ANNEXE 4 :

FICHES-RESUME DES DESCRIPTEURS DES BASSINS

VERSANTS

COURS D'EAU : SAONE

STATION : LE CHATELET

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 11700

Altitude (m) :

min.: 175

max.: 1215

Médiane : 275

relief : peu marqué

Forme du bassin : allongée

Réseau hydrographique : ramifié

Géologie : alluvions, karst

Végétation : feuillus et agriculture

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : Pluvial-océanique

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 158.9

coefficient de variation : 0.32

amplitudes de variation

min. : 61.42 max. : 265.2

Saison à plus fort risque de crue : hiver

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe : 1265

volume sur 24h : 1275

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale (h) : 338

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) : 1265

D (h) : 250

Modèle QdF : Vandenesse

Etiages

Débit quinquennal sec (1jour) : 13.3

Débit décennal sec (1 jour) : 10.8

Coefficient de tarissement moyen (1/jours) : 0.08

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 19.9

De (j) : 15.3

Modèle QdF : St Floret

Descripteurs de la nappe phréatique : nappe alluviale, karst

Descripteurs du degré d'artificialisation : nombreux aménagements

Autres descripteurs

COURS D'EAU : AIN

STATION : CHALAIN

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 560

Altitude (m) :

min.: 450

max.: 1377

médiane : 800

relief : peu marqué

Forme du bassin : rectangulaire

Réseau hydrographique : peu développé

Géologie : karst

Végétation : feuillus, agriculture

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : Pluvio-nival

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 28.0

coefficient de variation : 0.23

amplitudes de variation

min. : 16.13 max. : 43.38

Saison à plus fort risque de crue : de novembre à mars

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe : **

volume sur 24h : 321

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale :

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) :

D (h) :

Modèle QdF :

Etiages

Débit quinquennal sec (1jour) : 2.05

Débit décennal sec (1 jour) : 1.77

Coefficient de tarissement moyen : 0.097

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 2.7

De (j) : 12

Modèle QdF : Ménétréol

Descripteurs de la nappe phréatique : karst

Descripteurs du degré d'artificialisation : aménagements

Autres descripteurs

COURS D'EAU : ARDECHE

STATION : SAUZE ST MARTIN

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 2230

Altitude (m) :

min.: 50

max.: 1677

médiane : 500

relief : marqué

Forme du bassin : **compact**

Réseau hydrographique : **étendu, ramifié**

Géologie : **socle cristallin**

Végétation : **chêne vert à l'aval, feuillus à l'amont**

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : **Pluvio-nival**

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 63.4

coefficient de variation : 0.36

amplitudes de variation

min. : 23.58

max. : 124.9

Saison à plus fort risque de crue : **octobre-novembre**

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe :

volume sur 24h :

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale : 12.8

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) :

D (h) : 10

Modèle QdF : Soyans

Etiages

Débit quinquennal sec (1jour) : 2.75

Débit décennal sec (1 jour) : 2.06

Coefficient de tarissement moyen : 0.077

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 4.8

De (j) : 17.8

Modèle QdF : Vaubarlet

Descripteurs de la nappe phréatique : **nappes perchées**

Descripteurs du degré d'artificialisation : **aménagements**

Autres descripteurs

COURS D'EAU : ROMANCHE

STATION : CHAMBON

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 220

Altitude (m) :

min.: 1075

max.: 3859

médiane : 2375

relief : marqué

Forme du bassin :

Réseau hydrographique : **linéaire**

Géologie : **socle cristallin**

Végétation : **étagée alpine**

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : Nival

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 7.4

coefficient de variation : 0.16

amplitudes de variation

min. : 5.15

max. : 9.66

Saison à plus fort risque de crue : **mai-juin**

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe : 78

volume sur 24h : 54

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale :

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) :

D (h) :

Modèle QdF :

Etiages

Débit quinquennal sec (1jour) : 0.774

Débit décennal sec (1 jour) : 0.695

Coefficient de tarissement moyen : 0.031

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 0.95

De (j) : 38.7

Modèle QdF : Ménétréol

Descripteurs de la nappe phréatique : nappes perchées

Descripteurs du degré d'artificialisation : pas d'aménagement

Autres descripteurs

COURS D'EAU : DURANCE

STATION : BRIANCON

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 548

Altitude (m) :

min.: 1175

max.: 3520

médiane : 2225

relief : marqué

Forme du bassin : allongée

Réseau hydrographique : linéaire

Géologie : socle cristallin

Végétation : étagée alpine

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : Nival/Nivo-pluvial

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 14.6

coefficient de variation : 0.21

amplitudes de variation

min. : 9.40

max. : 23.27

Saison à plus fort risque de crue : mai-juin

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe :

volume sur 24h :

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale :

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) :

D (h) :

Modèle QdF :

Etiages :

Débit quinquennal sec (1jour) : 3.75

Débit décennal sec (1 jour) : 3.48

Coefficient de tarissement moyen : 0.041

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 4.3

De (j) : 28.8

Modèle QdF : Ménétréol

Descripteurs de la nappe phréatique : réseaux aquifères compartimentés

Descripteurs du degré d'artificialisation : aménagements

Autres descripteurs

COURS D'EAU : VAR

STATION : LA MESCLA

Descripteurs du bassin versant

Surface (km²) : 1830

Altitude (m) :

min.: 175

max.: 2957

médiane : 1425

relief : marqué

Forme du bassin : compact

Réseau hydrographique : développé, ramifié

Géologie : granit

Végétation : alpine à l'amont, méditerranéenne à l'aval

Descripteurs du régime hydrologique

Régime de Pardé : Nivo-pluvial

Débit annuel (m³/s):

moyenne : 36.6

coefficient de variation : 0.29

amplitudes de variation

min. : 18.22 max. : 70.25

Saison à plus fort risque de crue : octobre

Descripteurs des événements rares

Crues

Débit décennal (m³/s) :

pointe : **

volume sur 24h : 380

Médiane de la durée caractéristiques des crues supérieures à la crue quinquennale :

Modélisation QdF :

QIXA10 (m³/s) :

D (h) :

Modèle QdF :

Etiages

Débit quinquennal sec (1 jour) : 9.29

Débit décennal sec (1 jour) : 8.17

Coefficient de tarissement moyen : 0.020

Modélisation QdF :

VCN(2,1) (m³/s) : 11.9

De (j) : 53.2

Modèle QdF : Ménétréol

Descripteurs de la nappe phréatique : karst, nappes profondes captives, paléokarsts

Descripteurs du degré d'artificialisation : nombreux aménagements

Autres descripteurs

ANNEXE 5 :

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arnell N.W., Krasovskaia I. and Gottschalk L. (1993a) :** River flow regimes in Europe. In Friend, vol. 1, Hydrological studies, pp112-121.
- Arnell N.W., Oancea V. and Oberlin G. (1993b) :** European river flow regimes. A contribution to «Europe's Environment 1993». CEMAGREF Lyon, I.H. Wallingford, Report to the European Environment Agency Task Force under PHARE Technical Assistance Contract ZZ911105/01/B022 (Wallingford éd.).
- Balocki J.B. and Burges S.J. (1994) :** Relationships between n-day flood volumes for infrequent large floods. J. of Water Ressources Planning and Manag., vol. 120, n°6, pp794-818.
- CEMAGREF (1996) :** Modélisation synthétique des crues et des régimes hydrologiques (sous-action 2-1 : Méthodologie). 2.-Connaissance des phénomènes et cartographie. Programme fédérateur risques, Cémagref groupement de Lyon, division hydrologie-hydraulique, Ministère de l'Environnement. 157p.
- Dingman S.L. (1978) :** Synthesis of flow-duration curves for unregulated streams in New-Hampshire. Water Ressources Bulletin, vol. 14, n°6, pp1481-1502.
- Duband D. (1975) :** Hydrologie statistique approfondie. Polycopié de cours 3^{ème} année de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, INPG.
- Guillot P., Duband D. (1967) :** La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies – IASH Publication n° 84, 1967.
- Gottschalk L., Jensen J.L., Lundquist D., Solantie R. and Tollan A. (1979) :** Hydrological regions in Nordic countries. Nordic Hydrology, vol. 10, pp273-276.
- Haines A.T., Finlayson B.L. and McMahon T.A. (1988) :** A global classification of river regimes. Applied Geography, vol. 8, pp255-272.
- Krasovskaia I. (1995) :** Quantification of the stability of river flow regimes. Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 40, n°5, pp587-598.
- Krasovskaia I., Gottschalk L., Arnell N.W. and van der Wateren-de Hoog B. (1993) :** Variations in regime class over time. In Friend, vol. 1, Hydrological studies, pp131-138.
- Krasovskaia I. and Gottschalk L. (1997) :** Stability of river flow regimes. In Friend, Third report : 1994-1997, CEMAGREF Editions , pp79-86.
- Michel C. (1982) :** Extrapolation par la méthode du Gradex. Note interne du 03-05, CEMAGREF Anthony.
- Miquel J. and Phien Bou Pha B. (1978) :** Tempétiage : un modèle d'estimation des risques d'étiage. XV Journées de l'Hydraulique, SHF, Toulouse, 5-7 Septembre 1978.
- Oberlin G. (1992) :** Normalisation des variables dans les modèles hydrologiques descriptifs. Informations techniques du CEMAGREF, Mars 1992, n°85, note 4.

- Oberlin G. (1997)** : Régime hydrologique : fondements renouvelés du concept, modélisations et propriétés émergentes. Appel d'offres PNRH 1997, 10p.
- Oberlin G. and Oancea V. (1993)** : A first glance on Hydrological regimes, alpine and mediterranean area. UNESCO IHP, FRIEND Project, AMHY Group, Topic III (Hydrological regimes). Report January 1993 (CEMAGREF éd.).
- Pardé M. (1955)** : Fleuves et rivières. Colin éd. - Paris.
- Pretorian R., Gendreau N. and Mic R. (1997)** : Application de la méthode QdF sur le bassin versant roumain du Riul Negru. 4^{ème} Rencontre Hydrologique Franco-Roumaine, Suceava (Roumanie), 2-4 Septembre 1997.
- Prudhomme C. (1995)** : Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie - Application à la régionalisation des crues en Europe alpine et méditerranéenne. Thèse Université de Montpellier II, CEMAGREF Lyon, 397p.
- Sherwood J.M. (1994)** : Estimation of volume-duration-frequency relations of ungauged small urban streams. Water Ressources Bulletin, vol. 30, n°2, pp261-269.