



HAL
open science

Problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques sur les populations de poissons : caractérisation des régimes d'éclusées et du niveau de perturbation hydrologique

Dominique Courret

► To cite this version:

Dominique Courret. Problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques sur les populations de poissons : caractérisation des régimes d'éclusées et du niveau de perturbation hydrologique. Autre [q-bio.OT]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014. Français. NNT : 2014INPT0127 . tel-04260151

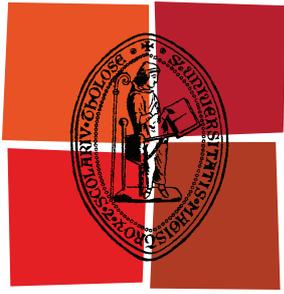
HAL Id: tel-04260151

<https://theses.hal.science/tel-04260151v1>

Submitted on 26 Oct 2023

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

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



Université
de Toulouse

THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Hydrologie, Hydrochimie, Sols, Environnement

Présentée et soutenue par :

M. DOMINIQUE COURRET

le : vendredi 19 décembre 2014

Titre :

PROBLEMATIQUE DES IMPACTS DE LA GESTION PAR ECLUSEES DES
AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES SUR LES POPULATIONS DE POISSONS.
CARACTERISATION DES REGIMES D'ECLUSEES ET DU NIVEAU DE
PERTURBATION HYDROLOGIQUE

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (I.M.F.T.)

Directeur(s) de Thèse :

M. DENIS DARTUS

Rapporteurs :

M. ARMIN PETER, EAWAG

M. ERIC SAUQUET, IRSTEA

Membre(s) du jury :

M. PASCAL LAFFAILLE, INP TOULOUSE, Président

M. DENIS DARTUS, INP TOULOUSE, Membre

M. HERVE CAPRA, IRSTEA, Membre

Mme VERONIQUE GOURAUD, EDF CHATOU, Membre

M. PHILIPPE BARAN, ECOGEA, Membre Invité

M. MICHEL LARINIER, EXPERT INDEPENDANT, Membre Invité

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Pascal Laffaille pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse, ainsi que Armin Peter et Eric Sauquet pour avoir accepté d'en être rapporteurs. Merci également à Véronique Gouraud et Hervé Capra d'avoir participé au jury. L'ensemble de vos commentaires et discussions ont été enrichissants et je tacherai d'en tirer profit dans la poursuite des travaux sur la problématique des éclusées hydroélectriques.

Merci à Denis Dartus d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse et d'avoir eu la compréhension et la patience d'attendre près de 6 années avant que j'en arrive au bout.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Michel Larinier auprès de qui j'ai beaucoup appris. Merci de m'avoir mis un pied, puis deux, à l'étrier de ce domaine passionnant qu'est l'écohydraulique, depuis 2004 et mon premier stage au GHAAPPE. Au cours de ces années, j'espère m'être imprégné, au moins un peu, de ton pragmatisme, de ta pertinence et de ta rigueur dans l'analyse et la rédaction. Le positionnement de l'équipe à l'interface entre la recherche et la gestion donne aux travaux menés un intérêt particulier. J'ai tâché de mener cette thèse dans cet esprit, même si la finalité de produire quelque chose d'abouti qui puisse être mis en œuvre n'est pas toujours évident à concilier avec les aspects scientifiques. J'espère que collectivement, on poursuivra dans cette voie.

Merci à Philippe Baran pour les années partagées au sein du Pôle Ecohydraulique, ta confiance dans ma conduite des projets et les discussions et conseils avisés qui permettent d'y voir plus clair dans le « chni ».

Je tiens également à remercier tous les collaborateurs avec qui j'ai pu avoir des discussions sur la problématique des éclusées hydroélectriques - en particulier Matthieu Chanseau, ainsi que Jean-Marc Lascaux et l'équipe d'ECOGEA - avec qui les échanges ont été enrichissants et continueront sans aucun doute à l'être.

Je remercie l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) d'avoir accepté et de m'avoir encouragé à me lancer dans ce projet de thèse. C'était un engagement de ma part lors de l'obtention du poste en 2009. J'ai mis plus de temps que prévu, mais l'engagement est tenu.

Mes remerciements vont bien sûr à l'ensemble des collègues du GHAAPPE, puis du Pôle Ecohydraulique, ainsi que du groupe HYDROECO de l'IMFT, pour la bonne ambiance dans le travail, l'aide et les conseils dont j'ai pu bénéficier.

Une pensée chaleureuse à l'ensemble de mes proches, famille et amis. Merci en particulier à mes parents de m'avoir fait confiance et laisser prendre les orientations souhaitées dans mes études et qui m'ont permis d'arriver à la situation professionnelle d'aujourd'hui. Un petit mot pour Michel « le petit pêcheur » qui m'a transmis la passion de la pêche. Au-delà du loisir, tout ce temps passé au bord des cours d'eau m'a amené à développer un intérêt pour les milieux aquatiques qui a finalement beaucoup compté dans mon parcours professionnel. Pour les copains, ça y est, c'est fini, vous ne pourrez plus me demander : "mais au fait, quand est-ce que tu soutiens ta thèse ?".

Le mot de la fin avec de profonds remerciements à ma compagne Flo pour tout le bonheur de vivre ensemble. Merci en particulier pour ta patience lorsque le travail et la thèse ont débordé sur notre vie personnelle. Et une pensée pour Clément "le Txululu" qui a déboulé dans nos vies depuis un peu plus d'un an et nous apporte beaucoup de bonheur.

CARACTERISATION DE LA PERTURBATION HYDROLOGIQUE INDUITE PAR LES REGIMES D'ECLUSEES HYDROELECTRIQUES ET DEFINITION D'UN INDICATEUR

REFLEXION SUR LES MESURES DE MITIGATION DES IMPACTS DES ECLUSEES SUR LES POPULATIONS DE POISSONS

RESUME

La gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques (plus de 150 en France) pour la production d'énergie de pointe engendre de brusques variations de débit sur les cours d'eau et est susceptible d'altérer la composition, l'abondance et la structure des populations de poissons et d'invertébrés, sur de longues distances. Les objectifs de cette thèse ont été (1) de développer une méthode de caractérisation des éclusées au sein des hydrogrammes, ainsi qu'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique, et (2) de progresser dans la définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées sur les poissons.

A partir de l'analyse de 97 stations et 1575 années de données de débit, les gradients des variations naturelles de débit ont tout d'abord été caractérisés sur 8 gammes entre 5% et 4 fois le débit moyen interannuel (module). Des formules représentant les variations de débit « les plus rapides possibles naturellement » ont été construites en tenant compte du type de variation (hausse ou baisse), de la taille du cours d'eau (via le module) et de la gamme de débit sur laquelle se déroule la variation, pour ensuite discriminer les éclusées des événements naturels.

A partir de l'analyse de 80 stations et 491 années de données de débit influencées par les éclusées, une méthode a été mise au point pour repérer au sein des hydrogrammes les éclusées dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle, à partir de 3 critères : une amplitude minimale (\geq à 10% du module et \geq à 20% du débit de base de l'éclusées), un gradient minimal ($>$ au gradient naturel maximal) et une limite haute sur le débit maximum (pour éliminer les événements de crues). Une grande variabilité des régimes d'éclusées du fait de la diversité des aménagements hydroélectriques et des fluctuations des apports hydrologiques et de la demande énergétique, a été constatée et illustrée.

Un indicateur synthétique différenciant 5 niveaux de perturbation hydrologique induit par les régimes d'éclusées a été construit. Le niveau de perturbation de chacune des 491 années de données a été évalué par expertise par 3 opérateurs selon les connaissances sur les impacts biologiques des éclusées. Une analyse discriminante linéaire permet de reproduire ce classement à partir de 5 paramètres caractérisant les régimes d'éclusées (87% de bon reclassement). Les exemples montrent que l'indicateur est bien sensible aux changements de gestion des centrales et permet d'apprécier les évolutions spatio-temporelles des régimes d'éclusées, notamment leur amortissement vers l'aval. L'indicateur peut être produit par année ou par période correspondant à des phases biologiques. Son calcul automatisé ne nécessite que l'hydrogramme sur la période ciblée, la valeur du module du cours d'eau et les débits d'équipement des centrales en amont. Cet indicateur constitue un outil pour les gestionnaires de « pré-diagnostic » des impacts biologiques et de suivi des évolutions spatiales et temporelles des régimes d'éclusées.

Une réflexion a été menée sur les études, méthodes et critères de définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées, en s'appuyant sur une revue bibliographique et sur plusieurs études de cas (Dordogne, Maronne, Creuse, Gave d'Ossau). Les travaux portent majoritairement sur la truite et le saumon atlantique, mais également sur l'ombre commun et les cyprinidés. Les différents types d'étude et de mesures de mitigation possibles vis-à-vis de la problématique des éclusées ont été listés et discutés. Différentes problématiques posées par la gestion par éclusées (fonctionnalité et exondation des frayères, échouage-piégeage et dérive des alevins) ont été passées en revue afin d'extraire les résultats et les critères permettant de définir des mesures efficaces.

Mots-clés : Eclusées, Perturbations hydrologiques, Impacts écologiques, Mesures de mitigation.

CHARACTERIZATION OF HYDROLOGICAL DISTURBANCE DUE TO HYDROPEAKING REGIMES AND DEFINITION OF AN INDICATOR

REFLECTION ON MITIGATION MEASURES OF IMPACTS ON FISH POPULATIONS

ABSTRACT

Hydropeaking management of hydroelectric facilities (more than 150 in France) generates sudden changes in flow on the river and can affect the composition, the abundance and the structure of fish and invertebrates populations over long distances. The objectives of this thesis were (1) to develop a method for characterizing hydropeaks within hydrograph and a synthetic indicator of hydrological disturbance, and (2) to progress in defining mitigation measures of hydropeaking impacts on fish.

From the analysis of 97 stations and 1575 years of flow data, rate of change of natural flow variations have been characterized within 8 ranges between 5% and 4 times the mean inter-annual discharge. Formulas representing the "fastest variations possible naturally" and taking into account the type of change (increase or decrease), the size of the stream (via the mean inter-annual discharge) and the flow range over which the variation takes place have been constructed and then used to discriminate hydropeaks and natural events.

From the analysis of 80 stations and 491 years of flow data affected by hydropeaks, a method was developed to identify, within the hydrograph, hydropeaks whose characteristics are beyond what can occur in natural hydrology, using 3 criteria: a minimum range ($\geq 10\%$ of the mean inter-annual discharge and $\geq 20\%$ of the hydropeak base flow), a minimal rate of change ($>$ to the maximum natural rate of change) and an upper limit on the maximum flow rate (to remove flood events). A large variation in hydropeaking regimes, due to the diversity of hydroelectric schemes and fluctuations in incoming flow and energy demand, was observed and illustrated.

A synthetic indicator differentiating 5 levels of hydrological disturbance induced by hydropeaking regimes was constructed. The level of disturbance of each of 491 years of flow data was evaluated by 3 expert operators according to knowledge of the biological impacts of hydropeaks. Linear discriminant analysis allows reproducing this classification using 5 characteristic parameters of hydropeaking regimes (87% of correct reclassification). Examples show that the indicator is sensitive to changes in hydropower plant management and allows appreciating the spatial and temporal changes in hydropeaking regimes, including the cushioning in downstream direction. The indicator can be produced per year or per period corresponding to biological phases. Its automated calculation requires only the hydrograph on the target period, the value of the mean inter-annual discharge and the maximum turbine discharge of the hydropower plant upstream. This indicator is a tool for managers of "pre-diagnosis" of biological impacts and for monitoring spatial and temporal changes in hydropeaking.

Reflections were conducted on the studies, methods and criteria for defining mitigation measures of hydropeaking impacts, based on the literature and on several case studies (Dordogne, Maronne, Creuse, Gave d'Ossau). Studies mainly concern trout and Atlantic salmon, but also grayling and cyprinids. Possible types of studies and mitigation measures have been listed and discussed. Several issues raised by hydropeaking (functionality and dewatering of spawning grounds, stranding-trapping and drift of fry) have been reviewed in order to identify results and criteria to determine effective measures.

Keywords: Hydropeaking, Hydrologic disturbances, Ecological impacts, Mitigation measures.

CARACTERISATION DE LA PERTURBATION HYDROLOGIQUE INDUITE PAR LES REGIMES D'ECLUSEES HYDROELECTRIQUES ET DEFINITION D'UN INDICATEUR REFLEXION SUR LES MESURES DE MITIGATION DES IMPACTS DES ECLUSEES SUR LES POPULATIONS DE POISSONS

SYNTHESE

1) Introduction, problématique et objectifs

Les régimes hydrologiques, de par la dynamique des débits, constituent un des éléments physiques structurant pour les biocénoses des cours d'eau. Ces régimes peuvent être perturbés par les activités et usages anthropiques, en particulier les usages amenant à stocker, prélever ou restituer des quantités d'eau. Les travaux se sont ici concentrés sur les perturbations hydrologiques induites par la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques, utilisée pour la production d'énergie de pointe. On dénombre en France plus de 150 aménagements hydroélectriques exploités par éclusées, situés essentiellement dans les massifs des Alpes, des Pyrénées et du Massif Central. A l'aval des centrales, les éclusées se traduisent dans le cours d'eau par des variations brutales de débit dues au démarrage et à l'arrêt du turbinage. Cette gestion est susceptible de perturber toutes les composantes de l'hydrologie des cours d'eau et d'induire des altérations plus ou moins conséquentes de la composition, de l'abondance et de la structure en âge des populations de poissons et d'invertébrés, sur des linéaires de cours d'eau pouvant atteindre plusieurs dizaines de km.

Parmi les méthodes et indicateurs hydrologiques existant, aucun ne permet de bien caractériser les régimes d'éclusées et a fortiori d'en apprécier le niveau de perturbation. Or, cela s'avère nécessaire pour pouvoir progresser dans la compréhension de leurs impacts et la définition de mesures de mitigation efficaces. D'autre part, pour l'étude des incidences ou les programmes de surveillance prévus par la DCE, il serait également utile de disposer d'un indicateur du niveau de perturbation de l'hydrologie, incluant celle induite par les éclusées.

Par ailleurs, si les études sur les impacts biologiques des éclusées sont nombreuses, peu de travaux débouchent en revanche sur des propositions de méthodes et de critères permettant de définir des mesures d'atténuation de ces impacts. Les études où des mesures sont mises en oeuvre et où un retour d'expérience est acquis sur leur efficacité s'avèrent rares. Aujourd'hui, on manque donc d'éléments pour, sur un cours d'eau donné, définir de manière pertinente des règles de gestion hydrologique ou des aménagements morphologiques permettant de réduire efficacement les effets des éclusées.

Dans le cadre de cette thèse, afin de pouvoir mieux décrire les caractéristiques effectives des régimes d'éclusées, les travaux ont tout d'abord porté sur la mise au point d'une méthode de repérage et de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes (partie 3). Cela a nécessité au préalable de caractériser les gradients des variations de débit en hydrologie naturelle de façon à pouvoir établir des critères de discrimination des éclusées (partie 2). Un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique induite par les éclusées a ensuite été construit dans le but de fournir aux gestionnaires un outil de pré-diagnostic des impacts et de suivi des évolutions spatiales et temporelles des régimes d'éclusées (partie 4). Enfin, une réflexion a été menée sur les études, méthodes et critères de définition des mesures d'atténuation des impacts des éclusées à partir de la bibliographie et de plusieurs études de cas (partie 5).

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

Dans une première partie, le travail a consisté (1) à caractériser les gradients des variations de débit à la hausse et à la baisse sur des cours d'eau à l'hydrologie naturelle concernés ou qui pourraient être concernés par la problématique des éclusées hydroélectriques (cours de montagne ou de piémont) et (2) à exploiter ces résultats pour la fixation des critères pour la sélection des éclusées hydroélectriques. 97 stations hydrométriques, situées principalement dans les massifs des Pyrénées (24), du Massif Central (36), des Alpes (20) et du Jura (9), ainsi que dans les Vosges (3), en Corse (4)

et dans le Massif Armoricaïn (2), ont été identifiées. Le caractère naturel ou très peu perturbé de l'hydrologie de ces stations a été validé en vérifiant l'absence d'aménagement majeur sur le cours d'eau à l'amont et par un examen visuel détaillé des hydrogrammes. Un total de 1575 années de chroniques hydrologiques ont été extraites et analysées, avec des données essentiellement à pas de temps fin (débits à pas de temps variable [QTVAR 5%] ou débits horaires [QH]) qui rendent compte fidèlement des variations et permettent une évaluation précise de leurs gradients, ainsi que des débits moyens journaliers (QMJ) dans le cas de données anciennes sur des cours d'eau de taille moyenne à grande (module > 10-15 m³/s).

Les gradients ont été caractérisés sur 8 gammes de variations définies entre 5% du débit moyen interannuel (module) et 4 fois le module, de manière distincte entre les hausses et les baisses, mais sans distinction entre les variations continues ou non. Le traitement automatique des chroniques de débit a été réalisé sous Excel avec le développement d'une Macro codée en Visual Basic. De manière logique, on observe que (1) pour une station et une gamme de variation donnée, les gradients des hausses de débit sont plus importants que ceux des baisses de débit, (2) pour une station donnée, les gradients de hausses et de baisses sont globalement d'autant plus faibles que la variation se déroule vers les faibles débits, et (3) pour une gamme de variation donnée, les valeurs de gradients de hausses et de baisses ont globalement tendance à décroître au fur et à mesure que la valeur du module du cours d'eau augmente. L'intérêt principal de ce travail est de disposer à présent d'évaluations chiffrées de ces gradients de variation.

Ces résultats ont été exploités pour construire des formules représentant les hausses et les baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement », formules qui sont utilisées par la suite pour discriminer les éclusées des variations naturelles dans le cadre de la construction de l'indicateur. Ces formules tiennent compte du type de variation (hausse ou baisse), de la taille du cours d'eau (via le module) et de la gamme de débit sur laquelle se déroule la variation. Leur établissement a été basé sur les plus fortes valeurs de 9^e décile des gradients dans chaque gamme de variation, comme valeurs représentatives des plus forts gradients naturels que l'on peut rencontrer. Cette démarche est globalement très sécuritaire vis-à-vis du risque de sous-estimer les gradients des variations naturelles de débit. Les formules ont été construites sous la forme de fonction exponentielle : $Q = 4 * \exp(-a * t^b)$, avec Q le débit en proportion du module et t le temps en heure, b un coefficient égal à 1.15 pour les hausses de débit et à 0.75 pour les baisses et a un coefficient fonction de la valeur du module du cours d'eau.

Ces formules permettent ainsi d'obtenir un ordre de grandeur du temps minimal de toutes variations de débit naturelles, à la hausse ou à la baisse, se déroulant en deçà de 4 fois le module. Elles ne sont basées que sur la valeur du module du cours d'eau qui est une information dont on dispose a priori à chaque station hydrométrique. La construction de cette référence générale sur les gradients des variations naturelles de débit permet, dans le cadre de la construction de l'indicateur « éclusée », de contourner l'impossibilité de trouver systématiquement une référence locale d'hydrologie naturelle pour chaque site touchée par la problématique.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Afin de pouvoir mieux décrire les caractéristiques effectives des régimes d'éclusées, les travaux ont porté sur la mise au point d'une méthode de repérage automatique et de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes. Concrètement, l'objectif est de sélectionner toutes les variations de débit dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle sur le cours d'eau concerné.

Un jeu de données a été constitué en identifiant 80 stations hydrométriques à l'hydrologie influencée au moins une année par les éclusées hydroélectriques. Ces stations se situent principalement dans les bassins Adour-Garonne (39), Loire-Bretagne (18) et Rhône-Méditerranée-Corse (21) qui englobent les massifs montagneux. Leurs débits moyens interannuels varient de 1.2 à 384 m³/s. Un total de 491 années de données de débit influencées a été rassemblé et analysé. Ces données de débit sont à pas de temps variable (QTVAR 5%) pour pouvoir rendre compte précisément des variations de débit liées aux éclusées hydroélectriques.

Dans une première étape, la méthodologie développée fait appel à une valeur seuil sur le gradient entre les valeurs consécutives de débit, égale à 1% du module par heure, pour identifier et caractériser les événements significatifs de hausse et de baisse de débit. Dans une seconde étape, une sélection est réalisée parmi les événements de hausse et de baisse reconstitués pour ne retenir

que ceux dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle, et que l'on qualifiera donc d'éclusées. Cette sélection se base sur 3 critères :

- Une condition d'amplitude minimale : \geq à 10% du module et \geq à 20% du débit de base.
- Une condition de gradient minimal : supérieur à l'ordre de grandeur du gradient maximal que l'on peut rencontrer en situation naturelle (calculé à partir des formules établies précédemment)
- Une limite haute sur le débit maximum qui a pour but d'éviter de prendre en compte les événements hydrologiques de crues et décrues dépassant les capacités des aménagements (3^e critère de sécurité par rapport aux 2 premiers).

Dans une troisième étape, les hausses ou baisses d'éclusées consécutives, séparées par une courte phase de stabilité ou une légère inversion de tendance du débit, mais que l'on peut considérer comme faisant partie d'une seule éclusée globale, sont concaténées. Le traitement des chroniques de débit a été automatisé sous Excel avec le développement d'une Macro codée en Visual Basic.

La méthodologie de sélection des éclusées proposée ne nécessite que la valeur du module du cours d'eau, ainsi que des informations sur les débits d'équipement des centrales présentes en amont. Elle est applicable aux chroniques de débit à pas de temps variable (QTVAR de la banque HYDRO), ainsi qu'aux chroniques à pas de temps fixe suffisamment fin (horaire ou infra-horaire), pour des cours d'eau de module supérieur à 1 m³/s, et des variations de débit jusqu'à 4 fois le module. Cela englobe la quasi-totalité des cours d'eau soumis aux éclusées et des débits d'équipements des aménagements en France, et la totalité des stations hydrométriques identifiées dans cette étude. La méthodologie proposée est donc adaptée à une utilisation « en routine » pour la production d'indicateurs.

Au niveau d'une station hydrométrique, les caractéristiques d'un régime d'éclusées dépendent du régime hydrologique des cours d'eau captés (pluvial, pluvio-nival, nival, glaciaire), des caractéristiques de l'aménagement hydroélectrique (type d'aménagement, capacité utile de stockage, débit d'équipement, possibilité de régulation), du règlement d'eau (débit réservé notamment), des éventuelles missions annexes (cote touristique estivale, soutien d'étiage, ...), ainsi que de la distance entre le point de restitution des éclusées et la station hydrométrique (atténuation des éclusées, éventuelle retranscription par des aménagements intermédiaires). La diversité des situations des aménagements, couplée aux fluctuations des apports hydrologiques et de la demande énergétique, engendre une grande variabilité entre les régimes d'éclusées.

Le test de la méthodologie développée pour le repérage des éclusées au sein des hydrogrammes sur le jeu de données d'hydrologie naturelle a permis de vérifier qu'il n'y a bien aucun ou très peu d'événements sélectionnés. Les résultats permettent d'avancer que l'hydrologie d'une station pourra être considérée au moins sensiblement perturbée dès lors que le cumul des nombres annuels de baisses et de hausses retenues est supérieur à 20 (critère servant à la distinction initiale entre les stations à l'hydrologie naturelle ou peu perturbée [classe 0] et celles à l'hydrologie influencée [classe 1 à 5]).

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Pour donner une vision synthétique du niveau de perturbation hydrologique induit par les régimes d'éclusées, un indicateur a été construit sous la forme de 5 classes distinguant des niveaux de perturbation sensible (classe 1), marquée (2), très marquée (3), sévère (4) et très sévère (5).

De manière à pouvoir ensuite calibrer une procédure automatique, le niveau de perturbation hydrologique de chaque chronique annuelle de débit a été évalué par expertise par trois opérateurs en suivant la logique des connaissances sur les impacts biologiques des éclusées. Une analyse discriminante linéaire a été utilisée pour reproduire ce classement à partir d'un petit nombre de paramètres chiffrés décrivant les régimes d'éclusées. Les fonctions de classement prennent en compte 5 paramètres : le nombre total de baisse et de hausses d'éclusées par année, la valeur du débit de base non dépassée par 10% des baisses, la valeur d'amplitude non dépassée par 90% des baisses, la valeur de gradient non dépassée par 90% des baisses et la valeur de gradient non dépassée par 90% des hausses. L'analyse discriminante permet de reclasser correctement 427 des 491 chroniques annuelles de débit, soit près de 87%, ce qui constitue un résultat satisfaisant. Les

données mal classées se retrouvent toutes dans la première classe inférieure ou supérieure à celle évaluée par expertise.

Le diagnostic peut être affiné avec la subdivision des classes 2, 3 et 4 en deux sous-classes selon que le second score de l'analyse discriminante le plus élevé est obtenu pour la classe supérieure ou inférieure. Sur une station donnée, l'évolution du score maximum donné par l'analyse peut également être intéressante à suivre pour apprécier l'effet de modifications de gestion qui ne se traduisent pas forcément par un changement de classe. Les exemples de mises en œuvre montrent que l'indicateur s'avère effectivement sensible aux changements de gestion des centrales et permet d'apprécier les évolutions temporelles et spatiales des régimes d'éclusées, en particulier leur amortissement vers l'aval. L'indicateur a été construit sur des chroniques annuelles de débit. Il peut également être appliqué sur des périodes plus longues ou plus courtes, notamment sur des périodes correspondant à des phases biologiques des espèces présentes sur les cours d'eau. L'application de la méthode de sélection des éclusées et le calcul de l'indicateur sont entièrement automatisés dans un fichier Excel 2010 au travers d'une Macro codée en Visual Basic. Ce logiciel étant couramment utilisé, l'indicateur "éclusées" est ainsi un outil facilement transférable aux gestionnaires.

L'indicateur proposé ne s'appuie que sur l'analyse des chroniques de débit, et ne fournit donc qu'une appréciation du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées. Dans la mesure où le classement suit la logique des connaissances sur les conséquences biologiques des éclusées, il peut être interprété comme un risque d'impacts biologiques, mais ne peut pas être considéré comme une indication du niveau d'impact réel de la gestion par éclusées des aménagements (non prise en compte des autres perturbations hydrologiques que peuvent induire les aménagements ; lien complexe entre les niveaux de perturbation hydrologique et d'impact biologique ; autres sources d'impact des aménagements par les modifications thermiques, morphologiques, ...). Malgré ces limites, l'indicateur proposé représente une avancée significative dans l'appréciation du niveau de perturbation liée aux éclusées par rapport au fait de n'examiner que les données administratives de l'aménagement (débit réservé et débit d'équipement). Cet indicateur constitue une méthode complémentaire à celles existantes de type HVA-RVA, DHRAM, HIP, IAHRIS ou HYDMOD-R qui ne permettent pas d'appréhender correctement les éclusées. Au final, l'indicateur constitue un outil de "pré-diagnostic", et surtout un outil de suivi des évolutions spatio-temporelles des régimes d'éclusées, permettant d'apprécier notamment l'effet de mesures de mitigation ou l'atténuation vers l'aval des éclusées.

5) Réflexions sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées hydroélectriques

Une réflexion a été menée sur les études, méthodes et critères de définition des mesures d'atténuation des impacts des éclusées à partir de la bibliographie et de plusieurs études de cas qui ont fait l'objet de travaux avec de multiples partenaires (Dordogne, Maronne, Creuse, Gave d'Ossau). Les travaux portent majoritairement sur la truite fario et le saumon atlantique, ainsi que sur les cyprinidés d'eaux vives, l'ombre commun, le brochet ou la perche. Les différents types d'étude vis-à-vis de la problématique des éclusées ont été passés en revue : études de l'hydrologie et des régimes d'éclusées, étude du régime thermique et de l'éventuel effet de « thermopeaking », suivi des paramètres physico-chimiques (qualité de l'eau), cartographies des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques (sectorisation), étude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des conditions d'habitat sur la gamme de turbinage, suivis de la reproduction des poissons et de l'exondation des pontes, suivis de l'échouage-piégeage des alevins, suivis de la dérive des alevins, suivis de la composition, de l'abondance et de la structure des populations de poissons, analyses énergétique et économique. Les mesures de mitigation possible ont été listées et discutées : arrêt total des éclusées, suspension momentanée, modifications des caractéristiques des éclusées, interventions sur la morphologie, mesures structurelles sur l'aménagement. Pour plusieurs problématiques posées par la gestion par éclusées (fonctionnalité et exondation des zones de frayères ; échouage-piégeage des alevins ; dérive des alevins), on a tâché d'extraire des différentes études de cas les résultats et les critères permettant de définir des mesures efficaces en tirant profit des retours d'expérience sur leur efficacité lorsqu'elles ont pu être mises en œuvre.

Les études de cas ont majoritairement débouché sur des mesures de modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques présentant l'avantage de profiter à l'ensemble du linéaire du cours d'eau à l'aval de la centrale et déclinées selon un calendrier biologique. De manière globale, les études amènent à préconiser :

- (1) le maintien de débits de base hivernaux variant entre 25% et 45% du module pour limiter l'exondation des frayères de truite et de saumons,
- (2) le maintien de débits de base printaniers variant entre 30% à 60%, voire 75% du module et (3) la limitation également au printemps et en été des gradients de baisse à des valeurs de l'ordre de 10% à 30% du module par heure pour limiter les échouage-piégeages de l'ensemble des espèces en limitant les surfaces exondées, ainsi que les déconnexions de bras secondaires et de dépressions rivulaires
- (4) de limiter le débit maximum à environ 1.5 fois le module au printemps sur la Dordogne et au module en été sur la Creuse pour limiter la mise en eau de sites piégeux et la dégradation des habitats des juvéniles.

Sur tous les cours d'eau, les efforts d'atténuation les plus forts ont ainsi été ciblés durant le printemps, cette saison englobant l'émergence des alevins de truite et de saumon, ainsi que la reproduction, l'incubation et l'émergence de bon nombre d'espèces lithophiles. Des opérations de travaux sur la morphologie des cours d'eau peuvent s'avérer un complément utile, voire incontournable, pour apporter une solution dans certains contextes morphologiques particulièrement problématiques comme les bras secondaires. Leur efficacité reste toutefois ponctuelle et ces opérations ne peuvent généralement pas, à elles seules, suffire à limiter de façon satisfaisante l'impact des éclusées à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau.

Les mesures structurelles sur les aménagements hydroélectriques, soit pour soustraire les éclusées sur des tronçons de cours d'eau, soit pour trouver des compromis maximisant les mesures de mitigation, tout en minimisant les contraintes sur la production de pointe actuelle (ouvrage de démodulation ou bassin "tampon"), ont été peu étudiés, ou du moins mis en œuvre en France; et mériteraient peut-être d'être davantage explorés.

Si l'on sait à présent comment solutionner certaines problématiques pour certaines espèces (exondation des frayères et échouage-piégeage des alevins de truite et de saumons), les connaissances et surtout les retours d'expérience manquent encore pour d'autres problématiques et espèces moins étudiées (dérive forcée des alevins ; dégradation des habitats vers les forts débits ; ombre et cyprinidés). Les réflexions menées ici sur la définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées restent donc à approfondir

**CARACTERISATION DE LA PERTURBATION HYDROLOGIQUE INDUITE PAR LES
REGIMES D'ECLUSEES HYDROELECTRIQUES ET DEFINITION D'UN INDICATEUR
REFLEXION SUR LES MESURES DE MITIGATION DES IMPACTS DES ECLUSEES SUR
LES POPULATIONS DE POISSONS**

SOMMAIRE

1.	Introduction, problématique et objectifs	1
2.	Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle	9
2.1.	Objectifs de l'étude des gradients des variations de débit naturelles	9
2.2.	Constitution du jeu de données de stations hydrométriques à l'hydrologie naturelle .	9
2.3.	Méthodologie de traitement des hydrogrammes	11
2.4.	Illustrations des résultats par station	15
2.5.	Exploitation des résultats pour la fixation des critères pour le repérage des éclusées hydroélectriques.....	19
2.5.1.	Etablissement de relations donnant l'ordre de grandeur des gradients naturels maximaux par gamme de variation	19
2.5.2.	Reconstitution des hausses et des baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement ».....	28
2.6.	Conclusions, discussion et perspective sur l'étude des gradients des variations de débit naturelles.....	35
3.	Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes	37
3.1.	Objectifs de la méthodologie de sélection des éclusées.....	37
3.2.	Constitution du jeu de données de stations hydrométriques influencées par les éclusées hydroélectriques	37
3.3.	Définition d'une éclusée et caractérisation.....	39
3.4.	Principe de la méthodologie de repérage des éclusées	42
3.4.1.	Etape 1 : Identification et caractérisation des événements significatifs de hausse et de baisse de débit	42
3.4.2.	Etape 2 : Sélection des éclusées	47
3.4.3.	Etape 3 : Concaténation des éclusées consécutives	49
3.5.	Test du nombre de variations retenues sur les chroniques de débit naturelles.....	50
3.6.	Descripteurs des régimes d'éclusées.....	51
3.6.1.	Paramètres chiffrés.....	51
3.6.2.	Représentation graphique	52
3.7.	Variabilité des régimes d'éclusées	54
3.7.1.	Sources de variabilité spatiale et temporelle des régimes d'éclusées	54
3.7.2.	Statistiques globales des régimes d'éclusées	57

3.7.3.	Exemples de régimes d'éclusées	67
3.8.	Conclusions, discussions et perspectives sur la méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes.....	81
4.	Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées	83
4.1.	Objectif de l'indicateur	83
4.2.	Classement du niveau de perturbation par expertise.....	83
4.3.	Reclassement automatique du niveau de perturbation par analyse discriminante linéaire	84
4.3.1.	Choix des paramètres retenus dans l'analyse discriminante	84
4.3.2.	Résultats du reclassement par l'analyse discriminante.....	85
4.4.	Subdivision des classes 2, 3 et 4	86
4.5.	Score maximum de l'analyse discriminante	88
4.6.	Répartition et caractéristiques des régimes d'éclusées dans les différentes classes.....	89
4.7.	Mise en œuvre de l'indicateur sur des périodes de l'année	92
4.8.	Exemples de mise en œuvre de l'indicateur	94
4.8.1.	La Maronne à Basteyroux de 1989 à 2012	94
4.8.2.	La Dordogne d'Argentat à Cénac de 1989 à 2012	98
4.8.3.	L'Ain à Pont d'Ain et Chasey-sur-Ain de 1997 à 2012	104
4.8.4.	Le Doubs franco-suisse de Fournet à Glère, de 1990 à 2012	106
4.9.	Conclusions, discussions et perspectives sur l'indicateur « éclusées »	110
5.	Réflexions sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées hydroélectriques.....	115
5.1.	Etudes possibles sur la problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques.....	117
5.1.1.	Etude de l'hydrologie et des régimes d'éclusées	117
5.1.2.	Etude du régime thermique et de l'éventuel effet « thermopeaking »	119
5.1.3.	Suivi des paramètres physico-chimiques (qualité d'eau)	121
5.1.4.	Cartographies des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques (sectorisation)	121
5.1.5.	Etude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats piscicoles sur la gamme de turbinage.....	123
5.1.6.	Suivi de la reproduction des poissons et de l'exondation des pontes lors des retours à bas débits.....	127
5.1.7.	Suivi de l'échouage-piégeage des poissons lors des baisses d'éclusées	128
5.1.8.	Suivi de la dérive des poissons lors des hausses d'éclusées	129
5.1.9.	Suivi de l'état des populations de poissons (composition, abondance, structure)....	130
5.1.10.	Etudes énergétiques et économiques du fonctionnement des aménagements hydroélectriques	131
5.2.	Type de mesures de mitigation des impacts des éclusées	132

5.2.1.	L'arrêt général de la gestion par éclusées	132
5.2.2.	La suspension des éclusées durant des périodes ciblées, biologiquement très sensibles.	132
5.2.3.	La modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques.....	133
5.2.4.	Les travaux sur la morphologie du cours d'eau pour en réduire la sensibilité aux éclusées.	134
5.2.5.	Mesures structurelles sur les aménagements hydroélectriques	134
5.3.	Fonctionnalité des sites de reproduction	136
5.4.	Exondation des frayères ou de pontes	140
5.4.1.	Constats d'exondation de frayères ou de pontes	140
5.4.2.	Mise en eau des surfaces de granulométrie favorables à la fraie des truites et saumons	141
5.4.3.	Discussions la problématique d'exondation des frayères ou des pontes.....	143
5.5.	Echouage-piégeage lors des baisses de débit.....	144
5.5.1.	Constats d'échouage-piégeage.....	144
5.5.2.	Taille et période de sensibilité à l'échouage-piégeage des alevins de truites et saumons	146
5.5.3.	Mesures de mitigation envisageables contre l'échouage-piégeage.....	147
5.5.4.	Evolution des largeurs ou surfaces mouillées en fonction du débit	148
5.5.5.	Relation entre gradients de niveau d'eau et gradient de débit, en fonction du débit	150
5.5.6.	Débits de mise en eau des dépressions de cordons rivulaires	155
5.5.7.	Propositions de mesures de mitigation de l'échouage-piégeage des alevins de salmonidés	157
5.6.	Dérive forcée lors des hausses de débit	158
5.6.1.	Taille et période de sensibilité à la dérive forcée des alevins de salmonidés	159
5.6.2.	Mesures de mitigation envisageables contre la dérive.....	159
5.6.3.	Evolutions des conditions d'habitat des alevins en fonction du débit.....	161
5.6.4.	Discussion sur la problématique de dérive forcée des alevins.....	163
5.7.	Discussion sur la définition des mesures de mitigation.....	164
6.	Conclusions, discussions et perspectives générales	170
7.	Bibliographie.....	173
8.	Annexes.....	181
8.1.	Annexe 1 : Liste des stations à l'hydrologie naturelle identifiées	182
8.2.	Annexe 2 : Tableau des valeurs de gradients naturels (9 ^{ème} décile).....	189
8.3.	Annexe 3 : Tableaux détaillant la création des points pour les régressions	191
8.4.	Annexe 4 : Liste des stations à l'hydrologie influencée identifiées	197
8.5.	Annexe 5 : Tableau récapitulatif des classements par expertise et des reclassements par l'analyse discriminante.....	204

1. INTRODUCTION, PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Le régime hydrologique, une composante dynamique essentielle au fonctionnement des hydrosystèmes

La notion de régime hydrologique d'un cours d'eau peut se définir comme l'ensemble des caractéristiques de variation de son débit dans le temps. Le régime hydrologique est usuellement synthétisé par des caractéristiques moyennes comme les débits moyens mensuels permettant d'en apprécier les variations saisonnières et sur lesquels se base la typologie des régimes selon l'origine des apports d'eau dans le cours d'eau et les caractéristiques des bassins versant (glaciaire, nival, pluvial, de nappe, mixte, ...). Mais vis-à-vis du fonctionnement des écosystèmes aquatiques, c'est bien l'ensemble des caractéristiques de la dynamique des débits qui sont déterminantes. Cette dynamique des débits peut être appréhendée au travers de 5 composantes : l'intensité, la fréquence, la durée, le timing et les gradients de variations des épisodes de débit (Richter et al. 1996, 1997 ; Poff et al. 1997). Dans un cours d'eau, les débits influencent les autres compartiments physiques d'un cours d'eau tels que la thermie et la physicochimie. Ils façonnent également la morphologie du cours d'eau au travers des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments lors des épisodes de forts débits et des interactions avec la ripisylve. Les débits, en lien avec la morphologie du cours d'eau, déterminent également les conditions d'habitat morphodynamique pour les populations d'invertébrés et de poissons (Wasson et al. 1995 ; Figure 1). Les débits constituent ainsi un des éléments physiques structurant pour les biocénoses des cours d'eau, au travers des événements extrêmes tels que les crues ou les étiages sévères, mais pas seulement (Bunn et Arthington 2002).

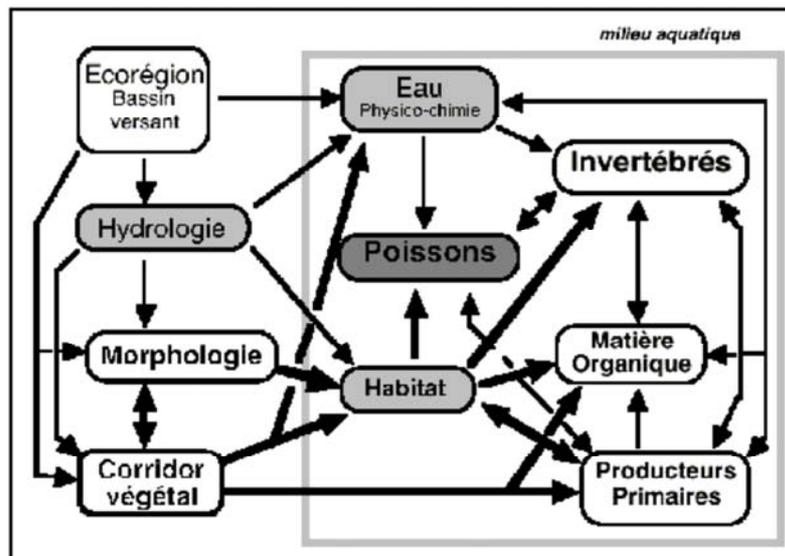


Figure 1 : Modèle conceptuel de l'écosystème d'eau courante d'après Wasson et al. (1995).

Les perturbations anthropiques des régimes hydrologiques

Les régimes hydrologiques des cours d'eau peuvent être perturbés par les activités et usages anthropiques, avec d'une part des actions « indirectes » liées aux activités sur le bassin versant influençant la génération des débits (occupation des sols, imperméabilisation, drainage, ...), et d'autre part des actions « plus directes » sur les débits des cours d'eau liées à des usages amenant à stocker, prélever ou restituer des quantités d'eau. Parmi les perturbations « directes » des régimes hydrologiques, on peut distinguer :

Les prélèvements d'eau « au fil de l'eau » pour l'Adduction d'Eau Potable (AEP), l'irrigation, l'alimentation de canaux de navigation ou les usages industriels. Ces prélèvements peuvent être permanents (AEP) ou périodiques, par exemple durant la période estivale pour l'irrigation. Ils s'opèrent soit par pompage directement dans le cours d'eau, soit au travers d'une prise d'eau gravitaire ou d'un pompage associés à un seuil ou barrage généralement de faible hauteur, avec un volume de retenue réduit. L'eau prélevée peut être totalement consommée (irrigation) ou seulement partiellement restituée et parfois très loin du point de prélèvement (dans le cas de l'AEP notamment,

avec les rejets des stations d'épurations). Le tronçon de cours d'eau à l'aval du point de prélèvement subit une réduction de son débit durant les périodes d'activités des prélèvements, au maximum dans la mesure du débit d'équipement des pompes ou des prises d'eau.

Le stockage d'eau pour des prélèvements pour l'AEP ou l'irrigation. Cela nécessite la construction sur les cours d'eau de grands barrages afin de créer un volume de retenue conséquent offrant des capacités de stockage. Les prélèvements associés peuvent se trouver dans la retenue et/ou sur le cours d'eau plus loin à l'aval du barrage. Le tronçon de cours d'eau à l'aval du barrage subit une réduction de son débit, d'une ampleur généralement plus forte que dans le cas des prises d'eau pour des prélèvements « au fil de l'eau », le débit supplémentaire au débit minimum à relâcher à l'aval du barrage étant généralement stocké, même lorsque les prélèvements ne sont pas actifs, et tant que la retenue n'est pas remplie. La nécessité de construction d'un grand barrage traduit généralement le besoin d'un taux de prélèvement supérieur. Lorsque des prélèvements se trouvent sur le cours d'eau à l'aval du barrage, de l'eau est alors déstockée et restituée au pied du barrage pour les alimenter ou les compenser. Ce cas de figure se présente essentiellement en période estivale dans le cas de prélèvements pour l'irrigation, ainsi que dans le cas de prélèvement pour le refroidissement de centrales thermiques (nucléaire, charbon, fioul, gaz). Le débit du cours d'eau est ainsi augmenté entre le barrage et le ou les points de prélèvement. Les valeurs de débit atteintes sur le tronçon peuvent largement dépassées les valeurs du débit entrant naturel. On parle usuellement de « soutien d'étiage ». Un même tronçon de cours d'eau peut ainsi subir des réductions et des augmentations de débit selon les périodes de l'année.

Le stockage d'eau pour l'écrêtement des crues. Dans le cadre de la protection contre les inondations, des barrages avec des capacités de stockage ont été construits afin d'écrêter les crues, c'est-à-dire de réduire leur débit maximum. Vis-à-vis de ce seul objectif, les ouvrages n'ont pas intérêt à stocker de l'eau et modifier les débits en dehors des épisodes de fortes crues. C'est bien le cas avec les barrages secs à pertuis de fond ouvert, qui ne se remplissent que lors des crues ciblées (comme ceux par exemple de Lurberria sur la Nivelle [64] ou sur l'One à l'amont de Luchon [31]). Mais, la mission d'écrêtement des crues est confiée à des grands barrages également utilisés pour le stockage d'eau pour des prélèvements, les différents usages pouvant d'ailleurs rentrer en conflit sur l'utilisation de la capacité de stockage, entre remplir pour pouvoir satisfaire les besoins de prélèvements à venir et garder de la capacité de stockage pour pouvoir écrêter les éventuelles crues. Le multi-usage stockage et écrêtement des crues va avoir tendance à cumuler et globalement aggraver les perturbations du régime hydrologique à l'aval.

Les prélèvements d'eau pour la production d'hydroélectricité « au fil de l'eau », avec un point de restitution de l'eau turbinée déportée à l'aval de la prise d'eau dans le but de dégager de la chute, et ainsi de la puissance de production. Ces prélèvements sont permanents, sauf règlement contraire, et dans la mesure où le débit entrant est supérieur à la somme du débit réservé et du débit d'armement des turbines (plus petit débit turbiné). Le tronçon de cours d'eau entre le point de prélèvement (prise d'eau) et de restitution de l'eau (centrale ou extrémité du canal de fuite) subit une réduction de débit. On parle usuellement de Tronçon Court-Circuité (TCC). Le régime hydrologique à l'aval de la restitution n'est en principe pas perturbé. Selon la qualité de la régulation des centrales, les gradients des variations de débit peuvent parfois être quelque peu modifiés à l'aval.

Le stockage d'eau pour la production d'hydroélectricité de pointe → les éclusées. L'électricité ne pouvant être stockée à grande échelle, des grands barrages ont été construits pour pouvoir produire de l'hydroélectricité de pointe via le turbinage, ciblé dans le temps, de volumes d'eau préalablement stockés dans des retenues. Le terme « éclusées » désigne les variations de débit engendrées à l'aval des centrales. L'hydroélectricité présente l'avantage d'une forte modularité, avec une mise en route et un arrêt du turbinage rapides, ce qui n'est pas le cas de tous les modes de production. L'hydroélectricité de pointe est ainsi utilisée pour l'ajustement permanent de la production à la consommation et participe ainsi à l'équilibre du réseau électrique (Figure 2).

A l'aval des centrales, les éclusées hydroélectriques se traduisent dans le cours d'eau par des variations brutales de débit dues au démarrage et à l'arrêt du turbinage. Cette gestion, induisant de fait des déplacements de volumes d'eau à différentes échelles de temps (journalière, hebdomadaire, voire saisonnière selon les capacités de stockage des aménagements), est susceptible de perturber considérablement toutes les composantes de l'hydrologie d'un cours d'eau (Figure 3) (Sabaton et al. 1995 ; Courret et Larinier 2008).

Dans le cadre de cette thèse, les travaux se sont concentrés sur les perturbations hydrologiques induites par la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques.

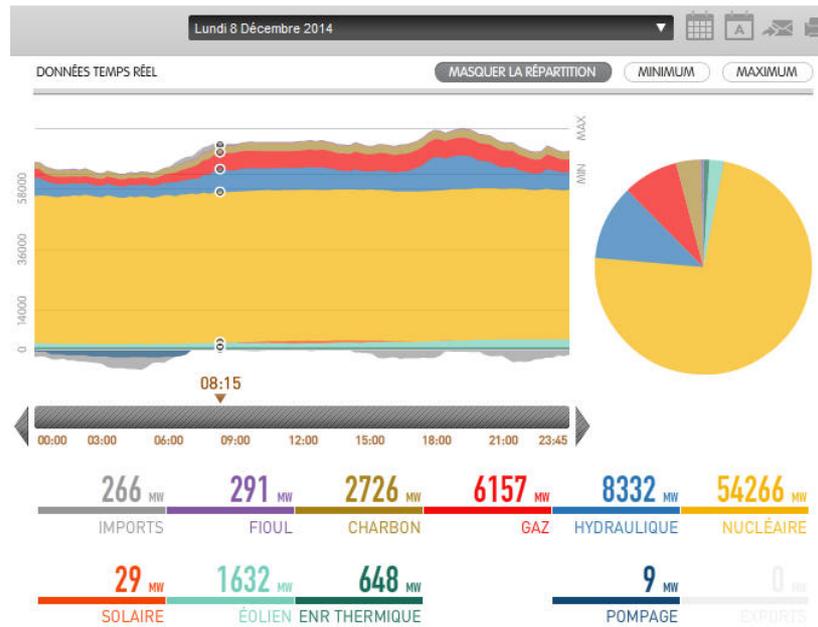


Figure 2 : Illustration de la composition du mix énergétique pour la production d'électricité pour la journée du 8 décembre 2014 en France (extrait du service Eco2mix sur www.rte-france.com).

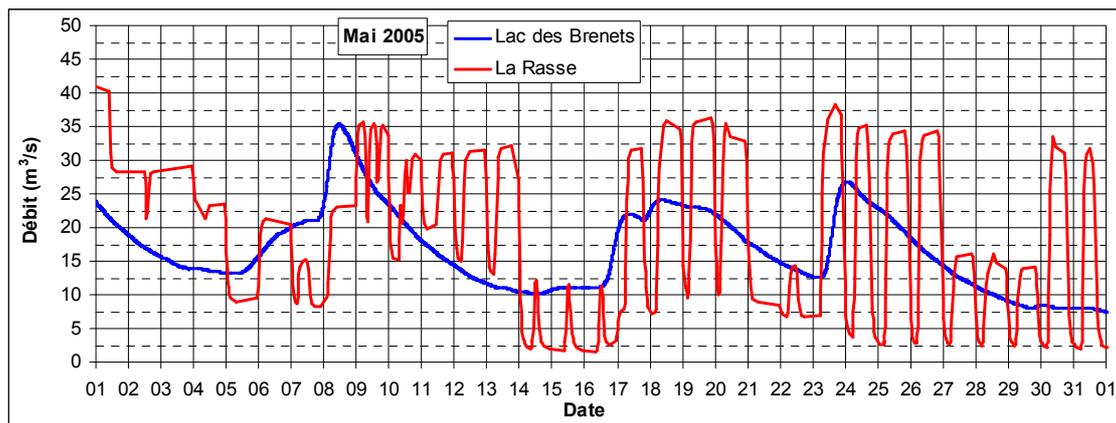


Figure 3 : Comparaison des chroniques de débit aux stations du Lac des Brenets (hydrologie naturelle) et de la Rasse (hydrologie influencée par les éclusées du Chatelôt), sur le Doubs en mai 2005 (figure extraite de Courret et Larinier 2008).

Les aménagements hydroélectriques gérés par éclusées en France

En 1995, Lauters dénombre en France métropolitaine 144 aménagements hydroélectriques exploités par éclusées, qui se trouvent essentiellement dans les massifs des Alpes, des Pyrénées et du Massif Central (Lauters 1995). Cet ordre de grandeur reste d'actualité, très peu de nouveaux aménagements gérés par éclusées ayant été construit depuis (barrage sur le Rizzanese en Corse mis en service en 2013). Leur puissance cumulée atteint de l'ordre de 8000 MW, pour une production annuelle de l'ordre de 33 TWh.

Parmi ces aménagements gérés par éclusées, on distingue ceux dit « de type éclusées » possédant des capacités de stockage permettant des déplacements de volumes d'eau à l'échelle journalière ou hebdomadaire (cas du barrage du Chastang ; Figure 4), de ceux dits « de lac » possédant des capacités de stockage permettant des déplacements de volumes d'eau à l'échelle mensuelle ou saisonnière (cas du lac d'Artouste ; Figure 4). Les premiers se rencontrent notamment dans le Massif Central avec par exemple les chaînes sur la Dordogne ou la Truyère, mais également sur l'Ain, le Doubs ou le Rhône, avec des centrales exploitant généralement des chutes moyennes. Les seconds se rencontrent principalement dans les Pyrénées et dans les Alpes, avec plutôt des usines de haute chute.



Figure 4 : A gauche le barrage du Chastang sur la Dordogne (19), à droite le barrage et lac d'Artouste sur le Gave du Soussouéou (64).

Les aménagements hydroélectriques exploités par éclusées se trouvant essentiellement dans les massifs montagneux, les tronçons de cours d'eau subissant les éclusées font majoritairement partie de la zone salmonicole. De nombreux cours d'eau colonisés par les saumons et truite de mer sont d'ailleurs concernés dont notamment l'Allier, la Sioule, la Dordogne, la Maronne, la Cère et la Vézère dans le Massif Central, le Gave d'Ossau, le Gave de Pau, la Neste, la Pique, la Garonne et l'Ariège dans les Pyrénées, ainsi que la Sélune et l'Orne en Normandie.

Toutefois, de par la position plus basse de certains aménagements, et du fait de la propagation des éclusées sur des distances pouvant être importantes (plusieurs dizaines de km, voire une centaine), cette perturbation de l'hydrologie touche également des zones cyprinicoles, comme par exemple sur la Creuse à l'aval du complexe d'Eguzon (Lascaux et al. 2013), ou sur la Dordogne à l'aval du Sablier (Lascaux et Cazeneuve 2008).

La Figure 5 présente à titre d'exemple les tronçons de cours d'eau subissant des éclusées hydroélectriques au sein du bassin Adour-Garonne (Moor et al. 2013).

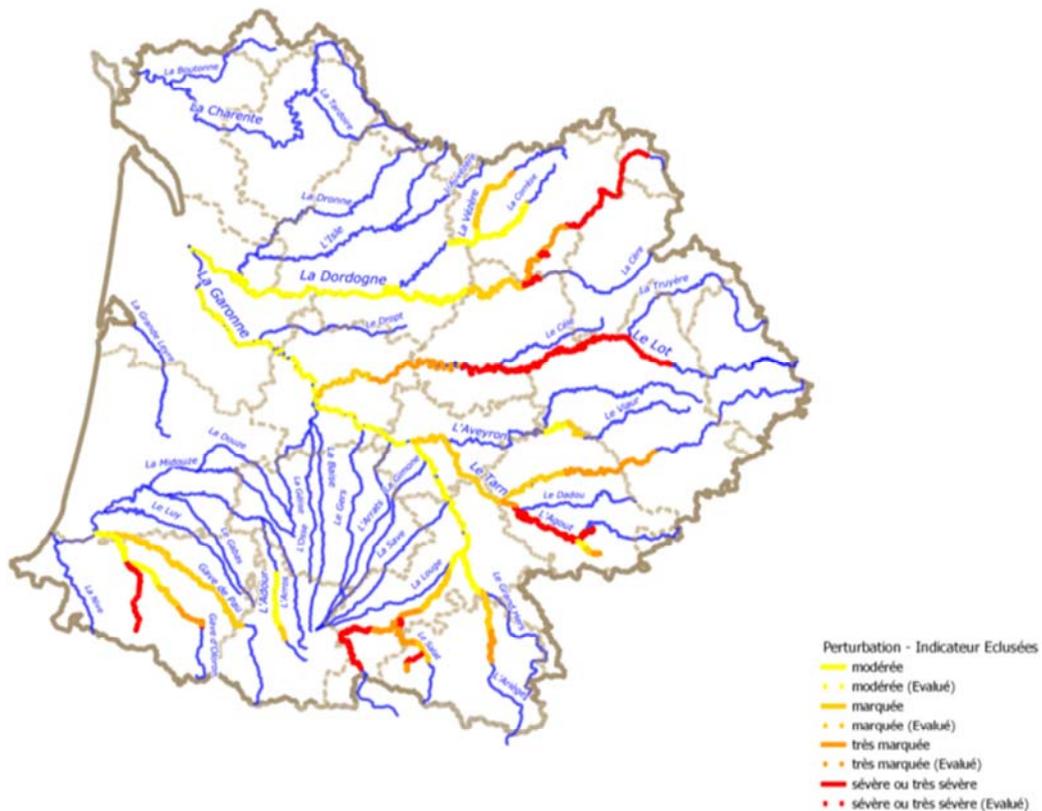


Figure 5 : Tronçons de cours d'eau subissant des éclusées hydroélectriques au sein du bassin Adour-Garonne, sud-ouest de la France (carte provisoire ; figure extraite de Moor et al. 2013).

L'hydroélectricité tend globalement à se développer dans le contexte des objectifs d'accroissement des énergies renouvelables et de réduction des émissions de CO₂. Le développement de l'éolien et du photovoltaïque qui sont des sources de production intermittentes et aléatoires accroît également le besoin d'outils de production disposant de capacités de modulation rapide, telle que l'hydroélectricité. En France, la programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité sur la période 2009-2020¹ prévoit une augmentation des capacités de production de pointe de 3000 MW pour l'hydroélectricité. Même si cette augmentation de capacité de pointe devrait pour partie être assurée par la création de Station de Transfert d'Energie par Pompage-turbinage (STEP), la gestion par éclusées devrait a minima se maintenir, voire se développer.

Les impacts des éclusées hydroélectriques sur les populations de poissons et d'invertébrés

Les impacts des éclusées hydroélectriques sur les populations de poissons et d'invertébrés ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Des synthèses ont notamment été réalisées par Cushman (1985), Sabaton et al. (1995), Valentin (1997), Steele et Smokorowski (2000) ou Baumann et Klauss (2003). La gestion par éclusées peut induire des altérations plus ou moins conséquentes de la composition, de l'abondance et de la structure en âge des populations de poissons et d'invertébrés, sur des linéaires de cours d'eau pouvant atteindre plusieurs dizaines de km.

Sur les populations d'invertébrés, la gestion par éclusées provoque le plus souvent une diminution de la diversité du peuplement par rapport aux conditions naturelles. L'impact semble cependant très variable selon les espèces : il peut être négatif sur certaines, semble nulle sur d'autres et peut même apparaître positif sur certaines espèces robustes profitant d'une compétition réduite dans leur niche écologique. D'une manière générale, les baisses de débit provoquent des mortalités par assèchement des invertébrés ayant colonisés les zones de marnage lors des épisodes de fort débit précédents. D'autre part, les hausses de débit provoquent une augmentation de la dérive (Valentin 1995).

Sur les populations de poissons, au sommet de la chaîne alimentaire des hydrosystèmes, l'impact d'une gestion par éclusées se traduit le plus souvent par une réduction de la richesse spécifique et de la biomasse (Moog 1993 ; Almodovar et Nicola 1999) et/ou par une modification de la composition structure du peuplement (Valentin 1995). La réduction de la biomasse peut résulter :

- de destructions des pontes par exondation des frayères (espèces lithophiles) ou des supports de pontes (espèces phytophiles), ou par entraînement (érosion des frayères ou arrachage des pontes).
- de mortalités d'alevins, voire de juvéniles et d'adultes selon les espèces, dans les zones rapidement découvertes ou déconnectées lors des baisses de débit (Bradford 1997 ; Saltveit et al. 2001 ; Halleraker et al. 2003 ; Lascaux et al. 2006).
- d'entraînement vers l'aval et de mortalités d'alevins, par dérive forcée lors des hausses de débit (Lauters 1995 ; Valentin 1995 ; Liebig 1998).
- d'un ralentissement de la croissance des poissons (Raastad et al. 1993).

La modification de la structure du peuplement peut résulter d'une sensibilité différente selon les espèces et leur cycle biologique aux éclusées, ainsi que des faveurs d'habitat au débit minimum.

La caractérisation des régimes d'éclusées et du niveau de perturbation hydrologique

Dans les études existantes sur les impacts biologiques, la caractérisation des régimes d'éclusées s'est souvent arrêtée au recueil des données administratives de l'aménagement, c'est-à-dire le débit réservé et le débit d'équipement, déterminant l'amplitude maximale des éclusées. Les effets ont été rarement mis en relation avec les paramètres hydrologiques effectifs des éclusées (nombre d'éclusées, débits de base, débits maximum, amplitudes et gradients réellement générés) et leurs répercussions hydromorphologiques. Or, la compréhension de ces impacts et la définition de mesures de mitigation efficaces ne peuvent passer que par une caractérisation fine des perturbations

¹ Rapport téléchargeable : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ppi_elec_2009.pdf

hydrologiques, puis hydromorphologiques générées par l'exploitation par éclusées, en reliant les différents effets biologiques constatés à un ou plusieurs facteurs de perturbation déterminés.

Par ailleurs, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau de 2000 prévoit qu'une étude des incidences de l'activité humaine sur l'état des eaux de surface soit entreprise, incluant l'estimation et l'identification de l'incidence des régulations importantes du débit d'eau, y compris les transferts et diversions d'eau, sur les caractéristiques générales du débit et les équilibres hydrologiques (article 5 et annexe II ; étude à achever au plus tard 4 ans après la date d'entrée en vigueur de la directive, à mettre à jour au plus tard 13 ans après et par la suite tous les 6 ans). Parallèlement, des programmes de surveillance de l'état des eaux doivent être établis conformément aux exigences de l'annexe V où le régime hydrologique (quantité et dynamique du débit d'eau et connexion aux masses d'eau souterraine) est identifié comme l'un des paramètres hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques (article 8 et annexe V; programmes opérationnels au plus tard six ans après la date d'entrée en vigueur de la directive). Que ce soit pour l'étude des incidences ou les programmes de surveillance, il serait donc utile de disposer d'un indicateur du niveau de perturbation de l'hydrologie, incluant la perturbation induite par les éclusées.

En France, l'arrêté du 25 janvier 2010 et la circulaire du 29 janvier 2013 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux définissent les méthodes et principes d'échantillonnage et d'analyse des différents paramètres. Concernant le régime hydrologique, quelques éléments succincts sont indiqués pour le suivi des crues et des étiages, mais le cas des éclusées hydroélectriques n'est pas du tout abordé.

Parmi les méthodes et indicateurs hydrologiques disponibles dans la bibliographie, aucun ne permet de bien caractériser les régimes d'éclusées et a fortiori d'en apprécier le niveau de perturbation. En particulier, les méthodes IHA-RVA², DHRAM³, HIP⁴ et IAHRIS⁵ ne permettent pas d'appréhender correctement les éclusées hydroélectriques dans la mesure où elles se basent sur des chroniques de débit journalier. De plus, le principe de ces méthodes est de mesurer les écarts de l'hydrologie influencée par rapport à l'hydrologie naturelle mesurée soit à l'amont, soit antérieurement à l'aménagement ou modélisée ; ce qui limite leur emploi en France, au moins à court terme, du fait de la rareté de stations à l'hydrologie vraiment naturelle, et des difficultés que posent la mise en œuvre de modélisations pertinentes.

Dans la méthode suisse HYDMOR-R⁶, les caractéristiques des éclusées servant au calcul de l'indice (débit maximum, débit de base, gradient de hausse et de baisse) sont à déterminer soit sur la base de données de débit sur une période de 10 semaines avec des éclusées pendant des conditions d'étiage, soit à partir des données administratives de l'aménagement (sauf pour les gradients). Le choix d'une période de 10 semaines pendant des conditions d'étiage ne garantit pas que les caractéristiques extraites soient représentatives de l'ensemble des éclusées. Il y a d'ailleurs des aménagements qui ne pratiquent pas d'éclusées en période d'étiage. De plus, il n'est pas tenu compte du nombre d'éclusées, qui est pourtant un paramètre déterminant dans leur impact.

Le "Flashiness Index" proposé par Baker et al. (2004) est calculé en divisant la somme des amplitudes absolues de débit entre chaque paire de donnée de débit, par la somme des débits sur la période considérée (généralement par année). Cet indice n'est applicable que sur des données à pas de temps fixe (journalier ou horaire notamment). En étant appliqué sur des données à pas de temps fin, cet indice peut apparaître intéressant pour la caractérisation des éclusées. Cependant, il n'y est pas adapté dans la mesure où il ne permet pas de discriminer les événements hydrologiques d'origine naturelle et les éclusées, et où la valeur de l'indice est principalement influencée par les amplitudes des variations de débit, et peu par leurs gradients, débits de base et débits maxima. Le "Flashiness

² **IHA-RVA** : Indicators of Hydrologic Alteration - Range of Variability Approach (Richter et al. 1996, 1997, 1998 ; Shiau et Wu 2004 ; Mathews and Richter 2007 ; The Nature Conservancy 2007 ; Gao et al. 2009).

³ **DHRAM** : Dundee Hydrological Regime Alteration Method (Black et al. 2000, 2005).

⁴ **HIP** : Hydroecological Integrity assessment Process (Olden et Poff 2003 ; Henriksen 2006).

⁵ **IAHRIS** : Indices de Alteracion Hydrologica en RIoS (Martinez et al. 2008 ; Martinez Santa-Maria et Fernandez Yuste 2010 ; Martinez Santa-Maria et al. 2010).

⁶ **HYDMOD-R** : Hydrologie- régime d'écoulement au niveau R (région) (Pfaundler et al. 2011)

Index" est d'ailleurs présenté principalement comme un outil pour apprécier les conséquences des évolutions dans l'utilisation des sols sur les bassins versant.

De manière générale, les différentes méthodes ou indices cités précédemment ne cherchent pas à identifier les différentes éclusées au sein de l'hydrogramme et ne peuvent donc pas en fournir les caractéristiques de chacune. Ces informations sont pourtant intéressantes pour réaliser des croisements avec les observations d'impacts biologiques et tâcher d'en comprendre les mécanismes.

La caractérisation des éclusées hydroélectriques à partir de chroniques de débit à pas de temps suffisamment fin est ainsi toujours une préoccupation d'actualité avec les travaux de Zolezzi et al. (2011) et de Sauterleute (2012). Les méthodes proposées sont intéressantes, mais en l'état elles ne répondent pas à la logique d'un indicateur dans la mesure où elles sont construites sur des études de cas en traitant les données d'une ou de quelques stations hydrométriques, et où elles font appel à la fixation de critères au cas par cas par l'opérateur.

Les mesures d'atténuation des impacts des éclusées hydroélectriques

Si les études sur les impacts biologiques des éclusées sont nombreuses, peu de travaux débouchent en revanche sur des propositions de méthodes et de critères permettant de définir des mesures d'atténuation de ces impacts.

Certaines études font des recommandations à la suite de constats d'impact biologiques, de modélisation des habitats des espèces et/ou de modélisation du fonctionnement des aménagements hydroélectriques, mais sans avoir pu mettre en œuvre les mesures proposées et donc en évaluer l'efficacité. En France, suite aux travaux de groupe « éclusées », des recommandations sont émises par Sabaton et al. (1995) et Valentin (1997) pour la fixation du débit de base vis-à-vis des alevins ou les conditions d'habitat pendant les éclusées. Dans la bibliographie internationale, on peut notamment citer les travaux de Gibbins et Acornley (2000) sur la rivière North Tyne (UK), Halleraker et al. (2007) sur la rivière Surna (NOR). Heller et Schleiss (2011) présentent la conception d'un ouvrage de démodulation des éclusées à usages multiples sur le Rhône en Suisse. Plus récemment, les travaux de Olivares (2008), de Bieri (2012) et Person (2013) couplent des modélisations des habitats des espèces et du fonctionnement des aménagements hydroélectriques pour apprécier les rapports coûts / bénéfices de différents scénarii de gestion.

Les études où des mesures de mitigation sont testées et où un retour d'expérience est acquis sur leur efficacité s'avèrent rares. Les travaux de Travnichek et al. (1995), Connor et Pflug (2004), Patterson et Smokorowski (2010) et Harnish et al. (2014), tous réalisés sur la côte ouest des USA ou du Canada, ainsi que ceux menés en France sur la Dordogne et la Maronne (voir Tableau 9 en page 116) sont à ce titre remarquables. Ces quelques exemples démontrent qu'il est possible de significativement atténuer les impacts des éclusées hydroélectriques. Cependant, les mesures mises en œuvre dans études outre-Atlantique ne sont pas aisément transférables et généralisables aux cours d'eau français étant donné notamment les différences entre les contextes biologiques.

Aujourd'hui, on manque donc de méthodes et de retours d'expérience pour, sur un cours d'eau donné, définir de manière pertinente des règles de gestion hydrologique ou des aménagements morphologiques permettant de réduire efficacement les effets des éclusées.

A ce jour, la législation française ne prévoit qu'une disposition d'ordre hydrologique concernant la fixation des débits réservés à l'aval des ouvrages, sans différencier les tronçons « simplement » court-circuité et les tronçons subissant des éclusées. Il n'y a aucune autre disposition prévue que ce soit en termes de mesures hydrologiques vis-à-vis des débits maximaux, des amplitudes ou des gradients des éclusées, ou sur d'autres types de mesures de mitigation (structurelles sur les aménagements hydroélectriques, travaux sur le cours d'eau). Les règlements d'eau de certains aménagements en contiennent cependant. Concernant le débit minimal, la législation fixe l'objectif de garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces, avec une valeur-plancher du débit réservé fixée de manière générale à 10% du débit moyen interannuel du cours d'eau (module) et à 5% du module pour les ouvrages qui contribuent, par leur capacité de modulation, à la production d'électricité en période de pointe de consommation (liste des aménagements fixée par décret) (article L.214-18 du Code de l'Environnement). Des éclusées peuvent ainsi s'inscrire sur un débit de base de 5% du module. La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006 a d'autre part introduit la possibilité de moduler la valeur du débit réservé selon les périodes de l'année sous réserve que la moyenne annuelle des valeurs ne soit pas inférieure à la valeur-plancher, et que la valeur minimale reste supérieure à la moitié de la valeur-plancher. Dans le cas des ouvrages de

production de pointe, on peut donc théoriquement adopter sur certaines périodes une valeur de débit réservé égale à 2.5% du module.

Objectifs et plan des travaux

Afin de pouvoir mieux décrire les caractéristiques effectives des régimes d'éclusées, les travaux ont tout d'abord porté sur la **mise au point d'une méthode de repérage et de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes** (partie 3). Cela a nécessité au préalable de **caractériser les gradients des variations de débit en hydrologie naturelle** (partie 2) de façon à pouvoir établir des critères de discrimination entre les éclusées et les variations naturelles.

Un **indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique induite par les éclusées** a ensuite été construit (partie 4) dans le but de fournir aux gestionnaires un outil de pré-diagnostic et de suivi des évolutions spatiales et temporelles des régimes d'éclusées.

Enfin, une **réflexion a été menée sur les études, méthodes et critères pour la définition des mesures d'atténuation des impacts des éclusées** (partie 5). Cette réflexion s'est appuyée d'une part sur une importante revue bibliographique, et d'autre part sur plusieurs études de cas sur des cours d'eau du Massif Central (Dordogne, Maronne, Creuse), des Pyrénées (Gave d'Ossau, Lez) et du Jura (Doubs franco-suisse).

2. ETUDE DES GRADIENTS DES VARIATIONS DE DEBIT EN HYDROLOGIE NATURELLE

2.1. Objectifs de l'étude des gradients des variations de débit naturelles

A partir de l'étude d'un nombre aussi conséquent que possible de stations à l'**hydrologie naturelle** ou très peu perturbée, **les objectifs sont (1) de caractériser les gradients des variations de débit à la hausse et à la baisse et (2) d'exploiter ces résultats pour la fixation des critères pour la sélection des éclusées hydroélectriques**. La constitution du jeu de données hydrologiques est tout d'abord présentée. La méthodologie de traitement des hydrogrammes est ensuite détaillée. Quelques résultats par station illustrent certains constats. L'exploitation de l'ensemble des résultats pour la fixation des critères de repérage des éclusées hydroélectriques est enfin présentée.

2.2. Constitution du jeu de données de stations hydrométriques à l'hydrologie naturelle

Les données hydrologiques regroupées proviennent de la banque HYDRO et d'EDF. Pour constituer ce jeu de données, on a cherché des **données d'hydrologie naturelle** sur des cours d'eau concernés ou qui pourraient être concernés par la problématique des éclusées, c'est-à-dire :

- sur des cours d'eau touchés par des éclusées, des stations hydrométriques situées en amont des aménagements hydroélectriques, ou en aval mais pour lesquelles on dispose alors des données antérieures aux aménagements,
- des stations situées sur des cours d'eau voisins de ceux touchés par les éclusées (affluents).

Concrètement, les stations ont été recherchées dans les départements :

- 9, 11, 31, 64; 65 et 66 pour les Pyrénées,
- 3, 7, 11, 12, 15, 18, 19, 23, 30, 34, 36, 42, 43, 46, 48, 63, 81, 82 et 87 pour le Massif Central,
- 4, 5, 6, 26, 38, 69, 73, 74, 83 et 84 pour les Alpes,
- 1, 25, 39, 70 et 90 pour le Jura,
- 54, 67, 68 et 88 pour les Vosges,
- 2A et 2B pour la Corse,
- Et de manière ciblée sur la Rance (22) et la Sélune (50) dans le Massif Armoricaïn.

De fait, les stations se situent principalement dans les massifs montagneux des Pyrénées (23), du Massif Central (36), des Alpes (20) et du Jura (9), ainsi que dans les Vosges (3), en Corse (4) et dans le Massif Armoricaïn (2) (Tableau 1). Le caractère naturel ou très peu perturbé de l'hydrologie des stations a été validé préalablement au traitement par un examen visuel détaillé (inspection des hydrogrammes année par année). Au final, **97 stations ont été retenues** ; leurs caractéristiques sont reportées en annexe 1. La Figure 7 présente une cartographie des stations à l'hydrologie naturelle.

A minima 10 et en moyenne 16 années de chroniques ont été traitées pour chaque station ; les travaux portent ainsi sur le **traitement de 1 575 années de chroniques hydrologiques**. Des données à différents pas de temps ont été utilisées. Les données extraites de la banque HYDRO sont soit des débits à pas de temps variables (QTVAR 5%), soit des débits moyens journaliers (QMJ). Les données d'EDF sont des débits horaires (QH). Les chroniques de débits à pas de temps variables ou au pas de temps horaire rendent compte fidèlement des variations et permettent une évaluation précise de leurs gradients. Les chroniques de débits moyens journaliers peuvent amener à sous-estimer les gradients des variations se déroulant en moins d'une journée. C'est toutefois le seul type de données dont on dispose pour les données anciennes, antérieures aux aménagements hydroélectriques. Leur emploi a été limité aux cours d'eau de module supérieur à 10 m³/s, sur lesquels les variations se déroulent plus lentement et les risques de sous-estimation sont moindres. On a eu recours à des chroniques anciennes de débits moyens journaliers compte tenu du manque de données récentes d'hydrologie naturelle sur des grands cours d'eau drainant les massifs montagneux, l'hydrologie de la quasi-totalité de ces cours d'eau étant aujourd'hui notablement influencée. Pour certaines stations situées sur des cours d'eau de module supérieur à 15 m³/s, en complément des

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

chroniques de QTVAR, il a également été fait appel à des débits moyens journaliers pour « gommer » de légères perturbations, non liées à des régimes d'éclusées, apparaissant à faibles débits (type de données noté QTVAR / QMJ dans la Figure 6). Cela a permis d'extraire des valeurs de gradients plus fiables pour les lentes variations se déroulant sur les gammes de débit en deçà du module (gamme 1 à 5 dans le Tableau 1 page suivante)

Les valeurs de module des stations constituant le jeu de données s'échelonnent d'environ $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à plus de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. La Figure 6 présente la répartition du nombre de stations en fonction des valeurs de module et du type de données. On a pu regrouper un nombre conséquent de stations à l'hydrologie naturelle de module inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Les données d'hydrologie naturelle sur des cours d'eau de module supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ drainant des massifs montagneux sont beaucoup plus rares.

Bassin	Massif (ou région)	Nombre de stations hydrométriques		Nombre d'année	
Adour-Garonne	Pyrénées	21	43	373	786
	Massif Central	22		413	
Loire-Bretagne	Massif Central	11		132	
RMC	Pyrénées	2	38	27	557
	Massif Central	3		30	
	Alpes	20		249	
	Jura	9		211	
	Corse	4		40	
Rhin-Meuse	Vosges	3		80	
Seine-Normandie	Massif Armoricain	2		20	
Total		97		1575	

Tableau 1 : Nombre de stations à l'hydrologie naturelle et d'années traitées par bassin et massif montagneux.

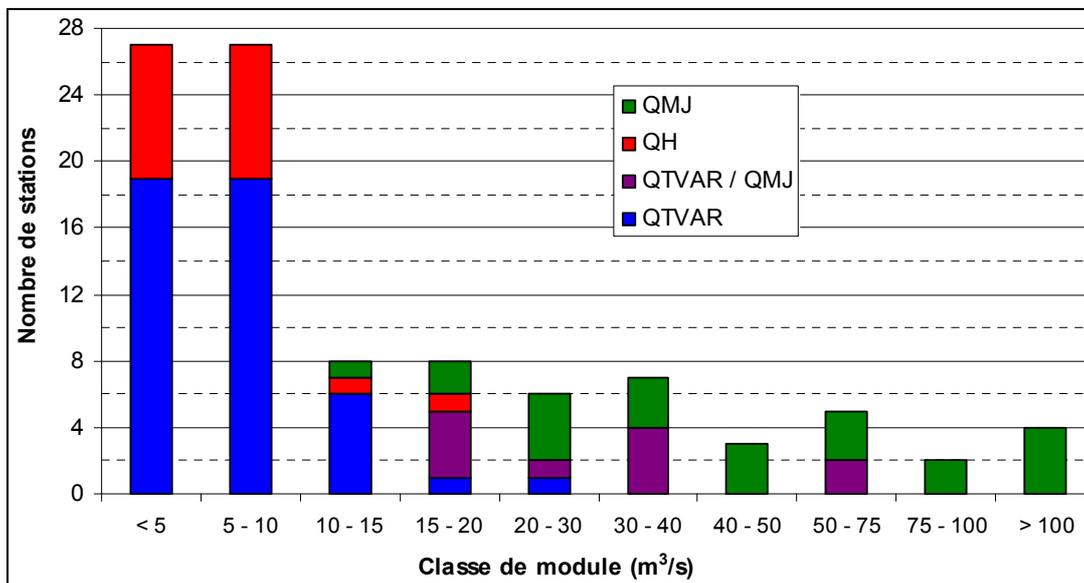


Figure 6 : Répartition du nombre de stations en fonction des valeurs de module et du type de données.

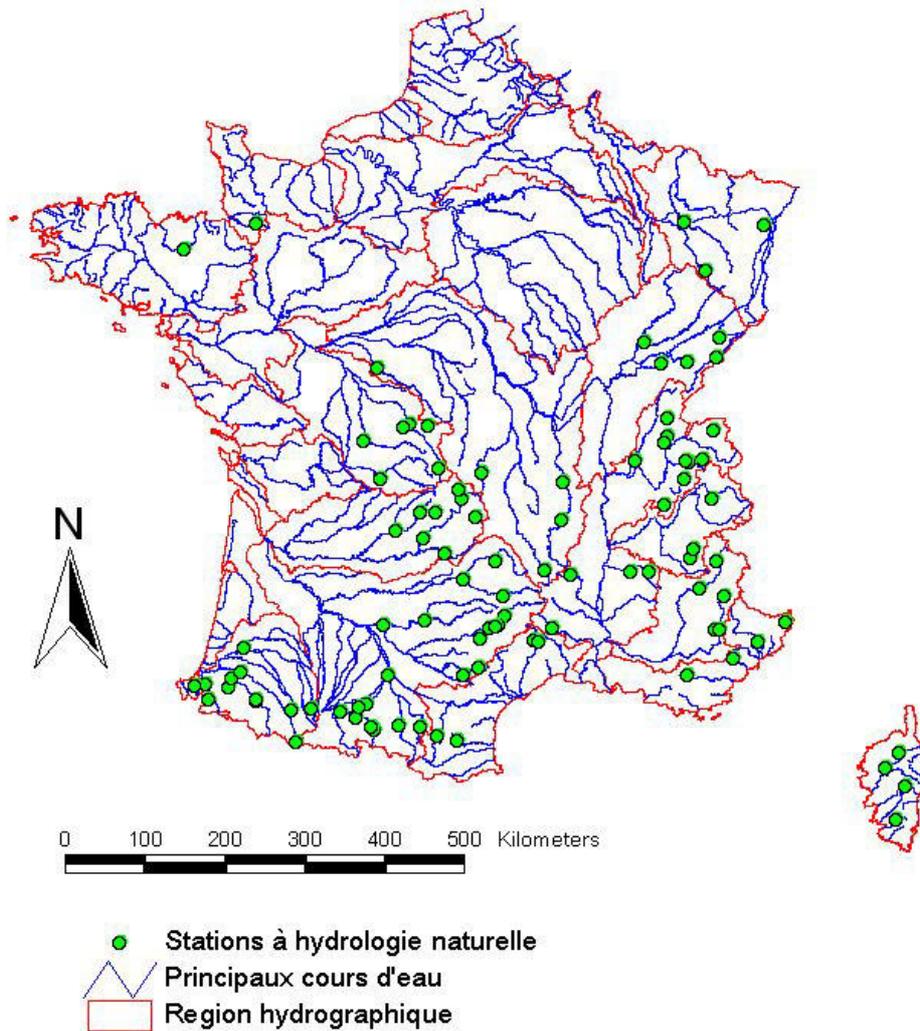


Figure 7 : Cartographie des stations à l'hydrologie naturelle.

2.3. Méthodologie de traitement des hydrogrammes

L'objectif du traitement est d'extraire des hydrogrammes les valeurs de gradients des hausses et des baisses de débit.

Huit gammes de variation ont été définies en fonction du module du cours d'eau, de 5% à 400% (Tableau 2), délimitées par 9 valeur-seuils de débit.

Les variations au-delà de 4 fois le module du cours d'eau (épisodes de crue) n'ont pas été étudiées étant donné que la quasi-totalité des débits d'équipement des aménagements hydroélectriques sont inférieurs à cette valeur (Lauters, 1995). Les quelques aménagements qui présentent des débits d'équipement supérieurs à 4 fois le module font généralement partie de chaîne d'aménagements dont le dernier à l'aval présente un débit d'équipement inférieur à cette valeur.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

N°	Gamme de variation du débit (% du module du cours d'eau)
1	5% - 10%
2	10% - 15%
3	15% - 25%
4	25% - 50%
5	50% - 100%
6	100% - 200%
7	200% - 300%
8	300% - 400%

Tableau 2 : Gammes de variation de débit définies.

Le traitement des chroniques de débit s'effectue sous Excel et est automatisé au travers d'une Macro codée en Visual Basic. La Figure 10 présente un extrait du fichier de traitement des hydrogrammes. A partir des données brutes (couple date-débit, colonne A et B), des données secondaires sur les variations élémentaires entre deux mesures consécutives sont calculées : durée entre les 2 mesures, amplitude de la variation, gradient de la variation (colonne C, D et E). Les valeurs de débit sont typées (colonne F) selon la plage à laquelle elles appartiennent, conformément au Tableau 3. Les changements de type de débit entre chaque paire de mesures sont repérés (colonne G), ainsi que le nombre de valeur-seuil franchie (colonne J). A chaque franchissement d'une valeur-seuil est associée une date interpolée entre les dates des 2 mesures qui l'encadrent (colonne K à S selon le débit-seuil). Dès que 2 valeur-seuils sont consécutivement franchis à la hausse ou à la baisse, cela indique qu'une variation de débit s'est déroulée sur l'ensemble d'une des gammes définies. Les informations suivantes sont alors reportées dans un tableau : numéro de la gamme de variation, valeur du gradient de la variation (en m^3/s et en % du module), date de début et de fin de la variation (Figure 8). La méthodologie de traitement des hydrogrammes est illustrée en Figure 8. Elle est applicable aux différents types de données (QTVAR, QH et QMJ). Pour chacune des 8 gammes de variations, et pour les hausses et les baisses, le dénombrement des valeurs de gradient extraites, ainsi que la production de différents quantiles des valeurs de gradients (min, max, 1^{er} et 9^{eme} décile, 1^{er} et 3^{eme} quartile, médiane, ...) sont également automatisés.

La méthodologie développée extrait une valeur de gradient sur une gamme de variation, que la variation se soit déroulée de façon continue ou non (les deux cas sont illustrés en Figure 9). Certaines valeurs de gradient sont ainsi calculées en incluant potentiellement des phases de stabilité du débit et/ou d'inversion de tendance. Ces valeurs sous-estiment alors les gradients instantanés effectifs. Le découpage en de multiples gammes de variation, d'amplitude de plus en plus faible vers les bas débits, limite toutefois le phénomène. L'opportunité de ne prendre en compte que les variations de débit continues a été envisagée et testée, mais n'a pas été retenue. Cette approche s'avère en fait difficile à mettre en œuvre en pratique, les grandes variations dans les chroniques de débit incluant fréquemment des variations élémentaires (entre 2 mesures consécutives) où le débit est stable, voire où la tendance s'inverse. Cela se produit d'autant plus que le pas de temps de la chronique est fin et que les événements sont lents. Cela est donc particulièrement problématique pour les baisses dans les gammes de bas débits.

Plage de débit	Type de débit
$\leq 5\%$	1
] 5% - 10%]	2
] 10% - 15%]	3
] 15% - 25%]	4
] 25% - 50%]	5
] 50% - 100%]	6
] 100% - 200%]	7
] 200% - 300%]	8
] 300% - 400%]	9
> 400%	10

Tableau 3 : Définition des types de débit.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

	A	B	C	D	E
1	Gamme de variation	Gradient de hausse (m ³ /s)	Gradient de hausse (% mod)	Date avant hausse	Date après hausse
2	1	0.00	0.01%	11/08/1986 08:58	16/09/1986 10:22
3	1	0.06	0.11%	06/07/1989 00:53	07/07/1989 22:02
4	1	0.03	0.05%	09/08/1989 04:39	13/08/1989 05:55
5	1	0.02	0.03%	24/07/1998 16:00	31/07/1998 12:21
6	1	0.04	0.08%	02/09/1998 02:24	04/09/1998 20:25
7	1	0.04	0.06%	03/09/2003 12:00	06/09/2003 20:21
8	1	0.05	0.08%	29/07/2005 05:15	31/07/2005 19:19
9	1	0.10	0.18%	26/07/2006 14:24	27/07/2006 18:55
10	1	0.01	0.01%	16/08/2006 12:33	08/09/2006 16:47
11	2	0.14	0.24%	17/08/1976 04:13	18/08/1976 01:07
12	2	0.08	0.13%	25/08/1985 21:36	27/08/1985 10:42

Figure 8 : Extrait d'un tableau regroupant les caractéristiques des variations de débit à la hausse.

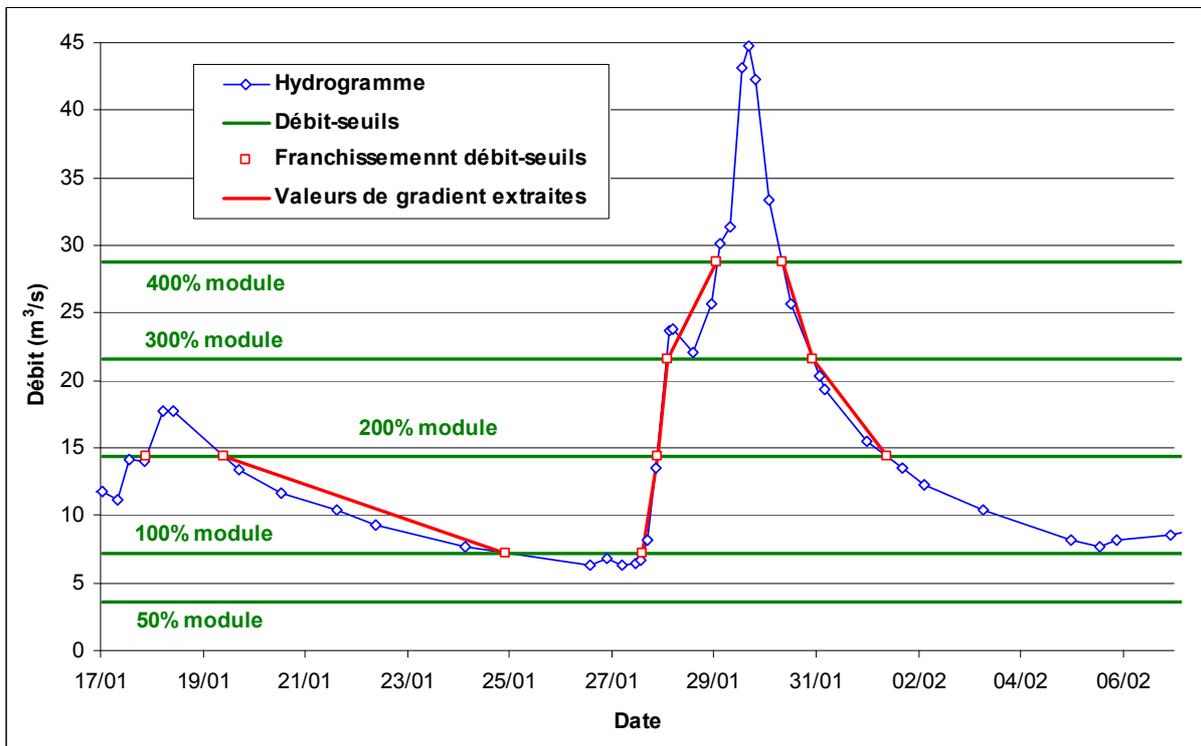


Figure 9 : Illustration de la méthodologie de traitement des hydrogrammes et d'extraction des valeurs de gradient.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
2	Lancer Analyse																			
5	Données brutes		Données secondaires							Date franchissement Débit-Seuil										
6	Date et heure	Débit (m³/s)	Durée entre deux mesures (jours)	Amplitude (m³/s)	Gradient ((m³/s)/h)	"Type de débit"	Changement type	Type min	Type max	Nb seuils franchis	0.36	0.72	1.08	1.80	3.60	7.20	14.40	21.60	28.80	
49	36182.39	9.20	1.73	-1.63	-0.04	7	0			0										
50	36184.13	7.65	2.43	-1.36	-0.02	7	1	6	7	-1						36184.93				
51	36186.56	8.29	0.33	0.51	0.06	6	0			0										
52	36186.90	6.80	0.31	0.53	-0.07	6	0			0										
53	36187.20	6.27	0.27	0.19	0.03	6	0			0										
54	36187.47	6.46	0.08	0.22	-0.41	6	0			0										
55	36187.56	6.60	0.14	1.56	0.47	6	1	6	7	1						36187.61				
56	36187.70	8.24	0.17	5.26	1.30	7	0			0										
57	36187.87	13.50	0.20	10.20	1.54	7	1	7	9	2							36187.89	36188.08		
58	36188.14	23.70	0.05	0.10	0.08	9	0			0										
59	36188.19	23.80	0.40	-1.70	-0.18	9	0			0										
60	36188.60	22.10	0.34	3.60	0.44	9	0			0										
61	36188.94	25.70	0.19	4.40	0.99	9	1	9	10	1										36189.07
62	36189.12	30.10	0.21	1.30	0.26	10	0			0										
63	36189.33	31.40	0.23	11.70	2.09	10	0			0										
64	36189.56	43.10	0.11	1.70	0.62	10	0			0										
65	36189.68	44.80	0.15	-2.50	-0.70	10	0			0										
66	36189.83	42.30	0.26	-8.90	-1.41	10	0			0										
67	36190.09	33.40	0.42	-7.70	-0.76	10	1	9	10	-1										36190.34
68	36190.51	25.70	0.56	-5.40	-0.40	9	1	8	9	-1								36190.93		
69	36191.07	20.30	0.11	-0.90	-0.35	8	0			0										
70	36191.18	19.40	0.83	-3.90	-0.20	8	0			0										
71	36192.00	15.50	0.69	-2.00	-0.12	8	1	7	8	-1										36192.38
72	36192.69	13.50	0.43	-1.20	-0.12	7	0			0										
73	36193.12	12.30	1.14	-1.90	-0.07	7	0			0										

Figure 10 : Vue partielle du fichier de traitement des chroniques de débit : données brutes, données secondaires, repérage des dates de franchissement des valeur-seuils.

2.4. Illustrations des résultats par station

Des figures de résultats pour quelques stations (3 des Pyrénées, 3 du Massif Central et 3 des Alpes) sont présentées dans les pages suivantes (Figure 11 à Figure 13). On a porté sur ces figures certains quantiles caractéristiques de la distribution des valeurs de gradient de hausse et de baisse pour chaque gamme de variation (les 1^{er} et 9^{ème} déciles, les 1^{er} et 3^{ème} quartiles et la médiane). On ne dispose pas toujours de valeurs de gradient pour les gammes de variation 1 (5%-10%), 2 (10%-15%) ou 3 (15%-25%), le débit de certains des cours d'eau étudiés ne descendant pas naturellement en deçà de ces valeurs. Il se peut également que le nombre de valeurs de gradient extraites sur ces gammes soit trop faible (< 10) pour en extraire des valeurs statistiques.

Ces résultats sont présentés pour illustrer 2 constats :

- d'une part, le fait que, **pour une station et une gamme de variation donnée, les gradients des hausses de débit sont plus importants que ceux des baisses de débit,**
- et d'autre part, le fait que **pour une station donnée, les gradients de hausses et de baisses sont globalement d'autant plus faibles que la variation se déroule vers les faibles débits.**

Il apparaît donc important que les critères sur le gradient pour le repérage des éclusées soient différenciés entre les hausses et les baisses et qu'ils soient progressifs selon la gamme de débit sur laquelle se déroule la variation.

Au-delà de l'exploitation qui en est faite pour la fixation des critères sur le gradient pour le repérage des éclusées hydroélectriques, ces résultats par station pourront également venir alimenter les réflexions des études de cas sur la problématique des éclusées.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

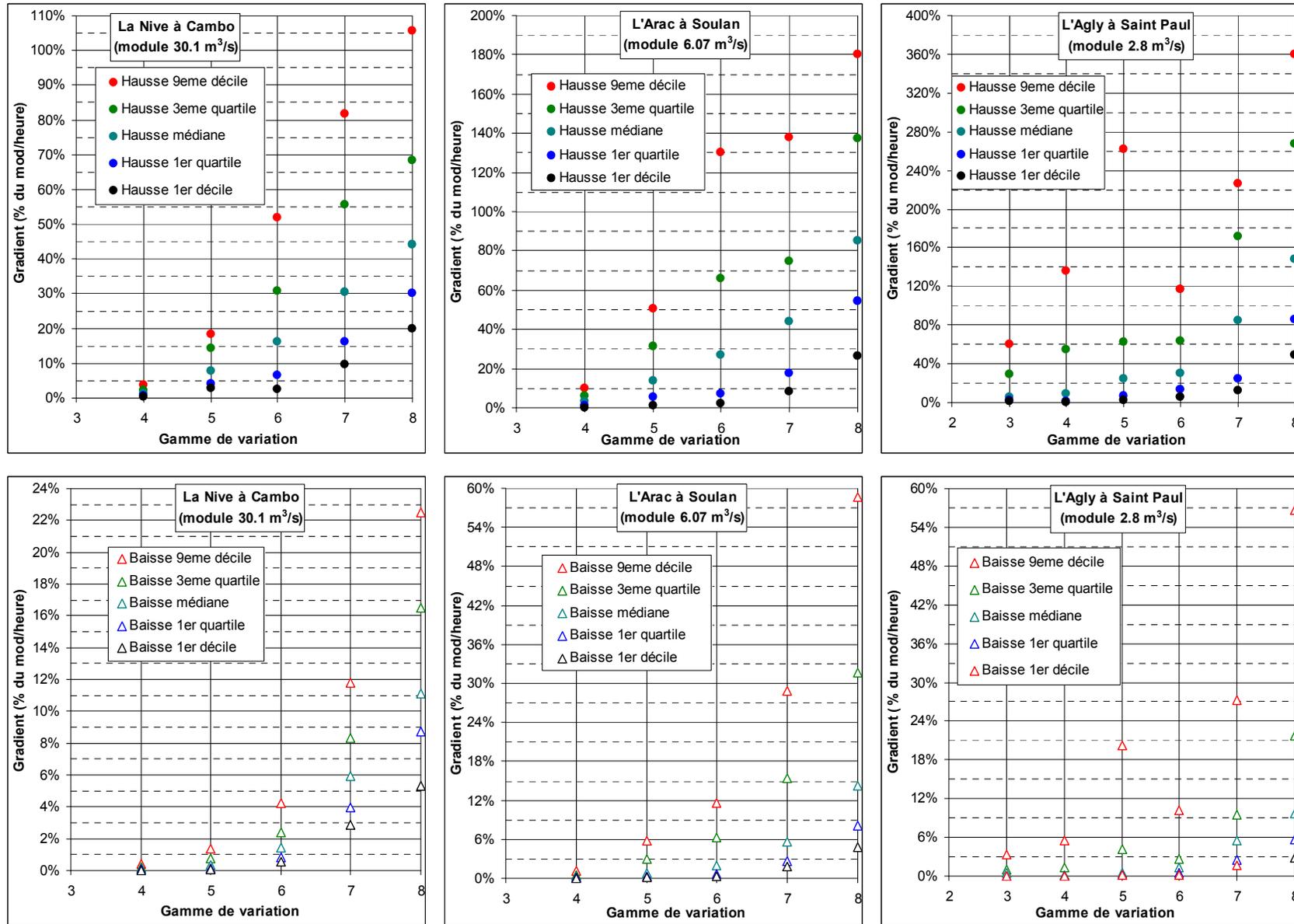


Figure 11 : Valeurs caractéristiques de la distribution des gradients (en % du module / heure) par gamme de variation, pour les hausses et les baisses de débit, pour 3 stations des Pyrénées.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

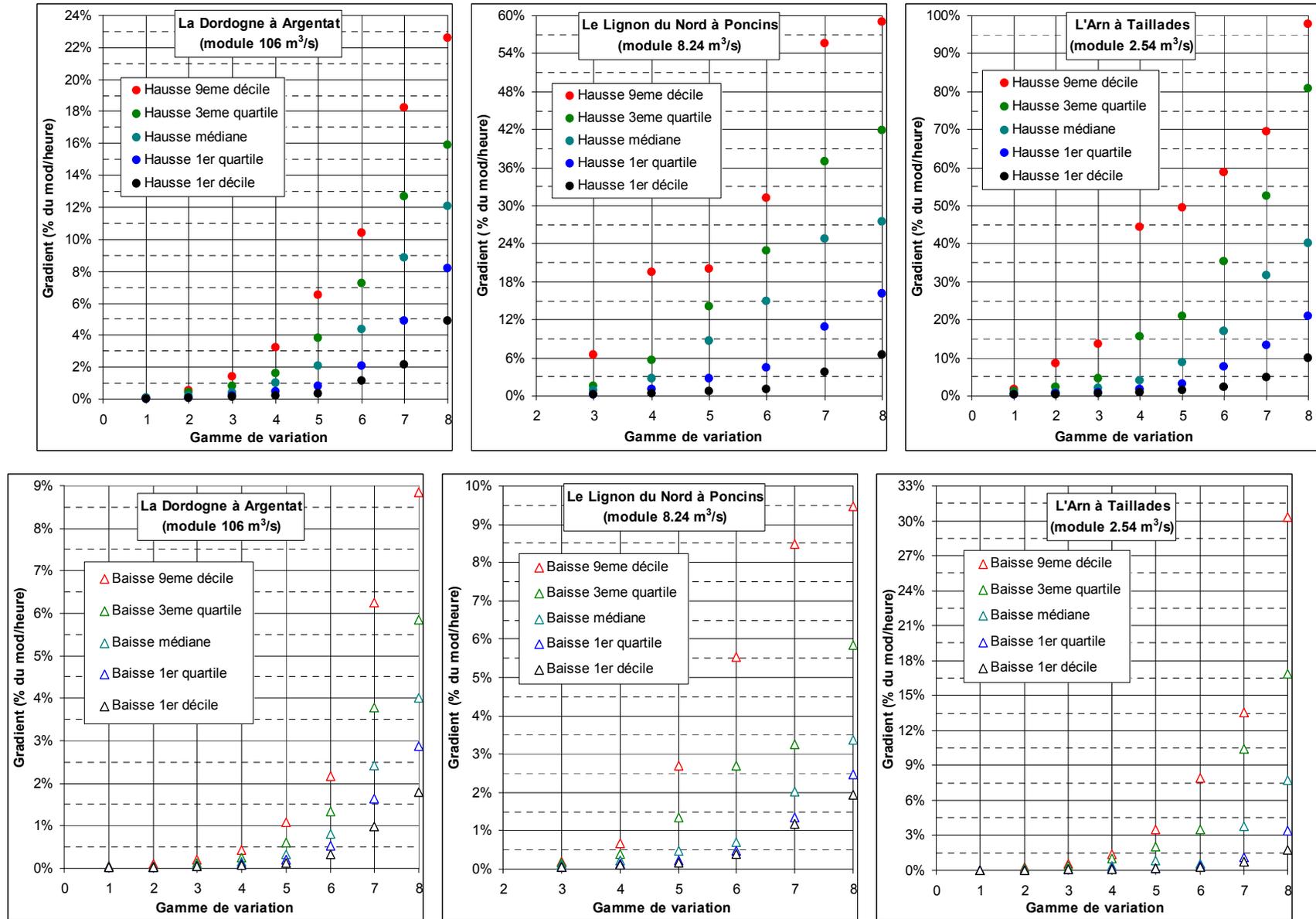


Figure 12 : Valeurs caractéristiques de la distribution des gradients (en % du module / heure) par gamme de variation, pour les hausses et les baisses de débit, pour 3 stations du Massif Central.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

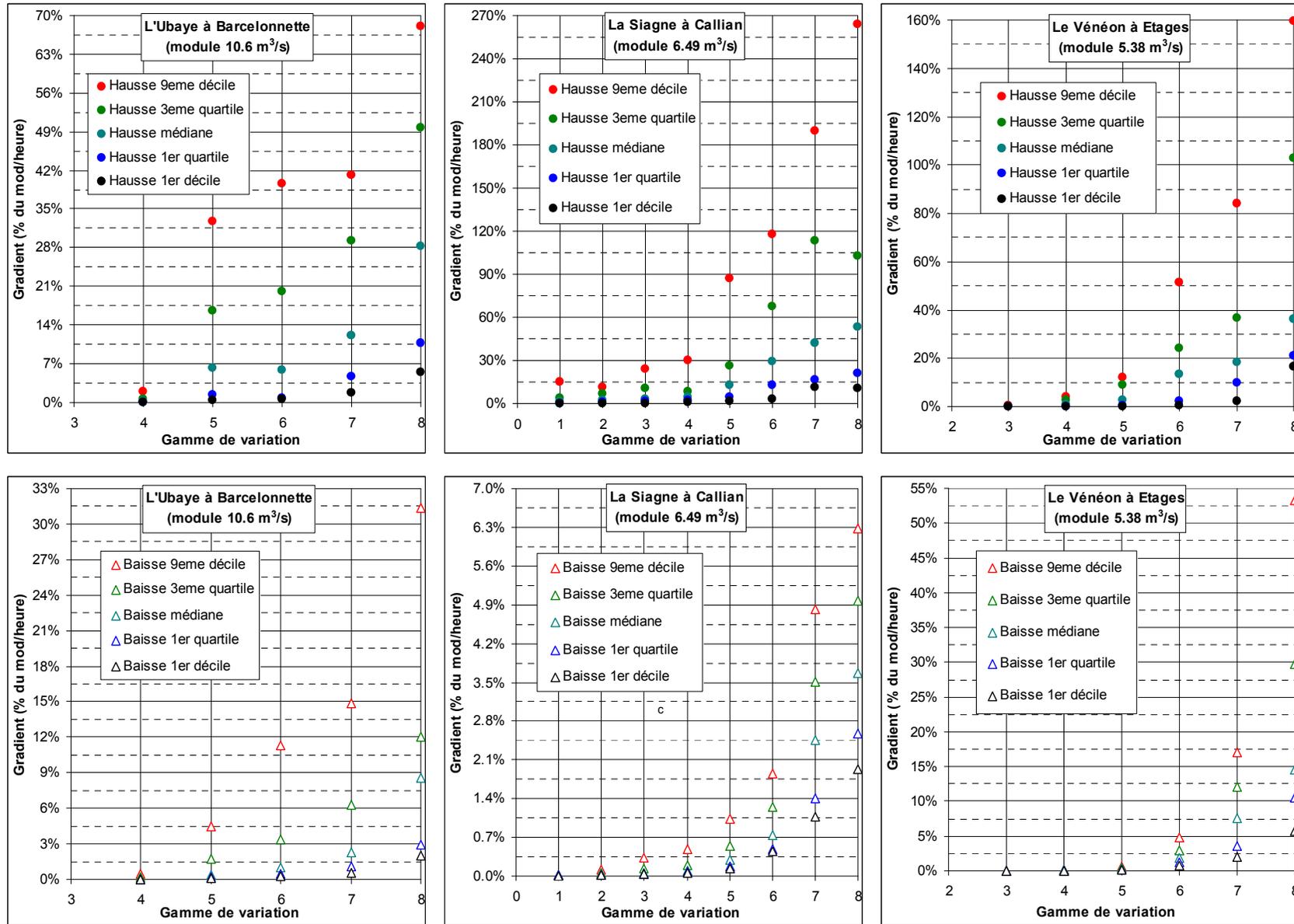


Figure 13 : Valeurs caractéristiques de la distribution des gradients (en % du module / heure) par gamme de variation, pour les hausses et les baisses de débit, pour 3 stations des Alpes.

2.5. Exploitation des résultats pour la fixation des critères pour le repérage des éclusées hydroélectriques

Dans la méthodologie de traitement des hydrogrammes développée par la suite pour la production d'un indicateur de la perturbation hydrologique liée aux éclusées hydroélectriques, la condition de gradient minimal est utilisée dans le but de ne sélectionner que les variations de débit qui sont plus rapides que les variations naturelles.

2.5.1. Etablissement de relations donnant l'ordre de grandeur des gradients naturels maximaux par gamme de variation

La démarche adoptée consiste à prendre en compte – pour chaque station et sur chaque gamme de variation – le 9^{ème} décile des valeurs de gradient de hausse et de baisse, comme valeur représentative des plus forts gradients naturels que l'on peut rencontrer. Un tableau regroupant l'ensemble de ces valeurs de gradients est reporté en Annexe 1. La démarche porte uniquement sur les gammes de variation 3 à 8, donc globalement sur une gamme de variation de 15% à 400% du module, le nombre de données sur les gammes 1 et 2 étant trop faible. On a porté dans les Figure 17 à Figure 22 les graphiques des valeurs de 9^{ème} décile des gradients de baisse de débit (en % du module/heure) en fonction des modules des stations (en m³/s) ; et de même pour les gradients de hausse dans les Figure 23 à Figure 28. Il s'avère que, **pour une gamme de variation donnée, ces valeurs de gradients, pour les hausses comme pour les baisses, ont globalement tendance à décroître au fur et à mesure que la valeur du module du cours d'eau augmente.** Il apparaît donc important que les critères sur le gradient pour le repérage des éclusées soient fonction de la taille du cours d'eau. Au-delà de 50 m³/s de module, on n'observe plus de tendance nette de décroissance.

A partir de ces résultats, nous avons cherché à établir, pour chaque gamme de variation, une relation donnant en fonction du module l'ordre de grandeur des plus fortes valeurs de gradients naturels que l'on peut rencontrer. Pour ce faire, les stations ont été regroupées en 6 classes selon leurs valeurs de module, sur les intervalles : < 4, [4 ; 8[, [8 ; 15[, [15 ; 30[, [30 ; 50[et > 50. La Figure 13 présente le nombre de stations et le type de données selon les classes. A partir de chaque classe, on a créé un point avec :

- pour ordonnée la moyenne des 3 valeurs de gradient les plus fortes, en excluant toutefois les valeurs supérieures à la moyenne plus 2 fois l'écart type,
- et pour abscisse la moyenne des valeurs de module des trois stations prises en compte (sauf pour le dernier groupe, pour lequel on a fixé l'abscisse à 50 m³/s).

Les tableaux présentant le détail des valeurs prises en compte pour la création de ces points sont reportés en Annexe 2. Les points créés sont portés dans les graphiques des Figure 17 à Figure 28 (losanges noirs). Des régressions ont été ajustées sur ces points avec des équations de la forme : $y = 1 / (a x^2 + b x + c)$, en veillant à conserver une décroissance continue des courbes de 1 à 50 m³/s. Les courbes obtenues sont tracées sur les graphiques. Au-delà de 50 m³/s de module, on a adopté une valeur constante de gradient (en % du module/heure) égale à la valeur donnée par la régression pour un module de 50 m³/s.

Les Figure 15 et Figure 16 présentent les relations établies pour les différentes gammes de variation, réunies dans deux graphiques pour les baisses et les hausses de débit respectivement. **La démarche menée a permis d'aboutir à des relations donnant un ordre de grandeur des gradients naturels maximaux à la hausse et à la baisse, progressives selon la gamme de variation du débit (entre 15% et 400% du module) et selon la taille du cours d'eau (entre 1 et 50 m³/s).**

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

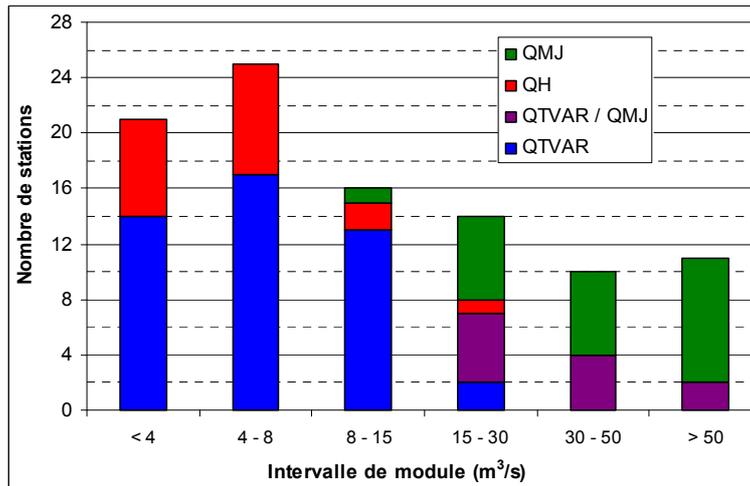


Figure 14 : Nombre de stations et type de données selon les regroupements de stations.

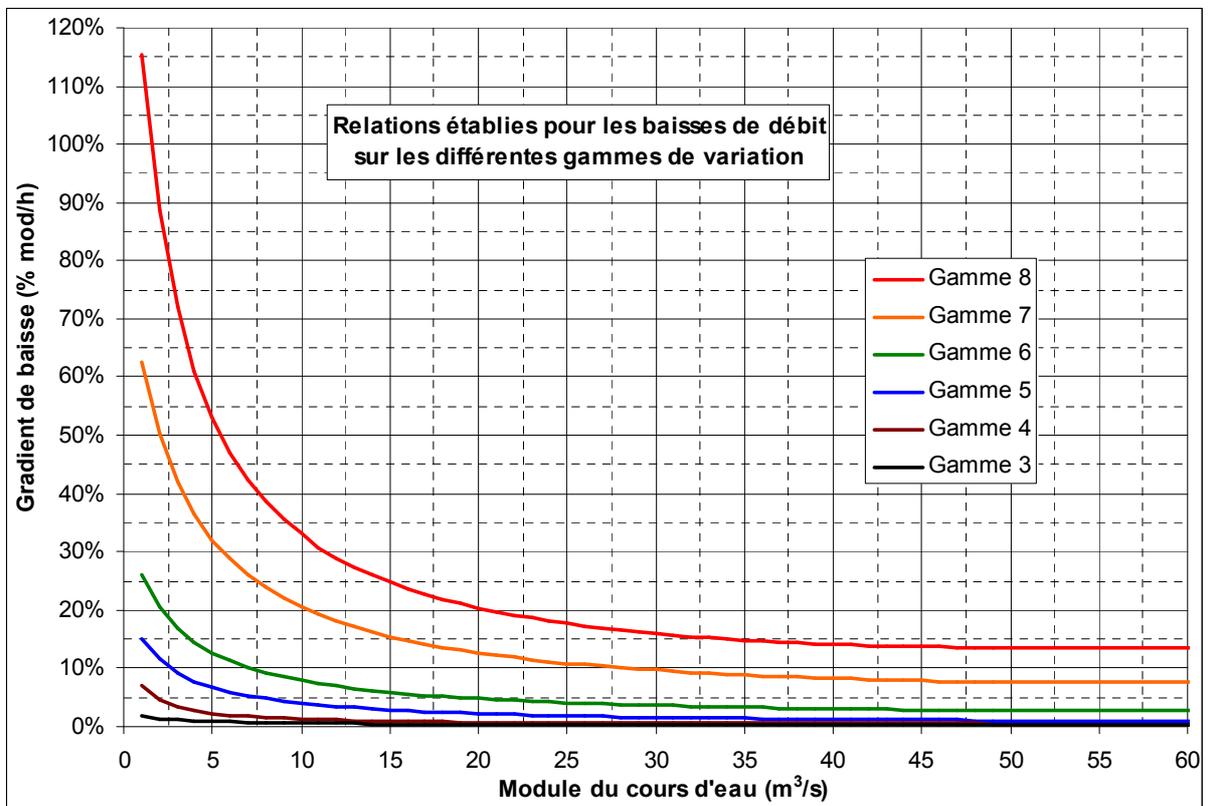


Figure 15 : Relations établies pour les baisses de débit sur les différentes gammes de variation.

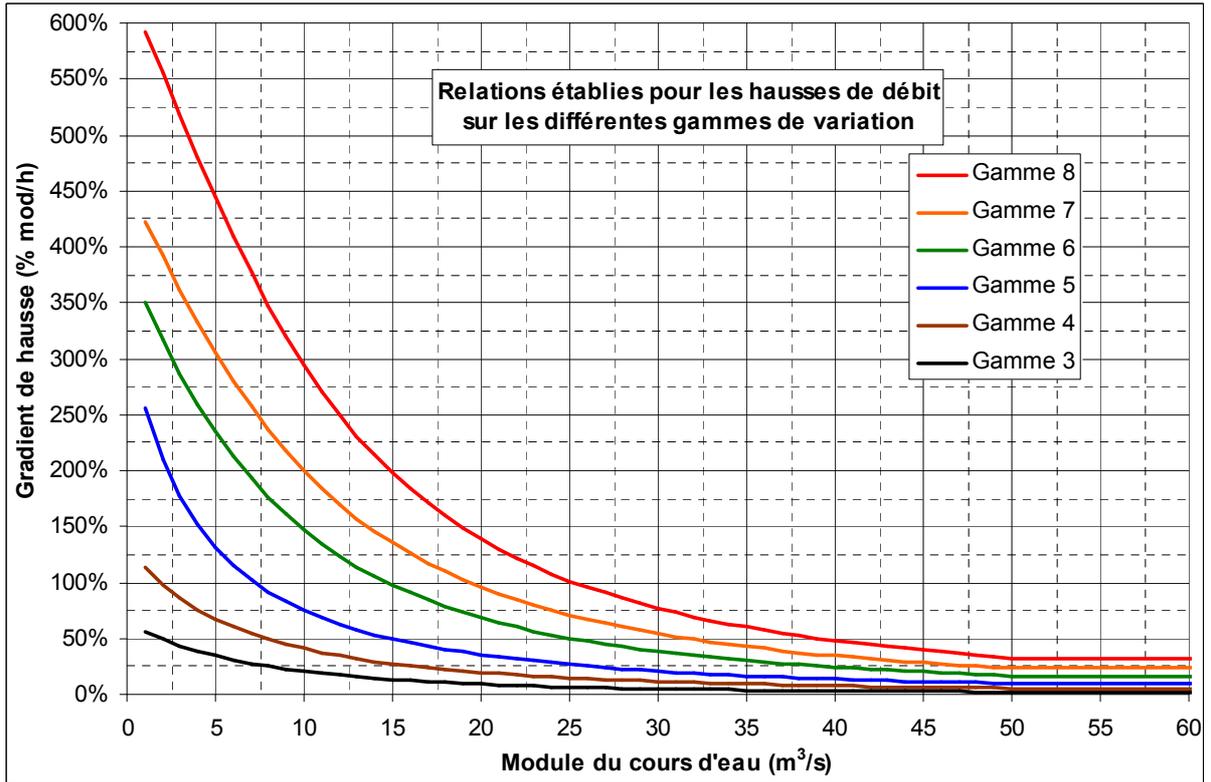


Figure 16 : Relations établies pour les hausses de débit sur les différentes gammes de variation.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

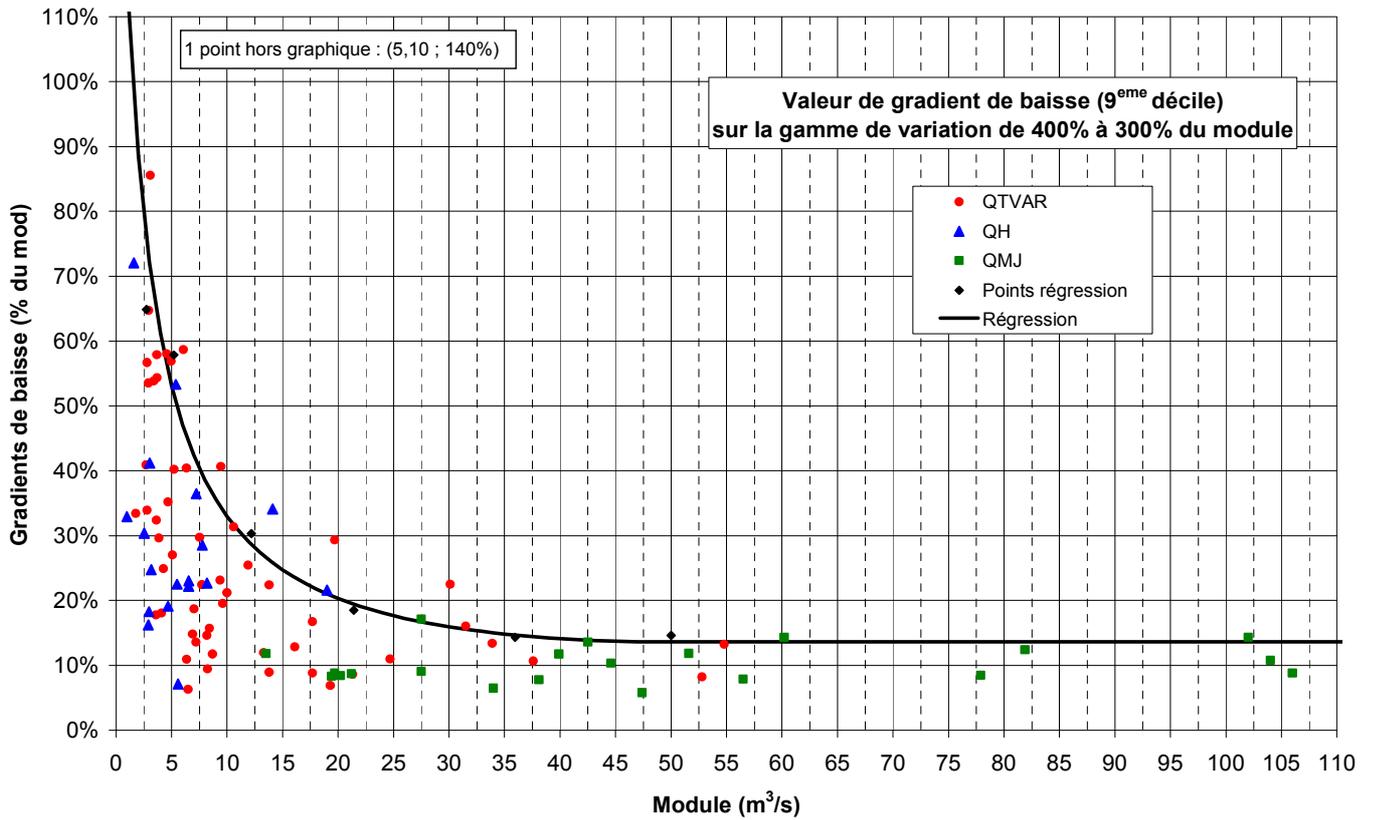


Figure 17 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 8 (400% à 300% du module) en fonction du module des stations.

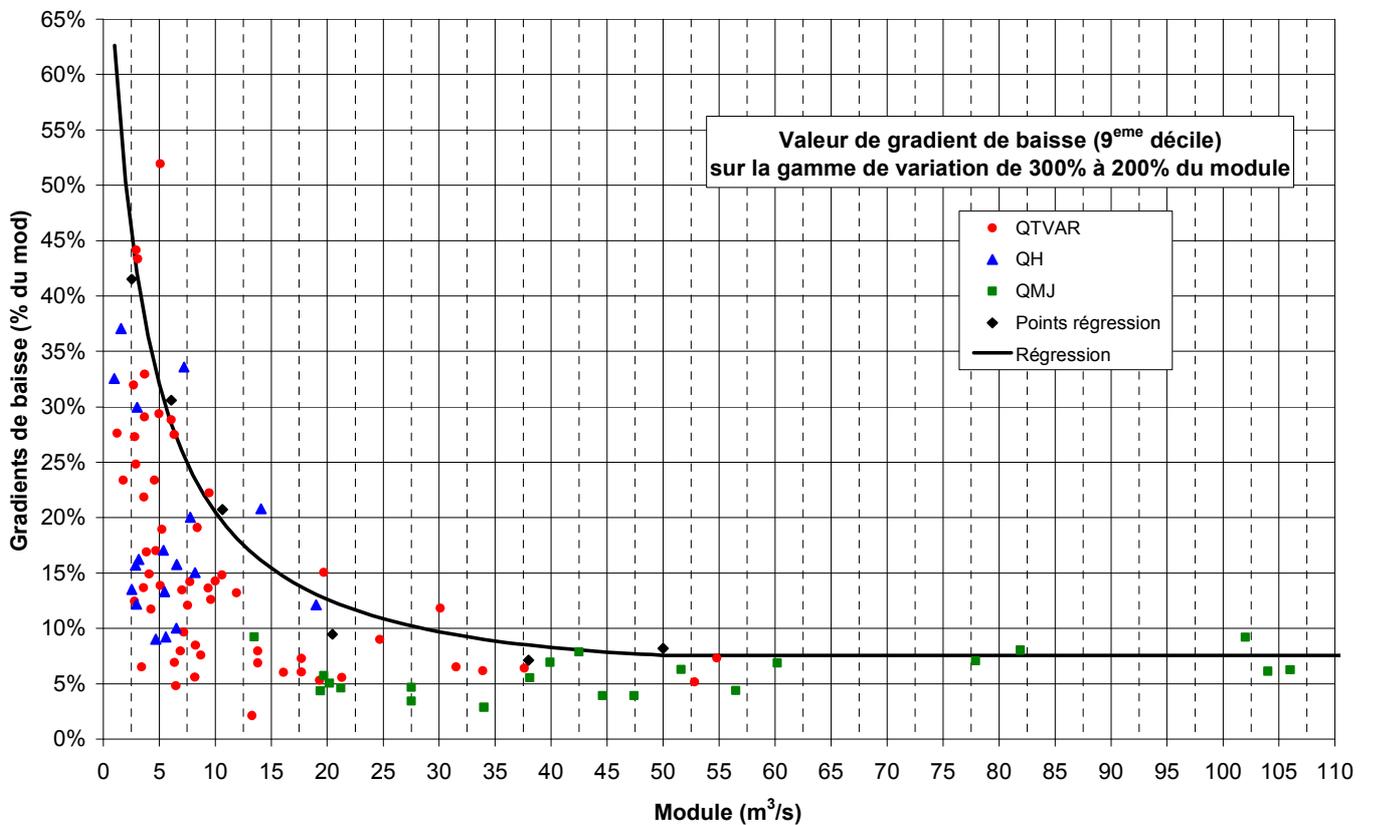


Figure 18 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 7 (300% à 200% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

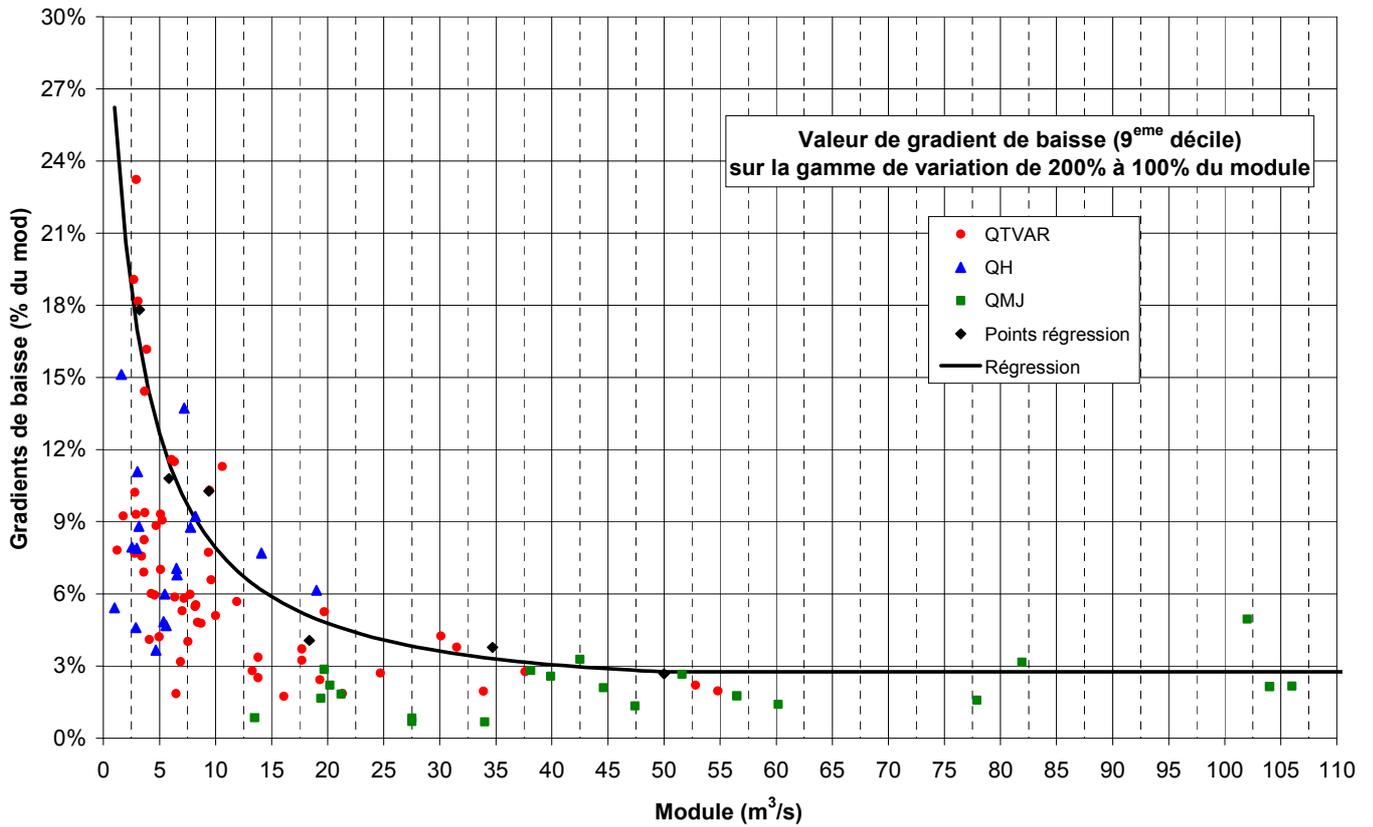


Figure 19 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 6 (200% à 100% du module) en fonction du module des stations.

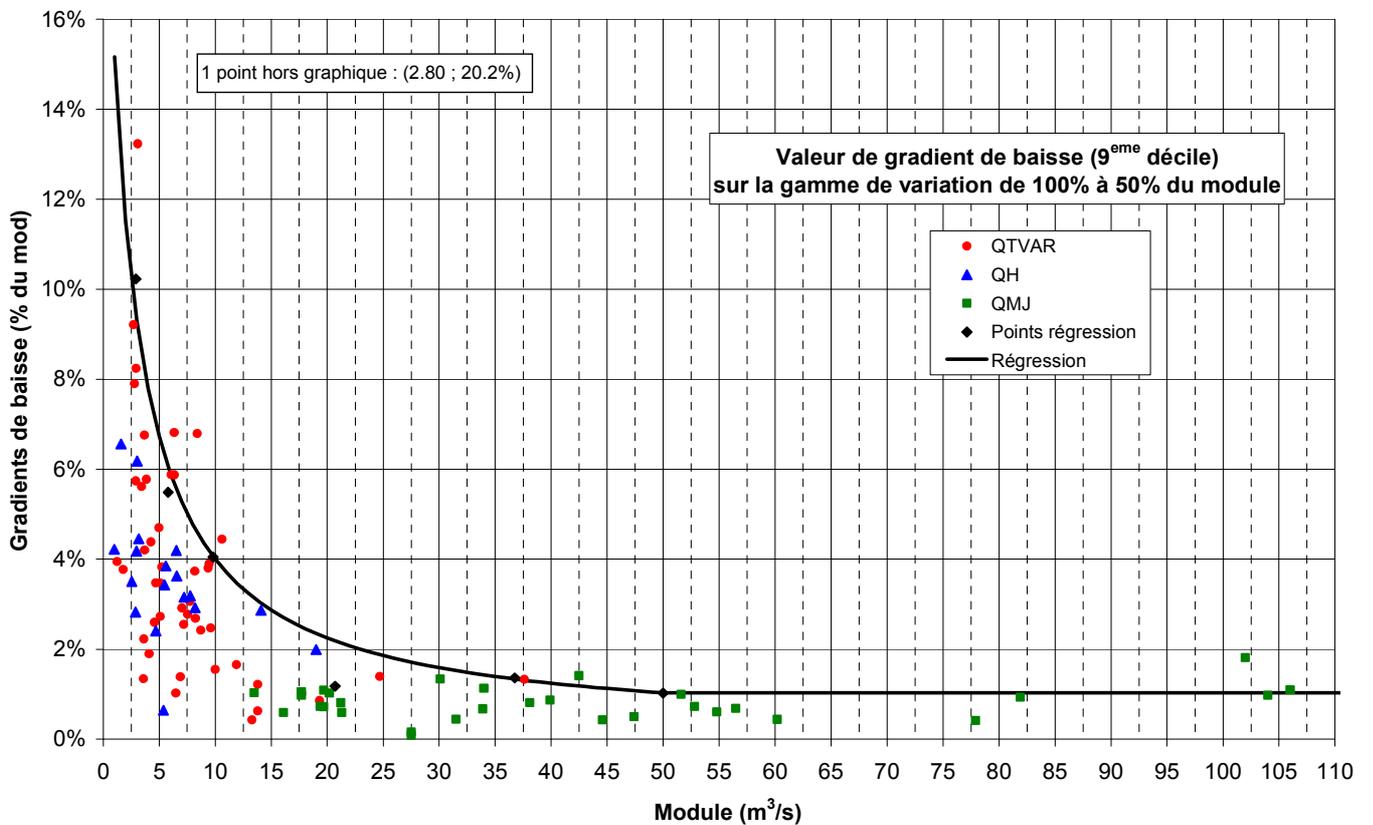


Figure 20 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 5 (100% à 50% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

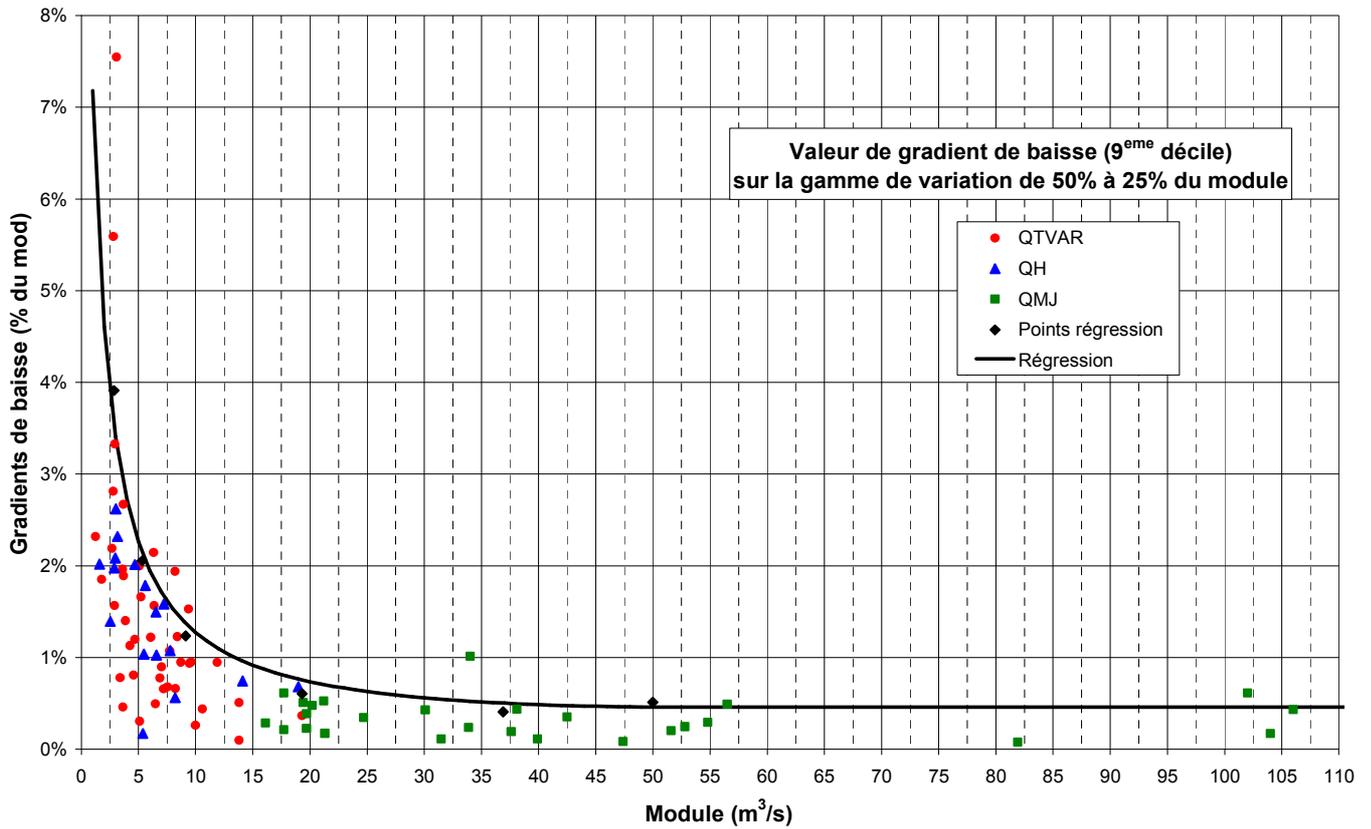


Figure 21 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 4 (50% à 25% du module) en fonction du module des stations.

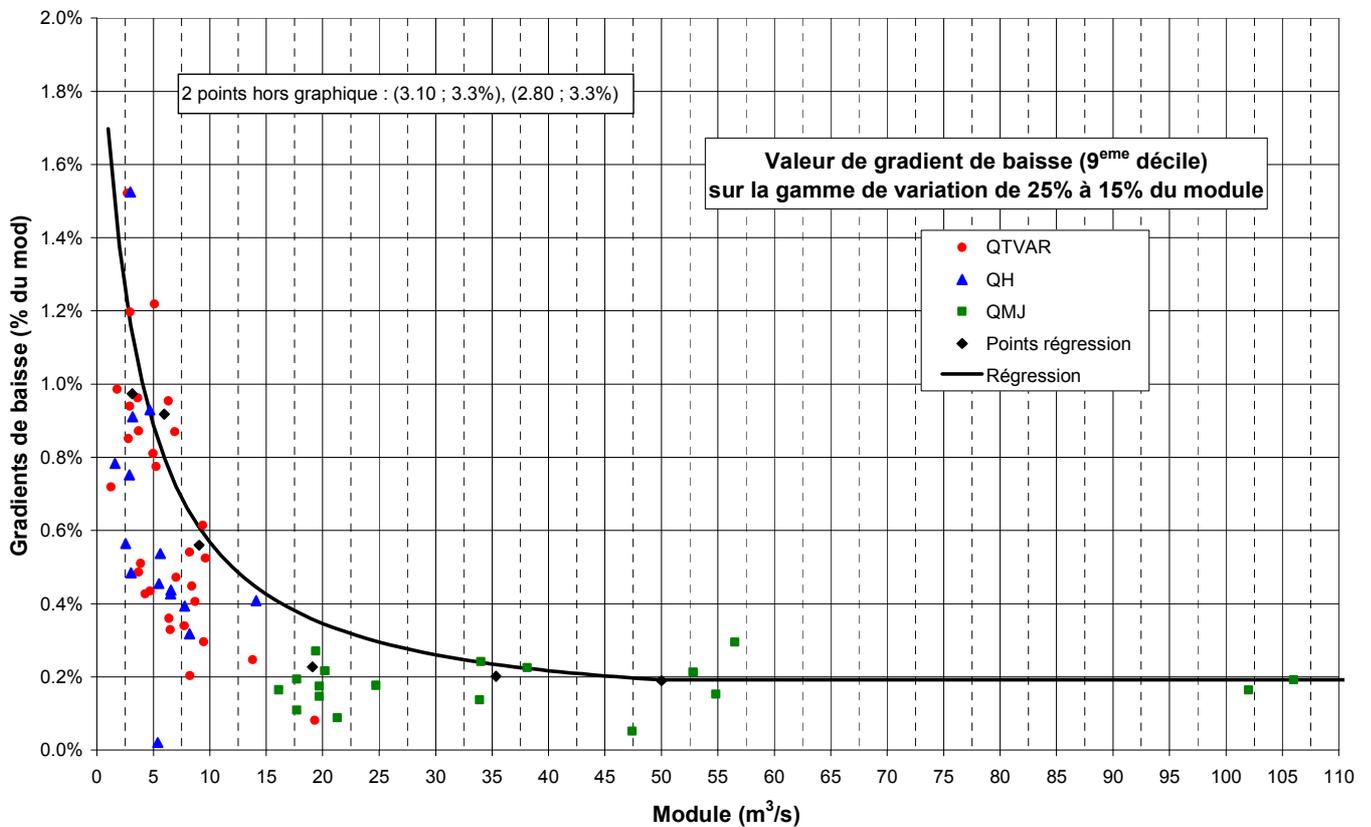


Figure 22 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 3 (25% à 15% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

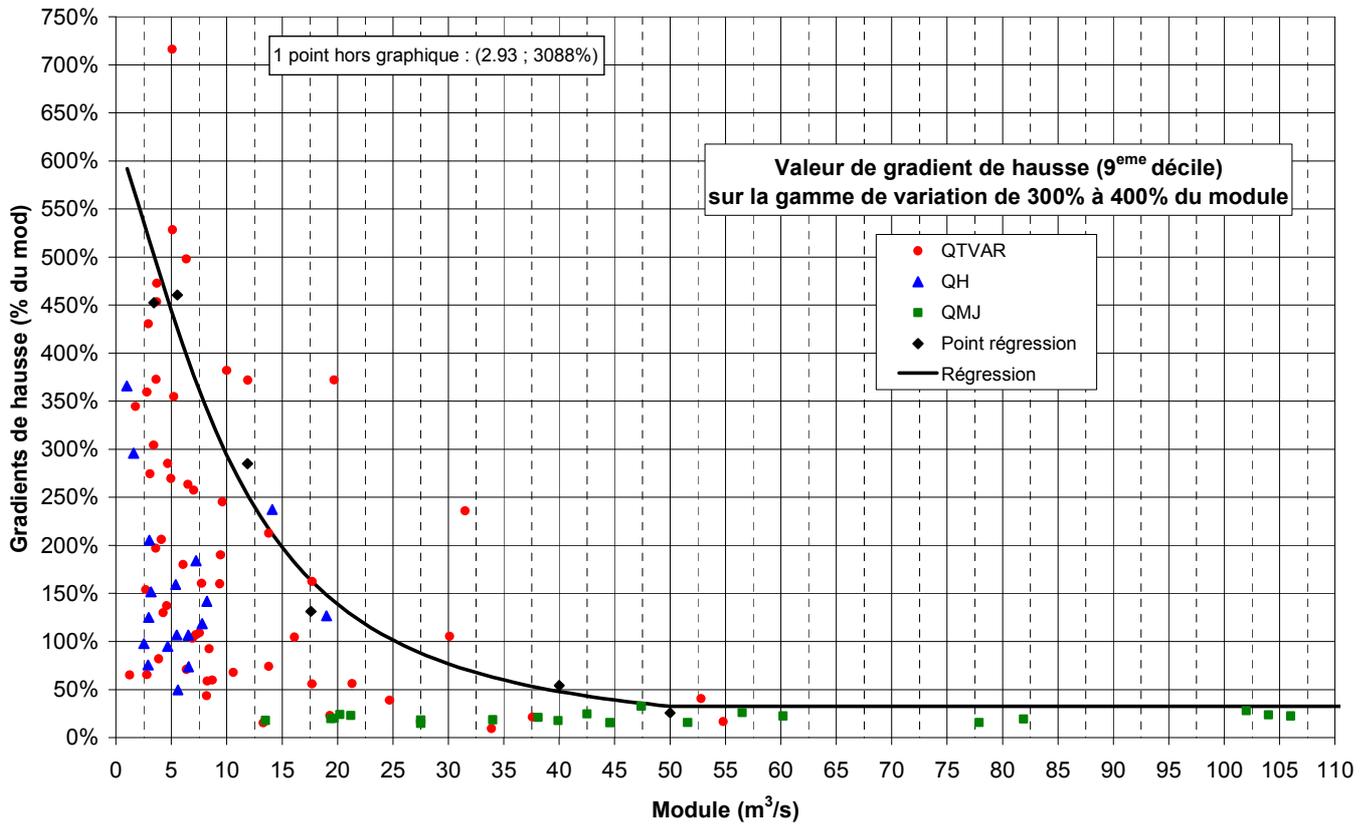


Figure 23 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 8 (300% à 400% du module) en fonction du module des stations.

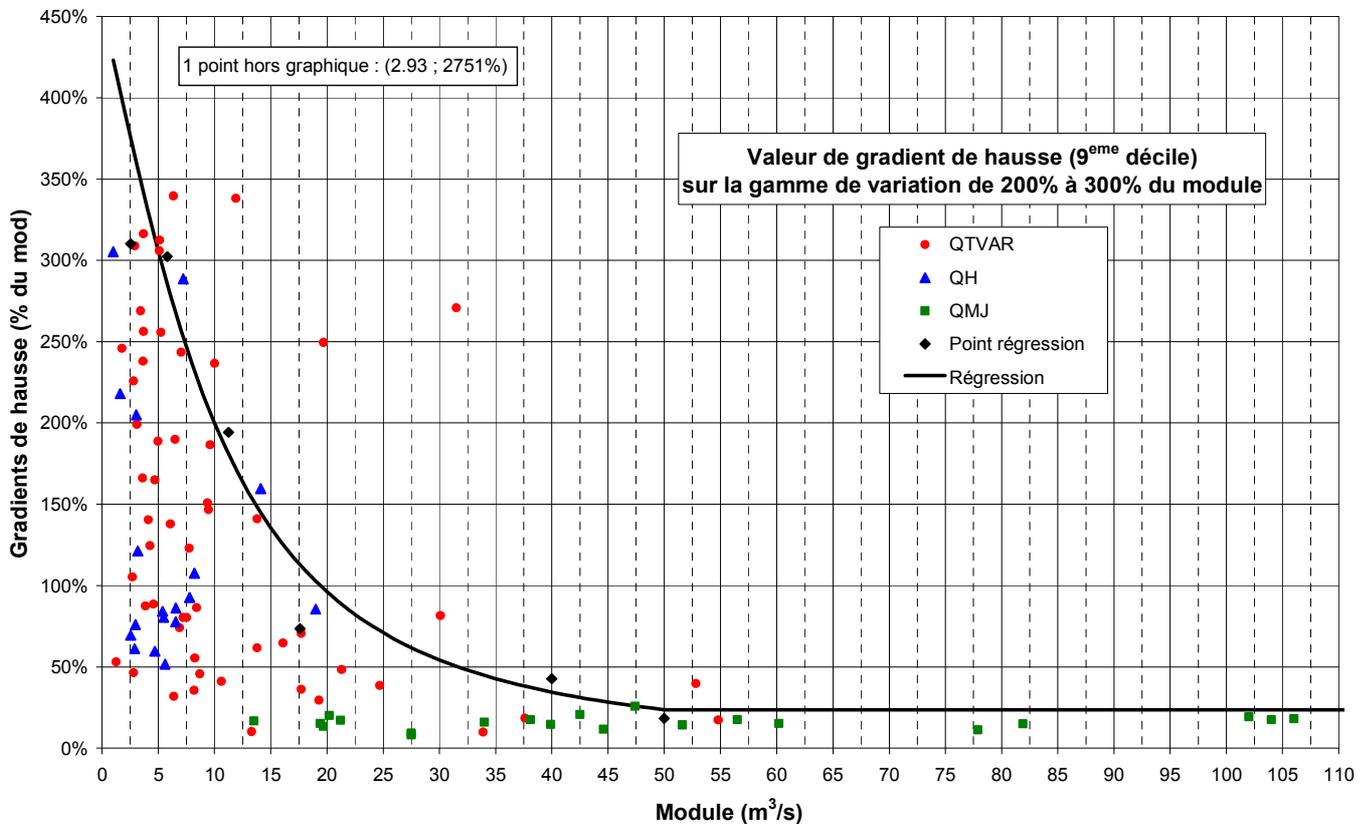


Figure 24 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 7 (200% à 300% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

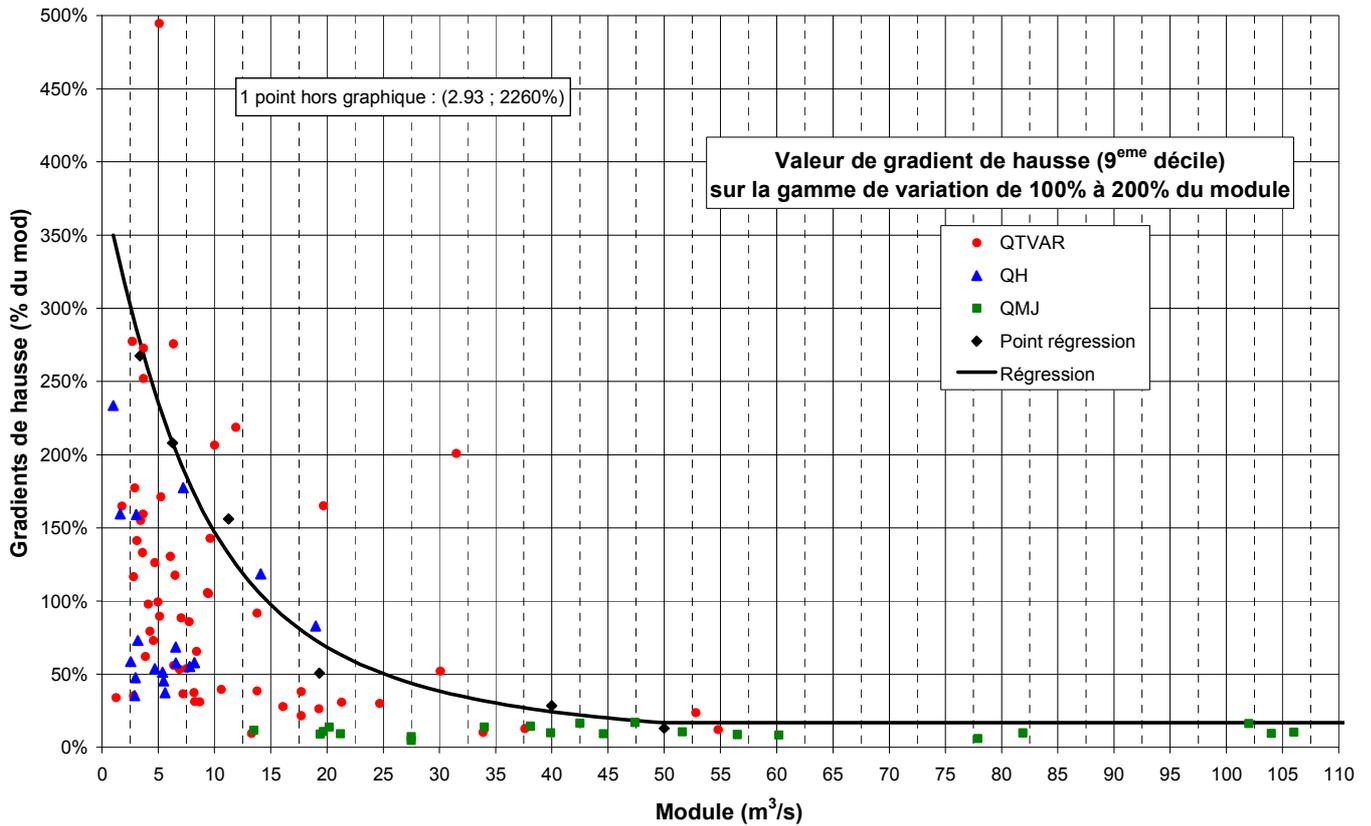


Figure 25 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 6 (100% à 200% du module) en fonction du module des stations.

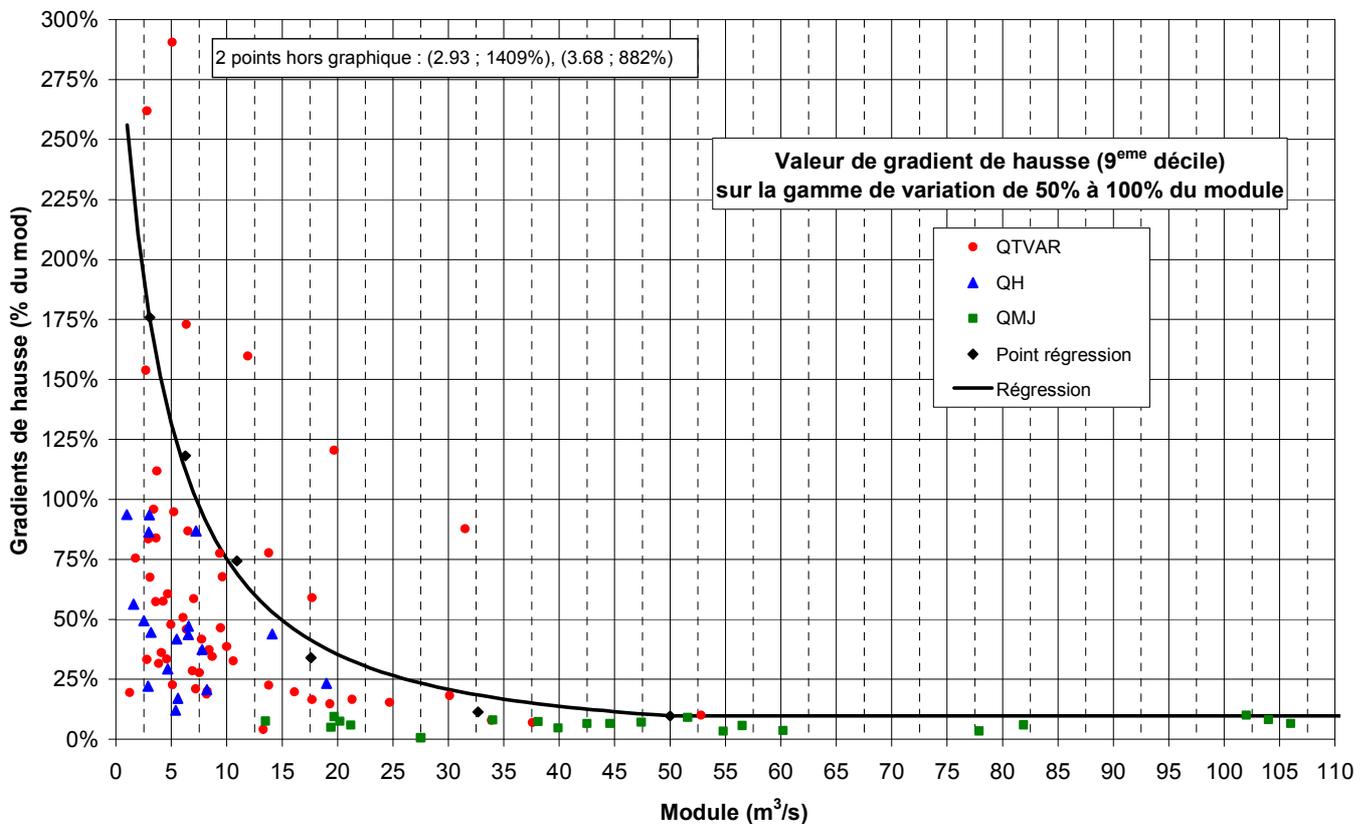


Figure 26 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 5 (50% à 100% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

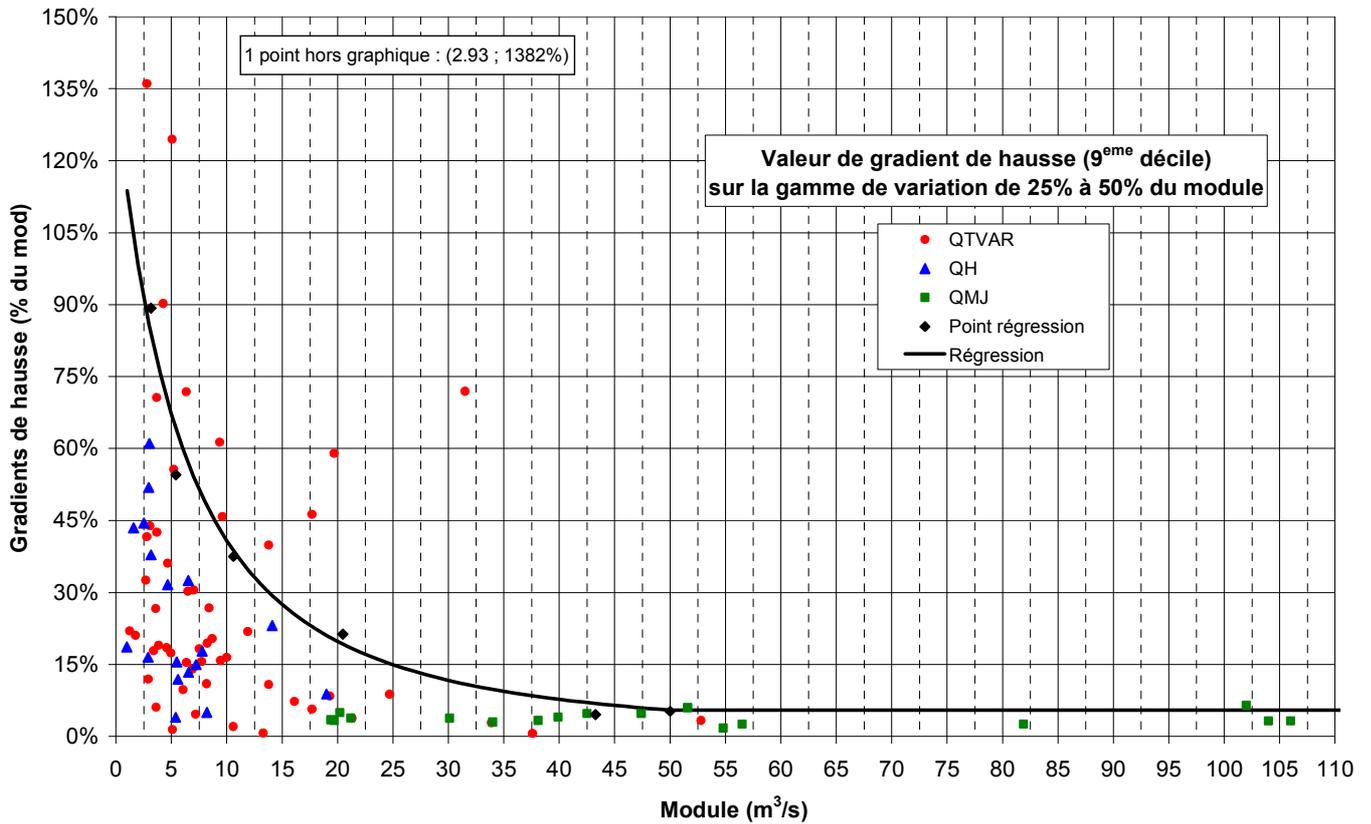


Figure 27 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 4 (25% à 50% du module) en fonction du module des stations.

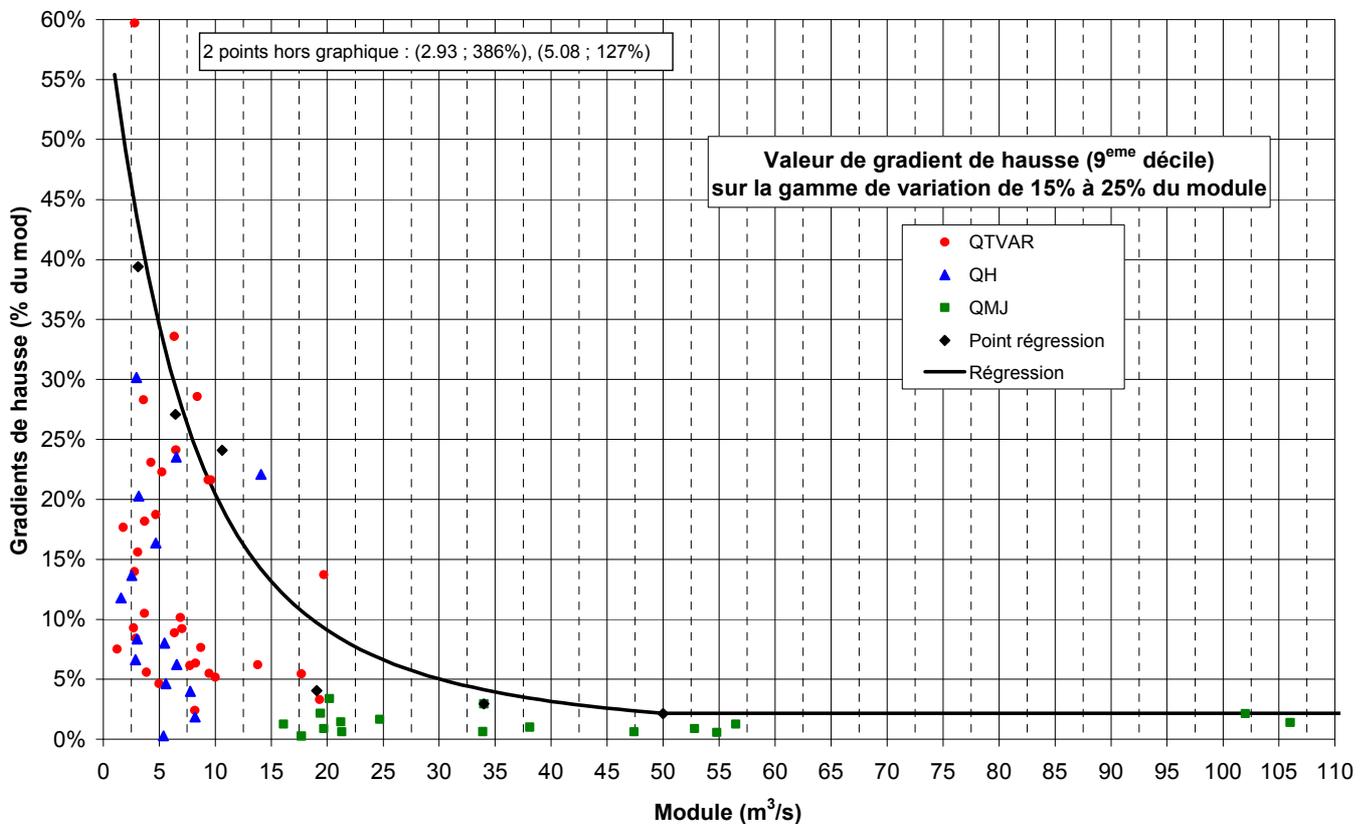


Figure 28 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 3 (15% à 25% du module) en fonction du module des stations.

2.5.2. Reconstitution des hausses et des baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement »

En fonction de la valeur du module du cours d'eau, on a reconstitué les hausses et baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement », en appliquant, sur les 6 gammes de variation du débit entre 15% et 400% du module, les valeurs de gradient maximal données par les relations établies précédemment. Les hausses et les baisses de débit ainsi obtenues sont illustrées en Figure 29 et Figure 30.

Cela amène à considérer par exemple :

- qu'une hausse de débit de 15% à 200% du module se déroule au plus vite naturellement en environ 50 minutes sur un cours de 1 m³/s de module, 1H30 sur un cours de 5 m³/s, 3H45 sur un cours de 15 m³/s, 7H sur un cours de 25 m³/s et 20H sur un cours de 50 m³/s.
- qu'une hausse de débit de 200% à 400% du module se déroule au plus vite naturellement en environ 25 minutes sur un cours de 1 m³/s de module, 35 minutes sur un cours de 5 m³/s, 1H15 sur un cours de 15 m³/s, 2H20 sur un cours de 25 m³/s et 7H15 sur un cours de 50 m³/s.
- qu'une baisse de débit de 400% à 200% du module se déroule au plus vite naturellement en environ 2H30 sur un cours de 1 m³/s de module, 5H sur un cours de 5 m³/s, 10H30 sur un cours de 15 m³/s, 15H sur un cours de 25 m³/s et 20H30 sur un cours de 50 m³/s.
- qu'une baisse de débit de 200% à 15% du module se déroule au plus vite naturellement en environ 16H30 sur un cours de 1 m³/s de module, 37H30 sur un cours de 5 m³/s, en 3.5 jours sur un cours de 15 m³/s, en plus de 5 jours sur un cours de 25 m³/s et en près de 8 jours sur un cours de 50 m³/s.

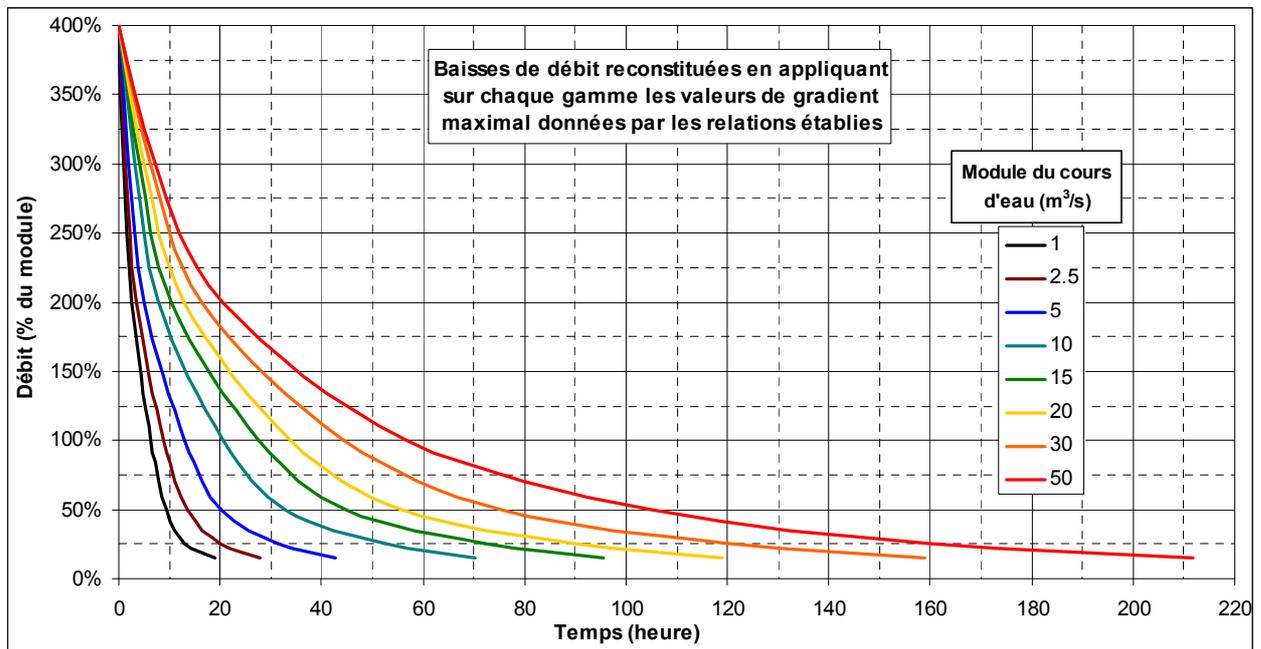


Figure 29 : Baisses de débit reconstituées en appliquant sur chaque gamme les valeurs de gradient maximal données par les relations établies.

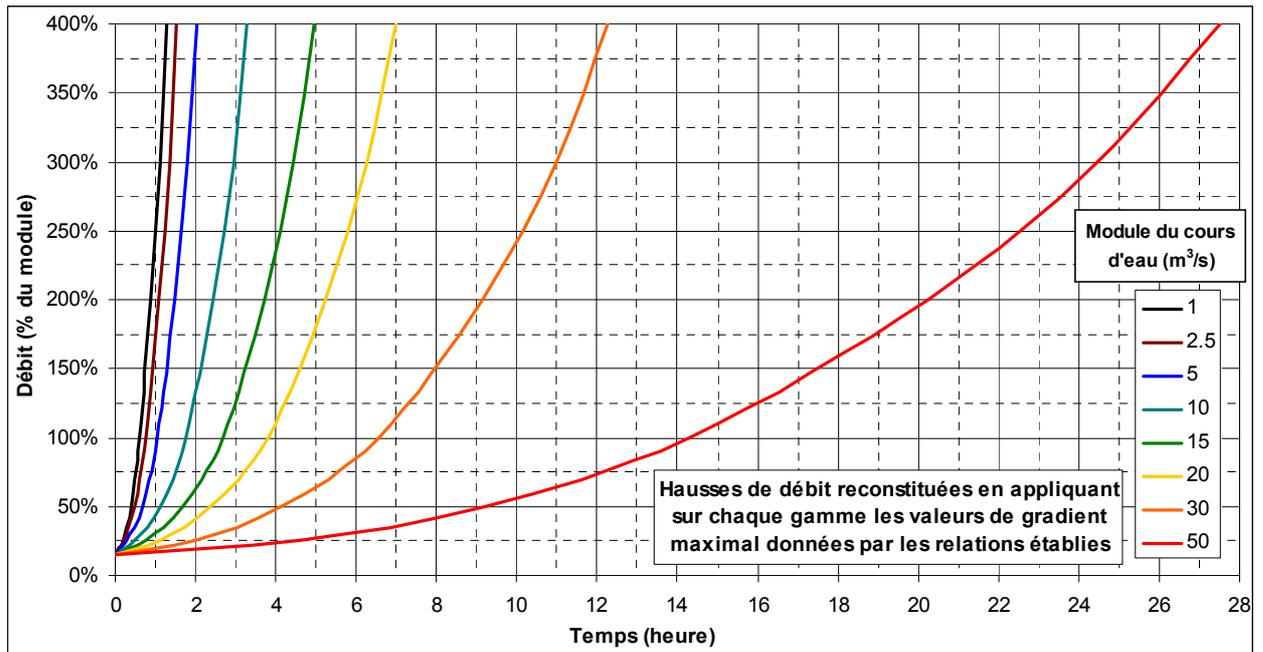


Figure 30 : Hausses de débit reconstituées en appliquant sur chaque gamme les valeurs de gradient maximal données par les relations établies.

Quelle que soit la valeur du module du cours d'eau, les baisses de débit ainsi reconstituées peuvent être fidèlement représentées par une fonction exponentielle de la forme : $Q = 4 * \exp(-a * t^{0.75})$, avec Q le débit en proportion du module et t le temps en heure ($R^2 > 99.75\%$). Pour un temps de variation t donné (valeur nécessairement positive), cette fonction donne la valeur de débit atteinte lors d'une baisse débutant depuis un débit de 400% du module.

La valeur du coefficient a diminue au fur et à mesure que le module du cours d'eau augmente (Figure 31) ; cela rend compte de la tendance des baisses de débit à se dérouler d'autant plus lentement que le cours d'eau est important. La valeur du coefficient a peut elle-même être exprimée en fonction du module de la station M au travers d'une fonction de type : $a = 1 / (\alpha_1 M^3 + \alpha_2 M^2 + \alpha_3 M + \alpha_4)$. Pour des valeurs de module de cours d'eau supérieures à 50 m³/s, la valeur du coefficient a est constante du fait des choix en amont dans la démarche.

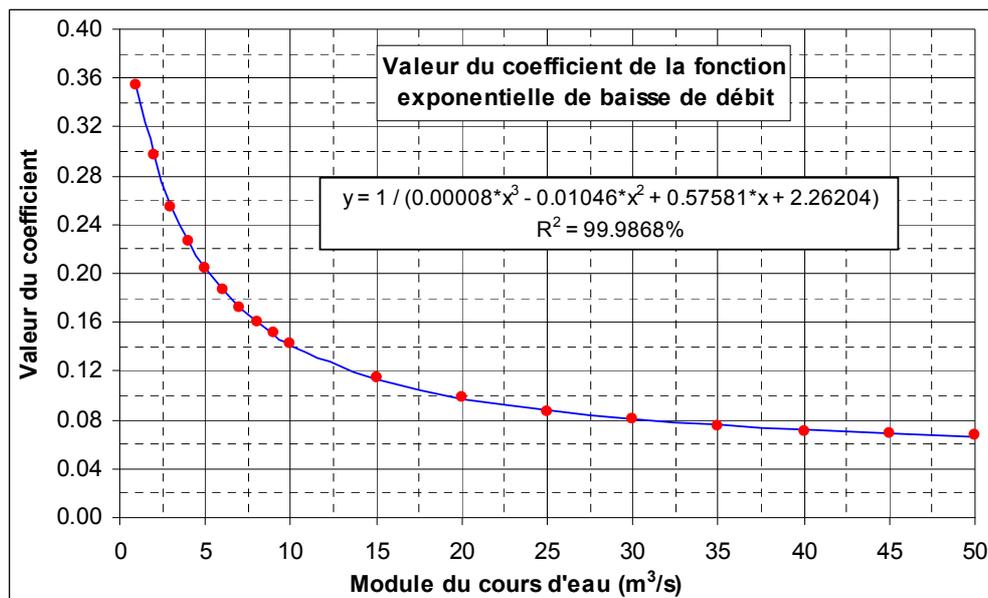


Figure 31 : Valeur du coefficient a de la fonction exponentielle de baisse de débit.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

De même, quelle que soit la valeur du module du cours d'eau, les hausses de débit reconstituées peuvent être fidèlement représentées par une fonction exponentielle de la forme : $Q = 4 * \exp(-a * t^{1.15})$, avec Q le débit en proportion du module et t le temps en heure ($R^2 > 99.60\%$). Pour un temps de variation t donné (valeur nécessairement positive), cette fonction donne la valeur de débit de laquelle débiterait une hausse atteignant un débit de 400% du module.

La valeur du coefficient a diminue au fur et à mesure que le module du cours d'eau augmente (Figure 32) ; cela rend compte de la tendance des hausses de débit à se dérouler d'autant plus lentement que le cours d'eau est important. La valeur du coefficient a peut elle-même être exprimée en fonction du module de la station M au travers d'une fonction de type : $a = 1 / (\alpha_1 M^3 + \alpha_2 M^2 + \alpha_3 M + \alpha_4)$. Pour des valeurs de module de cours d'eau supérieures à 50 m³/s, la valeur du coefficient a est constante du fait des choix en amont dans la démarche.

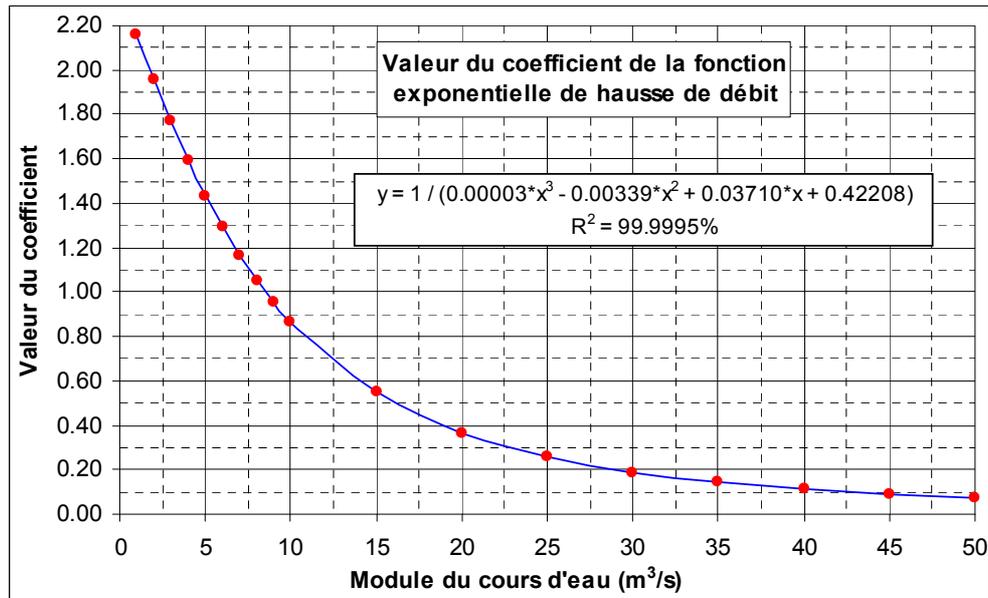


Figure 32 : Valeur du coefficient a de la fonction exponentielle de hausse de débit.

Sur le domaine de valeurs de t positives, les fonctions mathématiques employées sont strictement décroissantes, cette décroissance étant de plus en plus lente (dérivées 1^{ère} et 2^{ème} toujours négatives). Cela permet d'envisager une extrapolation réaliste de ces fonctions vers les débits inférieurs à 15% du module. Les valeurs de gradient de hausses et de baisses données par les formules correspondent bien à l'ordre de grandeur des gradients maximaux extraits dans les chroniques de débit naturel sur les gammes de variation 1 (5% à 10%) et 2 (10% à 15%) (Figure 33 à Figure 36). Cette extrapolation vers les faibles débits est nécessaire dans la mesure où les éclusées hydroélectriques présentent sur certains cours d'eau des débits de base faibles, de l'ordre de 2.5%, 5% ou 10% du module, voisins des débits réservés réglementaires (1/40^{ème}, 1/20^{ème} ou 1/10^{ème}).

Les formules $Q = f(t)$ établies représentant les hausses et les baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement » peuvent être inversées pour exprimer le temps de variation en fonction du débit $t = f(Q)$. Pour une valeur de débit Q donnée, inférieure à 400% du module, ces formules donnent alors le temps de variation pour atteindre 400% du module à partir de ce débit dans le cas d'une hausse, et pour atteindre ce débit à partir de 400% du module dans le cas d'une baisse. **Par différence, il est ainsi possible de déterminer le temps minimal de toutes variations de débit naturelles se déroulant en deçà de 4 fois le module.** Les Figure 37 et Figure 38 présentent respectivement les baisses et les hausses de débit "les plus rapides possibles naturellement", sur une gamme de variation de 2% à 400% du module, selon les formules établies. Elles permettent d'évaluer si les variations de débit repérées dans un hydrogramme se déroulent ou non à des gradients supérieurs à ce qui est possible naturellement.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

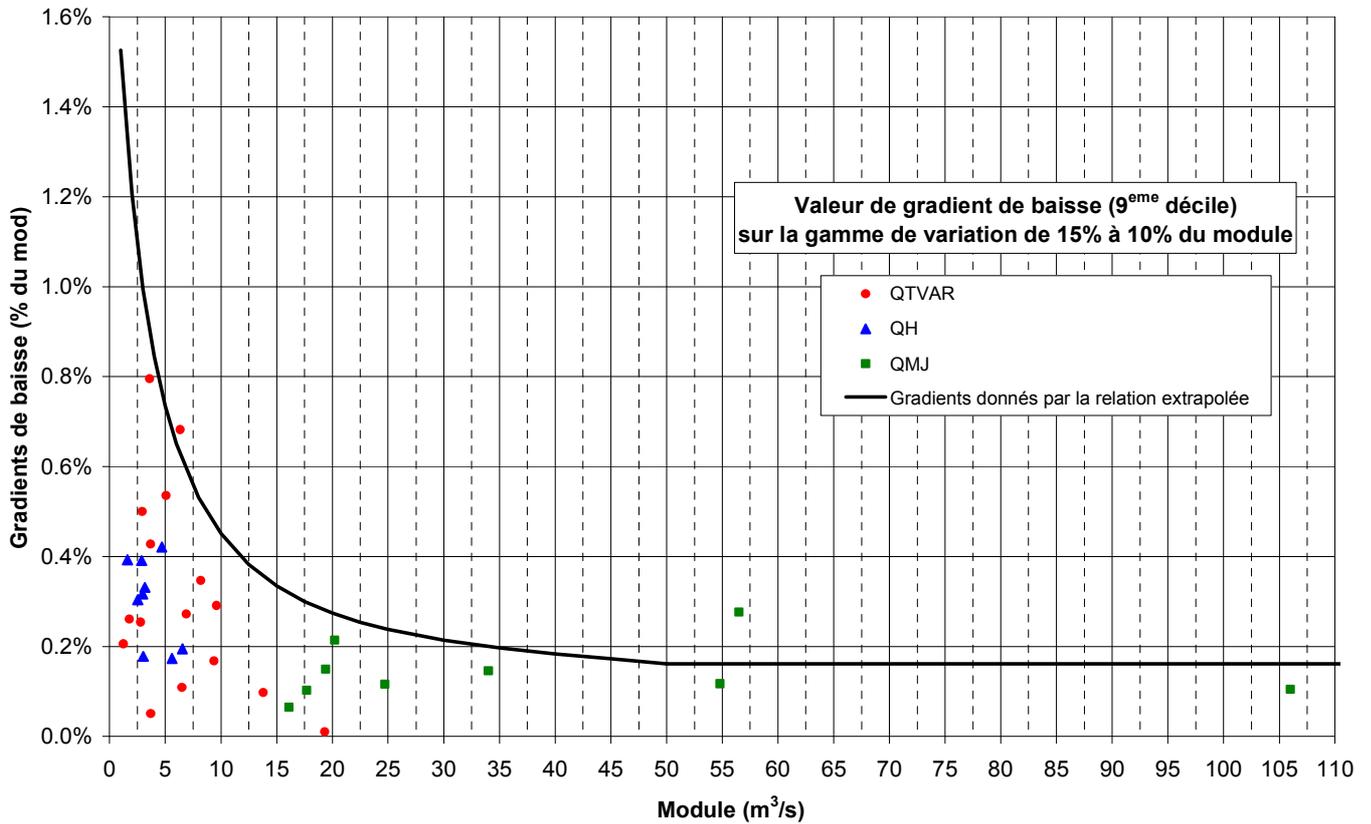


Figure 33 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 2 (15% à 10% du module) en fonction du module des stations.

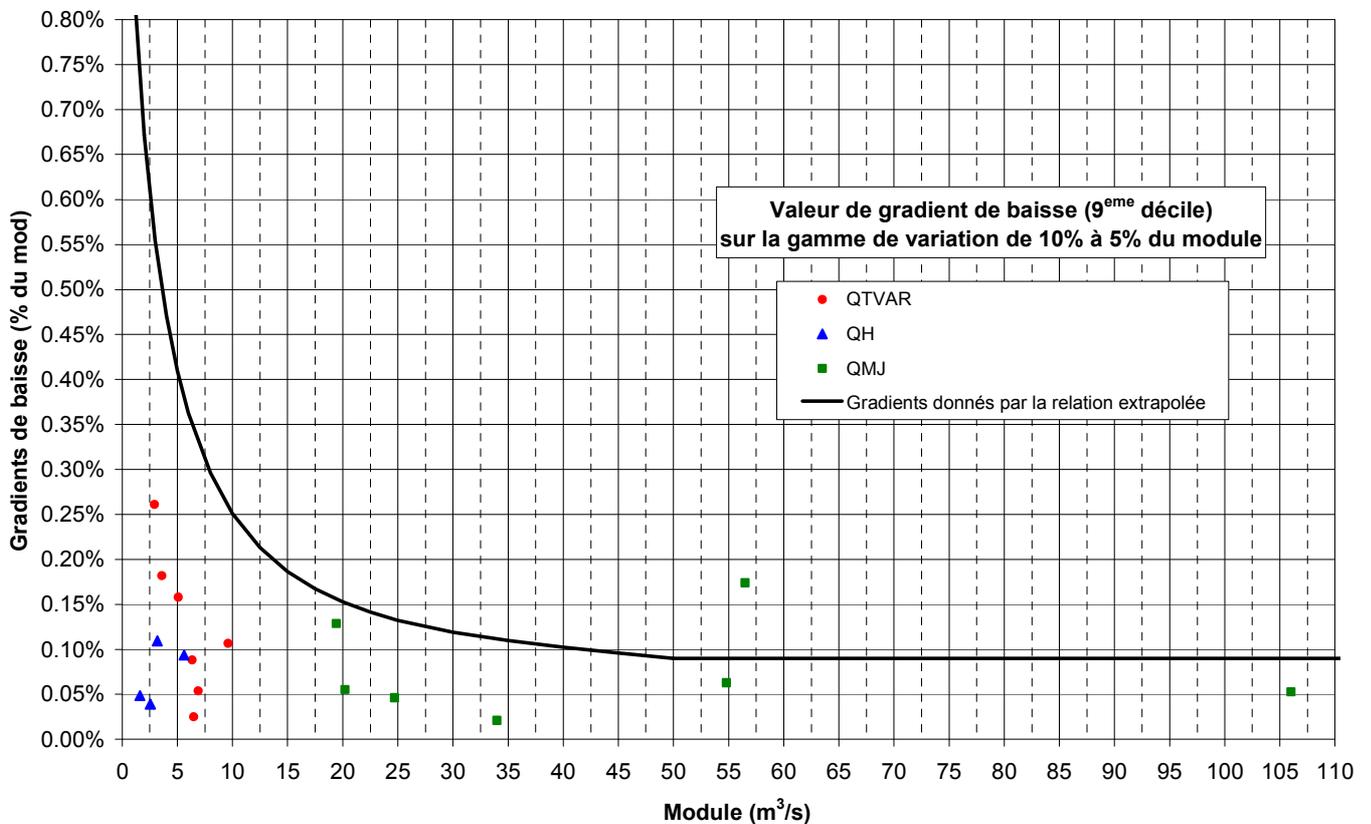


Figure 34 : Gradient de baisse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 1 (10% à 5% du module) en fonction du module des stations.

2) Etude des gradients des variations de débit en hydrologie naturelle

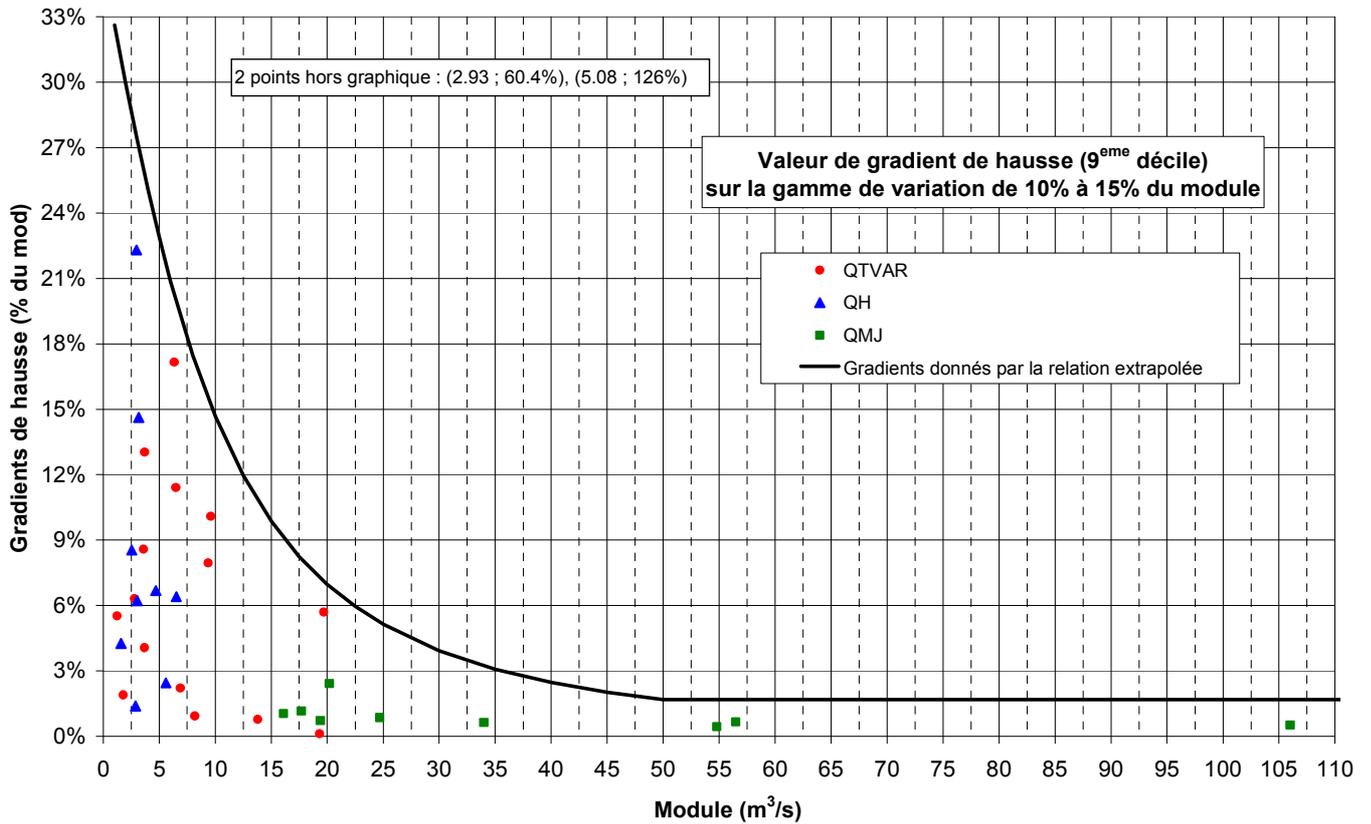


Figure 35 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 2 (10% à 15% du module) en fonction du module des stations.

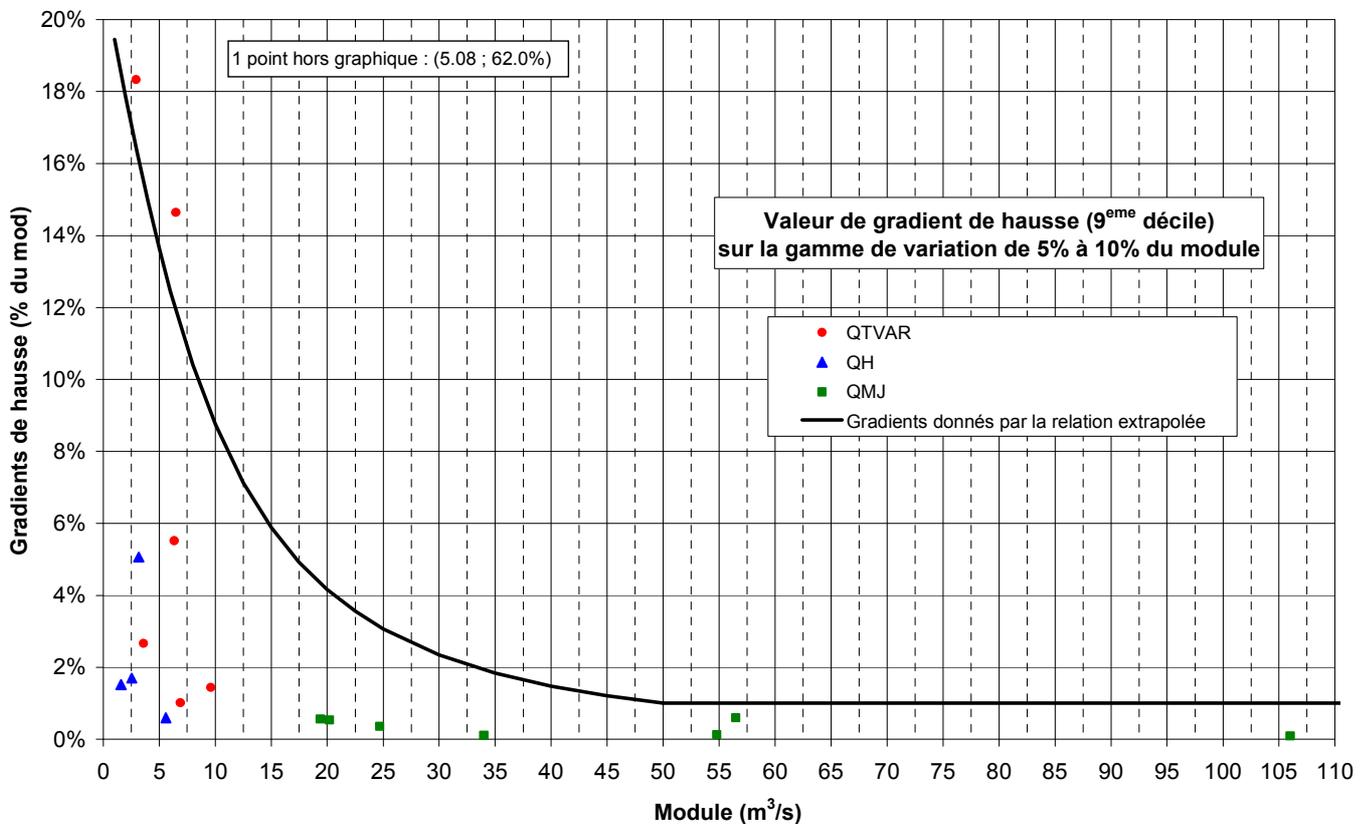


Figure 36 : Gradient de hausse de débit (9^{ème} décile) sur la gamme de variation 1 (5% à 10% du module) en fonction du module des stations.

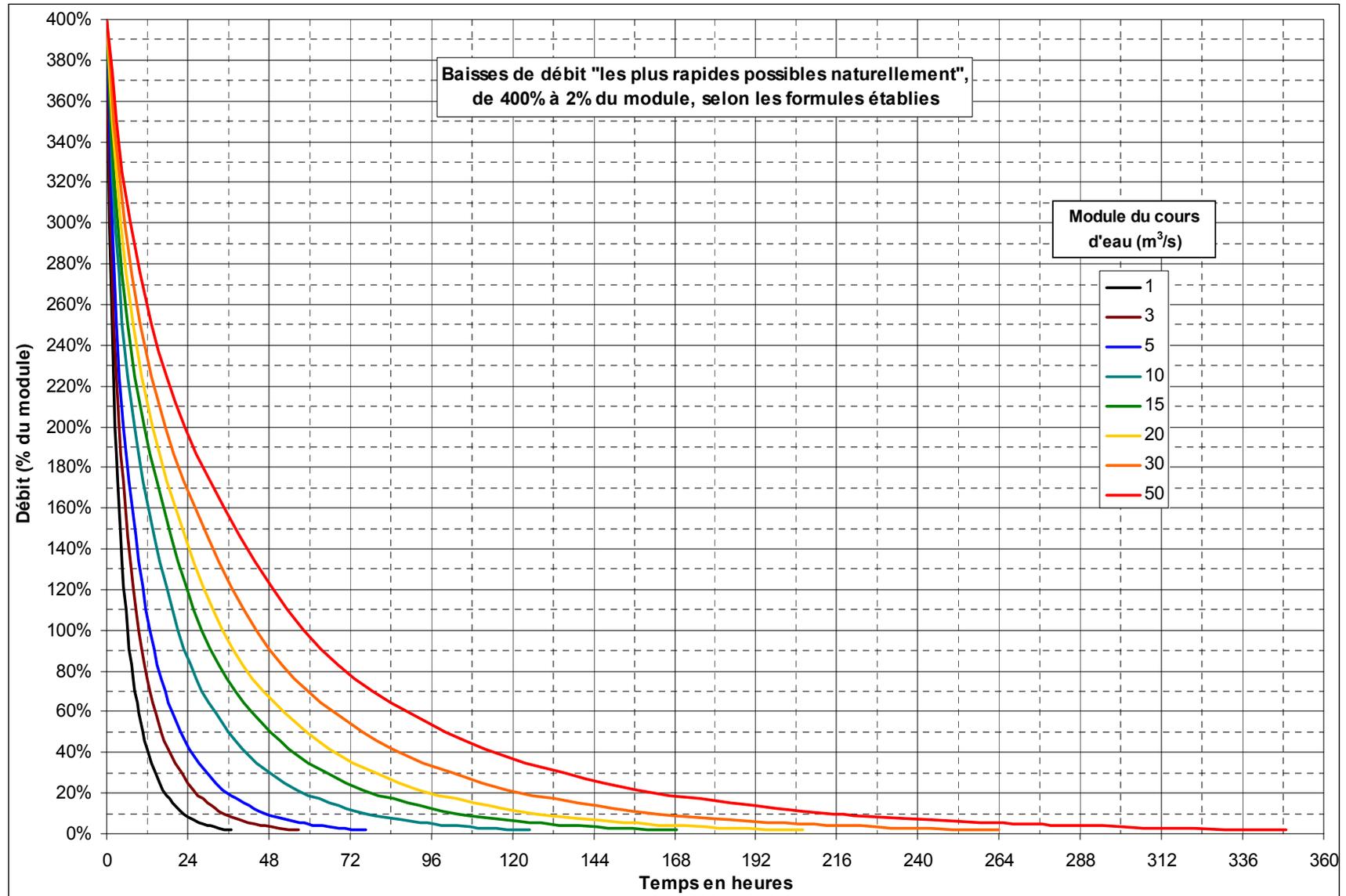


Figure 37 : Baisses de débit "les plus rapides possibles naturellement", de 400% à 2% du module, pour des cours d'eau de module entre 1 et 50 m³/s selon les formules établies.

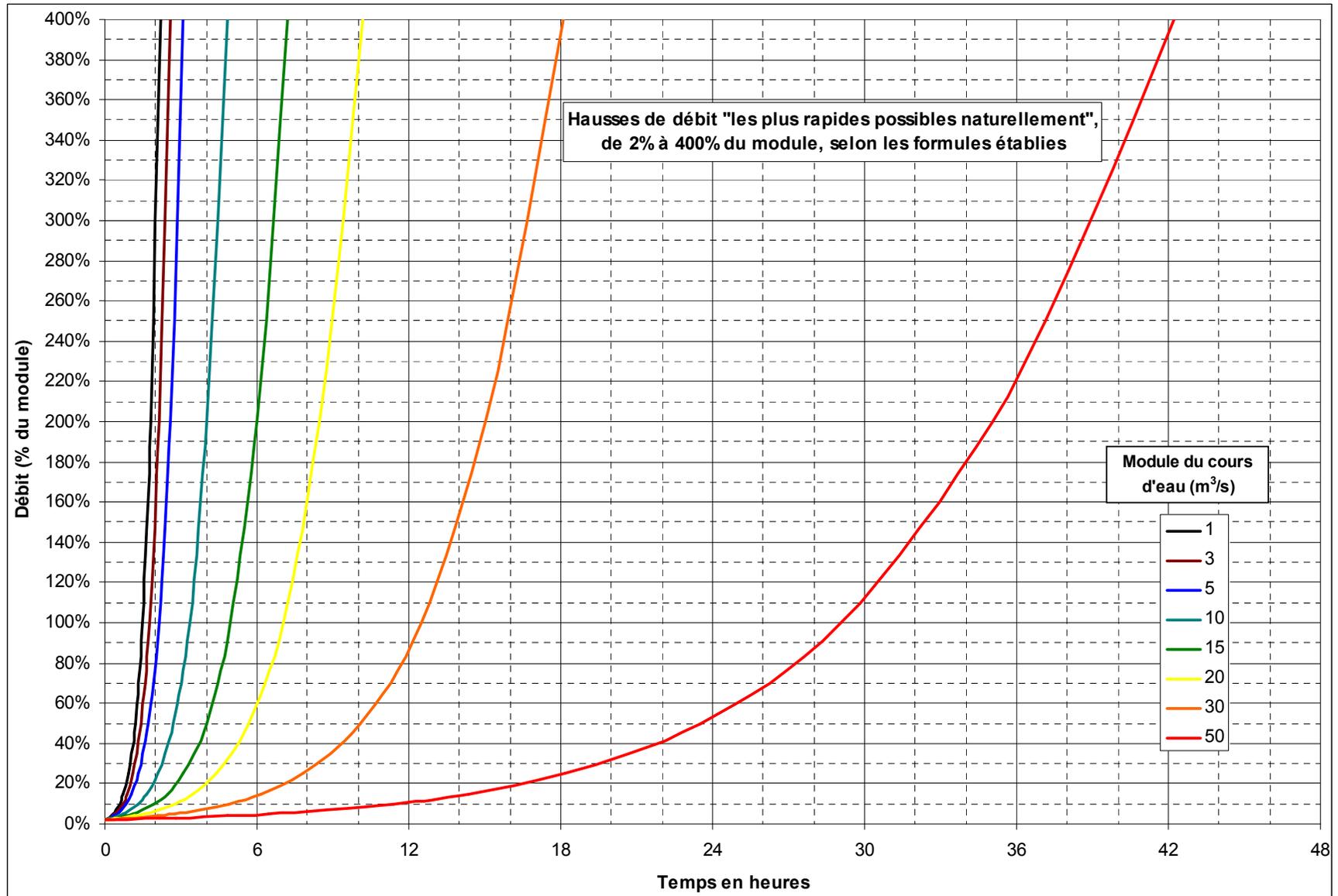


Figure 38 : Hausse de débit "les plus rapides possibles naturellement", de 2% à 400% du module, pour des cours d'eau de module entre 1 et 50 m³/s selon les formules établies.

2.6. Conclusions, discussion et perspective sur l'étude des gradients des variations de débit naturelles

Dans cette première partie, le travail a consisté (1) à caractériser les gradients de variations de débit à la hausse et à la baisse sur des cours d'eau à l'hydrologie naturelle concernés ou qui pourraient être concernés par la problématique des éclusées hydroélectriques (cours de montagne ou de piémont) et (2) à exploiter ces résultats pour la fixation des critères pour la sélection des éclusées hydroélectriques.

97 stations hydrométriques, situées principalement dans les massifs des Pyrénées (24), du Massif Central (36), des Alpes (20) et du Jura (9), ainsi que dans les Vosges (3), en Corse (4) et dans le Massif Armoricain (2), ont été identifiées. Le caractère naturel ou très peu perturbé de l'hydrologie de ces stations a été validé en vérifiant l'absence d'aménagement majeur sur le cours d'eau à l'amont et par un examen visuel détaillé des hydrogrammes. Un total de 1575 années de chroniques hydrologiques ont été extraites et analysées, avec des données essentiellement à pas de temps fin (débits à pas de temps variable [QTVAR 5%] ou débits horaires [QH]) qui rendent compte fidèlement des variations et permettent une évaluation précise de leurs gradients, ainsi que des débits moyens journaliers (QMJ) dans le cas de données anciennes sur des cours d'eau de taille moyenne à grande.

Le traitement de ces chroniques a permis de caractériser les gradients des hausses et des baisses de débit naturelles sur 8 gammes de variation entre 5% et 400% du module pour chacune des stations. De manière logique, on observe que :

- pour une station et une gamme de variation donnée, les gradients des hausses de débit sont plus importants que ceux des baisses de débit,
- pour une station donnée, les gradients de hausses et de baisses sont globalement d'autant plus faibles que la variation se déroule vers les faibles débits,
- et pour une gamme de variation donnée, les valeurs de gradients de hausses et de baisses ont globalement tendance à décroître au fur et à mesure que la valeur du module du cours d'eau augmente.

L'intérêt principal de ce travail est de disposer à présent d'évaluations chiffrées de ces gradients de variation.

Les variations au-delà de 4 fois le module du cours d'eau (épisodes de crue) n'ont pas été étudiées étant donné que la quasi-totalité des débits d'équipement des aménagements hydroélectriques sont inférieurs à cette valeur.

Ces résultats ont été exploités pour construire des formules représentant les hausses et les baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement ». Pour ce faire, on a pris en compte – pour chaque station et sur chaque gamme de variation – le 9^{ème} décile des valeurs de gradient de hausse et de baisses, comme valeur représentative des plus forts gradients naturels que l'on peut rencontrer. La démarche a ensuite été basée sur les plus fortes valeurs de 9^{ème} décile pour établir, pour chaque gamme de variation, des relations donnant l'ordre de grandeur des gradients naturels maximaux en fonction du module du cours d'eau. Les hausses et les baisses de débit « les plus rapides possibles naturellement » ont enfin été reconstituées en appliquant sur chaque gamme de variation les valeurs de gradient maximal.

Cette démarche est globalement sécuritaire vis-à-vis du risque de sous-estimer les gradients des variations naturelles de débit. Sur les différentes gammes de variation, la plupart des stations présentent en effet des valeurs de 9^{ème} décile des gradients inférieures aux valeurs données par les relations établies. D'autre part, une même variation de débit naturelle ne se déroule généralement pas sur plusieurs gammes, en présentant sur chacune les gradients maximaux possibles. C'est-à-dire que, par exemple dans le cas d'un cours d'eau de régime pluvial océanique, les gradients maximaux sur les gammes de débit en deçà du module sont plutôt liés à des orages estivaux intervenant pendant l'étiage, alors que ceux sur les gammes de débit au-delà du module sont plutôt liés à des crues automnales et hivernales.

Les formules construites permettent ainsi d'obtenir un ordre de grandeur du temps minimal de toutes variations naturelles de débit, à la hausse ou à la baisse, se déroulant en deçà de 400% du module. Elles ne sont basées que sur la valeur du module du cours d'eau qui est une information dont on dispose a priori à chaque station hydrométrique. Conformément aux constats effectués, les cas des hausses et des baisses de débit sont différenciés et les formules sont progressives selon la

gamme sur laquelle se déroule la variation et selon la valeur du module du cours d'eau, entre 1 et 50 m³/s, puis constantes au-delà.

Ces formules ont été intégrées dans le fichier de traitement des chroniques de débit influencées par les aménagements hydroélectriques, développé dans le cadre de l'indicateur « éclusées ». Elles permettent d'évaluer si les variations de débit repérées se déroulent ou non à des gradients supérieurs à ce qui est possible naturellement, auquel cas ces variations sont alors considérées comme des perturbations hydrologiques. Le but final est de rendre l'indicateur le plus représentatif possible du niveau de perturbation hydrologique liée à la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques.

La construction de cette référence générale sur les gradients des variations naturelles de débit permet, dans le cadre de la construction de l'indicateur « éclusée », de contourner l'impossibilité de trouver systématiquement une référence locale d'hydrologie naturelle pour chaque site touchée par la problématique. Cela ne doit cependant pas empêcher, dans le cadre d'étude de cas, d'adopter des critères mieux adaptés au contexte local, ou de mener des comparaisons plus précises entre les gradients naturels et ceux des éclusées comme par exemple cela a été fait sur le Doubs (Courret et Larinier 2008), la Creuse (Cazeneuve et al. 2009) ou le Gave d'Ossau (Courret 2010).

3. MISE AU POINT D'UNE METHODE DE SELECTION DES ECLUSEES AU SEIN DES HYDROGRAMMES

3.1. Objectifs de la méthodologie de sélection des éclusées

Le but de la méthodologie est le **repérage automatique** au sein des chroniques hydrologiques d'un maximum et si possible de toutes les variations de débit liées aux éclusées, n'incluant qu'un minimum et si possible aucune variation de débit d'origine naturelle. Les variations de débit d'origine anthropique sont cependant susceptibles de retrouver des caractéristiques naturelles lorsqu'elles se propagent vers l'aval et s'atténuent ("dilution" par les apports intermédiaires et atténuation des gradients). Concrètement, **l'objectif est donc de sélectionner toutes les variations de débit dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle sur le cours d'eau concerné**. Cette discrimination entre les caractéristiques anthropiques ou naturelles des variations de débit est indispensable au développement de tout indicateur de perturbation crédible.

La méthodologie doit pouvoir s'appliquer aux chroniques de débit à pas de temps variable (QTVAR produit par la banque HYDRO), **ainsi qu'aux chroniques à pas de temps fixe suffisamment fin** (horaire ou infra-horaire) qui sont à même de rendre compte correctement des variations de débit liées aux éclusées, notamment de leurs gradients. Elle doit également pouvoir **s'appliquer à une gamme étendue de cours d'eau** (module de quelques m³/s à plusieurs centaines de m³/s).

3.2. Constitution du jeu de données de stations hydrométriques influencées par les éclusées hydroélectriques

Dans le cadre de ce travail d'actualisation de l'indicateur, **80 stations hydrométriques à l'hydrologie influencée au moins une année par les éclusées hydroélectriques ont été identifiées**. L'identification s'est appuyée sur la liste de toutes les stations hydrométriques de la banque HYDRO en avril 2009 pour lesquelles des données de débit à pas de temps suffisamment fin étaient disponibles (stations en service et hors service, à signification hydrologique et particulière). Cette liste a été croisée avec les connaissances sur les schémas des aménagements hydroélectriques sources d'éclusées, notamment les cartographies et répertoires EDF des usines hydrauliques et barrages de janvier 1987, ainsi que ceux de Lauters (1995). L'identification a été réalisée avec la volonté d'être exhaustif sur le territoire métropolitain ; il est cependant possible que certaines stations influencées n'aient pas été identifiées. Les stations identifiées se situent principalement dans les bassins Adour-Garonne (39), Loire-Bretagne (18) et Rhône-Méditerranée-Corse (RMC, 21) qui englobent les massifs montagneux.

Les 80 stations identifiées ne couvrent pas tous les tronçons de cours d'eau soumis à éclusées. Il y a de nombreux tronçons sur lesquels il n'y a pas de station hydrométrique, ou des stations où des données à pas de temps suffisamment fin pour décrire les éclusées ne sont pas disponibles (typiquement des stations où seuls les débits moyens journaliers [QMJ] sont disponibles). C'est en particulier le cas dans les Alpes où le nombre d'aménagements hydroélectriques fonctionnant par éclusées est important, et où on ne dispose que de 6 stations hydrométriques publiques fournissant des données à pas de temps variables (QTVAR).

Plus de 6 années de données de débit influencées ont été extraites en moyenne pour chaque station, avec un minimum de 3 années, sauf pour 3 stations où certaines années sont soit trop incomplètes, soit à l'hydrologie s'avérant peu perturbée (classe 0 ; voir paragraphes 3.5). La période de données traitées va jusqu'à la fin de l'année 2010, sauf pour 3 stations où les données de cette année-là sont trop incomplètes. **Un total de 491 années de données de débit influencées a ainsi été rassemblé** (contre 109 années de données extraites de 30 stations du bassin Adour-Garonne dans la première version de l'indicateur ; Courret et Larinier 2008). Les données de débit sont à pas de temps variable (QTVAR 5%).

Le Tableau 4 récapitule les nombres de stations et d'années traitées pour la construction de l'indicateur par bassin et massif montagneux (ou région). La Figure 39 présente la cartographie des stations soumises à éclusées. La liste des stations avec leurs caractéristiques est reportée en annexe 4. Pour chaque station, il est indiqué les aménagements hydroélectriques influençant l'hydrologie, avec les capacités totales ou utiles de leurs retenues et les débits d'équipement des centrales.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Bassin	Massif (ou région)	Nombre de stations hydrométriques		Nombre d'année	
Adour-Garonne	Pyrénées	18	39	118	272
	Massif Central	21		154	
Loire-Bretagne	Massif Central	18		91	
RMC	Pyrénées	5	21	18	122
	Massif Central	4		12	
	Alpes	6		33	
	Jura	5		54	
	Corse	1		5	
Seine-Normandie	Normandie	1	2	3	6
	Yonne	1		3	
Total		80		491	

Tableau 4 : Nombres de stations et d'années traitées pour la construction de l'indicateur par bassin et massif montagneux (ou région).

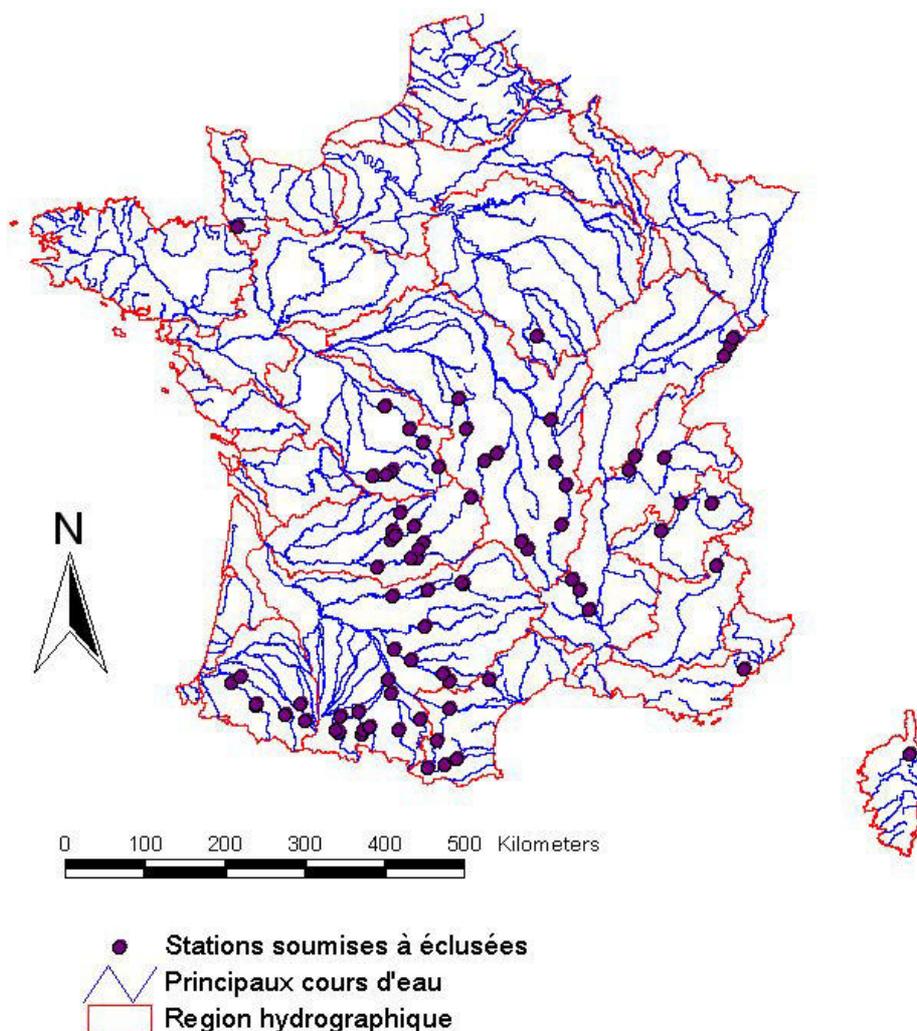


Figure 39 : Cartographie des stations soumises à éclusées.

Les débits moyens interannuels (modules) des 80 stations identifiées vont de 1.2 m³/s au minimum (la Têt à Mont-Louis) à 384 m³/s (le Rhône à Surjoux). La Figure 40 présente les nombres de stations (en haut) et d'années de données traitées (en bas) par classe de module. Les deux

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

graphiques différent légèrement car le nombre d'années de données traitée pour chacune des stations n'est pas toujours le même. Contrairement au jeu de données d'hydrologie naturelle (revoir Tableau 1), il y a très peu de stations dont le module est inférieur à 5 m³/s. La majorité des stations présente des modules entre 5 et 40 m³/s.

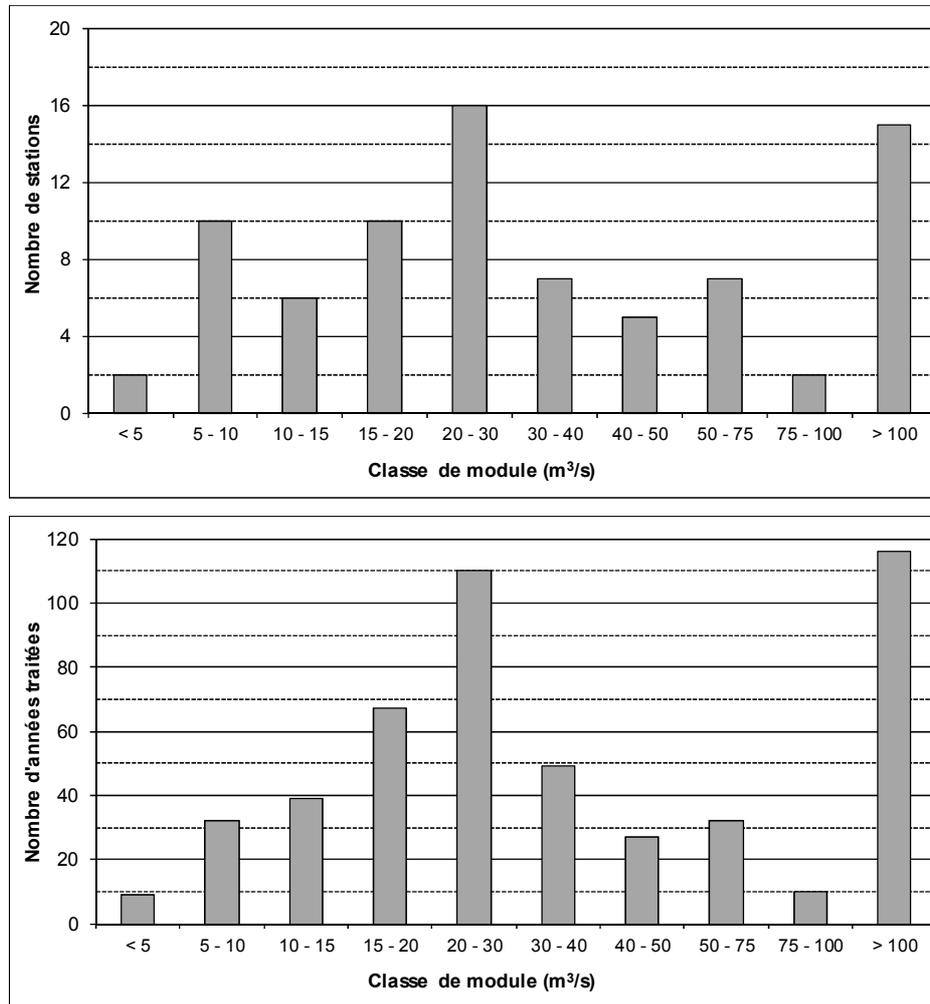


Figure 40 : Nombre de stations (en haut) et d'années de données traitées (en bas) par classe de module.

Parmi les caractéristiques des stations renseignées en annexe 4, il n'est pas indiqué de distance entre la station et l'aménagement "source" des éclusées. Pour quelques stations, cette distance est simple à mesurer, mais la plupart des stations sont dans des situations où la détermination de cette distance serait plus complexe et moins sensée (voir les commentaires en annexe 4), avec :

- Des stations soumises à l'influence de plusieurs régimes d'éclusées pratiqués sur plusieurs cours d'eau confluent en amont
- Des stations à l'aval d'aménagement assurant une retranscription ou une démodulation plus ou moins complète des éclusées venant d'une source "initiale" plus en amont.

Globalement, parmi les 80 stations hydrométriques identifiées, de l'ordre d'une quinzaine seulement se trouvent à l'aval immédiat (quelques kilomètres) des aménagements générant les éclusées.

3.3. Définition d'une éclusée et caractérisation

Les aménagements hydroélectriques dits de lac ou d'éclusées constituent la principale source d'éclusées. Ces éclusées hydroélectriques correspondent aux variations plus ou moins brutales de

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

débit à la hausse ou à la baisse, dues respectivement à la mise en route ou à l'arrêt des turbines (Figure 41).

D'autres variations de débit d'origine anthropiques peuvent être générées par des centrales au fil de l'eau en cas de mauvaise régulation du débit turbiné, par le soutien d'étiage ou la réalimentation intermittente d'un cours d'eau, par des lâchés d'eau pour la navigation (canoé-kayak), par la gestion de parcours d'eaux vives ... Ces variations de débit sont généralement de bien moindre ampleur que les éclusées hydroélectriques.

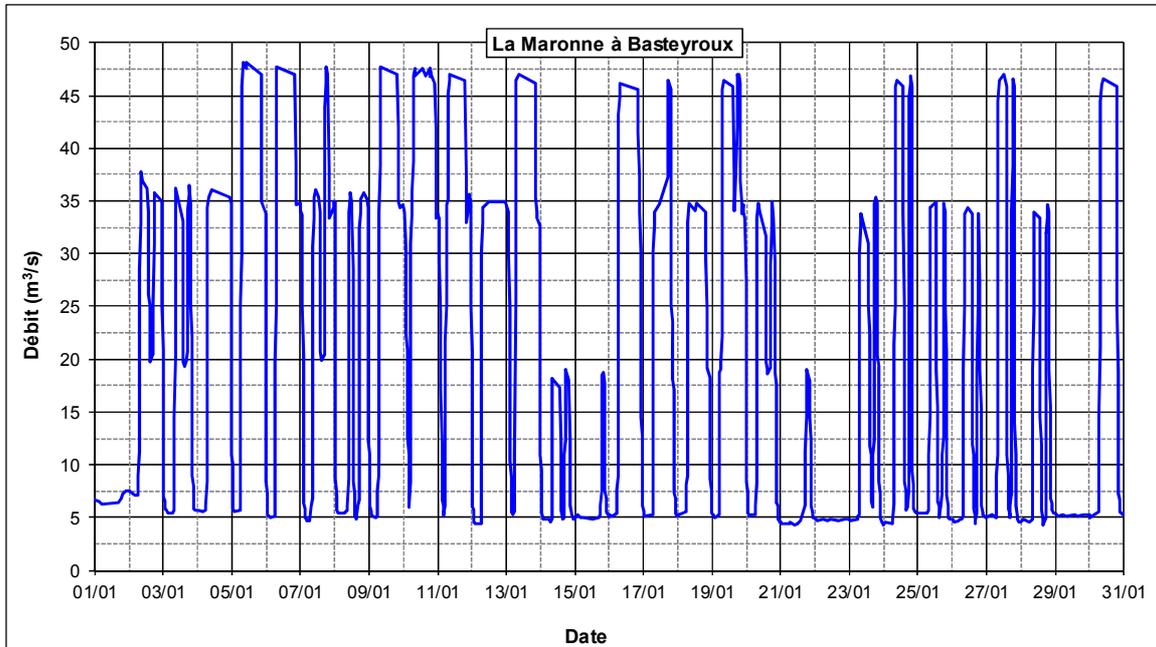


Figure 41 : Illustration d'éclusées hydroélectriques à la station de Basteyroux sur la Maronne en aval de l'usine hydroélectrique de Hautefage (module de 20 m³/s).

Dans la suite de ce rapport, on parle de "hausse d'écluse" et de "baisse d'écluse", le terme général "les éclusées" regroupant ces deux ensembles. Une hausse ou une baisse d'écluse peut en premier lieu se caractériser par (Figure 42) :

- Le débit de base (**Q_{base}**) en m³/s, qui est le débit à partir duquel démarre une hausse ou auquel se termine une baisse.
- le débit maximum (**Q_{max}**) en m³/s, qui est le débit auquel se termine une hausse ou à partir duquel démarre une baisse.
- L'amplitude (en m³/s), différence entre le débit maximum et le débit de base (**Q_{max} – Q_{base}**).
- Le gradient ou la vitesse de variation du débit en m³/s/h, égal à l'amplitude divisée par la durée Δt de la variation de débit : **(Q_{max} – Q_{base}) / Δt** . Cela correspond visuellement à la pente de l'hydrogramme.

Il peut ensuite être intéressant d'établir des rapports entre ces variables, notamment :

- Le rapport (adimensionnel) entre le débit maximum et le débit de base : **Q_{max} / Q_{base}**.
- L'amplitude rapportée au débit de base (adimensionnelle) : **(Q_{max} – Q_{base}) / Q_{base}**.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

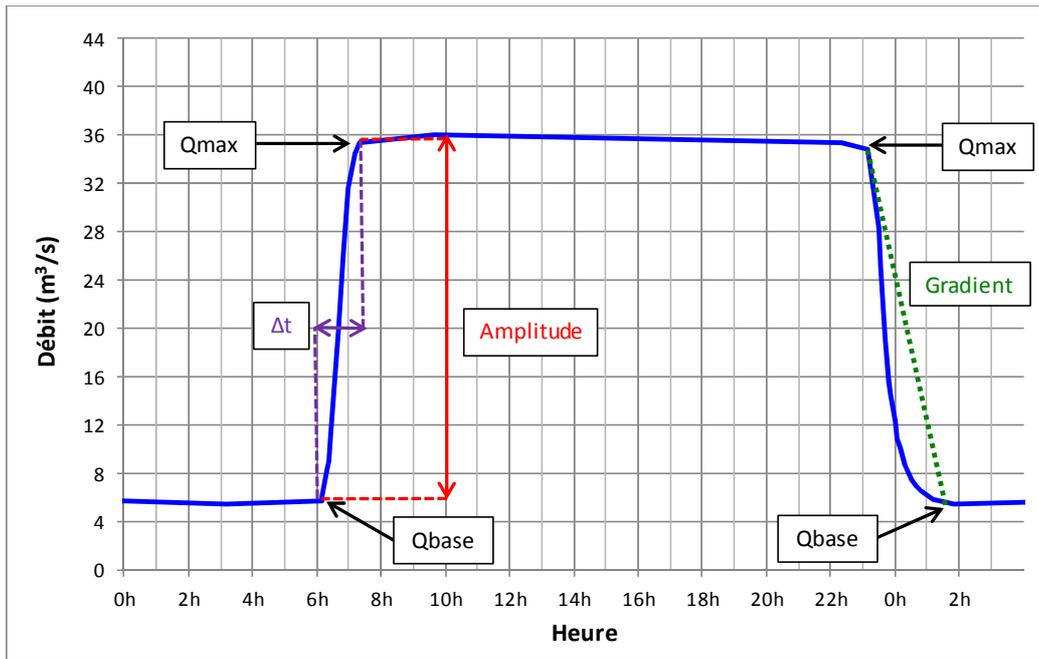


Figure 42 : Variables caractéristiques d'une hausse ou baisse d'éclusee.

La durée d'une éclusée (à ne pas confondre avec la durée Δt d'une hausse ou d'une baisse) peut en première approche être définie comme la durée passée au débit maximum atteint par une hausse, avant la baisse suivante. Cette définition peut s'avérer parfois difficilement applicable lorsque plusieurs hausses ou baisses se succèdent, ou lorsqu'une baisse suivant une hausse ne revient pas au même débit de base. Ces cas de figures se présentent en particulier à l'aval des centrales hydroélectriques dont les turbines ont de multiples débits de fonctionnement et sont gérées avec des modalités à différents pas de temps (horaire, journalier, hebdomadaire). C'est le cas notamment de la Dordogne à l'aval du Sablier (Figure 43). C'est pour cette raison que l'on a été obligé de distinguer les hausses d'éclusées et les baisses d'éclusées.

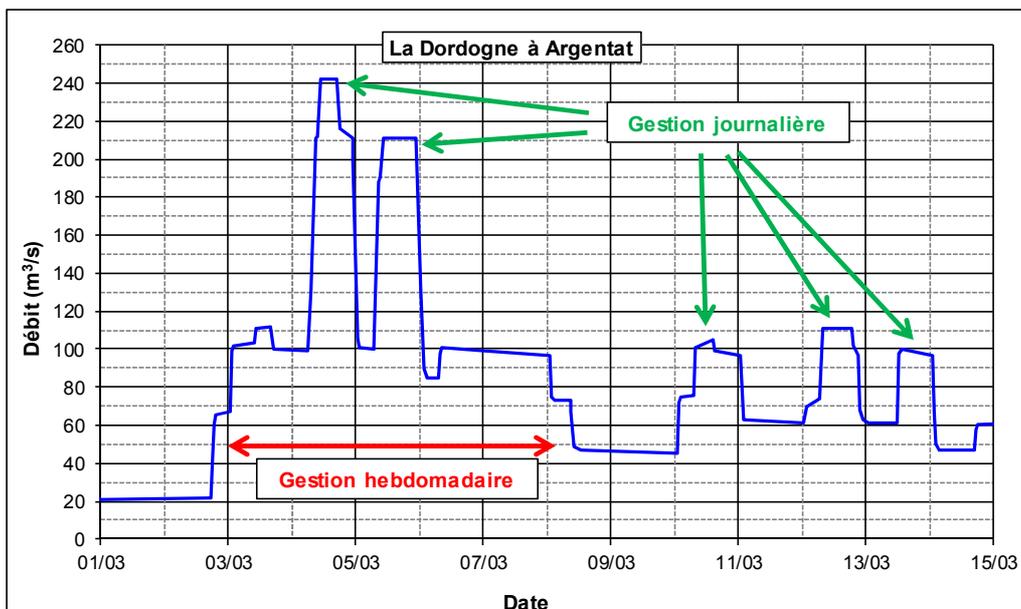


Figure 43 : Illustration d'un fonctionnement par éclusées à Argentat sur la Dordogne avec des modalités de gestion à différents pas de temps (module de $106 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.4. Principe de la méthodologie de repérage des éclusées

Le repérage des hausses et baisses d'éclusées au sein des hydrogrammes se déroule en deux étapes :

- une première étape d'identification et de caractérisation des événements significatifs de hausse et de baisse de débit, sans préjuger de leur caractère naturel ou artificiel.
- et une seconde étape de sélection parmi ces événements visant à ne retenir que les hausses et les baisses de débit dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle, et que l'on qualifiera donc d'éclusées.

Une 3^{ème} étape consiste à éventuellement concaténer des hausses ou des baisses d'éclusées successives. Toutes les étapes du traitement de l'hydrogramme se déroulent sous le logiciel Excel et sont automatisée avec une Macro codée en Visual Basic.

3.4.1. Etape 1 : Identification et caractérisation des événements significatifs de hausse et de baisse de débit

Procédure

Dans les chroniques de débits à pas de temps variable ou à pas de temps fixe suffisamment fin, une variation de débit naturelle ou anthropique se trouve généralement décrite par plusieurs mesures successives (couple date-débit ; Figure 44).

Pour caractériser les événements significatifs de hausses et de baisses de débit à partir des données brutes (date-débit ; colonne A et B sur la Figure 45), des données secondaires sur les variations élémentaires entre chaque paire de mesures consécutives sont calculées : durée, amplitude et gradient instantané (colonne C, D et E). Dans un premier temps, on identifie les hausses et les baisses de débit significatives parmi les variations élémentaires (colonne F et G respectivement), leur gradient instantané devant être supérieur à une valeur-seuil (voir paragraphe suivant). Sur l'hydrogramme, cela se traduit par le fait que la droite reliant deux points de mesures consécutifs doit présenter une pente minimale.

Ensuite, chaque série continue de hausses élémentaires est regroupée sous un unique événement de hausse (de même pour les baisses) (Figure 44). Chaque événement est caractérisé par les débits et les dates de début et de fin (colonnes J à M). L'amplitude totale, le gradient moyen, le rapport entre le débit maximum et le débit de base et l'amplitude rapportée au débit de base sont calculés (colonnes N à Q). La durée minimale de l'événement en hydrologie naturelle est calculée en tenant compte du type de variation (hausse ou baisse), de la taille du cours d'eau et de la gamme de variation du débit (différence entre les colonnes R et S). La colonne T contient le rapport entre le gradient de l'événement et le gradient maximal en hydrologie naturelle (amplitude / durée minimale). Si ce rapport est supérieur à 1, l'événement s'est déroulé plus rapidement que la référence naturelle, et inversement.

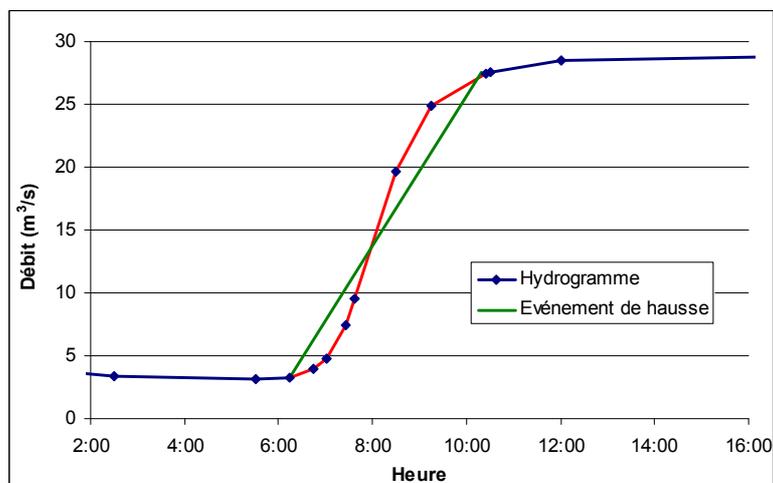


Figure 44 : Description d'une hausse de débit en QTVAR et caractérisation d'un événement de hausse.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
2	Lancer Analyse			Module :		106.0	m ³ /s	Amplitude minimale :		10.60	m ³ /s			Coefficient :		0.072						
3								Débit maximum :		400	m ³ /s											
4																						
5	Données brutes		Données secondaires			Analyse des variations élémentaires		Analyse des événements de hausse														
6	Date et heure	Débit (m ³ /s)	Durée entre deux mesures	Amplitude (m ³ /s)	Gradient ((m ³ /s)/h)	Hausse de débit	Baisse de débit	Début de hausse	Continuité de hausse	Débit avant hausse (m ³ /s)	Débit après hausse (m ³ /s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m ³ /s)	Gradient moyen ((m ³ /s)/h)	Rapport global	Amplitude rapportée au débit de base	T ₀ Avant (heure)	T ₀ Après (heure)	Gradient comparé à la référence naturelle	Hausse d'éclusées	
7	37622.07	74.10	0.052	-4.10	-3.28		Baisse	0														0
8	37622.12	70.00	1.474	4.70	0.13			0														0
9	37623.60	74.70	0.041	37.30	37.93	Hausse		1	2	74.70	114.00	37623.60	37623.68	39.30	20.33	1.5	0.5	16.0	12.6	1.8	1	
10	37623.64	112.00	0.040	2.00	2.11	Hausse		0														0
11	37623.68	114.00	0.265	-1.00	-0.16			0														0
12	37623.94	113.00	0.045	-11.00	-10.15		Baisse	0														0
13	37623.99	102.00	0.295	-1.00	-0.14			0														0
14	37624.28	101.00	0.024	30.00	52.94	Hausse		1	2	101.00	256.00	37624.28	37624.39	155.00	63.27	2.5	1.5	13.6	5.5	3.3	1	
15	37624.31	131.00	0.078	125.00	66.37	Hausse		0														0
16	37624.39	256.00	0.067	1.00	0.63			0														0
17	37624.45	257.00	0.109	-2.00	-0.76			0														0
18	37624.56	255.00	0.035	24.00	28.24	Hausse		1	1	255.00	279.00	37624.56	37624.60	24.00	28.24	1.1	0.1	5.5	4.6	1.0	0	
19	37624.60	279.00	0.358	3.00	0.35			0														0
20	37624.95	282.00	0.056	-83.00	-61.48		Baisse	0														0
21	37625.01	199.00	0.019	-2.00	-4.44		Baisse	0														0
22	37625.03	197.00	0.026	-23.00	-36.32		Baisse	0														0
23	37625.06	174.00	0.024	-2.00	-3.53		Baisse	0														0
24	37625.08	172.00	0.253	1.00	0.16			0														0
25	37625.33	173.00	0.022	22.00	41.25	Hausse		1	4	173.00	293.00	37625.33	37625.48	120.00	35.29	1.7	0.7	9.0	4.2	1.4	1	
26	37625.36	195.00	0.042	2.00	1.97	Hausse		0														0
27	37625.40	197.00	0.052	88.00	70.40	Hausse		0														0
28	37625.45	285.00	0.025	8.00	13.33	Hausse		0														0
29	37625.48	293.00	1.849	8.00	0.18			0														0
30	37627.32	301.00	0.368	0.00	0.00			0														0
31	37627.69	301.00	0.537	2.00	0.16			0														0
32	37628.23	303.00	0.051	86.00	69.73	Hausse		1	1	303.00	389.00	37628.23	37628.28	86.00	69.73	1.3	0.3	3.8	1.2	2.2	1	
33	37628.28	389.00	0.113	1.00	0.37			0														0
34	37628.39	390.00	0.219	19.00	3.61	Hausse		1	1	390.00	409.00	37628.39	37628.61	19.00	3.61	1.0	0.0	1.1	0.6	0.1	0	
35	37628.61	409.00	1.653	2.00	0.05			0														0

Figure 45 : Vue partielle du fichier Excel de traitement des chroniques de débit : données brutes, données secondaires, analyse des variations élémentaires et analyse des événements de hausse (partie analyse des événements de baisse manquante).

Fixation de la valeur-seuil sur le gradient

D'un côté, cette valeur-seuil sur le gradient doit être suffisamment faible pour permettre une prise en compte correcte des débuts et des fins d'événements présentant des gradients généralement plus faibles que le « cœur » des événements, dans le souci notamment de bien obtenir leur amplitude totale (revoir la Figure 44). D'un autre côté, cette valeur-seuil ne doit pas être trop faible pour ne pas inclure des phases de variations très lentes avant ou après l'événement, qui ne change pas significativement son amplitude, mais qui, si on les inclut, peuvent aboutir à des valeurs faibles de gradient moyen qui ne sont plus représentatives de l'événement et qui poseraient des problèmes dans la seconde étape de sélection. La fixation de la valeur-seuil sur le gradient s'est appuyée sur les résultats sur :

- L'amplitude cumulée des événements détectés rapportée à l'amplitude totale (en %), l'amplitude totale des hausses correspondant à la somme de toutes les amplitudes positives entre 2 mesures consécutives (idem pour les baisses avec les amplitudes négatives).
- Le gradient moyen des événements détectés rapporté au module des cours d'eau (en % du module / heure), obtenu en divisant l'amplitude cumulée des événements par leur durée cumulée.

Ces résultats ont été produits de manière distincte pour les hausses et les baisses de débit, sur les données d'hydrologie naturelle rassemblées (97 stations avec plus de 1575 années ; Figure 46), et sur les données d'hydrologie influencée par les éclusées rassemblées pour cette étude (80 stations avec 491 années ; Figure 47). Les amplitudes cumulées et les gradients moyens des événements détectés ont été calculés pour 15 valeur-seuils sur le gradient entre 0.1% et 10% du module / heure, pour chaque station. Chaque courbe dans les Figure 46 et Figure 47 correspond à une station.

L'amplitude cumulée des événements détectés rapportée à l'amplitude totale diminue logiquement lorsque la valeur-seuil sur le gradient augmente, en partant globalement de 95-100% pour toutes les stations pour une valeur-seuil de 0.1% du module/heure, avec une dispersion grandissante entre les stations vers les fortes valeurs, pour atteindre entre environ 90% et 5% pour une valeur-seuil de 10% du module/heure. Les stations présentent globalement deux comportements : soit une évolution quasi-linéaire, soit une diminution rapide dans la gamme des faibles valeurs-seuils, puis une diminution plus lente, voire une stabilisation vers les fortes valeur-seuils. Le comportement de diminution rapide dans la gamme des faibles valeurs-seuils se rencontre en particulier pour les baisses de débit en hydrologie naturelle, avec par exemple une amplitude cumulée inférieure à 50% de l'amplitude totale pour bon nombre de stations dès que la valeur-seuil sur le gradient dépasse 3-4% du module / heure. En hydrologie influencée, la grande majorité des stations présente une évolution linéaire de l'amplitude cumulée, que ce soit pour les hausses ou les baisses de débit.

Le gradient moyen des événements détectés augmente lorsque la valeur-seuil sur le gradient augmente, en partant globalement de valeurs inférieures à 10-15% du module/heure pour une valeur-seuil de 0.1% du module/heure, avec une dispersion grandissante entre les stations vers les fortes valeurs, pour atteindre entre environ 10% et 30-50% du module/heure pour la plupart des stations pour une valeur-seuil de 10% du module/heure. L'évolution est linéaire pour la plupart des stations ; certaines stations présentant une augmentation plus rapide de leurs gradients moyens dans la gamme des faibles valeurs-seuils, en particulier pour les hausses de débit, en hydrologie naturelle ou influencée.

Globalement, il n'y a pas de valeur-seuil sur le gradient qui ressorte de manière très évidente. **Une valeur seuil de 1% du module / heure a été adoptée, de manière à bien reconstituer l'amplitude des événements.** En hydrologie influencée, cette valeur permet d'obtenir une amplitude cumulée des événements détectés représentant au moins 80% de l'amplitude totale pour les baisses de débit et au moins 90% pour les hausses de débit, cela pour la quasi-totalité des stations.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

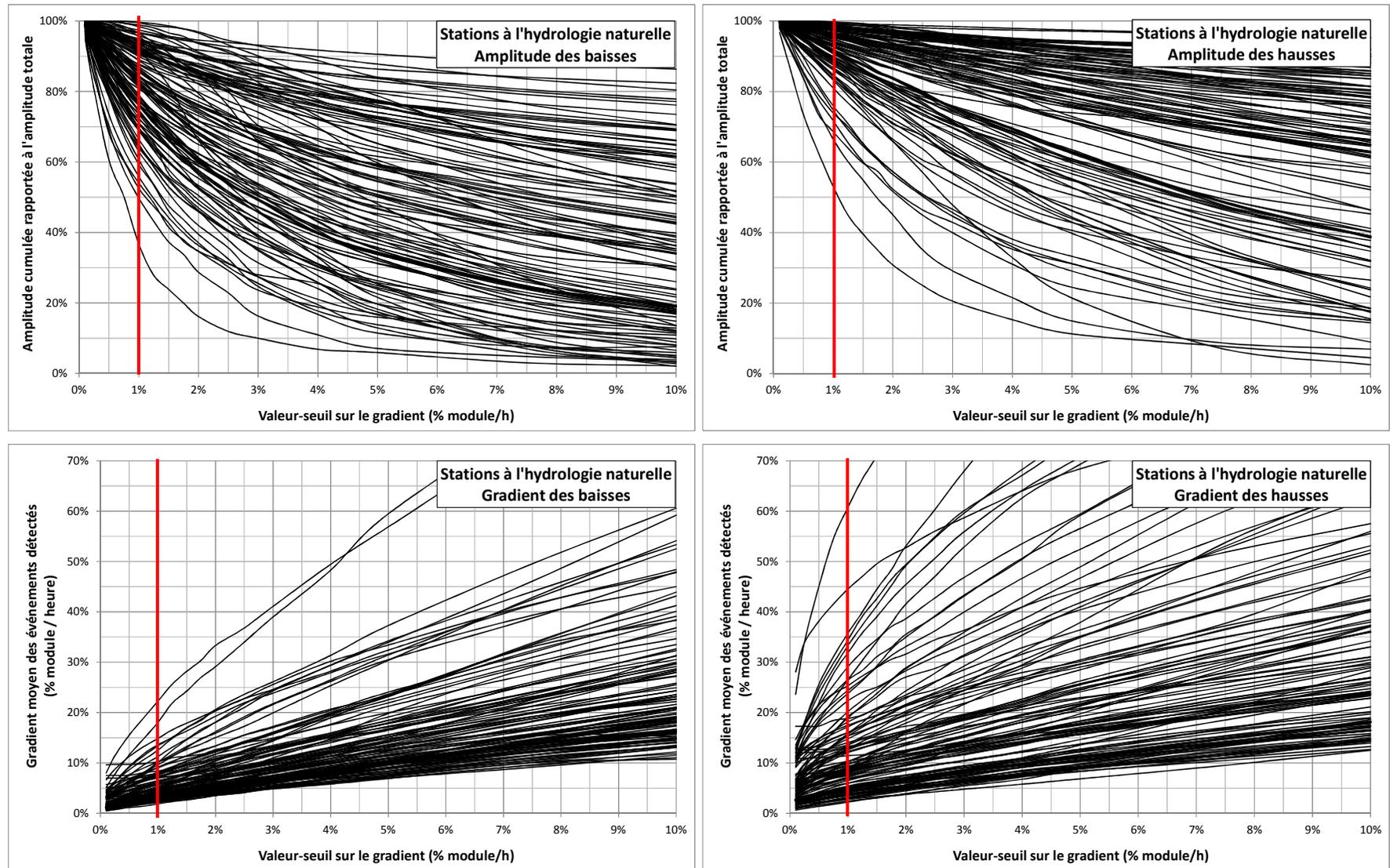


Figure 46 : Amplitude cumulée et gradient moyen des événements de hausse et de baisse de débit détectés, en fonction de la valeur-seuil sur le gradient, sur les stations à l'hydrologie naturelle (1 courbe par station).

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

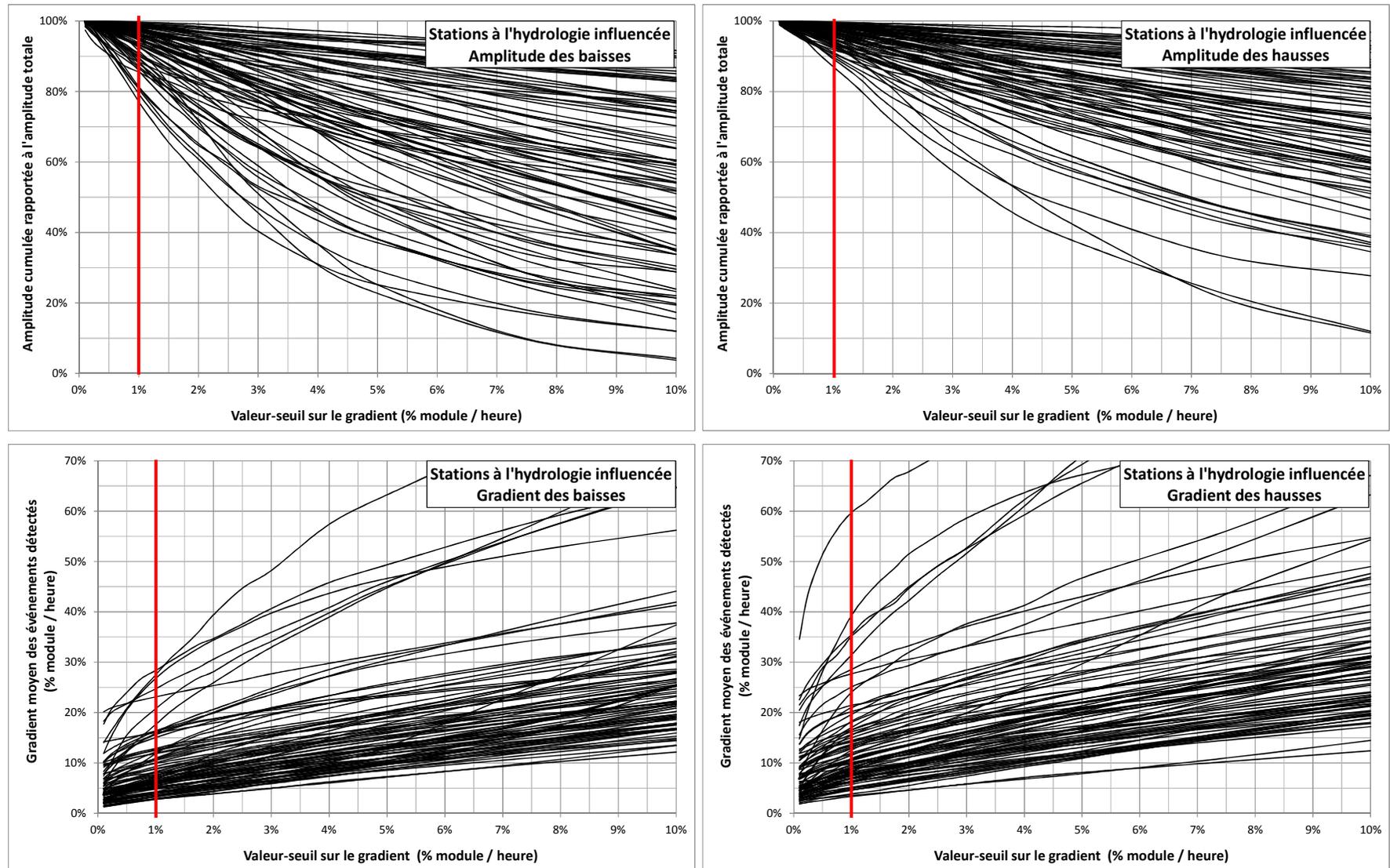


Figure 47 : Amplitude cumulée et gradient moyen des événements de hausse et de baisse de débit détectés, en fonction de la valeur-seuil sur le gradient, sur les stations à l'hydrologie influencée (1 courbe par station).

3.4.2. Etape 2 : Sélection des éclusées

La seconde étape vise à sélectionner parmi les événements de hausse et de baisse identifiés, ceux dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle, et que l'on qualifiera donc d'éclusées (colonne U pour les hausses dans la Figure 45). Cette sélection se base sur 3 critères :

- **une condition d'amplitude minimale :**

Pour qu'une variation soit retenue comme une éclusée, son amplitude doit d'une part être supérieure ou égale à 10% du module, et d'autre part représenter une variation supérieure ou égale à 20% du débit de base (débit avant une hausse ou après une baisse). Cette double condition vise à éviter de comptabiliser les petites variations liées aux dysfonctionnements et aux imprécisions des capteurs des stations hydrométriques, et celles dont les conséquences sur les paramètres hydromorphologiques restent a priori faibles (peu de variations des paramètres hydromorphologiques et des conditions d'habitat pour les espèces dans le cours d'eau ; voir par exemple les études d'impacts hydromorphologiques sur la Dordogne [Courret et al. 2006], la Creuse [Courret et Lascaux 2009] ou sur le Gave d'Ossau [Agerin 2012 ; Vandewalle et al. 2012]). Cette double condition ne pose pas de problème pour la sélection des éclusées hydroélectriques dans la mesure où les débits d'équipement des aménagements, ainsi que les amplitudes courantes entre les points de fonctionnement des turbines sont bien supérieurs à ces valeurs.

- **une condition de gradient minimal :**

L'étude des gradients des variations de débit naturelles (partie 2) a permis d'établir des formules donnant un ordre de grandeur du gradient maximal, de toutes variations de débit, à la hausse ou à la baisse, se déroulant en deçà de 4 fois le module du cours d'eau. Le critère de gradient est différencié entre les hausses et les baisses de débit, et présente une progressivité selon la taille du cours d'eau et selon la gamme de débit sur laquelle se déroule la variation. Seule la valeur du module du cours d'eau est nécessaire pour appliquer ces formules.

Une variation n'est retenue comme une éclusée que si son gradient dépasse cet ordre de grandeur naturel (valeur de la colonne T supérieure à 1 dans la Figure 45). L'utilisation de cette référence générale sur les gradients maximaux des variations naturelles de débit permet, dans le cadre de la construction de l'indicateur « éclusée », de contourner l'impossibilité de trouver systématiquement une référence locale d'hydrologie naturelle pour chaque site touchée par la problématique. **Les gradients naturels de référence étant beaucoup plus faibles pour les baisses de débit que pour les hausses, la démarche amène généralement à sélectionner davantage de baisses d'éclusées que de hausses d'éclusées.**

- **une limite haute sur le débit maximum :**

La limite haute sur le débit maximum a pour but d'éviter de prendre en compte les événements hydrologiques de crues et décrues dépassant les capacités des aménagements. Les variations dont le débit maximum dépasse cette limite haute ne sont donc pas retenues comme des éclusées. Ce critère sur le débit maximum est une « sécurité » supplémentaire par rapport aux deux critères de sélection sur l'amplitude et le gradient.

La valeur de débit maximum est à déterminer par l'opérateur en fonction du débit d'équipement du ou des aménagements hydroélectriques sources des éclusées en amont, ainsi qu'à partir d'un examen visuel détaillé de la chronique de débit. Dans la mesure où c'est une « sécurité » par rapport aux autres critères, et pour prendre en compte les éventuels apports intermédiaires entre la source des éclusées et la station hydrométrique, il est conseillé de prendre un peu de marge dans la fixation du débit maximum.

La complexité des schémas d'aménagements hydroélectriques et de leur gestion peut parfois rendre délicate la définition du critère sur le débit maximum. L'usine induisant les éclusées à une station donnée n'est pas forcément la première usine à l'amont. Des éclusées d'usines plus fortement équipées, situées plus en amont, peuvent se répercuter au travers d'un aménagement en provoquant des déversements au barrage. C'est le cas par exemple du Doubs franco-suisse sur lequel les

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

éclusées de l'aménagement du Chatelôt équipé à 45 m³/s se ressentent à l'aval de l'aménagement du Refrain équipé à 23 m³/s (Courret et Larinier 2008). Cela peut également être le cas à l'aval des chaînes d'aménagements où celui situé le plus aval, ayant souvent un rôle de démodulation partielle des éclusées, est moins équipé que les précédents. C'est le cas par exemple sur la Dordogne avec un débit d'équipement de 550 m³/s pour le Chastang et de 340 m³/s pour le Sablier, ou sur la Creuse avec un débit d'équipement de 150 m³/s pour Eguzon et de 75 m³/s pour Roche-aux-Moines. L'exploitant n'ayant pas intérêt à « perdre » de l'eau par déversement au niveau l'aménagement le plus aval (à condition que ce soit le même), ces situations sont toutefois rares et restreintes à des périodes d'apports hydrologiques importants ou de demande énergétique exceptionnelle. Les influences de plusieurs aménagements sur des cours d'eau qui confluent sont également susceptibles de se cumuler, on peut alors considérer la somme de leur débit d'équipement (cas de la Maronne et de la Cère qui confluent avec la Dordogne, ou cas de la Vienne sur laquelle se cumulent les influences des chaînes d'aménagements sur le Taurion et sur la Maulde).

La valeur maximale que l'on peut renseigner pour la limite haute sur le débit maximum est de 4 fois le module. C'est lié au fait que les formules pour recalculer les gradients naturels ne sont pas applicables pour des débits supérieurs. Cela n'est pas gênant dans la mesure où la quasi-totalité des débits d'équipement des aménagements hydroélectriques sont inférieurs à 4 fois le module (Lauters 1995). Les quelques cas où le débit d'équipement des centrales est supérieur à cette valeur sont connus ; ces aménagements font partie de chaînes et présentent en aval un autre aménagement ayant un rôle de démodulation partielle, de telle sorte que des éclusées dépassant 4 fois le module apparaissent rarement sur des linéaires consécutifs de cours d'eau.

Ces valeur-seuils sur l'amplitude, le gradient ou le débit maximum ne préjugent en rien de l'impact écologique des hausses et des baisses d'éclusées sélectionnées au final. La qualité de la sélection des éclusées dépendra toujours de la qualité de la chronique de débit (« finesse » du pas de temps ; présence ou non d'artefacts). Le long d'un cours d'eau, **à partir d'un aménagement générant des éclusées, le nombre d'éclusées sélectionnées par la méthode a tendance à diminuer vers l'aval** du fait d'une part de l'augmentation du module du cours d'eau, et donc des valeur-seuils sur l'amplitude et le gradient, et d'autre part du fait de l'amortissement des éclusées qui peuvent progressivement retrouver des gradients proches de l'hydrologie naturelle.

La méthodologie de sélection des éclusées proposée ne nécessite que la valeur du module du cours d'eau qui est une donnée facilement accessible (disponible à chaque station de la banque HYDRO), ainsi que des informations sur les débits d'équipement des centrales présentes en amont. Cette méthodologie est donc adaptée à une utilisation « en routine » pour la production d'indicateurs. Toutes les hausses d'éclusées sélectionnées sont listées par ordre chronologique dans un des onglets du fichier Excel avec leurs caractéristiques (de même pour les baisses d'éclusées ; Figure 48) :

- débit de base et débit maximum,
- date et heure de début et de fin de la variation,
- amplitude totale, gradient moyen,
- rapport du débit maximum sur le débit de base, amplitude rapportée au débit de base, durée minimale en hydrologie naturelle (différence entre TQAprès et TQAvant) et gradient rapporté à la référence naturelle.

Baisse d'éclusées										
Débit avant baisse (m3/s)	Débit après baisse (m3/s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m3/s)	Gradient moyen ((m3/s)/h)	Rapport global	Amplitude rapportée au débit de base	TQAvant (heure)	TQAprès (heure)	Gradient comparé à la référence naturelle
65.20	47.90	40182.79	40182.93	17.30	5.19	1.36	0.36	36.01	51.32	4.59
64.20	13.60	40183.09	40183.54	50.60	4.67	4.72	3.72	36.74	125.24	8.17
68.20	13.10	40183.97	40184.56	55.10	3.84	5.21	4.21	33.89	127.67	6.54
68.00	18.90	40184.97	40185.54	49.10	3.59	3.60	2.60	34.03	104.41	5.15
68.50	17.50	40186.14	40186.58	51.00	4.78	3.91	2.91	33.69	109.20	7.08
68.80	12.50	40187.06	40187.71	56.30	3.63	5.50	4.50	33.49	130.73	6.27
35.80	28.00	40187.85	40187.98	7.80	2.60	1.28	0.28	66.92	80.85	4.64

Figure 48 : Visualisation du tableau listant des baisses d'éclusées dans le fichier Excel.

3.4.3. Etape 3 : Concaténation des éclusées consécutives

Au sein des hydrogrammes, un événement global de hausse ou de baisse de débit peut être décrit de manière entrecoupée par de courtes phases de stabilité du débit, voire par de petites variations inverses, qui peuvent être d'origine réelle ou artificielle. Des phases de stabilité du débit entre deux mesures sont notamment susceptibles d'apparaître dans le cas de variations assez lentes décrites avec un pas de temps réduit entre les mesures. A l'aval des centrales hydroélectriques, on trouve également régulièrement des variations saccadées du fait de paliers aux différents points de fonctionnement successifs d'une turbine ou de plusieurs turbines (Figure 49). Cela se manifeste en particulier dans le cas où la station hydrométrique est proche de la centrale source des éclusées.

A ce stade de la méthodologie de repérage et de sélection des éclusées, les variations séparées par une phase de stabilité ou une inversion de tendance du débit sont considérées comme des événements distincts. Cela aurait tendance à surestimer le nombre d'éclusées, à en surestimer les valeurs statistiques des débits de base et des gradients, et à en sous-estimer les valeurs statistiques des débits maxima et des amplitudes. Pour y pallier, la 3^{ème} étape vise à concaténer, parmi les éclusées sélectionnées, celles consécutives que l'on peut considérer comme faisant partie d'une seule éclusée globale. La concaténation de 2 hausses d'éclusées consécutives se base sur 3 critères :

- le débit de base de la 2^{ème} hausse ne doit pas être inférieur de plus de 10% du module du cours d'eau par rapport au débit maximum de la 1^{ère} hausse. Cette condition exclut la possibilité d'avoir repéré une baisse d'éclusée entre les 2 hausses.
- le débit maximum de la 2^{ème} hausse doit être supérieur de plus de 10% du module du cours d'eau par rapport au débit maximum de la 1^{ère} hausse.
- le gradient global entre le débit de base de la 1^{ère} hausse et le débit maximum de la 2^{ème} hausse doit être supérieur à la valeur de référence naturelle.

De même, la concaténation de 2 baisses d'éclusées consécutives se base sur 3 critères :

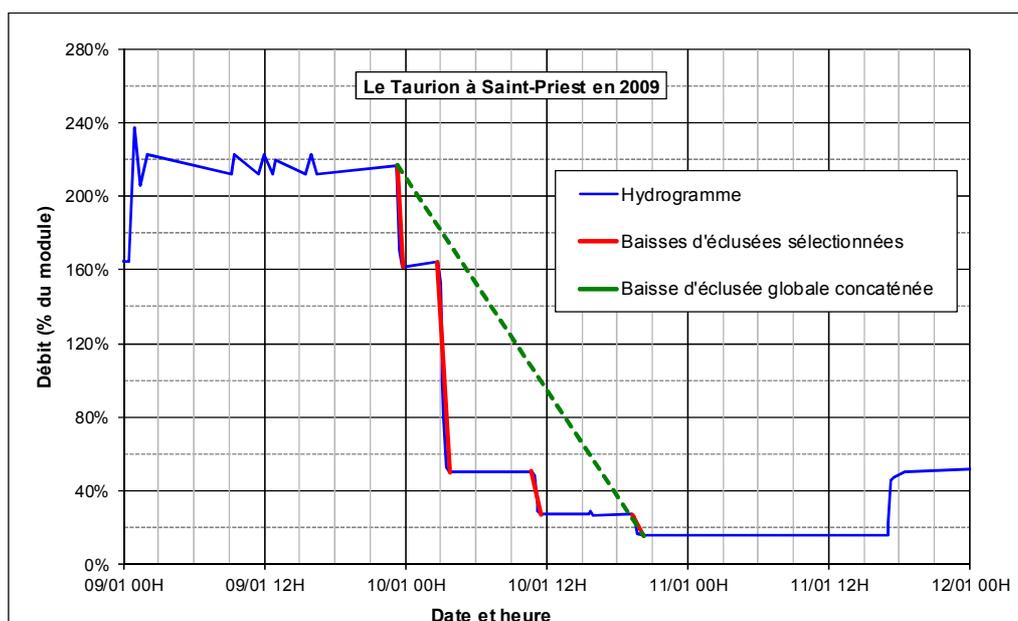
- le débit maximum de la 2^{ème} baisse ne doit pas être supérieur de plus de 10% du module du cours d'eau par rapport au débit de base de la 1^{ère} baisse. Cette condition exclut la possibilité d'avoir repéré une hausse d'éclusée entre les 2 baisses.
- le débit de base de la 2^{ème} baisse doit être inférieur de plus de 10% du module du cours d'eau par rapport au débit de base de la 1^{ère} baisse.
- le gradient global entre le débit maximum de la 1^{ère} baisse et le débit de base de la 2^{ème} baisse doit être supérieur à la valeur de référence naturelle.

Lorsque les 3 conditions sont réunies, les 2 hausses consécutives sont concaténées en une seule hausse globale allant du débit de base de la 1^{ère} hausse, jusqu'au débit maximum de la 2^{ème} hausse, avec le recalcul de l'amplitude et du gradient correspondant (idem pour les baisses ; Figure 49).

Le processus de concaténation se déroule en comparant les hausses ou les baisses consécutives 2 par 2, en partant des 2 dernières sélectionnées. Lorsque 2 éclusées sont concaténées, la nouvelle éclusée recalculée est à nouveau comparée avec la précédente. Le processus permet ainsi de concaténer un nombre non limité d'éclusées consécutives (dans les faits, quelquefois jusqu'à 3 ou 4 éclusées, mais rarement davantage). Dans les tableaux listant respectivement les hausses et les baisses d'éclusées sélectionnées, les lignes correspondant à des éclusées concaténées sont surlignées en jaune.

Les gradients naturels de référence étant beaucoup plus faibles pour les baisses de débit que pour les hausses, la concaténation de baisses consécutives est beaucoup plus fréquente que la concaténation de hausses.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes



Débit avant baisse (m3/s)	Débit après baisse (m3/s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m3/s)	Gradient moyen ((m3/s)/h)	Rapport global	Amplitude rapportée au débit de base	TQAvant (heure)	TQAprès (heure)	Gradient comparé à la référence naturelle
13.60	9.87	39815.68	39815.72	3.73	3.73	1.38	0.38	44.38	55.73	11.35
13.40	6.05	39819.69	39819.71	7.35	14.70	2.21	1.21	44.89	74.23	58.68
10.10	5.02	39820.21	39820.32	5.08	1.85	2.01	1.01	54.89	81.61	9.72
13.70	5.12	39821.30	39821.33	8.58	11.44	2.68	1.68	44.13	80.82	48.93
41.20	30.70	39822.97	39822.99	10.50	21.00	1.34	0.34	11.19	18.88	15.38
31.20	9.50	39823.11	39823.16	21.70	21.70	3.28	2.28	18.43	57.13	38.69
9.52	5.12	39823.45	39823.48	4.50	6.00	1.88	0.88	56.67	80.82	32.21
5.12	2.99	39823.80	39823.84	2.13	2.13	1.71	0.71	80.82	103.00	22.17
29.00	15.60	39825.75	39825.82	13.40	7.66	1.86	0.86	20.48	39.72	11.00
31.20	14.70	39826.54	39826.59	16.50	13.20	2.12	1.12	18.43	41.72	18.63
Débit avant baisse (m3/s)	Débit après baisse (m3/s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m3/s)	Gradient moyen ((m3/s)/h)	Rapport global	Amplitude rapportée au débit de base	TQAvant (heure)	TQAprès (heure)	Gradient comparé à la référence naturelle
13.60	9.87	39815.68	39815.72	3.73	3.73	1.38	0.38	44.38	55.73	11.35
13.40	6.05	39819.69	39819.71	7.35	14.70	2.21	1.21	44.89	74.23	58.68
10.10	5.02	39820.21	39820.32	5.08	1.85	2.01	1.01	54.89	81.61	9.72
13.70	5.12	39821.30	39821.33	8.58	11.44	2.68	1.68	44.13	80.82	48.93
41.20	2.99	39822.97	39823.84	38.21	1.82	13.78	12.78	11.19	103.00	4.37
29.00	15.60	39825.75	39825.82	13.40	7.66	1.86	0.86	20.48	39.72	11.00
31.20	14.70	39826.54	39826.59	16.50	13.20	2.12	1.12	18.43	41.72	18.63

Figure 49 : Illustration, sur l'hydrogramme et dans le tableau listant les baisses d'éclusées sélectionnées, de la concaténation de 4 baisses d'éclusées consécutives sur le Taurion à Saint-Priest.

3.5. Test du nombre de variations retenues sur les chroniques de débit naturelles

La méthodologie développée pour le repérage des éclusées au sein des hydrogrammes a été testée sur le jeu de données d'hydrologie naturelle présenté en partie 2 (1575 chroniques annuelles de débit extraites de 97 stations ; voir 2.2), de façon à vérifier s'il n'y a bien aucun ou très peu d'événements sélectionnés. La Figure 50 présente les pourcentages cumulés des chroniques annuelles de débit selon le nombre de baisses, le nombre de hausses et le nombre cumulé de baisses et hausses sélectionnés.

Concernant le nombre de baisse, il n'en est retenu aucune pour près de la moitié des années, moins de 4 pour environ 90% des années, moins de 12 pour 99% des années et au maximum 19. Concernant le nombre hausse, il n'en est retenu aucune pour environ 95% des années, moins de 4 pour 99% des années, et au maximum 9. Concernant le nombre cumulé de baisse et hausse, il n'en est retenue aucune pour près de la moitié des années, moins de 4 pour environ 90% des années, moins de 14 pour 99% des années et au maximum 20.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Ces résultats permettent d'avancer que, **compte tenu des critères de sélection adoptés, l'hydrologie d'une station pourra être considérée au moins sensiblement perturbée dès lors que le cumul des nombres annuels de baisses et de hausses sélectionnées est supérieur à 20.**

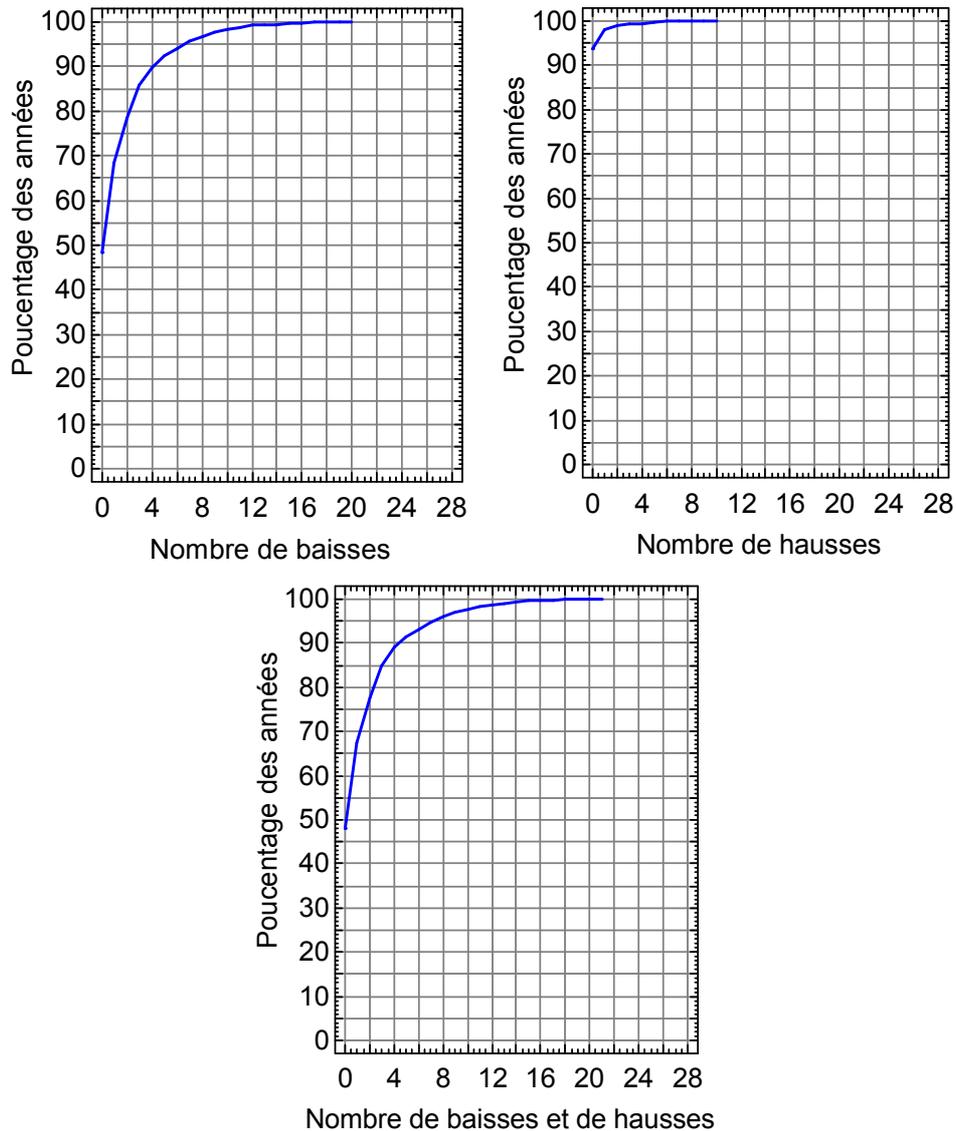


Figure 50 : Pourcentages cumulés des années selon le nombre de baisses retenues, le nombre de hausses retenues et le nombre cumulé de baisses et hausses retenues.

3.6. Descripteurs des régimes d'éclusées

3.6.1. Paramètres chiffrés

Le terme « régime d'éclusées » fait référence à l'ensemble des éclusées durant une période (année, saison, période biologique, période tarifaire de l'électricité, ...). Pour caractériser un régime de baisses ou de hausses d'éclusées sur une période, les paramètres chiffrés suivants sont produits de manière automatisée dans le fichier Excel :

- le nombre de hausses et de baisses d'éclusées.
- 9 valeurs statistiques (minimum, moyenne, maximum, médiane, 1^{er} et 3^{eme} quartile, 1^{er} et 9^{eme} décile) de la distribution des valeurs des 7 variables caractérisant chaque hausse et baisse d'éclusées sélectionnée : débits de base, débits maxima, amplitude, gradient, rapport débit maximum sur débit de base, amplitude rapportée au débit de base et gradient rapporté à la référence naturelle. Soit au total 56 valeurs pour les hausses et 56 valeurs pour les baisses d'éclusées.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Dans la suite du document, ces valeurs statistiques sont codifiées avec des termes composés de la manière suivante :

- une première lettre majuscule, H ou B, indiquant que la valeur concerne les hausses ou les baisses d'éclusées respectivement
- un terme indiquant le paramètre : débits de base (qbase), débits maxima (qmax), amplitude (ampli), gradient (grad), rapport débit maximum sur débit de base (rapp), amplitude rapportée au débit de base (amprap) et gradient rapporté à la référence naturelle (gradref).
- Soit les termes min, moy ou max pour indiquer les valeurs minimales, moyennes ou maximales, soit un nombre indiquant le quantile de non-dépassement correspondant.

Par exemple, le code Bqbase25 désigne ainsi le débit de base non dépassé par 25% des baisses d'éclusées.

Dans le fichier développé, l'ensemble des paramètres caractérisant les régimes d'éclusées (114 au total) est produit automatiquement par année, ainsi que par mois pour chaque année (Figure 51). Les tableaux listant les caractéristiques de toutes les baisses et hausses d'éclusées peuvent être retravaillés pour obtenir des statistiques sur des périodes particulières (saisons, périodes biologiques, périodes tarifaires de l'électricité, ...). Les paramètres dimensionnels peuvent être adimensionnalisés en les rapportant au module du cours d'eau afin de faciliter les comparaisons entre stations.

Année	Nombre de baisses	Rapport							
		Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9
2008	303	1.21	3.02	11.94	1.49	1.91	2.73	3.79	5.01
2009	240	1.24	2.84	10.27	1.50	1.86	2.48	3.31	4.86
2010	306	1.21	3.35	87.64	1.42	1.92	2.71	3.82	4.91

Année	Mois	Nombre de baisses	Rapport							
			Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9
2008	1	33	1.31	3.12	6.92	1.39	1.64	3.09	4.06	5.31
2008	2	45	1.23	3.41	5.74	1.61	1.95	2.66	5.03	5.43
2008	3	41	1.58	3.58	6.55	2.24	2.68	3.60	4.36	5.25
2008	4	22	1.23	2.88	6.96	1.54	1.98	2.96	3.51	3.81
2008	5	17	1.27	3.01	4.57	1.75	2.62	3.20	3.49	4.02
2008	6	5	1.22	2.12	4.82	1.23	1.24	1.53	1.79	3.61
2008	7	28	1.21	2.36	4.07	1.27	1.69	2.40	2.93	3.33
2008	8	47	1.32	2.56	3.75	1.81	2.25	2.61	2.96	3.10
2008	9	34	1.36	3.67	11.94	1.68	2.12	2.79	4.64	6.13
2008	10	29	1.30	2.49	5.09	1.43	1.53	2.38	3.12	3.72
2008	11	1	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
2008	12	1	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21

Figure 51 : Visualisation partielle (rapport débit maximum / débit de base) des onglets du fichier Excel avec les paramètres caractérisant les régimes des baisses d'éclusées par année (en haut) et par mois pour chaque année (en bas) sur la Loire à Feurs.

3.6.2. Représentation graphique

Pour visualiser l'ensemble des caractéristiques d'un régime d'éclusées sur une période, il est proposé de les représenter au travers d'un diagramme en bulle (Figure 52). Chaque bulle correspond à une éclusée et est positionnée en fonction de son débit de base en abscisse et de son amplitude en ordonnée ; le nombre de bulles rend ainsi compte du nombre d'éclusées. Le débit maximum peut être déduit en sommant les 2 valeurs. La couleur de la bulle est fonction du gradient de l'éclusée (sous forme de classe).

Le fichier Excel produit automatiquement 2 diagrammes en bulle représentant respectivement l'ensemble des hausses et des baisses d'éclusées durant la période de données traitées. Les axes sont gradués en proportion du module pour faciliter les comparaisons entre stations.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

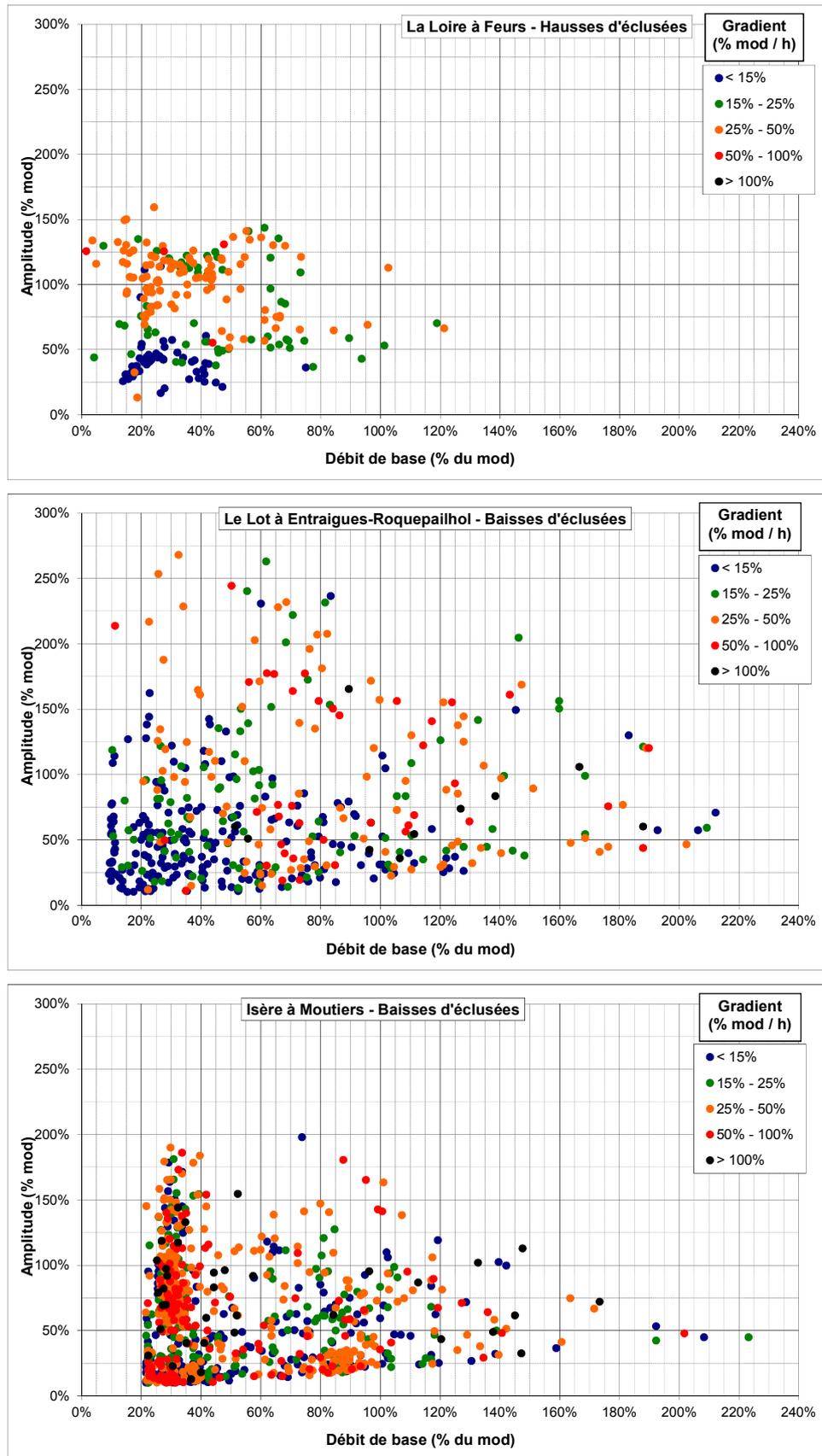


Figure 52 : Exemples de diagrammes en bulle pour les hausses ou les baisses d'éclusées durant l'année 2010.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

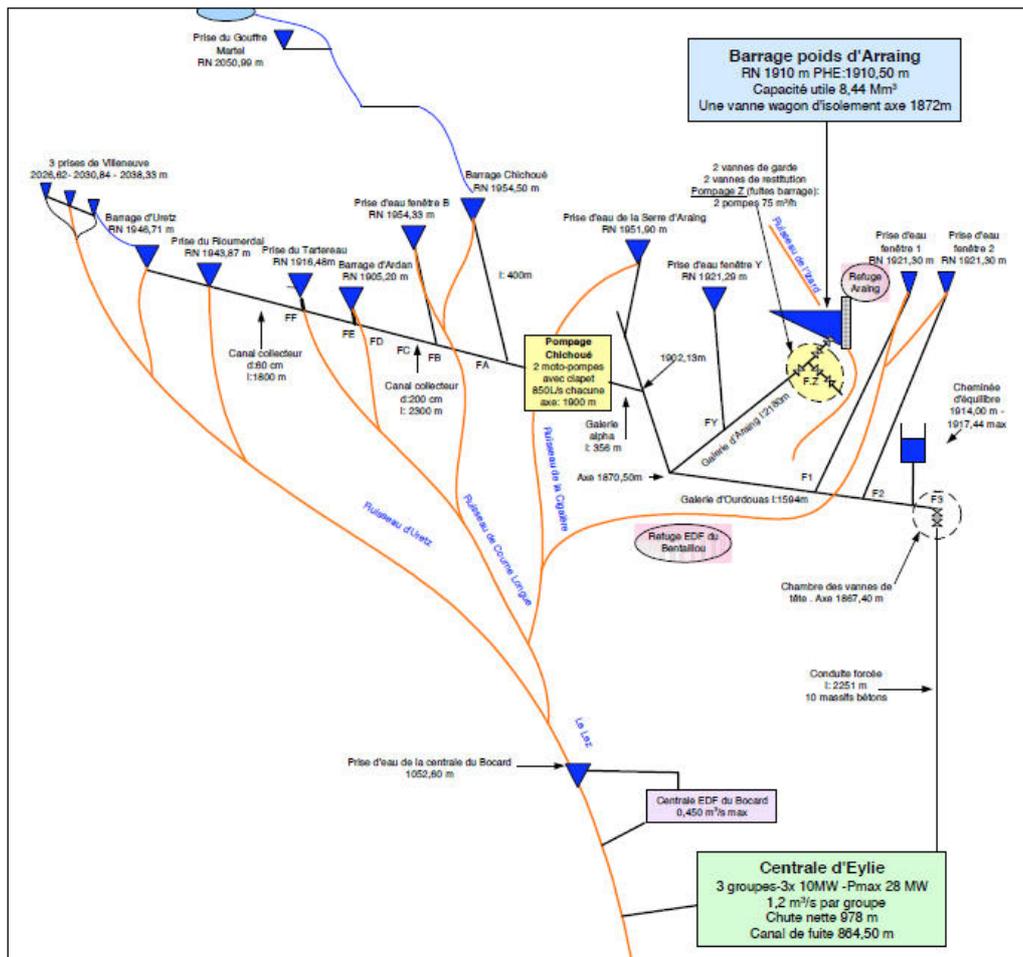
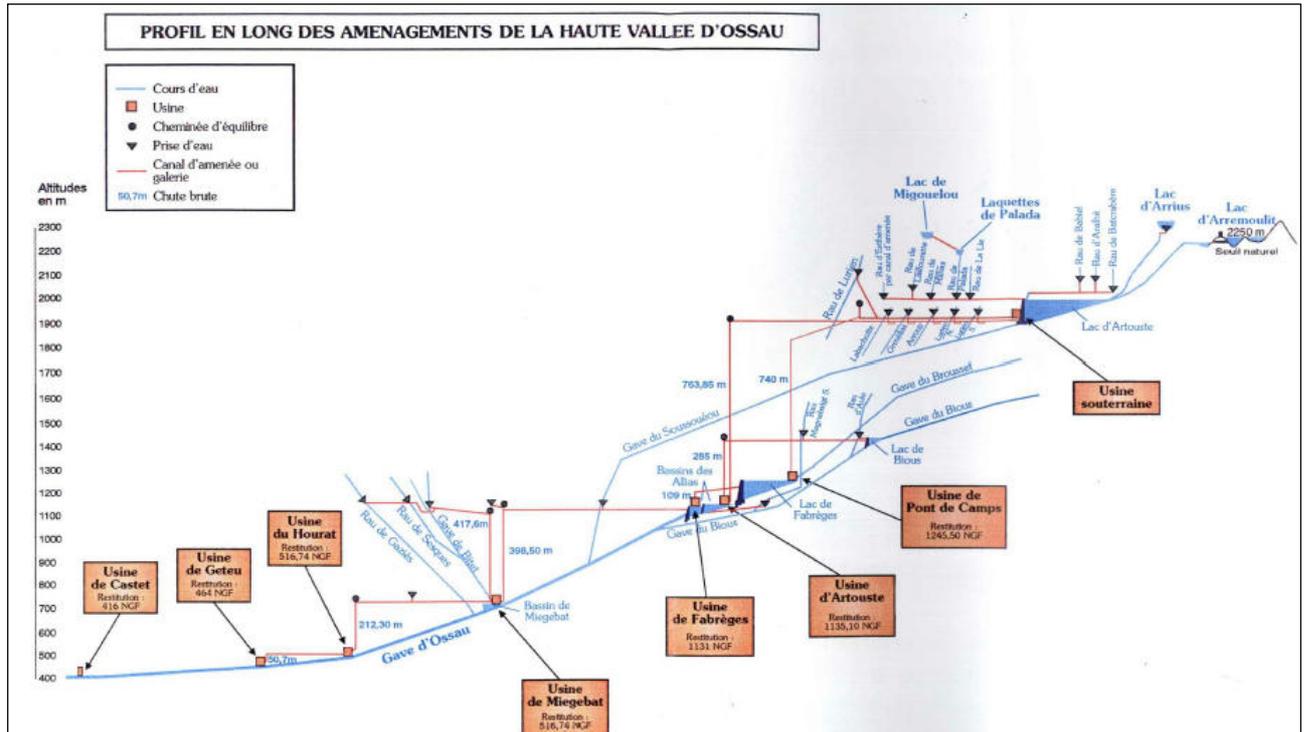


Figure 54 : Exemple de schémas d'aménagements hydroélectriques avec des barrages d'altitude et des usines « de lac ». Barrage d'Artouste, Bious et Fabrèges en vallée d'Ossau (64) en haut ; barrage d'Arraing et centrale d'Eylie sur le Lez (09) en bas (source SHEM et EDF).

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

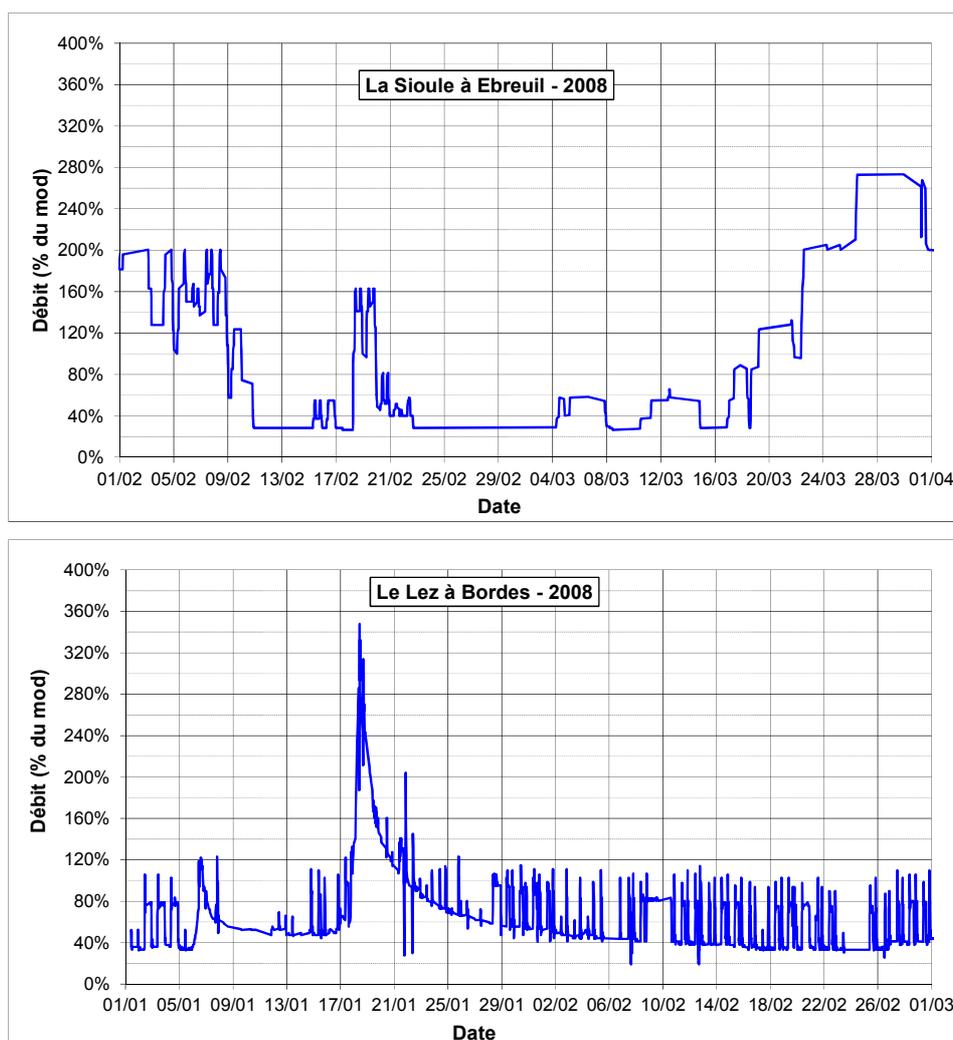


Figure 55 : Illustration d'une modulation complète du débit d'un cours d'eau par le turbinage (en haut) et d'éclusées se surimposant sur un régime hydrologique pseudo-naturel (en bas).

La gestion d'un aménagement hydroélectrique est encadrée par son règlement d'eau qui fixe notamment la ou les valeurs de débit réservé selon les périodes, et parfois des valeurs maximales de gradient ou des durées minimales de paliers à certains débits. Elle peut également être influencée par des missions annexes de soutien d'étiage, d'écrêtage des crues, de maintien d'une cote touristique estivale sur la retenue, ou de lâchés d'eau pour la pratique des sports d'eaux-vives en aval. Au niveau d'une centrale, les possibilités de régulation du débit turbiné dépendent du nombre et du type de turbine (Pelton, Francis ou Kaplan) et de leur système de régulation. Selon leurs équipements, certaines centrales présentent seulement quelques points de fonctionnement précis, et d'autres offrent plus de souplesse pour le choix du débit turbiné.

A l'aval des centrales sources d'éclusées, quel que soit leur type, on trouve régulièrement d'autres aménagements dits « au fil de l'eau » qui ne possèdent aucune capacité de stockage (ou très peu), mais qui retranscrivent les éclusées. La retranscription peut être complète lorsque les aménagements « au fil de l'eau » présentent des débits d'équipements supérieurs ou égaux à ceux fonctionnant par éclusées. Les éclusées réapparaissent sur le cours d'eau parfois très loin à l'aval du barrage à l'origine des éclusées. La retranscription peut être incomplète lorsque les aménagements « au fil de l'eau » présentent des débits d'équipements inférieurs à ceux fonctionnant par éclusées. Seule une fraction du débit de l'éclusées est alors turbinée et l'excédent provoque des déversements au barrage et se répercutent dans les éventuels tronçons court-circuités. C'est souvent le cas au niveau des microcentrales de producteurs autonomes présentes à l'aval d'aménagements de grands producteurs (EDF, SHEM).

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

L'ensemble de ces facteurs (régime hydrologique, schéma d'aménagement, capacité de stockage des retenues, équipement des centrales, retranscription des éclusées) aboutit à une variabilité importante dans les modes de gestion des aménagements et dans les régimes d'éclusées générés en terme de nombre d'éclusées par an, de débits de base, d'amplitudes, de débits maximaux et de gradients, etc... De plus, la gestion d'un aménagement compose avec la demande énergétique et l'hydrologie naturelle qui sont deux paramètres fluctuants dans le temps. Cela rajoute de la variabilité au sein d'un régime d'éclusées selon les saisons et les années. Enfin, l'amortissement progressif des éclusées vers l'aval et leur "dilution" par les apports intermédiaires engendrent une atténuation vers l'aval des caractéristiques de chaque régime d'éclusées, jusqu'à ce que les éclusées ne soient plus vraiment perceptibles.

3.7.2. Statistiques globales des régimes d'éclusées

La Figure 56 présente les valeurs classées des nombres de hausses, de baisses et nombre total d'éclusées parmi les 491 années de chronique hydrologique analysées. Le nombre total d'éclusées sélectionnées par la méthodologie peut varier de seulement quelques éclusées par année lorsque leur influence est tout juste sensible, à plus de 3500 hausses et baisses d'éclusées par an pour les stations les plus perturbées. Un quart des chroniques présente un nombre inférieur à environ 150, un quart entre 150 et 300, un quart entre 300 et 550 et un quart un nombre supérieur à 550. Environ 13% des chroniques présentent plus de 1000 éclusées sélectionnées. Les nombres les plus élevés se rencontrent au niveau de stations hydrométriques situées à l'aval immédiat des aménagements dans des régimes d'éclusées très particuliers (cas de la Garonne à Saint-Béat), ainsi que dans des cas où un régime d'éclusées est retranscrit par des microcentrales présentant vraisemblablement des problèmes de régulation (cas notamment du Salat à Roquefort ou de la Vienne à Saint-Priest-Taurion en 2005 et 2006). Les nombres les plus faibles se rencontrent au niveau de stations hydrométriques situées loin à l'aval des aménagements générant les éclusées. Les éclusées sélectionnées sont alors essentiellement constituées de baisses. Cela est lié au critère de sélection sur les gradients de référence naturelle, qui sont beaucoup plus faibles pour les baisses de débit que pour les hausses.

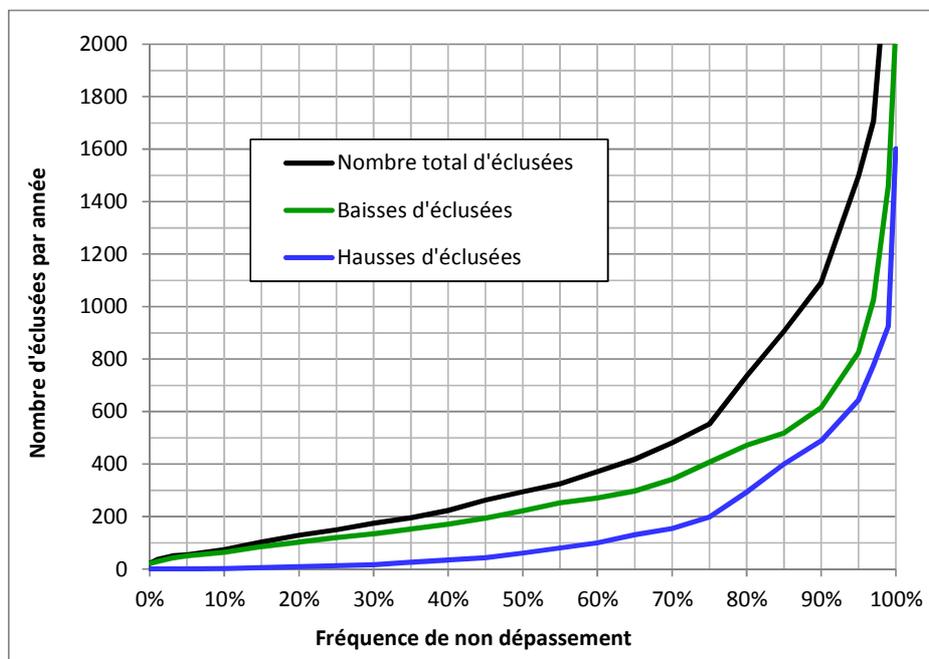


Figure 56 : Valeurs classées des nombres de hausses, de baisses et total d'éclusées parmi les 491 années de chronique hydrologique analysées.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Afin d'illustrer la variabilité des régimes d'éclusées, les Figure 57 et Figure 58 présentent, pour les régimes annuels de baisses et de hausses d'éclusées respectivement, les valeurs classées des statistiques de 6 paramètres (débit de base, débit maximum, amplitude, gradient, rapport [Qmax / Qbase] et rapport [gradient éclusée / gradient de référence naturelle]), parmi les 491 années de chronique hydrologique analysées.

Pour les régimes de baisses d'éclusées, par exemple, les débits de base médians varient pour la plupart entre environ 0.2 et 0.75 module, avec des valeurs qui diminuent rapidement pour 5% des chroniques, jusqu'à 0.03 module, et des valeurs qui augmentent rapidement pour 5% des chroniques, jusqu'à 1.1 module. Les débits maxima médians varient pour la plupart entre environ 0.45 et 1.4 module, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour 10% des chroniques, jusqu'à 2.5 module. Les amplitudes médianes varient pour la plupart entre environ 0.15 et 0.7 module, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour 10% des chroniques, jusqu'à 2.1 module. Les rapports [Qmax / Qbase] médians sont pour 75% des chroniques compris entre 1.2 et 2, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour les 25% de chroniques restantes, dépassant notamment un rapport de 5 pour 5% d'entre elles. Les gradients médians sont pour 75% des chroniques compris entre environ 0.02 et 0.15 module / heure, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour les 25% de chroniques restantes, dépassant notamment 0.33 module / heure pour 5% d'entre elles. Les rapports [gradient éclusée / gradient de référence naturelle] médians sont pour 75% des chroniques compris entre environ 1.5 et 10, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour les 25% de chroniques restantes, dépassant notamment un rapport de 22 pour 5% d'entre elles.

Les régimes de hausses d'éclusées présentent des statistiques globales du même ordre de grandeur que celles des régimes de baisses concernant les débits de base, débits maxima, amplitudes et rapports [Qmax / Qbase]. En revanche, les gradients des régimes de hausses d'éclusées s'avèrent plus élevés que ceux des baisses. Par exemple, les gradients médians sont pour 75% des chroniques compris entre environ 0.07 et 0.47 module / heure, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour les 25% de chroniques restantes, dépassant notamment 1.15 module / heure pour 5% d'entre elles. Par contre, les rapports [gradients éclusée / gradient de référence naturelle] des régimes de hausses d'éclusées s'avèrent plus faibles que ceux des baisses. Les rapports médians sont pour 75% des chroniques compris entre environ 1 et 2, avec des valeurs qui augmentent rapidement pour les 25% de chroniques restantes, dépassant notamment un rapport de 3.65 pour 5% d'entre elles.

Le Tableau 5 présente les coefficients de corrélation de rang de Spearman⁷ et les valeurs des tests de significativité statistique entre 18 paramètres décrivant les 491 régimes d'éclusées annuels (9 paramètres décrivant les baisses d'éclusées et 9 décrivant des hausses).

Entre les différents descripteurs d'un même paramètre, il ressort que les 1^{er} et 9^e déciles des amplitudes (Bampli10 et Bampli90 → 0.76) et des gradients (Bgrad10 et Bgrad90 → 0.87) sont corrélés positivement de manière forte. Les niveaux de corrélation sont en revanche bien plus faibles entre les 1^{er} et 9^e déciles des débits de base (Bqbase10 et Bqbase90 → 0.18) et des débits maxima (Bqmax10 et Bqmax90 → 0.45). C'est également le cas pour les hausses d'éclusées. Cela peut s'expliquer par le fait que les amplitudes et gradients des éclusées dépendent étroitement des caractéristiques des centrales qui sont stables dans le temps, mais que par contre les gammes de débits sur lesquelles se déroulent ces éclusées au niveau des stations hydrométriques dépendent des apports hydrologiques qui peuvent être très variables selon les cours d'eau et les années. C'est en particulier le cas à l'aval des centrales dites « de lac » avec un bassin versant intermédiaire significatif

⁷ Ce coefficient de corrélation a été choisi dans la mesure où les valeurs des paramètres caractéristiques des régimes d'éclusées présentent des distributions non-normales, ainsi que des valeurs extrêmes, susceptibles de biaiser les coefficients de corrélations linéaires de Pearson. Ce coefficient permet de mettre en évidence des corrélations non linéaires, mais monotone (strictement croissante ou strictement décroissante). Plus la valeur est proche de -1 ou de +1, plus le niveau de corrélation, respectivement négative ou positive, est fort, et inversement plus la valeur est proche de 0, plus le niveau de corrélation est faible.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

entre les retenues et les centrales, ainsi qu'au niveau des stations hydrométriques éloignées des centrales.

Ces différences de niveau de corrélation sont bien visualisables dans les Figure 59 à Figure 62 qui présentent les gammes des valeurs de débits de base, débits maxima, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées (1^{er} décile, médiane et 9^e décile) de chacun des 491 régimes d'éclusées annuels. Pour les amplitudes (Figure 61) et les gradients (Figure 62), les valeurs médianes et de 9^e décile tendent bien à augmenter avec les valeurs du 1^{er} décile. Cette tendance apparait par contre beaucoup moins nette pour les débits de base (Figure 59) ou les débits maxima (Figure 60). Certaines stations et années peuvent en effet présenter à la fois un 1^{er} décile des débits de base faibles et une valeur médiane et/ou une valeur de 9^e décile forte.

Entre les différents paramètres des baisses ou des hausses d'éclusées, de manière assez logique, il ressort des corrélations positives entre les débits de base et les débits maxima et entre les débits maxima et les amplitudes, surtout leurs 9^e déciles (Bqbase90 et Bqmax90 → 0.78 ; Bqmax90 et Bampli90 → 0.84). Les débits maxima et les amplitudes apparaissent également positivement corrélés avec les gradients, mais à un niveau moins fort (coefficients entre 0.47 et 0.26). Ces constats se retrouvent également pour les hausses d'éclusées.

De manière plus inattendue, le nombre de baisses d'éclusées est positivement corrélés aux 1^{er} et 9^e déciles des gradients (Baisses et Bgrad10 → 0.63 ; Baisses et Bgrad90 → 0.53). Cela traduit le fait que dans les régimes présentant de nombreuses éclusées, celles-ci sont nécessairement rapides. Par contre, il ne ressort pas la même corrélation entre le nombre de hausses et leurs gradients.

Entre les paramètres des baisses et des hausses, les nombres de baisses et de hausses d'éclusées sont positivement corrélés de manière forte (Baisses et Hausses → 0.76). Plus le nombre de baisses d'éclusées détectées est élevé, plus le nombre de hausses l'est également. Le nombre de hausses est également positivement corrélés aux gradients des baisses (Hausses et Bgrad10 → 0.60 ; Hausses et Bgrad90 → 0.63), alors qu'il ne l'est pas vraiment avec les gradients des hausses.

Entre les paires de paramètres analogues (Bqbase 10 et Hqbase10, ...), il ressort des corrélations positives fortes, avec des coefficients entre 0.63 et 0.87, sauf entre les 9^e déciles de débits de base. C'est en particulier le cas entre les 1^{er} déciles des débits de base et entre les 9^e déciles des amplitudes (0.87 et 0.83 respectivement).

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

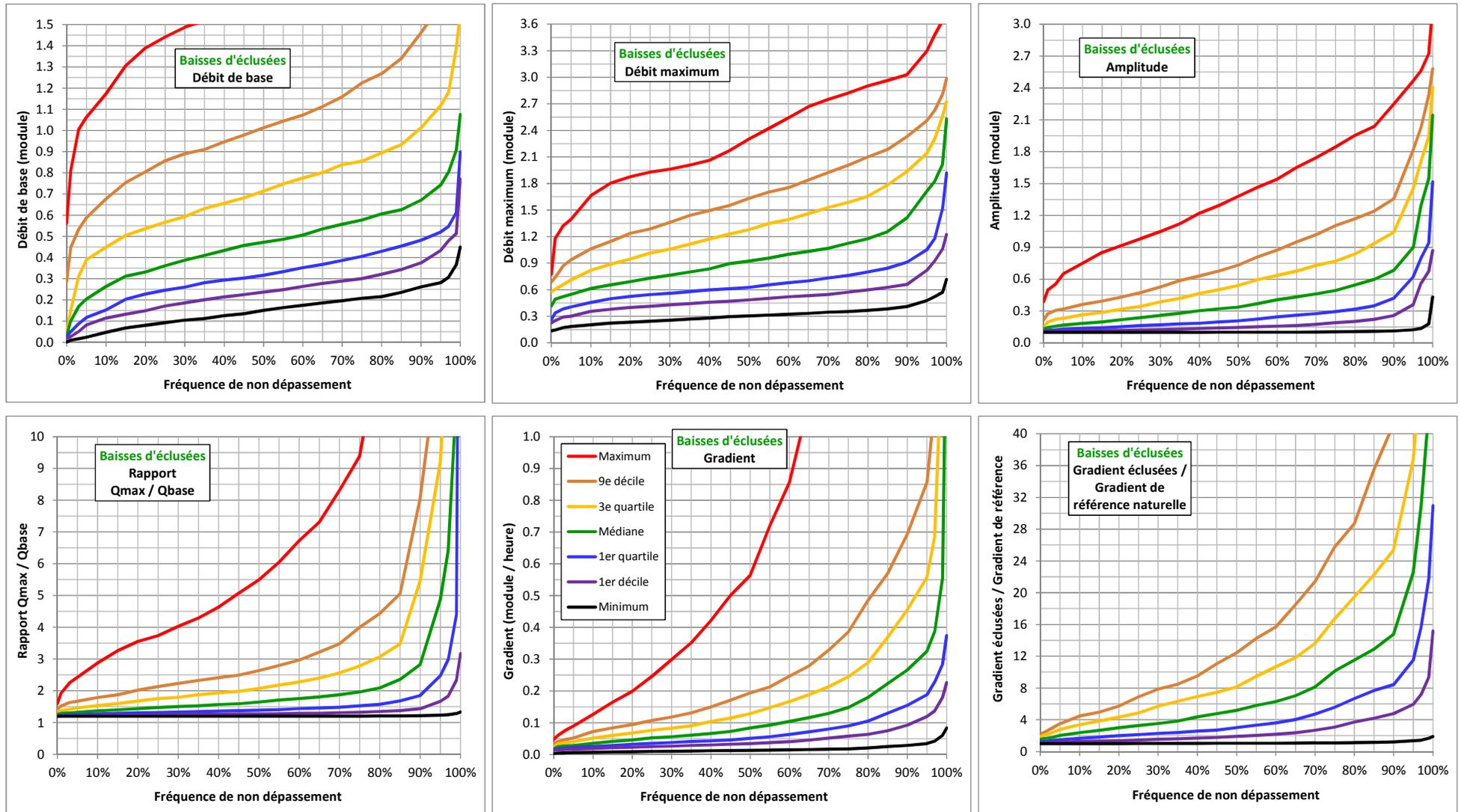


Figure 57 : Valeurs classées des statistiques de 6 paramètres caractérisant les régimes de baisses d'éclusées (débit de base, débit maximum, amplitude, gradient, rapport [Qmax / Qbase] et rapport [gradient éclusée / gradient de référence naturelle]), parmi les 491 années de chronique hydrologique.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

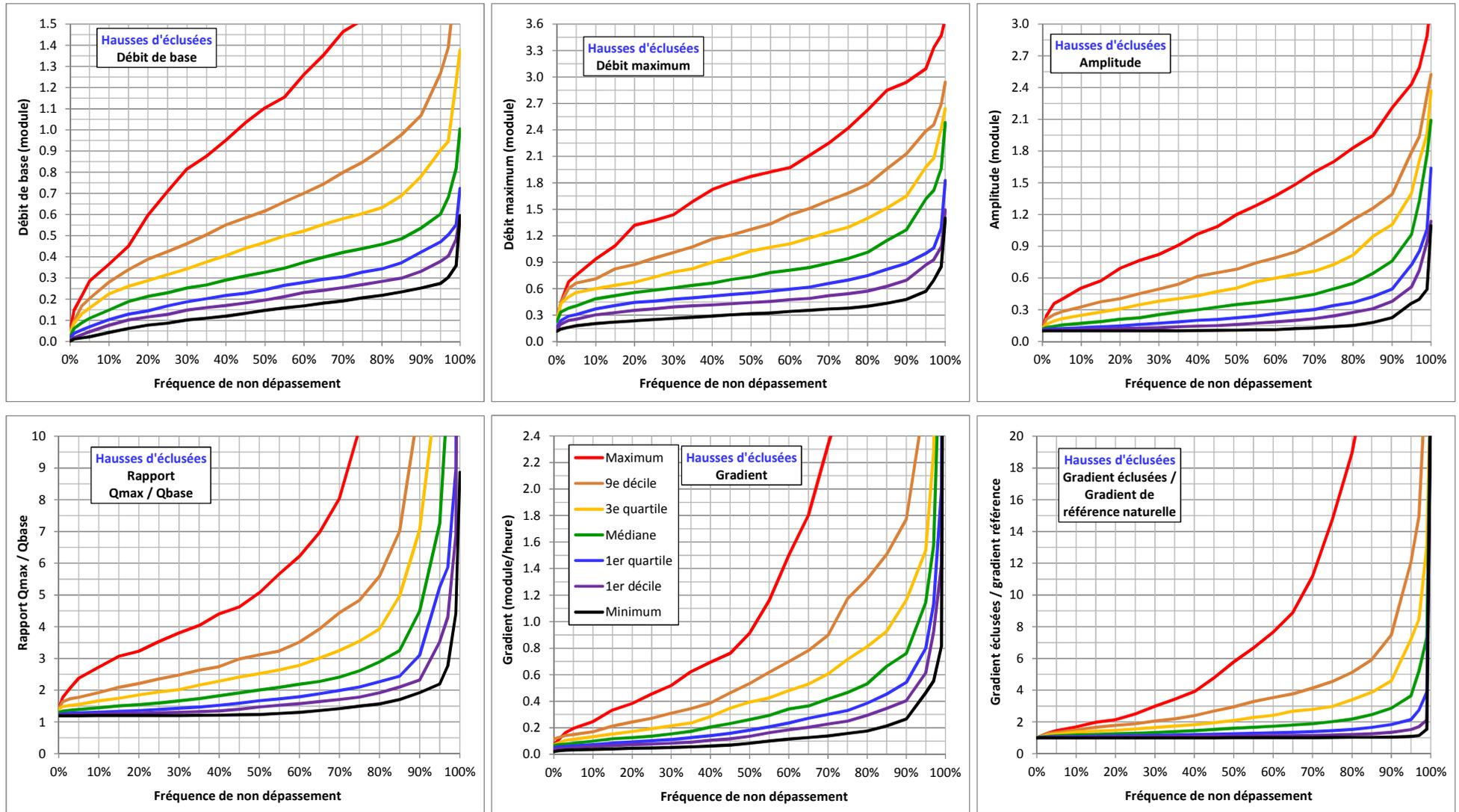


Figure 58 : Valeurs classées des statistiques de 6 paramètres caractérisant les régimes de hausses d'éclusées (débit de base, débit maximum, amplitude, gradient, rapport [Qmax / Qbase] et rapport [gradient éclusée / gradient de référence naturelle]), parmi les 491 années de chronique hydrologique.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Coefficient de corrélation de rang de Spearman	Baisses	Bqbase10	Bqbase90	Bqmax10	Bqmax90	Bampli10	Bampli90	Bgrad10	Bgrad90	Hausse	Hqbase10	Hqbase90	Hqmax10	Hqmax90	Hampli10	Hampli90	Hgrad10	Hgrad90
Baisses		-0.21	-0.18	-0.05	-0.08	0.09	0.06	0.63	0.53	0.76	-0.04	0.18	0.16	0.18	0.04	0.15	0.34	0.45
		0.00	0.00	0.25	0.08	0.07	0.19	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00
Bqbase10	-0.21		0.18	0.41	-0.08	-0.25	-0.33	-0.24	-0.17	-0.15	0.87	0.39	0.24	-0.02	-0.27	-0.28	-0.18	-0.21
		0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00
Bqbase90	-0.18	0.18		0.38	0.78	0.31	0.45	0.11	0.18	-0.04	0.10	0.40	0.15	0.43	0.13	0.30	0.00	0.06
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.44	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.97	0.18
Bqmax10	-0.05	0.41	0.38		0.45	0.59	0.41	0.32	0.26	0.06	0.33	0.27	0.71	0.45	0.42	0.38	0.25	0.16
		0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bqmax90	-0.08	-0.08	0.78	0.45		0.60	0.84	0.31	0.30	0.04	-0.10	0.21	0.29	0.66	0.38	0.66	0.11	0.14
		0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Bampli10	0.09	-0.25	0.31	0.59	0.60		0.76	0.47	0.34	0.03	-0.21	-0.05	0.52	0.47	0.75	0.65	0.44	0.33
		0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bampli90	0.06	-0.33	0.45	0.41	0.84	0.76		0.44	0.36	0.16	-0.29	0.06	0.34	0.67	0.55	0.83	0.21	0.20
		0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bgrad10	0.63	-0.24	0.11	0.32	0.31	0.47	0.44		0.87	0.60	-0.10	0.15	0.41	0.38	0.35	0.40	0.63	0.63
		0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bgrad90	0.53	-0.17	0.18	0.26	0.30	0.34	0.36	0.87		0.63	-0.01	0.30	0.35	0.44	0.22	0.36	0.60	0.73
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hausse	0.76	-0.15	-0.04	0.06	0.04	0.03	0.16	0.60	0.63		0.00	0.45	0.11	0.39	-0.18	0.24	0.05	0.29
		0.00	0.00	0.44	0.21	0.38	0.49	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00
Hqbase10	-0.04	0.87	0.10	0.33	-0.10	-0.21	-0.29	-0.10	-0.01	0.00		0.41	0.39	0.02	-0.20	-0.24	-0.02	-0.06
		0.41	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.78	0.96	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.64	0.18
Hqbase90	0.18	0.39	0.40	0.27	0.21	-0.05	0.06	0.15	0.30	0.45	0.41		0.17	0.59	-0.25	0.20	-0.16	0.08
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Hqmax10	0.16	0.24	0.15	0.71	0.29	0.52	0.34	0.41	0.35	0.11	0.39	0.17		0.42	0.65	0.40	0.50	0.32
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hqmax90	0.18	-0.02	0.43	0.45	0.66	0.47	0.67	0.38	0.44	0.39	0.02	0.59	0.42		0.29	0.84	0.10	0.23
		0.00	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Hampli10	0.04	-0.27	0.13	0.42	0.38	0.75	0.55	0.35	0.22	-0.18	-0.20	-0.25	0.65	0.29		0.53	0.58	0.35
		0.37	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hampli90	0.15	-0.28	0.30	0.38	0.66	0.65	0.83	0.40	0.36	0.24	-0.24	0.20	0.40	0.84	0.53		0.22	0.23
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hgrad10	0.34	-0.18	0.00	0.25	0.11	0.44	0.21	0.63	0.60	0.05	-0.02	-0.16	0.50	0.10	0.58	0.22		0.80
		0.00	0.00	0.97	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.24	0.64	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Hgrad90	0.45	-0.21	0.06	0.16	0.14	0.33	0.20	0.63	0.73	0.29	-0.06	0.08	0.32	0.23	0.35	0.23	0.80	
		0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tableau 5 : Coefficient de corrélation de rang de Spearman et valeurs des tests de significativité statistique entre 18 descripteurs des 491 régimes d'éclusées annuels (voir paragraphe 3.5.1 pour la signification des codes des variables).

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

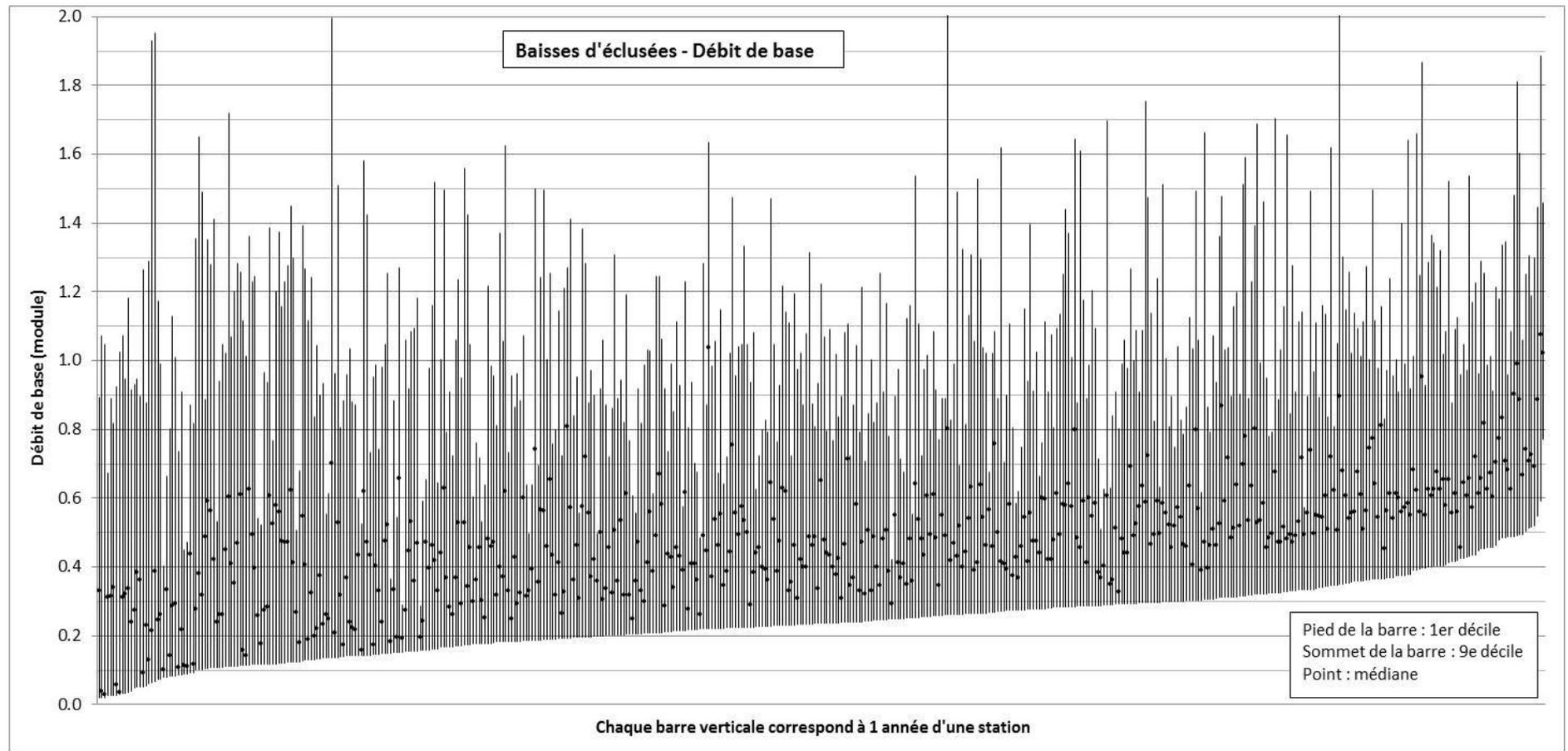


Figure 59 : Gammes des valeurs de débits de base des baisses d'éclusées (1^{er} décile, médiane et 9^e décile) de chacune des 491 années de données traitées, présentées par valeur de 1^{er} décile croissante.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

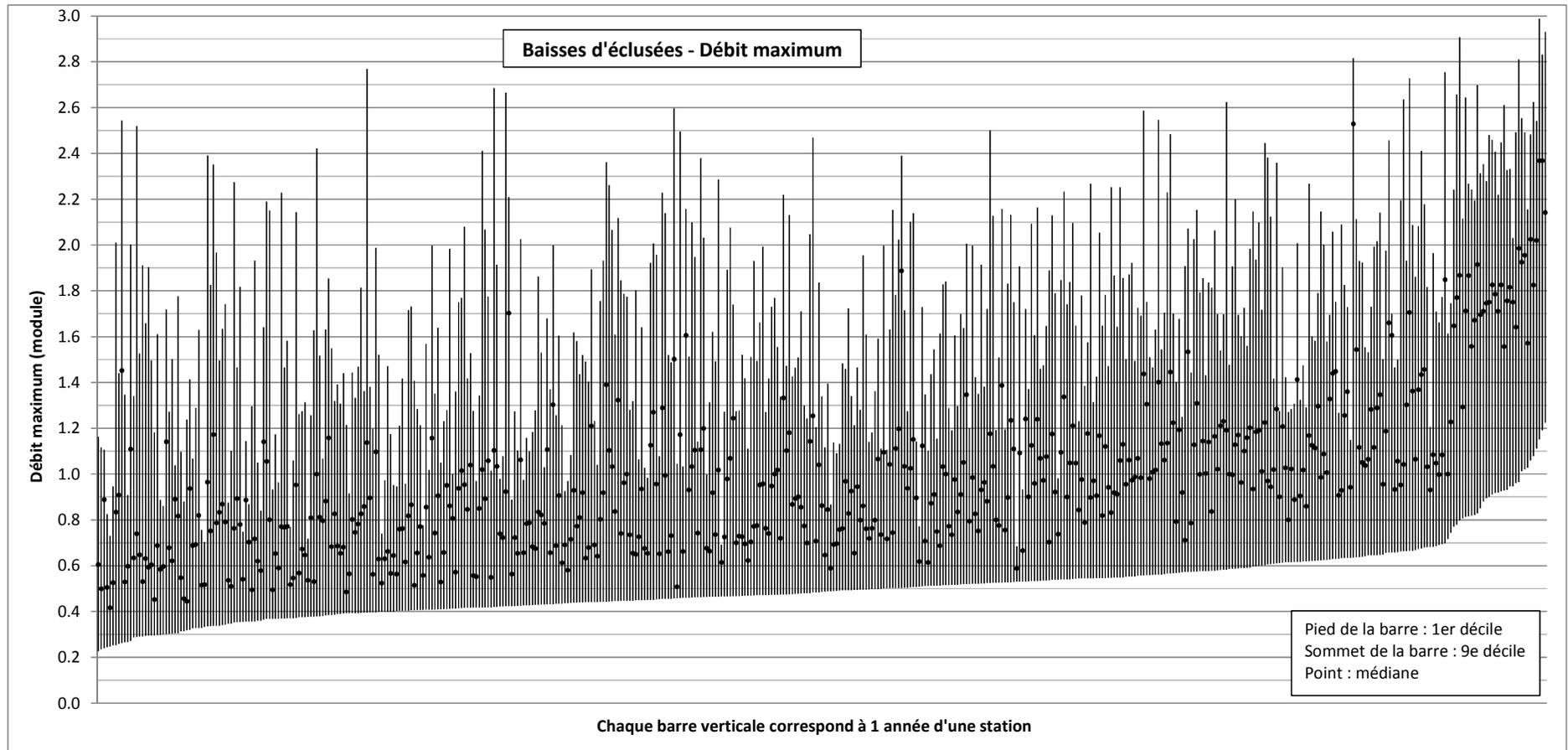


Figure 60 : Gammes des valeurs de débits maxima des baisses d'éclusées (1^{er} décile, médiane et 9^e décile) de chacune des 491 années de données traitées, présentées par valeur de 1^{er} décile croissante.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

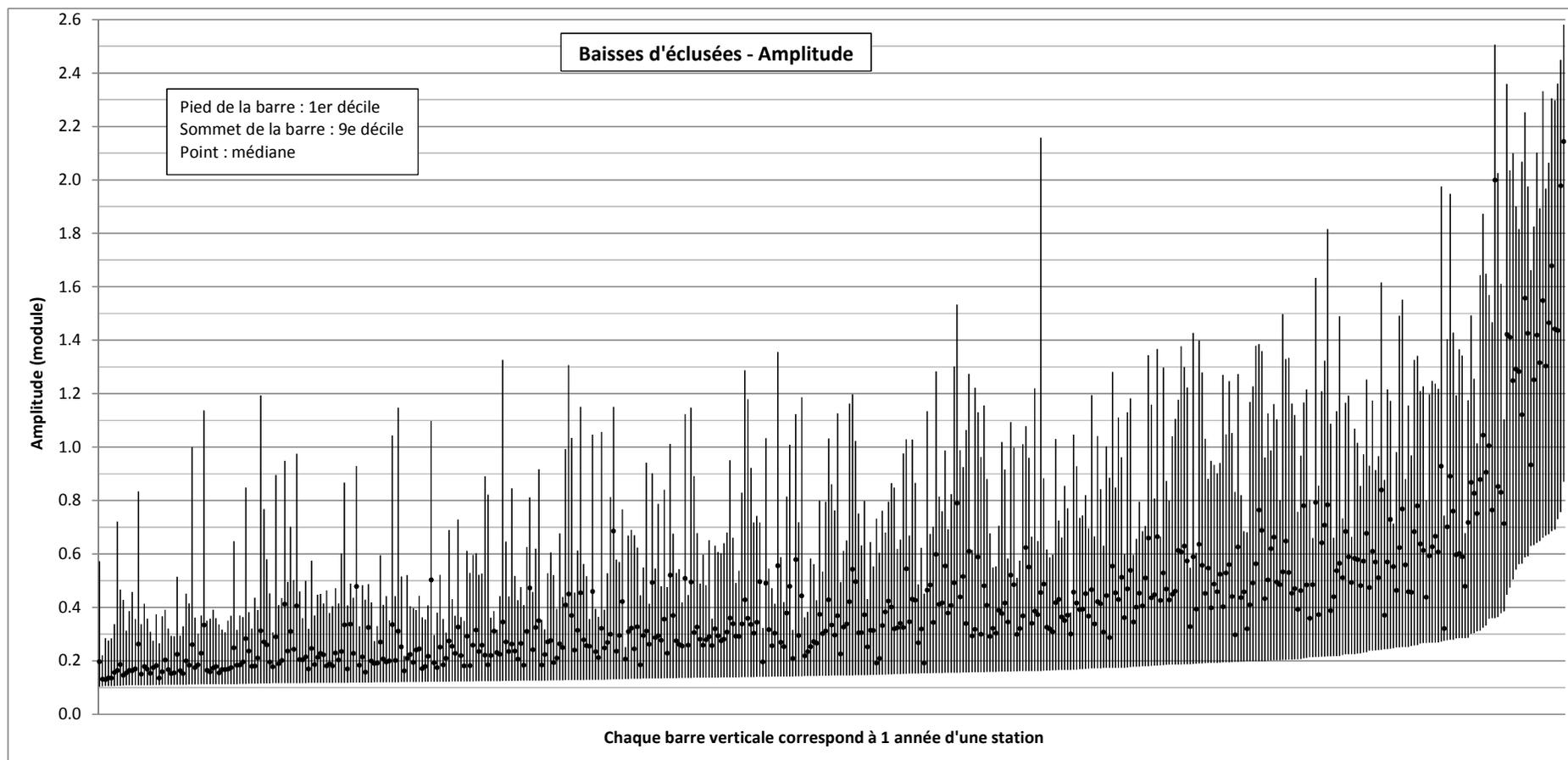


Figure 61 : Gammes des valeurs d'amplitude des baisses d'éclusées (1^{er} décile, médiane et 9^e décile) de chacune des 491 années de données traitées, présentées par valeur de 1^{er} décile croissante.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

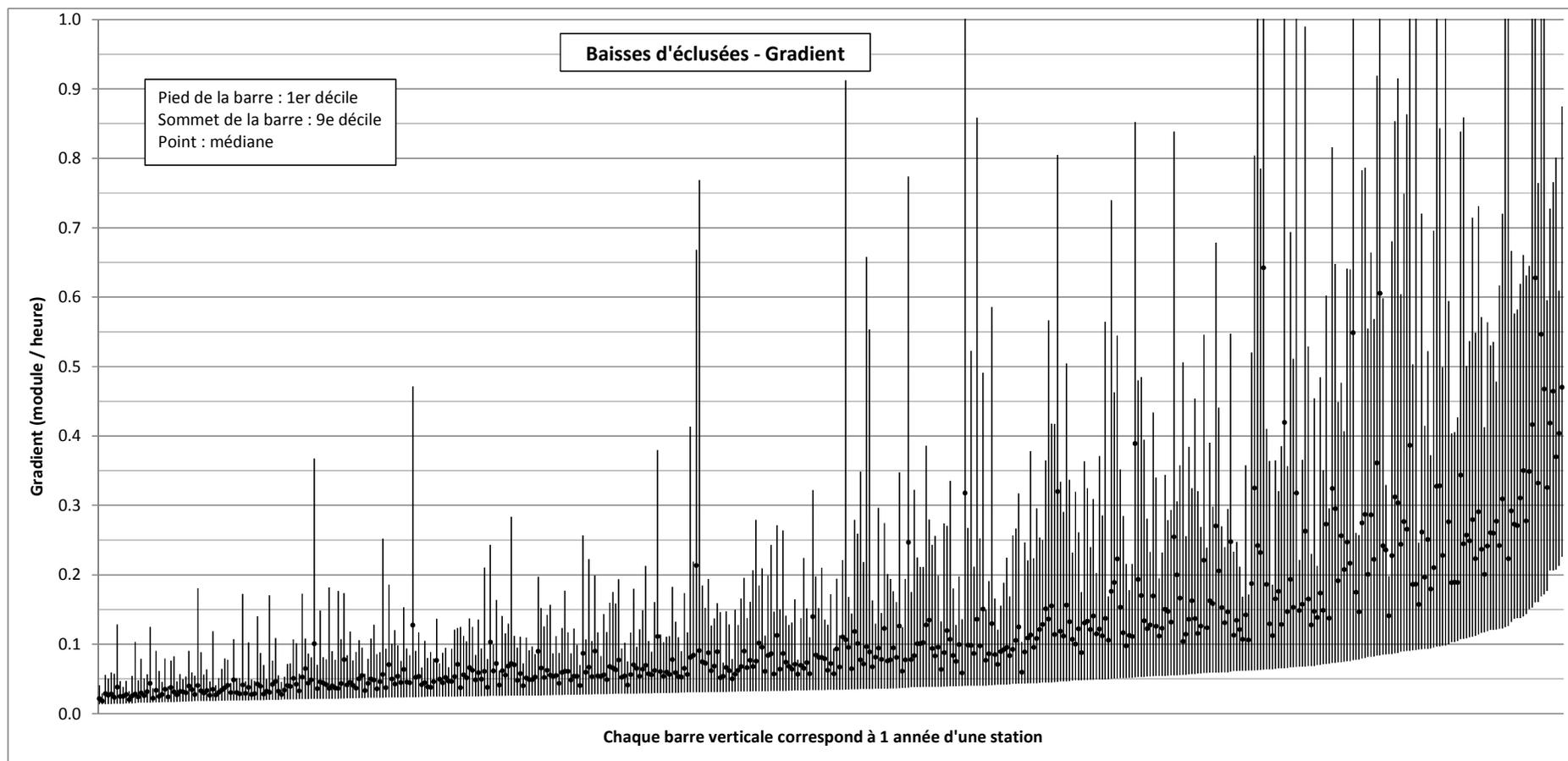


Figure 62 : Gammes des valeurs de gradient des baisses d'éclusées (1^{er} décile, médiane et 9^e décile) de chacune des 491 années de données traitées, présentées par valeur de 1^{er} décile croissante.

3.7.3. Exemples de régimes d'éclusées

La variabilité des régimes d'éclusées au niveau de stations hydrométriques est illustrée au travers de 11 fiches exemples extraites de l'année 2010, en allant de stations soumises à des perturbations hydrologiques drastiques caractérisées par des valeurs extrêmes de l'un ou de plusieurs des descripteurs, à des stations où les perturbations sont beaucoup plus modérées. Pour chaque exemple, une fiche composée de l'hydrogramme et de 2 diagrammes en bulle pour les baisses et les hausses d'éclusées est présentée.

Les fiches 1, 2 et 3 constituent des exemples de perturbations hydrologiques drastiques :

- La Garonne à Saint-Béat (fiche 1) du fait d'un nombre très important d'éclusées (plus de 1600 baisses et 1200 hausses d'éclusées, soit 3-4 éclusées par jour en moyenne), avec des amplitudes dépassant régulièrement 100% du module et des gradients de plus de 100% du mod/h.
- Le Lot à Entraygues (Roquepaihol) (fiche 2) du fait d'un nombre important d'éclusées (plus de 400 baisses et 400 hausses), avec des amplitudes dépassant régulièrement 200% du module, et des gradients régulièrement entre 25% et 100% du mod/h.
- Le Rhône à Surjoux (fiche 3) du fait d'un nombre également important d'éclusées (plus de 500 baisses et 500 hausses), et surtout de débits de base très faibles (1^{er} décile et médiane à 2.8% et 5.9% du module).

Les fiches 4 et 5 constituent des exemples de perturbations hydrologiques un peu moins drastiques que les précédentes :

- La Loire à Feurs (fiche 4) du fait d'un nombre conséquent d'éclusées (306 baisses et 232 hausses), avec des amplitudes atteignant régulièrement 130% du module, des débits de base peu élevés (1^{er} décile à 20.8% du module), et des gradients, notamment des hausses, régulièrement supérieurs à 25% du mod/h.
- L'Ain à Pont d'Ain (fiche 5) du fait d'un nombre plus réduit d'éclusées (171 baisses et 23 hausses), mais dont l'amplitude dépasse régulièrement 100% du module. Les débits de base sont assez faibles (1^{er} décile à 23.1% du module) et les gradients, notamment des hausses, sont régulièrement supérieurs à 25% du mod/h.

Les fiches 6 et 7 constituent des exemples où la perturbation hydrologique est moyenne :

- L'Isère à Montmélian (fiche 6) du fait d'un nombre encore conséquent d'éclusées (402 baisses et 210 hausses), mais dont les amplitudes ne dépassent que rarement 75% du module. Les débits de base sont supérieurs à 30% du module et les gradients sont inférieurs à 25% du mod/h.
- La Vienne à Palais-sur-Vienne (fiche 7) du fait d'un nombre plus réduit d'éclusées (279 baisses et 147 hausses), avec des amplitudes ne dépassant que rarement 100% du module. Les débits de base sont la plupart supérieurs à 30% du module (1^{er} décile à 31.3% du module) et les gradients sont régulièrement supérieurs à 25% du mod/h.

Les fiches 8 et 9 constituent des exemples où la perturbation hydrologique est modérée :

- L'Aude à Carcassonne (fiche 8) du fait d'un nombre encore conséquent de baisses d'éclusées (262), mais avec quasiment plus de hausses sélectionnées (2), des amplitudes inférieures à 50% du module et des gradients inférieurs à 10% du mod/h.
- La Creuse à Glénic (fiche 9) du fait d'un nombre encore conséquent de baisses d'éclusées (253), mais avec presque plus de hausses sélectionnées (9), avec des amplitudes inférieures à 75% du module et des gradients inférieurs à 10% du mod/h.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

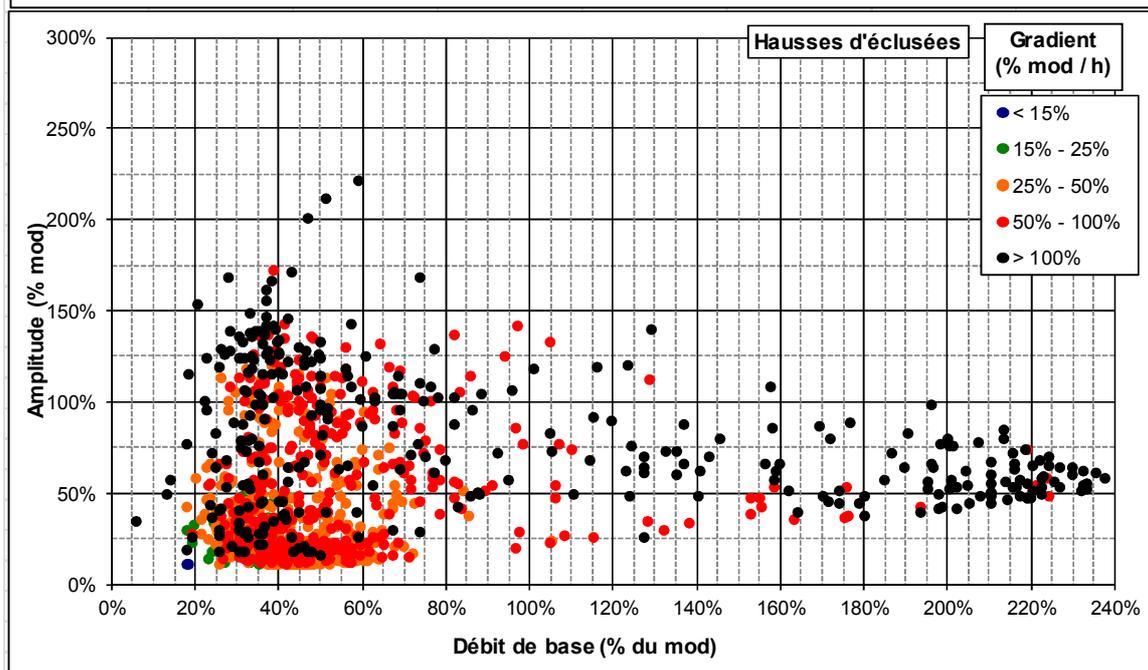
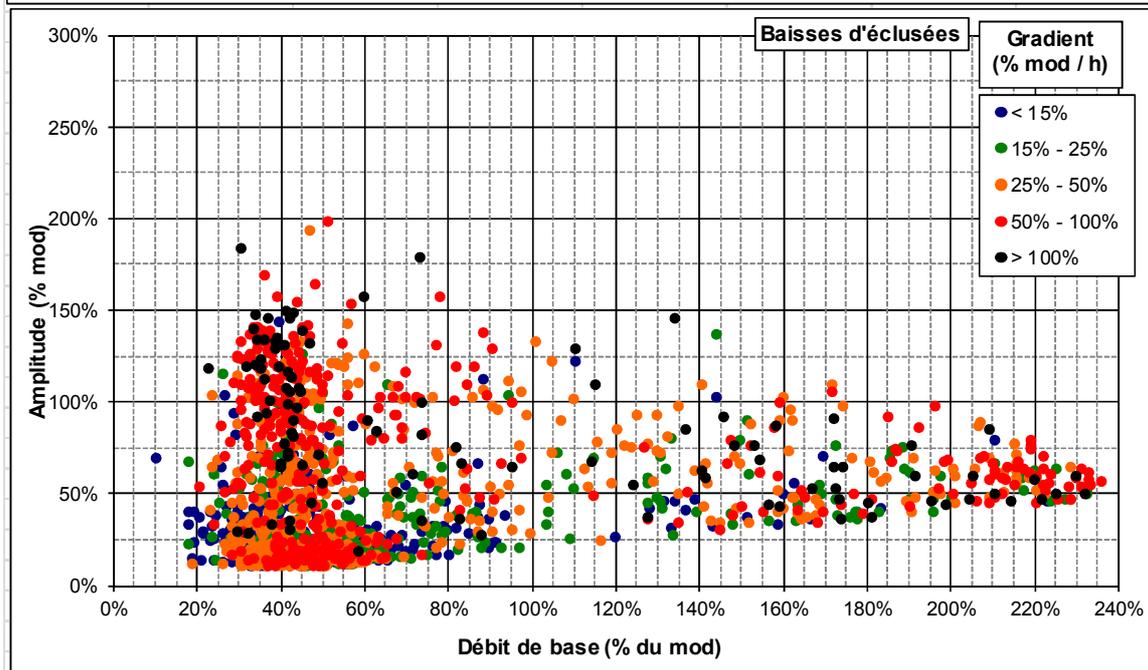
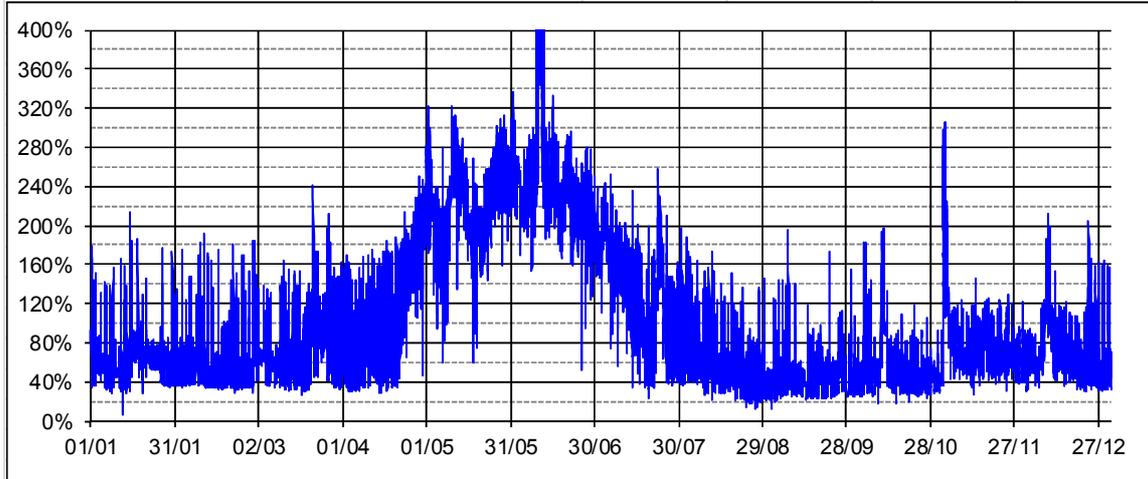
Les fiches 10 et 11 constituent des exemples où la perturbation due aux éclusées est encore sensible, mais faible :

- La Dordogne à Cénac (fiche 10) du fait d'un nombre réduit de baisses d'éclusées (83) et d'aucune hausse sélectionnée, dont les amplitudes atteignent parfois 100% du module, mais sur des débits de base alors supérieurs à 80% du module et avec des gradients inférieurs à 10% du mod/h.
- La Loire à Bas-en-Basset (fiche 11) du fait d'un nombre d'éclusées encore conséquent (202 baisses et 76 hausses), mais dont les amplitudes restent inférieures à 30% du module.

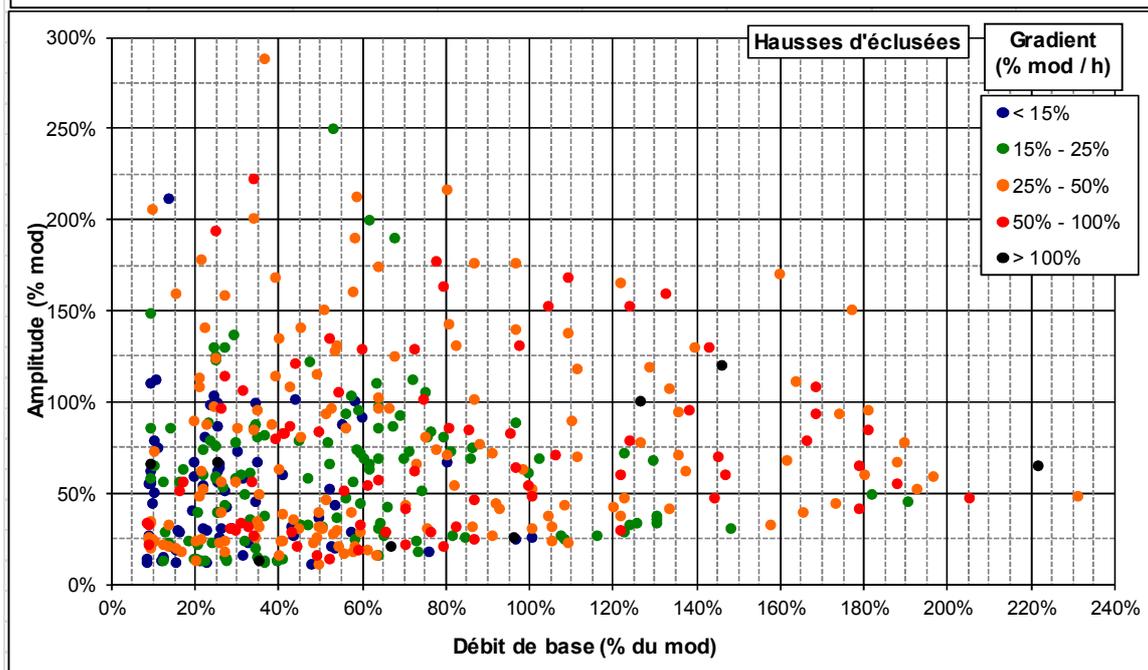
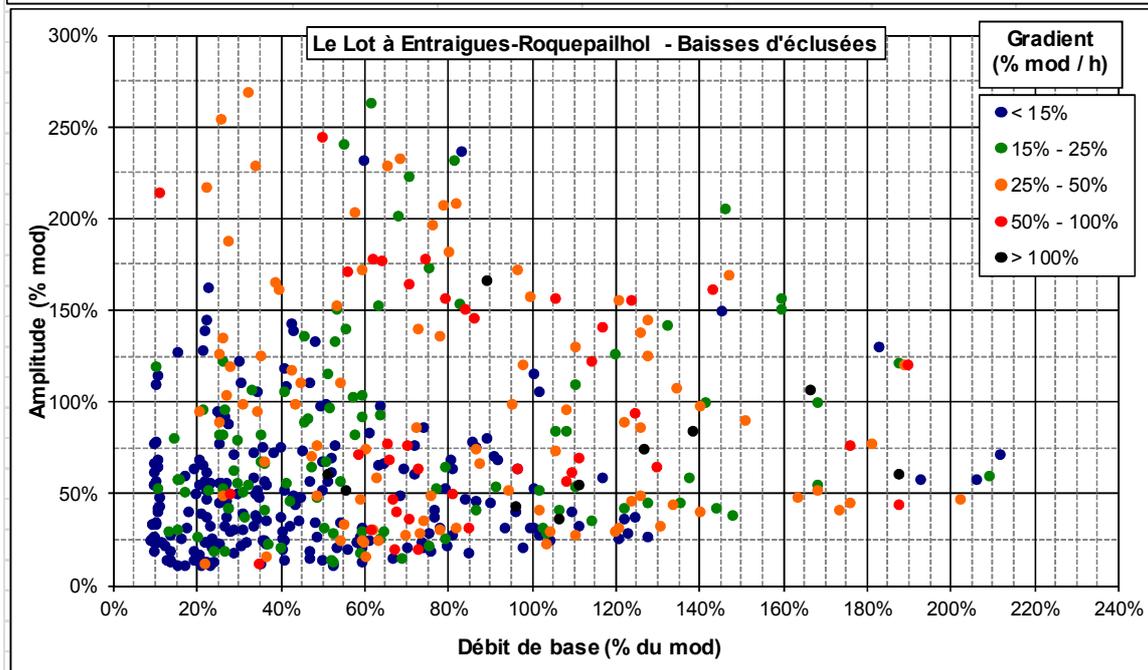
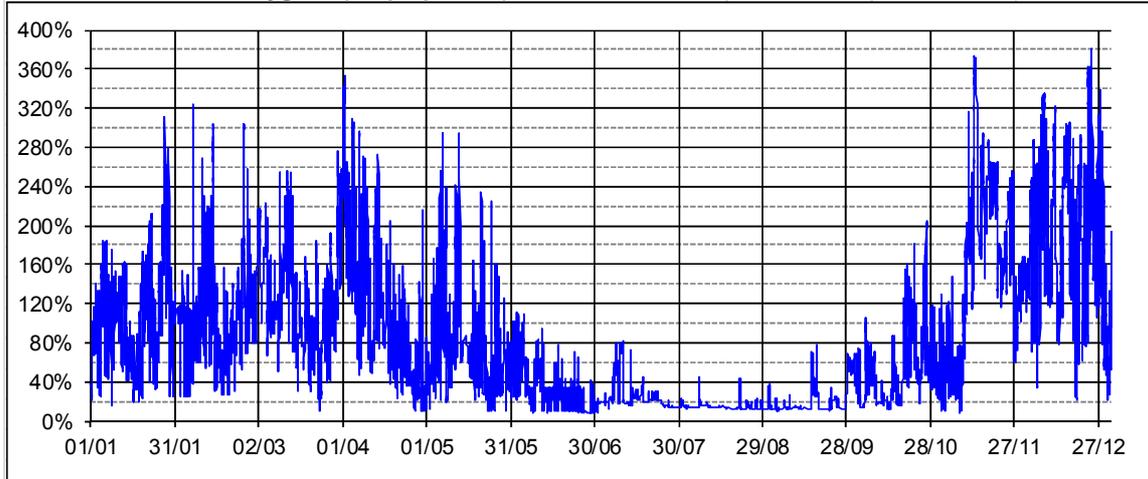
A titre de comparaison, on a porté dans la fiche 12 des chroniques de débit des stations à l'hydrologie naturelle. La comparaison visuelle avec les hydrogrammes précédemment présentés amène à constater un nombre beaucoup plus réduit d'événements hydrologiques significatifs en situation naturelle par rapport aux stations soumises à éclusées. D'autre part, il apparaît clairement que les décrues naturelles, avec un tarissement très progressif du débit, se déroulent à des gradients nettement plus faibles que les baisses d'éclusées.

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Fiche 1 : la Garonne à Saint-Béat en 2010

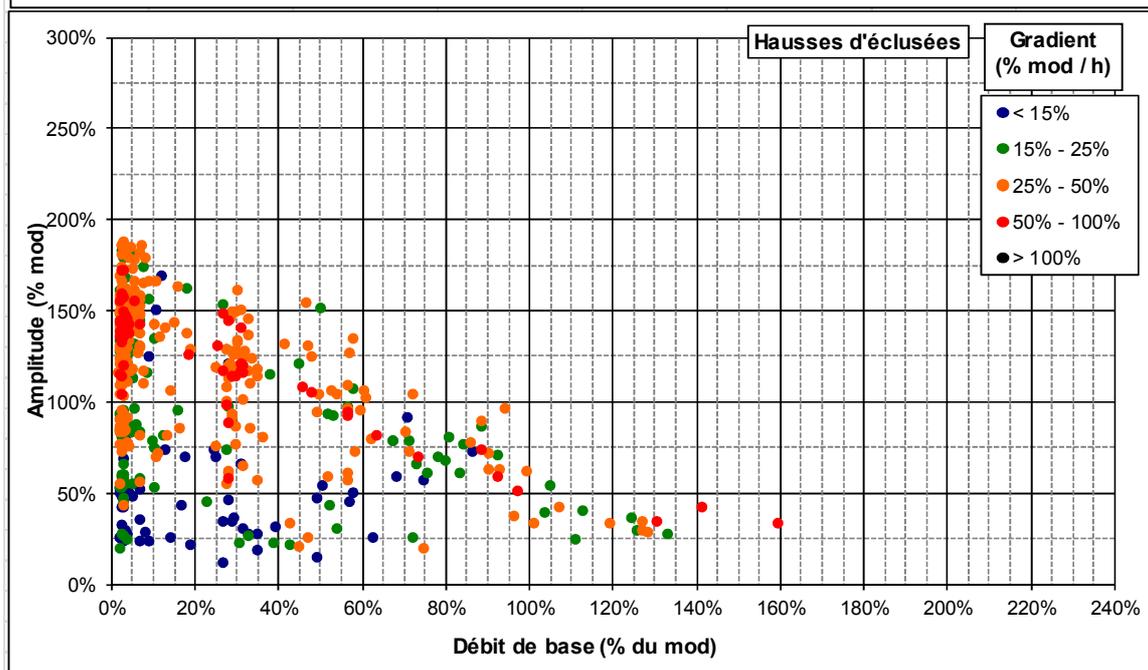
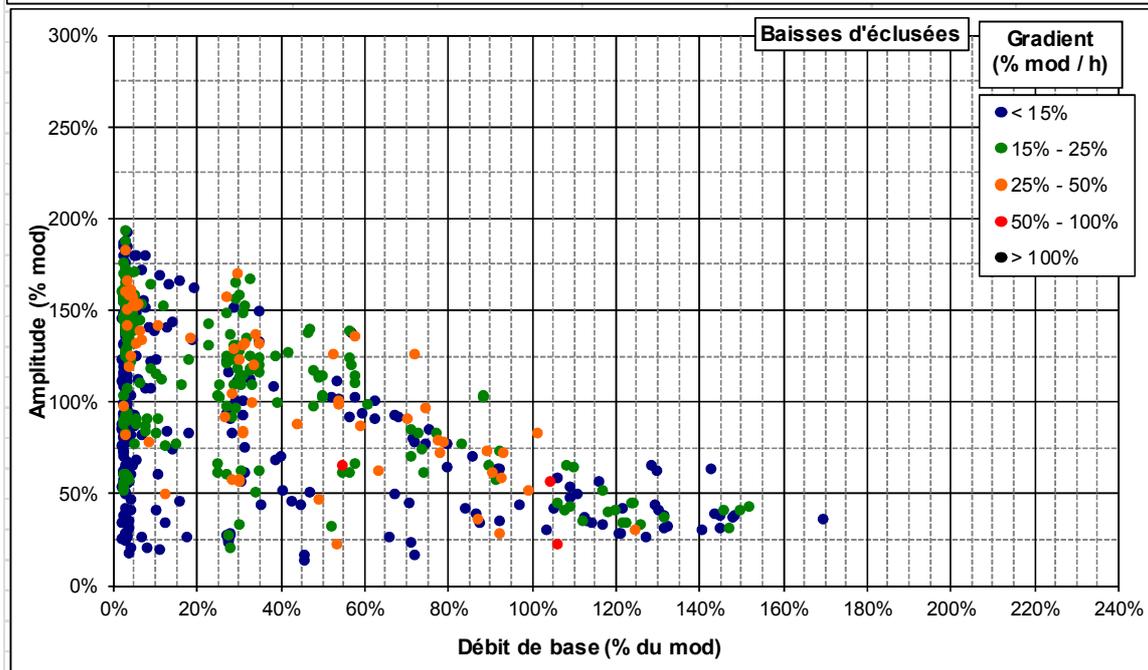
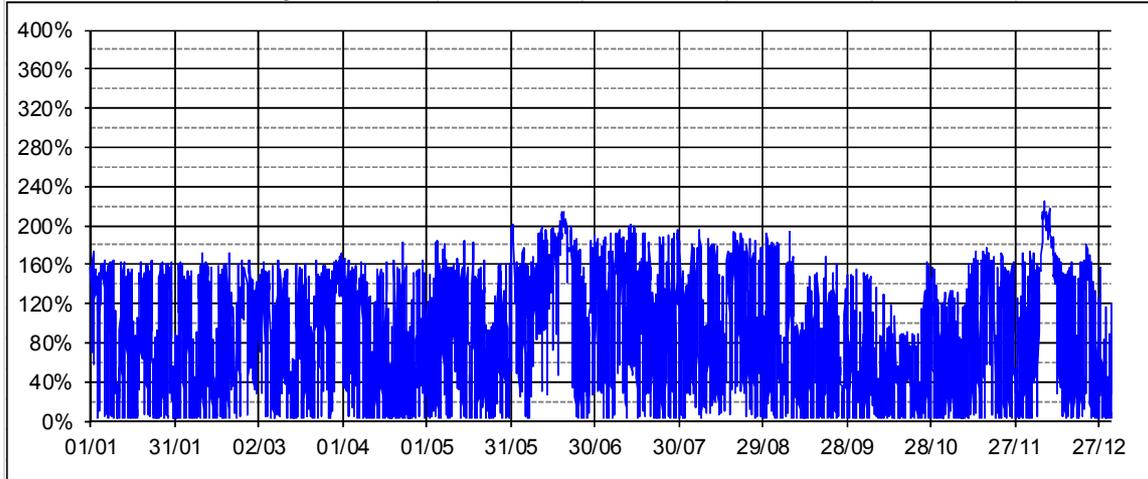


Fiche 2 : le Lot à Entraigues (Roquepailhol) en 2010

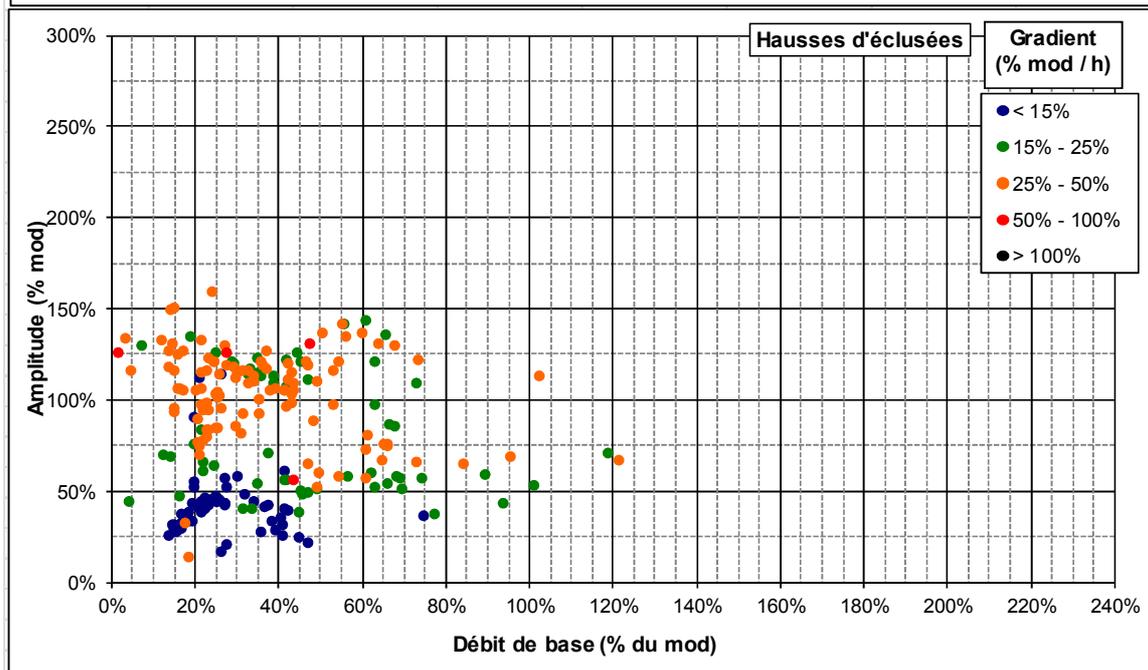
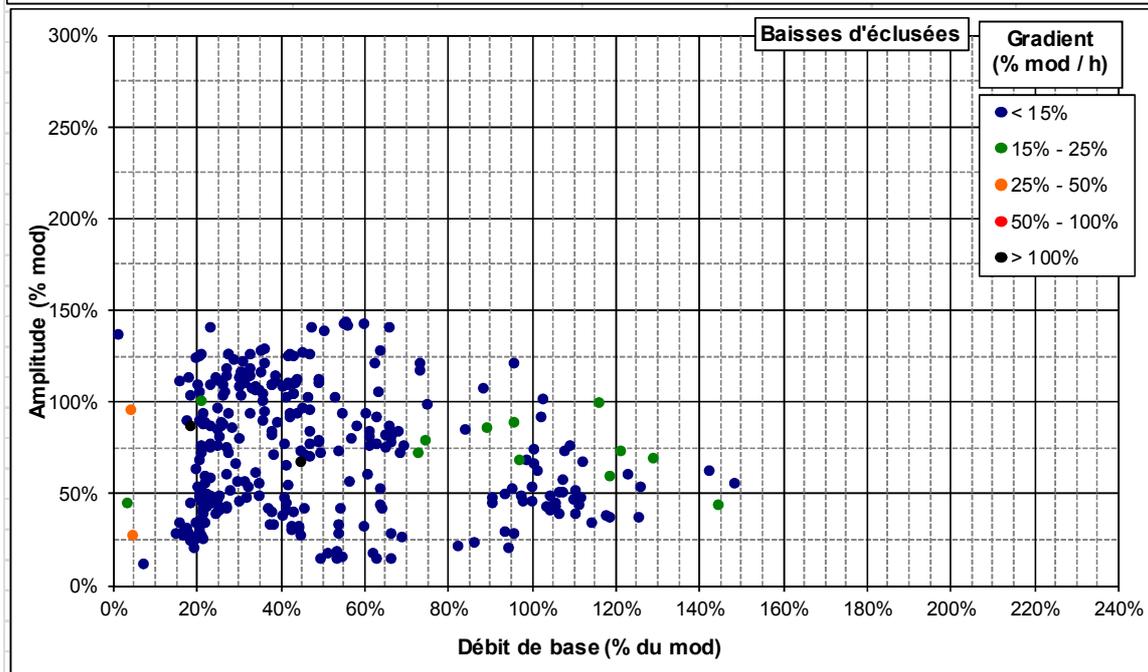
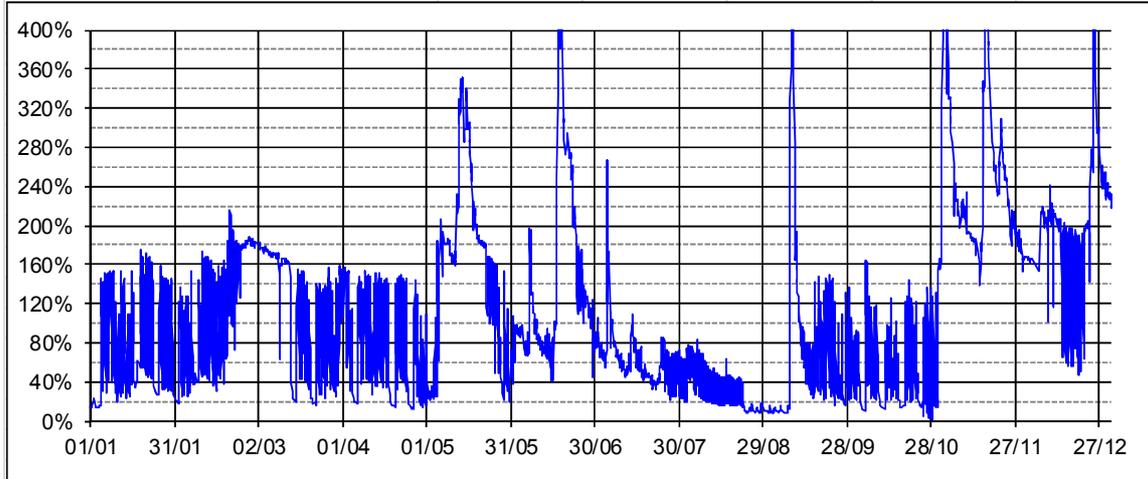


3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

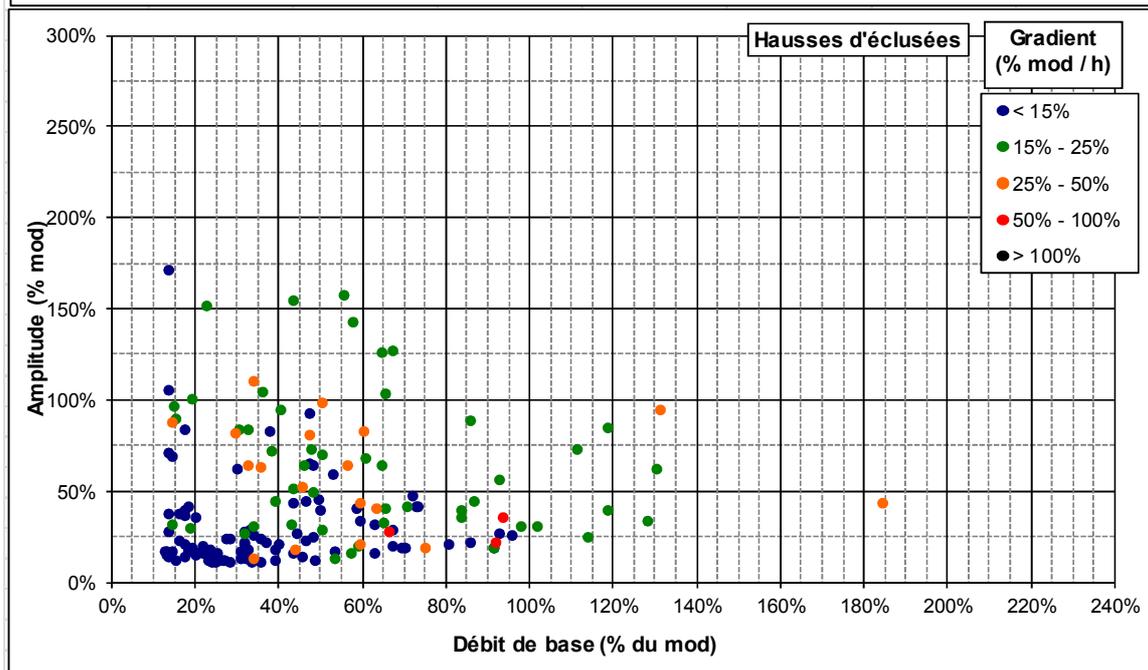
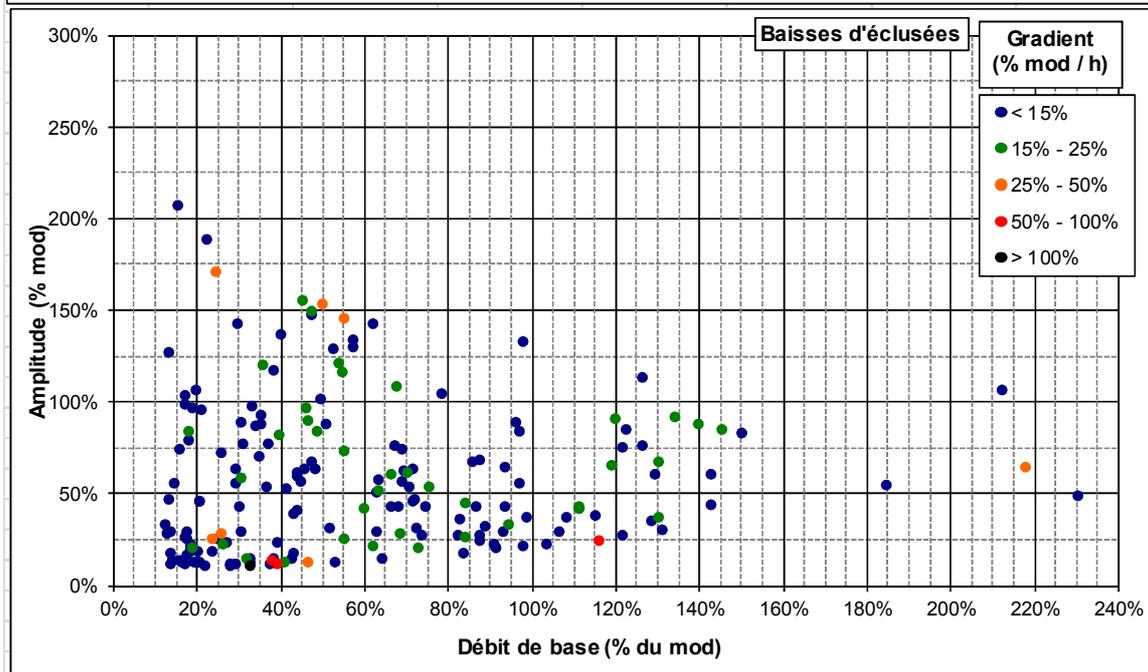
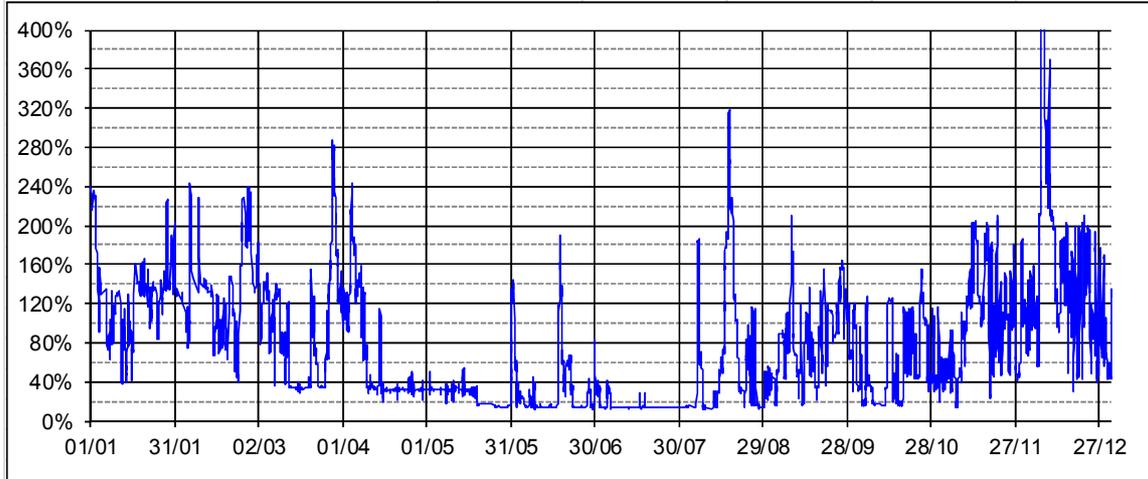
Fiche 3 : le Rhône à Surjoux en 2010



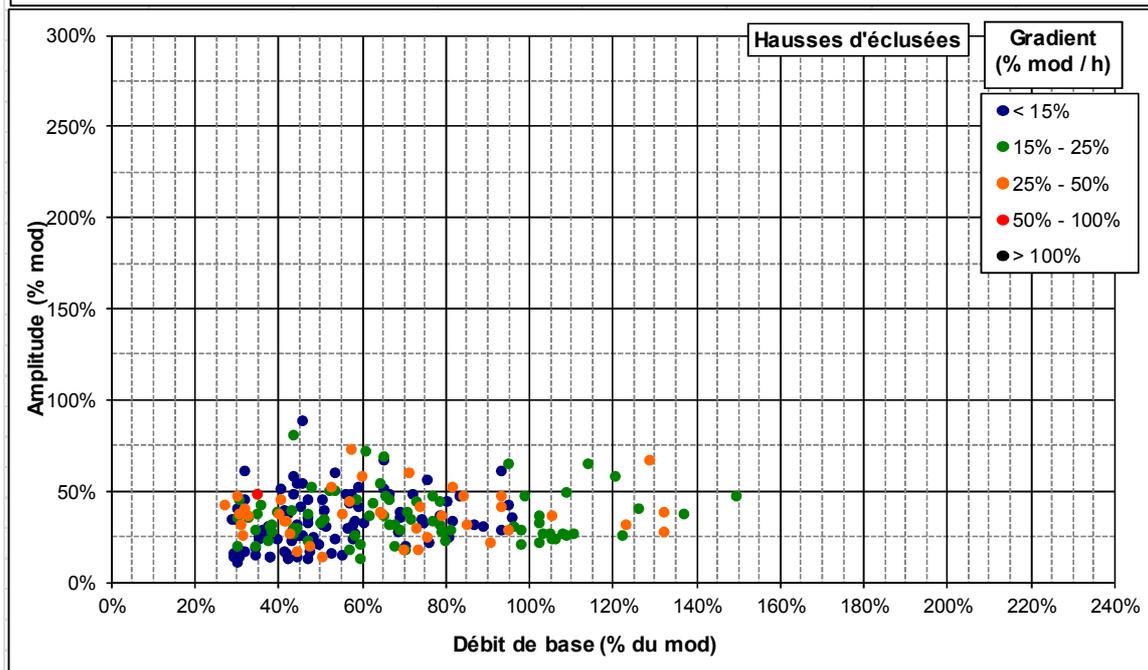
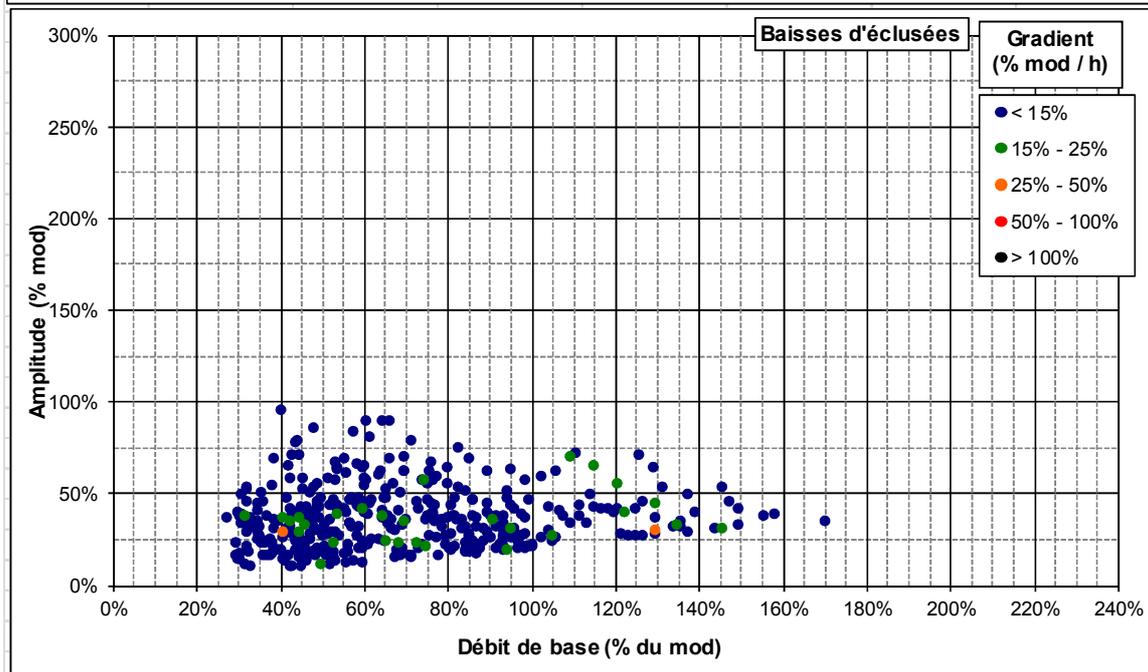
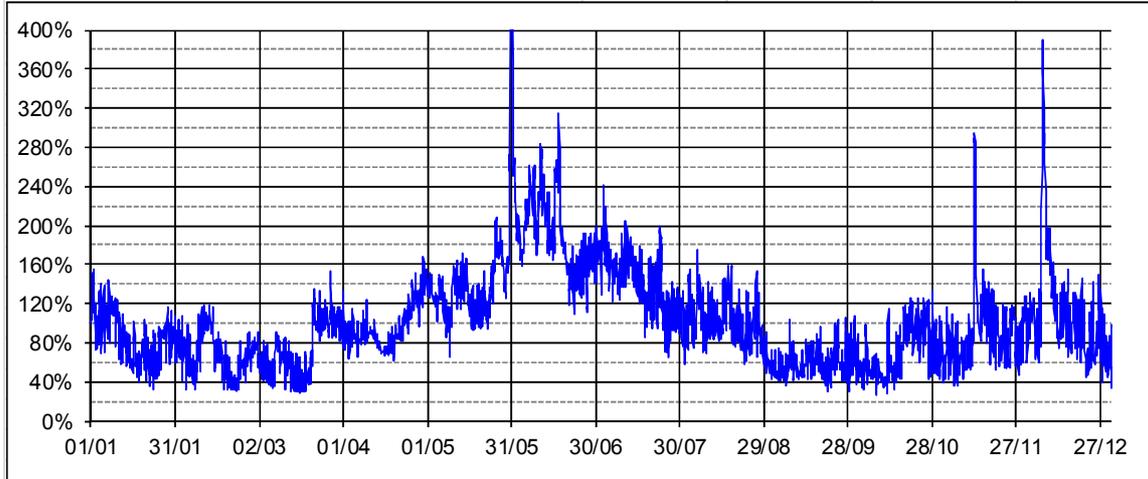
Fiche 4 : la Loire à Feurs en 2010



Fiche 5 : l'Ain à Pont d'Ain en 2010

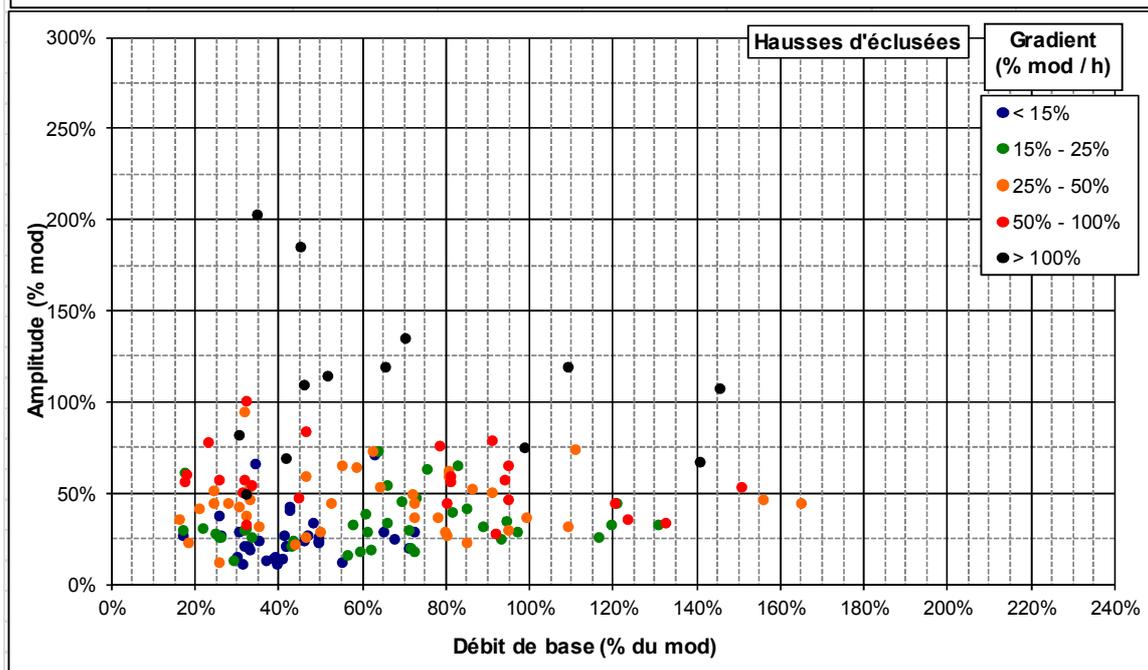
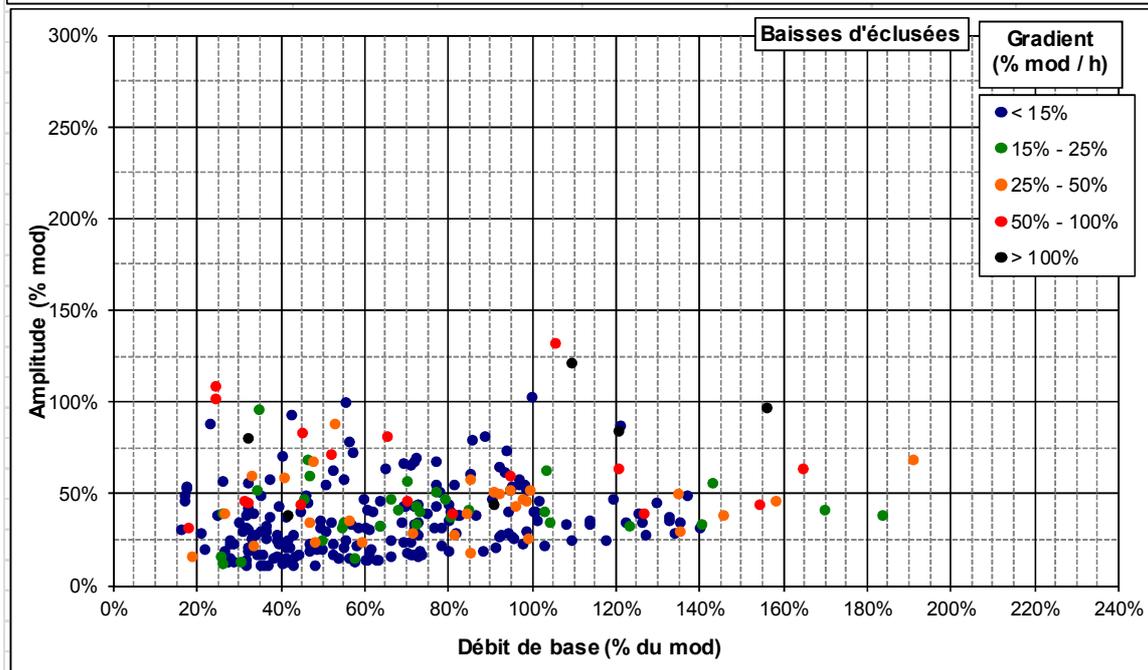
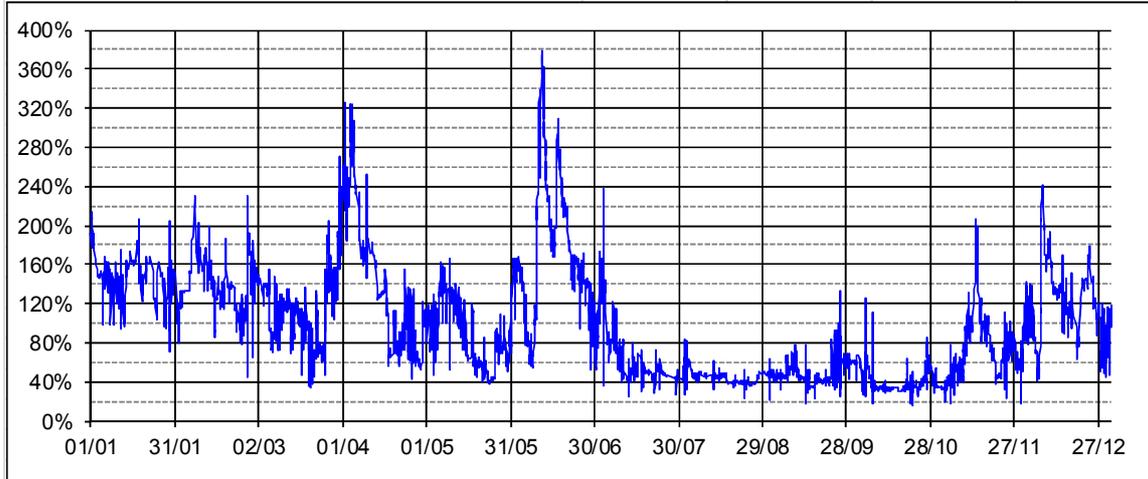


Fiche 6 : l'Isère à Montmélian en 2010

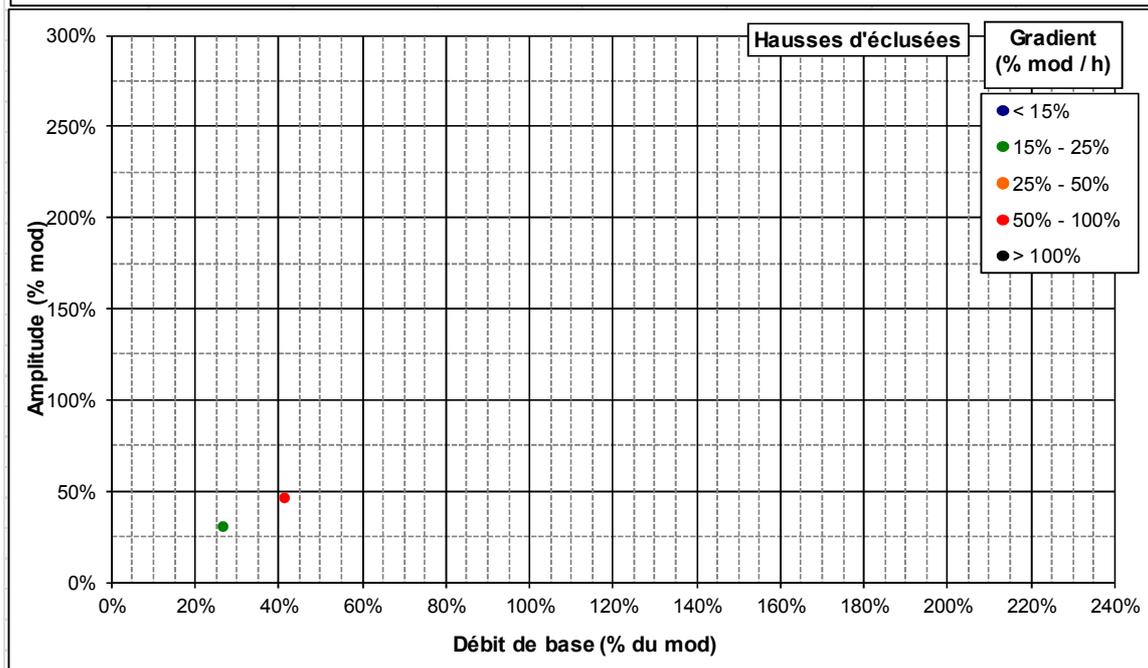
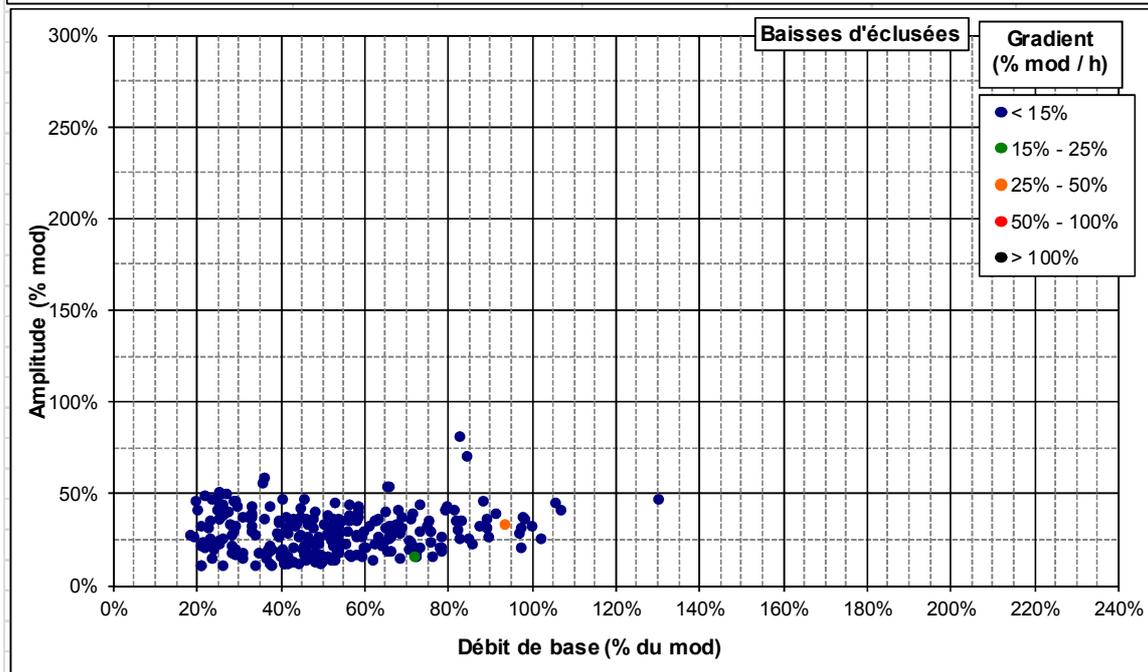
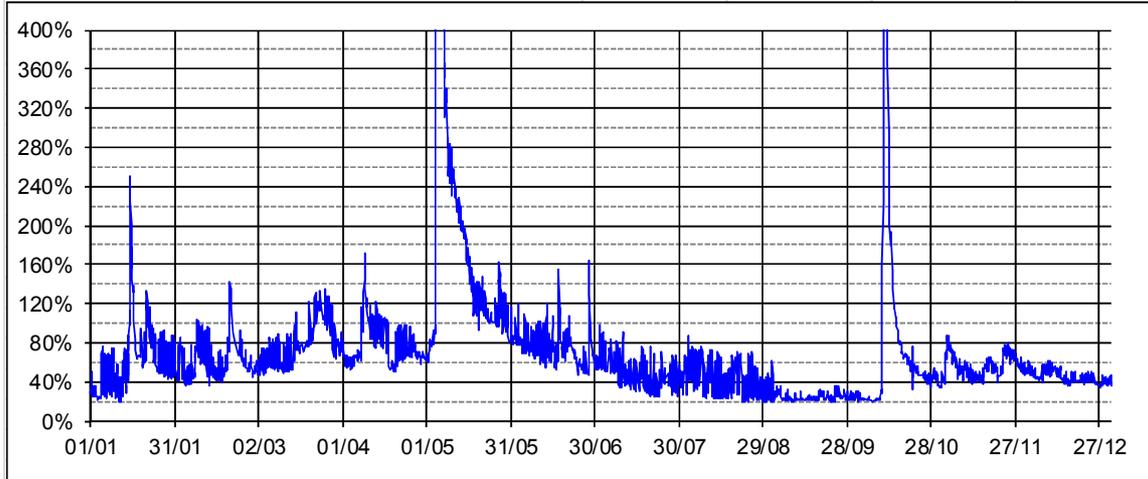


3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Fiche 7 : La Vienne à Palais-sur-Vienne en 2010

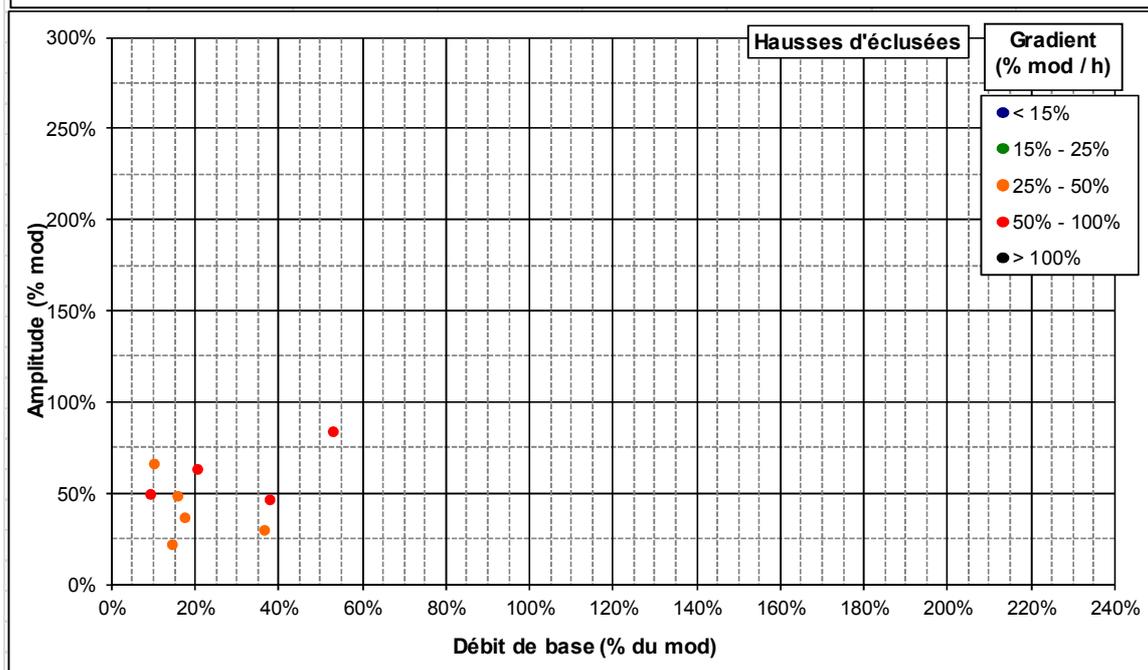
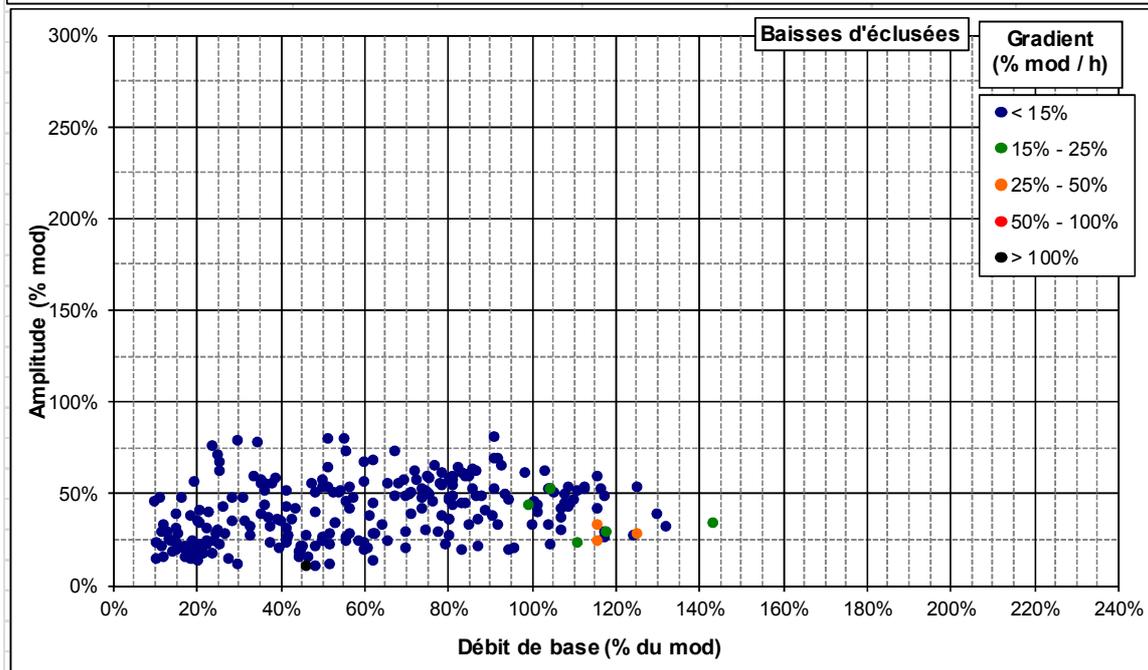
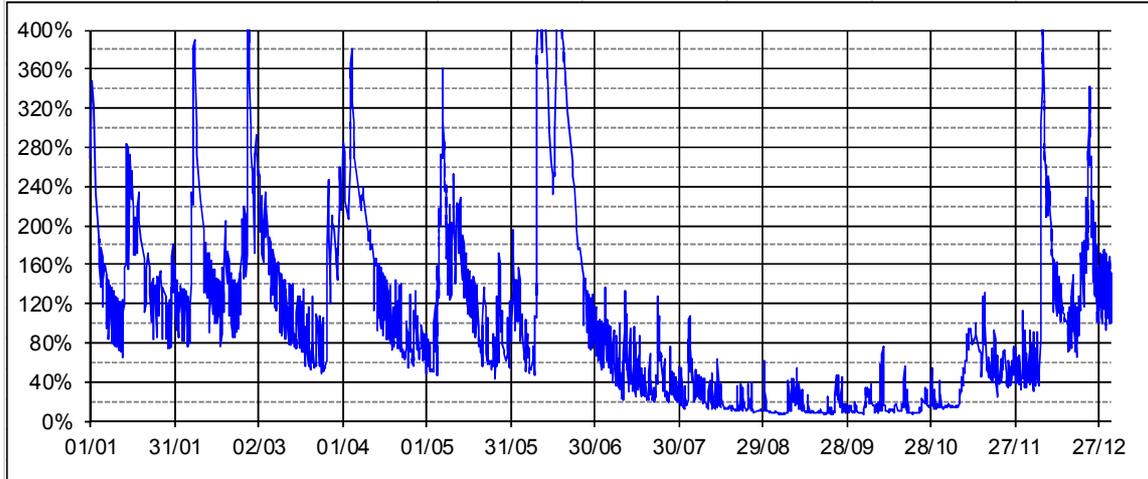


Fiche 8 : l'Aude à Carcassonne en 2010

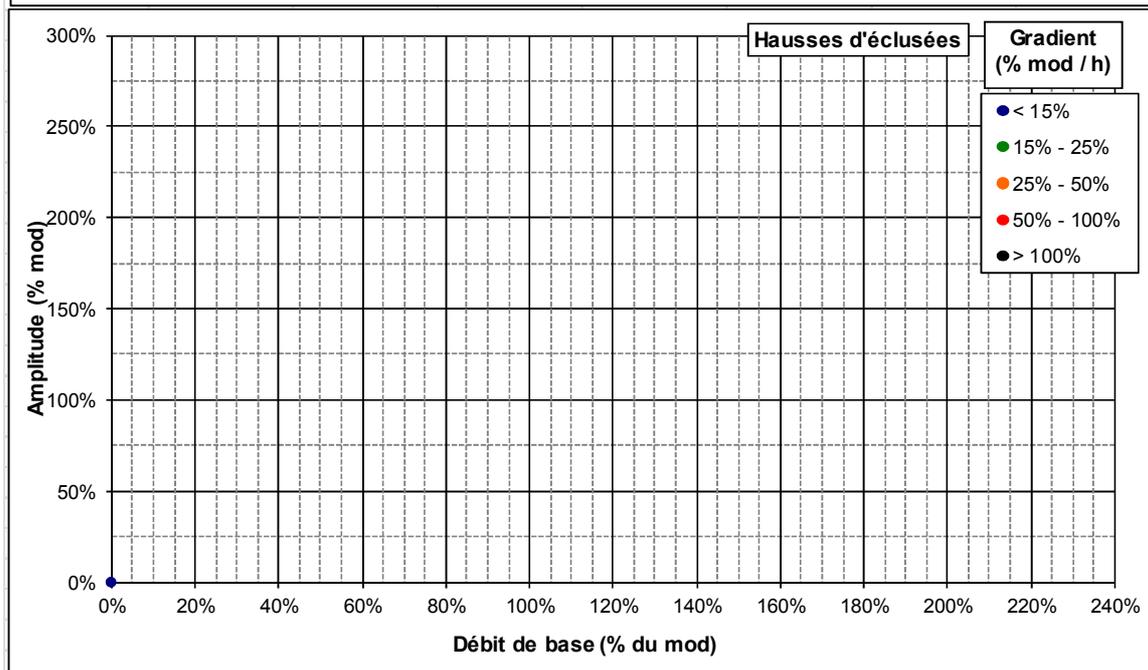
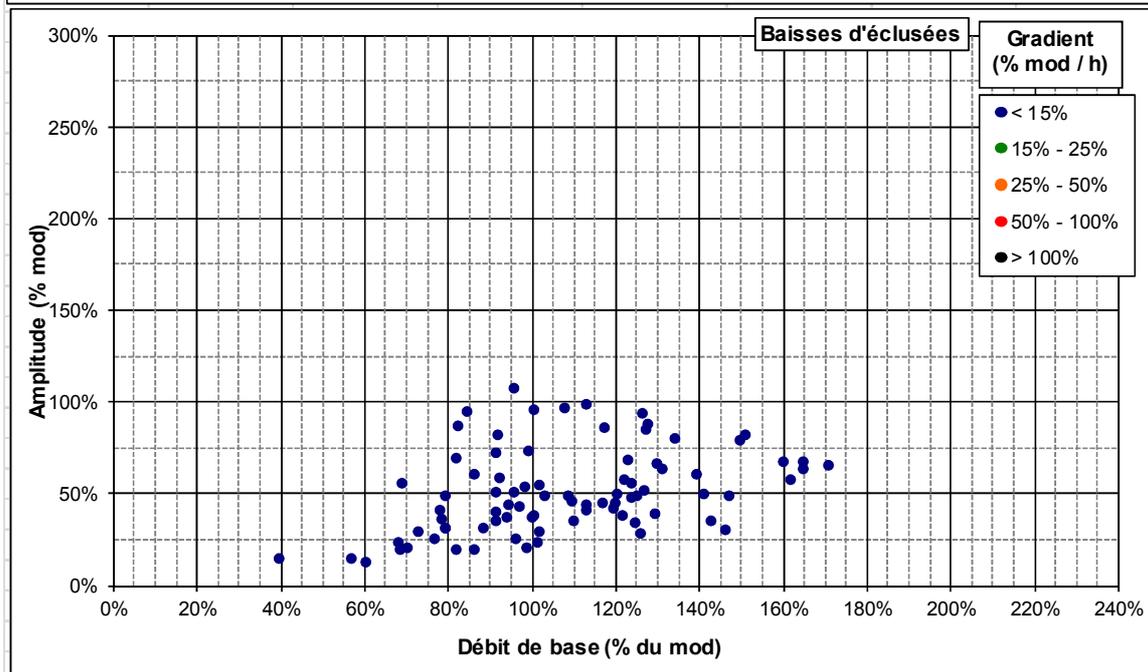


3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Fiche 9 : la Creuse à Glénic en 2010

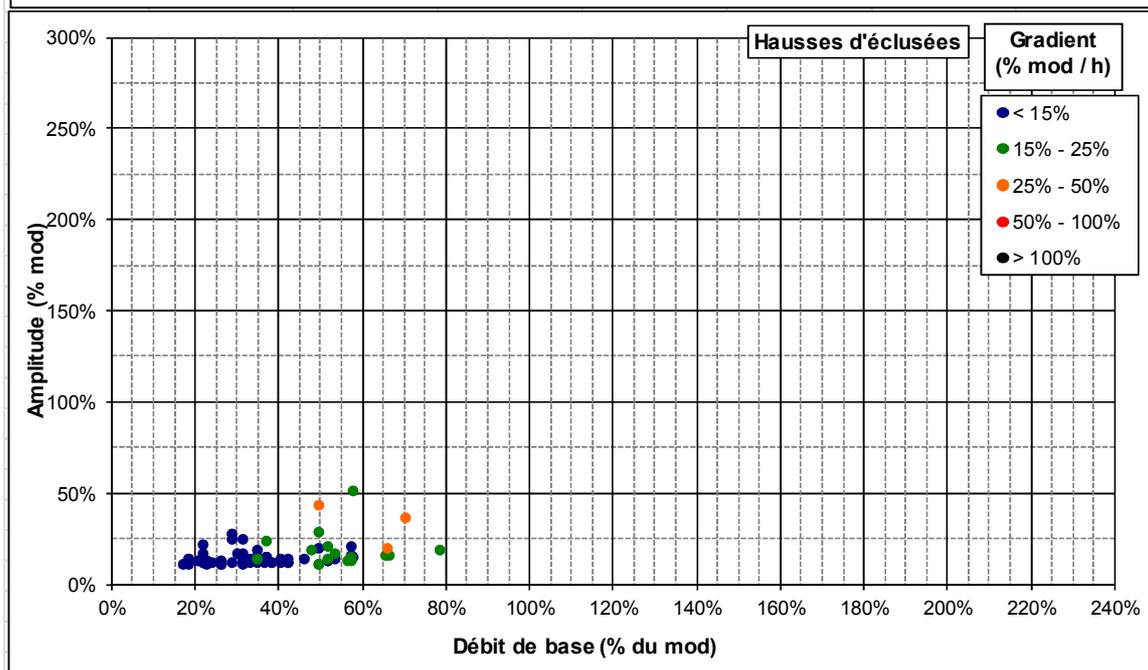
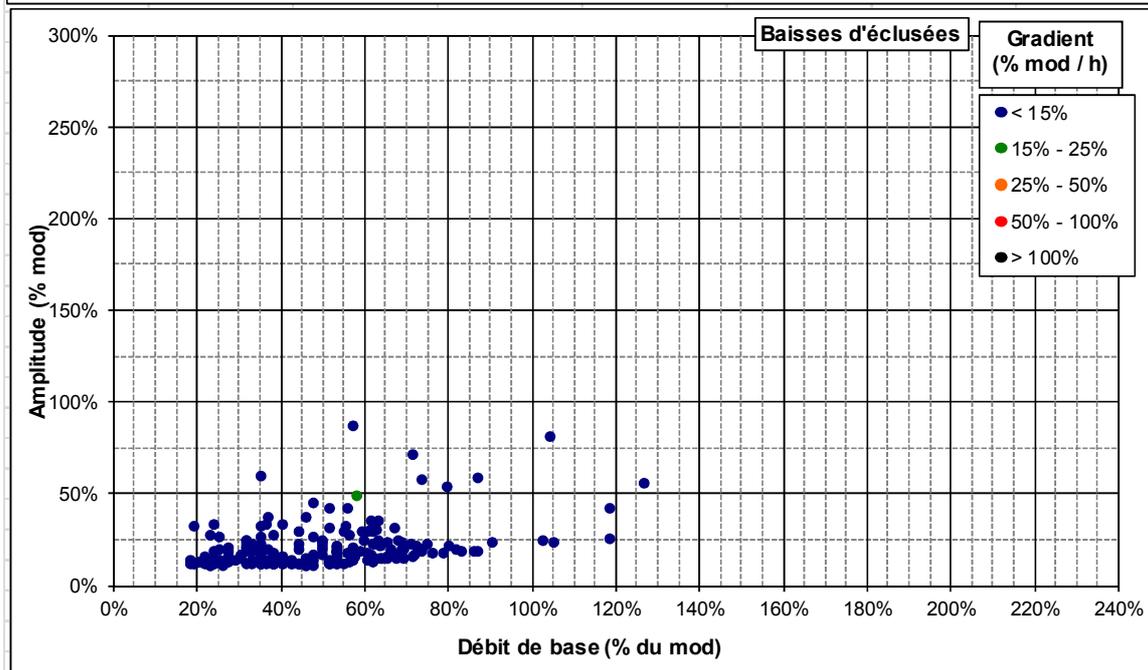
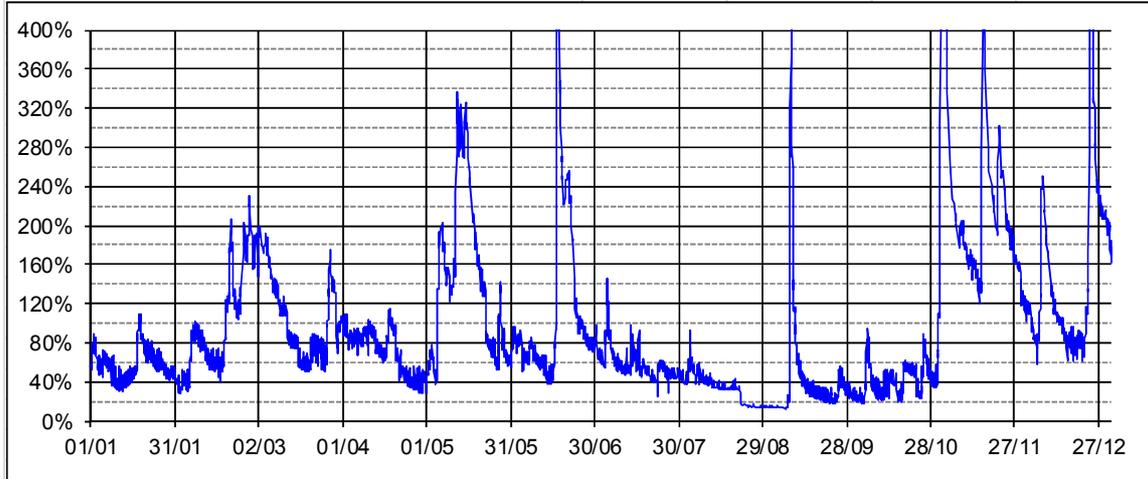


Fiche 10 : la Dordogne à Cénac en 2010

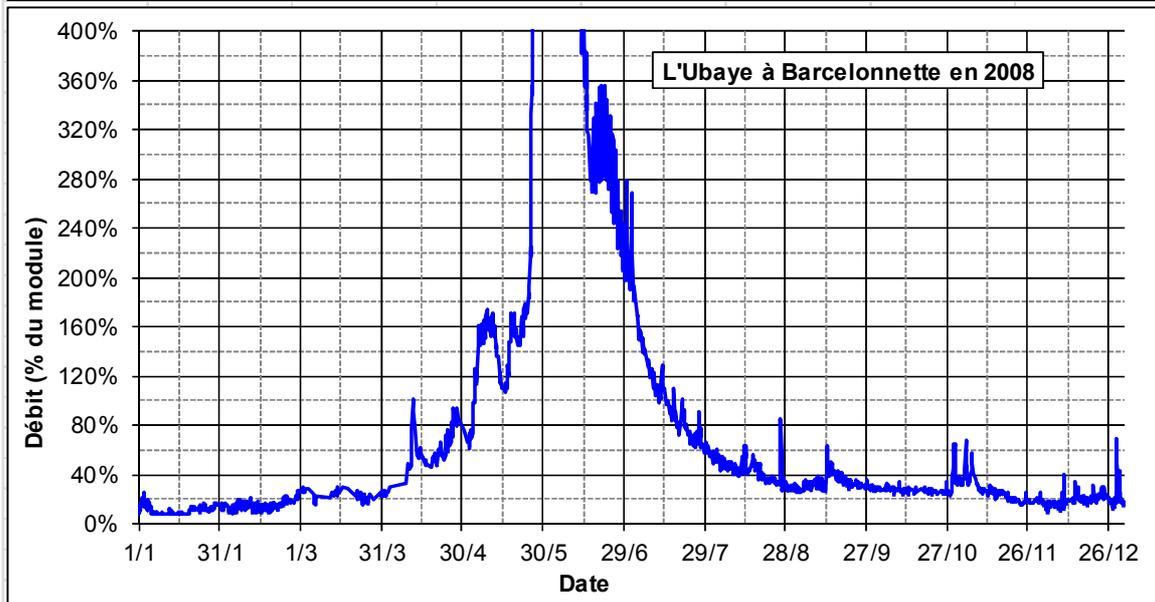
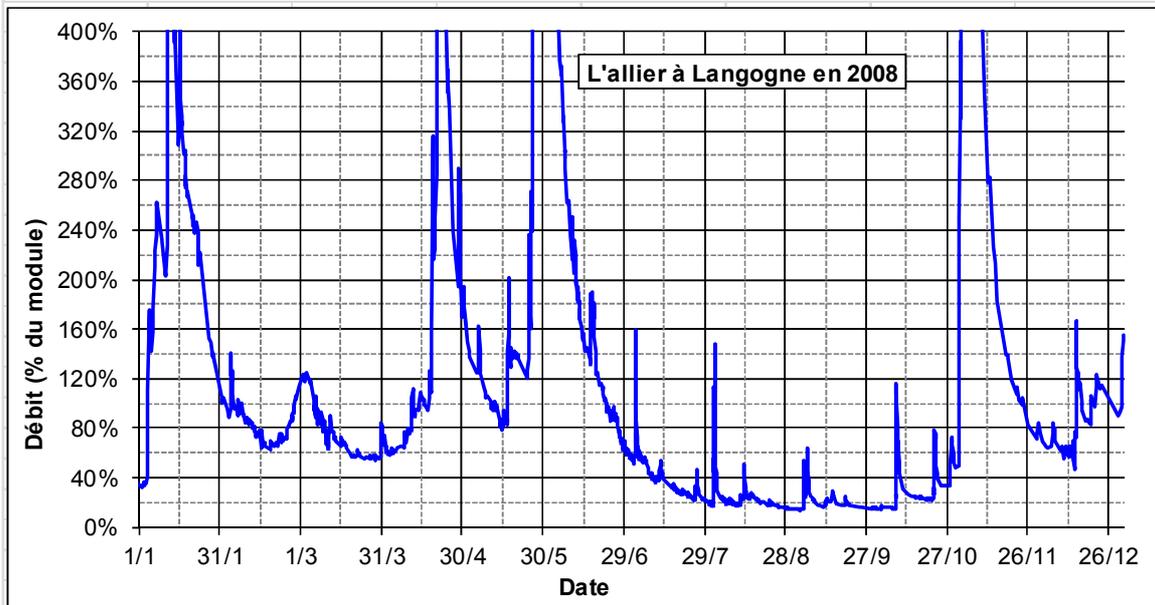
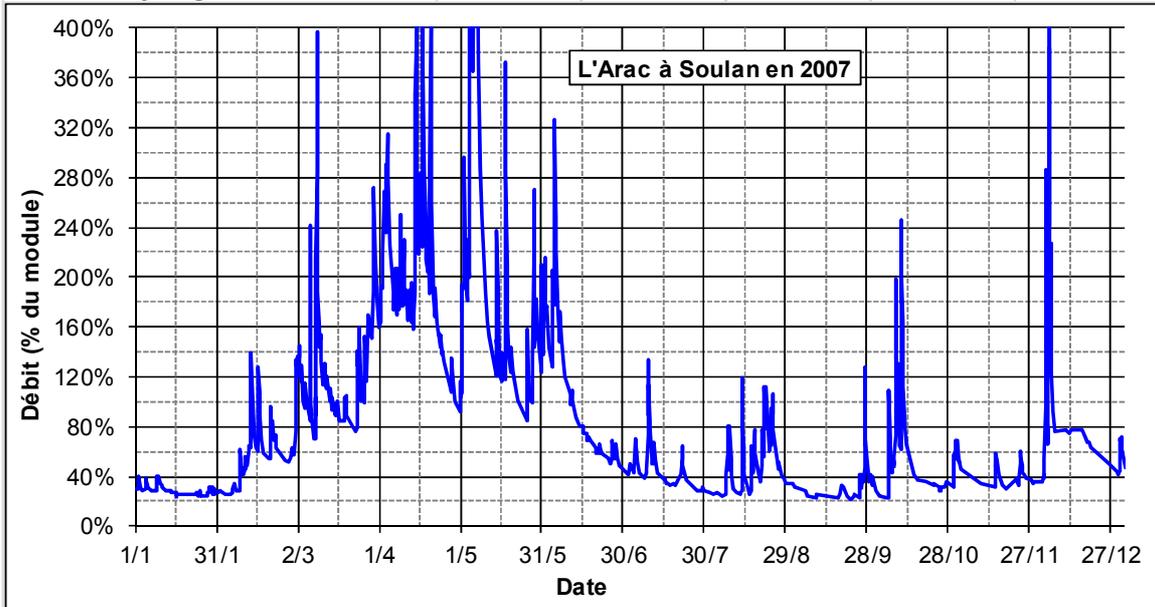


3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

Fiche 11 : la Loire en Bas-en-Basset en 2010



Fiche 12 : Hydrogrammes naturels



3.8. Conclusions, discussions et perspectives sur la méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

En vue de la définition d'un indicateur du niveau de perturbation hydrologique induite par les éclusées hydroélectriques, une méthodologie de repérage de ces éclusées au sein des hydrogrammes a été en premier lieu proposée. Cette méthodologie a été construite avec l'objectif de repérer toutes les variations de débit dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle sur le cours d'eau concerné. Cette discrimination entre les caractéristiques anthropiques ou naturelles des variations de débit est indispensable au développement de tout indicateur de perturbation crédible. Les hausses et les baisses d'éclusées sont différenciées étant donné que plusieurs hausses ou baisses peuvent se succéder, et qu'une baisse qui suit une hausse ne revient pas forcément au même débit de base. Cela rend d'ailleurs délicat la définition de la durée d'une éclusée.

Dans une première étape, la méthodologie fait appel à une valeur seuil sur le gradient entre les valeurs consécutives de débit, égale à 1% du module par heure, pour identifier et caractériser les événements significatifs de hausse et de baisse de débit.

Dans une seconde étape, une sélection est réalisée parmi les événements de hausse et de baisse identifiés pour ne retenir que ceux dont les caractéristiques sont au-delà de ce qui peut se rencontrer en hydrologie naturelle, et que l'on qualifiera donc d'éclusées. Cette sélection se base sur 3 critères :

- Une condition d'amplitude minimale. Pour qu'une variation soit retenue comme une éclusée, son amplitude doit d'une part être supérieure ou égale à 10% du module, et d'autre part représenter une variation supérieure ou égale à 20% du débit de base.
- Une condition de gradient minimal. Une variation n'est retenue comme une éclusée que si son gradient dépasse l'ordre de grandeur du gradient maximal que l'on peut rencontrer en situation naturelle en tenant compte du type de variation (hausse ou baisse), de la taille du cours d'eau (via son module) et de la gamme de variation du débit. L'utilisation de cette référence générale sur les gradients maximaux des variations naturelles de débit permet, dans le cadre de la construction de l'indicateur « éclusées », de contourner l'impossibilité de trouver systématiquement une référence locale d'hydrologie naturelle pour chaque station concernée par la problématique. Les gradients naturels de référence étant beaucoup plus faibles pour les baisses de débit que pour les hausses, la démarche amène généralement à sélectionner davantage de baisses d'éclusées que de hausses d'éclusées.
- Une limite haute sur le débit maximum qui a pour but d'éviter de prendre en compte les événements hydrologiques de crues et décrues dépassant les capacités des aménagements. La valeur de débit maximum est à déterminer par l'opérateur en fonction du débit d'équipement du ou des aménagements hydroélectriques sources des éclusées en amont, ainsi qu'à partir d'un examen visuel détaillé de la chronique de débit (au maximum 4 fois le module).

Dans une troisième étape, les hausses ou baisses d'éclusées consécutives, séparées par une courte phase de stabilité ou une légère inversion de tendance du débit, mais que l'on peut considérer comme faisant partie d'une seule éclusée globale, sont concaténées. Cela permet de ne pas surestimer le nombre d'éclusées et les valeurs statistiques des débits de base et des gradients, et de ne pas sous-estimer les valeurs statistiques des débits maxima et des amplitudes. Cette préoccupation sur la concaténation ou la différenciation des événements successifs se retrouve chez Zolezzi (2011) et Sauterleute (2012).

La méthodologie de sélection des éclusées proposée ne nécessite que la valeur du module du cours d'eau qui est une donnée facilement accessible (indiquée dans les synthèses de chaque station de la banque HYDRO), ainsi que des informations sur les débits d'équipement des centrales présentes en amont pour fixer la limite haute sur le débit maximum. Elle est applicable aux chroniques de débit à pas de temps variable (QTVAR produit par la banque HYDRO), ainsi qu'aux chroniques à pas de temps fixe suffisamment fin (horaire ou infra-horaire) qui sont à même de rendre compte

3) Mise au point d'une méthode de sélection des éclusées au sein des hydrogrammes

correctement des variations de débit liées aux éclusées. Concernant la taille des cours d'eau et la plage de débit, la gamme d'application de la méthodologie est liée aux formules permettant de recalculer l'ordre de grandeur des gradients maximaux naturels, soit des cours d'eau de module supérieur à $1 \text{ m}^3/\text{s}$, et des variations de débit jusqu'à 4 fois le module (d'où la valeur maximale pour le débit maximum). Cela englobe la quasi-totalité des cours d'eau soumis aux éclusées et des débits d'équipements des aménagements en France, et la totalité des stations hydrométriques identifiées dans cette étude. La méthodologie proposée est donc adaptée à une utilisation « en routine » pour la production d'indicateurs.

Chaque hausse et baisse d'éclusée peut être caractérisée par un ensemble de paramètres chiffrés : débit de base et débit maximum, date et heure du début et de fin de la variation, amplitude, gradient, rapport débit maximum sur débit de base, amplitude rapportée au débit de base, gradient comparée à la référence naturelle ... Sur une période donnée, les régimes d'éclusées peuvent être caractérisés par les nombres de hausses et de baisses d'éclusées, et par les statistiques décrivant la distribution des valeurs des différents paramètres chiffrés (minimum, moyenne, maximum, différents quantiles...). Un ensemble de 114 valeurs est ainsi produit par la méthodologie. Pour visualiser l'ensemble des caractéristiques d'un régime d'éclusées, il est proposé de les représenter au travers d'un diagramme en bulle. Chaque bulle correspond à une éclusée et est positionnée en fonction de son débit de base en abscisse et de son amplitude en ordonnée ; le nombre de bulle rend ainsi compte du nombre d'éclusées. La couleur de la bulle est fonction du gradient de l'éclusée (sous forme de classe).

La méthodologie de repérage des éclusées proposée et celle de Sauterleute (2012) présentent des points communs dans leurs différentes étapes. Celle proposée ici présente toutefois les avantages (1) de ne plus faire appel à l'opérateur pour fixer la valeur du critère sur le gradient, en utilisant de manière automatique une référence générale sur les gradients maximaux naturelles, et (2) d'intégrer des conditions sur l'amplitude et sur le débit maximum.

Dans la présente étude, les résultats de la méthodologie de repérage des éclusées proposée ont été exploités pour construire un indicateur du niveau de perturbation hydrologique (partie 4). La méthodologie peut également être utilisée pour mener des études de cas détaillées de régimes d'éclusées en traitant directement les tableaux produits avec les caractéristiques de chaque hausse ou baisse d'éclusées ou ceux avec les caractéristiques des régimes d'éclusées par année et par mois de chaque année.

Au niveau d'une station hydrométrique, les caractéristiques d'un régime d'éclusées dépendent du régime hydrologique des cours d'eau captés (pluvial, pluvio-nival, nival, glaciaire), des caractéristiques de l'aménagement hydroélectrique (type d'aménagement, capacité utile de stockage, débit d'équipement, possibilité de régulation), du règlement d'eau (débit réservé notamment), des éventuelles missions annexes (cote touristique estivale, soutien d'étiage, ...), ainsi que de la distance entre le point de restitution des éclusées et la station hydrométrique (atténuation des éclusées, éventuelle retranscription par des aménagements intermédiaires). La diversité des situations des aménagements couplée aux fluctuations des apports hydrologiques et de la demande énergétique engendre une grande variabilité entre les régimes d'éclusées.

Le test de la méthodologie développée pour le repérage des éclusées au sein des hydrogrammes sur le jeu de données d'hydrologie naturelle présenté en partie 2 (1575 chroniques annuelles de débit extraites de 97 stations) a permis de vérifier qu'il n'y a bien aucun ou très peu d'événements sélectionnés. Les résultats permettent d'avancer que l'hydrologie d'une station pourra être considérée au moins sensiblement perturbée dès lors que le cumul des nombres annuels de baisses et de hausses retenues est supérieur à 20. Dans le processus de l'indicateur « éclusées », cette condition sur le nombre annuel de hausse et de baisse retenues permet de faire une première distinction entre les stations jugées à l'hydrologie naturelle ou très peu perturbée (classe 0), et les stations jugées à l'hydrologie sensiblement à très sévèrement perturbée (classe 1 à 5).

4. DEFINITION D'UN INDICATEUR SYNTHETIQUE DU NIVEAU DE PERTURBATION HYDROLOGIQUE LIEE AUX ECLUSEES

4.1. Objectif de l'indicateur

L'objectif de l'indicateur est de synthétiser les informations données par les différents descripteurs des régimes d'éclusées, sous forme de 5 classes qualifiant le niveau de perturbation hydrologique, en allant d'une hydrologie où la perturbation est suffisamment sensible (classe 1) pour se différencier d'un régime naturel (classe 0), à un niveau de perturbation très sévère (classe 5) caractérisé par des valeurs drastiques de l'un ou de plusieurs paramètres. Il est considéré que l'hydrologie d'une station est perturbée (classe 1 à 5) dès que le nombre cumulé de hausses et de baisses sélectionnées durant une année est supérieur à 20 (voir paragraphe 3.5). Le Tableau 6 présente la qualification du niveau de perturbation hydrologique associée à chaque classe. Des niveaux de perturbation sensible, marquée, très marquée, sévère et très sévère ont été distingués.

Classe	Code couleur	Niveau de perturbation hydrologique due aux éclusées
0		Hydrologie naturelle ou peu perturbée
1	Bleu	Perturbation hydrologique sensible.
2	Vert	Perturbation hydrologique marquée.
3	Jaune	Perturbation hydrologique très marquée.
4	Orange	Perturbation hydrologique sévère.
5	Rouge	Perturbation hydrologique très sévère.

Tableau 6 : Qualification du niveau de perturbation hydrologique associée à chaque classe.

Cet indicateur doit :

- pouvoir être produit « en routine », par un outil transférable aux gestionnaires,
- permettre d'apprécier les évolutions temporelles et spatiales des régimes d'éclusées, en particulier l'amortissement vers l'aval,
- et être sensible aux changements dans la gestion des aménagements (mesures sur les débits minimum ou maximum, sur les gradients, ...).

La méthodologie de repérage des éclusées présentée dans la 3^{ème} partie a été appliquée sur les 80 stations hydrométriques identifiées et 491 chroniques annuelles de débit. Les débits maxima ayant pour but d'éviter de prendre en compte les événements hydrologiques dépassant les capacités des aménagements ont été déterminés pour chaque station à partir des informations disponibles sur les aménagements en amont et de l'examen des hydrogrammes. Les valeurs adoptées sont indiquées dans la liste des stations en Annexe 4. Le travail de construction de l'indicateur s'est appuyé sur une caractérisation à l'échelle annuelle (année civile) des régimes d'éclusées, l'indicateur proposée pouvant néanmoins s'appliquer sur des périodes plus courtes (saisons, périodes biologiques, tarifaires, ...) ou plus longues (voir paragraphe 4.7).

4.2. Classement du niveau de perturbation par expertise

De manière à pouvoir ensuite calibrer une procédure automatique, le niveau de perturbation hydrologique de chaque chronique annuelle de débit a été évalué par expertise par trois opérateurs : Michel Larinier, Philippe Baran et Dominique Courret.

La réalisation d'un classement par expertise a été préférée à l'emploi d'une méthode statistique. Cela est lié au fait que les plus fortes perturbations hydrologiques sont causées par des régimes d'éclusées qui peuvent avoir des caractéristiques assez différentes (l'un parce que les éclusées sont très nombreuses, l'autre parce que les débits de base sont très faibles, un 3^{ème} parce que les amplitudes et gradients sont très forts ...). Les méthodes statistiques de classification ascendantes (regroupement des données) ou descendantes (partitionnement), basées sur des calculs de dissimilarités, ne permettent pas de regrouper ces différents régimes d'éclusées dans la même classe.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Le classement par les opérateurs a été effectué à partir de l'examen de fiches présentant les chroniques de débit et des diagrammes en bulle des hausses et des baisses d'éclusées (comme celles présentées dans la 3^{ème} partie). Pour ne pas influencer les opérateurs, les caractéristiques des stations n'étaient pas indiquées sur les fiches. **L'évaluation du niveau de perturbation hydrologique par les opérateurs a suivi la logique des connaissances sur les impacts biologiques des éclusées : plus le nombre d'éclusées est élevé, plus leurs amplitudes, gradients et débit maxima sont importants et plus leurs débits de base sont faibles, plus le risque d'impacts biologiques est fort.** Une des difficultés réside dans le fait d'agréger les informations sur les différents paramètres du régime d'éclusées pour n'aboutir qu'à une classe. Cet exercice revient implicitement à hiérarchiser l'importance des différents paramètres et fait intervenir dans une certaine mesure l'arbitraire de l'opérateur.

Les différents opérateurs sont parvenus à des classements proches. Un classement final a été adopté après discussion sur les stations et années divergentes. Les classements par expertise retenus sont reportés dans le tableau récapitulatif en annexe 5.

4.3. Reclassement automatique du niveau de perturbation par analyse discriminante linéaire

Pour reproduire les niveaux de perturbation hydrologique évalués par expertise à partir d'un petit nombre de paramètres chiffrés décrivant les régimes d'éclusées, une analyse discriminante linéaire a été utilisée, cette méthode étant réputée pour reproduire le classement d'un jeu de données de calibration et fournir des fonctions de classement.

L'analyse discriminante linéaire a été réalisée avec le logiciel Statgraphics plus 5.0. Elle produit, pour chaque classe, une fonction de classement qui traduit les valeurs des paramètres pris en compte en un score (donc 5 fonctions dans notre cas). Ces fonctions se présentent sous la forme de combinaisons linéaires des paramètres. Pour chaque donnée, les scores des 5 fonctions sont calculés et la donnée est affectée à la classe dont la fonction donne le score maximum.

4.3.1. Choix des paramètres retenus dans l'analyse discriminante

Pour le reclassement, les 114 paramètres chiffrés caractérisant les régimes d'éclusées étaient disponibles (voir paragraphe 3.6.1). Le choix des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante n'a pas été laissé « au hasard », car la recherche automatique d'un taux maximum de concordance avec les classements par expertise amenait à prendre en compte de nombreux paramètres, dont certains redondants, ou ayant des sens de variation illogiques au sein des fonctions linéaires. Le choix des paramètres a été effectué par itération, en s'appuyant sur les 3 considérations suivantes :

- Les paramètres pris en compte doivent refléter les différentes caractéristiques des éclusées pour pouvoir rendre compte de tous les changements de gestion des aménagements (évolutions du nombre des éclusées, de leurs débits de base, débits maxima, amplitudes et gradients).
- Considérant que les impacts biologiques sont principalement liés aux éclusées les plus drastiques du régime, les caractéristiques "fortes" des éclusées ont été ciblées, sans aller jusqu'à prendre en compte les caractéristiques "extrêmes" (minimum, maximum) qui ne sont liées qu'à une éclusée.
- Les termes au sein des fonctions linéaires doivent intervenir dans un sens conforme à la logique; c'est-à-dire que plus le nombre d'éclusées est élevé, plus leurs amplitudes, gradients et débit maxima sont importants et plus leurs débits de base sont faibles, plus le score et la classe donnés par les fonctions doivent augmenter (même logique que pour le classement par expertise).

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Au final, il a été retenu 5 paramètres dans l'analyse discriminante :

- le nombre total de baisse et de hausses d'éclusées par année (Nbtot = Baisses + Hausses),
- la valeur du débit de base non dépassée par 10% des baisses (Bqbase10),
- la valeur d'amplitude non dépassée par 90% des baisses (Bampli90),
- la valeur de gradient non dépassée par 90% des baisses (BGrad90),
- et la valeur de gradient non dépassée par 90% des hausses (HGrad90).

L'indicateur se base ainsi principalement sur les baisses d'éclusées dont les nombres sont quasiment toujours supérieurs à ceux des hausses du fait de gradients naturels de référence beaucoup plus faibles pour les baisses que pour les hausses (et sinon de peu inférieurs). Pour les caractéristiques de débit de base et d'amplitude, les paramètres pris en compte ne portent que sur les baisses. Il n'est en effet pas nécessaire de prendre également en compte des paramètres portant sur les hausses dans la mesure où les informations sont alors redondantes, et où toutes évolutions des débits de base et des amplitudes des éclusées se manifestent aussi bien sur les baisses que sur les hausses. Il n'a pas été pris en compte de paramètres sur les débits maxima dans la mesure où l'information est alors redondante avec ceux sur les débits de base et amplitudes. Pour les gradients, il est pris en compte à la fois un paramètre des baisses et un paramètre des hausses de façon à pouvoir rendre compte des évolutions des deux types de variation. L'utilisation du 1^{er} décile des débits de base et des 9^{me} déciles des amplitudes et gradients est liée à la volonté de cibler les caractéristiques "fortes" des éclusées pour reproduire le niveau de perturbation.

Les valeurs de Bqbase10, Bampli90, Bgrad90 et Hgrad90 sont rapportées au module du cours d'eau. Le nombre de hausses d'éclusées sélectionnées pouvant être faible, la valeur de Hgrad90 a été considérée nulle lorsque ce nombre est inférieur à 10, considérant que lorsque les hausses sont peu nombreuses, leurs gradients comptent peu dans le niveau de perturbation hydrologique, et pour éviter de prendre en compte des valeurs liées à un seul événement.

Les performances de reclassement par l'analyse discriminante ont été améliorées avec des transformations des variables utilisant le logarithme décimal et permettant d'obtenir des gammes de variation des paramètres plus réduites et proches pour les différents paramètres. Pour le débit de base, la transformation permet également d'obtenir des valeurs d'autant plus fortes que le débit de base est faible. Le Tableau 7 présente les gammes de valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante, les formules de transformation et les nouvelles gammes de valeur obtenues.

Paramètre	Gamme de valeurs			Paramètre transformé	Gamme de valeurs		
	Min	Moy	Max		Min	Moy	Max
NbTot	21	467	3659	Log(NbTot)	1.32	2.47	3.56
Bqbase10	0.02	0.243	0.77	Log(1+10/Bqbase10)	2.70	1.68	1.15
Bampli90	0.218	0.838	2.58	Log(1+10*Bampli90)	0.50	0.93	1.43
Bgrad90	0.029	0.329	6.801	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	0.06	0.43	1.63
Hgrad90	0	0.736	21.22				

Tableau 7 : Gammes de valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante, formules de transformation et nouvelles gammes de valeur obtenues.

4.3.2. Résultats du reclassement par l'analyse discriminante

L'analyse discriminante calibrée sur l'ensemble du jeu de données permet de reclasser correctement 427 des 491 chroniques annuelles de débit, soit près de 87%, ce qui constitue un résultat satisfaisant (Figure 63). Les données mal classées se retrouvent toutes dans la classe immédiatement inférieure ou supérieure à celle évaluée par expertise ; il n'y a en effet jamais d'écart de plus d'une classe. Sur les 64 cas mal classés, il y en a 63 où le second score le plus élevé correspond à la classe évaluée par expertise.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Les performances de reclassement ont également été testées en retirant successivement chacune des stations du jeu de données de calibration et en examinant les résultats pour cette station (« leave-one-out cross-validation »). **L'analyse discriminante permet alors de reclasser correctement 414 des 491 chroniques annuelles de débit, soit 84.3%, ce qui constitue un résultat toujours satisfaisant** (Figure 64). De même, les données mal classées se retrouvent toutes dans la classe immédiatement inférieure ou supérieure à celle évaluée par expertise.

La Figure 65 illustre la procédure de reclassement par l'analyse discriminante. L'ensemble des reclassements est reporté dans le tableau récapitulatif en Annexe 5. **Au final, ces résultats montrent d'une part que les paramètres pris en compte sont de bons descripteurs des régimes d'éclusées, et d'autre part que l'analyse discriminante est une méthode adaptée pour agréger les informations de ces différents paramètres et produire un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique sous forme de classe.**

Classement par expertise		Reclassement par l'analyse discriminante dans les différentes classes				
Classe	Nombre de chronique annuelle	1	2	3	4	5
1	90	83	7	0	0	0
		92.2%	7.8%	0.0%	0.0%	0.0%
2	132	8	112	12	0	0
		6.1%	84.8%	9.1%	0.0%	0.0%
3	120	0	7	101	12	0
		0.0%	5.8%	84.2%	10.0%	0.0%
4	80	0	0	9	69	2
		0.0%	0.0%	11.3%	86.3%	2.5%
5	69	0	0	0	7	62
		0.0%	0.0%	0.0%	10.1%	89.9%
Taux global de reclassement correct :		87.0%				

Figure 63 : Tableau de reclassement par l'analyse discriminante linéaire calibrée sur l'ensemble du jeu de données.

Classement par expertise		Reclassement par l'analyse discriminante dans les différentes classes				
Classe	Nombre de chronique annuelle	1	2	3	4	5
1	90	83	7	0	0	0
		92.2%	7.8%	0.0%	0.0%	0.0%
2	132	9	111	12	0	0
		6.8%	84.1%	9.1%	0.0%	0.0%
3	120	0	9	100	11	0
		0.0%	7.5%	83.3%	9.2%	0.0%
4	80	0	0	14	62	4
		0.0%	0.0%	17.5%	77.5%	5.0%
5	69	0	0		11	58
		0.0%	0.0%	0.0%	15.9%	84.1%
Taux global de reclassement correct :		84.3%				

Figure 64 : Tableau de reclassement par l'analyse discriminante linéaire en retirant successivement chacune des stations du jeu de données de calibration (« leave-one-out cross-validation »).

4.4. Subdivision des classes 2, 3 et 4

A partir des résultats de l'analyse discriminante, les classes 2, 3 et 4 peuvent être divisées en deux sous-classes selon que le second score le plus élevé est obtenu pour la classe supérieure ou inférieure. Par exemple, une station en classe 3 peut être affectée en classe 3- si le second score le plus élevé est obtenu pour la classe 2, ou en classe 3+ si le second score le plus élevé est obtenu pour la classe 4 (Figure 65). Cette subdivision des classes 2, 3 et 4 permet d'affiner le diagnostic.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	BampI90	Bgrad90	HausSES	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*BampI90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adéquation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
1	2000	3	430	0.199	0.701	0.223	90	1.222	520	2.72	1.71	0.90	0.52	335.7	350.3	354.2	353.7	344.1	354.2	353.7	3	4	3+	OK	
1	2001	2	262	0.195	0.612	0.211	48	0.894	310	2.49	1.72	0.85	0.47	303.4	312.7	312.7	308.7	294.5	312.7	312.7	2	3	2+	OK	
1	2002	3	339	0.225	0.620	0.207	75	1.913	414	2.62	1.66	0.86	0.60	314.9	326.6	328.4	326.3	313.7	328.4	326.6	3	2	3-	OK	
1	2003	3	334	0.283	0.690	0.256	80	1.325	414	2.62	1.56	0.90	0.56	315.7	327.8	330.3	328.1	315.5	330.3	328.1	3	4	3+	OK	
1	2004	3	332	0.273	0.669	0.257	49	1.445	381	2.58	1.58	0.89	0.57	310.9	322.2	324.1	321.5	308.2	324.1	322.2	3	2	3-	OK	
1	2005	2	258	0.230	0.602	0.149	32	0.848	290	2.46	1.65	0.85	0.41	294.3	302.2	301.5	296.4	280.6	302.2	301.5	2	3	2+	OK	
1	2006	2	282	0.227	0.528	0.175	25	0.585	307	2.49	1.65	0.80	0.39	288.1	295.0	293.3	287.6	270.7	295.0	293.3	2	3	2+	OK	
1	2007	2	268	0.156	0.575	0.166	35	0.698	303	2.48	1.81	0.83	0.40	303.3	312.1	311.2	307.0	292.8	312.1	311.2	2	3	2+	OK	
1	2008	2	237	0.156	0.689	0.213	32	0.544	269	2.43	1.81	0.90	0.42	310.4	320.4	320.6	317.0	304.1	320.6	320.4	3	2	3-	Non	Oui
1	2009	2	150	0.159	0.515	0.280	44	0.726	194	2.29	1.81	0.79	0.49	276.8	281.6	277.9	271.4	253.6	281.6	277.9	2	3	2+	OK	
2	2004	3	367	0.312	0.443	0.386	343	0.818	710	2.85	1.52	0.73	0.57	307.5	318.4	319.8	317.2	302.5	319.8	318.4	3	2	3-	OK	
2	2005	2	284	0.331	0.409	0.153	176	0.235	460	2.66	1.49	0.71	0.30	278.5	284.1	281.9	275.2	255.8	284.1	281.9	2	3	2+	OK	
2	2006	2	332	0.298	0.367	0.196	251	0.236	583	2.77	1.54	0.67	0.35	285.4	292.1	290.4	284.7	266.2	292.1	290.4	2	3	2+	OK	
2	2007	2	402	0.273	0.351	0.176	336	0.232	738	2.87	1.58	0.65	0.32	295.0	303.0	302.1	297.3	280.1	303.0	302.1	2	3	2+	OK	
2	2008	2	215	0.333	0.415	0.160	153	0.259	368	2.57	1.49	0.71	0.31	269.5	273.8	270.6	263.0	242.5	273.8	270.6	2	3	2+	OK	
2	2009	2	140	0.369	0.416	0.380	133	0.726	273	2.44	1.45	0.71	0.56	256.7	259.8	255.8	248.0	226.2	259.8	256.7	2	1	2-	OK	
3	2004	1	84	0.285	0.274	0.041	18	0.164	102	2.01	1.56	0.57	0.14	189.5	180.3	167.0	150.7	118.6	189.5	180.3	1	2	1	OK	
3	2005	1	89	0.355	0.465	0.039	20	0.226	109	2.04	1.46	0.75	0.15	219.4	215.4	206.5	193.0	165.7	219.4	215.4	1	2	1	OK	
3	2006	1	54	0.325	0.414	0.041	11	0.165	65	1.81	1.50	0.71	0.14	191.2	182.5	170.1	153.6	122.5	191.2	182.5	1	2	1	OK	
3	2007	1	43	0.322	0.429	0.032	8	0.124	51	1.71	1.51	0.72	0.06	182.3	171.9	158.4	140.6	108.2	182.3	171.9	1	2	1	OK	
3	2008	1	34	0.489	0.605	0.036	6	0.178	40	1.60	1.33	0.85	0.07	183.4	173.9	162.0	144.1	112.2	183.4	173.9	1	2	1	OK	
3	2009	1	23	0.405	0.458	0.064	13	0.277	36	1.56	1.41	0.75	0.20	166.7	154.6	140.2	121.4	87.1	166.7	154.6	1	2	1	OK	
4	2004	3	523	0.286	0.437	0.191	433	0.357	956	2.98	1.56	0.73	0.36	319.5	331.7	333.8	331.6	318.1	333.8	331.7	3	2	3-	OK	
4	2005	3	455	0.323	0.472	0.161	307	0.327	762	2.88	1.50	0.76	0.33	310.9	321.8	323.4	320.1	305.4	323.4	321.8	3	2	3-	OK	
4	2006	3	502	0.264	0.364	0.128	331	0.252	833	2.92	1.59	0.67	0.28	303.0	312.1	311.9	307.7	291.6	312.1	311.9	2	3	2+	Non	Oui
4	2007	3	480	0.272	0.416	0.128	337	0.242	817	2.91	1.58	0.71	0.27	309.6	319.9	320.6	317.0	302.0	320.6	319.9	3	2	3-	OK	
4	2008	2	376	0.315	0.365	0.104	217	0.227	593	2.77	1.52	0.67	0.24	283.1	289.3	287.2	280.9	261.9	289.3	287.2	2	3	2+	OK	
4	2009	2	255	0.334	0.369	0.097	80	0.218	335	2.53	1.49	0.67	0.23	256.8	258.8	253.9	244.8	222.3	258.8	256.8	2	1	2-	OK	
4	2010	2	403	0.375	0.446	0.131	214	0.356	617	2.79	1.44	0.74	0.30	293.7	302.0	301.9	296.8	279.5	302.0	301.9	2	3	2+	OK	

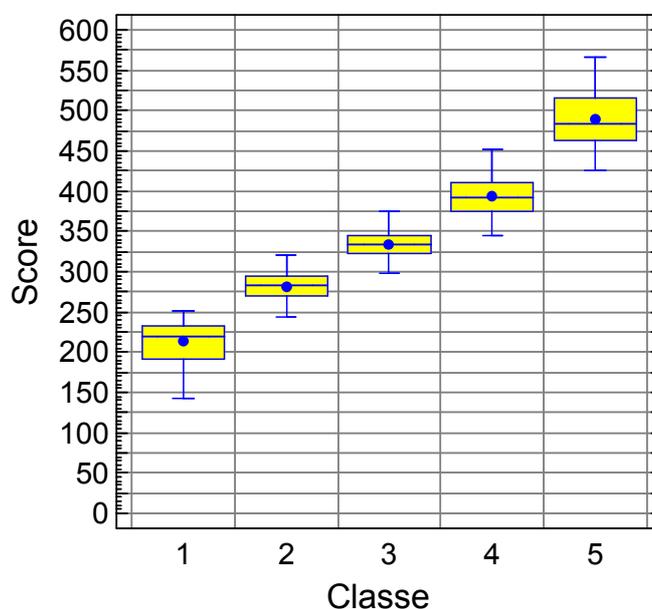
Figure 65 : Illustration de la procédure de reclassement par l'analyse discriminante.

4.5. Score maximum de l'analyse discriminante

Les scores de l'analyse discriminante sont globalement croissants de la classe 1 à 5, dans le sens d'une perturbation hydrologique de plus en plus sévère (Figure 66). Dans le graphique, les boîtes de dispersion présentent les valeurs minimales et maximales (extrémités de la droite verticale), le 1^{er} et le 3^{ème} quartile (extrémités de la boîte), la médiane (trait au sein de la boîte) et la moyenne (point).

Il n'y a quasiment aucun recouvrement entre les gammes de valeurs des classes 1 et 2, peu de recouvrement entre les classes 4 et 5, et un recouvrement concernant environ 25% des valeurs entre les classes 2 et 3 et les classes 3 et 4. Sur les périodes de données traitées, 47 stations présentent des changements de classe entre les années, avec un total de 59 changements (certaines stations en présentant 2, voire 3). Pour une station donnée, 56 changements de classe (soit $\approx 95\%$) se déroulent sans recouvrement des gammes de valeurs. Pour les 3 cas où il y a un recouvrement (station n° 8, 71 et 82), celui-ci est minime.

L'évolution de ce score peut donc être intéressante à suivre sur une station donnée pour apprécier l'effet de modifications de gestion des centrales qui ne se traduisent pas forcément par un changement de classe. Les évolutions de ce score à la hausse ou à la baisse peuvent être interprétées comme une aggravation ou une atténuation de la perturbation.



Score	Classe				
	1	2	3	4	5
Minimum	143.4	243.7	298.6	344.5	425.2
Moyenne	213.2	281.8	334.3	393.2	489.1
Max	250.6	321.2	375.8	452.1	566.8
1 ^{er} décile	173.7	257.5	314.2	363.4	450.7
1 ^{er} quartile	196.3	269.7	321.8	374.1	464.0
Médiane	219.4	283.9	332.9	392.8	483.3
3 ^{ème} quartile	231.8	294.9	344.8	410.0	512.3
9 ^{ème} décile	240.4	303.3	359.7	423.4	535.9

Figure 66 : Gamme de valeurs des scores maxima de l'analyse discriminante selon les classes.

4.6. Répartition et caractéristiques des régimes d'éclusées dans les différentes classes

La Figure 67 présente le nombre de régimes d'éclusées affectés dans les différentes classes, ainsi que les valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante. La Figure 68 présente des diagrammes représentant les caractéristiques Bqbase10, Bampli90 et Nbtot des régimes d'éclusées annuels affectés dans les différentes classes.

Il a été affecté entre environ 70 et 130 chroniques annuelles de débit influencées par les éclusées selon les classes, soit entre 14% et 26% du nombre total de chroniques (491).

Les évolutions des valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante sont globalement logiques entre les classes : le nombre d'éclusées, l'amplitude ou les gradients ont tendance à croître de la classe 1 à la classe 5, et le débit de base tendance à décroître. En considérant les paramètres de manière indépendante les uns et des autres, les valeurs d'un paramètre peuvent toutefois présenter des distributions similaires entre 2 classes.

Les diagrammes en bulle permettent de visualiser l'évolution conjointe des paramètres des régimes d'éclusées entre les classes, ainsi que le panel des situations au sein d'une même classe. On observe qu'au sein d'une même classe, plus un paramètre est pénalisant, moins les autres paramètres le sont. En particulier, plus le nombre d'éclusées est important, plus les amplitudes vont être faibles, et/ou plus les débits de base vont être forts.

Les régimes d'éclusées affectés en classe 1 présentent la plupart des nombres d'éclusées inférieurs à 150, des amplitudes inférieures à 0.6 module et des débits de base supérieurs à 0.16 module. Des amplitudes supérieures, allant jusqu'à 1 module, ne sont associées qu'avec des nombres d'éclusées inférieurs à 100. Il y a également en classe 1 quelques régimes d'éclusées avec des nombres allant jusqu'à 280, mais avec alors des amplitudes inférieures à 0.4 module.

La classe 2 regroupe d'un côté des régimes avec un faible nombre d'éclusées (50-100), des amplitudes de l'ordre de 1.1-1.3 module et des débits de base de l'ordre de 0.12-0.32 module, et d'un autre côté des régimes avec jusqu'à 750-840 éclusées, des amplitudes inférieures à 0.5 module et des débits de base supérieurs à 0.2 module, ainsi que des situations intermédiaires.

De même, la classe 3 regroupe d'un côté des régimes avec un faible nombre d'éclusées (100-150), des amplitudes la plupart de l'ordre de 1.2-1.6 module et des débits de base de l'ordre de 0.16-0.48 module, et d'un autre côté des régimes avec jusqu'à plus de 1000 éclusées, des amplitudes inférieures à 0.4 module et des débits de base supérieurs à 0.18 module, ainsi que des situations intermédiaires.

Les régimes d'éclusées affectés en classe 4 présentent des nombres supérieurs à 300, sauf quelques cas dont les amplitudes dépassent 2 modules avec des débits de base de l'ordre de 0.12-0.2 module. La classe 4 englobe des régimes allant de 300-400 éclusées avec des amplitudes de l'ordre de 1.1-1.4 module et des débits de base de l'ordre de 0.08-0.2 module, jusqu'à des régimes avec plus de 1000 éclusées avec des amplitudes inférieures à 1 module et des débits de base la plupart supérieurs à 0.2 module.

La classe 5 regroupe les régimes d'éclusées dont les amplitudes sont supérieures à 1 module et atteignent jusqu'à 2.6 module, avec des débits de base la plupart inférieurs 0.16 module. Quelques régimes d'éclusées avec des amplitudes de l'ordre de 0.8-1.3 module et des débits de base de l'ordre de 0.24-0.32 module se trouvent également affectés en classe 5 du fait de nombre d'éclusées très élevés, supérieurs à 1600.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

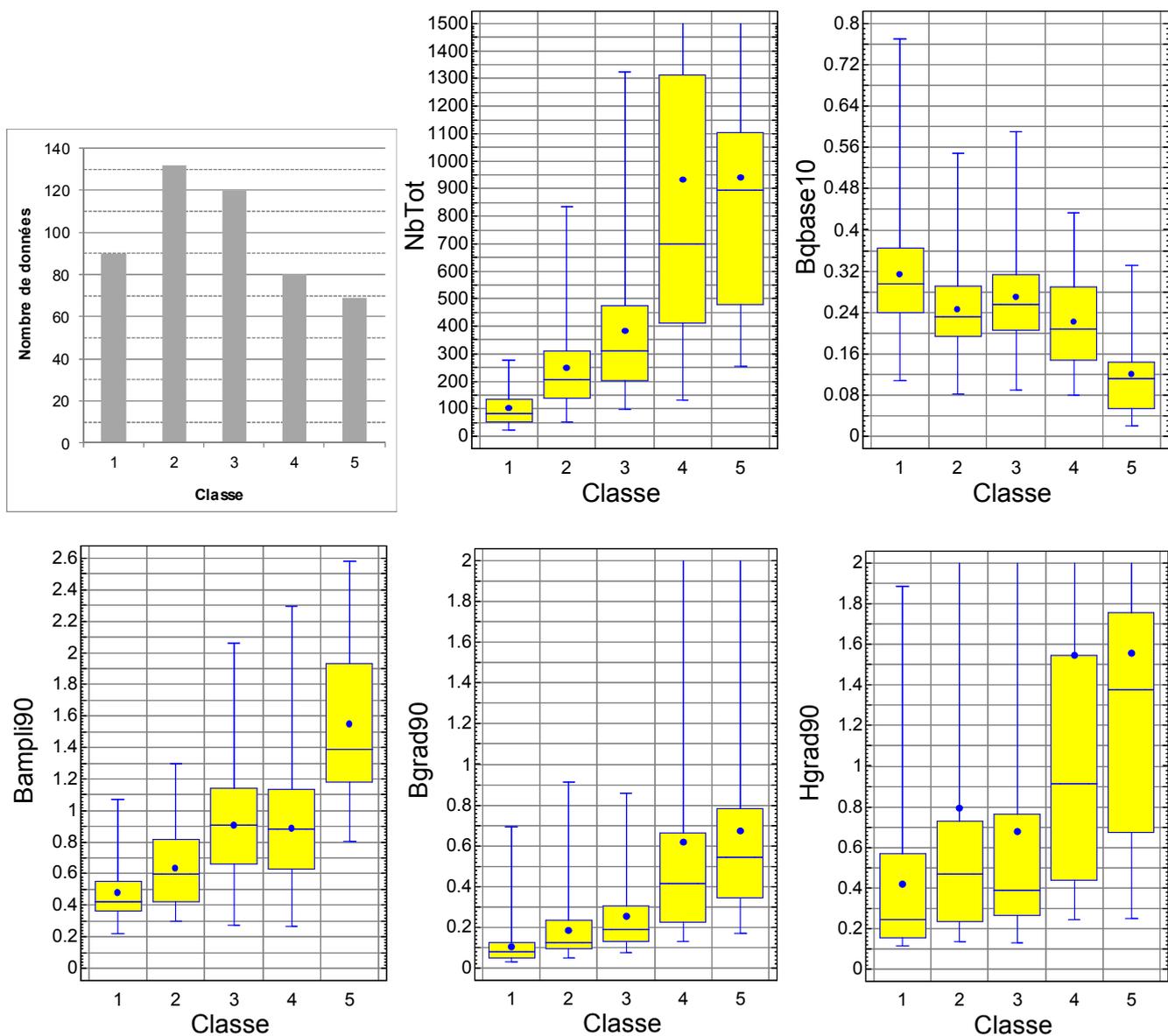


Figure 67 : Nombre de régimes d'éclusées et valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante selon les classes (en proportion du module pour Bqbase10, Bampli90, Bgrad90 et Hgrad90).

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

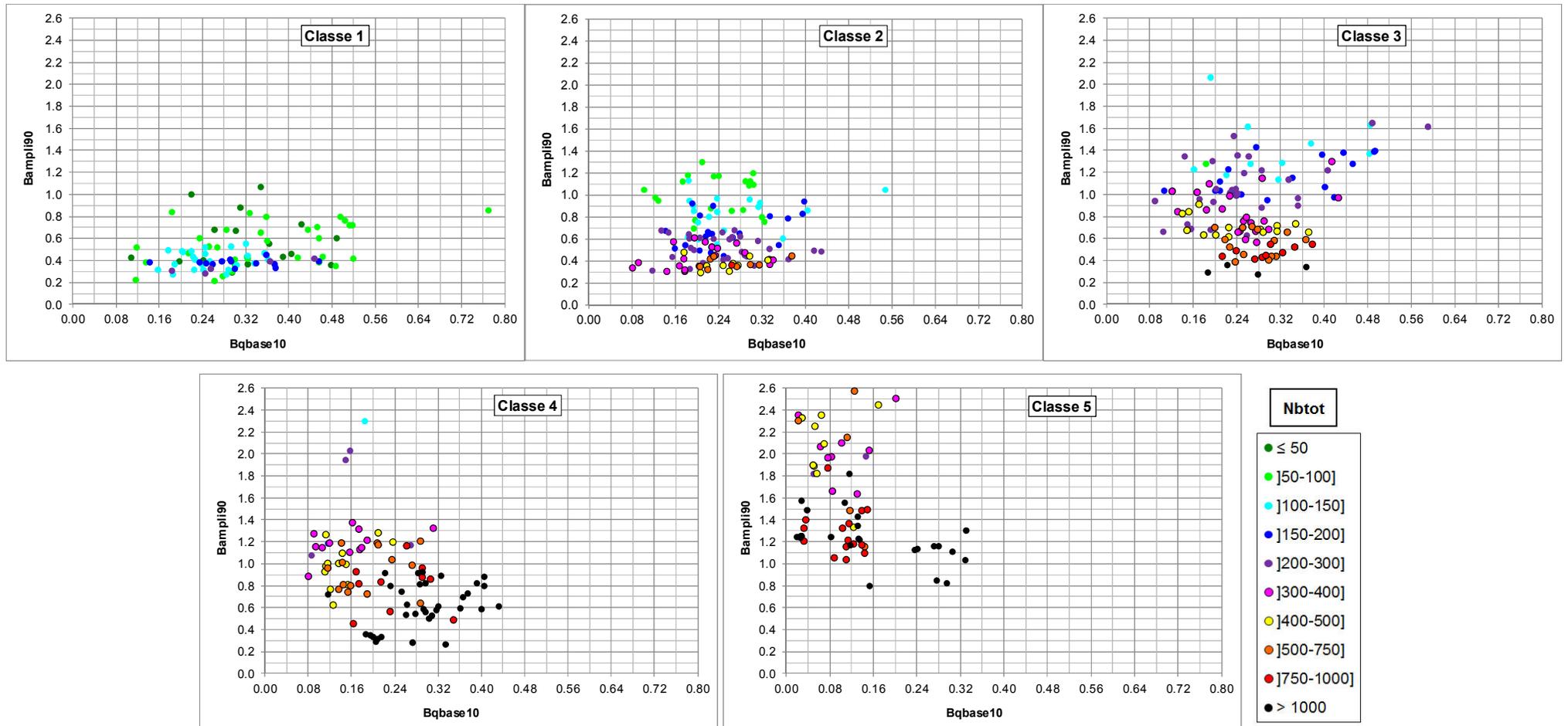


Figure 68 : Diagrammes représentant les caractéristiques Bqbase10, Bampli90 et Nbtot pour les différentes classes.

4.7. Mise en œuvre de l'indicateur sur des périodes de l'année

L'indicateur a été construit sur des chroniques annuelles de débit. Les fonctions de reclassement produites par l'analyse discriminante peuvent également être appliquées sur des périodes plus longues ou plus courtes, notamment sur des périodes de l'année correspondant à des certaines phases biologiques des espèces présentes sur les cours d'eau. **Dans la mise en œuvre, il est alors seulement nécessaire de recalculer le nombre d'éclusées annuel équivalent.** Par exemple, si on dénombre 100 éclusées durant une période 3 mois, il faudra renseigner 400 éclusées dans les fonctions de classement. Les autres paramètres (Bqbase10, Bampli90, Bgrad90 et Hgrad90) n'ont pas à être retouchés. Il convient toutefois que la période soit suffisamment longue et contiennent suffisamment d'éclusées pour que les valeurs de ces paramètres ne soient pas liées qu'à une éclusée. Une durée de l'ordre de 2-3 mois semble être un minimum.

Le schéma page suivante récapitule les étapes de la méthode de sélection des éclusées et de classement de la perturbation hydrologique

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

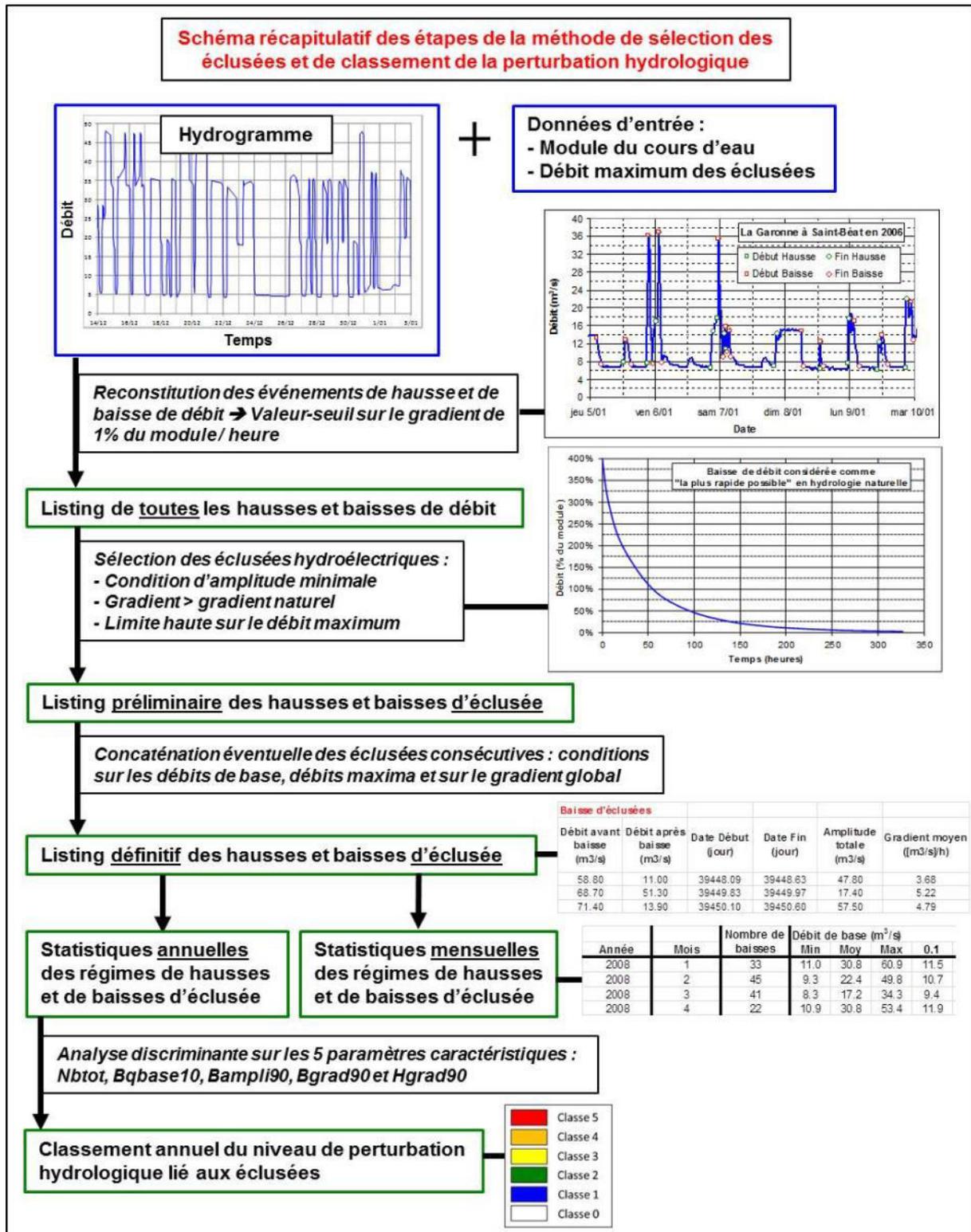


Figure 69 : Schéma récapitulatif des étapes de la méthode de sélection des éclusées et de classement de la perturbation hydrologique.

4.8. Exemples de mise en œuvre de l'indicateur

Plusieurs exemples de mise en œuvre de l'indicateur sont présentés afin d'en illustrer la capacité à répondre à la variabilité des régimes d'éclusées, et notamment aux changements de gestion des centrales ou à l'amortissement vers l'aval d'un régime d'éclusées.

4.8.1. La Maronne à Basteyroux de 1989 à 2012

La Maronne est un affluent rive gauche de la Dordogne, confluant en aval d'Argentat en Corrèze (19). Le tronçon aval de la Maronne est influencé par la gestion de l'aménagement de HautePAGE sur un linéaire d'environ 6.3 km entre la centrale et la confluence avec la Dordogne. Le module de la Maronne au niveau de la station de Basteyroux située environ 3 km en aval de l'usine est de 20.1 m³/s. Le débit maximum turbiné à la centrale est de l'ordre de 45 m³/s, soit 2.2 fois le module.

La Figure 70 présente le niveau de perturbation hydrologique et l'évolution du score de l'analyse discriminante sur la Maronne de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle et sur la période de mi-mars à mi-juin. A l'échelle annuelle, la perturbation hydrologique est qualifiée de très sévère (classe 5) de 1989 à 2010. Les scores, compris entre 500 et 600 de 1989 à 2000, diminuent à partir de 2001 avec des valeurs entre 430 et 510 jusqu'à 2010. La perturbation hydrologique est ensuite qualifiée de sévère (classe 4) en 2011 et de très marquée (classe 3) en 2012. Une attention particulière est portée sur la période de mi-mars à mi-juin durant laquelle des mesures d'atténuation des impacts des éclusées sont spécifiquement mises en œuvre. De 1989 à 2000, la perturbation hydrologique est très sévère avec des scores très proches de ceux obtenus à l'échelle annuelle. De 2001 à 2007, la perturbation est sévère ou très sévère, mais avec des scores déjà réduits par rapport à l'année entière. A partir de 2008, la perturbation hydrologique due au régime hydrologique sur la période mi-mars à mi-juin diminue, jusqu'à ne plus être notable en 2011 et 2012 (classe 0 ; nombre cumulé de hausses et de baisses détectées inférieur à 5 [équivalent à 20 sur l'année]). Cela ne veut pas dire que le régime hydrologique a retrouvé toutes ses caractéristiques naturelles, mais indique qu'il n'est plus pratiqué de véritable gestion par éclusées. Afin d'illustrer les différents niveaux de perturbation, la Figure 71 compare les chroniques de débit de la Maronne sur la période de mi-mars à mi-juin en 2007, 2008, 2010 et 2011.

Ces évolutions des scores et classement reflètent la mise en œuvre progressive de mesures d'atténuation de l'impact des éclusées avec notamment⁸ :

- la mise en place à partir de l'hiver 1997/1998 d'un débit de base durant les phases de reproduction des géniteurs, d'incubation des œufs et d'émergence des alevins (mi-novembre à fin mai puis mi-juin), avec la délivrance d'environ 3 m³/s à l'usine.
- l'augmentation du débit minimum délivré au barrage, passant de 0.485 m³/s auparavant à 1 m³/s en 2006, puis 2 m³/s en 2009.
- la limitation du débit maximum turbiné à 30 m³/s, de mi-mars à mi-juin, en 2010 (au lieu de 45 m³/s), puis la mise en place à partir de 2011 d'une durée maximale de 18H pour les éclusées au-delà de 25 m³/s (sous condition d'hydraulicité).
- la mise en place à partir de 2011 d'un débit de base de mi-mars à mi-juin avec la délivrance de 8 m³/s à l'usine (sous conditions d'hydraulicité et de pratique d'éclusées).
- La limitation des gradients de baisse à 10 m³/s/h du 15 mars au 30 septembre à partir de 2004.

Ces modifications de gestion se visualisent au travers des boîtes de dispersion des paramètres du régime d'éclusées pris en compte dans l'indicateur, parfois avec une année de décalage du fait de mise en œuvre en cours d'année. A l'échelle annuelle (Figure 72), il ressort une diminution du nombre d'éclusées en 2011 et 2012, de l'ordre de 150 et 100 éclusées respectivement, contre 250 à 500 auparavant, ainsi que l'effet des augmentations de débit de base en 1997/1998, en 2006 et 2009. Sur la période de mi-mars à mi-juin (Figure 73), ces évolutions de gestion ressortent encore plus

⁸ Pour le détail des mesures, voir les conventions pour la réduction de l'impact des éclusées sur le bassin de la Dordogne, consultables sur le site d'EPIDOR (www.eptb-dordogne.fr) ou de la DREAL Limousin (www.limousin.developpement-durable.gouv.fr).

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

nettement. On visualise de plus une réduction des amplitudes des éclusées à partir de 2008, ainsi qu'une diminution des gradients de baisse à partir de 2002.

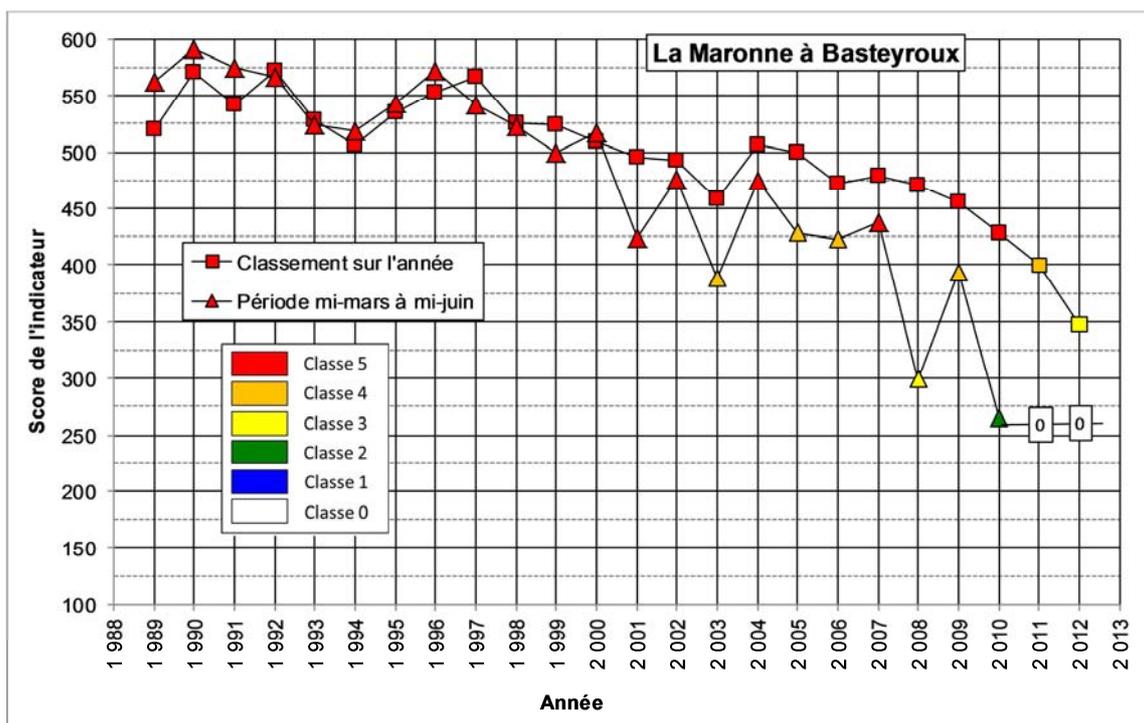


Figure 70 : Niveau de perturbation hydrologique et évolution du score de l'analyse discriminante sur la Maronne à Basteyroux de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle et sur la période de mi-mars à mi-juin.

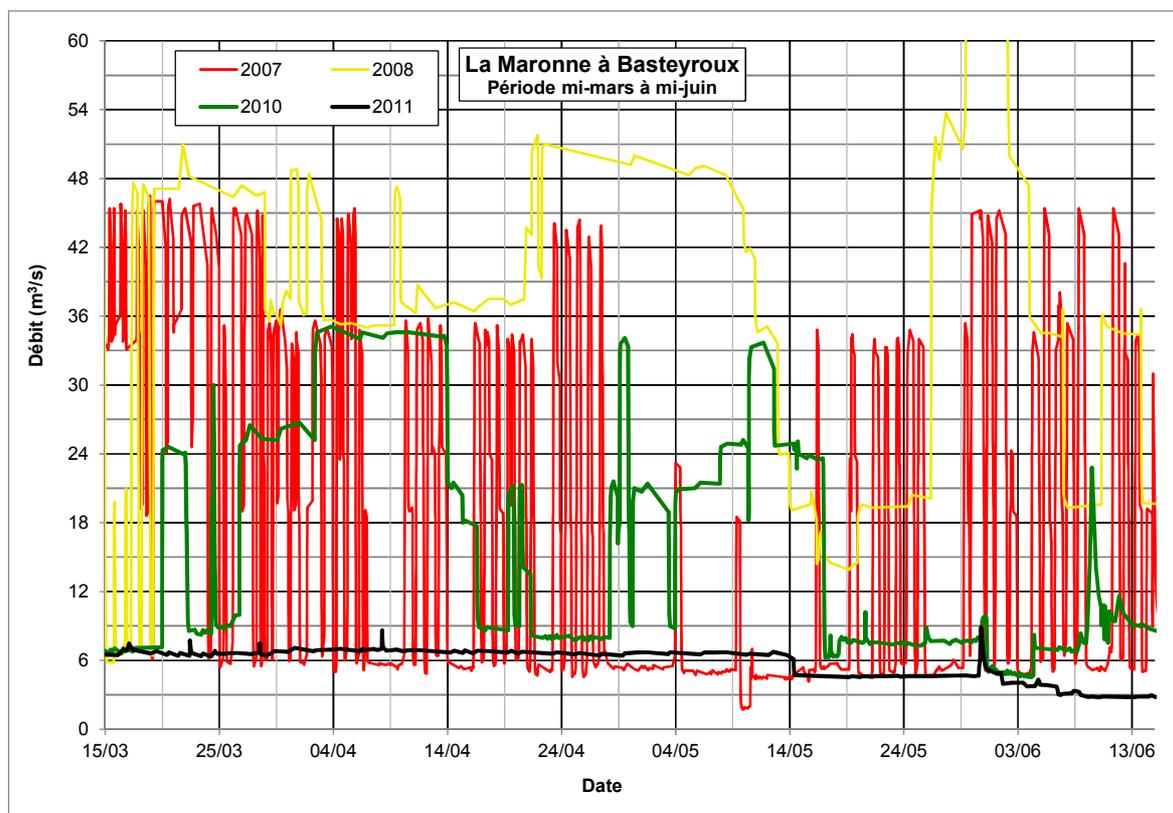


Figure 71 : Comparaison des chroniques de débit de la Maronne sur la période de mi-mars à mi-juin en 2007, 2008, 2010 et 2011.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

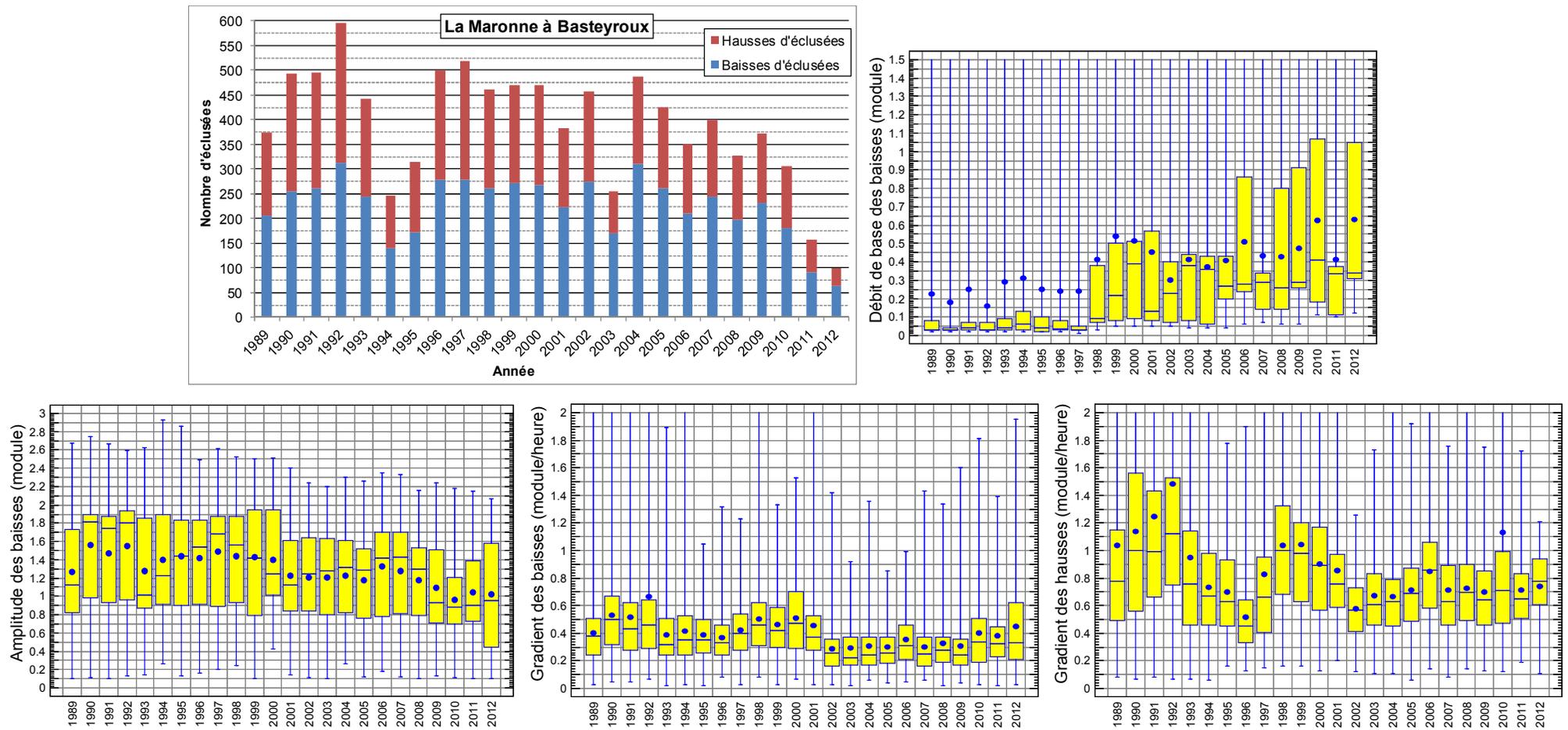


Figure 72 : Evolutions du nombre cumulé de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur la Maronne à Basteyroux, de 1989 à 2012.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

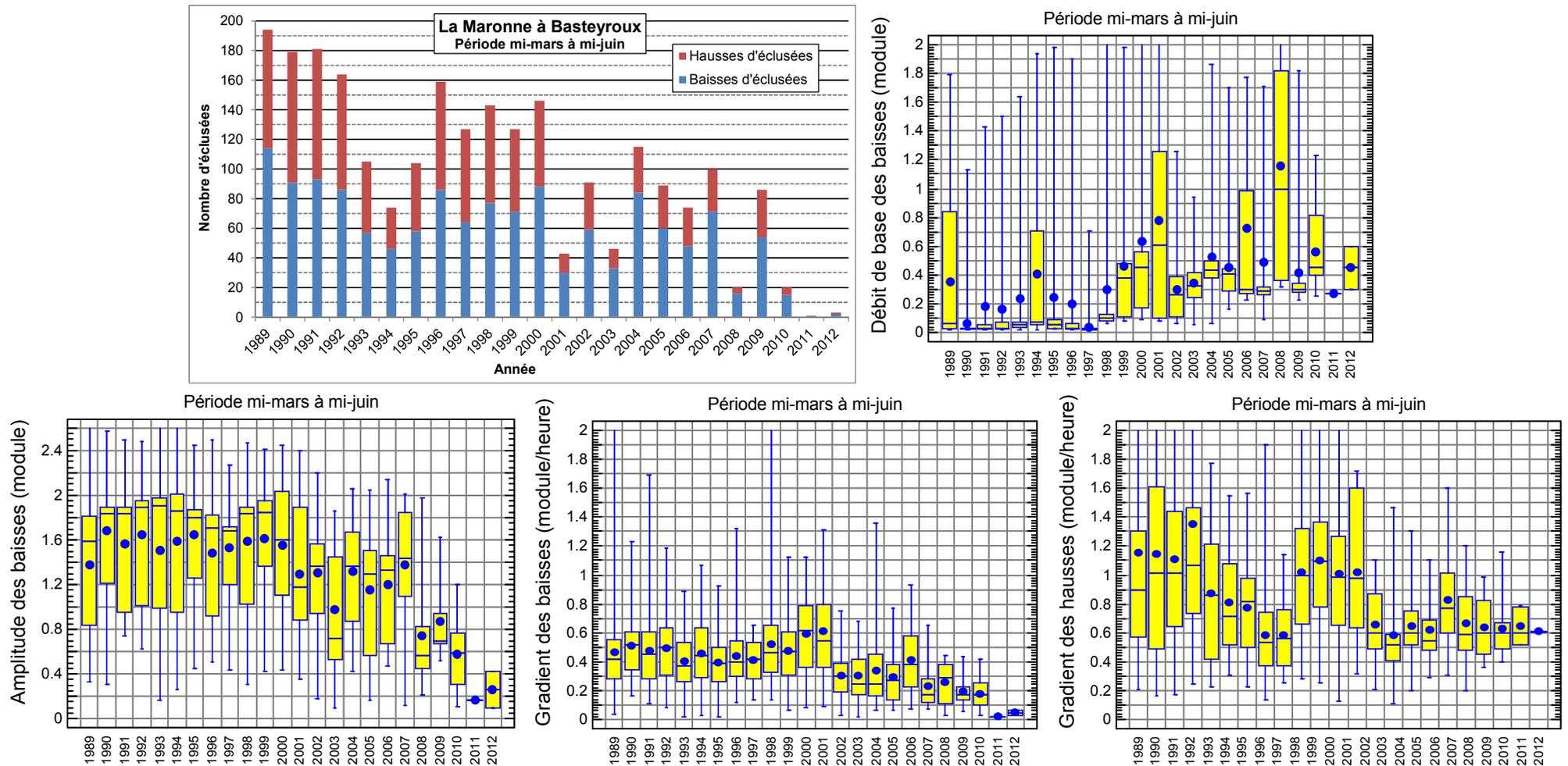


Figure 73 : Evolutions du nombre cumulé de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur la Maronne à Basteyroux, de 1989 à 2012, sur la période de mi-mars à mi-juin.

4.8.2. La Dordogne d'Argentat à Cénac de 1989 à 2012

Le bassin versant amont de la Dordogne est largement aménagé pour la production d'hydroélectricité avec notamment 5 grands barrages sur son propre cours, de l'amont vers l'aval : Bors-les-Orgues, Marèges, l'Aigle, Chastang et le Sablier, dernier barrage situé un peu en amont d'Argentat en Corrèze (19). Le module de la Dordogne au niveau d'Argentat est de $106 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit d'équipement de l'aménagement du Sablier est de $340 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 3.2 fois le module. A l'aval du Sablier, le régime d'éclusées se propage sur un linéaire important ; il est ici analysé au niveau des stations hydrométriques d'Argentat, de Brivezac, de Carennac et de Cénac situées respectivement à environ 2, 20, 45 et 120 km en aval. La Dordogne reçoit également l'influence des régimes d'éclusées pratiqués sur la Maronne qui conflue entre Argentat et Brivezac, et sur la Cère qui conflue entre Brivezac et Carennac.

Le Tableau 8 et la Figure 74 présentent le niveau de perturbation hydrologique et l'évolution du score de l'analyse discriminante sur la Dordogne de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle. Au niveau d'Argentat, la perturbation est globalement qualifiée de sévère (classe 4) de 1989 à 1999, puis de très marquée (classe 3) de 2000 à 2011 et devient marquée (classe 2) en 2012. Au niveau de Brivezac, le diagnostic est à peu près similaire et suit les mêmes évolutions. Le classement et/ou le score donnés par l'indicateur sont inférieurs à ceux d'Argentat la plupart des années, mais peuvent également y être supérieurs certaines années (2001, 2005 et 2008 notamment). Cela s'explique par des effets antagonistes entre l'amortissement des éclusées le long de la Dordogne et l'arrivée des éclusées venant de la Maronne, ces influences pouvant s'équilibrer ou l'emporter selon les années. Au niveau de Carennac, la perturbation est toujours atténuée par rapport à Brivezac. Elle est globalement qualifiée de marquée (classe 2) de 2003 à 2011, avec des années marquées (classe 3-) en 2005 et 2007, et n'est plus que sensible en 2012 (classe 1). Même si la Dordogne reçoit les éclusées venant de la Cère entre Brivezac et Carennac, l'amortissement de celles du Sablier et de la Maronne l'emporte. Au niveau de Cénac, le régime d'éclusées est encore sensible (classe 1) de 2003 à 2012.

Comme sur la Maronne, une attention particulière est portée sur la période de mi-mars à mi-juin durant laquelle des mesures d'atténuation des impacts des éclusées sont spécifiquement mises en œuvre (Tableau 9 et Figure 75). Au niveau d'Argentat, la perturbation est globalement qualifiée de sévère ou très marquée (classe 4 ou 3+) de 1989 à 2000, de sévère (classe 3) de 2001 à 2005. De 2006 à 2012, le niveau de perturbation est assez variable avec des années qui restent très marquée (2007, 2009 et 2010), une année marquée (2006) et des années où la perturbation n'est plus que sensible (2008, 2011, 2012). Au niveau de Brivezac, le diagnostic est à peu près similaire et suit les mêmes évolutions de 1989 à 2007. En revanche, à partir de 2008, le niveau de perturbation à Brivezac devient systématiquement inférieur à celui d'Argentat, avec un changement de classe ou une diminution du score. En particulier, en 2008 et 2012, l'hydrologie n'est plus perturbée par un véritable régime d'éclusées (classe 0), le nombre de variations détectées, hausses et baisses cumulées, étant inférieur à 5 (équivalent à 20 sur l'année). Au niveau de Carennac, la perturbation est toujours atténuée par rapport à Brivezac, l'année 2011 passant en particulier en classe 0. Au niveau de Cénac, le régime d'éclusées est encore sensible (classe 1), sauf en 2008, 2011 et 2012 (classe 0).

Ces évolutions des scores et classement reflètent la mise en œuvre progressive de mesures d'atténuation des éclusées avec notamment⁹ :

- la mise en place d'un débit de base de mi-novembre à mi-mars de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ à partir de 2004, puis de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ à partir de 2008 (au lieu de $10 \text{ m}^3/\text{s}$).
- la mise en place d'un débit de base de mi-mars à mi-juin de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ à partir de 2004, puis de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ à partir de 2008 et de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2012 (au lieu de $10 \text{ m}^3/\text{s}$).
- la limitation du débit maximum de mi-mars à mi-juin à $190 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2008 et 2009, à $200 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2010 et 2011, et à $180 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2012, sous conditions d'hydraulicité (au lieu de $340 \text{ m}^3/\text{s}$).
- la limitation des gradients de hausse du 1^{er} mars au 15 juin à $33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$ pour les débits inférieurs à $180 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$, à partir de 2004 (au lieu de $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$).

⁹ Pour le détail des mesures, voir les conventions pour la réduction de l'impact des éclusées sur le bassin de la Dordogne, consultables sur le site d'EPIDOR (www.eptb-dordogne.fr) ou de la DREAL Limousin (www.limousin.developpement-durable.gouv.fr).

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

- la limitation des gradients de baisse du 1^{er} février au 15 juin à $33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$ pour les débits supérieurs à $80 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$, à $10 \text{ m}^3/\text{s}/2\text{h}$ pour les débits inférieurs à $80 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$, voire 5 ou $2 \text{ m}^3/\text{s}/48\text{h}$ dans le cas où les apports naturels reconstitués sont inférieurs à $75 \text{ m}^3/\text{s}$. Mesures mises en place par étape en 2004, 2009 et 2012 (au lieu de $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{h}$).

Ces modifications de gestion se visualisent au travers des boîtes de dispersion des paramètres du régime d'éclusées pris en compte dans l'indicateur, parfois avec une année de décalage du fait de mise en œuvre en cours d'année. A l'échelle annuelle (Figure 76), il ressort essentiellement une diminution du nombre d'éclusées à partir du début des années 2000. Il n'apparaît d'évolutions majeures dans les distributions des débits de base, amplitudes ou gradients, si ce n'est une réduction des maxima des gradients de hausse à partir de 2003. Les effets des mesures saisonnières sur la gestion des débits sont masqués. Sur la période de mi-mars à mi-juin (Figure 77), on constate également une réduction du nombre d'éclusées à partir du début des années 2000, avec en particulier très peu d'éclusées en 2008, 2011 et 2012. Les effets des mesures de gestion apparaissent bien, avec les hausses des valeurs minimales de débit de base à partir de 2004, la réduction des amplitudes des éclusées à partir de 2008 (effet combiné des hausses de débit de base et des limitations du débit maximum), et la réduction des valeurs maximales de gradients à partir de 2004.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Classement et score de l'indicateur à l'échelle annuelle sur la Dordogne								
Année	Station							
	Argentat		Brivezac		Carennac		Cénac	
	Classe	Score	Classe	Score	Classe	Score	Classe	Score
1989	4-	383	3+	370				
1990	4+	415	4-	402				
1991	5	427	4-	402				
1992	4-	393	3+	366				
1993	3+	366	3-	339				
1994	4-	366	3+	345				
1995	4-	390	3+	375				
1996	4-	405	4-	400				
1997	4-	397	4-	391				
1998	4-	381	4-	391				
1999	4-	379	4-	388				
2000	3+	361	3+	365				
2001	3+	324	3+	351				
2002	3+	342	3+	360				
2003	3+	344	3-	306	2+	269	1	211
2004	3-	319	3-	320	2+	283	1	213
2005	3-	319	3+	344	3-	305	1	228
2006	3-	319	3-	316	2+	278	1	217
2007	3+	333	3+	337	3-	299	1	231
2008	3-	314	3-	320	2+	288	1	214
2009	3+	327	3-	334	2+	288	1	233
2010	3+	355	3-	326	2+	281	1	229
2011	3+	328	3-	330	2+	281	1	204
2012	2+	262	2-	242	1	210	1	151

Tableau 8 : Niveau de perturbation hydrologique sur la Dordogne d'Argentat à Cénac, de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle.

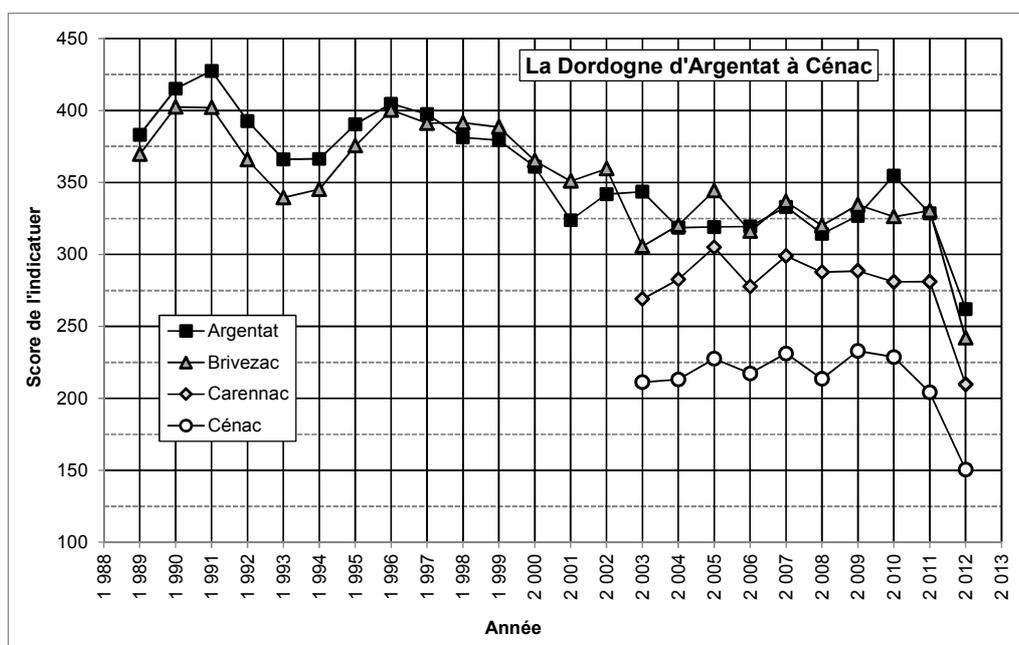


Figure 74 : Evolution du score de l'analyse discriminante sur la Dordogne d'Argentat à Cénac, de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Classement et score de l'indicateur sur la période mi-mars à mi-juin sur la Dordogne								
Année	Station							
	Argentat		Brivezac		Carennac		Cénac	
	Classe	Score	Classe	Score	Classe	Score	Classe	Score
1989	4+	410	4-	404				
1990	4+	410	4-	406				
1991	5	431	4-	414				
1992	4-	402	3+	357				
1993	3+	351	3-	335				
1994	4-	392	3+	358				
1995	3+	345	3-	327				
1996	3+	365	3+	351				
1997	3-	316	3-	328				
1998	4-	407	3+	368				
1999	4-	398	3+	372				
2000	4-	383	4-	380				
2001	3-	320	3-	297				
2002	3-	309	3-	324				
2003	3-	336	2+	280	2-	269	1	209
2004	3+	330	3-	324	3-	299	1	231
2005	3-	291	2+	282	2-	260	1	200
2006	2+	288	3-	312	2-	261	1	203
2007	3-	290	3-	310	2+	276	1	223
2008	1	154	0		0		0	
2009	3-	298	2+	286	2-	259	1	201
2010	3-	284	2-	241	1	214	1	161
2011	1	148	1	104	0		0	
2012	1	129	0		0		0	

Tableau 9 : Niveau de perturbation hydrologique et évolution du score de l'analyse discriminante sur la Dordogne d'Argentat à Cénac, de 1989 à 2012, sur la période de mi-mars à mi-juin.

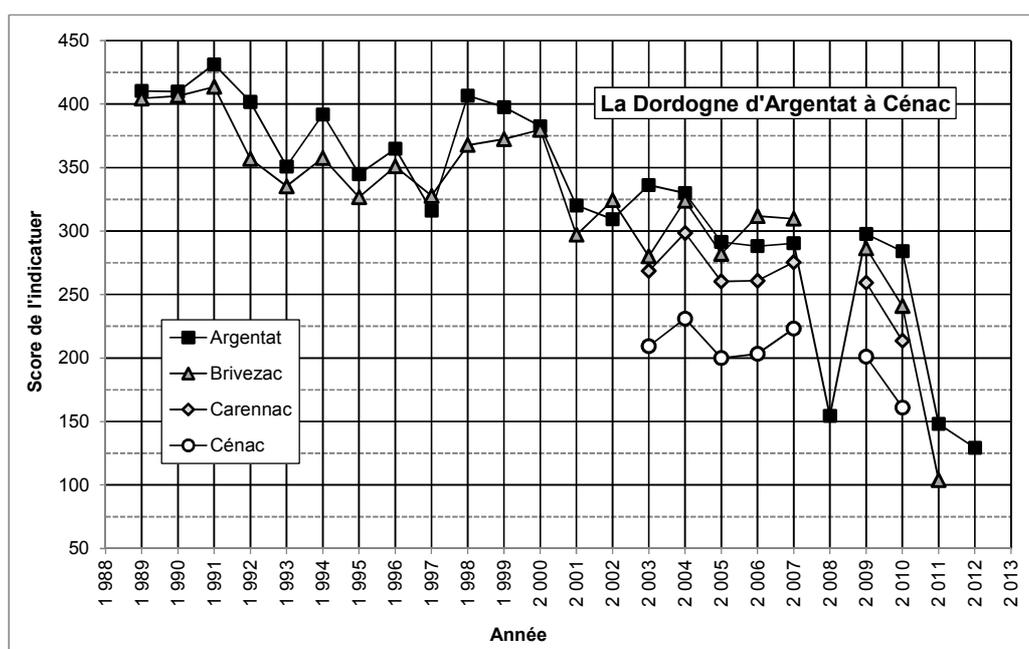


Figure 75 : Evolution du score de l'analyse discriminante sur la Dordogne d'Argentat à Cénac, de 1989 à 2012, sur la période de mi-mars à mi-juin

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

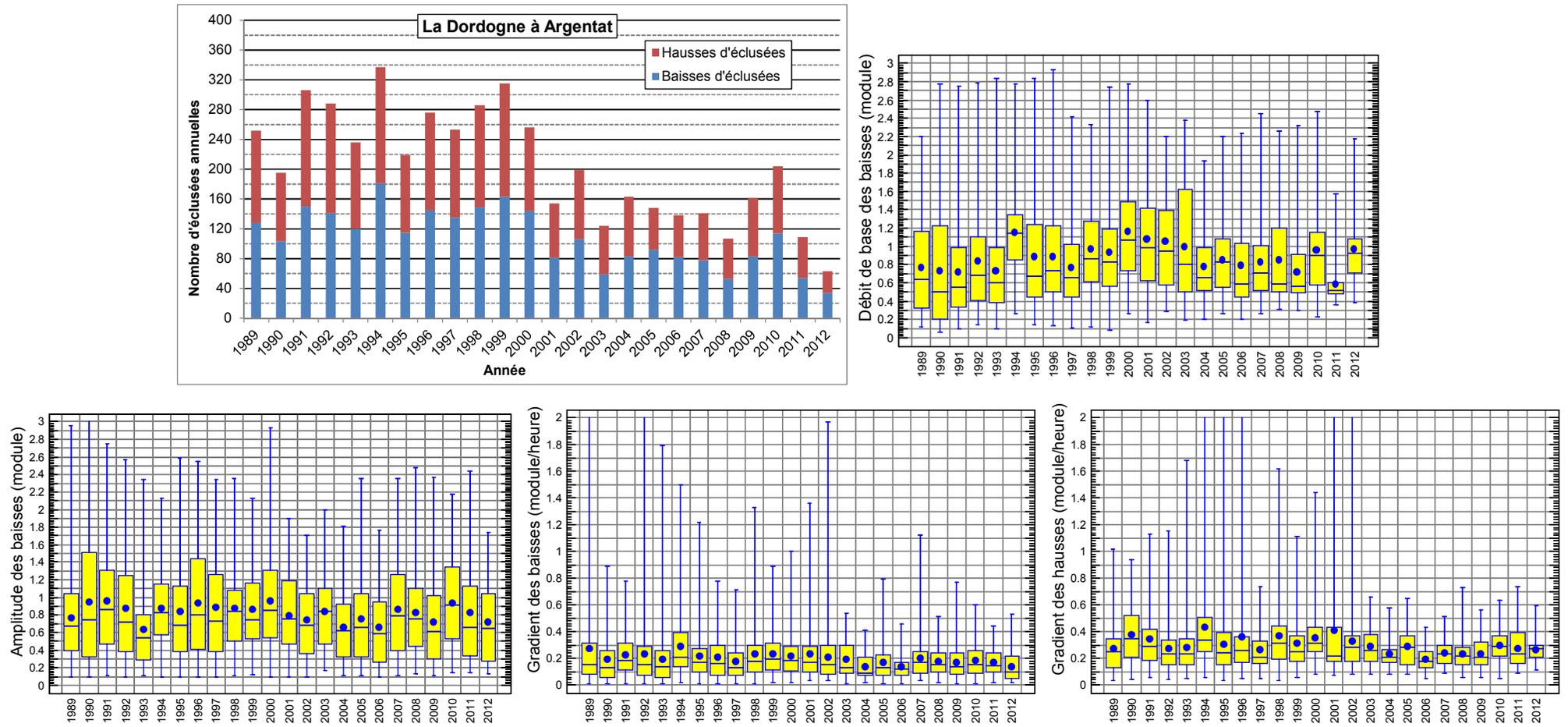


Figure 76 : Evolutions du nombre cumulé de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur la Dordogne à Argentat, de 1989 à 2012.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

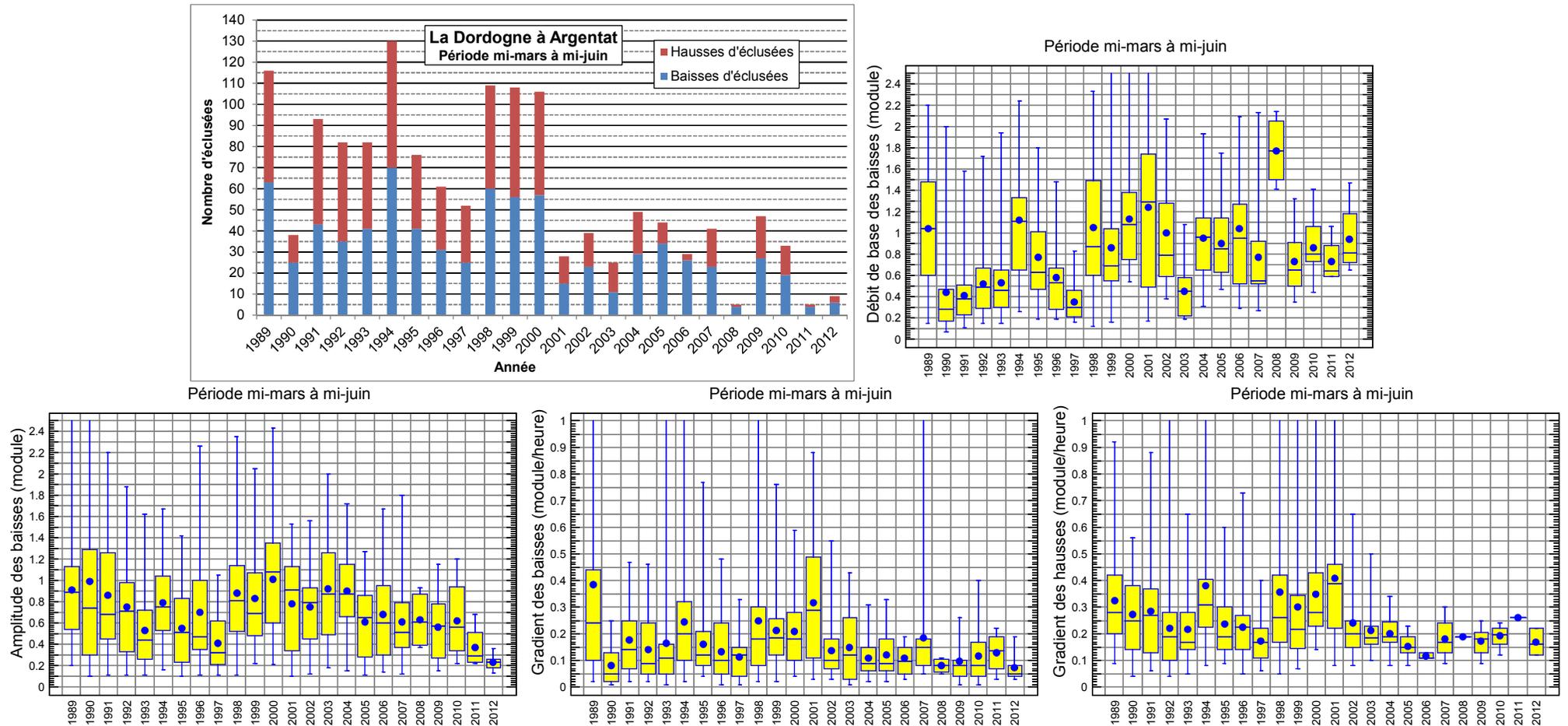


Figure 77 : Evolutions du nombre cumulé de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur la Dordogne à Argentat, de 1989 à 2012, sur la période de mi-mars à mi-juin.

4.8.3. L'Ain à Pont d'Ain et Chaisey-sur-Ain de 1997 à 2012

Le bassin versant amont de l'Ain est largement aménagé pour la production d'hydroélectricité avec notamment 5 grands barrages sur son propre cours, de l'amont vers l'aval : Vouglans, Saut-Mortier, Coizelet, Bolozon et l'Allement, dernier barrage situé un peu en amont de Poncin dans l'Ain (01) et dont le débit d'équipement est de 220 m³/s. Le module de l'Ain est de 105 m³/s au niveau de la station hydrométrique de Pont d'Ain située à environ 13.5 km à l'aval du barrage de l'Allement. Il atteint 123 m³/s à la station de Chaisey-sur-Ain située à environ 34 km à l'aval du barrage.

Sur la période de 1997 à 2012, le niveau de perturbation hydrologique dû aux régimes d'éclusées varie peu au niveau des 2 stations hydrométriques. Selon les années, il est qualifié de sévère ou très marqué (classe 4 ou 3) à Pont d'Ain et de très marqué ou marqué (classe 3 ou 2) à Chaisey-sur-Ain (Figure 78). Les légères variations interannuelles sont similaires sur les 2 stations. L'amortissement des éclusées sur les 20 km séparant les 2 stations se traduit toujours par une diminution du score de l'indicateur et presque toujours par un changement d'une classe.

L'amortissement des éclusées se traduit concrètement par une réduction de leurs gradients de hausse et de baisse (Figure 79). Dans l'indicateur, cette réduction des gradients a également comme effet d'entraîner une baisse du nombre d'éclusées sélectionnées, notamment des hausses. Cela est lié au fait que certaines variations identifiées comme des éclusées à Pont d'Ain ne le sont plus à Chaisey-sur-Ain dans la mesure où elles ont retrouvé des gradients inférieurs aux valeurs de référence naturelle. L'amortissement se traduit également par une augmentation des débits de base du fait des apports intermédiaires, ainsi que par une réduction des amplitudes rapportées au module, non pas que les amplitudes en m³/s diminuent vraiment, mais plutôt du fait de l'augmentation du module.

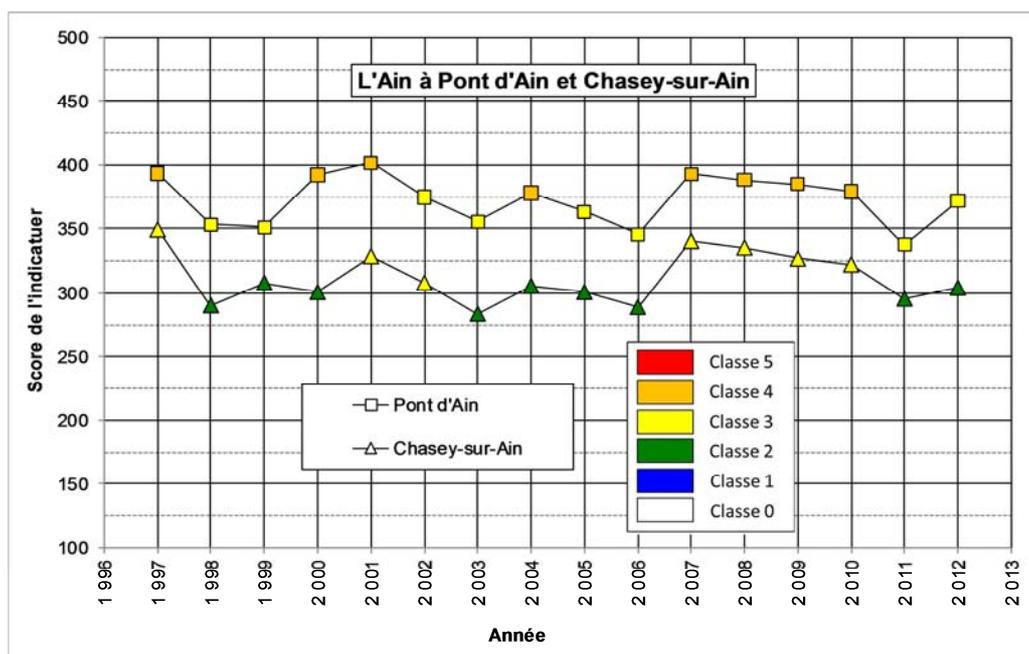


Figure 78 : Niveau de perturbation hydrologique et évolution du score de l'analyse discriminante sur l'Ain à Pont d'Ain et Chaisey-sur-Ain, de 1997 à 2012, à l'échelle annuelle.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

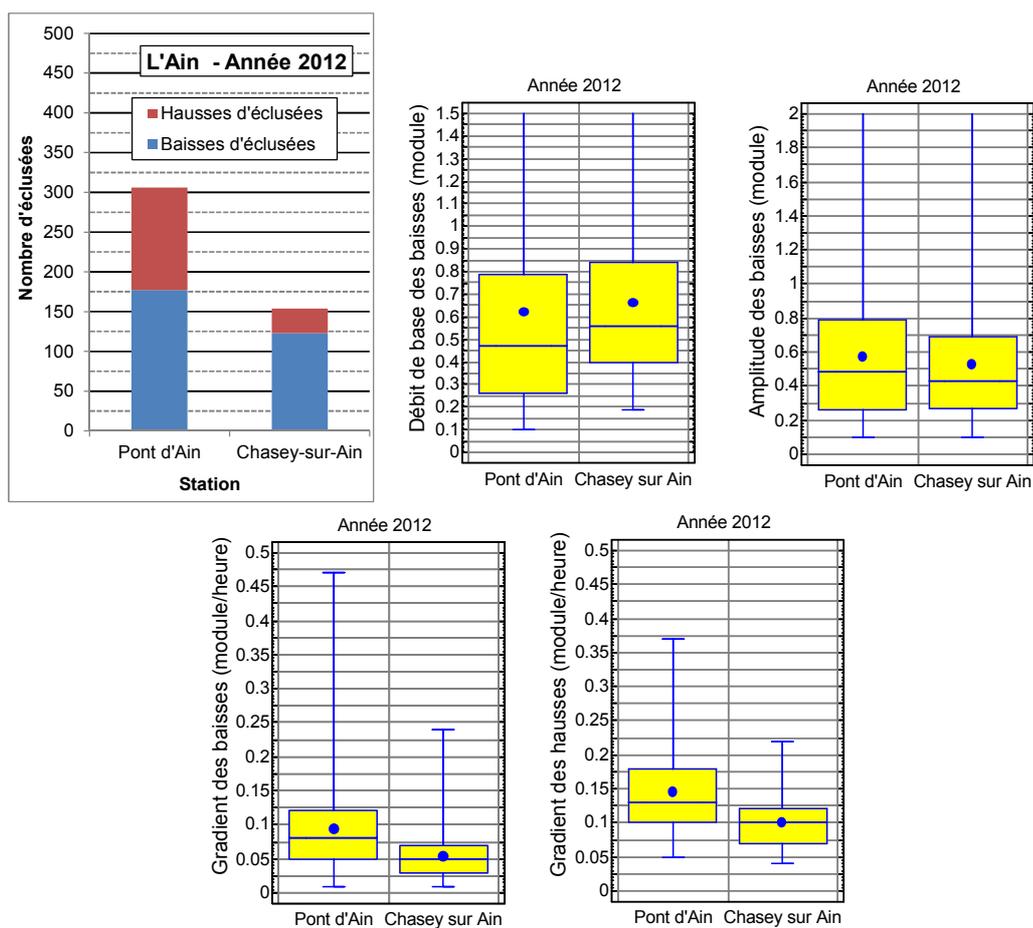


Figure 79 : Comparaison des nombres cumulés de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur l'Ain à Pont d'Ain et Chaisey-sur-Ain, en 2012.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

4.8.4. Le Doubs franco-suisse de Fournet à Glère, de 1990 à 2012

L'hydrologie du Doubs franco-suisse est modulée par l'aménagement du Chatelôt possédant une capacité utile de 16 Mm^3 et un débit d'équipement de $45 \text{ m}^3/\text{s}$. Les éclusées pratiquées sont ensuite plus ou moins remodelées par l'aménagement du Refrain situé environ 10.8 km en aval de l'usine du Chatelôt et possédant une capacité utile et un débit d'équipement bien inférieurs (1.2 Mm^3 et $23 \text{ m}^3/\text{s}$). La centrale de La Goule située à environ 6 km en aval de l'usine du Refrain est un aménagement au fil de l'eau (pas de capacité utile) équipé à hauteur de $18 \text{ m}^3/\text{s}$, mais dont la « reprise » des éclusées venant de l'amont est susceptible d'en modifier les caractéristiques (Figure 80).



Figure 80 : Situation géographique des aménagements hydroélectriques et des stations hydrométriques sur le Doubs franco-suisse.

Le régime d'éclusées généré par le Chatelôt est analysé au niveau de la station hydrométrique de Fournet (la Rasse) située à environ 7.2 km en aval de l'usine (module de $20.1 \text{ m}^3/\text{s}$). Sur cette station, des données ont été téléchargées en 2011 et 2014. Dans cet intervalle de temps, une nouvelle courbe de tarage a été produite et appliquée rétrospectivement jusqu'au moment de la crue de janvier 2004. Cela permet d'illustrer sur la période 2004-2011 l'effet que peut avoir un changement de courbe de tarage. L'évolution du régime d'éclusées à l'aval proche du Refrain et de La Goule est analysée au niveau de la station de Goumois située à environ 6.4 km en aval de l'usine de La Goule (module de $29.3 \text{ m}^3/\text{s}$). La station de Glère située après la boucle du Doubs en Suisse, à environ 42 km en aval de Goumois permet d'apprécier l'évolution lointaine du régime d'éclusées (module de $34 \text{ m}^3/\text{s}$). La Figure 81 présente le niveau de perturbation hydrologique et l'évolution du score de l'analyse discriminante sur le Doubs à Fournet, Goumois et Glère de 1990 à 2012, à l'échelle annuelle.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

A Fournet, à partir des données 2011, le niveau de perturbation hydrologique montre tout d'abord une phase de décroissance avec une qualification très sévère (classe 5) en 1994 et 1995, sévère (classe 4) de 1996 à 1998, très marquée (classe 3) en 1999, puis marquée (classe 2+) en 2000. De 2001 à 2005, la perturbation revient à un niveau sévère ou marqué. A partir de 2007, le niveau de perturbation augmente, repassant à très sévère en 2007 et 2008 et sévère en 2009 et 2010.

A partir des données 2014, l'application de la nouvelle courbe de tarage donnant des valeurs inférieures dans la gamme des débits en deçà du module, et donc des débits de base des éclusées plus faibles, le niveau de perturbation hydrologique apparaît plus fort qu'à partir des données 2011. Il est ainsi très sévère de 2004 à 2012, sauf en 2006 où il est sévère. Les évolutions interannuelles du score de l'indicateur entre les 2 jeux de données sont toutefois très similaires. **Cet exemple permet de rappeler que la fiabilité de l'indicateur dépend de celle des données hydrologiques et qu'il convient, lors d'une analyse temporelle notamment, de vérifier si les éventuelles évolutions constatées ne sont pas liées à la gestion de la station hydrométrique.**

La Figure 82 présente les évolutions des paramètres du régime d'éclusées pris en compte dans l'indicateur, à Fournet sur la période 2004-2012 (données 2014). Plusieurs évolutions se produisent sur cette période avec des effets antagonistes sur le niveau de perturbation. En 2006, il y a d'une part une augmentation des débits de base liée à l'augmentation du débit réservé délivré au pied du barrage du Chatelôt qui est passé de 0.25 à 2 m³/s, ainsi qu'une réduction du nombre d'éclusées. Mais d'autre part, en 2006 et surtout à partir de 2007, on observe une très forte augmentation de l'amplitude des éclusées, ainsi que de leurs gradients de hausse et de baisse. En 2004 et 2005, seul un quart des éclusées présentent une amplitude de plus de 0.7 fois le module ; alors que c'est plus de la moitié, voire plus des trois quarts à partir de 2006. De 2007 à 2012 (sauf en 2011), plus d'un quart des éclusées présente même une amplitude supérieure à 1.9 fois le module. Les gradients de hausse sont en moyenne multipliés par environ 3 entre 2004-2005 et après 2007. Les gradients de baisse sont en moyenne multipliés par environ 2 entre 2004-2005 et 2007-2010. En 2011-2012, ils rediminuent, sans toutefois revenir aux valeurs de 2004-2005. Ces changements de pratique sont à mettre en relation avec un changement de gestionnaire début 2006, concomitant avec un turbinage à débit maximum beaucoup plus fréquent qu'auparavant.

A Goumois, la perturbation hydrologique est globalement stable de 1990 à 2003 et qualifiée de marquée, sauf en 1998 et 1999 où elle n'est que sensible (Figure 81). A partir de 2004, le niveau de perturbation s'aggrave, devenant très marqué à partir de 2005. Les plus hauts scores sont obtenus à partir de 2007. A Glère, la perturbation hydrologique est quelques peu atténuée par rapport à Goumois, mais évolue de manière très similaire. Elle est globalement sensible (classe 1) de 1990 à 2003, sauf en 1994 et 1995 où elle est marquée. Elle devient marquée en 2005, puis très marquée de 2007 à 2010, avant de redevenir marquée en 2011 et 2012.

Au niveau de ces deux stations éloignées, on retrouve l'aggravation du régime d'éclusées généré par le Chatelôt à partir de 2007, avec des éclusées de plus grandes amplitudes, plus rapides, dont les effets se font d'autant plus ressentir à l'aval.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

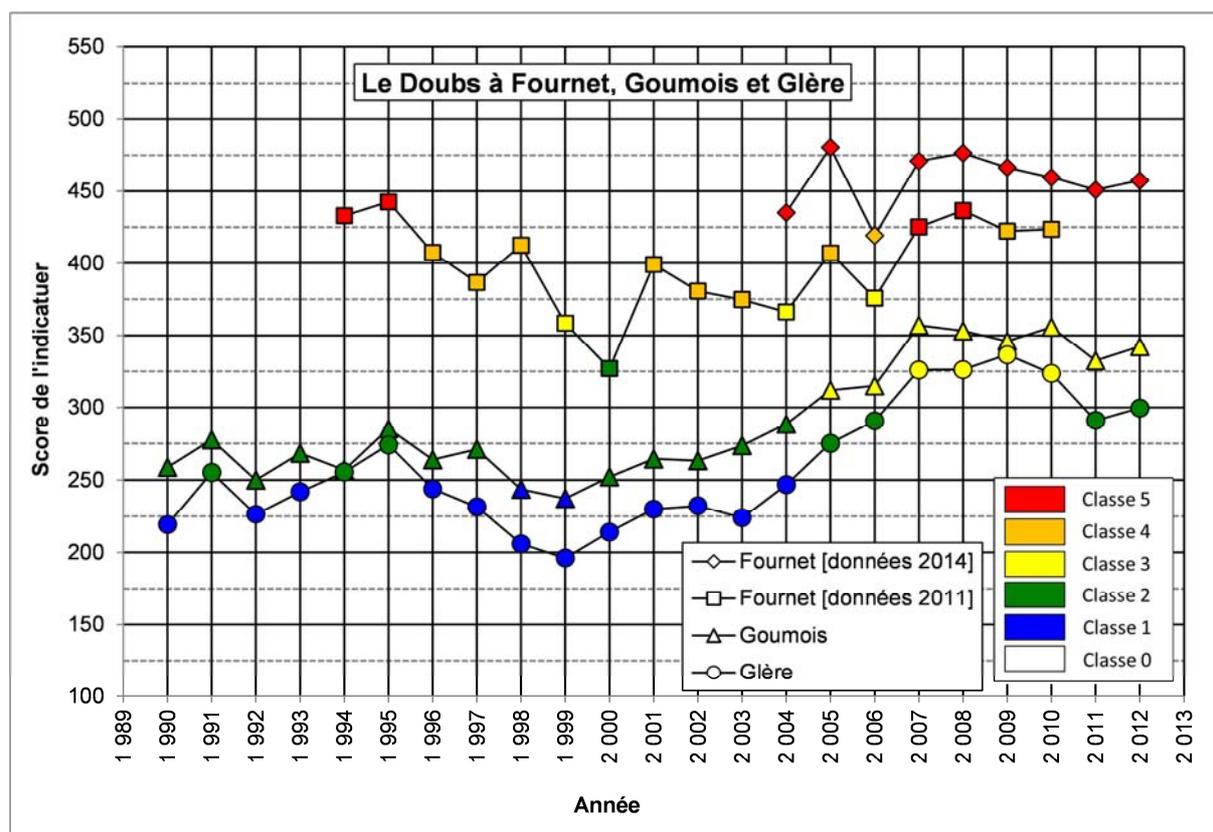


Figure 81 : Niveau de perturbation hydrologique et évolution du score de l'analyse discriminante sur le Doubs à Fournet, Goumois et Glère, de 1989 à 2012, à l'échelle annuelle.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

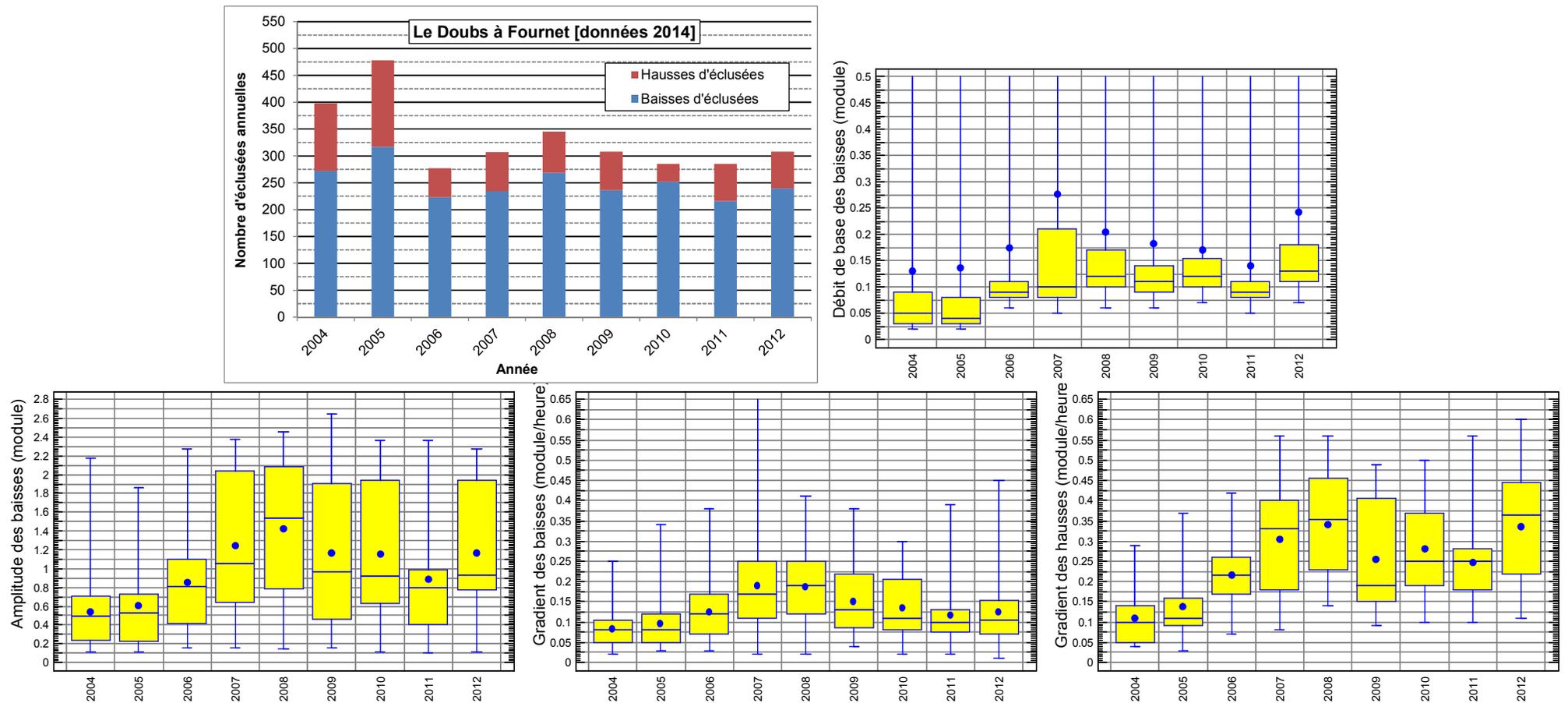


Figure 82 : Evolutions du nombre cumulé de hausses et baisses d'éclusées, des débits de base, amplitudes et gradients des baisses d'éclusées et des gradients des hausses d'éclusées, sur le Doubs à Fournet (La Rasse), de 2004 à 2012.

4.9. Conclusions, discussions et perspectives sur l'indicateur « éclusées »

Construction de l'indicateur « éclusées »

Pour donner une vision synthétique du niveau de perturbation hydrologique induit par les régimes d'éclusées, un indicateur a été construit sous la forme de 5 classes distinguant des niveaux de perturbation sensible (classe 1), marquée (2), très marquée (3), sévère (4) et très sévère (5). Une distinction initiale est réalisée entre les stations à l'hydrologie naturelle ou peu perturbée (classe 0) et celles à l'hydrologie influencée (classe 1 à 5). A partir des résultats du test de la méthodologie de repérage des éclusées sur 1575 chroniques annuelles de débit en hydrologie naturelle, il est considéré que l'hydrologie d'une station est influencée dès que le nombre cumulé de hausses et de baisses sélectionnées durant une année est supérieur à 20.

Pour la construction de l'indicateur, 80 stations à l'hydrologie influencée au moins une année par les éclusées hydroélectriques ont été identifiées à partir du croisement des connaissances sur les schémas des aménagements hydroélectriques sources d'éclusées et de la liste de toutes les stations hydrométriques de la banque HYDRO en avril 2009 pour lesquelles des données de débit à pas de temps suffisamment fin étaient disponibles. Les stations identifiées se situent principalement dans les bassins Adour-Garonne (39), Loire-Bretagne (18) et Rhône-Méditerranée-Corse (RMC, 21) qui englobent les massifs montagneux. 491 années de données de débit à pas de temps variable (QTVAR 5%) ont été extraites à partir de ces stations. La méthodologie de sélection des éclusées a été appliquée à l'ensemble de ces données.

De manière à pouvoir ensuite calibrer une procédure automatique, le niveau de perturbation hydrologique de chaque chronique annuelle de débit a été évalué par expertise par trois opérateurs en suivant la logique des connaissances sur les impacts biologiques des éclusées. Une analyse discriminante linéaire a été utilisée pour reproduire ce classement à partir d'un petit nombre de paramètres chiffrés décrivant les régimes d'éclusées. Cette méthode produit, pour chaque classe, une fonction sous la forme d'une combinaison linéaire des paramètres. Pour chaque régime d'éclusées à l'échelle annuelle, les scores donnés par les 5 fonctions sont calculés et le régime est affecté dans la classe dont la fonction donne le score maximum. Les fonctions de classement prennent en compte 5 paramètres :

- le nombre total de baisse et de hausses d'éclusées par année,
- la valeur du débit de base non dépassée par 10% des baisses,
- la valeur d'amplitude non dépassée par 90% des baisses,
- la valeur de gradient non dépassée par 90% des baisses,
- et la valeur de gradient non dépassée par 90% des hausses.

L'analyse discriminante permet de reclasser correctement 427 des 491 chroniques annuelles de débit, soit près de 87%, ce qui constitue un résultat satisfaisant. Les données mal classées se retrouvent toutes dans la première classe inférieure ou supérieure à celle évaluée par expertise ; il n'y a pas d'écart de 2 classes. Sur les 64 cas mal classés, il y en a 63 où le second score le plus élevé correspond à la classe évaluée par expertise. Au final, ces résultats montrent d'une part que les paramètres pris en compte sont de bons descripteurs des régimes d'éclusées, et d'autre part que l'analyse discriminante est une méthode adaptée pour agréger les informations de ces différents paramètres et produire un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique sous forme de classe.

Le diagnostic peut être affiné avec la subdivision des classes 2, 3 et 4 en deux sous-classes selon que le second score le plus élevé est obtenu pour la classe supérieure ou inférieure. Sur une station donnée, l'évolution du score maximum donné par l'analyse peut également être intéressante à suivre pour apprécier l'effet de modifications de gestion des centrales qui ne se traduisent pas forcément par un changement de classe. Les évolutions de ce score à la hausse ou à la baisse peuvent être interprétées comme une aggravation ou une atténuation de la perturbation.

Les exemples de mises en œuvre montrent que l'indicateur s'avère effectivement sensible aux changements de gestion des centrales et permet d'apprécier les évolutions temporelles et spatiales des régimes d'éclusées, en particulier leur amortissement vers l'aval.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Des tests de sensibilité des résultats de l'indicateur aux valeurs des différents paramètres pris en compte seraient encore intéressants à mener. Cela permettrait de mieux apprécier le poids de chaque paramètre. Il faudra toutefois garder à l'esprit que certains paramètres sont liés. En particulier, une réduction des gradients des éclusées aura un effet direct sur l'indicateur et potentiellement un effet indirect en réduisant le nombre d'éclusées détectées.

Calcul automatisé de l'indicateur

L'ensemble de la procédure – repérage des éclusées au sein de l'hydrogramme, production des tableaux avec les caractéristiques de chaque hausse et baisse d'éclusées, production des tableaux avec les caractéristiques des régimes d'éclusées par année et par mois de chaque année, représentation graphique de l'hydrogramme, production des diagrammes en bulles des hausses et des baisses d'éclusées et calcul de l'indicateur – est entièrement automatisé dans un fichier Excel 2010 au travers d'une Macro codée en Visual Basic. Sur un PC de configuration ordinaire, le temps de traitement d'une chronique annuelle de débit varie entre quelques secondes et 3-4 minutes selon le nombre d'éclusées. Le logiciel Excel étant couramment utilisé, l'indicateur "éclusées" est ainsi un outil facilement transférable aux gestionnaires.

Limites et intérêts de l'indicateur « éclusées »

L'indicateur proposé ne s'appuie que sur l'analyse des chroniques de débit, et ne fournit donc qu'une appréciation du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées. Dans la mesure où le classement suit la logique des connaissances sur les conséquences biologiques des éclusées, il peut être interprété comme un risque d'impacts biologiques, mais ne peut pas être considéré comme une indication du niveau d'impact réel de la gestion par éclusées des aménagements pour plusieurs raisons. D'une part, l'indicateur ne prend en compte que la perturbation liée aux caractéristiques des éclusées ; il ne rend pas compte des autres perturbations hydrologiques que peuvent induire les aménagements (modification de la fréquence des débits avec notamment l'aggravation ou le soutien des étiages et l'écrêtage des crues, et les déplacements de volumes d'eau du fait des cycles de stockage-déstockage). D'autre part, le lien entre les niveaux de perturbation hydrologique et d'impact biologique est complexe et dépend également de la morphologie du cours d'eau, des espèces concernées et du recoupement entre les différentes phases de leur cycle de développement et le régime d'éclusées. Une même perturbation hydrologique peut ainsi se traduire par des niveaux d'impacts biologiques différents. Enfin, les aménagements peuvent avoir des conséquences biologiques au travers (i) de modifications du régime thermique et de la physico-chimie, (ii) de modifications morphologiques consécutives au blocage du transport solide dans les retenues et à l'écrêtage des crues, (iii) des opérations de vidanges ou (iiii) du fait des ruptures de la continuité écologique.

Malgré ces limites, l'indicateur proposé représente une avancée significative dans l'appréciation du niveau de perturbation liée aux éclusées par rapport au fait de n'examiner que les données administratives de l'aménagement (débit réservé et débit d'équipement). Cet indicateur constitue une méthode complémentaire à celles existantes de type HVA-RVA, DHRAM, HIP, IAHRIS ou HYDMOD-R (voir références en introduction) qui ne permettent pas d'appréhender correctement les éclusées, et pourrait s'intégrer dans les procédures de type ELOHA¹⁰ (Poff et al. 2010). La méthodologie de repérage des éclusées et la construction de l'indicateur font appel à certains choix, notamment pour la fixation de valeurs-seuils, la méthode de reclassement ou les paramètres pris en compte. Ces choix ont été justifiés, même s'ils sont potentiellement discutables. De tels choix sont cependant incontournables dans ce genre d'exercice, et ceux effectués pour la construction de l'indicateur "éclusées" sont analogues à ceux faits lors de la construction des indicateurs hydrologiques existants ou des indicateurs sur d'autres paramètres physiques ou biologiques.

Améliorations de l'indicateur « éclusées »

Des améliorations pourront être apportées à l'indicateur dans l'avenir. On pourrait notamment envisager une régionalisation ou contextualisation des critères de sélection des éclusées. Pour ce faire, une première voie pourrait consister à régionaliser le critère de sélection des éclusées portant

¹⁰ ELOHA : Ecological limits of hydrological alteration.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

sur le gradient qui est à ce jour fixé par rapport à une référence globale sur les gradients naturels maximaux. Toutefois, la production de références « régionales » sur les gradients naturels, sur la base par exemple des hydroécotémoins (Wasson et al. 2002), nécessiterait tout d'abord probablement de disposer de davantage de données à l'hydrologie naturelle et/ou d'avoir recours à des modélisations hydrologiques capables de reproduire les variations de débit naturelles, depuis les débits d'étiage jusqu'aux débits de crues, et cela à un pas de temps suffisamment fin pour accéder de manière précise à leur gradients. Ensuite, il s'agirait de construire des modèles capables de prédire les informations souhaitées sur les gradients naturels au niveau des stations influencées, soit à partir des stations environnantes à l'hydrologie naturelle (mesurées ou modélisées), soit à partir des caractéristiques du bassin versant.

Concernant les modèles de prédiction, outre les nombreux travaux sur les débits de crue, il y a également des travaux sur la prédiction du type de régime hydrologique, du débit moyen, ou de certains paramètres du régime (Sauquet 2006 ; Sanborn et Bledsoe 2006 ; Snelder et al. 2009). Sanborn et Bledsoe (2006) fournissent notamment des modèles de prédiction pour 33 paramètres caractérisant les régimes hydrologiques de 3 états des USA, dont 2 paramètres sur les gradients mais qui restent relativement grossiers (moyenne de toutes les augmentations entre débits journaliers et moyenne de toutes les diminutions entre débits journaliers). De même, Carlisle et al. (2010) ont construit des modèles de prédictions pour 13 paramètres hydrologiques caractérisant les régimes hydrologiques des USA, mais aucun de ces paramètres ne porte sur les gradients. En Suisse, pour pouvoir appliquer le module HYDMOD-R¹¹ cherchant à apprécier le degré de naturalité du régime d'écoulement, il a également été développé des modèles prédictifs des valeurs de référence naturelle des paramètres hydrologiques, avec la mise à disposition de fichiers support SIG, mais aucun de ces paramètres ne porte sur les gradients (Pfaundler et al. 2011). A ce jour, on ne dispose pas de modèles permettant de prédire des informations relativement détaillées sur les gradients des variations naturelles de débit des cours d'eau.

Une seconde voie pourrait consister à adapter les critères de sélection des éclusées et/ou la manière d'en apprécier le niveau de perturbation en intégrant les connaissances acquises au travers des études de sites sur le lien entre caractéristiques des régimes d'éclusées et impacts biologiques. On pourrait notamment envisager d'adapter l'indicateur au contexte écologique du cours d'eau, en particulier au type de population piscicole. Un point pourrait consister à ce que l'indicateur cible mieux les périodes clés des cycles de développement des espèces concernées. Un autre point pourrait consister à ne plus fixer les critères de sélection ou d'appréciation du niveau de perturbation par rapport à une référence hydrologique, mais en fonction des valeurs critiques mises en évidence dans les études de cas. Mais les limites d'une telle approche sont d'une part les connaissances encore très fragmentaires à ce jour sur les liens entre les caractéristiques des régimes d'éclusées et leurs impacts biologiques, en particulier sur les espèces piscicoles autres que les salmonidés. D'autre part, ces liens dépendent de l'hydromorphologie du cours d'eau sur laquelle l'intégration d'informations pertinentes, bien que prônée notamment par Stewardson et Gippel (2003) ou Poff et al. (2010), complexifierait fortement la conception et la mise en œuvre de l'indicateur.

Des améliorations pourraient également être apportées dans la construction de l'indicateur. Tel que construit à ce jour, l'indicateur se base sur des valeurs statistiques des débits de base, des amplitudes et des gradients qui sont indépendantes les unes des autres. Or, il est clair que les impacts biologiques d'un régime d'éclusées seront différents si les éclusées présentant les plus faibles débits de base sont également celles présentant les plus grandes amplitudes et gradients, ou non. Pour prendre en compte cette interdépendance, une voie pourrait être par exemple de comptabiliser les éclusées dans des catégories croisées des différents paramètres jugés pertinents, et de calculer ensuite un score fonction de ces nombres et de degrés de sévérité affectés à chaque catégorie. Toute la difficulté résiderait alors dans la définition des catégories et de leurs degrés de sévérité.

En tous cas, pour progresser, il est impératif de poursuivre les analyses croisant les données sur l'état des peuplements de poissons et d'invertébrés avec les caractéristiques des régimes d'éclusées et les résultats de l'indicateur. Dans la mesure où les perturbations de l'hydrologie ne se résument pas aux régimes d'éclusées (modifications de la quantité, de la fréquence et du timing des débits) et où les populations peuvent également être impactées par des phénomènes hydrologiques naturels (crues ou étiages sévères notamment), il est probable qu'il faille rechercher un effet limitant du régime d'éclusées sur l'état des populations, plutôt qu'une corrélation directe.

¹¹ http://www.systeme-modulaire-gradue.ch/fg/module/hydro/detail/index_FR

Spatialisation de l'indicateur « éclusée » et intégration dans un indicateur global

L'indicateur livre un diagnostic établi au niveau des stations hydrométriques. Le niveau de perturbation aura tendance à être plus sévère vers l'amont en se rapprochant du point de restitution des éclusées, et inversement à être moins sévère vers l'aval du fait de l'amortissement des éclusées. Les apports d'un affluent peuvent en particulier atténuer sensiblement la perturbation à l'aval de la confluence au travers d'une augmentation des débits de base. En revanche, la retranscription plus ou moins complète des éclusées par des centrales au fil de l'eau peut en réinitialiser les gradients en fonction de leur capacité de régulation, et compromettre leur atténuation progressive vers l'aval.

Vis-à-vis de l'évaluation de l'état des masses d'eau dans le cadre de la DCE, plusieurs questions se posent :

- comment intégrer l'indicateur "éclusées" proposé ici, dans un indicateur global du niveau de perturbation de l'hydrologie prenant également en compte les modifications de la quantité, de la fréquence et du timing des débits ?
- comment étendre les diagnostics établis au niveau des stations hydrométriques à l'échelle des masses d'eau ?
- comment traiter le cas des tronçons de cours d'eau soumis à éclusées pour lesquels on ne dispose pas de données hydrologiques ?

Pour le bassin Adour-Garonne, Moor et al. (2013) propose une démarche pour la production d'un indicateur global, en définissant un indicateur du risque de modification de la répartition saisonnière des débits basé sur les capacités de stockage des aménagements présents en amont, un indicateur du risque de réduction des débits dans les tronçons court-circuités basé le débit maximum de prélèvement et en intégrant l'indicateur "éclusées" proposés ici. Une méthode d'agrégation des 3 indicateurs est proposée. Concernant l'indicateur "éclusées", les questions d'extension des diagnostics à l'échelle des masses d'eau et les cas de tronçons de cours d'eau soumis à éclusées pour lesquels on ne dispose pas de données hydrologiques sont à ce jour traités à « dire d'expert ».

En complément de cette approche basée sur les données administratives qui donne un niveau de risque, il serait utile de développer un indicateur des modifications effectives de la quantité, de la fréquence et du timing des débits, calculé à partir des données des stations hydrométriques. Pour ce faire, on pourrait tout à fait s'inspirer des méthodes existantes de type IHA-RVA, DHRAM, HIP, IAHRIS ou HYDMOR-R (voir références en introduction). La principale difficulté réside probablement dans la construction de données d'hydrologie naturelle de référence, à l'échelle nationale, servant ensuite de base de comparaison.

Vis-à-vis de l'extension des diagnostics de l'indicateur "éclusées", il serait intéressant de caractériser l'amortissement des régimes d'éclusées vers l'aval entre des stations hydrométriques successives, ainsi que la réponse de l'indicateur. Cela pourrait peut-être permettre de produire des "règles d'extension" s'appuyant par exemple sur l'augmentation du module et sur la distance entre les stations. La difficulté est qu'il y a peu de cours d'eau soumis à éclusées sur lesquels il y a des stations successives, suffisamment proches, sans autres sources de perturbation intermédiaires compliquant l'analyse (confluence d'un affluent lui-même soumis à éclusées ou présence de microcentrales susceptibles de modifier les caractéristiques des éclusées). Dans tous les cas, l'exercice d'extension des diagnostics va se heurter à la problématique de la présence de microcentrales sur les tronçons qui peuvent, selon la qualité de leur régulation, être "quasi-transparentes" ou sensiblement modifier les caractéristiques des éclusées et en particulier en "réinitialiser" leurs gradients.

Pour les tronçons soumis à éclusées sur lesquels on ne dispose pas à ce jour de données hydrologiques, la solution idéale consisterait évidemment à y implanter une station hydrométrique. A défaut, on peut envisager différentes solutions. Premièrement, on pourrait utiliser les chroniques de débits turbinés qui sont généralement enregistrés à des pas de temps assez fins, pour autant que ces données soient mises à disposition par l'exploitant. Dans le cas de barrage-usine, c'est alors simple dans la mesure où les débits dans le cours d'eau sont entièrement contrôlés par l'usine sur la gamme de turbinage. Dans le cas de centrales "de lac" où les éclusées se surimposent à un régime hydrologique plus ou moins reconstitué, c'est plus compliqué car il est alors nécessaire d'évaluer les débits du cours d'eau à l'amont de la restitution des éclusées. S'il n'existe pas directement de données sur ces débits, ce qui est généralement le cas, on peut envisager de les recalculer en se basant sur d'autres stations à l'hydrologie naturelle à proximité, en les vérifiant également par des mesures.

4) Définition d'un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées

Une deuxième solution consisterait à évaluer le niveau de perturbation en fonction des caractéristiques et du type de gestion de l'aménagement hydroélectrique, par analogie avec les résultats de l'indicateur obtenus dans des configurations comparables. Cela nécessiterait un travail préalable sur les stations analysées, de mise en relation des résultats de l'indicateur avec les caractéristiques des aménagements en amont (capacité utile, débit minimum, débit maximum, ...), ainsi qu'avec des informations sur les régimes hydrologiques (type, hydraulicité, ...).

Troisièmement, on pourrait envisager d'adapter l'indicateur pour qu'il puisse être appliqué sur des chroniques de niveau d'eau, plus faciles à acquérir que des chroniques de débit (pas de courbe de tarage à construire). Cela permettrait notamment de mettre en œuvre l'indicateur au niveau des stations "Vigicrues" qui ne sont pas tarées. Cela pose toutefois 2 problèmes. Premièrement, une même éclusée ne va pas se traduire par une même variation de niveau d'eau selon le faciès d'écoulement du cours d'eau (radier, rapide, plat courant, profond, ...). Le diagnostic pourrait ainsi différer pour deux chroniques de niveau d'eau mesurées très proches l'une de l'autre. La solution consisterait peut-être alors à définir un type de faciès où effectuer la mesure. Deuxièmement, les niveaux d'eau sont mesurés par rapport à une référence fixée arbitrairement pour chaque station, alors que les débits sont dans la démarche de l'indicateur rapportés au module des stations. Il serait ainsi difficile d'analyser de manière homogène différentes chroniques de niveau d'eau. Une solution pourrait consister à "calibrer" les chroniques de niveaux d'eau en mesurant les débits correspondants à quelques niveaux, mais on se rapproche alors de la construction d'une courbe de tarage.

5. REFLEXIONS SUR LES MESURES DE MITIGATION DES IMPACTS DES ECLUSEES HYDROELECTRIQUES

Comme évoqué en introduction générale, la gestion par éclusées peut induire des altérations plus ou moins conséquentes de la composition, de l'abondance et de la structure en âge des populations de poissons et d'invertébrés, sur des linéaires de cours d'eau pouvant atteindre plusieurs dizaines de km (Cushman 1985 ; Sabaton et al. 1995 ; Valentin 1997 ; Steele et Smokorowski 2000 ; Baumann et Klaus 2003). Si les études sur les impacts biologiques des éclusées sont nombreuses, peu de travaux débouchent en revanche sur des propositions de méthodes et de critères permettant de définir des mesures d'atténuation de ces impacts. Et les études où des mesures de mitigation sont testées et où un retour d'expérience est acquis sur leur efficacité s'avèrent encore plus rares. Aujourd'hui, on manque donc de méthodes et de retours d'expérience pour, sur un cours d'eau donné, définir de manière pertinente des règles des mesures permettant de réduire efficacement les effets des éclusées.

Dans cette partie, l'objectif est de mener une réflexion sur les études, méthodes, critères de définition et retours d'expérience sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées en s'appuyant d'une part sur les éléments disponibles dans la bibliographie, et d'autre part sur les résultats de plusieurs études de cas récentes sur la Dordogne, la Maronne, la Cère, la Creuse, le Doubs ou encore le Lez, auxquelles le Pôle Ecohydraulique de l'Onema et l'auteur ont participé auprès de multiples partenaires (Tableau 10).

Il est clair que les éléments synthétisés dans cette partie vont bien au-delà de ceux produits par le Pôle Ecohydraulique de l'Onema et l'auteur, qui ont principalement participé aux analyses hydrologiques et aux modélisations hydrauliques, en les réalisant, co-réalisant ou en les encadrant selon les cas.

Dans la mesure du possible, les études de cas ont cherché à coupler à la fois des analyses de l'hydrologie et des régimes d'éclusées, des études des paramètres hydromorphologiques et des conditions d'habitat au travers de modélisations hydrauliques, ainsi que des suivis des impacts biologiques des éclusées et de l'état des populations de poissons.

La bibliographie synthétisée et les études de cas portent exclusivement sur les populations de poissons. Les invertébrés n'ont pas été considérés dans le cadre des réflexions menées ici, ce qui ne veut pas dire que cela ne serait pas nécessaire et pertinent. Parmi les poissons, les travaux concernent majoritairement la truite fario et le saumon atlantique, mais également les cyprinidés d'eau vives, l'ombre commun, le brochet ou la perche.

Dans cette partie, les différents types d'étude possible autour de la problématique des éclusées et leurs intérêts sont tout d'abord passés en revue. Les différents types de mesure de mitigation des impacts des éclusées hydroélectriques sont ensuite listés et discutés. Certaines problématiques posées par la gestion par éclusées vis-à-vis des différentes phases biologiques des poissons sont successivement étudiées.

5) Réflexions sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées hydroélectriques

Cours d'eau (département)	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité Utile et Totale des retenues)	Module	Peuplements piscicoles (Biotypologie de Verreaux)	Organismes participant aux études et suivis	Principales références (non exhaustif)
Dordogne à l'aval du Sablier (Argentat) (19, 46, 24)	Influence de la chaîne d'aménagement sur la Dordogne, avec Bord-les-Orgues, Vaussaire, les Chaumettes, Triouzoune, Marèges, l'Aigle, Marcillac, Chastang (U tot ≈ 815 Mm ³) et dernier aménagement Argentat (U 5.58 Mm ³ , 340 m ³ /s).	de 106 m ³ /s à Argentat à 189 m ³ /s à Cénac	Salmonidés (TRF, SAT, OMB), Cyprinidés (ABL, BAF, CHE, GAR, GOU, VAI, VAN, ...), Chabot, Loche franche, Perche, Brochet, Lamproie marine, Lamproie de planer (B4-5 à B8)		SIEE 1999 ; Lascaux et al. 2004 ; Courret et al. 2006a et b ; Lascaux et al. 2006 ; Lascaux et Cazeuneuve 2008a et b ; Lascaux et al. 2008 ; Chanseau et al. 2008 ; Cazeuneuve et al. 2009a ; EPIDOR 2009 ; Vandewalle et al. 2009 ; Cazeuneuve et Lascaux 2012 ; Cazeuneuve et al. 2013 ; Clave et al. 2013 ; Clave et Fougerolas 2013
Maronne à l'aval de Hautefage (19)	Influence de la chaîne d'aménagements sur la Maronne, avec Enchanet (U 75.95 Mm ³), Gour Noir (U 4.58 Mm ³) et Hautefage (U 12.06 Mm ³ , 46 m ³ /s)	20.1 m ³ /s à Basteyroux	Salmonidés (TRF, SAT, OMB), Vairon, Chabot, Loche franche, Lamproie de Planer	EPIDOR , MIGADO , ECOGEA , EDF , AEAG, AAPPMA d'Argentat, FDPMPA 19, ONEMA	
Cère à l'aval du complexe d'Eguzon (46)	Influence de la chaîne d'aménagement sur la Cère, avec Saint-Etienne de Cantalès (U 100.6 Mm ³), Nepes (U 1.08 Mm ³), Candes (U 1.49 Mm ³) dont les éclusées sont restituées aux usines Laval de Cère I et II (36 et 43.9 m ³ /s) et le dernier aménagement Brugale (U 0.64 Mm ³ , 52.5 m ³ /s)	25.9 m ³ /s à Biars sur Cère	Salmonidés (TRF, SAT, OMB), Cyprinidés (ABL, BAF, CHE, GAR, GOU, VAI, VAN, ...), Chabot, Loche franche, Perche, Brochet, Lamproie marine, Lamproie de planer		
Creuse à l'aval du complexe d'Eguzon (36)	Influence des aménagements en chaîne d'Eguzon (U 22.1 Mm ³ , 168 m ³ /s), Roche-au-Moine (U 2.07 Mm ³ , 75 m ³ /s) et Roche-Bat-l'Aigle (U 0.36 Mm ³ , 75 m ³ /s).	35.9 m ³ /s à Ciron	Cyprinidés (ABL, BAF, BOU, BRE, CHE, GAR, GOU, HOT, SPI VAI, VAN, ...), Chabot, Perche, Brochet, Sandre, Silure, Anguille. Rares salmonidés (TRF, SAT) (B6 à B8)	FDPMPA 36, ECOGEA, FNPF, EDF, ONEMA	Vandewalle et Lascaux 2008 ; Cazeneuve et al. 2009b ; Courret et Lascaux 2009 ; Lascaux et al. 2013
Gave d'Ossau de Laruns à Oloron Sainte-Marie (64)	Chaîne d'aménagements du Gave d'Ossau avec les retenues d'Artouse, Bious et Fabrèges (U 24, 5.4 et 6.7 Mm ³) restituant les éclusées à l'usine de Geteu (26 m ³ /s). + Chaîne d'aménagements du Valentin avec les retenues d'Iscoo et d'Assouste restituant les eaux à l'usine d'Espalungue (3.1 m ³ /s). Démodulation partielle des éclusées par l'aménagement de Castet (25 m ³ /s, U 0.16 Mm ³). Eclusées retranscrites par des microcentrales.	≈ 15.9 m ³ /s à Laruns, 19.7 m ³ /s à Oloron	Salmonidés (TRF, SAT), Chabot, Vairon	CG64, FDPMPA 64, AAPPMA d'Oloron , ECOGEA, AGERIN, MIGRADOUR, ONEMA	ISL-Aquascop 2010 ; Courret 2010b ; Armand et Courret 2011 ; Vandewalle et al. 2012a, 2012b ; Agerin 2012 ; Santal et al. 2012
Doubs franco-suisse , à l'aval du Chatelôt (25)	Influence des aménagements du Chatelôt (U 16 Mm ³ , 50 m ³ /s), du Refrain (U 1.2 Mm ³ , 23 m ³ /s) et de la Goule (18 m ³ /s)	de 20.2 m ³ /s à Fournet, à 34.1 m ³ /s à Glère	Salmonidés (TRF, OMB), Cyprinidés (BAF, BLN, CHE, GAR, GOU, VAI, VAN, ...), Chabot, Loche franche, Perche, Brochet, Apron (B4 à B7)	DREAL, EDF, APPMA « la Franco-SUISSE », Université de Franche-Comté, EPTEAU, ONEMA	DeGiorgi 2008 ; Courret et Larinier 2008a ; EPTEAU 2012, 2014
Lez à l'aval d'Eylie (09)	Etang d'Arraing (U 8.44 Mm ³) dont l'eau est turbiné à l'usine d'Eylie (3.6 m ³ /s). Eclusées reprises au barrage de Bonac et turbinées à l'usine de Bordes (8 m ³ /s)	≈ 1 m ³ /s au niveau d'Eylie, 7.1 m ³ /s à Bordes sur Lez	Salmonidés (TRF)	FDPMPA 09, EDF, IMFT, ONEMA	Boyenval 2010 ; Hurel 2010 ; Prel 2011 ; Baran et al. 2012

Tableau 10 : Informations sur les études de cas récentes en France alimentant les réflexions.

5.1. Etudes possibles sur la problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques

On peut différencier 3 catégories parmi les différentes études possibles autour de la problématique des éclusées :

- les études sur les composantes physiques des hydrosystèmes (biotope) : hydrologie et régimes d'éclusées, thermie, paramètres physico-chimiques (qualité d'eau), cartographies des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques (sectorisation), paramètres hydromorphologiques et habitats piscicoles,
- les suivis biologiques (biocénoses), soit vis-à-vis de certains impacts (suivis de la reproduction et des risques d'exondation, des échouages-piégeages, des dérives), soit vis-à-vis de l'état des populations (composition, abondance, structure),
- et les études énergétiques et économiques vis-à-vis du fonctionnement des aménagements hydroélectriques.

5.1.1. Etude de l'hydrologie et des régimes d'éclusées

L'étude du régime hydrologique et des régimes d'éclusées apparaît primordiale pour correctement appréhender la problématique posée par le fonctionnement par éclusées d'un aménagement hydroélectrique, car c'est essentiellement par le biais des perturbations de l'hydrologie que s'opèrent les impacts sur les autres composantes physiques de l'hydrosystème et sur les biocénoses.

Ces études doivent permettre a minima d'analyser l'hydrologie influencée à l'aval de la restitution des éclusées sur le cours d'eau, et plus précisément d'appréhender les caractéristiques réelles des éclusées (débits de base, débits maxima, amplitudes, gradients de hausse et de baisse) qui ne correspondent pas forcément aux valeurs administratives. En particulier, les éclusées ne vont pas toutes du débit minimum au débit maximum autorisés. Dans le cas d'aménagement de lac, lorsque les éclusées sont restituées sur un régime hydrologique naturel ou largement reconstitué, les débits sur lesquelles elles s'additionnent ne sont généralement pas bien connus. Il est intéressant d'étudier les régimes d'éclusées sur plusieurs années pour en apprécier la variabilité liée aux apports hydrologiques et à la demande énergétique, ainsi que les éventuelles évolutions temporelles (réduction ou aggravation). Il est également intéressant d'analyser les caractéristiques pour les différentes phases biologiques des espèces présentes (reproduction des adultes, incubation des œufs, émergence des alevins, croissance des juvéniles). A titre d'exemples, on peut revoir les figures dans le paragraphe 4.8.

La méthode de repérage des éclusées au sein des hydrogrammes développée dans les parties précédentes peut constituer un bon outil pour ce genre d'étude. Il s'agit bien d'aller au-delà de la classe et du score de l'indicateur et d'analyser dans le détail les caractéristiques des éclusées en exploitant les tableaux produits avec les caractéristiques de chacune des hausses et des baisses d'éclusées.

L'étude de l'hydrologie influencées et des régimes d'éclusées nécessite bien évidemment l'existence et l'accès à des chroniques hydrologiques à l'aval si possible proche de la centrale. En France, on est loin d'avoir des chroniques hydrologiques publiques sur tous les tronçons soumis à éclusées. Les exploitants produisent parfois eux-mêmes ces données, mais ne souhaitent pas forcément les transmettre pour des raisons de secret industriel dans la mesure où ces informations permettent d'évaluer la valorisation de l'aménagement. La mise en place de conventions fixant des conditions de confidentialité et de présentations des résultats sous forme suffisamment agrégée pour que l'on ne puisse pas évaluer la valorisation de l'aménagement peuvent constituer une solution.

A ce jour, il reste cependant des tronçons sur lesquels il n'existe aucune donnée hydrologique. Dans ce cas, on peut envisager de poser des sondes relevant les niveaux d'eau à pas de temps suffisamment fin (5-10 minutes). Cela peut déjà permettre d'analyser les répercussions des éclusées en termes de hauteur d'eau. Pour travailler sur des débits, de multiples campagnes de jaugeages seront nécessaires pour construire une courbe de tarage. L'inconvénient est qu'une fois les sondes

posées, il faut laisser passer du temps pour acquérir les données. Une autre solution peut consister à analyser les données de production qui sont enregistrées pour la plupart des aménagements, toujours sous réserve de régler les questions de secret industriel qui se posent de manière encore plus forte. Il est alors possible d'en déduire les débits turbinés, avec une précision liée à l'évaluation du rendement des turbines. Cette approche permet dans tous cas d'accéder aux amplitudes et gradients des éclusées. Selon si l'hydrologie au niveau de l'usine est complétement maîtrisée ou si les éclusées s'inscrivent sur un régime hydrologique naturel ou pseudo-naturel, on sera en mesure ou non d'accéder à leurs débits de base et débits maxima.

Si des données d'hydrologie naturelle existent soit à l'amont de l'aménagement, soit antérieurement, il est alors possible d'apprécier la globalité des perturbations de l'hydrologie en analysant notamment les stockage-déstockages et déplacements de volumes d'eau aux différents pas de temps (journalier, hebdomadaire, saisonnier), l'aggravation ou le soutien des évènements de bas débits, l'écrêtage des crues, ... La caractérisation de l'hydrologie naturelle fournit d'autre part une référence à laquelle peuvent être comparés les caractéristiques des éclusées. Les Figure 83 et Figure 84 présentent à titre d'exemple des résultats d'analyses sur le Doubs franco-suisse et sur le Gave d'Ossau sur la fréquence des débits et les gradients de variation.

L'étude de l'hydrologie et des régimes d'éclusées permet au final de dresser un état des lieux de la gestion des aménagements, d'en identifier les éventuelles tendances, et donnent des éléments d'appréciation du niveau de risque auquel chacune des phases biologiques des espèces est exposée. Ces résultats peuvent déjà aider à étayer des mesures de mitigation en cherchant à réduire les écarts entre les situations influencées et naturelles. Les éléments sur l'hydrologie naturelle sont en particulier utiles pour évaluer la faisabilité du maintien de débits de base.

Il est intéressant ensuite de croiser les caractéristiques des éclusées avec d'une part les études sur l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats piscicoles sur la gamme de turbinage pour mieux en apprécier les répercussions, et avec d'autre part les résultats des différents suivis biologiques. Cela peut permettre de mieux cerner l'impact du régime d'éclusées sur l'état des populations, ainsi que les caractéristiques des éclusées qui sont sources d'impact et sur lesquelles il serait le plus judicieux de mettre en place des mesures.

Des études de l'hydrologie et des régimes d'éclusées ont notamment été réalisées sur la Maronne (SIEE 1999), la Dordogne (Courret et al. 2006a ; Lascaux et Cazeneuve 2008), la Creuse (Cazeneuve et al. 2009), le Gave d'Ossau (Courret 2010) et le Lez (Hurel 2010).

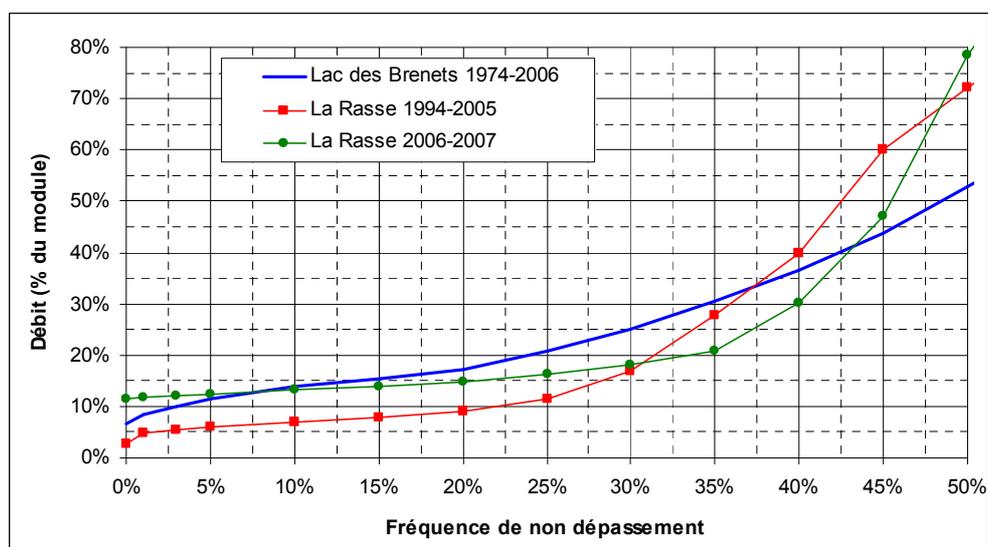


Figure 83 : Courbes de débits classés en pourcentage du module en hydrologie naturelle (Lac des Brenets) et influencée à l'aval de l'aménagement du Chatelôt sur le Doubs franco-suisse (La Rasse) (figure extraite de Courret et Larinier 2008).

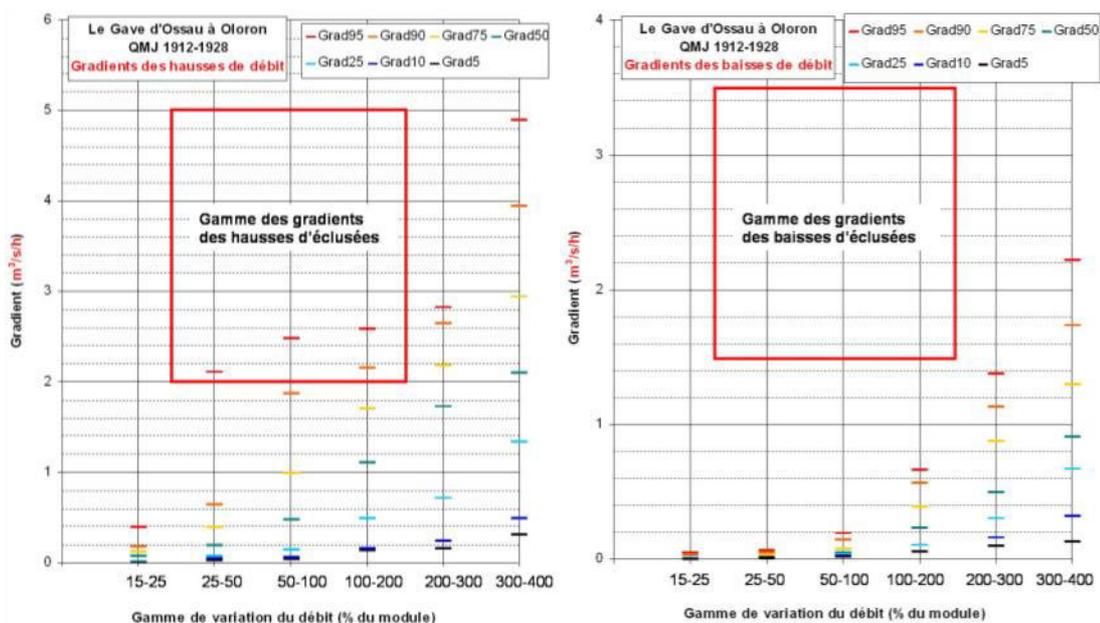


Figure 84 : Comparaison des gradients des variations de débit naturelles et des écluésées sur le tronçon Aval Castet sur le Gave d'Ossau (figure extraite de Courret 2010).

5.1.2. Etude du régime thermique et de l'éventuel effet « thermopeaking »

L'étude du régime thermique des tronçons soumis à écluésées est dans tous les cas utile pour bien cerner les périodes correspondant aux différentes phases biologiques des espèces par recoupement notamment avec les informations sur les températures déclenchant la reproduction des espèces ou sur les degrés-jour nécessaires à l'éclosion, à l'émergence et à la croissance des alevins (Figure 85). Cela permet ensuite de bien cibler dans le temps les mesures à mettre en œuvre. Un suivi sur plusieurs années est nécessaire de façon à appréhender la variabilité du régime thermique et les décalages possibles des périodes biologiques.

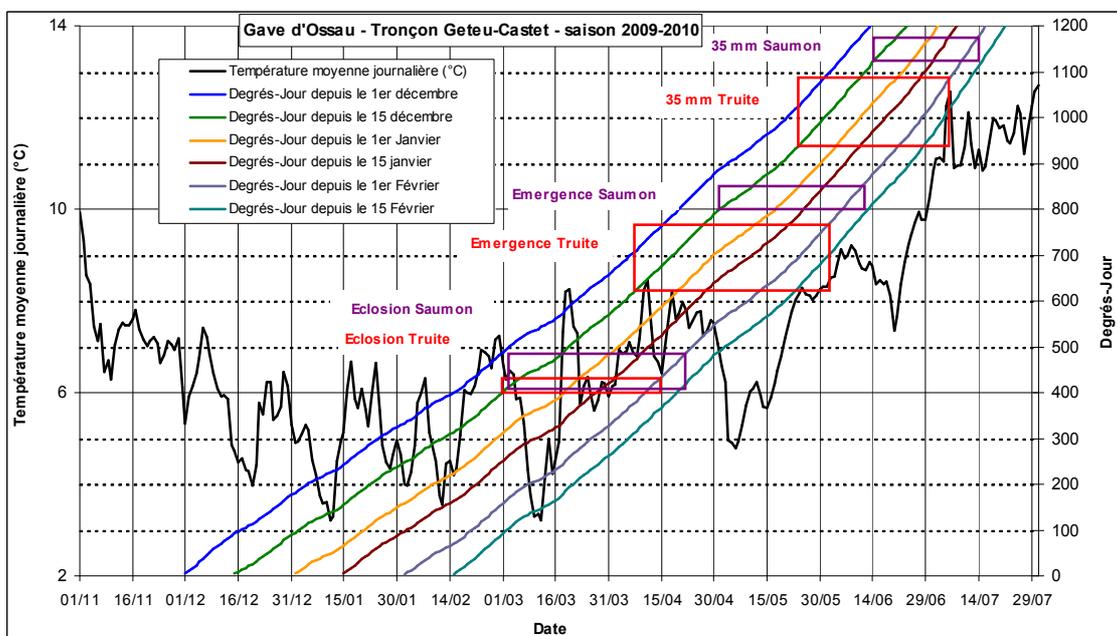


Figure 85 : Températures moyennes journalières du gave d'Ossau de novembre 2009 à août 2010 sur le tronçon Geteu-Castet (données ONEMA), cumuls de degrés-jour depuis la reproduction (6 dates par quinzaine entre le 01/12 et 15/02) et phases biologiques de la truite et du saumon (figure extraite de Vandewalle et al. 2012b).

Une étude du régime thermique est également nécessaire lorsqu'il est craint un éventuel effet de « thermopeaking ». Cela se produit en particulier à l'aval des aménagements de lac turbinant de l'eau depuis des retenues de haute altitude dont la température peut être sensiblement différente de celle du cours d'eau au point de restitution (Zolezzi et al. 2011). En France, cet effet a notamment été mis en évidence sur l'Oriège en aval de l'usine d'Orlu (Laggarique et al. 2002) ou sur le Gave d'Ossau à l'aval de l'usine de Geteu (Armand et Courret 2011 ; Figure 86). Selon les saisons et selon les caractéristiques de la retenue et du cours d'eau (altitude notamment), on peut observer durant les éclusées des effets aussi bien de refroidissement que de réchauffement, pouvant atteindre $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Le phénomène de « thermopeaking » peut également se produire à l'aval des retenues profondes qui se stratifient thermiquement, comme par exemple sur le Doubs à l'aval du Chatelôt (Degiorgi 2008) ou sur la Creuse à l'aval de Roche-au-Moine (Lascaux et al. 2013). Il existe en particulier des cas où la prise d'eau du débit réservé se trouve plutôt en surface, alors que celle des turbines est en profondeur. Lorsque la stratification thermique est en place, il se produit alors des variations rapides de température à chaque transition entre débit réservé et éclusées.

Les impacts éventuels de ces variations rapides de température sur les différentes phases biologiques des espèces sont mal connus. Ils ne sont peut-être pas toujours négligeables, en particulier sur la maturation des géniteurs ou sur le développement des œufs, et mériteraient peut-être d'être davantage investigués, notamment lorsque les écarts de température liées aux éclusées excèdent la variabilité journalière naturelle.

A ce jour, nous n'avons pas connaissance de mesure définies et mises en œuvre spécifiquement pour limiter cet effet de « thermopeaking ». Cela pourrait se justifier si des phases biologiques s'y avèrent sensibles et se recoupent avec des périodes où les températures du cours d'eau et de la retenue sont sensiblement différentes. Pendant les périodes ciblées, cela pourrait éventuellement se traduire par des mesures sur la gestion des débits turbinés avec des valeurs minimales et/ou maximales pour limiter les écarts de température à l'aval.

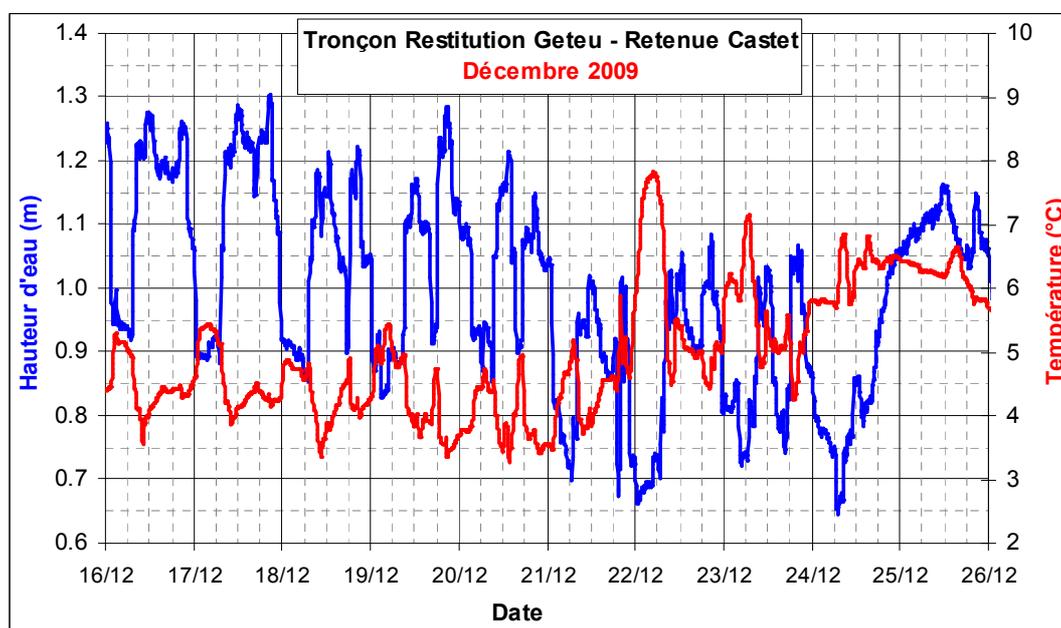


Figure 86 : Limnigramme et température du Gave d'Ossau sur le tronçon Geteu-Castet du 16 au 26/12/2009, en période de reproduction des salmonidés (figure extraite de Armand et Courret 2011).

5.1.3. Suivi des paramètres physico-chimiques (qualité d'eau)

Le suivi des paramètres physico-chimiques (oxygène dissous, taux d'ammonium, turbidité, ...) peut s'avérer nécessaire dans les cas où des problèmes se produisent dans le fonctionnement physico-chimique de la retenue. Dans ce type d'impact, le fonctionnement par éclusées sert de « révélateur » en concentrant les rejets d'eau de mauvaise qualité sur des durées restreintes, mais mais il s'agit bien en fait d'un problème général de qualité d'eau dans la retenue (Sabaton et al. 1995). Cette problématique peut essentiellement concerner des retenues de basse altitude présentant des activités anthropiques dans leur bassin versant amont et se manifester de manière saisonnière, principalement l'été. Un suivi des paramètres physico-chimique a notamment été réalisé à l'aval de l'usine de Rabodanges sur l'Orne où les éclusées se traduisent à certaines saisons par une réduction du taux d'oxygène dissous et une augmentation du taux d'ammonium (Sabaton et al. 1995).

Ce type de suivi semble à ce jour rarement réalisé vis-à-vis du fonctionnement par éclusées des aménagements hydroélectriques. Nous n'avons pas connaissance de mesure définies et mises en œuvre spécifiquement pour limiter des dégradations de la qualité de l'eau en aval d'une usine. Les solutions résident de toute façon plutôt dans le fait d'améliorer la qualité de l'eau entrant dans la retenue, que dans la gestion par éclusées.

5.1.4. Cartographies des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques (sectorisation)

La reconnaissance du tronçon soumis aux éclusées avec la cartographie des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques lors des éclusées (sectorisation) est normalement un préalable incontournable avant d'envisager une étude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats piscicoles ou des suivis biologiques (Figure 87). Pour bien visualiser les faciès d'écoulement, la granulométrie des fonds et les contextes morphologiques problématiques, ainsi que pour des raisons pratiques, la prospection du tronçon est à réaliser à bas débit, si possible au débit minimum. La cartographie des faciès d'écoulement permet notamment de choisir ensuite des stations représentatives de l'ensemble du tronçon pour l'étude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats piscicoles. Il est également intéressant de positionner et de décrire les contextes morphologiques potentiellement problématiques lors des éclusées, c'est à dire :

- les sites potentiels de reproduction des espèces présentes (granulométrie favorable à la fraie pour les espèces lithophiles, présence de support adéquat pour les espèces phytophiles, ...) en décrivant leur taille et leur situation d'enneigement.
- les sites potentiels d'échouage-piégeage, en précisant leur types ([1] bordures ou bancs de galet plus ou moins végétalisés ; [2] cordons rivulaires, composés d'une ou plusieurs dépressions, éventuellement reliées par des petits chenaux ; [3] bras secondaires ; ...), ainsi que leur taille (surface, linéaire, ...) et leur situation d'enneigement.

Il peut être profitable de faire une seconde prospection à fort débit, idéalement au débit maximum turbiné, pour confirmer ou infirmer la mise en eau sur la gamme de turbinage des sites potentiels repérés à bas débit. Cela peut permettre d'en écarter certains qui ne se mettent en eau que lors des événements de crues dépassant les capacités de l'aménagement hydroélectrique, ou au contraire d'en rajouter d'autres.

Ces informations sur les sites potentiels de reproduction des espèces et d'échouage-piégeage sont nécessaires pour d'une part bien choisir les sites pour les suivis biologiques dans la mesure où il n'est généralement pas possible de les suivre tous, et pour d'autre part connaître leur représentativité et ainsi les possibilités d'extrapolation des observations à l'échelle globale du tronçon.

De telles cartographies ont par exemple été réalisées sur la Maronne (Lascaux et al. 2008), la Dordogne (Lascaux et al. 2009), la Creuse (Vandewalle et Lascaux 2008) ou le Gave d'Ossau (ISL-Aquascop 2010 ; Figure 87).

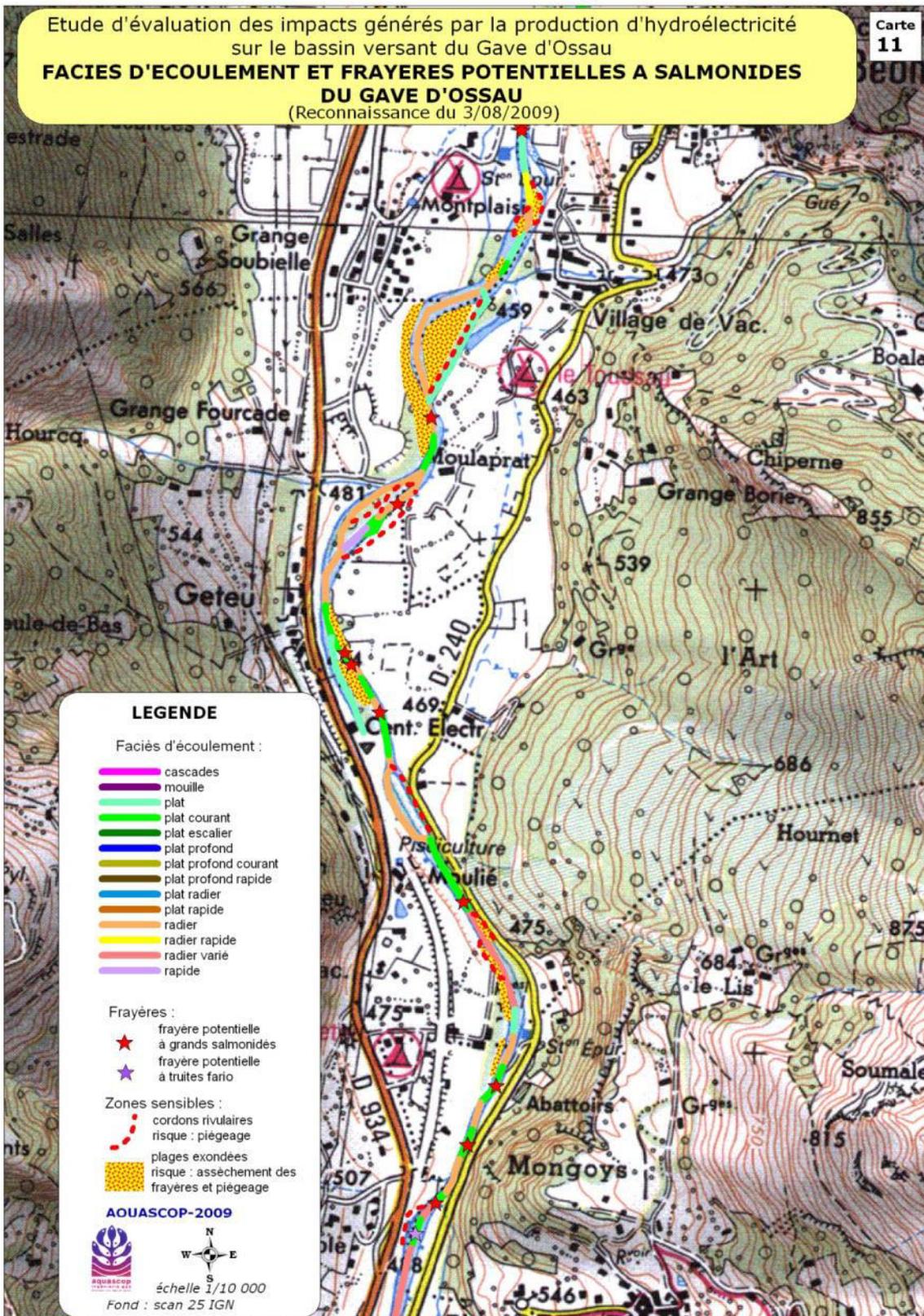


Figure 87 : Exemple de cartographie des faciès d'écoulement et des contextes morphologiques potentiellement problématiques sur le Gave d'Ossau (figure extraite d'ISL-Aquascop 2010).

5.1.5. Etude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats piscicoles sur la gamme de turbinage

Sur une ou plusieurs stations représentatives du tronçon en termes d'habitat et de contextes morphologiques problématiques, l'objectif de ce type d'étude est d'obtenir l'évolution en fonction du débit, sur la gamme de turbinage :

- des paramètres hydromorphologiques (surface mouillée, hauteur, vitesse, débit unitaire, force tractrice ...) (Figure 88).
- de la mise en eau et de la fonctionnalité des zones de reproduction des espèces (granulométrie favorable à la fraie pour les espèces lithophiles, présence de support adéquat pour les espèces phytophiles) par croisement des paramètres hydrauliques et les exigences des poissons sur le principe de la méthode des microhabitats (Bovee 1982 ; Ginot et al. 1998).
- de la fonctionnalité des habitats pour les différentes phases de développement des espèces, par croisement des paramètres hydrauliques et des préférences des poissons sur le principe de la méthode des microhabitats (Figure 89).
- le fonctionnement hydraulique des sites d'échouage – piégeage (mise en eau des bancs, des cordons rivulaires, débits de connexion des bras secondaires, ...).

Ce type d'étude permet ainsi d'appréhender les répercussions des éclusées et de progresser dans la compréhension de leurs impacts. Les résultats s'avèrent tout particulièrement utiles pour définir des mesures de mitigation portant sur les caractéristiques des éclusées (débit de base, débit maximum, amplitude, gradients), ainsi que pour dimensionner des opérations de travaux sur la morphologie, mais seulement au sein des stations étudiées.

Ces études passent généralement par la réalisation de modélisations hydrauliques, s'appuyant sur une topographie détaillée du cours d'eau (a minima 2 à 3 transects par faciès d'écoulement) et des contextes morphologiques à enjeux. La démocratisation des outils de topographie (tachéomètres, GPS différentiels) permet aujourd'hui d'envisager la modélisation de linéaires conséquents. Dans les études de cas sur la Maronne (SIEE 1999 ; ≈ 2.2 km de linéaire modélisé), la Dordogne (Courret et al. 2006 a et b ; 9.3 km au total), la Creuse (Courret et Lascaux 2009 ; 2.2 km) et le Gave d'Ossau (Vandewall et al. 2012 a et b ; Agerin 2012 ; 4.4 km au total), la modélisation hydraulique a été monodimensionnelle et réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS¹² (Brunner 2002 a et b). Les résultats du modèle hydraulique ont ensuite été exportés au travers de l'interface HEC-GéoRAS¹³, et exploités à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG ; Figure 88 et Figure 89). Sur le Lez, une modélisation bidimensionnelle a été mise en œuvre avec Télémac 2D¹⁴ pour apprécier de manière plus fine les conditions d'habitats dans le sillage de blocs (Boyenvall 2010 ; Prel 2011 ; ≈ 360 m de linéaire modélisé).

Il est important que la modélisation hydraulique soit calée de manière fiable sur l'ensemble de la gamme de variation liée aux éclusées hydroélectriques de manière à ce que cet aspect ne prête pas à discussions (Figure 91). Pour ce faire, il est préconisé que des lignes d'eau soient relevées à différents débits : au débit minimum ou à un débit proche, souvent réalisé en même temps que les relevés topographiques, au débit maximum turbiné, ainsi qu'à 1, 2 ou 3 débits intermédiaires selon l'étendue de la gamme de turbinage (Figure 90). Il a par exemple été réalisé 5 relevés de lignes d'eau sur la Dordogne ou la Creuse pour des gammes de turbinage allant jusqu'à environ 3 et 2.5 fois le module respectivement (Courret et al. 2006b, Courret et Lascaux 2009), et 3 relevés de lignes d'eau sur le Gave d'Ossau pour une gamme de turbinage allant jusqu'à environ 1.5 fois le module (Vandewalle et al. 2012b ; Agerin 2012). Pour les relevés de ligne d'eau, des points repères fixes sont généralement positionnés en berge au niveau des transects lors des relevés topographiques (Figure 87).

¹² <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

¹³ www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/

¹⁴ <http://www.opentelemac.org>

Dans le cas où l'étude vise seulement à obtenir des résultats sur la mise en eau et de la fonctionnalité des zones de reproduction des espèces, ou sur le fonctionnement hydraulique des sites d'échouage – piégeage, dont il est parfois difficile d'inclure un nombre conséquent au sein d'une station modélisée, il peut être envisagé de réaliser la topographie locale de ces sites et d'en apprécier le fonctionnement hydraulique par mesures à différents débits. Ces relevés peuvent en particulier être réalisés de manière concomitante avec le suivi de la reproduction ou de l'échouage-piégeage des poissons (voir paragraphes 5.1.6 et 5.1.7). Cette approche a notamment été adoptée pour étudier le fonctionnement hydraulique de sites d'échouage-piégeages disséminés sur la Maronne et la Cère (rapports en cours) (Figure 92).

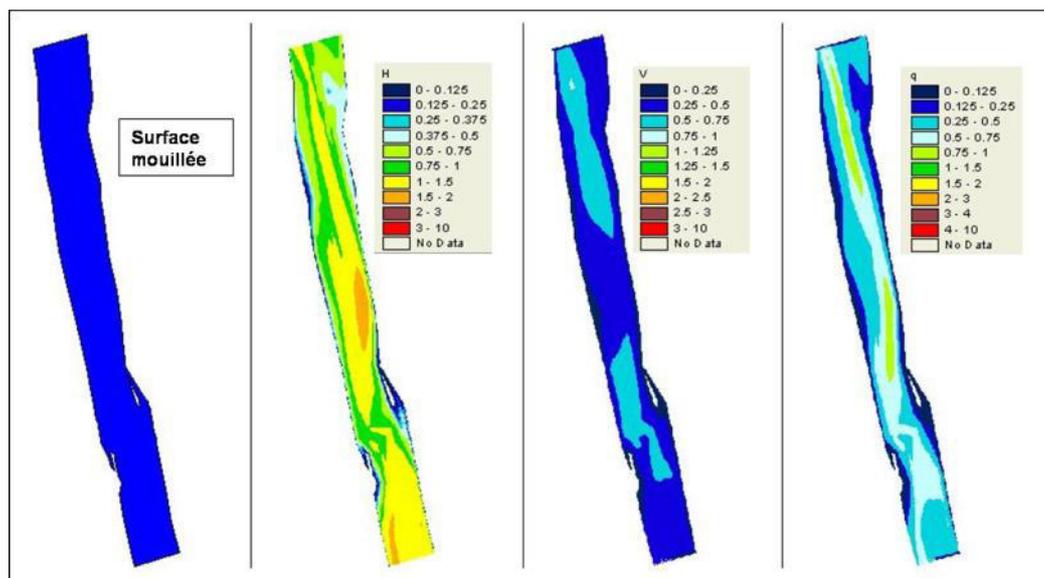


Figure 88 : Cartographies de surface mouillée, de hauteur d'eau (H en m), de vitesse d'écoulement (V en m/s) et de débit unitaire (q en m³/s/m), à Fontgombault sur la Creuse pour un débit de 25 m³/s (figure extraite de Courret et Lascaux 2009).

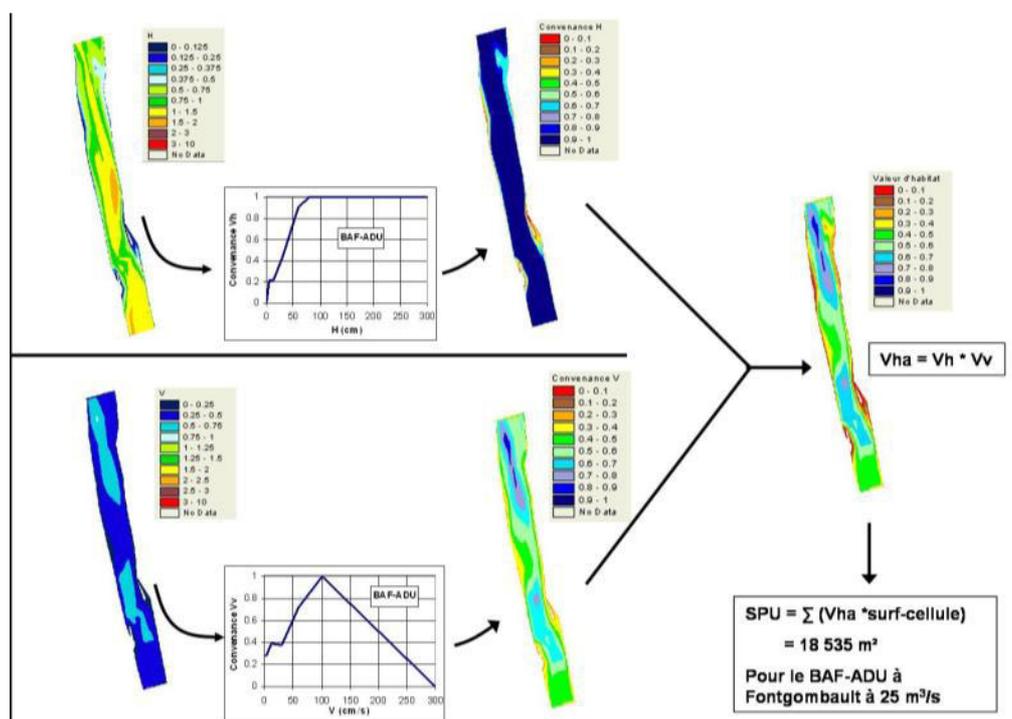


Figure 89 : Illustration du calcul de la SPU pour le barbeau au stade adulte (BAF-ADU) à Fontgombault à 25 m³/s (figure extraite de Courret et Lascaux 2009).

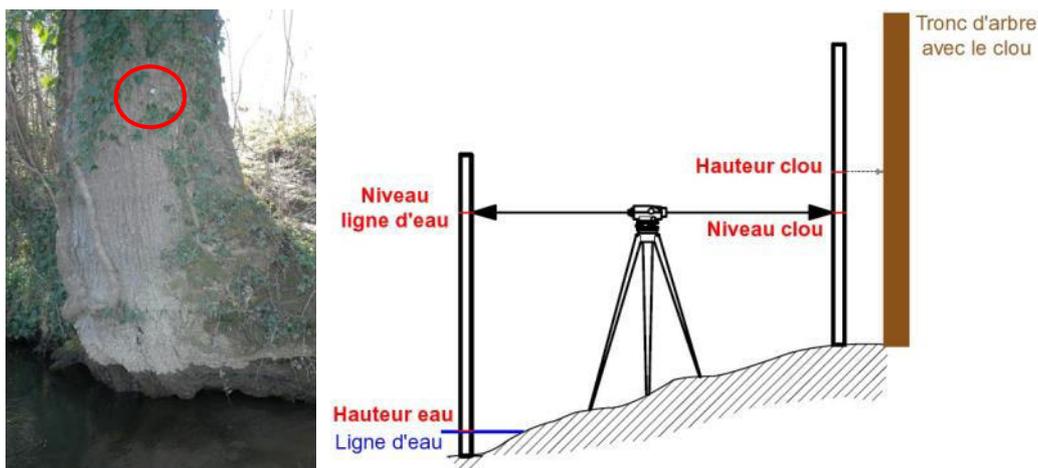


Figure 90 : A gauche, exemple de point repère positionné sur un arbre. A droite, schéma de principe du relevé de ligne d'eau (figure extraite de Vandewalle et al. 2012b).

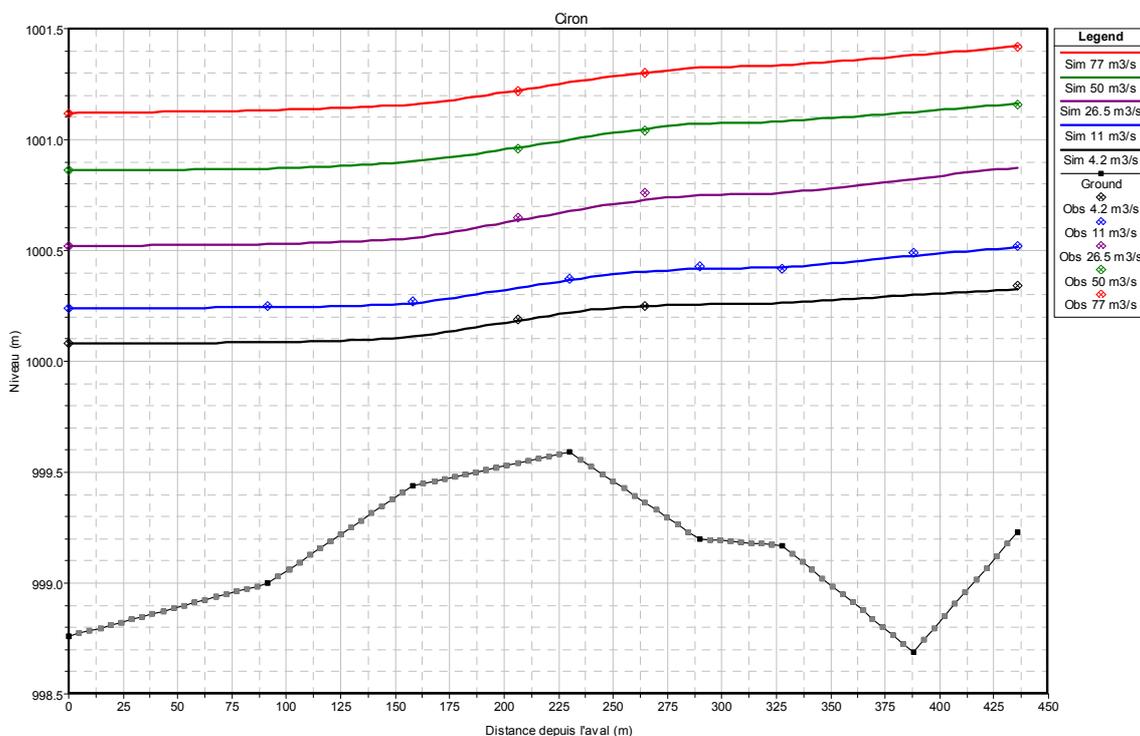


Figure 91 : Comparaison des lignes d'eau relevées (points) et simulées (lignes) sur la station de Ciron sur la Creuse (figure extraite de Courret et Lascaux 2009).

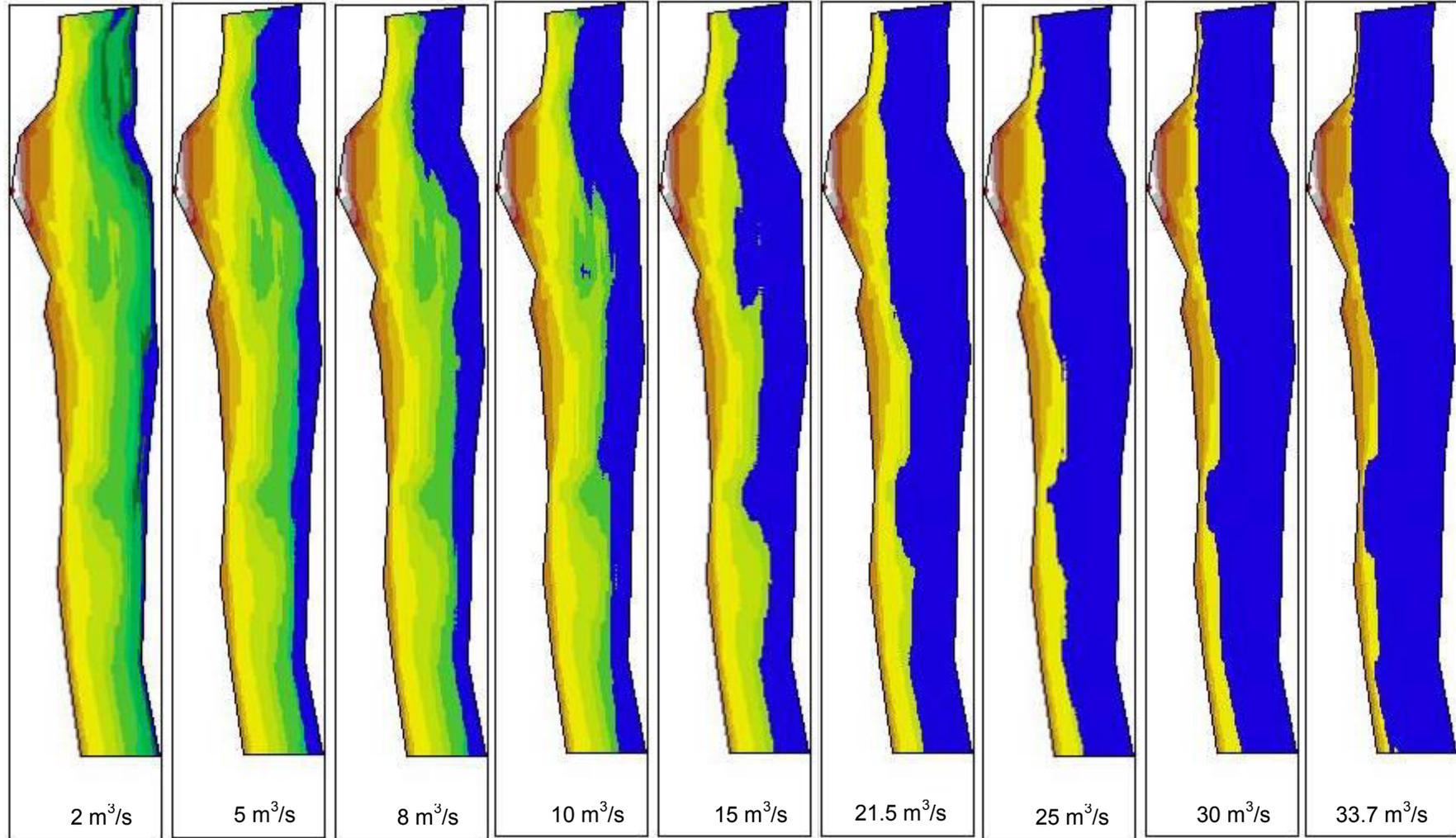


Figure 92 : Evolution de la mise en eau (zone bleue) de la bordure de galet de Graffouillère entre 2 et 33.7 m³/s, sur la Maronne.

5.1.6. Suivi de la reproduction des poissons et de l'exondation des pontes lors des retours à bas débits

Lors des retours à bas débit, des sites utilisés auparavant par les poissons pour se reproduire peuvent se retrouver hors d'eau, leurs pontes étant alors exondées, ce qui peut rapidement compromettre partiellement, voire totalement la survie selon l'espèce et les conditions de l'exondation (Figure 93 et voir paragraphe 5.4).



Figure 93 : Illustration de frayères de truites dont le dôme est exondé sur le Gave d'Ossau durant l'hiver 2009-2010 (flèches rouges) (figure extraite d'Armand et Courret 2011).

Le suivi in situ de la reproduction des poissons et de l'exondation des pontes doit avoir pour objectifs (1) de localiser les principaux sites réellement utilisés par les poissons, (2) de quantifier l'activité de reproduction et (3) de vérifier s'il y a ou non des exondations des pontes liées au fonctionnement par éclusées et de les quantifier. Dans la mesure où il n'est généralement pas possible de suivre tous les sites sur le tronçon soumis aux éclusées, une sélection doit être réalisée en s'appuyant de préférence sur une cartographie préalable des sites potentiels. Le suivi est à réaliser non seulement durant la période de reproduction des espèces pour le repérage des pontes, mais doit aussi se prolonger durant toute la période d'incubation des œufs jusqu'à l'émergence des alevins, pour vérifier si des exondations se produisent lors des épisodes de faibles débits.

Des suivis de la reproduction et de l'exondation des pontes ont essentiellement été réalisés pour les truites fario et les grands salmonidés migrateurs (saumon et truite de mer), ces espèces étant les principales concernées par la problématique des éclusées hydroélectriques et leurs frayères étant assez facilement repérables. Les suivis démarrent alors généralement mi ou fin novembre et peuvent se prolonger jusqu'en avril-mai. De tels suivis sont notamment réalisés chaque année depuis 1999 sur la Dordogne et la Maronne (suivis annuels d'ECOGEA pour MIGADO ; Cazeneuve et Lascaux 2013). De manière plus ponctuelle, un suivi a été réalisé sur le Gave d'Ossau durant l'hiver 2009-2010 (Armand et Courret 2011 ; Figure 93). Des observations sont également réalisées depuis quelques années sur le Doubs franco-suisse ou sur la basse vallée de l'Ain. Le suivi de la reproduction d'autres espèces telles que l'ombre, le chabot, les cyprinidés d'eaux vives (vandoises, barbeaux, ...), la perche ou le brochet sont bien moins évidents, leurs frayères ou leurs pontes étant difficiles à repérer. A notre connaissance, il n'y a que sur la Dordogne qu'un suivi annuel est réalisé vis-à-vis de la reproduction de ces espèces par ECOGEA pour EPIDOR (voir notamment Lascaux et Cazeneuve 2008b et Cazeneuve et al. 2009). A l'étranger, des suivis in situ de l'exondation de pontes ont par exemple été menés par le California Department of Water Resources (2008) et l'USFWS (2010).

La transmission des informations sur les programmes prévisionnels de turbinage à l'opérateur du suivi est quasiment indispensable pour que ce dernier puisse organiser les prospections à bon escient.

Lors des suivis, si les sites ne font pas partie de stations modélisées, il peut être intéressant de mesurer les hauteurs d'eau au-dessus des pontes, ainsi que les niveaux par rapport à un point repère fixe (Figure 90) et de déterminer les débits lors des différentes observations. **En recoupant ces informations d'enneigement des pontes et d'évolution des niveaux d'eau en fonction du débit, il est alors possible de déterminer à partir de quels débits les pontes sont maintenues en eau ou**

au contraire exondées. Par comparaison avec la chronique des débits durant la période sensible, il est alors possible de déterminer a posteriori quelle proportion de pontes a été exondée. C'est particulièrement utile lorsqu'il n'a pas été possible de réaliser une prospection lors de l'épisode de plus bas débit intervenu durant la période. **Ces résultats sont également tout particulièrement utiles pour définir des mesures de mitigation sur la gestion des débits.** De telles analyses ont notamment été réalisées sur la Maronne (Lascaux et al. 2004) ou sur la Dordogne (Vandewalle et al. 2009).

5.1.7. Suivi de l'échouage-piégeage des poissons lors des baisses d'éclusées

Lors des baisses de débit, les poissons qui se trouvent dans les zones qui s'assèchent ou se déconnectent du lit mouillé risquent de ne pas réussir à suivre le retrait de la surface mouillée ou de ne pas quitter à temps les dépressions ou les bras secondaires qui se déconnectent, et ainsi de se retrouver échoués ou piégés. Cela peut rapidement engendrer leur mort par asphyxie dès lors que les poissons se retrouvent complètement hors d'eau, ainsi que par prédation (Figure 94 et voir paragraphe 5.5).



Figure 94 : Illustration du phénomène d'échouage-piégeage (figure extraite de Lascaux et al. 2006).

Le suivi in situ de l'échouage-piégeage des poissons doit avoir pour objectifs de localiser les principaux sites réellement sources de mortalités pour les poissons et de quantifier ces mortalités dans la mesure du possible. Etant donné qu'il n'est généralement pas faisable de suivre tous les sites sur le tronçon soumis aux éclusées, une sélection doit être réalisée en s'appuyant de préférence sur une cartographie et une typologie préalable des sites potentiels. Des poissons adultes, notamment de petites espèces, sont susceptibles de se retrouver échoués ou piégés lors des baisses de débit. Ce type de suivi pourrait donc être réalisé toute l'année dès lors que des éclusées sont pratiquées. Il s'avère toutefois que la sensibilité des espèces est maximale lors des premiers stades de vie en pleine eau. Le suivi de l'échouage-piégeage est donc principalement à cibler à partir de l'émergence des alevins, durant a minima leurs premières semaines de vie. Les suivis réalisés en France sont ainsi principalement conduits de fin mars à juin selon les espèces visées et les régimes thermiques des cours d'eau.

Des suivis ont principalement été conduits vis-à-vis des alevins de truites et de saumons, ces espèces étant les principales concernées par la problématique des éclusées hydroélectriques et leurs alevins, dont la taille à l'émergence est de l'ordre de 20-25 mm, étant repérables non sans difficultés. En France, de tels suivis sont notamment réalisés chaque année depuis 2003 sur la Maronne et depuis 2005 sur la Dordogne (suivis annuels d'ECOGEA pour MIGADO puis pour EPIDOR ; voir

notamment Lascaux et al. 2006 ; Lascaux et Cazeneuve 2008 et Cazeneuve et al. 2009). Des suivis sont également engagés sur la basse vallée de l'Ain (Aubert et al. 2013) et sur le Doubs franco-suisse. Le suivi de l'échouage-piégeage des alevins des autres espèces telles que l'ombre, le chabot, les cyprinidés d'eaux vives (vandoises, barbeaux, ...), la perche ou le brochet, sont bien moins évidents, du fait de leur taille très réduite qui les rend peu repérables et indénombrables. La quantification des mortalités pour ces espèces est donc pratiquement impossible. Ces espèces sont également retrouvées dans les suivis cités ci-dessus. A l'étranger, des suivis in situ d'échouage-piégeage ont par exemple été menés par Hvidsten (1985), Olson and Metzgar (1987), Higgins et Bradford (1996), Stillwater Sciences (2006), Irvine et al. (2008), le California Department of Water Resources (2008) et l'USFWS (2010).

La transmission des informations sur les programmes prévisionnels de turbinage à l'opérateur du suivi est indispensable pour que ce dernier puisse organiser les prospections à bon escient suite aux baisses de débits. Il est primordial que les prospections interviennent rapidement après les baisses du débit, les poissons échoués ou piégés pouvant rapidement faire l'objet de prédation, ce qui nécessite une très bonne réactivité de l'opérateur.

Lors des suivis, si les sites ne font pas partie de stations modélisées, il peut être intéressant d'y relever les niveaux par rapport à un point repère fixe (Figure 90) et de déterminer les débits lors des différentes observations. En recoupant ces informations sur l'évolution des niveaux d'eau en fonction du débit avec la topographie des sites, il est alors possible d'en appréhender le fonctionnement hydraulique (mise en eau des bancs, des cordons rivulaires, débits de connexion des bras secondaires, ...). **En recoupant une cartographie et une typologie des sites d'échouage-piégeage avec une typologie des baisses d'éclusées et avec des mortalités moyennes par type de site et d'éclusées durant la période de sensibilité, il est possible d'appréhender les mortalités globales d'alevins de truite et saumons par échouage-piégeage sur un tronçon soumis à éclusées.** En France, de telles analyses ont notamment été réalisées sur la Maronne (Lascaux et al. 2008) ou sur la Dordogne (Cazeneuve et al. 2009).

La problématique de l'échouage-piégeage des poissons a également fait l'objet d'étude en chenal expérimental (Bradford et al. 1995 ; Bradford 1997 ; Halleraker et al. 2003 ; Cocherell et al. 2011) ou en conditions contrôlées in situ (Salveit et al. 2001), dont les résultats sont utiles en complément de ceux des études in situ pour comprendre le phénomène d'échouage-piégeage et définir des critères pour l'éviter ou le limiter (voir paragraphe 5.5).

La problématique de l'échouage-piégeage concerne également les invertébrés, même si cela a été peu étudié à notre connaissance. Dans le cadre des réflexions menées ici, les invertébrés n'ont pas été considérés étant donné que les mesures de mitigation n'ont jusqu'à présent pas été définies vis-à-vis de ces organismes, ce qui ne veut pas dire que cela ne serait pas nécessaire et pertinent.

5.1.8. Suivi de la dérive des poissons lors des hausses d'éclusées

Lors des hausses de débit, les poissons peuvent être amenés à dériver de manière forcée lorsque les conditions d'écoulements dépassent leur capacité de maintien de leur position. Ce phénomène concerne essentiellement les stades alevins des espèces dont les capacités de nage sont les plus réduites. Il peut être a minima source de déplacement vers l'aval des poissons, mais semble également pouvoir être source de mortalités, même si le devenir des poissons entraînés est difficile à déterminer (voir paragraphe 5.6).

Le phénomène de dérive forcée a été peu étudié et mis en évidence in situ (Salveit et al. 1995), du fait des difficultés techniques à filtrer efficacement une fraction significative du débit pendant une éclusée. La problématique a été essentiellement étudiée en chenal expérimental (Ottaway et Clarke 1980 ; Ottaway et Forrest 1983 ; Irvine 1986 ; Heggenes 1988 ; Crisp et Hurley 1991 a et b ; Lauter 1995 ; Valentin 1995 ; Liebig et al. 1998). Dans toutes ces études, une des difficultés réside dans le fait de pouvoir étudier les alevins dès les premiers jours suivant leur émergence du substrat. Il est d'autre part parfois délicat de faire la part des choses entre une dérive des alevins véritablement forcée par les conditions hydrodynamiques et une dévalaison volontaire pour la recherche d'habitat. In situ, le phénomène de dérive des alevins est le plus souvent suspecté au travers des suivis de populations en cas de faibles recrutements en alevins, ou via l'analyse des conditions d'habitat pendant les éclusées (Sabaton et al. 1995).

Le suivi in situ de la dérive forcée des poissons lors des hausses d'éclusées reste donc encore expérimental. L'objectif d'un tel suivi est de déterminer si les hausses d'éclusées provoquent une augmentation du phénomène de dérive par rapport à une hydrologie naturelle. Le nombre de points de suivi est nécessairement réduit et ces points sont de préférence à positionner à l'aval de sites de reproduction avérée des espèces, dans des endroits offrant les meilleures conditions de filtration possibles, ainsi que d'accessibilité et de sécurité pour les opérateurs. La conception du dispositif de filtration est un point essentiel pour le succès du suivi. Il peut notamment se poser des problèmes de colmatage du filet qui réduisent le débit filtré et donc l'efficacité du dispositif. Deux stratégies peuvent notamment être adoptées avec soit un dispositif fixe filtrant en continu (plusieurs relevés journaliers étant alors nécessaires), soit un dispositif amovible installé ponctuellement. **La transmission des informations sur les programmes prévisionnels de turbinage à l'opérateur du suivi est là encore indispensable** pour que ce dernier puisse mettre en œuvre les dispositifs amovibles dès le début des hausses d'éclusées ou surveiller les dispositifs de filtration fixe à bon escient. A notre connaissance, un seul suivi in situ de la dérive des poissons est développé par ECOGEA et MIGADO sur la Maronne depuis 2012 (Clave et al. 2013 ; Figure 95).

La problématique de dérive forcée concerne également les invertébrés et a fait l'objet de davantage d'études. Dans le cadre des réflexions menées ici, les invertébrés n'ont pas été considérés étant donné que les mesures de mitigation n'ont jusqu'à présent pas été définies vis-à-vis de des organismes, ce qui ne veut pas dire que cela ne serait pas nécessaire et pertinent.



Figure 95 : Photographie du dispositif fixe d'échantillonnage en service en amont du pont de la Broquerie sur la Maronne (figure extraite de Clave et al. 2013).

5.1.9. Suivi de l'état des populations de poissons (composition, abondance, structure)

Afin d'appréhender l'état des populations de poissons sur les tronçons soumis aux éclusées, il est intéressant de réaliser des échantillonnages par pêche électrique.

L'idéal est de pouvoir réaliser sur des stations représentatives du tronçon des pêches dites « complètes » ou « de Lury », c'est-à-dire en couvrant toute la largeur du cours d'eau avec un nombre d'électrodes adéquat et plusieurs passages successifs. Ce protocole permet normalement de capturer toutes les espèces et stades de poissons, pour autant qu'ils soient suffisamment grands pour réagir au champ électrique. Cela permet ainsi d'acquérir des informations quantitatives sur la composition de la population de poissons avec les densités et biomasses des différentes espèces et générations (structure des populations). La biométrie des individus (taille, poids) permet également d'apprécier leur croissance.

Sur les cours d'eau de module au-delà d'environ 15-20 m³/s, il devient de plus en plus difficile et lourd de mettre en œuvre des pêches « complètes ». Sur les cours d'eau de module supérieur à 25-30 m³/s, cela devient pratiquement impossible. **Pour ces « grands » cours d'eau, dans la mesure où les éclusées hydroélectriques impactent principalement les premiers stades de développement des espèces, des protocoles de pêche « par point » ou « EPA » (Echantillonnage Ponctuel d'Abondance) peuvent être mis en œuvre en ciblant spécifiquement leurs habitats qui sont peu profonds et donc prospectables à pied.** Ce protocole ne permet donc pas d'échantillonner les stades adultes, voire juvéniles des espèces, ni d'ailleurs toutes les espèces. Il

fournit en revanche des informations semi-quantitatives (nombres de poissons rapportés au temps de pêche ou au nombre de points), permettant d'appréhender le niveau de recrutement des espèces, c'est-à-dire le succès global des phases de reproduction des adultes, d'incubation des œufs, d'émergence et de croissance des alevins.

Pour pouvoir bien progresser dans la compréhension des impacts des éclusées hydroélectriques sur l'état des populations, et en particulier discriminer les rôles respectifs des événements hydrologiques naturels et des éclusées, il est préconisé de réaliser ces échantillonnages tous les ans. Des durées minimales de 3 à 5 ans de suivi sont couramment mentionnées pour pouvoir apprécier la variabilité de l'état des populations. Sur un tronçon soumis à éclusées, même si aucun changement dans la gestion de l'aménagement n'est intervenu, ni aucune mesure de mitigation n'a été mise en œuvre, il est tout de même intéressant de poursuivre les suivis sur de plus longues durées. En effet, du fait de la variabilité des apports hydrologiques et de la demande énergétique, les régimes d'éclusées peuvent être sensiblement différents entre les années. La comparaison de l'état des peuplements entre ces années peut ainsi être riche d'enseignements sur les événements et les caractéristiques d'éclusées qui sont impactant ou non, et s'avérer particulièrement utile pour identifier des mesures de mitigation adaptées.

Parmi les études de cas listées dans le Tableau 10, des pêches complètes sont réalisées sur le Lez (1-7 m³/s ; Hurel 2010), la Maronne (20 m³/s ; Clave et Fougerolas 2013) et le Doubs franco-suisse (20-35 m³/s ; Degiorgi 2008). Des pêches par point sont réalisées sur la Dordogne (106-189 m³/s ; Clave et Fougerolas 2013 pour les pêches visant les alevins de truites et de saumons ; Cazeneuve et Lascaux 2012 pour les pêches visant les autres espèces), la Creuse (29-37 m³/s ; Cazeneuve et al. 2009b ; Lascaux et al. 2013) et le Gave d'Ossau (16-20 m³/s ; Santal et al. 2012).

5.1.10. Etudes énergétiques et économiques du fonctionnement des aménagements hydroélectriques

La réalisation d'études sur le fonctionnement des aménagements hydroélectriques est particulièrement intéressante pour pouvoir apprécier les répercussions de différentes mesures de gestion des débits sur la production énergétique et l'économie. C'est le pendant nécessaire aux études portant sur l'hydrosystème pour pouvoir mener une réflexion coût de production / bénéfices environnementaux, ou inversement coût environnementaux / bénéfices de production. Etant donné que les données nécessaires font partie du secret industriel, ce type d'étude ne peut être généralement réalisé que par l'exploitant lui-même. Plus le schéma de l'aménagement hydroélectrique est complexe, plus l'exercice le sera également. S'il semble assez facile d'évaluer les répercussions du maintien d'un débit de base ou de la limitation du débit maximum, cela semble plus délicat pour la limitation des gradients de hausse ou de baisse, en particulier dans le cas d'aménagements en chaîne.

Dans le cadre de la convention pour la régulation des débits sur le bassin de la Dordogne¹⁵, une telle étude est réalisée chaque année par EDF en modélisant a posteriori la gestion qui aurait été faite des aménagements sans les mesures de mitigation, et compte-tenu du scénario des apports hydrologiques et de la demande énergétique. Cela permet d'apprécier les répercussions des mesures de mitigation mises en œuvre par comparaison avec ce qui a été réellement réalisé (Figure 96).

En Suisse, le fonctionnement de l'aménagement hydroélectrique de haute chute Oberhasli dans le bassin de l'Aare a été modélisé et les conséquences de différentes mesures de mitigation portant sur la gestion des débits, la morphologie du cours d'eau et/ou la structure de l'aménagement ont été évaluées à la fois sur les habitats piscicoles et sur l'économie de l'aménagement (Person 2013 ; Bieri 2013).

¹⁵ Convention et annexes disponibles sur les sites de la DREAL Limousin ou d'EPIDOR (<http://www.limousin.developpement-durable.gouv.fr/renouvellement-de-la-concession-a708.html> ; www.epfb-dordogne.fr)

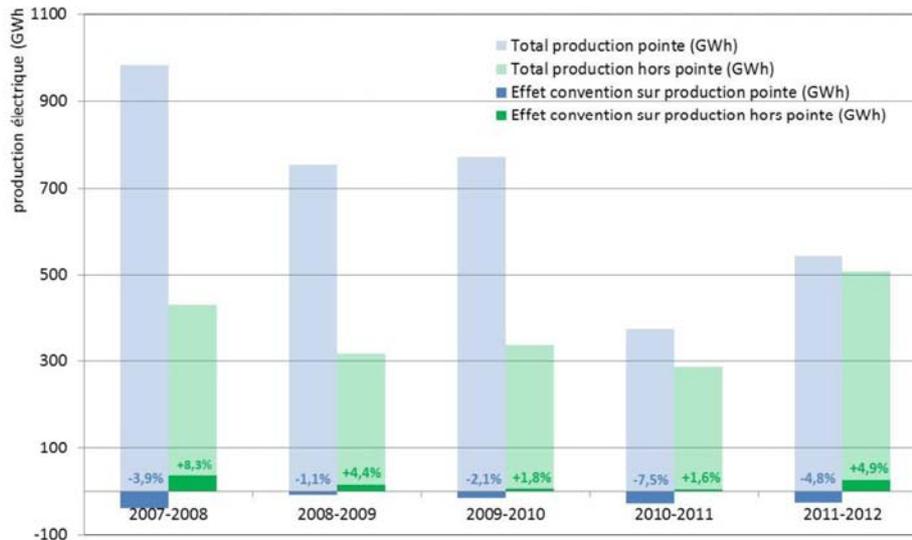


Figure 96 : Bilan énergétique des mesures de mitigation mises en œuvre sur la Dordogne (données EDF ; figure extraite du bilan de la convention 2008-2012 de réduction des impacts des éclusées sur le bassin de la Dordogne¹⁶).

5.2. Type de mesures de mitigation des impacts des éclusées

Différents types de mesures de gestion, de travaux sur le cours d'eau ou de mesures structurelles sur les aménagements hydroélectriques sont envisageables afin d'éviter, ou du moins d'atténuer les impacts des éclusées hydroélectriques.

5.2.1. L'arrêt général de la gestion par éclusées

L'arrêt général de la gestion par éclusées amène à revenir à une gestion au fil de l'eau, l'aménagement ne remplissant alors plus la fonction de production d'énergie de pointe. Cette solution radicale est celle qui donne évidemment les meilleures garanties en termes de réduction d'impacts, mais dont les conséquences sur l'intérêt énergétique et l'équilibre économique de l'aménagement sont maximales.

En France, à notre connaissance, il n'y a pas de cas où un aménagement a complètement arrêté la gestion par éclusées spécifiquement pour en éviter les impacts. Par contre, il y a plusieurs cas où l'effacement ou la reconfiguration d'aménagements principalement motivés par des raisons de sureté ou de rétablissement de la continuité écologique (effet obstacle du barrage et impacts liés à la retenue) a ou va corollairement supprimer les éclusées. Cela a été le cas sur le Léguer avec l'effacement de l'aménagement de Kernansquillec en 1996-2001. Cela sera bientôt le cas sur la Sélune avec l'effacement des aménagements de Vezins et de La Roche-qui-Boit (vidange envisagée à partir de 2015). Le projet de reconfiguration du barrage de Poutès sur l'Allier s'est également traduit par un retour à une gestion au fil de l'eau de cet aménagement depuis 2012 (des éclusées générées depuis les aménagements sur l'Ance du Sud subsistent à l'aval de l'usine de Monistrol).

5.2.2. La suspension des éclusées durant des périodes ciblées, biologiquement très sensibles.

La suspension des éclusées durant des périodes ciblées, biologiquement très sensibles, peut se faire soit en revenant à une gestion de l'aménagement au fil de l'eau, soit en restant en situation de débit minimum et en stockant les apports supplémentaires du cours d'eau (probablement hors événements de crue). Cette solution peut notamment être intéressante lorsque les autres solutions abordées ci-dessous, modification des caractéristiques hydrologiques des éclusées ou travaux sur la morphologie du cours d'eau, sont difficiles à mettre en œuvre de manière efficace. Sa faisabilité dépend fortement de la durée de la période biologique visée et de son timing par rapport aux besoins

¹⁶ http://www.limousin.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_convention_eclusees_2008-2012.pdf

de production d'énergie de pointe. On peut en particulier l'envisager au printemps, cette période étant d'un côté moins stratégique pour la production d'énergie de pointe et d'un autre côté biologiquement très sensible avec l'émergence et les premières semaines de vie des alevins de nombreuses espèces dont les salmonidés. On peut notamment avoir recours à la suspension ciblée des éclusées dans les cas où le fonctionnement des turbines ne permet pas de modifier les caractéristiques des éclusées (absence de points de fonctionnement adéquat pour mettre en place des débits de base, des gradients, ...). Cela peut être envisagé soit de manière durable, soit de manière transitoire en attendant des résultats d'étude ou des améliorations sur les possibilités de fonctionnement des turbines.

En France, nous n'avons pas connaissance de cas de suspension ciblée des éclusées inscrite explicitement dans le règlement d'eau d'un aménagement. Par contre, de longues périodes d'arrêt des éclusées peuvent se produire du fait d'apports hydrologiques ou d'une demande énergétique faibles. Cela a par exemple été le cas sur plusieurs cours d'eau durant les années « sèches » en 2003 ou 2011. Il est alors intéressant de suivre l'état des populations ; cela permet d'apprécier l'impact de la gestion par éclusées par comparaison avec des données antérieures ou à recueillir postérieurement.

Des travaux sur les aménagements hydroélectriques peuvent également conduire à des arrêts prolongés des éclusées. Cela a par exemple été le cas sur le Doubs Franco-Suisse avec le chômage technique de l'usine du Refrain d'août 1994 à juin 1997. Même si des éclusées étaient toujours générées plus en amont, cela a permis d'observer que les densités de truites et d'ombres de 1 et 2 ans à l'aval du Refrain ont nettement augmenté en 1996 par rapport à 1994, puis ont rediminué en 1999 (De Giorgi 2008). Un arrêt prolongé du fonctionnement par éclusées s'est également produit ces dernières années sur l'Aude du fait de travaux sur les usines d'Escouloubre et de Nentilla.

5.2.3. La modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques

La modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques consiste essentiellement à fixer des valeurs de débit de base, de débit maximum, d'amplitude, de gradient de hausse ou de gradient de baisse des éclusées permettant d'éviter, ou du moins d'en atténuer les impacts. De manière générale, on est amené à augmenter le débit de base (fixation de valeur minimale) et à limiter le débit maximum, l'amplitude ou les gradients de hausse ou de baisse des éclusées (fixation de valeurs maximales). Des mesures peuvent également être envisagées sur le timing ou la durée des éclusées, essentiellement vis-à-vis des problématiques d'échouage-piégeage et de dérive des alevins (voir paragraphe 5.5 et 5.6). L'avantage de ces mesures sur la gestion des débits est qu'elles profitent à l'ensemble du linéaire du cours d'eau à l'aval de la centrale.

Par contre, en restreignant les possibilités de modulation des débits, ces mesures se traduisent par une certaine désoptimisation de la production d'énergie de pointe. Le meilleur rapport entre la restriction des éclusées et la réduction des impacts passe généralement par une modulation des mesures par période, selon la sensibilité des phases biologiques des espèces présentes sur le cours d'eau. Les besoins des espèces sont en effet différents entre les périodes de reproduction des adultes, d'incubation des œufs, ou durant l'émergence et les premières semaines de vie des alevins. Ainsi, dans les différentes études de cas en France, les travaux ont amené à définir des « calendriers biologiques » avec des mesures adaptées à chaque période (EPIDOR 2009 ; Vandewalle et al. 2012b ; Agerin 2012).

Lors de la définition des mesures sur la gestion des débits, outre la fixation des valeurs minimales ou maximales sur les différents paramètres des éclusées, une des difficultés réside dans la gestion des exceptions à ces mesures. Par exemple, le maintien de débit de base élevé entre les éclusées peut se heurter au fait que les débits naturels soient inférieurs à la valeur définie, ou à des objectifs de remplissage de la retenue pour le respect d'une cote estivale minimale. Dans ce cas, une solution peut alors consister à réduire le débit jusqu'à une valeur minimale définie ou jusqu'à la valeur du débit entrant, avec un gradient de baisse approprié. En contrepartie, il n'est plus pratiqué d'éclusées en considérant que s'il n'y pas assez d'eau pour maintenir le débit de base, il n'y en a également pas assez pour pratiquer des éclusées (hors nécessité absolue pour la sécurité du réseau). De même, la fixation d'une limite sur le débit maximum turbiné ne peut pas forcément être respectée en cas d'apports hydrologiques naturels importants. Des règles doivent également être définies pour gérer les conditions de dépassement, puis de retour à la valeur maximale de débit, avec par exemple un suivi du profil naturel de la crue.

5.2.4. Les travaux sur la morphologie du cours d'eau pour en réduire la sensibilité aux éclusées.

Pour réduire les impacts des éclusées, on peut envisager de retoucher la morphologie d'un cours d'eau pour en réduire la sensibilité aux variations de débit. Les travaux peuvent notamment consister à :

- Nivelier des zones de reproduction des espèces lithophiles (truite, saumon, ombre, barbeau, ...) de façon à garantir leur ennoisement pour le débit minimum durant la période de reproduction des adultes, d'incubation des œufs et d'émergences des alevins.
- Retravailler (généralement approfondir) la prise d'eau de bras secondaires pour assurer leur alimentation pérenne pour les valeurs de débit minimum ou de débit de base, et ainsi éviter ou limiter leur déconnexion et les problèmes d'échouage-piégeage associés.
- Supprimer des zones d'échouage-piégeage des poissons, par exemple en nivelant des dépressions alternativement mises en eau et déconnectées sur la gamme de variation des éclusées.
- Améliorer les conditions d'habitat des espèces sur la gamme de turbinage. Des apports de blocs peuvent en particulier être réalisés de façon à conserver des zones d'habitat favorable, ou du moins à offrir des zones d'abris, durant les épisodes de forts débits engendrés par les éclusées. Des opérations plus conséquentes de restauration de la morphologie d'un cours d'eau peuvent également être envisagées lorsque celle-ci est dégradée.

Les opérations de travaux sur le cours d'eau peuvent être utiles, voire incontournables pour solutionner certains contextes morphologiques très problématiques, en particulier les bras secondaires (Chanseau et al. 2008). Leur efficacité reste toutefois ponctuelle et ces opérations ne peuvent pas, à elles seules, suffire à limiter de façon satisfaisante l'impact des éclusées à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Ces opérations ne sont donc à considérer que comme un complément aux mesures sur la gestion des débits qui profitent à l'ensemble du linéaire du cours d'eau.

En France, de multiples opérations de travaux ont notamment été réalisés sur la Dordogne et la Maronne, avec des nivellements de zones de reproduction, des réouvertures de bras secondaires et des suppressions de zones d'échouage-piégeage (Chanseau et al. 2008). Des études poussées ont été réalisées sur le Lez pour concevoir des apports de blocs et en apprécier les effets sur les conditions d'habitat (Boyenval 2010 ; Prel 2011), sans réalisation jusqu'à présent. Des opérations d'apports de blocs ou de « caches » ont été réalisées sur certains cours d'eau (sur la Pique notamment [31]), sans nécessairement avoir fait l'objet d'études préalables ou de suivis approfondis.

5.2.5. Mesures structurelles sur les aménagements hydroélectriques

Plusieurs types de mesures structurelles sur les aménagements hydroélectriques peuvent apporter des solutions aux impacts des éclusées :

- Déporter vers l'aval le point de restitution des éclusées sur le cours d'eau, soit en prolongeant un canal ou une conduite de fuite à la sortie de l'usine, soit en créant un nouvel aménagement hydroélectrique qui recapte directement les débits turbinés.

Cela peut permettre de totalement supprimer les éclusées sur le tronçon de cours d'eau court-circuité par le prolongement. Les caractéristiques des éclusées risquent par contre d'être plus sévères qu'auparavant au niveau du nouveau point de restitution dans la mesure où il ne se produira plus de phénomène d'atténuation sur le tronçon amont. Cela n'est pas forcément problématique si le nouveau point de restitution se trouve directement dans une retenue existante à l'aval, ou à un niveau où le cours d'eau a reçu des apports intermédiaires significatifs qui augmentent les débits de base des éclusées. La création d'un nouvel aménagement supprimant les éclusées sur un tronçon de cours d'eau et augmentant la production d'hydroélectricité peut apparaître comme un scénario « gagnant – gagnant ». Cela va toutefois dépendre des modalités de reprises des éclusées venant de l'amont. Si le nouvel aménagement ne fait que reprendre les débits directement en sortie de l'usine existante, sans la création d'une nouvelle prise d'eau sur le cours d'eau, le projet a de bonnes chances d'être bénéfique pour l'hydrosystème. Si en revanche, il s'agit de créer une nouvelle prise d'eau sur le cours

d'eau pour capter non seulement les débits turbinés à l'usine existante, mais aussi probablement les débits du cours d'eau qui ont pu se reconstituer, le projet ne sera pas forcément bénéfique pour l'hydrosystème. Il se posera alors la question suivante : est-il préférable (1) que le tronçon subissent des éclusées, ou (2) qu'il y ait un nouvel obstacle à la continuité écologique (ennoisement, montaison et dévalaison des poissons, transit sédimentaire) et que le tronçon soit en situation de débit plus réduit qu'auparavant ? Cela dépendra d'une part de la sévérité des éclusées, et d'autre part des modalités de débits réservés à l'aval de la nouvelle prise d'eau et des mesures mises en œuvre pour en atténuer les impacts sur la continuité écologique.

- Créer un bassin de démodulation à l'aval du point de rejet des éclusées.

Selon son volume, la création d'un bassin de démodulation peut permettre de modifier les caractéristiques des éclusées sur le cours d'eau à l'aval, voire de les supprimer, en évitant ou en limitant les contraintes sur la gestion des aménagements existants. De plus, les débits en sortie du bassin étant généralement turbinés, cela peut augmenter la production d'hydroélectricité.

La contrepartie est que cela nécessite la création d'un nouveau barrage de grande taille sur le cours d'eau pour disposer d'une capacité utile importante nécessaire à la démodulation des éclusées. Une nouvelle portion de cours d'eau est donc ennoyée. La création de tels barrages n'est déjà pas faisable d'un point de vue technique à l'aval de tous les points de restitution actuels des éclusées. D'autre part, l'acceptabilité sociale et environnementale de tels projets n'est pas évidente. En particulier, la création d'un barrage supplémentaire à l'aval de chaînes d'aménagements qui ont déjà artificialisé des linéaires importants de cours d'eau serait probablement très difficilement acceptable. L'idéal serait que le nouveau bassin de démodulation n'empiète pas sur le cours d'eau, mais vu les volumes nécessaires, cela paraît toutefois difficilement réalisable.

En France, les derniers aménagements aval de certaines chaînes ont déjà été prévus pour jouer un certain rôle de démodulation des éclusées générées par les aménagements amont, plutôt motivé à l'époque de leur construction par questions de sûreté à l'aval que par des objectifs environnementaux. On parle également d'aménagements dits "de compensation". Ces derniers aménagements aval présentent ainsi des débits d'équipement inférieurs à ceux en amont. La démodulation réalisée reste généralement partielle ; c'est-à-dire qu'il subsiste des éclusées à l'aval, mais avec des caractéristiques atténuées.

C'est le cas par exemple du barrage-usine du Sablier achevé en 1957 à l'aval de la chaîne d'aménagement sur la Dordogne avec un débit d'équipement initial de $220\text{m}^3/\text{s}$, puis un suréquipement en 1989 à hauteur de $340\text{m}^3/\text{s}$, sachant que l'aménagement en amont, le Chastang, est équipé à $530\text{m}^3/\text{s}$. La capacité utile du Sablier est d'environ 5.6Mm^3 , soit 20.7 fois moins que celle du Chastang. A titre d'ordre de grandeur, cela représente presque 3H à $530\text{m}^3/\text{s}$. De même, le barrage-usine de Roche-au-Moine sur la Creuse, achevé en 1932 et équipé à $75\text{m}^3/\text{s}$, est prévu pour démoduler les éclusées générées par l'aménagement amont d'Eguzon équipé à $150\text{m}^3/\text{s}$. La capacité utile de Roche-au-Moine est d'environ 2Mm^3 , soit 11 fois moins que celle d'Eguzon, ce qui représente à titre d'ordre de grandeur environ 3H45 à $150\text{m}^3/\text{s}$. Sur le Gave d'Ossau, l'aménagement de Castet a vocation à démoduler les éclusées restituées à l'usine de Geteu qui est équipé à $26\text{m}^3/\text{s}$. Castet est équipé à $25\text{m}^3/\text{s}$ et présente une retenue avec une capacité utile initiale de $245\,000\text{m}^3$ (problématique de réduction du volume utile par le comblement sédimentaire), ce qui représente à titre d'ordre de grandeur environ 2H35 à $25\text{m}^3/\text{s}$.

- Créer un bassin « tampon » pour atténuer les gradients des éclusées.

Il s'agit de la création de bassins dont les volumes sont bien plus faibles que ceux des bassins de démodulation évoqués ci-dessus. Ces bassins « tampons » ne permettent donc pas de modifier les débits de base ou maxima des éclusées, mais permettent d'en atténuer les gradients de hausse et de baisse. Le principe est que le bassin soit vide hors éclusées, qu'il se remplisse suite au démarrage de l'éclusée, qu'il soit plein pendant l'éclusées et qu'il se vide lors de son arrêt. Le débit restitué au cours d'eau est lié au niveau d'eau dans le bassin, dont le remplissage et la vidange permettent d'obtenir dans le cours d'eau des gradients atténués par rapport à ceux en sortie d'usine. Les volumes nécessaires étant bien plus faibles que ceux des bassins de démodulation évoqués précédemment, les bassins « tampons » peuvent être implantés sans empiéter sur le cours d'eau.

En France, un bassin « tampon » a notamment été aménagé à l'aval de l'usine de Sainte Lucie de Tallano turbinant les eaux stockées dans le barrage du Rizzanese (Corse), dès la construction de l'aménagement en 2008-2013 (Figure 97). Un bassin a également été construit en 2014 à l'aval de la centrale de La Bathie restituant les eaux turbinées dans l'Isère dans le cadre de son augmentation de

puissance (Galland et al. 2014). Le débit turbiné par la centrale a été porté de 55 m³/s à 60 m³/s. Le bassin dont la création est principalement motivée par des questions de sureté à l'aval présente un volume de 53 000 m³, soit une durée de remplissage d'environ 15 minutes à 60 m³/s. Lorsque l'usine démarre, le bassin se remplit dès que le débit turbiné dépasse 14 m³/s. Cela permet d'obtenir un palier de 26 minutes à 14-16 m³/s à la restitution à l'Isère, en ne faisant qu'un palier de 8 minutes à 20 m³/s en sortie d'usine (Figure 98).



Figure 97 : Vue aérienne de l'usine de Sainte-Lucie de Tallano et de son bassin « tampon » (source Géoportail).

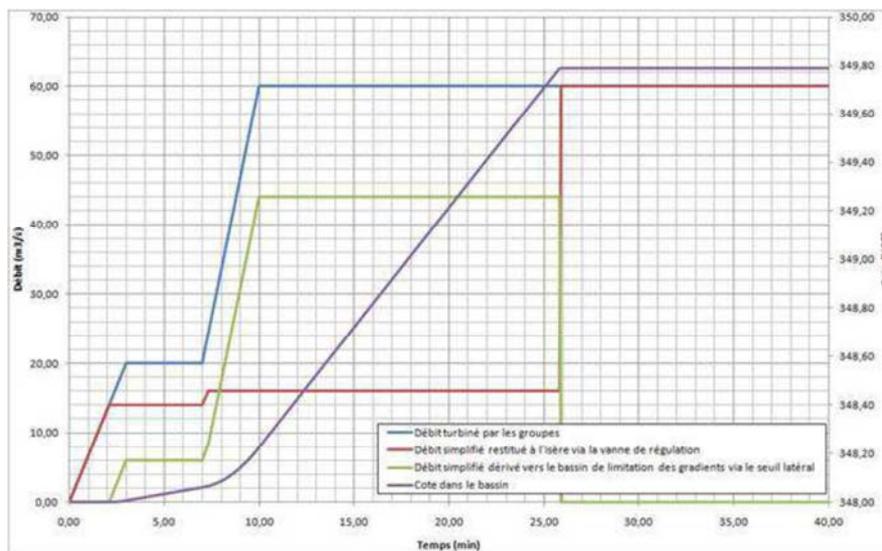


Figure 98 : Hydrogrammes schématisiques des différents débits et niveaux d'eau dans le bassin "tampon" lors du démarrage de l'usine de La Bathie de 0 à 60 m³/s (figure extraite de Galland et al. 2014).

5.3. Fonctionnalité des sites de reproduction

Pour accomplir leur reproduction, les poissons ont besoin de conditions hydrauliques (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement) et de substrats ou supports, et qui sont particuliers et différents selon les espèces. On distingue notamment les espèces dites lithophiles qui déposent ou enfouissent leurs œufs sur ou dans la granulométrie dans des conditions de vitesses d'écoulement assez importantes (truite, saumon, ombre, barbeau, chabot, vandoise, ...) et les espèces phytophiles qui déposent leur œufs sur des supports végétaux, des amas de branches ou de racines, dans des conditions d'écoulement calmes (brochet et perche notamment).

Le fonctionnement par éclusées des aménagements étant susceptible d'induire des variations de débit, et donc des conditions hydrauliques, sur des gammes étendues (de bas débits, jusqu'à 2 à 4

fois le module), il est suspecté que cela pénalise la fonctionnalité des sites de reproduction des espèces sur les zones de granulométrie ou les supports adéquats.

Sur la Maronne (Figure 99) la Dordogne (Figure 100) et le Gave d'Ossau (Figure 101), la fonctionnalité des zones de fraie pour la truite et la saumon a été évaluée via les modélisations hydrauliques par une méthode voisine de celle des microhabitats (Bovee 1982 ; Ginot et al. 1998). Les zones de granulométrie favorable à la fraie ont à chaque fois été délimitées de manière précise lors de la description topographique du cours d'eau, et l'on a tâché d'adopter des courbes de préférence des poissons pour les hauteurs d'eau et vitesse d'écoulement, adaptées à la taille des géniteurs des cours d'eau. Dans ces différentes études de cas, il s'avère que la fonctionnalité des sites de fraie pour la truite ou le saumon est au moins bonne, si ce n'est maximale, sur des gammes de débit étendues au sein des gammes de turbinage. Même si dans certains cas les surfaces favorables décroissent vers les débits maximum turbinés, elles restent au moins de l'ordre de 30-40%. Par contre, la fonctionnalité des sites de fraie diminue rapidement en dessous de débits de 30% à 50% du module. Il est donc préférable que des éclusées soient pratiquées durant la période de reproduction, plutôt que de rester à bas débits, afin que les poissons puissent exploiter les surfaces (sous réserve que les pontes soient ensuite maintenues en eau ; voir paragraphe suivant). L'analyse peut être poussée davantage en comparant ces résultats avec la fréquence des débits durant la période de reproduction des espèces afin de vérifier si des débits favorables sont suffisamment fréquents ou non. De manière encore plus détaillée, les chroniques de débit durant la période de reproduction peuvent être transformées en chroniques des surface favorables à la fraie pour vérifier s'il existe ou non des moments où les surfaces sont fonctionnelles. **Au final, dans les différentes études de cas présentées, il n'a pas été jugé nécessaire d'émettre des préconisations de gestion des débits spécifiquement vis-à-vis de la fonctionnalité des zones de fraie pour la truite et la saumon.**

figure 6 - S.P.U. avant aménagement - stade fraie

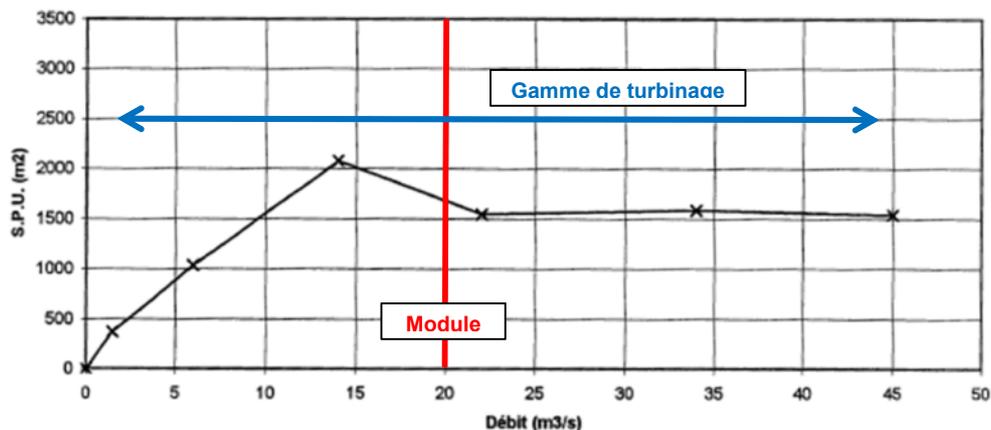


Figure 99 : Evolution de la surface favorable à la fraie du saumon en fonction du débit sur la Maronne (figure extraite de SIEE 1999).

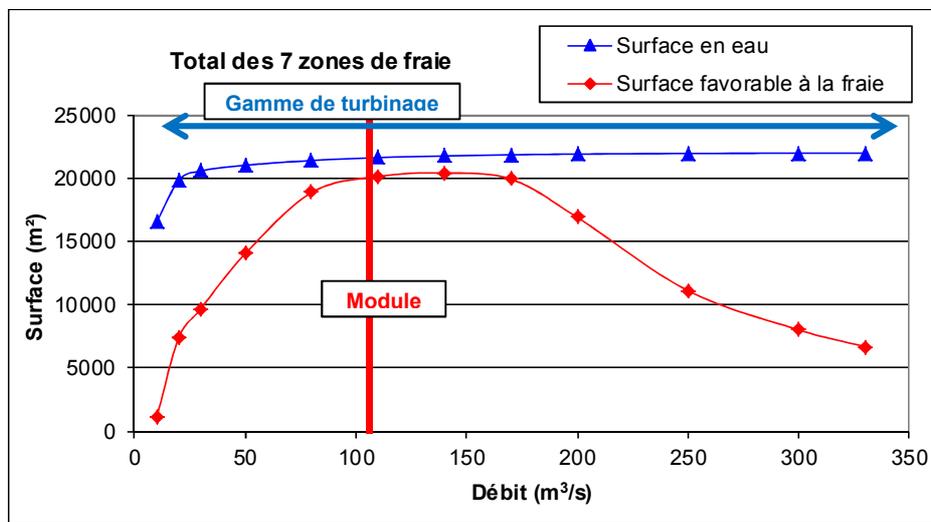
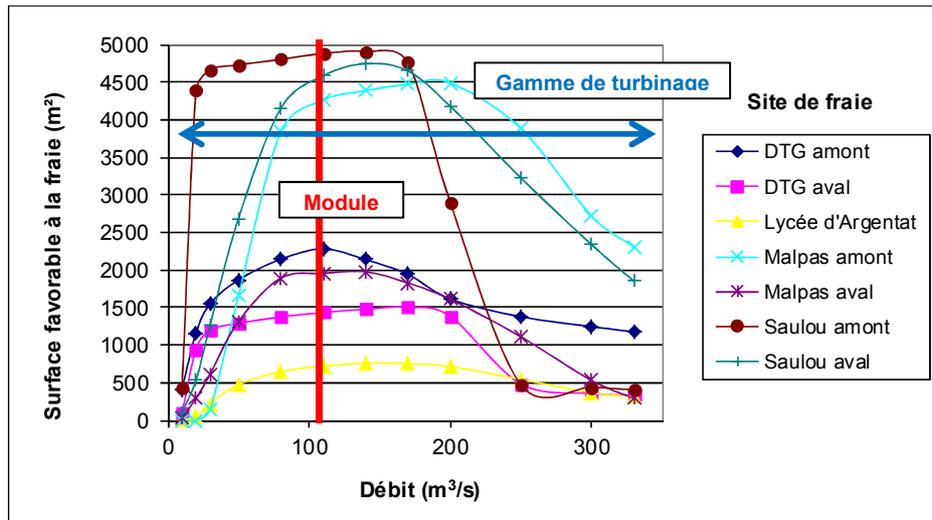
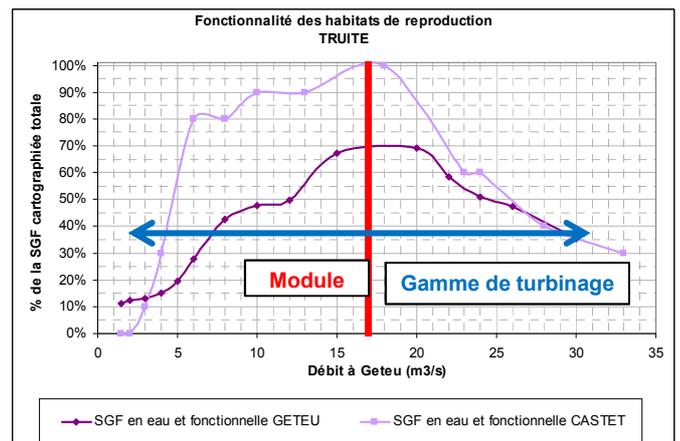
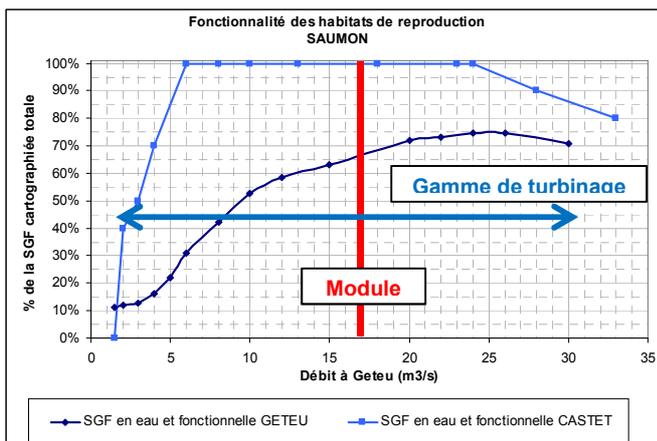


Figure 100 : Evolution de la surface favorable à la fraie du saumon en fonction du débit sur la Dordogne (figure extraite de Courret et al. 2006a).



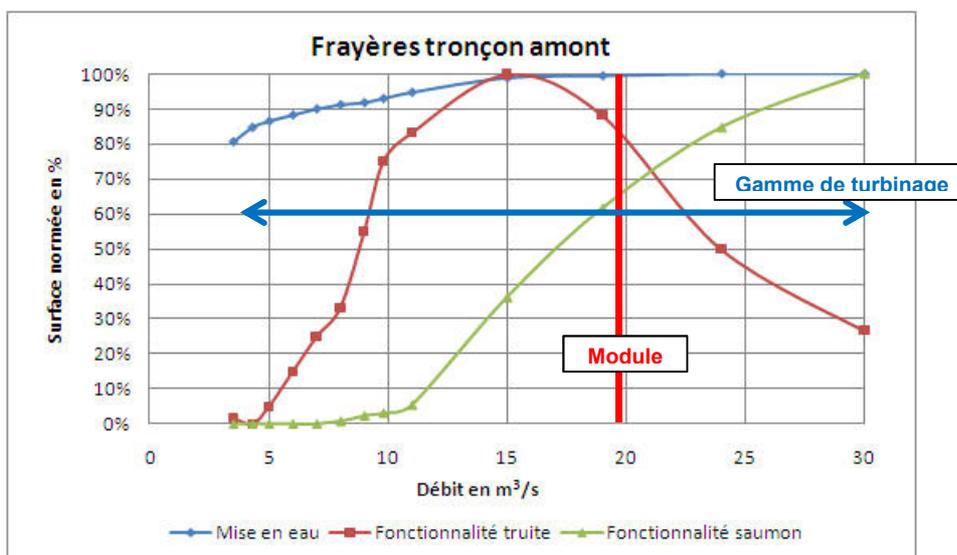


Figure 101 : Evolutions des surfaces favorables à la fraie de la truite et du saumon en fonction du débit sur différents tronçons du Gave d'Ossau (tronçon Geteu-Castet en haut, figure extraite de Vandewalle et al. 2012b ; tronçon aval Castet en bas, figure extraite d'Agerin 2012).

Dans le cas de régimes qui présentent en période de reproduction de multiples éclusées de courtes durées au sein de la journée, comme par exemple sur la Garonne à l'aval de l'aménagement de Plan d'Arem (Figure 102), on peut toutefois se demander si les éclusées sont assez longues pour que les poissons puissent en profiter pour accomplir leur reproduction, et en l'occurrence creuser leur frayère pour les salmonidés. Dans de tels cas, il serait alors peut-être judicieux de comparer la durée des éclusées avec les informations disponibles sur les durées de creusement des frayères et de réaliser un suivi in situ de la reproduction. Si la fonctionnalité de sites de reproduction s'avère insuffisante, il pourrait être réfléchi à des modifications des caractéristiques des éclusées, avec par exemple des éclusées plus longues à des débits plus faibles (volume constant).

La fonctionnalité des sites de reproduction des autres espèces que la truite ou le saumon n'a pas été étudiée dans les études de cas présentées, ni dans la bibliographie à notre connaissance. Ce serait envisageable pour certaines espèces lithophiles dont les préférences sur les conditions hydrauliques et la granulométrie sont connues (ombre, barbeau, vandoise, ...).

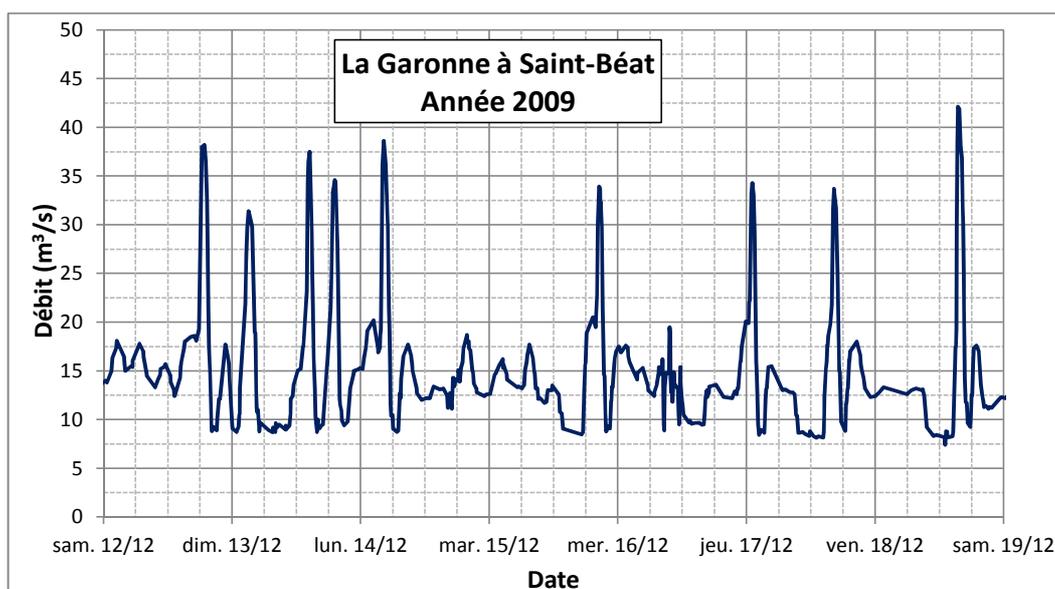


Figure 102 : Hydrogramme de la Garonne à Saint-Béat durant une semaine en décembre 2009.

5.4. Exondation des frayères ou de pontes

Lors des retours à bas débit, des sites utilisés auparavant par les poissons pour se reproduire peuvent se retrouver hors d'eau, leurs pontes étant alors exondées. Cela peut rapidement compromettre partiellement, voire totalement leur survie selon l'espèce et les conditions de l'exondation (durée, humidité et température au sein de la frayère).

5.4.1. Constats d'exondation de frayères ou de pontes

Les suivis annuels ont permis de montrer qu'avant la mise en place de mesures spécifiques (période 2000-2004), de 4% à 15% des frayères de grands salmonidés sur la Dordogne et de 5% à 12% sur la Maronne étaient exondées chaque hiver (Figure 103). Tout en sachant que sur la Dordogne le retour au débit minimal réglementaire de 10 m³/s en période hivernale n'était déjà pas fréquent et que sur la Maronne un débit de base hivernal de l'ordre de 4 m³/s (20% du module) était déjà en place et permettait un gain de frayères maintenues en eau évalué à 17.7% durant 3 années de suivis de 2002 à 2004 (Lascaux et al. 2004).

Sur le Gave d'Ossau, un suivi durant l'hiver 2009-2010 que les proportions de frayères exondées (dôme ou totalement) étaient d'environ 20% sur le tronçon Confluence Valentin – Geteu, 57% sur le tronçon Geteu – Castet et < 20% sur le tronçon Castet – Raguette (Armand et Courret 2011).

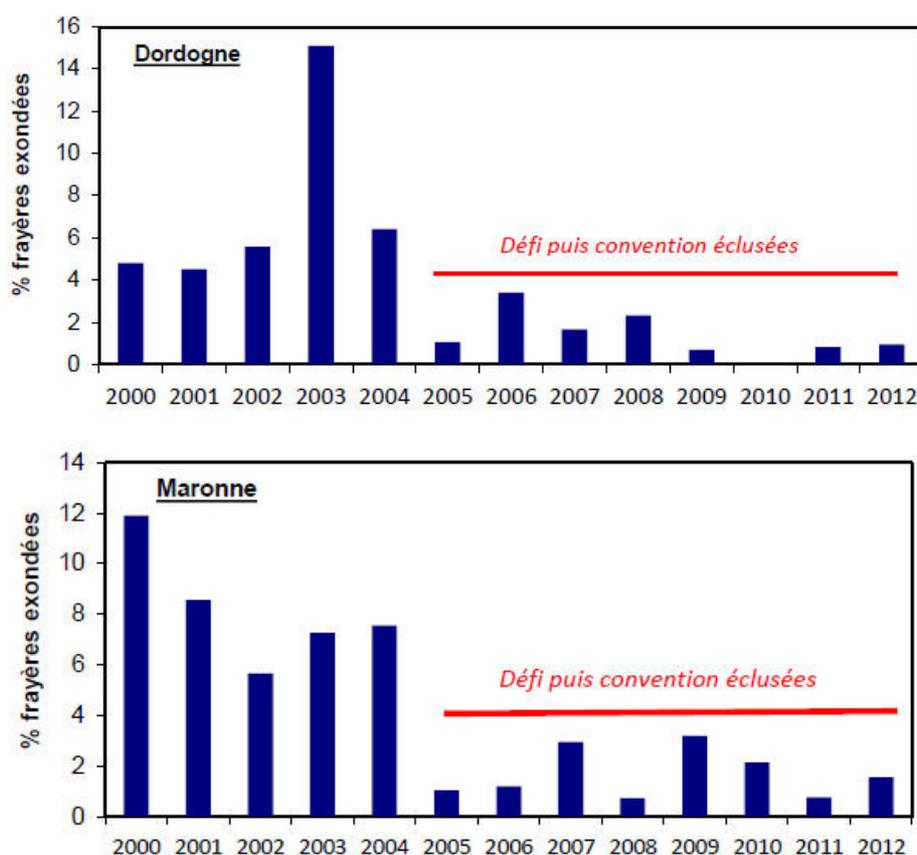


Figure 103 : Pourcentage de frayères de grands salmonidés exondées sur la Dordogne et la Maronne de 2000 à 2012 (données ECOGEA pour MIGADO ; figure extraite du bilan de la convention 2008-2012 de réduction des impacts des éclusées sur le bassin de la Dordogne¹⁷).

Des constats d'exondation de pontes d'autres espèces, dont notamment l'ombre, la vandoise, le chabot, le brochet et la perche, ont été réalisés sur la Dordogne et la Maronne (Lascaux et Cazeneuve 2008 ; Cazeneuve et al. 2009). Les difficultés de repérage des pontes de ces espèces rend toutefois difficile, voire impossible, l'évaluation des proportions de pontes exondées.

¹⁷ http://www.limousin.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_convention_eclusees_2008-2012.pdf

5.4.2. Mise en eau des surfaces de granulométrie favorables à la fraie des truites et saumons

Sur la **Dordogne**, via la modélisation hydraulique, il a été étudié la mise en eau des surfaces de granulométrie favorables à la fraie des grands salmonidés, sur 7 sites délimités lors de la description topographique des stations, en sachant que ces sites étaient réellement exploités par les poissons grâce aux suivis. Par ailleurs, les débits maintenant en eau les frayères observées lors des suivis ont été déterminés par recoupement entre les mesures d'enneigement et l'évolution des niveaux d'eau au droit des sites (Figure 104). On observe que la mise en eau des surfaces de granulométrie favorables est déjà de 72% au débit minimum réglementaire de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, puis augmente rapidement jusqu'à $25\text{-}30 \text{ m}^3/\text{s}$ pour dépasser 90%. La progression est ensuite assez linéaire ; on atteint environ 98% à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (proche du module). On observe en revanche que seulement 30% des frayères observées seraient maintenues en eau au débit minimum réglementaire de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. La proportion augmente rapidement de manière linéaire jusqu'à plus de 90% pour un débit d'environ $30 \text{ m}^3/\text{s}$. On atteint ensuite 100% pour un débit d'environ $60 \text{ m}^3/\text{s}$ de manière progressive.

Il s'avère donc que la sensibilité effective des frayères de grands salmonidés à l'exondation est bien plus importante que ne le laisse présager l'évolution de la mise en eau des surfaces de granulométrie favorables. Cela est lié au fait que les poissons n'exploitent pas de manière homogène les surfaces délimitées, mais utilisent préférentiellement les zones en bordure, généralement à moins de 5 m de la berge, plus sensibles à l'exondation. Il est par contre rassurant de constater que les débits en-dessous desquelles les pourcentages diminuent rapidement sont cohérents entre les 2 approches. L'étude de la mise en eau des surfaces de granulométrie favorables à la fraie des grands salmonidés via la modélisation peut donc constituer un bon outil pour déterminer des valeurs minimales de débit pour le maintien en eau des frayères de salmonidés. Par contre, il faut rester prudent sur l'interprétation des pourcentages de mise en eau et plutôt interpréter la forme de la courbe.

Ces résultats ont amené à préconiser **le maintien d'un débit de base de 30 puis 35 m^3/s à l'aval du Sablier, soit 28-33% du module, du 15 novembre au 15 mars**, les mesures liées à l'émergence des alevins prenant ensuite le relai. Cela a été mis en œuvre à partir de l'hiver 2003-2004. En complément de cette mesure sur la gestion des débits, des opérations de travaux ont été conduites sur les sites encore problématiques afin de les niveler et de garantir leur mise en eau pour le débit minimum (Chanseau et al. 2008 ; Figure 105). Des opérations similaires ont également été menées sur la Maronne. La conjonction de ces mesures permet aujourd'hui de maintenir chaque année environ 98% des frayères de grands salmonidés en eau (Figure 103).

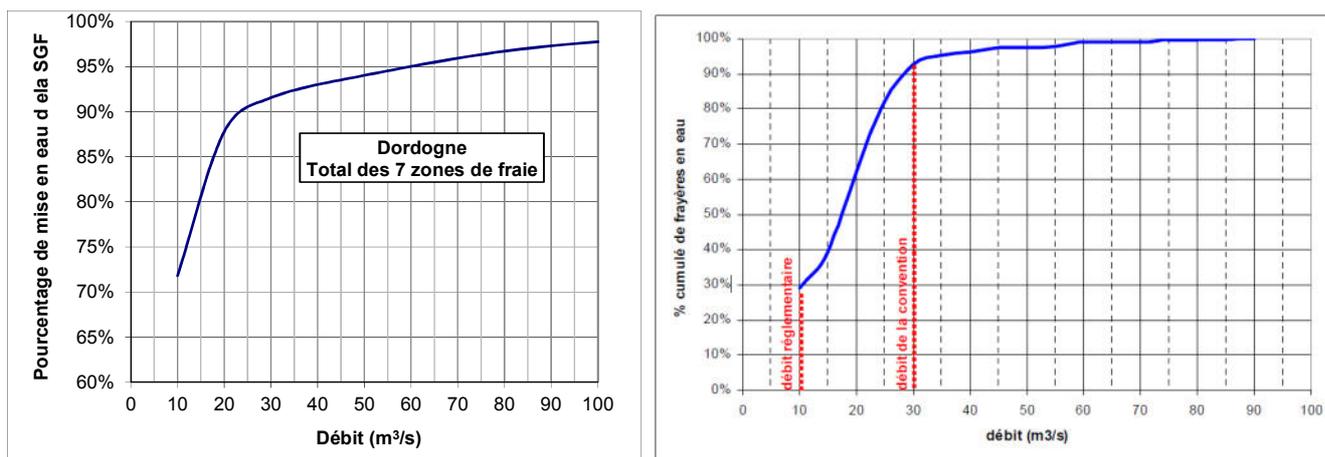


Figure 104 : A gauche, évolution du pourcentage de mise en eau des Surfaces de Granulométrie Favorable (SGF) à la fraie des grands salmonidés sur la Dordogne (figure extraite de Courret et al. 2006a). A droite, pourcentages cumulés de frayères de grands salmonidés maintenues en eau en fonction du débit sur la Dordogne (figure extraite de Vandewalle et al. 2008).

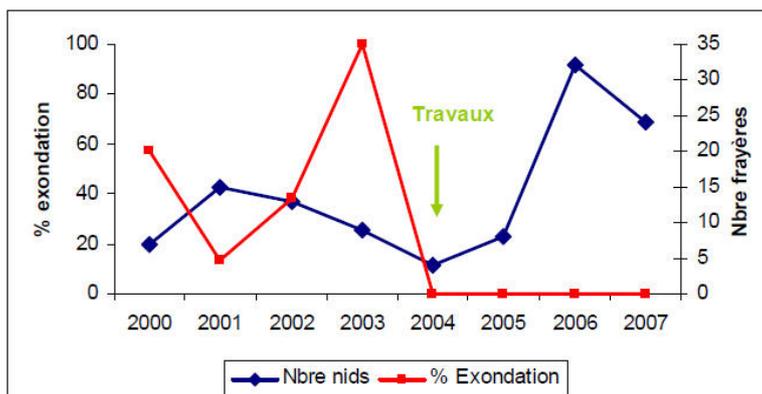


Figure 105 : En haut : travaux sur la zone de fraie du « Lycée d'Argentat » sur la Dordogne ; site avant travaux (à gauche) et après travaux (à droite) pour un même débit ($32 \text{ m}^3/\text{s}$). En bas : nombre de frayères et % d'exondation sur le site de 2000 à 2008 (figure extraite de Chanseau et al. 2008).

Sur le **Gave d'Ossau**, la mise en eau des surfaces de granulométrie favorables à la fraie des salmonidés, délimitées lors de la description topographique des stations, a été étudiée via la modélisation hydraulique (Figure 106). Sur le tronçon Geteu-Castet, sur les 335 m^2 de granulométrie favorable dans la station de Geteu (seulement 10 m^2 d'un seul tenant dans la station de Castet), seuls 20% sont en eau au débit minimum de $1.5\text{-}2 \text{ m}^3/\text{s}$. La mise en eau est rapide et linéaire jusqu'à dépasser 80% à $9 \text{ m}^3/\text{s}$, puis ralentit pour plafonner vers 95% au-delà de $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur le tronçon aval Castet, sur les 176 m^2 de granulométrie favorable dans la station amont (seulement 7 m^2 dans la station aval), 80% sont déjà en eau pour un débit de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. La mise en eau des surfaces restantes est assez progressive et atteint 90% à $7\text{-}8 \text{ m}^3/\text{s}$ et 100% à $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est intéressant de noter que les évolutions de mise en eau des surfaces de granulométrie favorables sur les 2 tronçons sont bien cohérentes avec les constats d'exondation réalisés. Ces résultats ont amené à préconiser **le maintien de débits minima hivernaux de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval de l'usine de Geteu, soit 47% du module, et de $6.5\text{-}7.0 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval de Castet, soit 34.4-37% du module**, en visant le maintien en eau de l'ordre de 80-90% des surfaces et en tenant compte de la faisabilité hydrologique. Ces mesures n'ont pas été mises en œuvre jusqu'à présent.

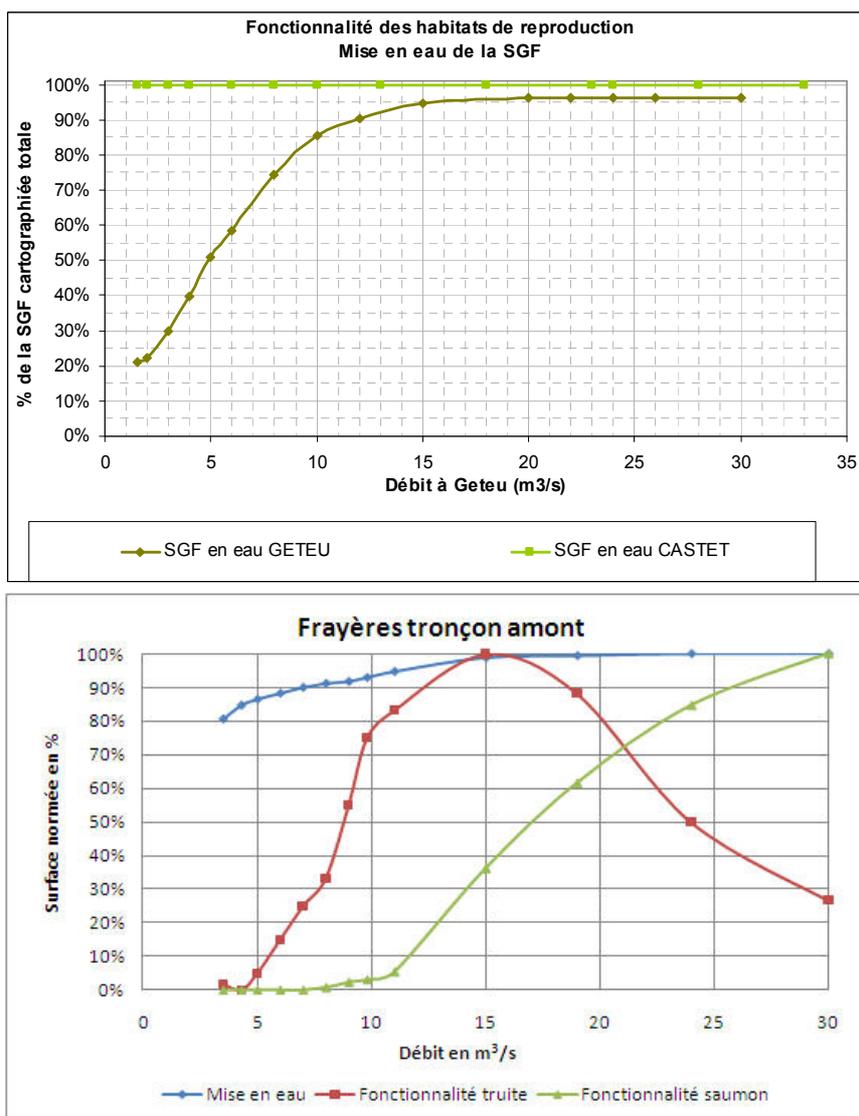


Figure 106 : Evolution du pourcentage de mise en eau des Surfaces de Granulométrie Favorable (SGF) à la fraie des salmonidés sur le Gave d'Ossau (tronçon Geteu-Castet en haut, figure extraite de Vandewalle et al. 2012b ; tronçon aval Castet en bas, figure extraite d'Agerin 2012).

5.4.3. Discussions la problématique d'exondation des frayères ou des pontes

Il faut avoir conscience que les perturbations du transit sédimentaire induites par les aménagements hydroélectriques, en particulier le blocage total des fractions grossières dans les grandes retenues, peuvent avoir tendance à exacerber la problématique d'exondation des frayères. En effet, la raréfaction de la granulométrie favorable peut pousser les poissons à davantage utiliser des zones de bordure où cette granulométrie subsiste, et ainsi augmenter la sensibilité de leur frayère à l'exondation, et en corolaire les débits nécessaires à leur maintien en eau. C'est particulièrement le cas sur la Dordogne et la Maronne et probablement aussi sur le Gave d'Ossau.

L'augmentation de la fréquence des débits d'éclusées par rapport à une hydrologie naturelle en période de reproduction peut également être un facteur poussant les poissons à davantage utiliser des zones de bordure où subsistent trouvent des conditions hydrauliques favorables, les vitesses d'écoulement vers le centre du chenal étant trop élevées.

Dans les différentes études de cas, on s'est focalisé sur le maintien en eau des frayères. Aux débits préconisés, l'ennoiement d'une part des frayères reste très faible, de l'ordre de quelques centimètres. Les vitesses d'écoulement au-dessus le sont également. Si les retours au débit de base sont fréquents ou longs, on peut alors se poser des questions sur les conditions de circulation

intragravellaire de l'eau dans les frayères qui sont essentielles pour la bonne oxygénation des œufs (Geist et al. 2008). A notre connaissance, ces questions n'ont pas été étudiées vis-à-vis du fonctionnement par éclusées des aménagements hydroélectriques et mériteraient peut-être d'être investiguées.

La mise en eau des sites de reproduction des autres espèces lithophiles que la truite ou le saumon (ombre, barbeau, vandoise, ...) n'a pas été étudiée dans les études de cas présentées, ni dans la bibliographie à notre connaissance. Ce serait envisageable pour celles dont les préférences sur les conditions hydrauliques et la granulométrie sont connues.

Pour les espèces phytophiles (brochet, perche), les suivis de leur reproduction dans les annexes hydrauliques de la Dordogne (couasnes) ont montré que ces espèces déposent leurs pontes dans des profondeurs minimales de l'ordre de 50 cm (Lascaux et Cazeuneuve 2008). Il est donc préconisé de limiter la baisse du débit de façon à ne pas abaisser les niveaux d'eau de plus de 50 cm sur les sites de reproduction, à partir du début de la reproduction (en mars pour le brochet et en avril pour la perche sur la Dordogne) et durant 5 à 6 semaines pour chacune des espèces (Lascaux et Cazeuneuve 2008). La difficulté réside dans le fait que la localisation et les débits auxquels se produit la reproduction de ces espèces s'avèrent très variable selon les années. Un suivi du régime thermique « en temps réel » peut s'avérer utile pour essayer de déterminer le début de leur reproduction. La thermie des annexes hydrauliques peut toutefois être significativement différente de celle du cours principale, ce qui ne facilite pas les suivis. Des prospections régulières des sites potentiels de reproduction constituent peut-être la meilleure solution.

5.5. Echouage-piégeage lors des baisses de débit

Lors des baisses de débit, les poissons qui se trouvent dans les zones qui s'assèchent ou se déconnectent du lit mouillé risquent de ne pas réussir à suivre le retrait de la surface mouillée ou de ne pas quitter à temps les dépressions ou les bras secondaires qui se déconnectent. Ils peuvent ainsi se retrouver échoués ou piégés. Dès lors que les poissons se retrouvent complètement hors d'eau, ils meurent rapidement par asphyxie. Dans les dépressions qui restent en eau, les poissons peuvent être surexposés à de la prédation ; les conditions de vie (thermie et oxygénation en particulier) peuvent également y devenir difficile, voire impossible.

5.5.1. Constats d'échouage-piégeage

Sur la Maronne, les suivis ont permis de mettre en évidence que les échouage-piégeages touchent non seulement les alevins de saumon et de truite, mais également d'autres espèces comme l'ombre, le chabot ou la lamproie de planer ; 11 espèces sont concernées au total (Lascaux et al. 2006). Pour les alevins de salmonidés, le recoupement d'une cartographie et une typologie des sites d'échouage-piégeage (a minima 26 sur le tronçon de 6,3 km ; 10% du linéaire de berge) avec une typologie des baisses d'éclusées et avec des mortalités moyennes par type de site et d'éclusées durant la période de sensibilité a permis d'évaluer qu'environ 50 000 alevins sont morts sur la période 2003-2007, ce qui représenterait plus de 60 % de la production à laquelle on pouvait s'attendre compte tenu de l'activité de reproduction sur le tronçon (Lascaux et al. 2008). Ces mortalités importantes se produisent alors même que le débit minimum d'environ 4 m³/s (20% du module) était maintenu durant la période de plus grande sensibilité. Cela montre que ce débit minimum qui peut apparaître conséquent ne se révèle encore pas suffisant dans le cas de la Maronne et qu'il ne constitue pas le seul paramètre sur lequel il faut intervenir pour éviter toute mortalité ou presque. Des mortalités importantes ont de plus été constatées dans les bras secondaires qui se déconnectaient lors du retour estival au débit réservé réglementaire de 0.5 m³/s. Ces pertes ont notamment pu être évaluées à environ 6 000 alevins de truite et saumon en 2004 et 4 000 alevins en 2005 (Lascaux et al. 2006).

Sur la Dordogne, les suivis ont permis de mettre en évidence que les échouage-piégeages touchent 13 espèces sur la partie amont de la Dordogne et 20 espèces sur la partie aval (Cazeneuve et Lascaux, 2008 ; Figure 107 et Figure 108). Pour les alevins de salmonidés, le recoupement d'une cartographie et typologie des sites d'échouage-piégeage (a minima 20 sur le tronçon entre Argentat et Brivezac ; 13% du linéaire de berge) avec une typologie des baisses d'éclusées et avec des mortalités moyennes par type de site et d'éclusées durant la période de sensibilité a permis d'évaluer qu'environ 45 000 alevins sont morts sur la période 2005-2008 (Cazeneuve et al. 2009).

Sur la basse vallée de l'Ain, les suivis ont permis de mettre en évidence que les échouage-piégeages touchent 21 espèces (Aubert et al. 2013).

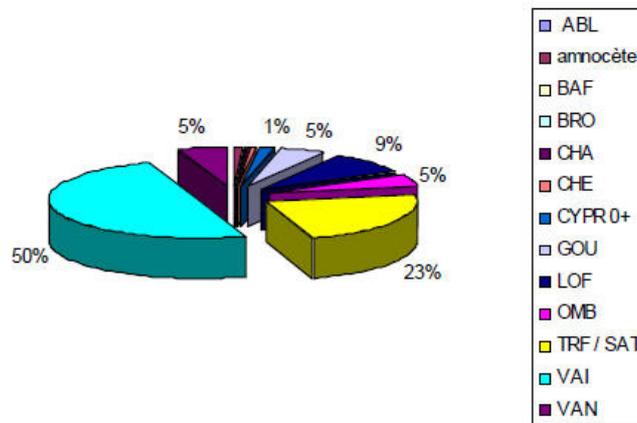


Figure 107 : Espèces récoltées et abondances relatives dans les suivis d'échouage-piégeage sur la Dordogne « amont » sur la période 2005-2008 (figure extraite de Cazeneuve et Lascaux. 2008)

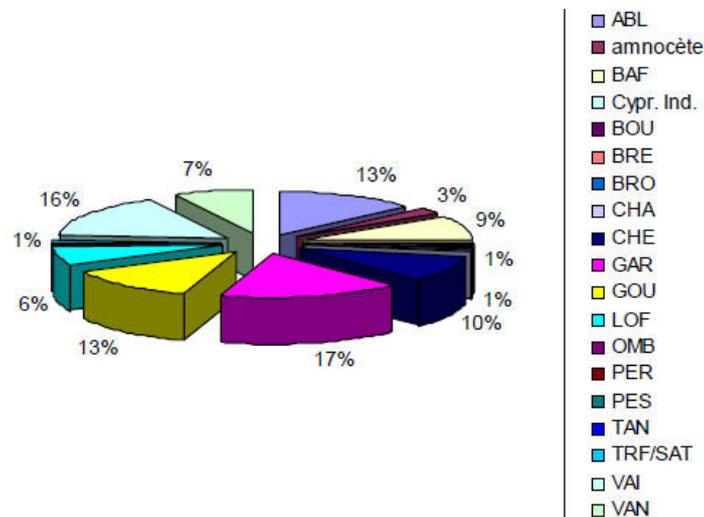


Figure 108 : Espèces récoltées et abondances relatives dans les suivis d'échouage-piégeage sur la Dordogne « aval » sur la période 2005-2008 (figure extraite de Cazeneuve et Lascaux. 2008).

Trois types de contextes morphologiques où peuvent se produire des échouage-piégeages peuvent être distingués, les mesures de mitigation envisageables pour chacun étant différentes (Figure 109) :

- les cordons rivulaires, composés de chenaux et de dépressions au sein de la ripisylve, plus ou moins interconnectés, avec potentiellement de multiples points d'alimentation depuis le chenal principal,
- les bancs de galets en lit mineur, qui peuvent être plus ou moins végétalisés,
- et les bras secondaires.

Concernant les cordons rivulaires, leur formation est probablement favorisée par l'écrêtage des crues par les aménagements hydroélectriques. En réduisant la fréquence des crues qui « rajeunissent » la végétation, cela permet le développement de la végétation à bois dur sur les rives. Cela semble en particulier le cas sur la Dordogne. Sur ce cours d'eau, le phénomène a de plus probablement été amplifié par le suréquipement de 220 m³/s à 340 m³/s en 1989. Cette augmentation du débit turbiné a provoqué la mise en eau régulière de franges rivulaires qui depuis 1957 étaient bien plus rarement ennoyées et sur lesquelles la végétation s'est développée.

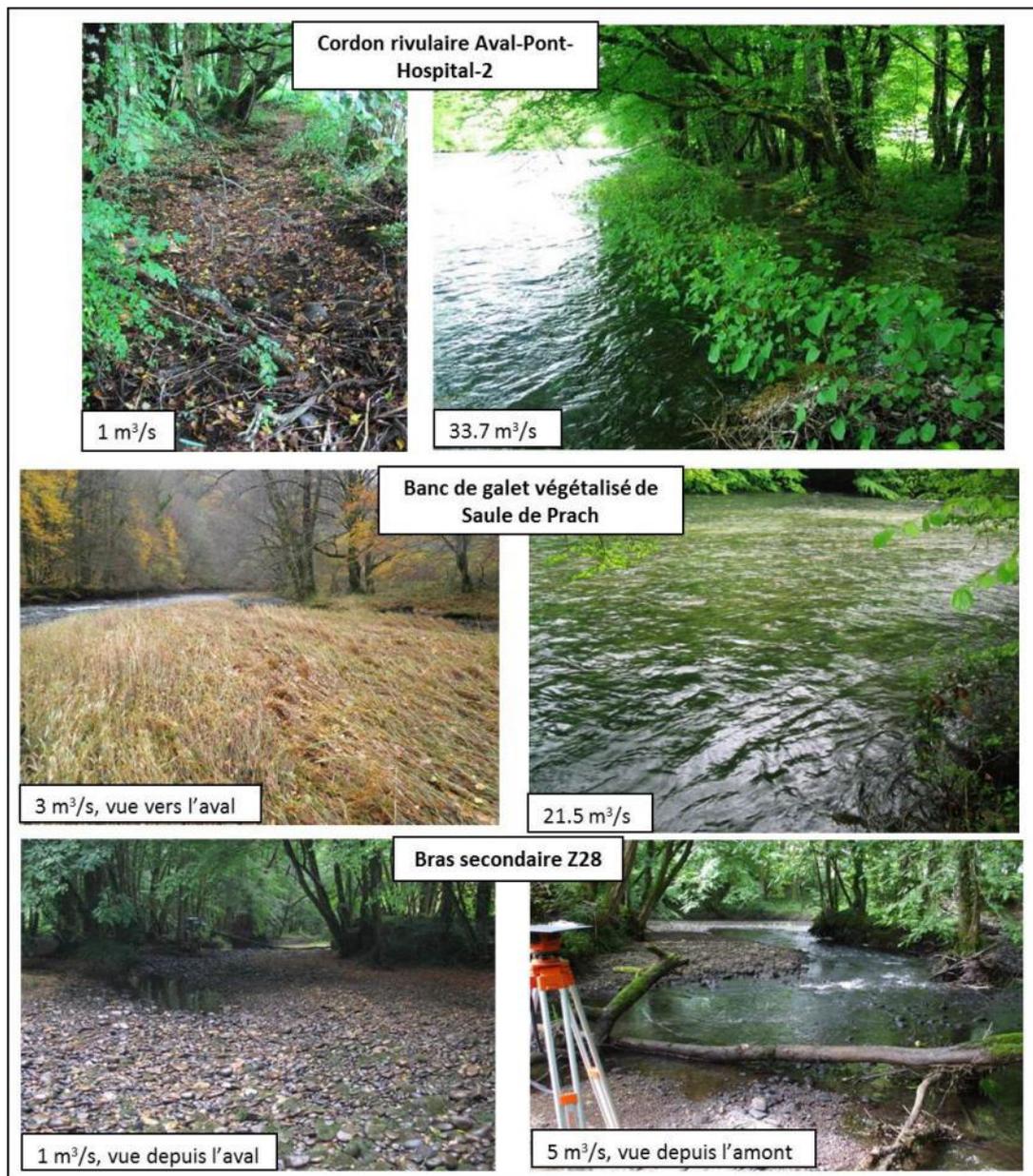


Figure 109 : Illustration de la typologie des sites d'échouage-piégeage sur la Maronne.

5.5.2. Taille et période de sensibilité à l'échouage-piégeage des alevins de truites et saumons

Selon la bibliographie (Hvidsten 1985 ; Olson et Metzgar 1987 ; Hoffart et al. 2003) et le suivi d'ECOGEA pour MIGADO sur la Maronne (Lascaux et al. 2006) et la Dordogne (Cazeneuve et al. 2009c), les alevins de salmonidés s'avèrent principalement sensibles au phénomène d'échouage-piégeage jusqu'à une taille d'environ 35 mm pour l'échouage sur les bancs de galets en lit mineur, et jusqu'à environ 50 mm pour le piégeage dans les dépressions des cordons rivulaires et dans les bras secondaires. Au-delà, les capacités de nage des alevins se développant, les poissons semblent quitter progressivement les habitats de bordure pour occuper des habitats aux abords du chenal, moins sensibles à l'échouage-piégeage. Ils présentent peut-être également une meilleure réactivité pour s'adapter aux baisses de niveau d'eau. Selon les modèles de croissance des salmonidés (Lagarrigue 2000), des tailles de 35 et 50 mm sont atteintes après environ 320-350 degrés-jour et 800-900 degrés-jour après l'émergence respectivement. Le piégeage d'alevins de plus grande taille, voire de juvéniles et d'adultes, restent possible et a été en particulier constaté lors de la déconnection de bras secondaires.

Sur la Maronne, compte tenu du régime thermique, la date médiane d'émergence des truites varie selon les années entre fin mars et fin avril, et la date médiane d'atteinte d'une taille de 35 mm varie entre mi-avril et mi-mai. Pour les saumons, la date médiane d'émergence varie entre début et fin avril, et la date médiane d'atteinte d'une taille de 35 mm varie entre début mai et fin mai (Lascaux et al. 2006 et 2008). Il faut avoir conscience que la dispersion autour de ces dates médianes peut être de l'ordre de 2-3 semaines avant et après. Globalement, la période de plus grande sensibilité à l'échouage-piégeage dure pratiquement deux mois et demi, de fin mars à début juin.

Sur le Gave d'Ossau à l'aval de l'usine de Geteu, du fait d'un régime thermique plus froid, il a été évalué qu'au printemps 2010 l'émergence des truites et saumons s'est produit de début avril à début juin, et qu'une taille de 35 mm était atteinte par les alevins entre fin mai et début juillet pour les truites, et entre mi-juin et mi-juillet pour les saumons (Vandewalle et al. 2012b).

Les périodes de sensibilité des alevins de salmonidés varient ainsi sensiblement selon les régimes thermiques des cours d'eau, ainsi que selon les années pour un même cours d'eau. Un suivi pluriannuel du régime thermique est donc très utile pour pouvoir les préciser et bien cibler la mise en œuvre des mesures de mitigation. Il faut avoir conscience que l'éventuelle refroidissement de la thermie par les eaux turbinées va avoir comme conséquence de prolonger cette période de sensibilité.

L'échouage-piégeage des autres espèces n'a pas été étudié comme pour les truites et saumons et les tailles et périodes de sensibilité n'ont pas été davantage investiguées ici. Il serait utile de récapituler les informations disponibles sur ces espèces.

5.5.3. Mesures de mitigation envisageables contre l'échouage-piégeage

Les mesures de mitigation contre l'échouage-piégeage sont différentes selon les contextes morphologiques. Afin de limiter l'échouage des alevins sur les **bancs de galets en lit mineur**, on peut envisager :

- **de limiter les surfaces exondées** et par conséquent le domaine de variation du débit. Cela s'obtient principalement par le maintien d'un débit minimal permettant de garder en eau la majeure partie du lit du cours d'eau, mais la limitation du débit maximum peut également y participer.
- **d'adopter un gradient de baisse maximal du niveau d'eau** pour que les poissons présents sur les zones exondées aient le temps de détecter la baisse et se suivre le retrait de la surface mouillée.

Les différents travaux montrent en effet que les échouages d'alevins de salmonidés semblent d'autant plus importants que le gradient de baisse du niveau d'eau est élevé (Olson and Metzgar 1987 ; Bradford et al. 1995 ; Bradford 1997 ; Salveit et al. 2001 ; Halleraker et al. 2003 ; Lascaux et al. 2006). Les préconisations pour limiter ce phénomène varient selon les auteurs entre 10-15 cm/h et 2.5 cm/h. La morphologie des zones exondées joue également un rôle. La sensibilité des alevins à l'échouage semble en particulier augmenter avec la taille du substrat et la présence d'abris, qui favorisent la formation de micro-poches (Salveit et al. 2001). La végétalisation des bancs semble également favoriser la sensibilité des alevins à l'échouage.

L'activité des poissons, en fonction de la saison (en relation avec la température de l'eau) et des conditions de lumière (jour/nuit), semble également influencer sur leur sensibilité à l'échouage. Lorsque les poissons sont actifs dans la colonne d'eau pour la nutrition, ils seraient moins sensibles que lorsqu'ils sont au repos, au fond sur le substrat. On pourrait alors envisager d'adapter le timing des éclusées pour que les baisses interviennent pendant les périodes d'activités des alevins. Le problème est que les poissons semblent pouvoir être actifs de jour comme de nuit, selon les conditions environnementales (température, cycle lunaire, conditions météorologiques, ...). Les informations de la bibliographie sont ainsi contradictoires avec parfois une plus grande sensibilité le jour (Bradford 1995 ; Bradford 1997 ; Salveit et al. 2001) et parfois une plus grande sensibilité la nuit (Halleraker et al. 2003). En l'état actuel des connaissances, il ne paraît donc pas pertinent d'essayer d'adapter le timing des baisses d'éclusées pour limiter l'échouage des alevins de salmonidés. Le décalage temporel d'une éclusées au fur et à mesure qu'elle se propage vers l'aval peut également compliquer et limiter l'intérêt de telles mesures.

Le piégeage des alevins dans les **dépressions des cordons rivulaires** lors des baisses de débit semble d'autant plus faible que la vitesse d'abaissement du niveau d'eau est faible. Par contre,

cela ne semble pas pouvoir être éliminé, même pour de très faibles vitesses d'abaissement (Higgins et Bradford 1996 ; Bradford 1997). Les mesures portant sur la vitesse d'abaissement du niveau d'eau ne semblent donc pas constituer des mesures de mitigation efficaces du piégeage des alevins. Pour éviter à coup sûr leur piégeage au sein d'une dépression, on peut envisager :

- **soit que cette dépression ne soit pas déconnectée** lors des baisses de débit, par le maintien d'un débit minimal,
- **soit qu'elle ne soit pas mise en eau** lors des hausses de débit, en limitant le débit maximum turbiné lors des éclusées.
- **soit supprimer la dépression** en intervenant sur la morphologie du cours d'eau.

Dans le cas des **bras secondaires**, la seule solution pour éviter les piégeages qui peuvent être massifs, c'est d'éviter leur déconnection et donc d'**assurer leur alimentation pérenne pour le débit minimum**. Si jamais cela n'est pas faisable, car la prise d'eau et le profil du bras se trouvent trop surélevés par rapport aux niveaux d'eau dans le chenal principal, il faut essayer alors de **limiter le nombre de cycles de connexion – déconnection**, comme cela serait le cas en hydrologie naturelle, soit probablement 1 à quelques fois durant le printemps.

Dans les paragraphes suivant, on présente différents types de résultats produits dans les études de cas et qui ont permis d'étayer des mesures de mitigation contre l'échouage-piégeage : évolution des largeurs ou surfaces mouillées, relation entre gradients de niveau d'eau et gradient de débit, et débits de mise en eau des dépressions de cordons rivulaires.

5.5.4. Evolution des largeurs ou surfaces mouillées en fonction du débit

Sur la **Dordogne** (Figure 110), les largeurs mouillées des 3 secteurs modélisés augmentent rapidement depuis $10 \text{ m}^3/\text{s}$, jusqu'à $40\text{-}50 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Malpas et Saulou et jusqu'à $75 \text{ m}^3/\text{s}$ pour Saulières-Rodanges. Pour ce dernier secteur, la largeur mouillée passe notamment d'environ 54 m à $10 \text{ m}^3/\text{s}$, à 63.5 m à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ et 69 m à $75 \text{ m}^3/\text{s}$ (+28% par rapport à $10 \text{ m}^3/\text{s}$). Elle augmente ensuite plus lentement, jusqu'à atteindre environ 76 m à $380 \text{ m}^3/\text{s}$, débit maximum turbinable par les usines du Sablier sur la Dordogne et de Hautefage sur la Maronne.

Sur la **Maronne** (Figure 111), la mise en eau de 9 sites où des échouage-piégeages ont été observés a été étudiée spécifiquement via le recoupement de topographie locales et de mesures de niveaux d'eau à différents débits. Avec la méthodologie de description employée, les surfaces en eau sont nulles à un débit de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, sauf pour le bras Z39 déjà quelque peu alimenté. La surface du bras Z39 augmente particulièrement vite jusqu'à un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ où 75% de sa surface est en eau. Quatre sites (Saule-de-Prach, Z1-Amont-RG3, Z28 et Amont-Pont-Basteyroux-RG) présentent une mise en eau rapide jusqu'à des débits de $10\text{-}15 \text{ m}^3/\text{s}$, puis plus progressive au-delà. Un débit de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ permet la mise en eau d'environ 60%-80% de leur surface ; un débit de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ permet la mise en eau d'environ 80-90% de leur surface. Quatre sites (Z1-milieu-RD, Grafouillere-Z103, Roc-de-Prach et Hosp2) présentent une évolution progressive de leur surface mouillée dont l'augmentation ne ralentit qu'au-delà de $30\text{-}35 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sur la **Creuse** (Figure 112), les largeurs mouillées des 4 stations modélisées présentent des comportements très différents. La station de Ciron présente un gain de surface mouillée très faible du fait d'une morphologie très encaissée ; 90% de largeur atteinte au débit maximum turbiné est déjà en eau à bas débit. A l'inverse, la largeur moyenne à Roche-au-Moine passe d'environ 40 m (60%) à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à 65 m (100%) à $75 \text{ m}^3/\text{s}$. Elle augmente très rapidement entre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (gradients supérieurs à $2.5\%/[\text{m}^3/\text{s}]$, rapidement entre $5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (gradients entre 2.5 et $1\%/[\text{m}^3/\text{s}]$), puis plus lentement au-delà (gradients inférieurs à $1\%/[\text{m}^3/\text{s}]$). Cette évolution s'explique par la mise en eau progressive d'un banc en rive gauche. Pour la station de Moulin neuf, l'augmentation très rapidement entre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4 \text{ m}^3/\text{s}$ est liée à la connexion de bras secondaires.

Sur le **Gave d'Ossau** (Figure 113), les largeurs moyennes augmentent très rapidement entre 1 et $6\text{-}8 \text{ m}^3/\text{s}$ selon les stations, avec des gradients supérieurs à $2\%/[\text{m}^3/\text{s}]$. A bas débit, elles ne représentent qu'autour de 60-65% de la surface en eau au débit maximum de la gamme de turbinage ($30 \text{ m}^3/\text{s}$). A $6\text{-}8 \text{ m}^3/\text{s}$, elles atteignent entre environ 75% et 90%.

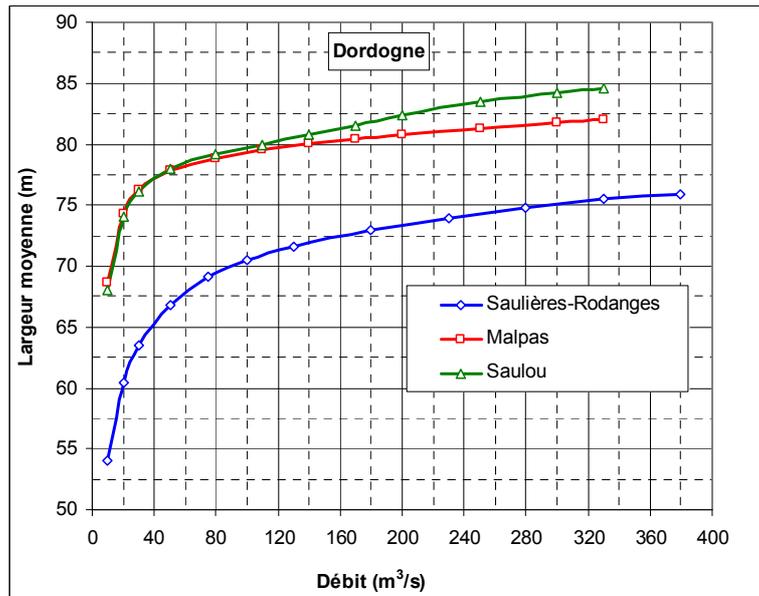


Figure 110 : Evolution des largeurs mouillées moyennes des secteurs de Saulières-Rodanges, du Malpas et de Saulou sur la Dordogne.

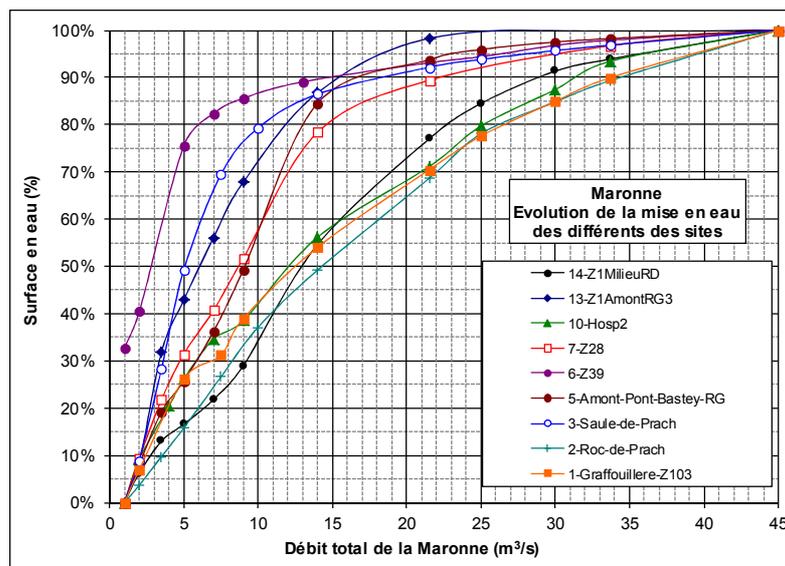


Figure 111 : Evolution des surfaces en eau des différents sites « étendus » sur la Maronne en pourcentage de la surface atteinte à 45 m³/s.

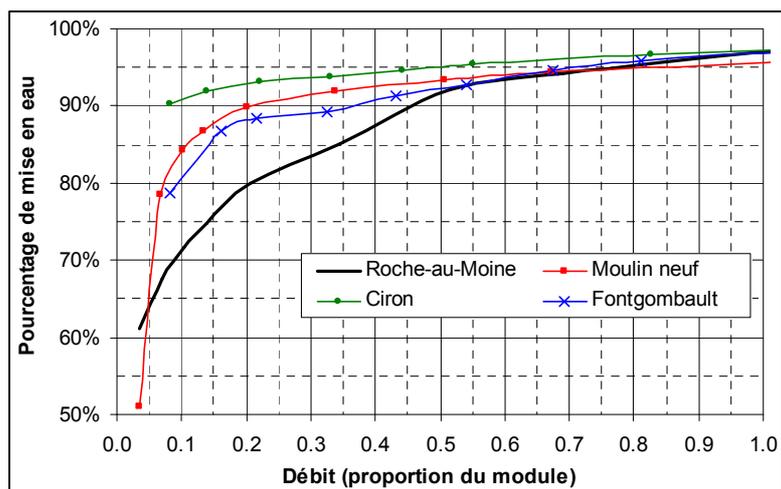


Figure 112 : Evolution de la largeur moyenne des 4 stations sur la Creuse en fonction du débit (en proportion du module) (figure extraite de Courret et Lascaux 2009).

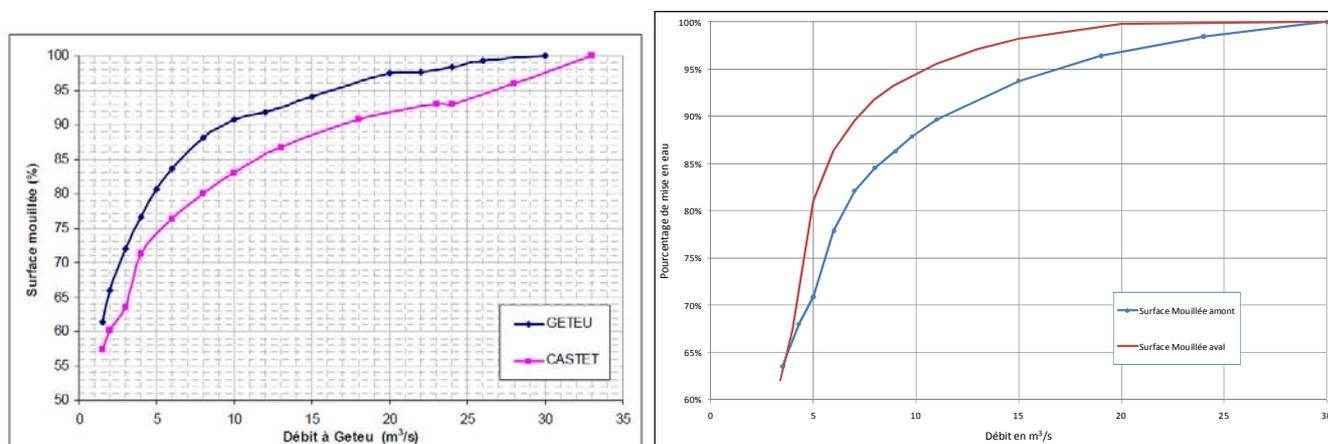


Figure 113 : Evolution des surfaces mouillées en pourcentage de la surface maximale en fonction du débit sur les différents tronçons et stations modélisées du Gave d'Ossau (tronçon Geteu-Castet à gauche, figure extraite de Vandewalle et al. 2012b ; tronçon aval Castet à droite, figure extraite d'Agerin 2012).

5.5.5. Relation entre gradients de niveau d'eau et gradient de débit, en fonction du débit

Pour la **Dordogne** (Figure 114), les niveaux d'eau sur les secteurs modélisés de Saulières-Rodanges, du Malpas et de Saulou ont des évolutions proches, avec une phase d'augmentation plus rapide jusqu'à environ $80 \text{ m}^3/\text{s}$, puis une phase d'augmentation assez linéaire au-delà de $120 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir d'un débit de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, les niveaux d'eau augmentent par exemple de 43, 29 et 38 cm à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les secteurs de Saulières-Rodanges, du Malpas et de Saulou respectivement, et de 90, 72 et 81 cm à $80 \text{ m}^3/\text{s}$. La gamme de turbinage de 10 à $340 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sablier) correspond sur les secteurs du Malpas et du Saulou à une variation du niveau d'eau d'environ 2.0 m. La gamme de turbinage de 10 à $380 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sablier + Hautefage) correspond sur le secteur Saulières-Rodanges à une variation du niveau d'eau d'environ 2.4 m. Les gradients de niveau d'eau diminuent logiquement vers les forts débits. Ils passent d'environ 2.65, 1.7 et 2.5 $\text{cm}/[\text{m}^3/\text{s}]$ autour de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les secteurs de Saulières-Rodanges, du Malpas et de Saulou respectivement, à environ 0.8 $\text{cm}/[\text{m}^3/\text{s}]$ autour de $60 \text{ m}^3/\text{s}$, et tendent vers 0.4-0.5 $\text{cm}/[\text{m}^3/\text{s}]$ au-delà de $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Les gradients de débit correspondant à différentes valeurs de gradient de niveau d'eau (2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 et 30 cm/h) en fonction du débit ont ensuite été déterminés sur le secteur Saulières-Rodanges (les résultats sur les secteurs du Malpas et du Soulou étant très similaires). On observe que le gradient de débit correspondant à un gradient de niveau d'eau donné augmente au fur et à mesure que le débit augmente entre 10 et $120 \text{ m}^3/\text{s}$, puis est relativement stable au-delà de $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Par exemple, le gradient de débit correspondant à un gradient de niveau d'eau de 10 cm/h est de l'ordre de 3.8 $\text{m}^3/\text{s}/\text{h}$ autour de

15 m³/s, de 8.5 m³/s/h autour de 40 m³/s, de 15.9 m³/s/h autour de 90 m³/s, et tend vers environ 20 m³/s/h autour de 120 m³/s.

Pour la **Maronne** (Figure 115), en termes de marnage, il convient tout d'abord de différencier les sites situés dans les bras secondaires de l'Hospital qui subissent des marnages moins importants que les autres sites situés sur des portions à chenal unique. Partant de 1 m³/s, pour les sites situés dans les bras secondaires de l'Hospital, le marnage atteint par exemple entre 21 et 31 cm à 20 m³/s et entre 40 et 53 cm à 45 m³/s, alors que pour les autres sites il atteint respectivement entre 45 et 75 cm et entre 65 et 116 cm (à une exception près). Pour une variation de débit donnée, le marnage dans les bras secondaires de l'Hospital s'avère approximativement 1.5 à 2 fois moindre que sur les secteurs à chenal unique. Ce constat est cohérent avec ceux faits par Lascaux et al. (2006). Ce phénomène participe probablement au fait que ces bras secondaires apparaissent en quelques sortes en partie « protégés » des effets des éclusées et que l'on y trouve des abondances 4 à 5 fois supérieures à celles que l'on trouve dans un tronçon à chenal unique (Clavé et al. 2009). Sur les sites situés sur des portions à chenal unique (hormis un point-repère), partant de 1 m³/s, le marnage varie entre 15 et 30 cm à 5 m³/s, entre 28 et 48 cm à 10 m³/s, entre 45 et 75 cm à 20 m³/s, entre 53 et 94 cm à 30 m³/s et entre 65 et 116 cm à 45 m³/s. Le marnage moyen est pour ces débits respectifs de 21, 36, 56, 71 et 87 cm. Dans la suite, la réflexion s'est concentrée sur le marnage au droit des bordures et bancs de galets. On en a extrait une évolution moyenne du marnage, ainsi que des évolutions minimales (Z1-milieu-RD) et maximales (Graffouillère). A partir de ces marnages, on a calculé les taux de variation minimum, moyen et maximum des niveaux d'eau en fonction du débit en m / (m³/s). Ces taux sont d'autant plus faibles que l'on se trouve dans une gamme de débits élevés. Le taux moyen est voisin de 8 cm / (m³/s) autour de 1 m³/s, puis passe à 4 cm / (m³/s) autour de 5 m³/s, 2 cm / (m³/s) autour de 15 m³/s et finit à environ 1 cm / (m³/s) autour de 35-50 m³/s. A partir de ces taux, on peut obtenir les gradients de débit correspondant à un gradient de hauteur d'eau donné, en fonction du débit autour duquel se déroule la variation. Un gradient de hauteur d'eau de 10 cm/h correspond par exemple à des gradients de débit de 1 m³/s/h autour de 1 m³/s, 2.5 m³/s/h autour de 5 m³/s, 4 m³/s/h autour de 10 m³/s, 6 m³/s/h autour de 20 m³/s, 8 m³/s/h autour de 30 m³/s et 11 m³/s/h autour de 45 m³/s.

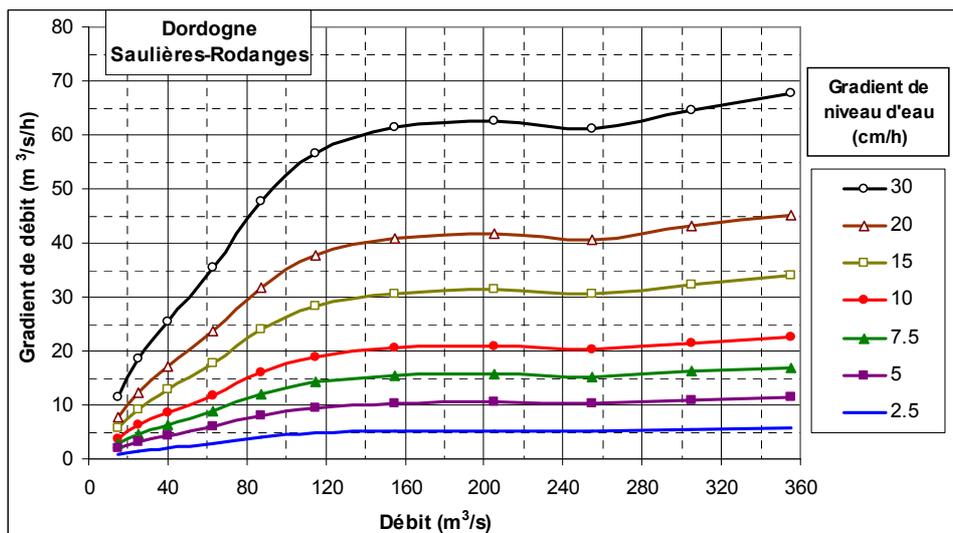
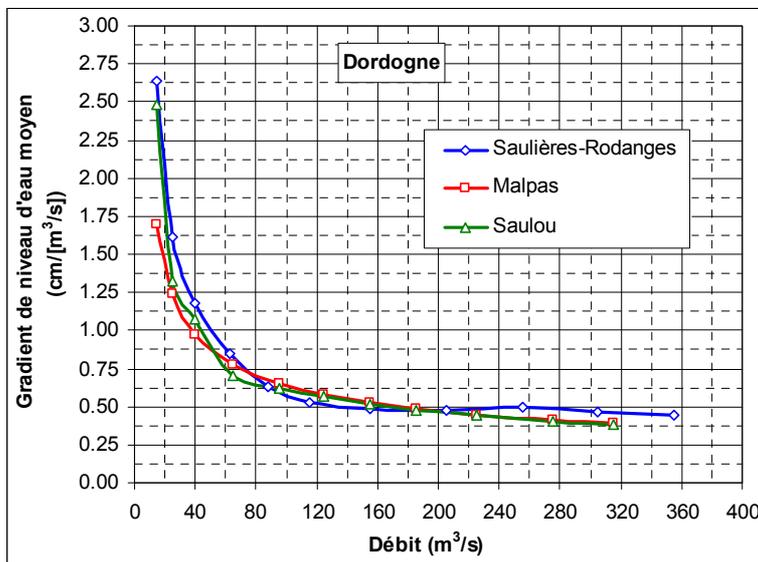
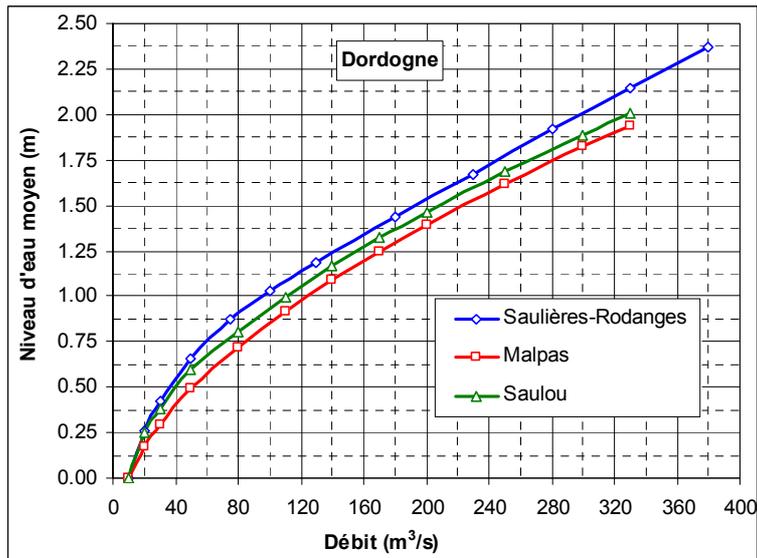


Figure 114 : Evolution des cotes des niveaux d'eau moyens sur 3 secteurs de la Dordogne à partir d'un débit de 10 m³/s (niveau égal à 0 à ce débit) (en haut), des gradients de niveau d'eau moyen en fonction du débit (au centre), et des gradients de débit correspondant à différentes valeurs de gradients de niveau d'eau (2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 et 30 cm/h) en fonction du débit (en bas).

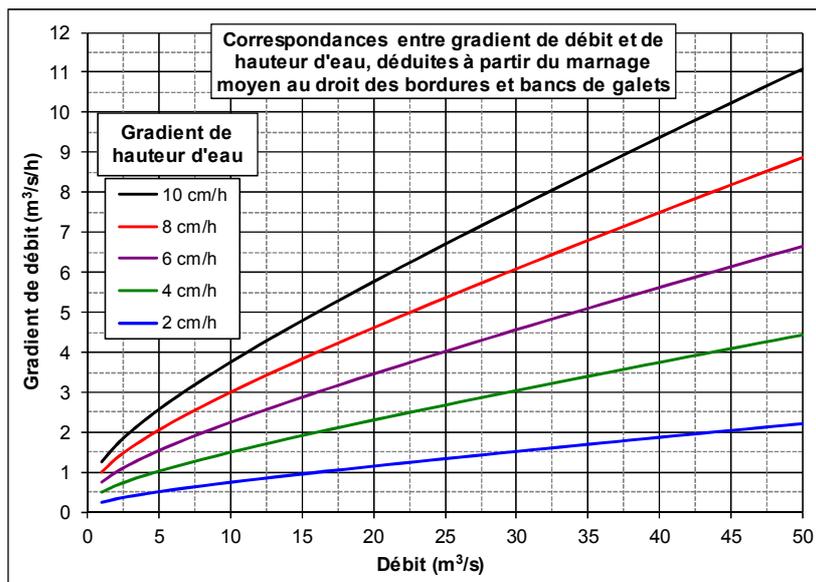
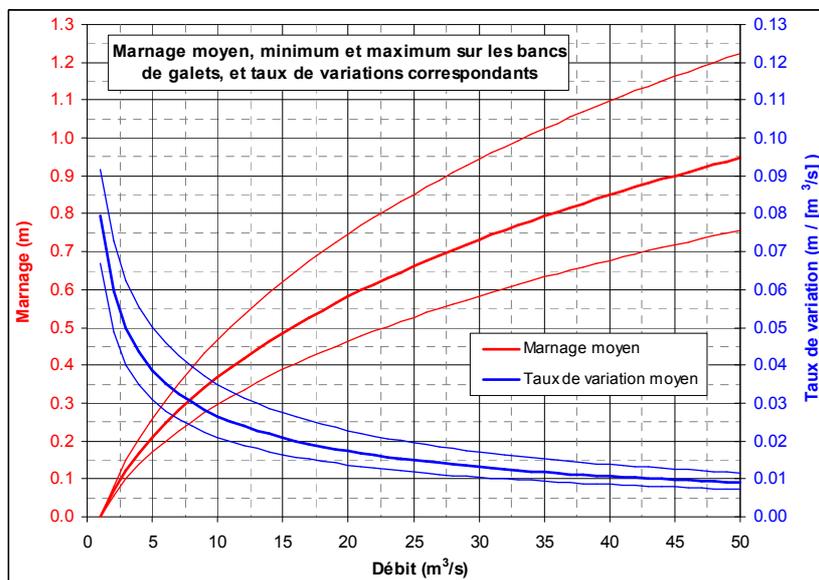
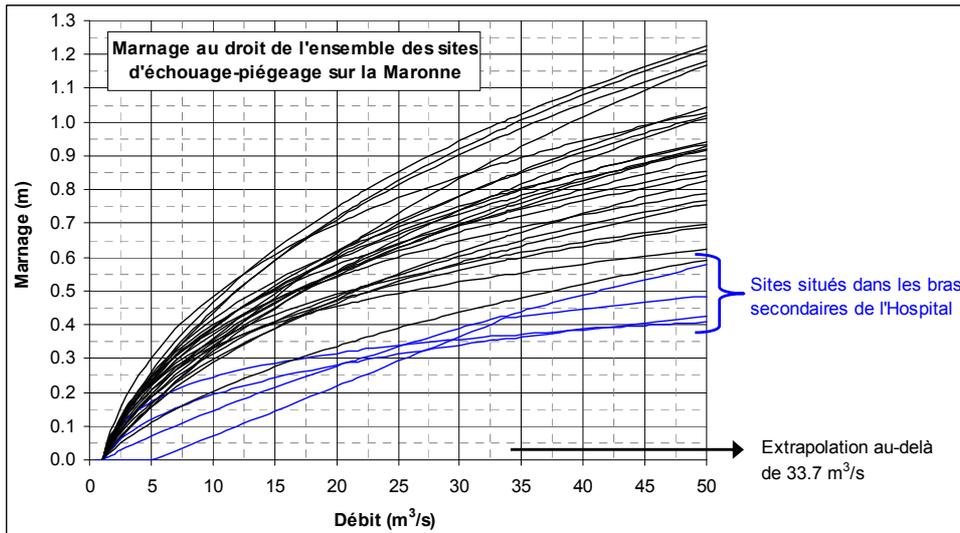
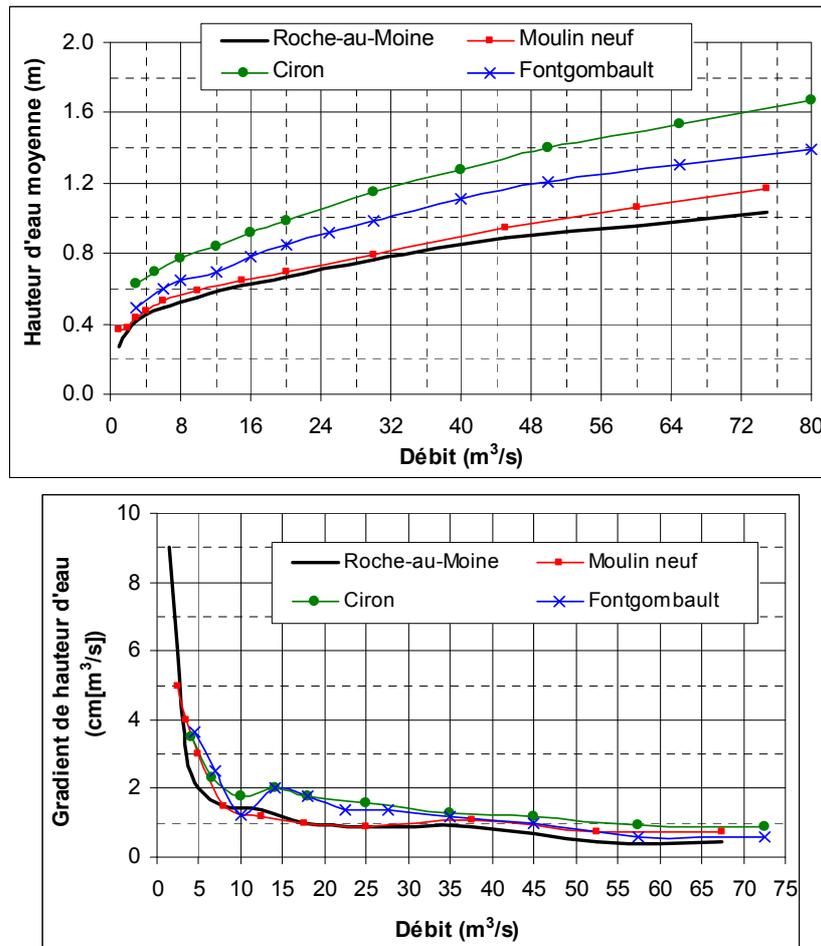


Figure 115 : Marnage au droit de l'ensemble des sites d'échouage-piégeage (en haut), marnage moyen, minimal et maximal sur les bordures et de bancs de galets de la Maronne (au centre) et correspondances entre gradient de débit et de hauteur d'eau (en bas).

Sur la **Creuse** (Figure 116), la station de Roche-au-Moine à la morphologie évasée et la station de Moulin neuf aux multiples chenaux présentent les plus faibles hauteurs d'eau moyennes. La station de Ciron très encaissée présente la plus forte hauteur d'eau moyenne. Les différentiels de hauteur d'eau sur la plage des débits turbinés sont de l'ordre de 65 cm à Roche-au-Moine, de 80 cm à Moulin neuf, de 105 cm à Ciron et de 90 cm à Fontgombault. Les gradients de hauteur d'eau sont autour de 4-5 cm/[m³/s] pour les débits inférieurs à 5 m³/s, sauf pour la station de Roche-au-Moine où ils atteignent jusqu'à 8 cm/[m³/s]. Ces gradients deviennent inférieurs à 2 cm/[m³/s] dès un débit de 7-8 m³/s, et avoisinent puis deviennent inférieurs à 1 cm/[m³/s] au-delà d'un débit de 20 à 40 m³/s selon les stations. Le tableau présente les variations de hauteur d'eau au niveau des stations amont de Roche-au-Moine et de Moulin neuf entre les différents paliers de turbinage, ainsi que les gradients correspondants pour des variations effectuées en 30 minutes. Sur les deux stations, la variation de hauteur d'eau la plus importante se trouve pour le premier palier entre 2 et 8 m³/s. Les gradients atteints pour des variations en 30 minutes sont de l'ordre de 30-35 cm/h.



Variations de débits (m ³ /s)	Roche-au-Moine		Moulin neuf	
	Variation de hauteur d'eau (cm)	Gradient (cm/h) pour des variations en 30 minutes	Variation de hauteur d'eau (cm)	Gradient (cm/h) pour des variations en 30 minutes
2 - 8	16	32	18	36
8 - 16	11	22	10	20
16 - 25	9	18	9	18
25 - 37	11	22	12	24
37 - 45	6	12	8	16
45 - 63	9	18	14	28
63 - 70	5	10	8	16

Figure 116 : Evolution des hauteurs d'eau moyennes (en m) sur les 4 stations en fonction du débit (en haut), gradients de hauteur d'eau (cm / [m³/s]) des 4 stations en fonction du débit (au centre), et variations de hauteurs d'eau et gradients entre les différents paliers de turbinage au niveau des stations amont de Roche-au-Moine et de Moulin neuf (en bas).

Sur le **Gave d'Ossau** (Figure 117), les hauteurs d'eau moyennes sur le tronçon Geteu-Castet à la morphologie plus ouverte s'avèrent plus faibles et évoluent moins rapidement que celles sur le tronçon Aval Castet, dans un secteur plus encaissé. Les différentiels de hauteur d'eau sur la plage des débits turbinés sont de l'ordre de 40-50 cm sur le tronçon Geteu-Castet, et de l'ordre de 90 cm sur le tronçon Aval Castet. Sur le tronçon Geteu-Castet, les gradients de hauteur d'eau atteignent près de 25 cm/[m³/s] pour les débits inférieurs à 3-4 m³/s. Ils diminuent ensuite rapidement et deviennent inférieurs à 5 cm/[m³/s] au-delà d'un débit de 6-7 m³/s, puis avoisine 3-4 cm/[m³/s] au-delà d'un débit de 10 m³/s.

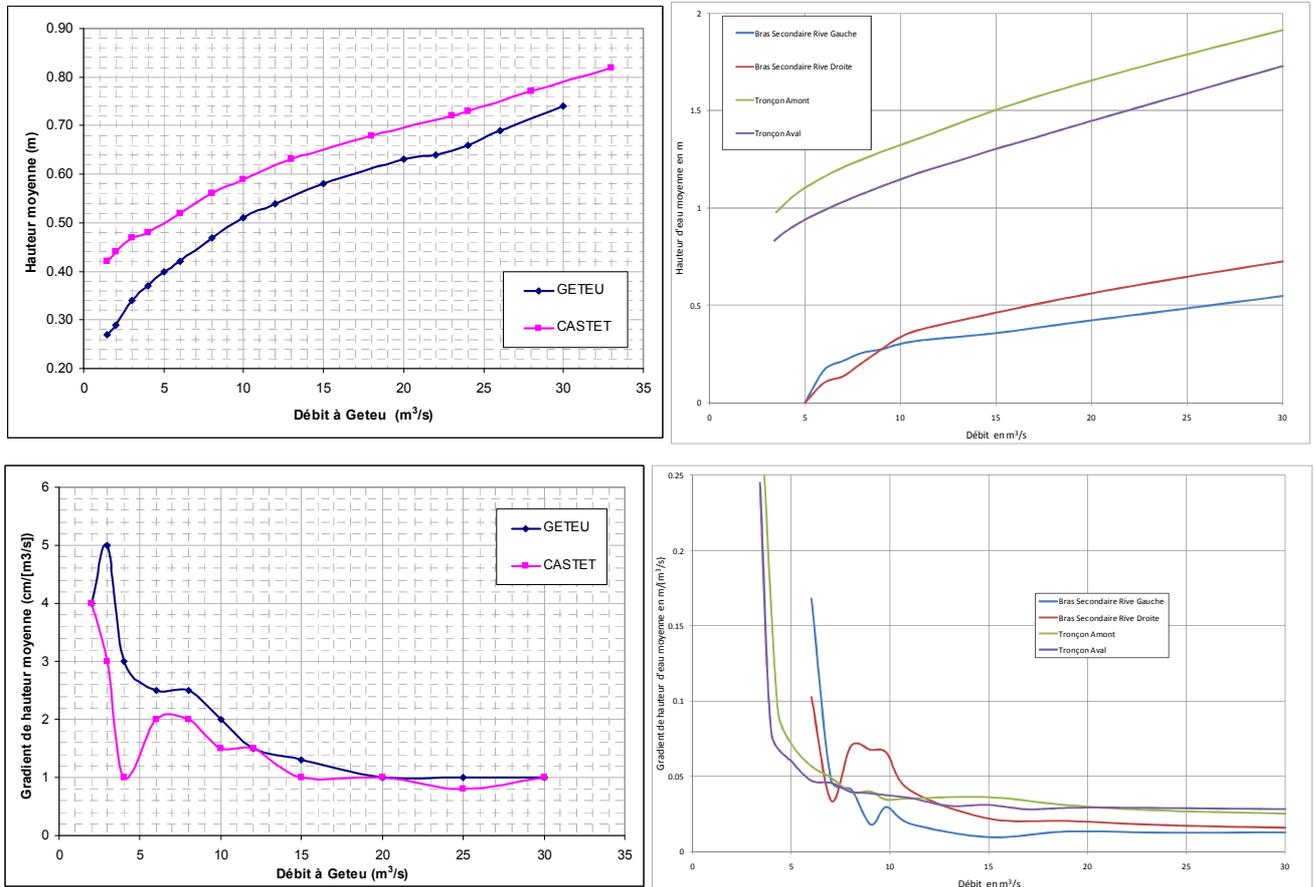


Figure 117 : Evolution des hauteurs d'eau moyennes sur les stations en fonction du débit (en haut) et de hauteur d'eau en fonction du débit sur les stations modélisées sur le Gave d'Ossau (tronçon Geteu-Castet à gauche, figure extraite de Vandewalle et al. 2012b ; tronçon aval Castet à droite, figure extraite d'Agerin 2012).

5.5.6. Débits de mise en eau des dépressions de cordons rivulaires

Sur la **Dordogne**, les débits de mise en eau de 49 dépressions piégeuses ont été déterminés via la modélisation hydraulique. Leur alimentation s'effectue entre 90 m³/s et 340 m³/s, avec une répartition assez homogène sur cet intervalle (croissance progressive des effectifs cumulés). Le premier quartile est de l'ordre de 130 m³/s, la médiane et la moyenne de l'ordre de 190 m³/s et le troisième quartile de l'ordre de 235 m³/s (Figure 118).

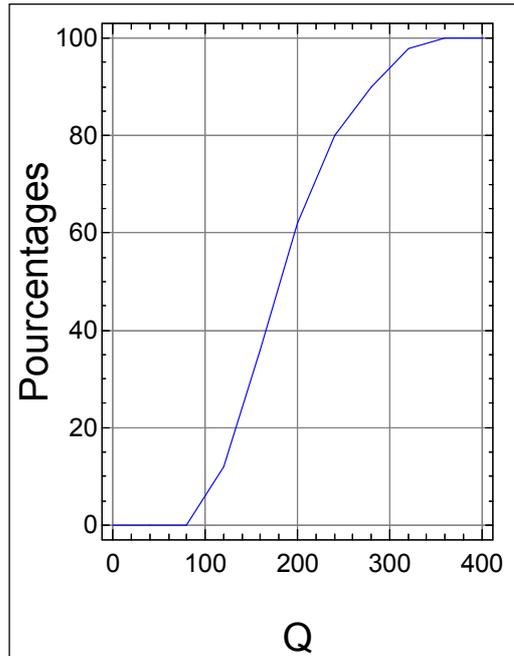


Figure 118 : Répartition des débits de mise en eau (m³/s) des 49 dépressions piégeuses sur la Dordogne.

Sur la **Maronne**, les débits ou gammes de débit de connexion et d'alimentation de 11 sites « ponctuels » ont été déterminés via le recoupement de topographies locales et de mesures de niveaux d'eau à différents débits (Figure 119). Un site présente un débit de connexion inférieur à 5 m³/s, 3 sites entre 5 et 10 m³/s et 2 sites entre 10 et 15 m³/s. Au-delà, il y a encore 4 autres sites qui présentent des débits de connexion bien plus élevés, d'environ 23 m³/s, jusqu'à 40-50 m³/s pour le bras-Hospital-RG6.

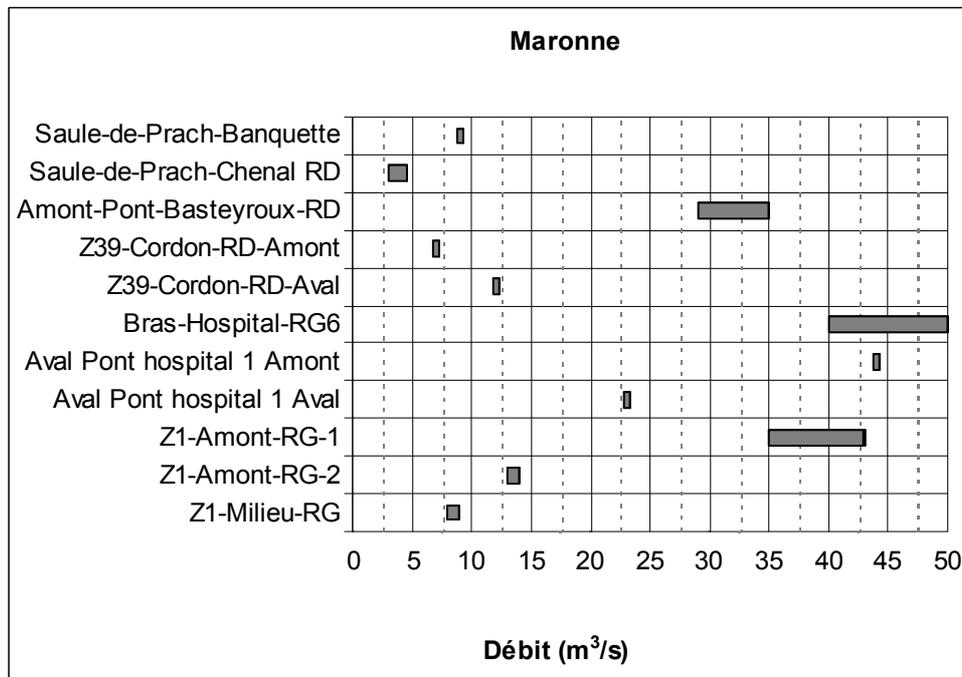


Figure 119 : Débit ou gamme de débit de connexion et d'alimentation des sites « ponctuels » sur la Maronne.

5.5.7. Propositions de mesures de mitigation de l'échouage-piégeage des alevins de salmonidés

Les différents résultats présentés ci-dessus sur le fonctionnement hydrauliques des stations, en complément de ceux des suivis d'échouage-piégeage, de l'état des populations et des analyses hydrologiques, ont participé à étayer un ensemble de mesures de mitigation sur les différents cours d'eau.

Sur la **Dordogne**, l'examen de l'évolution des surfaces mouillées, des niveaux d'eau et de leurs gradients amène à préconiser durant la principale période de sensibilité à l'émergence (fin mars à fin mai) en aval de la confluence Dordogne-Maronne, **(1) le maintien d'un débit minimum de l'ordre de 50 m³/s à l'aval d'Argentat (soit 47% du module) et 75 m³/s à l'aval de la confluence avec la Maronne (soit 59% du module), et (2) la limitation des gradients de baisse du débit à 20 m³/s/h à l'aval d'Argentat (soit 19% du module/heure)**. L'examen des débits de mise en eau des zones de piégeage amène également à préconiser sur cette même période **(3) la limitation du débit à une valeur maximale de l'ordre de 190 m³/s**. Ces mesures de gestion hydrologique limitent d'une part les surfaces exondées et les déconnexions de dépressions en lit mineur, et en évitent d'autre part la mise en eau de zones piégeuses en rive. Le débit minimal de 75 m³/s correspond à une largeur moyenne de l'ordre de 69.2 m sur le secteur Saulières-Rodanges (+28% par rapport à 10 m³/s et +9% par rapport à 30 m³/s). Le débit maximal de 190 m³/s (≈ 1.5 fois le module) correspond à une largeur moyenne de l'ordre de 73.1 m. La gamme de débit 75-190 m³/s permet ainsi de limiter le différentiel de surface mouillée à 390 m²/100 ml et celui de niveau d'eau à 0.63 m en moyenne. La limitation du débit à la valeur maximale de 190 m³/s permet d'éviter également la mise en eau de la moitié des dépressions des zones piégeuses étudiées. Sur la gamme de débit 75-190 m³/s, la limitation des gradients de baisse du débit à 20 m³/s/h permet de limiter les gradients de niveau d'eau à une valeur voisine de 10 cm/h. Il y a un risque à ce qu'un gradient de niveau d'eau de 10 cm/h ne soit pas suffisamment lent pour réduire les échouages en lit mineur sur les surfaces encore exondées, étant donné la granulométrie plutôt grossière des bancs de la Dordogne et pour certains leur végétalisation.

Ces mesures de gestion des débits ont été mises en œuvre progressivement entre 2008 et 2012 (Figure 124). Des opérations sur la morphologie de 7 bras secondaires et de quelques dépressions piégeuses et bras morts (couasnes) ont également été réalisées durant cette période. La poursuite des suivis d'échouage-piégeage et de l'état des peuplements permettront d'en tirer un retour d'expérience. Les échouages-piégeages d'alevins de salmonidés et des autres espèces semblent très significativement réduits ces dernières années sur la Dordogne, mais il faut noter que très peu d'éclusées ont été pratiquées chaque année en période printanière.

Sur la Maronne, l'examen de l'évolution des surfaces mouillées, des niveaux d'eau et de leurs gradients amène à préconiser durant la principale période de sensibilité à l'émergence (fin mars à fin mai) **(1) le maintien d'un débit de base des éclusées de l'ordre de 10 à 15 m³/s, soit 50% à 75% du module, pour limiter les surfaces exondées et les déconnexions de dépressions et (2) la limitation des gradients de baisse à 10 cm/h, soit 2.5 à 10 m³/s/h (soit 12.5% à 50% du module/heure) selon la gamme de débit entre 5 et 45 m³/s**. Le maintien de tels débits durant la période printanière est envisageable vis-à-vis des apports hydrologiques naturels, du moins jusqu'à fin mai. **Des valeurs inférieures de gradients semblent même nécessaires étant donné que les bordures ou bancs de la Maronne sont majoritairement constitués de gros galets (> 100 mm) et largement végétalisés**. Les valeurs de gradients de débit évoquées restent encore bien au-delà des valeurs naturelles, entre 50 et 75 fois plus fortes que les gradients médians selon la gamme de débit.

La mesure de maintien d'un débit de base a été mise en œuvre depuis 2011 ; par contre les gradients de baisse n'ont pas été mis en place du fait d'impossibilité jusqu'à présent pour les turbines et restent de 10 m³/s/h (soit 50% du module/heure) sur toute la gamme de débit. Une durée maximale journalière de 18H pour les éclusées dépassant 25 m³/s a en revanche été mise en place à partir de 2011 pour éviter la colonisation par les alevins des zones mises en eau (Figure 124). La poursuite des suivis d'échouage-piégeage et de l'état des peuplements permettront d'en tirer un retour d'expérience. La situation ne semble pas encore satisfaisante sur la Maronne avec toujours des événements d'échouage-piégeage d'alevins de salmonidés significatifs.

Sur la **Creuse**, le recoupement des résultats hydrauliques et les analyses de l'état des peuplements a amené à préconiser le **maintien d'un débit de base inter-éclusées d'a minima 5 et si possible 8 m³/s au printemps** (soit 17% à 27% du module), ce qui permet d'éviter les plus grosses fluctuations de surface mouillée de la Creuse dans une gamme où les gradients de baisse sont les plus rapides. Il est également préconisé que les **gradients maximaux des baisses n'excèdent pas 5 m³/s/h** à Scoury. Cela correspond à peu près sur cette station à des **variations de 5 cm/h** entre 75 et 40 m³/s et 7,5 cm/h entre 40 et 8 m³/s. Ces mesures n'ont pas été mises en œuvre jusqu'à présent.

Sur les 2 tronçons du Gave d'Ossau (Geteu-Castet et aval Castet), il est préconisé de **maintenir un débit minimum de 8 m³/s**. Cela permet de maintenir en eau une grande proportion de la surface mouillée des stations (80-88% sur le tronçon Geteu-Castet ; 85%-93% sur le tronçon aval Castet), de connecter et déjà bien mettre en eau les bras secondaires, ainsi que de bien mettre en eau les plages exondées et d'offrir des conditions d'habitats optimales ou proches de l'optimum pour les premiers stades de vie des saumons et des truites. Cela représente 40-50% du module du cours d'eau. Par rapport aux débits constatés au niveau d'Oloron sur la période 1989-2008 (conditions actuelles de gestion), des débits de 40-50% du module sont dépassés environ 80-90% du temps en mars et juin et presque 100% du temps en avril et mai. Il est également préconisé des **gradients de variations maximaux à la baisse de 3 m³/s/h sur le tronçon Geteu-Castet et 2 m³/s/h sur le tronçon aval Castet** (soit 19% et 11% du module/heure respectivement). Ces mesures n'ont pas été mises en œuvre jusqu'à présent.

5.6. Dérive forcée lors des hausses de débit

Le phénomène de dérive vers l'aval des alevins de salmonidés existe en conditions naturelles et est lié à la recherche d'un habitat de croissance favorable disponible. Le déclenchement de ces mouvements vers l'aval dépend notamment de la densité d'alevins congénères ou d'autres espèces déjà en place et concerne notamment les alevins qui éclosent tardivement (Beall et al. 1993 ; Heland et al. 1995). Ces déplacements participent au mécanisme d'ajustement de la densité des alevins aux ressources spatiales et trophiques du milieu, sans être a priori source de mortalité importante. Ce phénomène naturel peut notamment servir à la colonisation des zones aval des cours d'eau moins riches en zones de reproduction, sans provoquer la disparition des alevins des zones amont. On peut alors également parler de dispersion des alevins.

Le phénomène de dérive forcée des alevins peut se définir comme l'entraînement des poissons par le courant lors des hausses de débit, les vitesses d'écoulement atteintes dépassant leurs capacités de maintien de leur position. En hydrologie naturelle, ce phénomène est invoqué pour expliquer les faibles recrutements en alevins suite à des crues durant la période de post-émergence (voir notamment Nehring et Anderson 1993 ; Cattaneo et al. 2002, 2003 ; Capra et al. 2003 ; Sabaton et al. 2004). A la différence de la dispersion, la dérive forcée semble s'accompagner de mortalités importantes selon le débit maximum atteint et la durée des épisodes de crues.

Le phénomène de dérive forcée est également susceptible de se produire en aval des aménagements hydroélectriques fonctionnant par éclusées, lors des hausses de débit rapides induites par la mise en route des turbines. Dans le cas des éclusées, les débits maximum sont généralement inférieurs aux débits atteints lors des épisodes naturels qualifiés de crues, mais leur fréquence est bien plus élevée. En l'état actuel des connaissances, il est difficile d'évaluer si un régime d'éclusées est susceptible de provoquer de la dérive forcée et si cela entraînent seulement des déplacements des poissons vers l'aval ou des mortalités, et quelle peut en être l'ampleur (distances parcourues? taux de mortalité ?). Le phénomène de dérive forcée peut déjà être suspecté lorsque les débits maximum turbiné atteints sont importants, au-delà de 2 ou 3 fois le module par exemple. Cela est le plus souvent suspecté au travers des suivis de populations en cas de faibles recrutements en alevins, ou via l'analyse des conditions d'habitat pendant les éclusées (Sabaton et al. 1995). Par exemple, dans une configuration d'aménagement hydroélectrique comme sur la Dordogne (éclusées restituées au pied d'un barrage-usine), l'entraînement des alevins vers l'aval ne peut pas être compensé par des arrivées de poissons depuis l'amont. Cela peut alors se traduire par des réductions des densités de poissons sur les habitats de croissance à l'aval proche de la centrale. Cela semble être le cas sur la Dordogne sur une distance de l'ordre de 4 km à l'aval du barrage du Sablier (Chanseau et al. 2006).

Le phénomène de dérive forcée a été peu étudié et mis en évidence in situ (Salveit et al. 1995), du fait des difficultés techniques à filtrer efficacement une fraction significative du débit pendant une éclusée. La problématique a été essentiellement étudiée en chenal expérimental (Ottaway et Clarke 1980 ; Ottaway et Forrest 1983 ; Irvine 1986 ; Heggenes 1988 ; Crisp et Hurley 1991 a et b ; Lauters 1995 ; Valentin 1995 ; Liebig et al. 1998). Dans toutes ces études, une des difficultés réside dans le fait de pouvoir étudier les alevins dès les premiers jours suivant leur émergence du substrat. Il est d'autre part parfois délicat de faire la part des choses entre une dérive des alevins véritablement forcée par les conditions hydrodynamiques et une dévalaison volontaire pour la recherche d'habitat.

5.6.1. Taille et période de sensibilité à la dérive forcée des alevins de salmonidés

Les alevins post-émergents, possédant les capacités de nage les plus faibles, sont les plus vulnérables au phénomène de dérive. Le recoupement entre d'un côté les expériences qui mettent en évidence une sensibilité à la dérive forcée lors des hausses de débit (Lauters 1995 ; Liebig et al. 1998) et d'un autre côté celles qui ne montrent pas d'effet (Heggenes 1988 ; Lauters 1995 ; Valentin 1995) semble indiquer que les alevins y sont principalement sensibles jusqu'à une taille de l'ordre de 50 mm.

Les alevins semblent ainsi sensibles à la dérive forcée jusqu'à peu près la même taille que pour la problématique d'échouage-piégeage. Cela apparaît logique dans la mesure où l'on peut penser que les deux problématiques sont liées. En effet, les alevins que l'on retrouve échoués ou piégés dans les zones rivulaires lors des baisses de débit sont probablement des poissons qui n'ont pas pu maintenir leur position lors des hausses de débit précédentes et ont alors dérivé et colonisé ces zones où les vitesses d'écoulement restaient compatibles avec leur capacité de nage.

5.6.2. Mesures de mitigation envisageables contre la dérive

Pour limiter le phénomène de dérive forcée des alevins, on peut a priori envisager :

- de **définir un débit de base et/ou un débit maximum des éclusées**, soit indépendamment l'un de l'autre pour garantir certaines conditions d'habitat, soit conjointement, pour respecter certains critères hydrologiques ou critères de modifications des conditions d'habitat.
- d'**adopter un gradient de hausse maximal du débit** pour que les poissons aient le temps de s'adapter aux changements de conditions d'habitats.

La problématique de la dérive des alevins a été étudiée par Lauters (1995) ou Liebig et al. (1998) au travers de critères hydrologiques dans leurs chenaux expérimentaux. Leurs résultats incitent ainsi à limiter le rapport « débit d'éclusée / débit de base ». Lauters (1995) montre notamment que le rapport « taux de dérive pendant éclusée / taux de dérive avant éclusée » reste inférieur à 5 pour des rapports « débit d'éclusée / débit de base » inférieurs à 6. Liebig et al. (1998) montrent que le taux de dérive lors des éclusées passe de 10-12% de la population pour un rapport de 10, à 5-6% pour un rapport de 6. Mais la transposabilité de ces résultats obtenus en chenal expérimental vers les cours d'eau n'est pas du tout garantie. De plus, on peut s'interroger sur la pertinence du seul rapport « débit d'éclusée / débit de base ». En effet, différentes hausses de débit peuvent avoir un même rapport mais se traduire par des modifications très différentes des conditions hydromorphologiques : des hausses de 10% à 40% du module, de 30% à 120%, ou de 80% à 320% ont par exemple toutes un rapport de 4. Il apparaît en fait peu pertinent de dissocier l'influence du débit de base de celle du débit d'éclusées, ou de les résumer sous forme d'un paramètre adimensionnel tel que leur rapport.

La problématique de la dérive des alevins peut également être abordée au travers de critères hydromorphologiques et des conditions d'habitat pour les alevins. Des informations peuvent être tirées des études en cuve ou en canal expérimental (fond lisse) sur les capacités de nage ou de maintien des alevins (Heggenes et Traaen 1988 ; Graham et al. 1996 ; Peake et McKinley 1998). Les travaux d'Heggenes et Traaen (1988) portant sur les plus petits poissons s'avèrent les plus intéressants. Pour des alevins de saumons ayant juste résorbé leur vésicule vitelline (« swim-up » stage ; 25.7 mm et 0.156 g en moyenne), ces auteurs trouvent des vitesses critiques au nez des poissons de 0.14 et 0.20 m/s, à des températures de 6.0 et 12.4°C respectivement. Pour des alevins plus vieux de deux semaines (27.8 mm et 0.160 g en moyenne), ils trouvent des vitesses critiques de 0.18, 0.20, 0.27 et 0.29 m/s à des températures de l'eau de 6.9, 8.0, 17.3 et 19.5°C respectivement.

L'exploitation de ces critères en cours d'eau est délicate du fait des difficultés à simuler les vitesses d'écoulement au fond que les alevins ressentent réellement, en particulier en fonction de la granulométrie du substrat. Dans leur étude sur la rivière North Tyne en aval du réservoir de Kielder, Gibbins et Acornley (2000) présentent néanmoins un exemple de mise en œuvre des critères de Graham et al. (1996) extrapolés pour des alevins entre 25 et 50 mm (modalités de calcul des vitesses au fond non explicitées). Il est trouvé qu'au débit d'éclusées, de l'ordre de 80% de la surface mouillée des stations présentent des vitesses supérieures aux capacités de nage des alevins de saumon. Les auteurs préconisent par conséquent que les débits d'éclusées ne soient pas plus fréquents qu'en situation naturelle.

Les études sur les préférences d'habitat des alevins post-émergents peuvent également fournir des informations sur les conditions de hauteur d'eau et de vitesses d'écoulement maximales utilisées. Dans les expériences de Holm et al. (2001), des alevins de saumon entre 30 et 55 mm utilisent des vitesses moyennes d'écoulement entre 0 et 0.5 m/s, avec des préférences évoluant à l'intérieur de cette gamme en fonction de la disponibilité des conditions. Ils n'utilisent par contre pas de vitesse moyenne d'écoulement supérieure à environ 0.5 m/s. Heland et al. (1995) indiquent que les alevins post-émergents de saumon utilisent des zones peu profondes à courant vif (0.2 à 0.4 m/s) et que les alevins de truites utilisent des zones peu profondes (0.1 à 0.4 m) à courant modérée (0 à 0.2 m/s).

Vis-à-vis de la problématique de dérive des alevins, l'étude de l'évolution des conditions d'habitat en fonction du débit peut amener à préconiser un débit maximum d'éclusées pour ne pas trop dégrader les conditions d'habitat en soit, ou par rapport à celles du débit de base (déplacement des habitats favorables). On manque toutefois de critères pour interpréter ce genre de résultats.

Pour limiter le phénomène de dérive, il pourrait également être envisagé de limiter le gradient de hausse du débit pour permettre aux alevins de s'y adapter, comme cela est envisagé pour limiter l'échouage lors des baisses. Pourtant, aucune étude à notre connaissance n'a étudié l'influence de ce paramètre sur le phénomène de dérive, que ce soit via des critères hydrologiques ou hydromorphologiques.

Il pourrait également être réfléchi au timing des hausses d'éclusées, en particulier entre des conditions diurnes et nocturnes. Les résultats de Crips et Hurley (1991 b) semblent indiquer une plus grande vulnérabilité des alevins à la dérive durant la nuit, qui s'expliquerait selon les auteurs par la perte du contact visuel avec le substrat. Mais ces résultats mériteraient toutefois d'être confirmés.

La durée des éclusées ne semble en revanche pas pouvoir faire l'objet de mesure de mitigation vis-à-vis de la dérive, dans la mesure où le phénomène semble intervenir principalement au tout début de l'éclusée (dans les premières 12 minutes lors des expériences de Liebig et al. [1998]).

Au final, en l'état actuel des connaissances sur le phénomène de dérive, il n'existe pas de critères hydrologiques ou hydromorphologiques véritablement applicables sur les cours d'eau, permettant de définir des mesures de mitigation dans lesquelles on pourrait avoir confiance, et encore moins dont l'efficacité serait avérée.

Dans les paragraphes suivant, les réflexions menées sur le cas de la Dordogne sont présentées. Le phénomène de dérive forcée n'a pas été étudié in situ, et n'a donc été ni mis en évidence, ni écarté. Cette problématique est abordée dans la mesure où l'on peut suspecter que la dérive se produise étant donné que les débits maximaux turbinés (340 m³/s) atteignent potentiellement plus de 3 fois le module (106 m³/s) (avant la mise en place de la limitation à 190 m³/s vis-à-vis de l'échouage-piégeage).

5.6.3. Evolutions des conditions d'habitat des alevins en fonction du débit

Au regard des informations disponibles dans la bibliographie (Holm et al. 2001 ; Heland et al. 1995), il a été considéré comme conditions d'habitat favorable pour les alevins post-émigrants de saumon et de truite (< 50 mm), les zones où la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement moyenne sont inférieures ou égales à 0.5 m et 0.5 m/s respectivement. La valeur maximale de vitesse adoptée est logiquement supérieure aux vitesses focales de 0.15 à 0.25 m/s annoncées par Heggenes et Traaen (1988), dans la mesure où la vitesse effectivement ressentie par les alevins positionnés au fond est largement inférieure à la vitesse moyenne sur la colonne d'eau. Dans la mesure où la problématique de dérive forcée semble essentiellement liée à la vitesse d'écoulement, il a également été examiné l'évolution des zones où la vitesse est inférieure à 0.5 m/s indépendamment de la hauteur d'eau. La Figure 120 présente l'évolution des surfaces d'habitat favorables aux alevins post-émigrants ($H \leq 0.5$ m et $V \leq 0.5$ m/s) en fonction du débit, sur l'ensemble du tronçon Saulières-Rodanges, sans considérations sur les faciès ou la granulométrie. On a également reporté sur cette figure l'évolution des surfaces où la hauteur d'eau est inférieure à 0.5 m et des surfaces où la vitesse d'écoulement est inférieure à 0.5 m/s. La surface d'habitat favorable aux alevins post-émigrants diminue très rapidement de 10 à 50 m^3/s , passant d'environ 10.3 à 4.4 ha, rapidement de 50 à 100 m^3/s , passant d'environ 4.4 à 2.4 ha, puis de manière plus progressive au-delà, pour atteindre notamment 1.6 ha à 180 m^3/s , 0.9 ha à 280 m^3/s et 0.5 ha à 380 m^3/s . Ces surfaces représentent de l'ordre de 33% de la surface mouillée à 10 m^3/s , 11% à 50 m^3/s , 6% à 100 m^3/s , et entre 3.7% et 1.2% entre 180 et 380 m^3/s . Sur le tronçon Saulières-Rodanges, il apparaît clairement qu'avec les critères adoptés ($H \leq 0.5$ m et $V \leq 0.5$ m/s) le facteur limitant la surface d'habitat favorable aux alevins est la hauteur d'eau. Quasiment toutes les surfaces où la hauteur d'eau est inférieure à 0.5 m présentent également une vitesse d'écoulement inférieure à 0.5 m/s, alors que la réciproque n'est pas vraie. Vis-à-vis de la problématique de dérive forcée pour laquelle la question est de savoir si la vitesse d'écoulement dépasse ou non la capacité de nage des alevins, il est donc peut-être plus pertinent de ne considérer que la vitesse d'écoulement indépendamment de la hauteur d'eau.

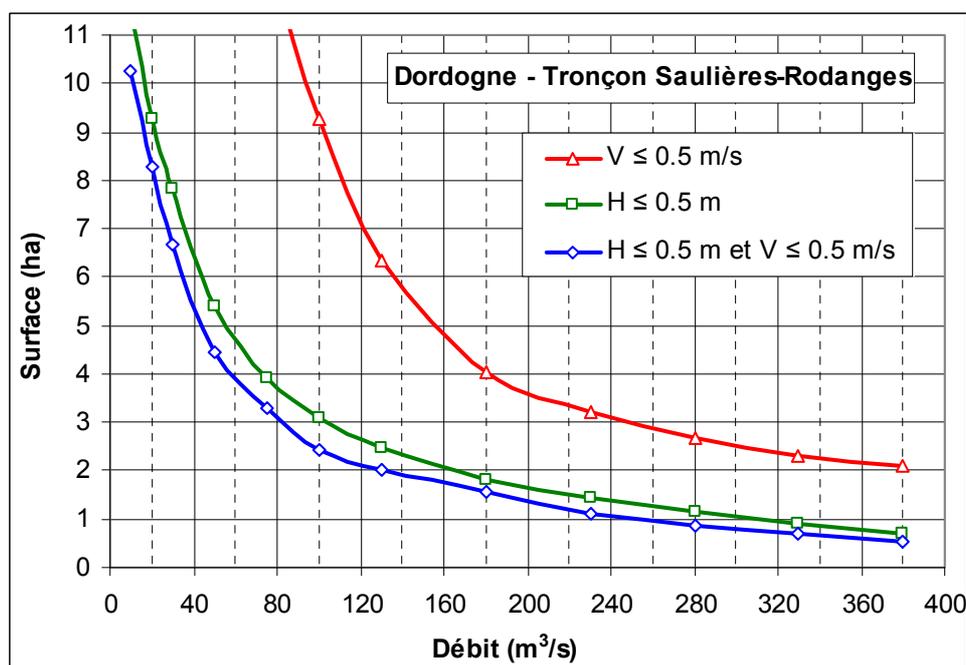


Figure 120 : Evolution des surfaces favorables aux alevins post-émigrants ($H \leq 0.5$ m et $V \leq 0.5$ m/s) en fonction du débit.

Pour tâcher d'apprécier les conséquences des variations de débit sur les habitats des alevins post-émigrants, il a été examiné les surfaces qui répondent aux critères considérés à la fois au débit de base et au débit maximum, en fonction de leurs valeurs respectives. A titre de comparaison, l'analyse a été menée pour les surfaces d'habitat favorables aux alevins post-émigrants ($H \leq 0.5$ m et $V \leq 0.5$ m/s) (Figure 121), ainsi que pour les surfaces où seule la vitesse d'écoulement est inférieure à 0.5 m/s et compatible avec les capacités de nage des alevins (Figure 122).

A partir d'un débit de base donné, les surfaces d'habitat favorable à la fois débit de base et au débit maximum diminuent au fur et à mesure que le débit maximum augmente. Cette diminution est très rapide à partir des faibles débits de base, et de plus progressive vers les forts débits de base. Cette surface a également tendance à diminuer vers les forts débits, sous l'effet de surfaces d'habitat initialement favorables au débit de base qui sont de plus en plus faibles. Les surfaces d'habitat favorable à la fois débit de base et au débit maximum sont ainsi très faibles, voire nulles, dès que l'amplitude dépasse 40-50 m³/s à partir des faibles débits de base, et 70-80 m³/s à partir des forts débits de base. Cela signifie notamment que les hausses de débit avec des amplitudes supérieures ou égales à ces ordres de grandeur engendrent au débit maximum des conditions défavorables aux alevins, sur toutes les zones qui leur étaient favorables au débit de base. Les habitats favorables sont intégralement déplacés.

Surface (m ²) favorable aux alevins post-émigrants (H ≤ 0.5 m et V ≤ 0.5 m/s) à la fois au débit de base et au débit maximum												
Débit de base (m ³ /s)	Débit maximum (m ³ /s)											
	10	20	30	50	75	100	130	180	230	280	330	380
10	10.26	4.90	1.87	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20		8.29	4.99	1.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30			6.66	2.59	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50				4.45	1.90	0.51	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75					3.30	1.75	0.66	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
100						2.44	1.28	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00
130							2.02	0.74	0.07	0.00	0.00	0.00
180								1.58	0.66	0.06	0.00	0.00
230									1.13	0.43	0.03	0.00
280										0.88	0.32	0.04
330											0.68	0.27
380												0.52

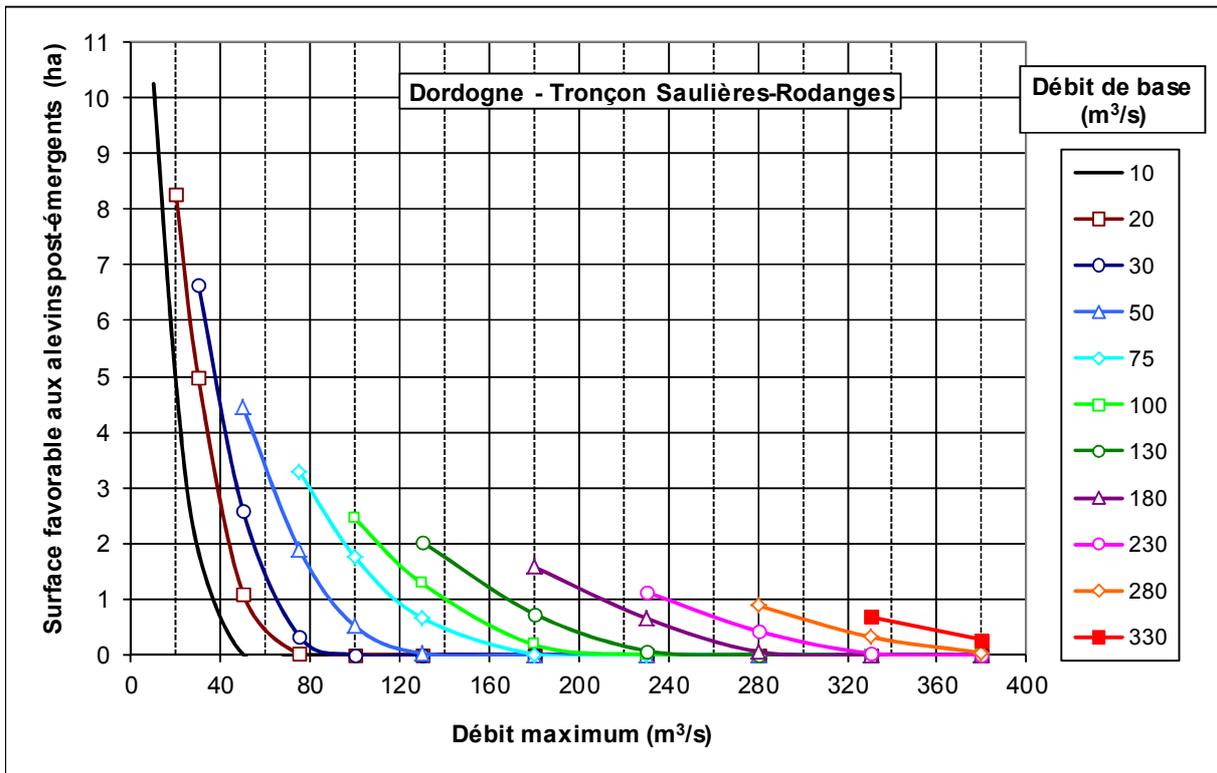


Figure 121 : Surface favorable aux alevins post-émigrants (H ≤ 0.5 m et V ≤ 0.5 m/s) à la fois au débit de base et au débit maximum, en fonction de leurs valeurs.

Les surfaces où seule la vitesse est inférieure à 0.5 m/s à la fois au débit de base et au débit maximum sont bien plus importantes que les surfaces d'habitat où la hauteur d'eau est prise en compte. A partir d'un débit de base donné, cette surface diminue au fur et à mesure que le débit maximum augmente. Par exemple, à partir d'un débit de base de 30 m³/s, cette surface est de 16.7 ha

pour un débit maximum de 50 m³/s, 5.9 ha pour 100 m³/s, 1.1 ha pour un 180 m³/s, et 0.3 ha pour 280 m³/s. Pour une amplitude de variation donnée, cette surface est d'autre part d'autant plus faible que la variation se déroule dans une gamme de débit élevé. Par exemple, cette surface est de 7.2 ha pour une variation entre 50 et 100 m³/s, de 3.2 ha pour une variation entre 130 et 180 m³/s, de 1.9 ha pour une variation entre 280 et 330 m³/s (50 m³/s d'amplitude à chaque fois).

Surface (ha) où V ≤ 0.5 m/s, à la fois au débit de base et au débit maximum												
Débit de base (m ³ /s)	Débit maximum (m ³ /s)											
	10	20	30	50	75	100	130	180	230	280	330	380
10	28.9	25.9	21.2	12.5	6.8	3.9	1.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1
20		29.8	24.8	15.1	8.5	5.0	2.4	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1
30			26.6	16.7	9.7	5.9	3.0	1.1	0.5	0.3	0.2	0.1
50				18.6	11.4	7.2	4.1	1.6	0.8	0.5	0.3	0.2
75					12.8	8.5	5.0	2.3	1.2	0.7	0.4	0.3
100						9.3	5.6	2.7	1.5	0.9	0.6	0.4
130							6.4	3.2	1.9	1.1	0.8	0.6
180								4.0	2.5	1.6	1.1	0.8
230									3.2	2.2	1.5	1.1
280										2.7	1.9	1.4
330											2.3	1.8
380												2.1

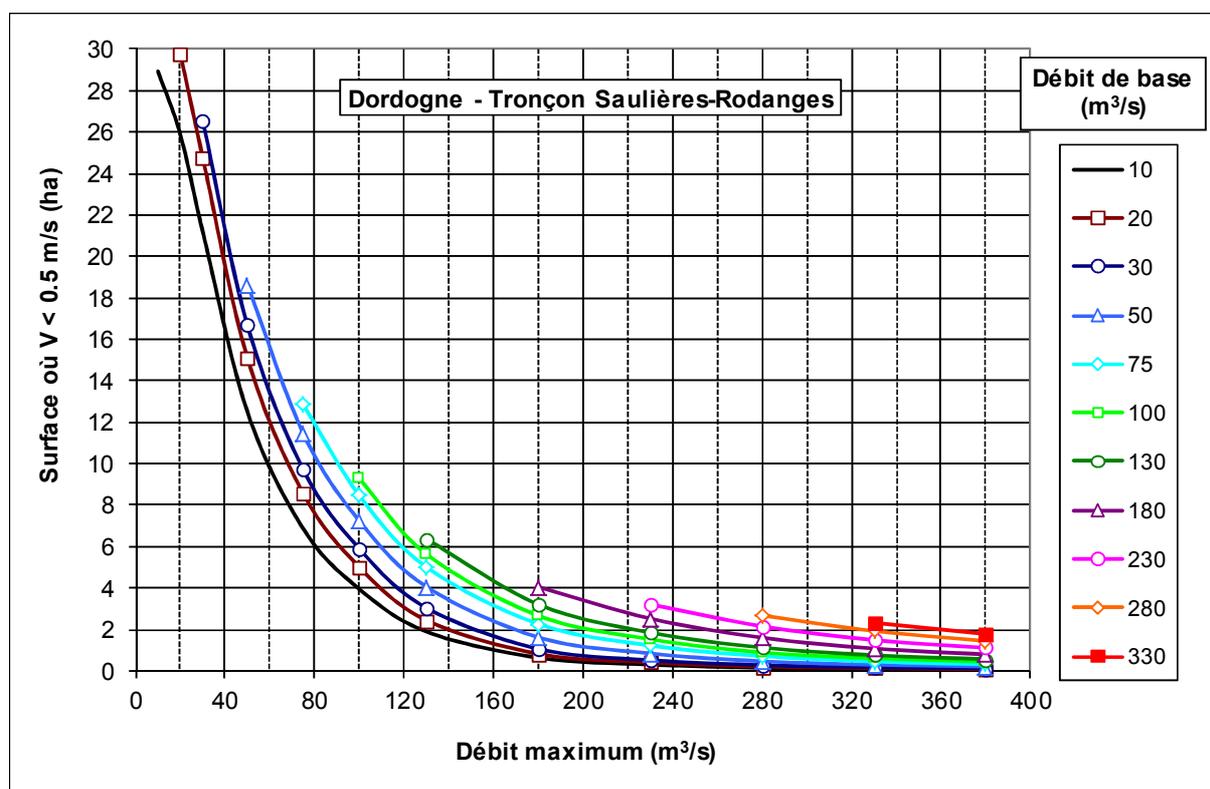


Figure 122 : Surface où V ≤ 0.5 m/s, à la fois au débit de base et au débit maximum, en fonction de leurs valeurs.

5.6.4. Discussion sur la problématique de dérivation forcée des alevins

Les résultats présentés ci-dessus pour le cas de la Dordogne montrent que les surfaces favorables aux alevins post-émergents de saumon et de truite diminuent rapidement lorsque le débit augmente et que ces surfaces sont intégralement déplacées pour des variations d'amplitudes de l'ordre de 40-50 m³/s pour les faibles débits de base et 70-80 m³/s pour les forts débits de base. Cela amène à penser que, suite aux hausses d'éclusées, les alevins sont amenés à se déplacer pour

trouver de nouveaux habitats favorables. Ceci dit, dans la mesure où le facteur limitant s'avère être essentiellement la hauteur d'eau, et non la vitesse d'écoulement, il est difficile d'évaluer si ces modifications d'habitats et besoins de déplacement sont susceptibles ou non d'engendrer une dérive forcée des alevins. En l'état actuel des connaissances, on manque de critères pour interpréter ces résultats sur les conditions d'habitat.

Pour le cas de Dordogne, il n'a pas été proposé à ce jour de mesures de mitigation spécifiquement vis-à-vis de cette problématique de dérive forcée des alevins. Le maintien d'un débit de base de 80 m³/s à l'aval de la confluence avec la Maronne, ainsi que la limitation du débit à une valeur maximale de l'ordre de 210 m³/s, mis en œuvre vis-à-vis de l'échouage-piégeage, ne peuvent être que bénéfiques en limitant les modifications d'habitat.

Pour progresser, il serait intéressant de mener des suivis in situ de la dérive des alevins lors des hausses d'éclusées, comme celui engagé sur la Maronne, sur plusieurs cours d'eau où les conditions d'habitats sont également modélisées. Cela aiderait à appréhender quels sont les paramètres et critères pertinent à considérer pour le phénomène de dérive forcée.

5.7. Discussion sur la définition des mesures de mitigation

En termes de mesure de mitigation des éclusées hydroélectriques, la législation française ne prévoit qu'une disposition concernant la fixation des débits réservés à l'aval des ouvrages, avec des valeurs minimales égales à 10% du module, voire 5% du module si l'aménagement fait partie de la liste dérogatoire au titre de la production d'énergie de pointe. Il n'y a aucune autre disposition prévue que ce soit en termes de mesures hydrologiques vis-à-vis des débits maximaux, des amplitudes ou des gradients des éclusées, ou sur d'autres types de mesures de mitigation (structurelles sur les aménagements hydroélectriques, travaux sur le cours d'eau).

Dans les études de cas présentées, des progrès ont été réalisés dans la définition des mesures de gestion des débits grâce d'une part au couplage d'analyses des régimes hydrologiques et des régimes d'éclusées, d'études sur l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats sur la gamme de turbinage et de suivis biologiques de grande ampleur, et grâce d'autre part aux retours d'expérience acquis suite à la mise en œuvre de mesures sur certains sites. La démarche expérimentale sur les cours du bassin de la Dordogne est à ce titre exemplaire et riche d'enseignements.

Les études de cas ont majoritairement débouché sur des mesures de modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques déclinées selon un calendrier biologique. Les Figure 124 à Figure 127 présentent les tableaux récapitulatifs des mesures proposées ou mises en œuvre selon les différentes périodes biologiques, pour la Dordogne, la Maronne, le Gave d'Ossau et la Creuse. De manière globale, les études amènent à préconiser :

- (1) le maintien de débits de base hivernaux variant entre 25% et 45% du module pour limiter l'exondation des frayères de truite et de saumons,
- (2) le maintien de débits de base printaniers variant entre 30% à 60%, voire 75% du module et (3) la limitation également au printemps et en été des gradients de baisse à des valeurs de l'ordre de 10% à 30% du module par heure pour limiter les échouage-piégeages de l'ensemble des espèces en limitant les surfaces exondées, ainsi que les déconnexions de bras secondaires et de dépressions rivulaires
- (4) de limiter le débit maximum à environ 1.5 fois le module au printemps sur la Dordogne et au module en été sur la Creuse pour limiter la mise en eau de sites piègeux et la dégradation des habitats des juvéniles.

Sur tous les cours d'eau, les efforts d'atténuation les plus forts ont ainsi été ciblés durant le printemps, cette saison englobant l'émergence des alevins de truite et de saumon, ainsi que la reproduction, l'incubation et l'émergence de bon nombre d'espèces lithophiles.

Les mesures de modification des caractéristiques des éclusées hydroélectriques présentent l'avantage de profiter à l'ensemble du linéaire du cours d'eau à l'aval de la centrale. Dans les cas où ces types de mesures ont été (Dordogne, Maronne) ou semblent en passe d'être mises en œuvre (Creuse, Doubs franco-suisse), cela s'est traduit par un rôle de démodulation accentuée ou nouveau pour les derniers aménagements aval des chaînes concernées. Des opérations de travaux sur la

morphologie des cours d'eau peuvent s'avérer un complément utile, voire incontournable, pour apporter une solution dans certains contextes morphologiques particulièrement problématiques comme les bras secondaires. Leur efficacité reste toutefois ponctuelle et ces opérations ne peuvent pas, à elles seules, suffire à limiter de façon satisfaisante l'impact des éclusées à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Dans certaines configurations d'aménagement hydroélectrique, des mesures structurelles pourraient s'avérer de bonnes solutions, soit pour soustraire les éclusées sur des tronçons de cours d'eau, soit pour trouver des compromis maximisant les mesures de mitigation, tout en minimisant les contraintes sur la production de pointe actuelle (ouvrage de démodulation ou bassin "tampon"). Hormis le cas de 2 bassins "tampons" à notre connaissance, ces types de solution ont été peu étudiés, ou du moins mis en œuvre en France; et mériteraient peut-être d'être davantage explorés.

Les retours d'expérience sur l'efficacité de mesures de mitigation des éclusées hydroélectriques restent rares dans la bibliographie, mais il est intéressant de noter que les démarches d'études menées en France aboutissent à des propositions de mesures comparables à celles mises en œuvre sur la côte Ouest des USA, à l'aval de l'aménagement de Skagit Hydroelectric Project sur la Upper Skagit River (Connor et al. 2004 ; Figure 123) ou à l'aval de l'aménagement de Priest Rapid sur la Columbia River (Harnish et al. 2014). Sur ces 2 cours d'eau, des améliorations notables des populations de saumons ont ainsi été obtenues. Harnish et al. (2014) ont en particulier observé une augmentation de 217 % de la productivité saumon quinnat (*Oncorhynchus tshawytscha*) correspondant aux contraintes mises en place pour prévenir l'assèchement des nids et une augmentation supplémentaire de 130% coïncidant avec la mise en œuvre des contraintes visant à limiter l'échouage et le piégeage des juvéniles.

Période	Gamme de débit en période de reproduction (m ³ /s et % du module)	Débit minimum (m ³ /s et % du module)	Amplitude maximale des baisses sur 24H (m ³ /s et % du module)	Gradient de baisse maximum (m ³ /s/h et % du module/h)	Baisse en journée	"Best-effort agreement" (1)
Initialement ≤ 1980	Pas de limite	28.3	Aucune	Aucun	Autorisée	Non
		22.30%				
Accord intermédiaire 1981-1990	118.9 - 198.2	28.3 - 65.1	Aucune	113.3	Autorisée	Non
	22.3% - 156.3%	22.3% - 51.3%		89.30%		
Accord final ≥ 1991	70.8 - 141.6	42.5 - 73.6	113.3	85.0	Interdite (2)	Oui
	55.8% - 111.6%	33.5% - 58%	89.30%	67%		

1 : Engagement à volontairement aller plus loin que les mesures établies si les conditions le permettent
2 : Sauf au-delà d'un certain seuil de débit

Figure 123 : Tableau récapitulatif des mesures de mitigation des éclusées mises en œuvre sur la Upper Skagit River selon les périodes. Module du cours d'eau égal à 126.8 m³/s au niveau de la centrale la plus aval (tableau adapté de Connor et al. 2004).

Si l'on sait à présent comment solutionner certaines problématiques pour certaines espèces (exondation des frayères et échouage-piégeage des alevins de truite et de saumons), les connaissances et surtout les retours d'expérience manquent encore pour d'autres problématiques et espèces moins étudiées (dérive forcée des alevins ; dégradation des habitats vers les forts débits ; ombre et cyprinidés). Bien que les principes des mesures de gestion des débits soient toujours les mêmes (hausses du débit de base, limitation des débits maximaux, des amplitudes et des gradients), l'état actuel des connaissances ne permet donc pas encore, sur un cours d'eau donné, de prédéfinir un ensemble complet de mesures dont on peut garantir l'efficacité. Ce constat amène à prôner la poursuite des suivis en cours, éventuellement le lancement de démarche similaires sur de nouveaux sites complémentaires, et surtout impérativement des tests grandeur-nature de mesures de mitigation.

Les réflexions menées ici sur la définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées restent donc à approfondir et il est prévu de poursuivre ce travail par la suite, cette dernière partie pouvant servir de base à la production collégiale d'un document bien plus complet. Les analyses sur les paramètres hydromorphologiques ou d'habitat des poissons à prendre en compte et sur leurs critères d'interprétation à partir des données disponibles n'ont déjà pas été poussées à bout dans cet exercice. Il y aurait tout particulièrement intérêt à creuser les recoupements entre les résultats des analyses hydrologiques, des études des paramètres hydromorphologiques et des habitats et des suivis biologiques. Il y a également en France d'autres sites d'étude que ceux considérés ici qui font l'objet de suivis conduits notamment par EDF et dont les enseignements seraient probablement intéressants à intégrer (sur la Dranse, le Thaurion, le Guil, le Tier, l'Aude, ...). Il existe aussi une

démarche d'étude récente sur la basse vallée de l'Ain. D'autre part, de nombreux travaux viennent d'être réalisés ou sont en cours à l'étranger, comme en témoigne le nombre élevé d'interventions sur la problématique des éclusées hydroélectriques au dernier colloque Ecohydraulique à Trondheim en juin 2014. Tous les enseignements de cette bibliographie n'ont pas encore pu être tirés dans cette réflexion.

Axe	Critère	Lieu	Période Début	Période Fin	Valeur C d C	Valeur 2008	Valeur 2009	Valeur 2010	Valeur 2011	Valeur 2012
Dordogne	Débit minimum*	Station d'Argentat	15-nov	15-mars	10 m ³ /s	35 m ³ /s	35 m ³ /s			
	Débit minimum*	Station d'Argentat	15-mars	15-juin	10 m ³ /s	35 m ³ /s	50 m ³ /s			
	Débit minimum*	Aval confluence Maronne	01-mars	15-juin	10,5 m ³ /s	39 m ³ /s	39 m ³ /s	70 m ³ /s	70 m ³ /s	80 m ³ /s
	Débit maximum*	Aval Station d'Argentat	15-mars	15-juin	340 m ³ /s	190 m ³ /s	190 m ³ /s	200 m ³ /s	200 m ³ /s	180 m ³ /s
	Débit maximum*	Aval confluence Maronne	15-mars	15-juin	385 m ³ /s	225 m ³ /s	225 m ³ /s	230 m ³ /s	230 m ³ /s	210 m ³ /s
	Gradient (+)	Station d'Argentat Q _A < 180 m ³ /s	01-mars	15-juin	100 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h
	Gradient (-)	Station d'Argentat Q _A < 80 m ³ /s Q _A > 80 m ³ /s	01-fév.	29-fév	100 m ³ /s/h	10 m ³ /s/2h 33 m ³ /s/h				
	Gradient (-) ANR Dordogne ≥ 75 m ³ /s	Station d'Argentat Q _A < 80 m ³ /s Q _A > 80 m ³ /s	01-mars	15 juin	100 m ³ /s/h	10 m ³ /s/2h 33 m ³ /s/h				
Gradient (-) ANR Dordogne < 75 m ³ /s	Station d'Argentat Q _A < 35 m ³ /s 35 < Q _A < 80 m ³ /s	01-mars**	15-juin**	100 m ³ /s/h	33 m ³ /s/h	10 m ³ /s/2h	10 m ³ /s/2h	10 m ³ /s/2h	2 m ³ /s/48h 5 m ³ /s/48h	
Maronne	Débit minimum	Barrage Hauteffage	01-janv	31-déc	0,485 m ³ /s	1 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s
	Débit minimum*	Depuis la centrale	15-nov	15 juin	0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s
	Débit minimum*	Depuis la centrale	15-mars	15-juin	0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	3,0 m ³ /s	8,0 m ³ /s	8,0 m ³ /s
	Débit maximum	Depuis la centrale	15-mars	15-juin	45 m ³ /s	----	----	30 m ³ /s	----	----
	Durée max de l'éclusee journalière > 25m ³ /s *	Aval centrale	15-mars	15-juin	----	----	----	----	18 heures	18 heures
	Gradient de baisse	Station de Basteyroux	15-mars	30-sept	----	10 m ³ /s/h	10 m ³ /s/h			
Cère	Débit minimum	Station de Brugale	01-janvier	31-déc	1 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s			
	Débit minimum*	Station de Brugale	15-mars	15-juin	1 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s	2 m ³ /s	4 m ³ /s	7 m ³ /s

* en fonction de l'hydraulicité rencontrée

** ce principe sera également appliqué dans le cas où les apports naturels deviendraient inférieurs à 35 m³/s à Argentat du 15 novembre au 01 mars.

Figure 124 : Evolution des mesures de gestion des débits mises en œuvre de 2008 à 2012 sur la Dordogne, la Maronne et la Cère dans le cadre de la convention pour la réduction de l'impact des éclusées sur le bassin de la Dordogne (Annexe 4).

Période biologique			1) Reproduction des géniteurs, incubation des œufs et vie sous graviers des larves	2) Emergence et premières semaines de vie des alevins	3) Croissance estivale et automnale des alevins et juvéniles, habitats des truites adultes
Date			Début décembre à fin mars	Début avril à début juillet	Juillet à fin novembre
Débit minimum à maintenir en permanence à l'aval de Geteu (module 16.9 m ³ /s)			8 m ³ /s 47% du module	8 m ³ /s 47% du module	4 m ³ /s 24% du module
Gradients de variation maximaux	A la baisse	Q < 8 m ³ /s	Sans objet	Sans objet	2 m ³ /s/h
		8 < Q < 15 m ³ /s	-	3 m ³ /s/h	3 m ³ /s/h
		Q > 15 m ³ /s	-	-	-
	A la hausse	Q < 8 m ³ /s	Sans objet	Sans objet	4 m ³ /s/h
		8 < Q < 15 m ³ /s	-	4 m ³ /s/h	-
		Q > 15 m ³ /s	-	4 m ³ /s/h	-

Figure 125 : Calendrier des débits proposé sur le gave d'Ossau, pour le tronçon Geteu-Castet (figure extraite de Vandewalle et al. 2012b).

Période biologique			1) Reproduction des géniteurs, incubation des œufs et vie sous graviers des larves	2) Emergence et premières semaines de vie des alevins	3) Croissance estivale et automnale des juvéniles
Date			1 ^{er} décembre au 15 mars	16 mars au 15 juin	15 juin au 30 novembre
Débit minimum à maintenir en permanence	Au droit des stations		6.0 m ³ /s	8.0 m ³ /s	4.5 m ³ /s
	Au niveau de Castet (module 18.9 m ³ /s)		6.5 - 7.0 m ³ /s 34.4 - 37% du module	8.5 - 9.0 m ³ /s 45 - 47.6% du module	5.0 - 5.5 m ³ /s 26.5 - 29.1% du module
Gradients de variation maximaux	A la hausse	Débit < 8.5-9 m ³ /s	4 m ³ /s/h	Sans objet	2 m ³ /s/h
		Débit > 8.5-9 m ³ /s	4 m ³ /s/h	4 m ³ /s/h	4 m ³ /s/h
	A la baisse	Débit < 8.5-9 m ³ /s	4 m ³ /s/h	Sans objet	1 m ³ /s/h
		Débit > 8.5-9 m ³ /s	4 m ³ /s/h	2 m ³ /s/h	2 m ³ /s/h

Figure 126 : Calendrier des débits proposé sur le gave d'Ossau, pour le tronçon Aval Castet (figure extraite d'Agerin 2012).

Proposition	Valeurs du paramètre	Période	Priorité
Les débits de base inter-éclusées	8 m ³ /s ou 5 m ³ /s (à défaut)	Automne-fin du printemps	1
Les débits maximaux estivaux	25 à 30 m ³ /s	Eté	1
Les gradients	5 cm/h	Printemps-été	1b
Le débit minimal estival garanti	3 m ³ /s	Eté	1b
L'effacement des seuils			1
Les apports de granulats en aval des barrages			2

Figure 127 : Résumé et priorisation des pistes d'améliorations pour le peuplement piscicole de la rivière Creuse en aval du complexe hydroélectrique d'Eguzon.

6. CONCLUSIONS, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES GENERALES

Dans le cadre de cette thèse, les travaux ont tout d'abord porté sur la mise au point d'une méthode de repérage des éclusées au sein des hydrogrammes. Cela a nécessité au préalable de caractériser les gradients des variations de débit en hydrologie naturelle de façon à établir des critères de discrimination entre les éclusées et les variations naturelles de débit. Un indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique liée aux éclusées a ensuite été construit dans le but de proposer aux gestionnaires un outil de « pré-diagnostic » des impacts biologiques et surtout un outil de suivi des évolutions spatiales et temporelles des régimes d'éclusées. Enfin, une réflexion a été menée sur les études, méthodes et critères de définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées, en s'appuyant sur la bibliographie et sur plusieurs études de cas récentes (Dordogne, Maronne, Creuse, Gave d'Ossau), afin d'extraire les résultats et les critères permettant de définir des mesures efficaces.

De manière générale, au-delà des points discutés à l'issue de chacune des parties, il est espéré que la méthode de repérage des éclusées au sein des hydrogrammes et l'indicateur synthétique du niveau de perturbation hydrologique proposés permettront une meilleure prise en compte et analyse de la problématique des impacts des régimes d'éclusées sur les hydrosystèmes, que ce soit dans le cadre des études de cas ou des démarches globales d'évaluation de l'état des cours d'eau. Même si ces outils sont critiquables sur plusieurs points de construction (comme le choix des critères de repérage, la fixation des valeur-seuils, l'évaluation initiale des niveaux de perturbation par expertise ou les interventions « manuelles » dans la mise au point de la méthode de reclassement), ils constituent une avancée significative par rapport au fait de n'examiner que les données administratives de l'aménagement (débit réservé et débit d'équipement) et sont complémentaires aux méthodes et indicateurs existant de type HVA-RVA, DHRAM, HIP, IAHRIS ou HYDMOD-R (voir références en introduction) qui ne permettent pas d'appréhender correctement les éclusées. L'utilisation de ces outils devrait ainsi participer à la progression des connaissances sur les impacts des éclusées et in fine la définition des mesures de mitigation, en facilitant les recoupements entre les caractéristiques des régimes d'éclusées et les résultats des études hydromorphologiques et des suivis biologiques. L'indicateur a d'ores et déjà été transférés aux agences de l'eau Adour-Garonne et Rhône-Méditerranée-Corse, particulièrement concernées par la problématique, qui envisagent de les intégrer dans leur tableau de bord pour l'évaluation de l'état des masses d'eau dans le cadre de la DCE. Il est prévu prochainement de diffuser librement le fichier Excel réalisant de manière automatisée le repérage des éclusées au sein des hydrogrammes, la production des statistiques mensuelles et annuelles des régimes d'éclusées, ainsi que le calcul de l'indicateur.

A l'avenir, les perspectives d'amélioration de la méthode de repérage et de l'indicateur résident notamment dans une régionalisation ou une contextualisation des critères de sélection des éclusées et/ou d'appréciation du niveau de perturbation hydrologique. Une première voie pourrait consister à régionaliser le critère de sélection des éclusées portant sur le gradient qui est à ce jour fixé par rapport à une référence globale. Une seconde voie pourrait également consister à adapter les critères en fonction du contexte écologique du cours d'eau, en intégrant des informations sur les espèces présentes, les périodes clés de leurs cycles de développement, l'hydromorphologie du cours d'eau et les valeurs critiques vis-à-vis des paramètres des éclusées. Dans tous les cas, étant donné l'état actuel des connaissances, cela semble constituer des projets de recherche plutôt à moyen terme.

Vis-à-vis de l'évaluation de l'état des masses d'eau dans le cadre de la DCE, plusieurs questions se posent :

- comment intégrer l'indicateur "éclusées" proposé ici, dans un indicateur global du niveau de perturbation de l'hydrologie prenant également en compte les modifications de la quantité, de la fréquence et du timing des débits ?
- comment étendre les diagnostics établis au niveau des stations hydrométriques à l'échelle des masses d'eau ?
- comment traiter le cas des tronçons de cours d'eau soumis à éclusées pour lesquels on ne dispose pas de données hydrologiques ?

Afin de produire un indicateur global du niveau de perturbation de l'hydrologie, il serait utile de développer un indicateur des modifications de la quantité, de la fréquence et du timing des débits, calculé à partir des données des stations hydrométriques et que l'on pourrait agréger avec l'indicateur "éclusées" ici proposé. Pour ce faire, on pourrait s'inspirer des méthodes existantes de type IHA-RVA, DHRAM, HIP, IAHRIS ou HYDMOR-R. La principale difficulté réside probablement dans la construction de données d'hydrologie naturelle de référence, à l'échelle nationale, servant ensuite de base de comparaison.

Vis-à-vis de la spatialisation des diagnostics de l'indicateur "éclusées", il serait intéressant de caractériser l'amortissement des régimes d'éclusées vers l'aval entre des stations hydrométriques successives, ainsi que la réponse de l'indicateur. Cela pourrait peut-être permettre de produire des "règles d'extension" s'appuyant par exemple sur l'augmentation du module et sur la distance entre les stations. La difficulté est qu'il y a peu de cours d'eau soumis à éclusées sur lesquels il y a des stations successives, suffisamment proches, sans autres sources de perturbation intermédiaires compliquant l'analyse (confluence d'un affluent lui-même soumis à éclusées ou présence de microcentrales susceptibles de modifier les caractéristiques des éclusées). Dans tous les cas, l'exercice d'extension des diagnostics va se heurter à la problématique de la présence de microcentrales sur les tronçons qui peuvent, selon la qualité de leur régulation, être "quasi-transparentes" ou sensiblement modifier les caractéristiques des éclusées et en particulier en "réinitialiser" leurs gradients.

Pour les tronçons soumis à éclusées sur lesquels on ne dispose pas à ce jour de données hydrologiques, la solution idéale consisterait évidemment à y implanter une station hydrométrique. A défaut, on peut envisager différentes solutions. Premièrement, on pourrait utiliser les chroniques de débits turbinés qui sont généralement enregistrés à des pas de temps assez fins, pour autant que ces données soient mises à disposition par l'exploitant. Une deuxième solution consisterait à évaluer le niveau de perturbation en fonction des caractéristiques et du type de gestion de l'aménagement hydroélectrique, par analogie avec les résultats de l'indicateur obtenus dans des configurations comparables. Cela nécessiterait un travail préalable sur les stations analysées, de mise en relation des résultats de l'indicateur avec les caractéristiques des aménagements en amont (capacité utile, débit minimum, débit maximum, ...), ainsi qu'avec des informations sur les régimes hydrologiques (type, hydraulité, ...). Troisièmement, on pourrait envisager d'adapter l'indicateur pour qu'il puisse être appliqué sur des chroniques de niveau d'eau, plus faciles à acquérir que des chroniques de débit (pas de courbe de tarage à construire). Cela pose toutefois 2 problèmes. Premièrement, une même éclusée ne va pas se traduire par une même variation de niveau d'eau selon le faciès d'écoulement du cours d'eau (radier, rapide, plat courant, profond, ...). Le diagnostic pourrait ainsi différer pour deux chroniques de niveau d'eau mesurées très proches l'une de l'autre. La solution consisterait peut-être alors à définir un type de faciès où effectuer la mesure. Deuxièmement, les niveaux d'eau sont mesurés par rapport à une référence fixée arbitrairement pour chaque station, alors que les débits sont dans la démarche de l'indicateur rapportés au module des stations. Il serait ainsi difficile d'analyser de manière homogène différentes chroniques de niveau d'eau. Une solution pourrait consister à "calibrer" les chroniques de niveaux d'eau en mesurant les débits correspondants à quelques niveaux, mais on se rapproche alors de la construction d'une courbe de tarage.

Pour la mitigation des impacts des éclusées hydroélectriques sur les populations de poissons, le principal levier consiste à modifier les caractéristiques des éclusées hydroélectriques en définissant des règles sur la gestion de débits. Ce type de solution présente l'avantage de profiter à l'ensemble du linéaire à l'aval de la centrale. Des opérations de travaux sur la morphologie des cours d'eau peuvent s'avérer un complément utile, voire incontournable, pour apporter une solution dans certains contextes morphologiques particulièrement problématiques comme les bras secondaires. Leur efficacité reste toutefois ponctuelle et ces opérations ne peuvent pas, à elles seules, suffire à limiter de façon satisfaisante l'impact des éclusées à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Dans certaines configurations d'aménagement hydroélectrique, des mesures structurelles pourraient s'avérer de bonnes solutions, soit pour soustraire les éclusées sur des tronçons de cours d'eau, soit pour trouver des compromis maximisant les mesures de mitigation, tout en minimisant les contraintes sur la production de pointe actuelle (ouvrage de démodulation ou bassin "tampon"). Ces types de solution ont été peu étudiés, ou du moins mis en œuvre en France; et mériteraient peut-être d'être davantage explorés.

Des progrès ont été réalisés dans la définition des mesures de gestion des débits grâce d'une part au couplage d'analyses des régimes hydrologiques et des régimes d'éclusées, d'études sur l'évolution des paramètres hydromorphologiques et des habitats sur la gamme de turbinage et de

suivis biologiques de grande ampleur, et grâce d'autre part aux retours d'expérience acquis suite à la mise en œuvre de mesures sur certains sites. Si l'on sait à présent comment solutionner certaines problématiques pour certaines espèces (exondation des frayères et échouage-piégeage des alevins de truite et de saumons), les connaissances et surtout les retours d'expérience manquent encore pour d'autres problématiques et espèces moins étudiées (dérive forcée des alevins ; dégradation des habitats vers les forts débits ; ombre et cyprinidés). Bien que les principes des mesures de gestion des débits soient toujours les mêmes (hausse du débit de base, limitation des débits maximaux, des amplitudes et des gradients), l'état actuel des connaissances ne permet donc encore pas, sur un cours d'eau donné, de prédéfinir un ensemble complet de mesures dont on peut garantir l'efficacité. Les réflexions menées ici sur la définition des mesures de mitigation des impacts des éclusées restent donc à approfondir et il est prévu de poursuivre ce travail par la suite, cette dernière partie pouvant servir de base à la production collégiale d'un document bien plus complet. Cela amène également à prôner la poursuite des suivis en cours, éventuellement le lancement de démarches similaires sur de nouveaux sites complémentaires, et surtout impérativement des tests grandeur-nature de mesures de mitigation.

Pour conclure, on rappelle que les enjeux sur la mitigation des impacts des éclusées sur les hydrosystèmes sont importants du fait du nombre et des linéaires de cours d'eau affectés, et que des opportunités de redéfinir les modes de gestion des aménagements hydroélectriques sont en cours ou à venir prochainement pour bon nombre de sites, notamment dans le cadre des procédures de renouvellements des concessions. Même si les travaux de la présente thèse ne sont pas des plus pointus dans chacun des domaines abordés (hydrologie, hydraulique, écologie), il est espéré que ces travaux participeront à trouver des solutions pour concilier à la fois les enjeux environnementaux et la production d'hydroélectricité de pointe, de façon à ce que cette énergie renouvelable soit « verte » et durable à tous points de vue.

7. BIBLIOGRAPHIE

Ackerman CT, 2002. HEC-Geo-RAS – An extension for support of HEC-RAS using ArcView GIS. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Report number CPD-76. 154p.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>

Agerin, 2012. Etude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et de la fonctionnalité des habitats piscicoles en fonction du débit sur le Gave d'Ossau à l'aval de Castet. Rapport Agerin pour CG64. 49 p.

http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/60576/GED_00000003.pdf

Almodovar A et Nicola GG, 1999. Effects of a small hydropower station upon brown trout (*salmo trutta*) in the river Hoz Seca (Tagus basin, Spain) one year after regulation. *Regulated Rivers : Research and Management* 15, 477 – 484.

Armand L et Courret D, 2011. Compte rendu du suivi de la fraie des salmonidés sur le Gave d'Ossau durant l'Hiver 2009 – 2010. Tronçon Confluence du Valentin – Restitution de Geteu. Tronçon Restitution de Geteu - retenue de Castet. Tronçon Aval Castet. Rapport POLE RA.11.01.

<http://piso2h.drealmp.fr/CONTRIBUTIONS%20GEDRE%20OSSAU/ctr06-09%201102%20Ossau%20GEDRE%20CG64%20annexe%207.pdf>

Aubert S, Roset N et Langon M, 2013. Suivi des échouages et piégeages de 2009 à 2012 sur la basse rivière d'Ain en lien avec le fonctionnement hydroélectrique par éclusées en aval du barrage d'Allement. Rapport ONEMA 39 p.

Baker DB, Richards RP, Loftus TT and Kramer JW, 2004. A new Flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water resources association* 40(2): 503-522.

Baumann P et Klaus I, 2003. Conséquences écologiques des éclusées – Etude bibliographique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne.

<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00776/index.html?lang=fr>

Baran P, Boucard F, Boyenval E, Cassan L, Garmendia L, Hurel G and Prel P, 2012. Hydropeaking impacts on the Lez river and studies to define mitigation measures. Eawag/Wasser-Agenda 21 Workshop on Hydropeaking, Zurich, 19 June 2012.

http://www.alpconv.org/en/organization/groups/WGWater/workshophydropeaking/Documents/03a_Courret_WS%20Hydropeaking%20Zurich%202012-06-19.pdf

Beall E, Dumas J, Claireaux D, Barriere L, Marty C, 1994. Dispersal patterns and survival of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) juveniles in a nursery stream. *ICES J. Mar Soi.*, 51, 1-9.

Bieri MP, 2012. Operation of Complex Hydropower Schemes and its Impact on the Flow Regime in the Downstream River System under Changing Scenarios. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. Thèse NO 5433.

http://infoscience.epfl.ch/record/180233/files/EPFL_TH5433.pdf

Black AR, Bragg OM, Duck RW, Jones AM, Rowan JS and Werritty A, 2000. Methods of assessing anthropogenic impacts on the hydrology of rivers and lochs. A user manual introducing the Dundee Hydrological Regime Assessment Method (DHRAM). SNIFFER report SR (00) 01/2F.

<http://www.sniffer.org.uk/files/9013/4183/8022/SR0001F.pdf>

Black AR, Rowan JS, Duck RW, Bragg OM and Clelland BR, 2005. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conservations: Marine and Freshwater Ecosystems* 15: 427-446.

Boyenval E, 2010. Modélisation hydraulique de l'aménagement morphologique du Lez dans un contexte de fonctionnement par éclusées Rapport de Projet de fin d'études ENSEEIHT. 55 p.

Bradford MJ, Taylor GC, Allan JA and Higgins PS, 1995. An experimental study of the stranding juvenile coho salmon and rainbow trout during rapid flow decreases under winter conditions. *North American Journal of Fisheries management* 15, 473 – 479.

Bradford MJ, 1997. An experimental study of stranding of juvenile salmonids on gravel bars and in sidechannels during rapid flow decreases. *Regulated Rivers : Research and Management* 13, 395 – 401.

Brunner GW, 2002a. HEC-RAS, River Analysis System User's Manual. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Report number CPD-68. 420p.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Brunner GW, 2002b. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. Report number CPD-69. 350P.

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>

Bovee KD, 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. US Fish and Wildlife Service, Instream flow information paper N° 12.

Bunn SE and Arthington AH, 2002. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. Environmental Management Vol. 30, No. 4, pp. 492–507

California Department of Water Resources, 2008. Redd Dewatering and Juvenile Salmonid Stranding in the Lower Feather River, 2007-2008. Interim Report for NOAA Fisheries prepared by California Department of Water Resources.

Capra H, Sabaton C, Gouraud V, Souchon Y and Lim P, 2003. A population dynamics model and habitat simulation as a tool to predict brown trout demography in natural and by-passed stream reaches. River Research and Applications 19, 551 – 568.

Carlisle DM, Falcone J, Wolock DM, Meador MR and Norris RH, 2010. Predicting the natural flow regime: model for assessing alteration in streams. River research and applications 26: 118-136.

Cattanéo F, Lamouroux N, Breil P and Capra H, 2002. The influence of hydrological and biotic processes on brown trout (*salmo trutta*) population dynamics. Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences 59, 12 – 22.

Cattanéo F, Hugueny B and Lamouroux N, 2003. Synchrony in brown trout, *salmo trutta*, population dynamics : a “Moran effect” on early-life stages. Oikos 100, 43 – 54.

Cazeuneuve L, Borry Y et Lascaux JM, 2006. Impact du fonctionnement par éclusées de l’usine hydroélectrique du Sablier sur la Dordogne : suivi des échouages-piégeages de poissons en 2005 et 2006 – Rapport d’étape. Rapport ECOGEA pour MIGADO 13D-06-RT.

Cazeuneuve L, Lagarrigue T et Lascaux JM, 2009a. Etude de l’impact écologique des éclusées sur la Dordogne. Analyse des pressions exercées par les phénomènes d’éclusées sur les écosystèmes de la rivière Dordogne et propositions de solutions susceptibles de les atténuer. Rapport final de phase 2. Rapport ECOGEA pour EPIDOR. 50 p.

http://www.eptb-dordogne.fr/public/content_files/rie2007_rapport_final.pdf

Cazeuneuve L, Courret D et Lascaux JM, 2009b. Etude de l’impact des éclusées sur la Creuse en aval du complexe hydroélectrique d’Eguzon (retenues d’Eguzon, de Roche-Au-Moine et de Roche-Bat-l’Aigue). Analyse hydrologique. 36p.

<http://www.bibliopeche.fr/pindownload/login.do?pin=KCHY7>

Cazeuneuve L, Lascaux JM et Mennessier JM, 2009c. Impact du fonctionnement par éclusées du barrage du Sablier sur la Dordogne et de l’usine hydroélectrique de Hautefage sur la Maronne : suivi des échouages-piégeages de poissons en 2008. Rapport ECOGEA pour MIGADO. 24 p + annexes.

Cazeuneuve L et Lascaux 2012. Etude des impacts des éclusées sur le bassin de la Dordogne. Résultats des échantillonnages piscicoles réalisés en 2011 sur la Dordogne. Rapport ECOGEA pour EPIDOR. 33 p + annexes.

Cazeuneuve L, Kardacz J et Lascaux JM, 2013. Veille écologique des impacts des éclusées sur le bassin de la Dordogne. Synthèse des observations réalisées en 2012 sur la Dordogne la Maronne et la Cère. Rapport ECOGEA pour EPIDOR 33 p + annexes.

Chanseau M, Courret D et Lascaux JM, 2008. Bilan des travaux réalisés sur les cours d’eau Maronne et Dordogne afin de limiter les impacts des éclusées. Rapport MIGADO. 16 p.

Clave D, Kardacz J et Cazeuneuve L, 2013. Suivi des premiers stades de vie des juvéniles de saumons. Rapport MIGADO LINCUB 12. 16 p + annexes.

Clave D et Fougerolas P, 2013. Restauration du saumon atlantique sur le bassin de la Dordogne : suivis biologiques, année 2012. Rapport MIGADO LPECHD12-LSTEMP12-LSPAP12. 25 p + annexes.

Cocherell SA, Chun SN, Cocherell DE, Thompson LC, Klimley AP and Cech JJ, 2011. A lateral-displacement flume for fish behavior and stranding studies during simulated pulsed flows. Environ. Biol. Fish. DOI 10.1007/s10641-011-9894-z.

Connor EJ and Pflug DE, 2004. Changes in the Distribution and Density of Pink, Chum, and Chinook Salmon Spawning in the Upper Skagit River in Response to Flow Management Measures. North American Journal of Fisheries Management 24:835–852, 2004.

Courret D, Larinier P, Lascaux JM, Chanseau M et Larinier M, 2006a. Etude pour une limitation des effets des éclusées sur la Dordogne en aval de l’aménagement du Sablier pour le saumon atlantique – Secteur Argentat-Saulières. Rapport MIGADO 8D-06-RT / GHAAPE RA.06.02. 38p + Annexes.

- Courret D, Larinier P, Lascaux JM, Chanseau M et Larinier M, 2006b.** Etude pour une limitation des effets des éclusées sur la Dordogne en aval de l'aménagement du Sablier pour le saumon atlantique – Secteur Saulières-Rodanges. Rapport d'étape MIGADO 15D-06-RT.
- Courret D et Lascaux JM, 2009.** Etude de l'impact des éclusées sur la Creuse à l'aval du complexe hydroélectrique d'Eguzon. Evolution des paramètres hydromorphologiques et des paramètres de l'habitat piscicole dans la gamme de turbinage. Rapport ECOGEA/GHAAPPE pour FNPF/EDF. 50 p.
<http://www.bibliopeche.fr/pindownload/pindownload.do;jsessionid=7857C8AAC19BA77EC2CC30B0E2D629CE>
- Courret D et Larinier M, 2008a.** Suivi de l'amélioration du Doubs Franco-Suisse. Analyse hydrologique. Etat des lieux en 2005. Rapport GHAAPPE RA.07.08 – V3. 39 p.
- Courret D et Larinier M, 2008b.** Etude pour la définition d'indicateurs pour la caractérisation des éclusées dans le bassin Adour-Garonne. Rapport GHAAPPE RA.07.09.52 p.
http://www.onema.fr/IMG/pdf/2008_028.pdf
- Courret D, 2010a.** Etude des gradients des variations de débit naturelles en vue de la fixation des critères pour le repérage des éclusées hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.09.04.44 p.
http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/59478/GED_00000000.pdf
- Courret D, 2010b.** Analyse de l'hydrologie et des régimes d'éclusées sur le Gave d'Ossau - Analyse des données existantes sur les tronçons Confluence Valentin - Geteu et Castet - Confluence Gave d'Aspe. Rapport GHAAPPE RA.09.03.
- Crisp DT and Hurley MA, 1991 a.** Stream channel experiment on downstream movement of recently emerged trout, *Salmo trutta* L. and salmon, *S. salar* L. -I. Effect of four different water velocity treatments upon dispersal rate. *J Fish Biol* 39: 347-361.
- Crisp DT and Hurley MA, 1991 b.** Stream channel experiment on downstream movement of recently emerged trout, *Salmo trutta* L. and salmon, *S. salar* L. -II. Effect of constant and changing velocities and of day and night upon dispersal rate. *J Fish Biol* 39: 363-370.
- Cushmann RM, 1985.** Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. *North American Journal of Fisheries Management* 5 : 330-339.
- DeGiorgi F, 2008.** Etat initial du Doubs Franco-Suisse en 2005 dans le cadre du suivi de l'effet de l'amélioration de la gestion des débits. Synthèse des études réalisées entre 2003 et 2005. Rapport de l'Université de Franche-Comté pour l'AAPPMA « la Franco-Suisse ». 123 p. + annexes.
- Eaucéa, 2008.** Etude de définition d'indicateurs pour la caractérisation des éclusées sur le bassin Adour-Garonne – Inventaire des méthodes et propositions d'indicateurs. Etude Eaucéa pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.
http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/57774/GED_00000000.pdf
- EPIDOR, 2009.** Le calendrier des débits de la Dordogne. 32 p.
http://www.eptb-dordogne.fr/public/content_files/calendrier_des_d%C3%A9bits.pdf
- Epteau, 2012.** Etudes des éclusées sur le Doubs Franco - Suisse. Evaluation des habitats piscicoles. Rapport pour EDF. Septembre 2012. 157 p. + annexes.
- Epteau, 2014.** Etudes des éclusées sur le Doubs Franco - Suisse. Analyse de scénarii visant à réduire les risques d'échouage et de piégeage piscicole. Rapport provisoire pour Chatelôt, EDF et La Goule. Avril 2014. 90 p. + annexes.
- Galland JC, Armand F and Guillot A, 2014.** La Bathie: simultaneous power increase and river safety improvement. Congrès SHF: "Enhancing Hydropower Plants", Grenoble, 9-10 avril 2014.
- Gao Y, Vogel RM, Kroll CN, Poff NL and Olden JD, 2009.** Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of hydrology* 374: 136-147.
- Geist DR, Arntzen EV, Murray CJ, McGrath KE, Bott YJ and Hanrahan TP, 2008.** Influence of River Level on Temperature and Hydraulic Gradients in Chum and Fall Chinook Salmon Spawning Areas Downstream of Bonneville Dam, Columbia River. *North American Journal of Fisheries Management* 27:30-41.
- Giggins CN and Acornley RM, 2000.** Salmonid habitat modelling studies and their contribution to the development of an ecologically acceptable release policy for Kielder reservoir North-East England. *Regulated rivers : research and management* 16, 203-224.
- Ginot V, Souchon Y, Capra H, Breil P et Valentin S, 1998.** EVHA, guide méthodologique. Cemagref, Lyon.
http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/EVHA_methode.pdf
- Graham WD, Thorpe JE and Metcalfe NB, 1996.** Seasonal current holding performance of juvenile atlantic salmon in relation to temperature and smolting. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53 : 80 – 86.

- Hallereker JH, Saltveit SJ, Harby A, Arnekliev JV, Fjeldstad HP et Kohler B, 2003.** Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo Trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. *River Research and Application* 19, 589-603.
- Hallereker JH, Sundt H, Alfredsen KT and Dangelmaier G, 2007.** Application of multiscale environmental flow methodologies as tools for optimized management of a Norwegian regulated national salmon watercourse. *River. Res. Applic.* 23: 493–510.
- Harnish RA, Sharma R, McMichael GA, Langshaw RB and Pearsons TN, 2014.** Effect of hydroelectric dam operations on the freshwater productivity of a Columbia River fall chinook salmon population. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, 71(4): 602-615.
- Heggenes J, 1988.** Effects of short-term flow fluctuations on displacement of, and habitat use by, brown trout in a small stream. *Transactions of the American Fisheries Society* 117 (4): 336-344.
- Heggenes J and Traaen T, 1988.** Downstream migration and critical water velocities in stream channels for fry of four salmonid species. *J. Fish. Biol.* 32: 717-727.
- Heggenes J, 1990.** Habitat utilisation and preference in juvenile atlantic salmon (*salmo salar*) in streams. *Regul. Riv.* 5, 341 – 354.
- Heggenes J, 1991.** Comparisons of habitat availability and habitat use by an allopatric cohort of juvenile Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) under low competition in a Norwegian stream. *Holarctic Ecology* 14, 51 – 62.
- Heggenes J, 1996 a.** Habitat selection by brown trout (*salmo trutta*) and young atlantic salmon (*salmo salar*) in streams : static and dynamic hydraulic modelling. *Regulated rivers : research and management* 12, 155 – 169.
- Heggenes J and Saltveit SJ, 1990.** Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young atlantic salmon (*Salmo Salar*) and brown Trout (*Salmo Trutta*) in a Norwegian river. *Journal of Fish Biology* 36, 707-720.
- Heland M, Gaudin P et Bardonnet A, 1995.** Mise en place des premiers comportements et utilisation de l'habitat après l'émergence chez les salmonidés d'eau courante. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337/338/339, 191-197.
- Heller P and Schleiss A, 2011.** Aménagements hydroélectriques fluviaux à buts multiples : résolution du mariage artificiel et conséquences sur les objectifs écologique, énergétique et social. *La Houille Blanche*, n° 6, 2011, p. 34-41.
- Henriksen JA, Heasley J, Kennen JG and Newsand S 2006,** Users' manual for the hydroecological integrity assessment process software (including the New Jersey Assessment Tools): U.S. Geological Survey, Biological Resources Discipline, Open File Report 2006-1093, 71 p.
(http://www.fort.usgs.gov/products/publications/pub_abstract.asp?PubID=21598).
- Higgins PS and Bradford M, 1996.** Evaluation of large-scale salvage to reduce the impact of controlled flow reduction in a regulated river. *North American Journal of Fisheries Management* 16, 666 – 673.
- Hoffard P, Fowler A and Brock W, 2003.** 2003 Evaluation of juvenile fall chinook salmon stranding in the Handford reach of the Columbia river. 32 p.
- Holm CF, Armstrong JD and Gilvear DJ, 2001.** Investigating a major assumption of predictive instream habitat models: is water velocity preference of juvenile Atlantic Salmon independent of discharge ? *Journal of Fish Biology* 59, 1653 – 1666.
- Hurel G, 2010.** Impacts du fonctionnement par écluses d'une usine hydroélectrique sur une population de truites communes (*Salmo trutta* L.) dans les Pyrénées ariégeoises (09). Etude des mesures compensatoires pouvant être apportées pour limiter les conséquences des écluses sur la truite commune, et plus particulièrement par l'apport de caches hydrauliques (blocs) pouvant servir d'abris. Rapport de Master 2 Fonctionnement des Ecosystèmes et Anthropisation, parcours professionnel, ENSAT. 62p.
- Hvidsten NA, 1985.** Mortality of pre-smolt Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and brown trout, *Salmo trutta* L., caused by fluctuating water levels in the regulated river Nidelva, central Norway. *Journal of Fish Biology* 27, 711-718.
- Irvine JR, 1986.** Effects of varying discharge on the downstream movement of salmon fry, *Oncorhynchus tshawytscha* Walbaum. *J. Fish Biol.*, 28, 17-28.
- Irvine RL, Oussoren T, Baxter JS and Schmidt DC, 2008.** The effect of flow reduction on fish stranding in British Columbia, Canada. *River. Res. Applic.* DOI: 10.1002/rra.1172.
- ISL-Aquascop, 2010.** Etude d'évaluation des impacts générés par la production d'hydroélectricité sur le bassin versant du gave d'Oloron - Gave d'Ossau. Projet de rapport final RSO-0126 version 0. Mars 2010.
<http://piso2h.drealmp.fr/CONTRIBUTIONS%20GEDRE%20OSSAU/ctr06-04%201003%20Ossau%20GEDRE%20CG64%20Annexe%203.pdf>

- Lagarrigue, 2000.** Croissance de la truite commune dans les Pyrénées françaises. Thèse de l'INP-ENSAT 143 p.
- Lagarrigue T et Lascaux JM, 2002.** Suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés migrateurs sur le bassin de la Dordogne en aval du barrage du Sablier (département de la Corrèze et du Lot) – Automne Hiver 2001-2002. Rapport E.CO.G.E.A. pour MI.GA.DO. n° D11-02-RT ; 35p. + annexes.
- Lagarrigue T, Céréghino R, Lim P, Reyes-Marchant P, Chappaz R, Lavandier P and Belaud A, 2002.** Diel and seasonal variations in brown trout (*Salmo trutta*) feeding patterns and relationship with invertebrate drift under natural and hydropeaking conditions in a mountain stream. *Aquat. Living Resour.* 15 (2002) 129–137.
- Lagarrigue T et Lascaux JM, 2003.** Suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés migrateurs sur le bassin de la Dordogne en aval du barrage du Sablier (département de la Corrèze et du Lot) – Automne Hiver 2002-2003. Rapport E.CO.G.E.A. pour MI.GA.DO. n° D15-03-RT ; 38p. + annexes.
- Lascaux JM, Vandewalle F et Lagarrigue T, 2004.** Suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés migrateurs sur le bassin de la Dordogne en aval du barrage du Sablier (département de la Corrèze et du Lot) – Automne Hiver 2003-2004. Rapport E.CO.G.E.A. pour MI.GA.DO. n° D10-04-RT ; 30p. + annexes.
- Lascaux JM, Lagarrigue T, Vandewalle F et Chanseau M, 2004.** Effets d'un débit minimum de 3 m³/s délivré à l'aval de l'usine de Hauteffage sur l'exondation des frayères de grands salmonidés de la Maronne - Automne-Hiver 2003/2004. Synthèse des suivis 2001/2002, 2002/2003 et 2003/2004. Rapport E.CO.G.E.A. pour MIGADO 18D-04-RT. 16 p + annexes.
- Lascaux JM, Lagarrigue T et Vandewalle F, 2005.** Suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés migrateurs sur le bassin de la Dordogne en aval du barrage du Sablier (département de la Corrèze et du Lot) – Automne Hiver 2004-2005. Rapport ECOGEA. pour MIGADO n° D9D-05-RT; 29p. + annexes.
- Lascaux JM, Cazeneuve L, Lagarrigue T et Chanseau M, 2006.** Impacts du fonctionnement par éclusées de l'usine de Hauteffage sur la Maronne : Suivi des échouages-piégeages de poissons de 2003 à 2005. Rapport ECOGEA. pour MIGADO n° 7D-06-RT; 32p. + annexes.
- Lascaux JM et Cazeneuve L, 2008a.** Etude de l'impact des éclusées sur les échouages d'alevins de salmonidés sur la Dordogne. Suivi 2007 et synthèse des données acquises depuis 2005. Rapport ECOGEA pour MIGADO 19D-08-RT. 14 p.
- Lascaux JM et Cazeneuve L, 2008b.** Etude de l'impact écologique des éclusées sur la Dordogne. Analyse des pressions exercées par les phénomènes d'éclusées sur les écosystèmes de la rivière Dordogne et propositions de solutions susceptibles de les atténuer. Rapport final de phase 1. Rapport ECOGEA pour EPIDOR. 74 p.
- http://www.eptb-dordogne.fr/public/content_files/impact_eclusees_ph1.pdf
- Lascaux JM, Cazeneuve L, Lagarrigue T et Chanseau M, 2008.** Cartographie des zones d'échouage-piégeage de la Maronne à l'aval de l'usine hydroélectriques de Hauteffage et essai d'estimation des mortalités totales d'alevins sur le cours d'eau. Rapport ECOGEA pour MIGADO 12D-08-RT. 27 p.
- Lascaux JM, Cazeneuve L et Courret D, 2013.** Etude de l'impact des éclusées sur la Creuse en aval du complexe hydroélectrique d'Eguzon (retenues d'Eguzon, de Roche-Au-Moine et de Roche-Bat-l'Aigue). Analyses des connaissances acquises entre 2006 et 2011. Rapport ECOGEA-Pole Ecohydraulique-FDAPPMA36 pour FNPF et EDF. 118 p + annexes.
- <http://www.peche-indre.com/accueil-federation/actualite/etude-eclusee-sur-la-creuse>
- Lauters F, 1995.** Impacts sur l'écosystème aquatique de la gestion par éclusées des ouvrages hydroélectriques – Etude de quelques cours d'eau et analyse des phénomènes mis en jeu. Thèse de Doctorat.
- Leclerc M, Boudreault A, Bechard JA and Corfa G, 1995.** Two-dimensional hydrodynamic modelling: a neglected tool in the instream flow incremental methodology. *Transactions of the American Fisheries Society* 124 (5): 645-662.
- Liebig H, 1998.** Etude du recrutement de la truite commune (*Salmo Trutta*) d'une rivière de moyenne montagne (Pyrénées Ariégeoise, 09) – Effets de la gestion par éclusées d'une centrale hydroélectrique. Thèse de Doctorat. 201 p.
- Liebig H, Lim P et Belaud A, 1998.** Influence du débit de base et de la durée des éclusées sur la dérive d'alevins de truite commune : expérimentations en canal semi-naturel. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 350/351, 337 – 347.
- Mäki-Petäys A, Huusko A, Erkinaro J and Muotka T, 2002.** Transferability of habitat suitability criteria of juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. Aquat. Sci.* 59, 218-228.
- Martínez C, Fernández JA, Sánchez J, Magdaleno F and García E, 2008.** IAHRIS: New software to assess hydrologic alteration. 4th ECRR Conference on River Restoration, Italy, Venice S. Servolo Island, 16-21 June 2008.
- Martínez Santa-María C and Fernandez Yuste JA, 2010.** IAHRIS 2.2. Indicators of Hydrologic Alteration in Rivers. Methodological reference manual.

http://www.ecogesfor.org/pdf/METH_REF_MANUAL_IAHRIS_v2_2.pdf

Martínez Santa-María C et al., 2010. IAHRIS 2.2 Indicators of Hydrologic Alteration in Rivers. User's Manual.

http://www.ecogesfor.org/pdf/User_manual_IAHRIS_v2_2.pdf

Mathews R and Richter BD, 2007. Applications of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American water Resources Association* 43(6):1400-1413.

Moog O, 1993. Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research and Management* 8, 5-14.

Moor JF, Reautez D et Culos X, 2013. Révision de l'état des lieux 2013. Evaluations des pressions sur l'hydrologie liées aux ouvrages - présentation de la méthode. Note technique du 22 février 2013. 36 p.

Nehring RB and Anderson RM, 1993. Determination of population-limiting critical salmonid habitats in Colorado streams using the physical habitat simulation system. *Rivers* 4, 1-19.

Olden JD and Poff NL, 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications* (19): 101-121.

Olivares MA, 2008. Optimal Hydropower Reservoir Operation with Environmental Requirements. Dissertation. University of California. 109 p.

<http://gradworks.umi.com/33/36/3336324.html>

Olson FW and Metzgar RG, 1987. Downramping to minimize stranding of salmonids fry. *Waterpower* 87, 691 – 701.

Ottaway EM and Clarke A, 1981. A preliminary investigation into the vulnerability of young trout (*Salmo trutta* L.) and Atlantic salmon (*S. salar* L.) to downstream displacement by high water velocities. *Journal of Fish Biology* 19: 135-145.

Ottaway EM and Forrest DR, 1983. The influence of water velocity on downstream movement of alevins and fry of brown trout, *Salmo trutta* L. *Journal of Fish Biology* 23: 221-227.

Peake S and McKinley RS, 1998. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55, 682-687.

Person E, 2013. Impact of Hydropeaking on Fish and their Habitat. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Thèse NO 5812. 139 p.

http://infoscience.epfl.ch/record/187169/files/EPFL_TH5812.pdf

Pfaundler M, Dübendorfer C et Zysset A, 2011. Méthodes d'analyse et d'appréciations des cours d'eau. Hydrologie - régime d'écoulement niveau R (région). Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n°1107: 113p.

<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01603/index.html?lang=fr>

Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE and Stromberg JC, 1997. The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* Vol. 47 No. 11. 769-784.

Poff NL, Richter BD, Arthington AH, Bunn SE, Naiman RJ, Kendy E, Acreman M, Apse C, Bledsoe BP, Freeman MC, Henriksen J, Jacobson RB, Kennen JG, Merritt DM, O'Keeffe JH, Olden JD, Rogers K, Tharme R and Warner A, 2010. The ecological limits of hydrological alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater biology* 55: 147-170.

Prel P, 2011. Caractérisation des écoulements autour d'un seuil poreux dans un contexte de diminution de l'impact des éclusées sur l'habitat de la truite. Rapport de Mastère Spécialisé en Hydraulique INP – ENSEEIHT. 47 p.

Rasstad JE, Lillehammer A and Lillehammer L, 1993. Effect of habitat improvement on atlantic salmon in the regulated river Suldalsgen. *Regulated Rivers: Research and Management* 8, 95-102.

Richter BD, Baumgartner JV, Powell J and Braun DP, 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology* 10(4): 1163-1174.

Richter BD, Baumgartner JV, Wigington R and Braun DP, 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37, 231-249.

Richter BD, Baumgartner JV, Braun DP and Powell J, 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 329-340.

Sabaton C, Lauters F, Valentin S et le groupe de travail « Eclusées », 1995. Impact sur le milieu aquatique de la gestion par éclusées des usines hydroélectriques. Synthèse des résultats issus des travaux du groupe de recherche « éclusées » de 1990 à 1995 – recommandations pour l'expertise d'un site. HE-31/95.19.

Sabaton C, Souchon Y, Lascaux JM, Vandewalle F, Baran P, Baril D, Capra H, Gouraud V, Lauters F, Lim P, Merle G and Paty G, 2004. The "Guaranteed Flow Working Group": A French evaluation of microhabitat component of IFIM based on habitat and trout population monitoring. *Hydroécologie appliquée* 14, 245 – 270.

Saltveit SJ, Bremmes T and Lindas OR, 1995. Effect of sudden increase in discharge in a large river on newly emerged Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) fry. *Ecology of Freshwater Fish* 4, 168-174.

Saltveit SJ, Halleraker JH, Arnekleiv JV and Harby A, 2001. Field experiment on stranding in juvenile atlantic salmon (*Salmo Salar*) and brown trout (*Salmo Trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. *Regulated Rivers : Research and Management* 17, 609-622.

Santal J, Barracou D et Picoulet K, 2012. 2011-2012 Connaissance des stocks. Suivi de la fraie du Saumon atlantique et contrôle de la production de juvéniles saumons. Rapport MIGRADOUR. 18 p + annexes.

Sauquet E, 2006. Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of hydrology* 331: 300-314.

Sauterleute J and Charmasson J, 2012. Characterisation of rapid fluctuation of flow and stage in rivers in consequences of hydropeaking. *Proceedings of the 9th ISE, Vienna.*

Shiau JT and Wu FC, 2004. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach. *Journal of water resources planning and management* 130 (5): 395-404.

SIEE, 1999. Etude hydraulique et hydrologique de la Maronne à l'aval de l'aménagement de Hauteffage. Dossier SIEE n°98.10.21. Rapport SIEE-GHAAPPE pour FDAPPMA19. 26 p + figure et annexes.

Snelder TH, Lamouroux N, Leathwick JR, Pella H, Sauquet E and Shankar U, 2009. Predictive mapping of the natural flow regime of France. *Journal of hydrology* 373: 57-67.

Souchon Y, Andriamahefa H, Breil P, Albert MB, Capra H et Lamouroux N, 2002. Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes : couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau. *Nature Sciences Sociétés* 10 : 26 – 41.

Steele RJ and Smokorowski KE, 2000. Review of literature related to the downstream ecological effects of hydroelectric power generation. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 2334.* 55 p.

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/251234.pdf>

Stewardson MJ and Gippel CJ, 2003. Incorporating flow variability into environmental flow regimes using the flow events method. *River research and applications* 19: 459-472.

Stillwater Sciences, 2006. Flow Fluctuations and Stranding at the Carmen-Smith Hydroelectric Project, Upper McKenzie River Basin, Oregon. Prepared for Eugene Water & Electric Board, by Stillwater Sciences.

Travnicek VH, Bain MB and Maceina MJ, 1995. Recovery of a Warmwater Fish Assemblage after the Initiation of a Minimum-Flow Release Downstream from a Hydroelectric Dam. *Transactions of the American Fisheries Society* 124:836-844. 1995.

The Nature Conservancy, 2009. Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual.

<http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>

USFWS, 2010. Relationship between flow fluctuations and red dewatering and juvenile stranding for chinook salmon and steelhead/rainbow trout in the Yuba river. Prepared by staff of The Energy Planning and Instream Flow Branch.

Valentin S, 1995. Variabilité artificielle des conditions d'habitat et conséquences sur les peuplements aquatiques : Effets écologiques des éclusées hydroélectriques en rivière. Thèse de Doctorat.

http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/16Valentin_1995_%20Variabilit%C3%A9_habitat_eclus%C3%A9es.pdf

Valentin S, 1997. Effets écologiques des éclusées en rivière. Expérimentations et synthèse bibliographique. Cemagref Edition. ISBN 2-85362-478-1.

Vandewalle F et Lascaux JM, 2008. Etude de l'impact des éclusées sur la Creuse en aval du complexe hydroélectrique d'Eguzon (retenues d'Eguzon, de Roche-Au-Moine et de Roche-Bat-l'Aigue). Résultats de la phase de sectorisation morphodynamique. 22 p. + annexes.

<http://www.bibliopeche.fr/pindownload/login.do?pin=4S661>

Vandewalle F, Mennessier JM, Cazeuneuve L et Lascaux JM, 2009. Suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés migrateurs sur le bassin de la Dordogne en aval du Sablier (départements de la Corrèze et du Lot) Automne - Hiver 2008 / 2009. Bilan de l'efficacité du relèvement du débit plancher de la Dordogne (30 m³/s soit 30% du module du cours d'eau) sur la préservation des frayères des grands salmonidés de l'exondation. Rapport ECOGEA pour MIGADO 4D-09RT. 26 p + annexes.

Vandewalle F, Mayeras F et Lascaux JM, 2012a. Etude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et de la fonctionnalité des habitats piscicoles en fonction du débit sur le Gave d'Ossau. Tronçon Valentin-Geteu. Rapport ECOGEA pour le CG64. 44 p.

http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/60576/GED_00000001.pdf

Vandewalle F, Mayeras F et Lascaux JM, 2012b. Etude de l'évolution des paramètres hydromorphologiques et de la fonctionnalité des habitats piscicoles en fonction du débit sur le Gave d'Ossau. Tronçon Geteu-Castet. Rapport ECOGEA pour le CG64. 46 p.

http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/60576/GED_00000002.pdf

Wasson JG, Malavoi JR, Maridet L, Souchon Y et Paulin L, 1995. Impact écologique de la chenalisation des rivières. Rapport CEMAGREF.

Wasson JG, Chanderis A, Pelle H et Blanc L, 2002. Les Hydro-écorégions de France métropolitaine. Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Rapport CEMAGREF

<http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/RapHERfinal.pdf>

Zolezzi G, Siviglia A, Toffolon M and Maiolini B, 2011. Thermopeaking in alpine streams: event characterization and times scales. *Ecohydrology* 4, 564-576.

8. ANNEXES

Annexe 1 : Liste des stations à l'hydrologie naturelle identifiées

Annexe 2 : Tableau des valeurs de gradients naturels (9eme décile)

Annexe 3 : Tableaux détaillant la création des points pour les régressions

Annexe 4 : Liste des stations à l'hydrologie influencée identifiées

Annexe 5 : Tableau récapitulatif des classements par expertise et des reclassements par l'analyse discriminante

8.1. Annexe 1 : Liste des stations à l'hydrologie naturelle identifiées

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
1a	Pyrénées Aquitaine	40	Audon	Adour	Audon	54.8	DIREN Aquitaine	Q1420010	QTVAR	1999 2008	6 à 8	6 à 8	Station situé au pont de la D7, en amont de la confluence de la Midouze, recours au QMJ pour lisser les légères perturbations à bas débit.
1b									QMJ	1974 2008	1 à 5	1 à 5	
2	Pyrénées Aquitaine	64	Saint-Etienne de Baïgorry	Nives des Aldudes	Saint-Etienne de Baïgorry	7.20	DIREN Aquitaine	Q9164610	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RG de la Nive, station située à la sortie de Saint-Etienne (aval pont D15).
3a	Pyrénées Aquitaine	64	Cambo-les-bains	Nive	Cambo-les-bains	30.1	DIREN Aquitaine	Q9312510	QTVAR	1999 2008	5 à 8	6 à 8	Affluent RG de l'Adour, conflant au niveau de Bayonne, station située à l'entrée de Cambo (pont de la D10)
3b									QMJ	1999 2008	4	4 à 5	
4	Pyrénées Aquitaine	64	Saint-Pée-sur-Nivelle	Nivelle	Saint-Pée-sur-Nivelle	4.96	DIREN Aquitaine	S5144010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Fleuve cotier se jetant au niveau de Saint-Jean-de-Luz
5	Pyrénées Aquitaine	64	Aïciritz-Camou-Suhast	Bidouze	Aïciritz-Camou-Suhast	5.23	DIREN Aquitaine	Q8032510	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de l'Adour, station située au niveau du moulin en amont de Aïcirits
6	Pyrénées Aquitaine	64	Oloron-Sainte-Marie	Gave d'Ossau	Oloron-Sainte-Marie	19.7	DDE 64	Q6142910	QMJ	1912 1928	3 à 8	3 à 8	Station située à l'amont d'Oloron, 1-2 km en amont de la confluence avec le Gave d'Aspe, 1er aménagement, Artouste, achevé en 1929.
7	Pyrénées Aquitaine	64	Oloron-Sainte-Marie	Gave d'Oloron	Oloron-Sainte-Marie	51.6	DDE 64	Q7002910	QMJ	1912 1923	4 à 8	4 à 8	Station située à l'aval d'Oloron, au niveau du pont de la voie ferrée, aménagement des vallées d'Aspe à partir de 1924 (Estaens, Peilhou) et de la vallée d'Ossau à partir de 1929 (Artouste).
8	Pyrénées Aquitaine	64	Escos	Gave d'Oloron	Escos	102	DDE 65	Q7412910	QMJ	1922 1944	3 à 8	3 à 8	Station située en amont d'Escos, en aval de la confluence du Saison, recours au QMJ pour lisser les premières influences, chronique arrêtée avant les constructions de barrages et d'usines des années 1940-50
9	Pyrénées Aquitaine	64	Bérenx	Gave de Pau	Bérenx	81.9	DIREN Aquitaine	Q5501010	QMJ	1923 1945	4 à 8	4 à 8	Station située en amont du pont de l'autoroute, entre Baigts et Puyoo, chronique arrêtée avant les constructions de barrages et d'usines des années 1950
10	Pyrénées Midi-Pyrénées	9	Soulan	Arac	Soulan	6.07	DIREN Midi-Pyrénées	O0384010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RD du Salat, station située 1-2 km en amont de la confluence, au pont de la D217.
11	Pyrénées Midi-Pyrénées	9	Lacourt	Salat	Pont Lacourt	19.0	EDF	1460	QH	1997 2007	4 à 8	4 à 8	Station située en aval de la centrale de Lacourt (fil de l'eau)
12	Pyrénées Midi-Pyrénées	9	Le Peyrat	Hers Vif	Peyrat	4.10	DIREN Midi-Pyrénées	O1442910	QTVAR	1999 2008	5 à 8	5 à 8	Affluent RD de l'Ariège, station en aval de la Bastide sur l'Hers
13	Pyrénées Midi-Pyrénées	9	Foix	Ariège	Foix	39.9	DIREN Midi-Pyrénées	O1252510	QMJ	1906 1939	4 à 8	4 à 8	Station située dans Foix, au premier pont en amont de la confluence de l'Arget, 1er aménagement, Izourt, achevé en 1940.
14	Pyrénées Midi-Pyrénées	31	Castelbiague	Arbas	Castelbiague	1.78	DIREN Midi-Pyrénées	O0554010	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Affluent RG du Salat, confluent en amont de Salies, station située en aval du village de Castelbiague, au lieu-dit Le Pont de Prades.
15	Pyrénées Midi-Pyrénées	31	Saint-Gaudens	Garonne	Saint-Gaudens	60.2	DIREN Midi-Pyrénées	O0200030	QMJ	1912 1931	5 à 8	5 à 8	Station située au niveau du pont de la voie ferrée, chronique arrêtée aux 20 premières années disponibles, avant les aménagements des années 1930.

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
16	Pyrénées Midi-Pyrénées	31	Palaminy	Garonne	Palaminy	104	DIREN Midi-Pyrénées	O0600010	QMJ	1924 1943	4 à 8	4 à 8	Station située au niveau du pont de Cazère, chronique arrêtée aux 20 premières années disponibles.
17	Pyrénées Midi-Pyrénées	31	Portet	Garonne	Portet	189	DIREN Midi-Pyrénées	O1900010	QMJ	1910 1939	4 à 8	4 à 8	Station située au niveau de l'embarcadère du bac, 1 km en aval de la confluence de l'Ariège, chronique arrêtée aux 30 premières années disponibles.
18	Pyrénées Midi-Pyrénées	31	Roquefort sur Garonne	Salat	Roquefort	42.5	DIREN Midi-Pyrénées	O0592510	QMJ	1913 1939	4 à 8	4 à 8	Station située 1 km en amont de la confluence avec la Garonne, barrage d'Araing sur le Lez achevé en 1941.
19	Pyrénées Midi-Pyrénées	65	Gourgue	Arros	Gourgue	3.64	DIREN Aquitaine	Q0522520	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RD de l'Adour, station situé en amont de Gourgue, au pont de la D81.
20	Pyrénées Midi-Pyrénées	65	Gedre	Gave d'Estaubé	Gloriette	0.99	EDF	1151	QH	1997 2007	4 à 8	5 à 8	Affluent RG du Gave d'Héas ; en amont du lac des Gloriettes
21	Pyrénées Midi-Pyrénées	65	Lourdes	Gave de Pau	Lourdes	44.6	DDE 64	Q4761010	QMJ	1919 1948	5 à 8	5 à 8	Station située à la sortie de Lourdes, premiers aménagements du bassin dans les années 1950 (Cap de long, Migoelou, Tech, Gloriette, Escoulous).
22	Pyrénées Languedoc-Rousillon	11	Belviane et Cavirac	Aude	Belviane	13.5	DDE 11	Y1112010	QMJ	1914 1930	5 à 8	5 à 8	Station située en aval de Belviane et Cavirac, entre les deux seuils, 1er aménagement, Puyvalador, achevé en 1932.
23	Pyrénées Languedoc-Rousillon	66	Saint-Paul de Fenouillet	Agly	Saint-Paul de Fenouillet	2.80	DDE 11	Y0624020	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Fleuve cotier, station située au niveau de la confluence avec la Boulzane, à l'aval du village de Saint Paul.
N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
24	Massif central Midi-Pyrénées	12	Vabre-l'Abbaye	Dourdou	Vabre-l'Abbaye	11.9	DIREN Midi-Pyrénées	O3594020	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RG du Tarn, station située en aval de la confluence de la Sorgue, au lieu-dit Radier, en amont de la station EDF
25a	Massif central Midi-Pyrénées	12	Mostuéjols	Tarn	Mostuéjols	31.5	DIREN Midi-Pyrénées	O3141010	QTVAR	1990 2008	4 à 8	6 à 8	Station située en amont de la confluence de la Jonte, au lieu-dit Plaisance
25b									QMJ	1969 2008	-	4 à 5	
26	Massif central Midi-Pyrénées	12	Millau	Dourbie	Millau	13.8	DIREN Midi-Pyrénées	O3394030	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RD du Tarn, confluent à Millau, station située 2 km en amont de la confluence, au lieu-dit Massebiau.
27	Massif central Midi-Pyrénées	12	Saint Georges de Luzençon	Cernon	Saint-Georges	2.96	EDF	2521	QH	1997 2007	2 à 8	2 à 8	Affluent RG du Tarn, confluent en aval de Millau
28	Massif central Midi-Pyrénées	12	Millau	Tarn	Millau	47.4	DIREN Midi-Pyrénées	O3401010	QMJ	1969 2008	3 à 8	3 à 8	Station située dans Millau, au pont entre deux seuils, à l'aval immédiat du parcours d'eaux vives, recours au QMJ pour lisser les légères perturbations à bas débit, liées notamment au parcours d'eaux vives
29	Massif central Midi-Pyrénées	12	Entraigues	Lot	Entraigues	34.0	DIREN Midi-Pyrénées	O7191510	QMJ	1937 1947	1 à 8	1 à 8	Station située 2-3 km en amont de la confluence avec la Truyère, 1er aménagement, Castelnaud, achevé en 1948.
30	Massif central Midi-Pyrénées	81	Anglès	Arn	Taillades	2.54	EDF	1623	QH	1997 2007	1 à 8	1 à 8	Affluent RD du Thoré (lui-même affluent RG de l'Agout), station située en amont de la retenue de Saint-Peyres

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
31	Massif central Midi-Pyrénées	82	Montauban	Aveyron	Montauban	56.5	DIREN Midi-Pyrénées	O5882510	QMJ	1979 2008	1 à 8	1 à 8	Station située au lieu-dit Loubéjac, au nord de Montauban, recours au QMJ pour lisser les légères perturbations à bas débit.
32	Massif central Midi-Pyrénées	82	Laguépie	Aveyron	Laguépie	19.4	DIREN Midi-Pyrénées	O5292510	QMJ	1979 2008	1 à 8	1 à 8	Station située au lieu-dit Magnounelle, en amont de la confluence du Viaur, recours au QMJ pour lisser les légères perturbations à bas débit.
33	Massif central Languedoc-Rousillon	7	Meyras	Ardèche	Meyras	3.60	DIREN Rhône-Alpes	V5004030	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Station située au pont de la D26, juste en amont des confluences du Lignon et de la Fontaulière.
34	Massif central Languedoc-Rousillon	30	Généralgues	Gardon de Mialet	Généralgues	6.34	SPC Grand Delta	V7124010	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Affluent RG du Gardon, station située juste en amont de la confluence, entre le pont de la voie ferrée à l'aval et un seuil à l'amont.
35	Massif central Languedoc-Rousillon	30	Saint-Laurent-le-Minier	Vis	Saint-Laurent-le-Minier	10.0	DIREN Languedoc-Rousillon	Y2035010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	4 à 8	Affluent RD de l'Hérault, station située environ 500 m à l'amont de la confluence avec l'Hérault.
36	Massif central Languedoc-Rousillon	34	Fraisse-sur-Agoût	Agoût	Fraisse	1.60	EDF	1616	QH	1997 2007	1 à 8	1 à 8	Station située en amont du lac de la Raviège
37a	Massif central Languedoc-Rousillon	34	Laroque	Hérault	Laroque	19.7	DIREN Languedoc-Rousillon	Y2102010	QTVAR	1990 2008	2 à 8	6 à 8	Station située à l'aval de Laroque, au niveau des Grottes, en aval de la confluence de la Vis.
37b									QMJ	1969 2008	-	3 à 5	
38a	Massif central Languedoc-Rousillon	48	Banassac	Lot	Banassac	16.1	DIREN Languedoc-Rousillon	O7101510	QTVAR	1999 2008	4 à 8	6 à 8	Station située au lieu-dit La Mothe
38b									QMJ	1979 2008	2 à 3	2 à 5	
39	Massif central Languedoc-Rousillon	48	Saint-Juery	Bès	Saint-Juery	7.78	EDF	2522	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de la Truyère, confluent dans le lac de Grandval.
40	Massif central Languedoc-Rousillon	48	Langogne	Allier	Langogne	8.40	DIREN Centre	K2070810	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Station située au pont de la N88, en amont de l'apport du barrage de Naussac.
41	Massif central Auvergne	15	Condat	Santoire	Condat	4.68	EDF	2207	QH	1997 2007	2 à 8	2 à 8	Affluent RG de la Rhue (elle-même affluent RG de la Dordogne, entre Bort et Marèges), confluent à Condat
42	Massif central Auvergne	15	Lacapelle-Viescamp	Authre	Viescamp	3.17	EDF	2483	QH	1997 2007	1 à 8	1 à 8	Affluent RD de la Cère, confluent dans la retenue Saint-Etienne de Cantalès, station juste en amont de la retenue
43	Massif central Auvergne	63	Pontgibaud	Sioule	Pontgibaud	6.37	DIREN Auvergne	K3222010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de l'Allier, station située au niveau du pont de la D943
44	Massif central Auvergne	63	Singles	Burande (Jarrigue)	Singles	3.03	EDF	2201	QH	1997 2007	2 à 8	2 à 8	Affluent RG de la Dordogne, confluent dans Bort, source à Chastreix (Puy de Sancy), station juste en amont de la retenue

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
45	Massif central Limousin	19	Corrèze	Corrèze	Corrèze	5.60	SPC Dordogne	P3352510	QH	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Station en amont du village de Corrèze (pont de neupont) et de l'aménagement de Corrèze-Bar.
46	Massif central Limousin	19	Monestier-Merlines	Chavanon	Celette	6.53	EDF	2274	QH	1997 2007	2 à 8	2 à 8	Affluent RD de la Dordogne, confluant dans Bort
47	Massif central Limousin	19	Moustier-Ventadour	Luzège	Pont de Bouyges	6.56	EDF	2269	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent RD de la Dordogne, confluant dans Chastang, station en amont du barrage de Luzège.
48	Massif central Limousin	19	Argentat	Dordogne	Argentat	106	SPC Dordogne	P1350010	QMJ	1900 1934	1 à 8	1 à 8	Station située en amont du vieux pont d'Argentat, 1er aménagement de la chaîne Dordogne, Marèges, achevé en 1935.
49	Massif central Limousin	19	Argentat	Maronne	Basteyroux	20.2	SPC Dordogne	P1592510	QMJ	1918 1944	1 à 8	1 à 8	Affluent RG de la Dordogne, confluant en aval d'Argentat, 1 ^{er} aménagement, Gour-Noir achevé en 1945.
50	Massif central Limousin	19	Brive	Corrèze	Brive	21.2	SPC Dordogne	P3922510	QMJ	1918 1937	3 à 8	4 à 8	Affluent RG de la Vézère, elle-même affluent RD de la Dordogne, station située à la sortie de Brive, 4-5 km en amont de la confluence, chronique arrêtée aux 20 premières années disponibles.
51	Massif central Limousin	23	Felletin	Creuse	Felletin	3.86	DIREN Limousin	L4010710	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Station située au niveau du Pont des Malades (D10), en amont du barrage des Combes (Confolent), en aval de la confluence du Dejoune.
52	Massif central Limousin	23	Fresselines	Petite Creuse	Fresselines	8.70	DIREN Limousin	L4411710	QTVAR	1994 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RD de la Creuse, station située juste en amont de la confluence avec la Creuse et de la retenue d'Eguzon, au niveau du pont de la D44.
53	Massif central Limousin	23	Genouillac	Petite Creuse	Genouillac	5.48	EDF	2009	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent RD de la Creuse, confluant à Fresselines, juste en amont de la retenue d'Eguzon
54	Massif central Limousin	23	Lafat	Sedelle	Lafat	2.89	EDF	2018	QH	1997 2007	2 à 8	2 à 8	Affluent RG de la Creuse, confluant dans la retenue d'Eguzon au Crozant
55a	Massif central Limousin	87	Saint-Bonnet-de-Bellac	Gartempe	Saint-Bonnet-de-Bellac	17.7	DIREN Limousin	L5301810	QTVAR	1999 2008	4 à 8	6 à 8	Affluent RG de la Creuse ; station située au pont de la D26 (Pont Saint-Martin)
55b									QMJ	1995 2008	3	3 à 5	
56	Massif central Limousin	87	Journac	Briance	Chambon Veyrinas	8.21	EDF	2120	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent de la Vienne, confluant en aval de Limoges
57	Massif central Centre	36	Saint-Cyran-du-Jambot	Indre	Saint-Cyran-du-Jambot	13.3	DIREN Centre	K7312610	QTVAR	1999 2008	4 à 8	5 à 8	Station située au pont de la D28d, au lieu-dit Razeray
58	Massif central Rhône-Alpes	42	Poncins	Lignon du Nord (ou du Forez)	Poncins	8.24	DIREN Centre	K0773220	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de la Loire, confluant à Feurs ; station située au pont de Poncins.
59	Massif central Rhône-Alpes	43	Bas-en-Basset	Loire	Bas-en-Basset	38.10	DIREN Centre	K0550010	QMJ	1919 1938	3 à 8	3 à 8	Station située au pont de la D42, en aval de la confluence de l'Ance du Nord et du Lignon du Sud, chronique arrêtée aux 20 premières années disponibles.

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
60	Alpes PACA	4	Barcelonnette	Ubaye	Barcelonnette	10.6	DIREN PACA	X0434010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RG de la Durance, confluent dans le lac de Serre-Ponçon, station située dans Barcelonnette (partie chenalisée)
61	Alpes PACA	4	Saint-Andre-les-Alpes	Issole	Saint-Andre-les-Alpes	2.70	DIREN PACA	X2114010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RD du Verdon, confluent juste en amont du barrage de Castillon
62	Alpes PACA	4	Mure-Argens	Verdon	Mure-Argens	7.22	EDF	0296	QH	1997 2007	4 à 8	4 à 8	Affluent RG de la Durance, station située juste à l'amont de la retenue de Castillon
63	Alpes PACA	5	Villar-Loubière	Séveraisse	Villar-Loubière	5.10	DIREN PACA	W2114010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RD du Drac, station située au pont de Villar-Loubière, en amont du barrage de dérivation vers la centrale de Saint-Maurice
64	Alpes PACA	5	L'Argentière-la-Bessée	Durance	Argentière	27.5	DIREN PACA	X0130010	QMJ	1910 1929	5 à 8	5 à 8	Station située en aval d'Argentière, au pont de la D104
65	Alpes PACA	5	Espinasses	Durance	Espinasses	77.9	EDF	X0500010	QMJ	1948 1959	5 à 8	5 à 8	Station située au niveau du barrage de Serre-Ponçon achevé en 1960.
66	Alpes PACA	6	Le Broc	Estéron	Au Broc	7.02	DIREN PACA	Y6434010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RD du Var, station située au lieu-dit La Clave, 3-4 km en amont de la confluence avec le Var.
67	Alpes PACA	6	Tende	Roya	Tende	2.91	DIREN PACA	Y6614010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Fleuve cotier dont le cours aval est en Italie, station située au pont de la voie ferrée, en amont de la confluence avec le torrent de Bieugne et la centrale de Saint-Dalmas.
68	Alpes PACA	83	Callian	Siagne	Callian	6.49	DIREN PACA	Y5514040	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Fleuve cotier se jetant à l'ouest de Cannes, station située au nord de la commune, au lieu-dit Ajustadoux, en aval de la centrale (fil de l'eau) de la Siagne, en aval de la prise d'eau du canal de la Siagne, mais en amont du barrage de dérivation vers la retenue de Saint-Cassien.
69	Alpes PACA	83	Châteauvert	Argens	Châteauvert	3.41	DIREN PACA	Y5032010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Fleuve cotier se jetant au niveau de Fréjus, station située au pont de Châteauvert
70	Alpes Rhône-Alpes	26	Châtillon-en-diois	Bez	Châtillon-en-diois	4.26	DIREN Rhône-Alpes	V4225010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RD de la Drôme, station située au pont de la D539, juste à l'amont du village
71a	Alpes Rhône-Alpes	26	Saillans	Drôme	Saillans	17.7	DIREN Rhône-Alpes	V4264010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	6 à 8	Affluent RG du Rhône, station située à l'amont du village de saillans, à l'amont d'un seuil en ruine
71b	QMJ								1979 2008	2	2 à 5		
72	Alpes Rhône-Alpes	38	Saint-Christophe-sur-Guiers	Guiers vif	Saint-Christophe-sur-Guiers	4.68	DIREN Rhône-Alpes	V1515010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG du Rhône, station située au pont Saint-Martin, en amont de la confluence avec le Guiers Mort, et du barrage de dérivation vers l'usine de Saint-Béron
73	Alpes Rhône-Alpes	38	Saint-Christophe-en-Oisan	Vénéon	Les Etages	5.38	EDF	0111	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de la Romanche, confluent en amont du Bourg-d'Oisant, station située un dizaine de km en amont du barrage de dérivation vers la centrale de Pont-Escoffier
74	Alpes Rhône-Alpes	73	Moutiers	Isère	Moutiers	27.5	DIREN Rhône-Alpes	W0110010	QMJ	1903 1926	5 à 8	5 à 8	Station située dans Moutiers, 500 m en amont de la confluence des Dorons, barrage de Tignes achevé en 1952.
75	Alpes Rhône-Alpes	74	Saint-Jean-de-Sixt	Borne	Saint-Jean-de-Sixt	3.1	DIREN Rhône-Alpes	V0205420	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG de l'Arve, station située au lieu-dit Les Epinettes, en aval du Grand-Bornand
76	Alpes Rhône-Alpes	74	Seytroux	Dranse de Morzine	Seytroux	7.5	DIREN Rhône-Alpes	V0325010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Conflue avec la Dranse d'Abondance en RG et forme La Dranse se jetant dans le lac Léman au niveau de Thonon, station située au pont de Couvaloup, 2-3 km en amont de la retenue du Jatty (alimentant la centrale de Bioge)

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
77	Alpes Rhône-Alpes	74	Dingy-Saint-Clair	Fier	Dingy-Saint-Clair	9.5	DIREN Rhône-Alpes	V1214010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG du Rhône, confluant en amont de l'aménagement de Chautagne, station située au pont Saint-Clair, en amont d'Annecy et de la confluence de la Filière.
78	Alpes Rhônes-Alpes	74	Argonay	Fier	Argonay	14.1	EDF	3118	QH	1997 2007	3 à 8	3 à 8	Affluent RG du Rhône, confluant en amont de l'aménagement de Chautagne, station située en aval de la confluence de la Filière.
79	Alpes Rhône-Alpes	74	Allèves	Chéran (ou Chéron)	Allèves	7.7	DIREN Rhône-Alpes	V1255010	QTVAR	1999 2008	3 à 8	3 à 8	Affluent RG du Fier, confluant dans la retenue de Vallière, station située au lieu-dit La Charnia, juste en aval de la confluence du ruisseau de Bellecombe et amont de la résurgence de la grotte de Prérougé
N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
80	Jura Rhônes-Alpes	1	Chezery-Florens	Valserine	Chezery-Florens	4.57	DIREN Franche-Comté	V1015030	QTVAR	1999 2008	4 à 8	4 à 8	Affluent RD du Rhône, confluant à Bellegarde, station située juste à l'aval du village.
81	Jura Rhônes-Alpes	1	Saint-Denis-en-Bugey	Albarine	Saint-Denis-en-Bugey	6.89	DIREN Rhônes-Alpes	V2924010	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Affluent RG de l'Ain, station située au pont juste en aval de celui de la voie ferrée
82	Jura Rhônes-Alpes	1	Chatillon-en-Michaille	Semine	Chatillon-en-Michaille	9.37	DIREN Rhônes-Alpes	V1015810	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Affluent RD de la Valserine, station située en aval du pont de Coz, juste à l'amont de la confluence avec la Valserine
83	Jura Franche-Comté	25	Saint-Hyppolyte	Dessoubre	Saint-Hyppolyte	13.8	DIREN Franche-Comté	U2215020	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Affluent RG du Doubs, station située 2-3 km en amont de la confluence
84a	Jura Franche-Comté	25	Vuillafans	Loue	Vuillafans	21.3	DIREN Franche-Comté	U2604030	QTVAR	1999 2008	4 à 8	6 à 8	Affluent RG du Doubs, station située en amont du village de Vuillafans, au lieu-dit Le Champ.
84b									QMJ	1969 2008	3	3 à 5	
85a	Jura Franche-Comté	39	Champagne-sur-Loue	Loue	Champagne-sur-Loue	52.8	DIREN Franche-Comté	U2634010	QTVAR	1990 2008	4 à 8	6 à 8	Affluent RG du Doubs, station située au pont de la D274
85b									QMJ	1963 2008	3	3 à 5	
86	Jura Franche-Comté	25	Villers-le-lac	Doubs	Lac des Brenets	19.3	OFEV	2247	QTVAR	1974 2003	2 à 8	2 à 8	Station suisse sur le Doubs frontière, située à la sortie du lac naturel des brenets (ou lac de Chaillexon), variations de débit possiblement atténuées par le lac
87	Jura Franche-Comté	39	Saint-Claude	Bienne	Saint-Claude	9.61	DIREN Franche-Comté	V2414010	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Affluent RG de l'Ain, confluant dans le lac du Coiselet, station située au lieu-dit Les Cheneviers, 2-3 km en amont de Saint-Claude et de la confluence du Tacon.
88a	Jura Franche-Comté	70	Pesmes	Ognon	Pesmes	33.9	DIREN Franche-Comté	U1084010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	6 à 8	Affluent RG de la Saône, station située en aval de Pesmes, au lieu-dit Les Grandes Raies, une dizaine de km en amont de la confluence.
88b									QMJ	1964 2008	3	3 à 5	

N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
89	Vosges Alsace	67	Holtzheim	Bruche	Holtzheim	8.19	DIREN Alsace	A2860110	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Affluent RG de l'Ill, confluant à Strasbourg, station située au pont de Holtzheim.
90a	Vosges Lorraine	88	Saint-Narbord	Moselle	Saint-Narbord	24.7	DIREN Lorraine	A4200630	QTVAR	1999 2008	4 à 8	5 à 8	Station située en aval de Saint-Narbord, au lieu-dit Noirgueux.
90b	QMJ								1962 2008	1 à 3	1 à 4		
91a	Vosges Lorraine	54	Laneuveville-devant-Nancy	Meurthe	Laneuveville-devant-Nancy	37.6	DIREN Lorraine	A6921010	QTVAR	1999 2008	4 à 8	5 à 8	Affluent RD de la Moselle, confluant à l'aval de Nancy, station située au niveau du pont du canal, en amont de Nancy.
91b	QMJ								1986 2008	-	4		
N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
92	Massif Armoricaire Basse-Normandie	50	Notre-Dame-du-Touchet	Sélune	Notre-Dame-du-Touchet	2.79	DIREN Basse-Normandie	I9031010	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Fleuve cotier normand, station située au niveau du pont de la D46, en amont du barrage de Vezins.
93	Massif Armoricaire Bretagne	22	Saint-Jouan de l'Isle	Rance	Saint-Jouan de l'Isle	1.24	DIREN Bretagne	J0611610	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 7	Fleuve cotier breton, station située au niveau du pont de la D166, en amont du village et du barrage de Rophemel.
N	Massif Région	Dép	Commune	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Type données	Période	Gamme Hausse	Gamme Baisse	Commentaire
94	Corse Haute-Corse	2B	Albertacce	Golo	Albertacce	2.93	DIREN Corse	Y7002020	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Station située au pont altu, en amont de la retenue de Calacuccia.
95	Corse Haute-Corse	2B	Morosaglia	Asco	Morosaglia	5.08	DIREN Corse	Y7114020	QTVAR	1999 2008	1 à 8	1 à 8	Affluent RG du Golo, station située juste en amont de la confluence avec le Golo, au second pont de voie ferrée.
96	Corse Haute-Corse	2B	Ghisoni	Fium-Orbo	Ghisoni	3.68	DIREN Corse	Y9414020	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Station située peu en amont du pont de sampolo et de la retenue EDF de Sampolo (début des travaux en 1987, mise en service en 1992)
97	Corse Corse du Sud	2A	Zoza	Rizzanese	Zoza	3.69	DIREN Corse	Y8814010	QTVAR	1999 2008	2 à 8	2 à 8	Station située en amont du village de Zoza, au Ponte Novu

8.2. Annexe 2 : Tableau des valeurs de gradients naturels (9^{ème} décile)

Station	Type de Données	Module (m ³ /s)	Valeur de gradient de <u>baisse</u> (9 ^{ème} décile) sur les différentes gammes de variation								Valeur de gradient de <u>hausse</u> (9 ^{ème} décile) sur les différentes gammes de variation								
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
1a	QTVAR	54.8						2.0%	7.3%	13.3%						12.1%	17.3%	16.9%	
1b	QMJ	54.8	0.06%	0.12%	0.2%	0.3%	0.6%				0.1%	0.4%	0.6%	1.7%	3.4%				
2	QTVAR	7.20				0.7%	2.5%	5.8%	9.7%	13.6%				4.6%	21.0%	36.6%	80.5%	107%	
3a	QTVAR	30.1						4.3%	11.8%	22.5%						18.2%	52.0%	81.6%	106%
3b	QMJ	30.1				0.4%	1.3%							3.8%					
4	QTVAR	4.96			0.8%	2.0%	4.7%	4.2%	29.4%	56.9%			4.6%	17.4%	47.8%	99.3%	189%	270%	
5	QTVAR	5.23			0.8%	1.7%	3.8%	9.1%	18.9%	40.2%			22.3%	55.6%	94.8%	171%	256%	355%	
6	QMJ	19.7		0.1%	0.2%	0.7%	2.9%	5.7%	8.8%			0.9%	3.3%	9.5%	10.9%	13.4%	20.0%		
7	QMJ	51.6			0.2%	1.0%	2.7%	6.3%	11.9%				6.0%	9.1%	10.6%	14.3%	15.9%		
8	QMJ	102		0.2%	0.6%	1.8%	5.0%	9.2%	14.3%			2.1%	6.4%	10.1%	16.2%	19.2%	28.0%		
9	QMJ	81.9			0.1%	0.9%	3.2%	8.0%	12.4%				2.6%	5.9%	9.7%	15.0%	19.3%		
10	QTVAR	6.07			1.2%	5.9%	11.6%	28.8%	58.7%				9.7%	50.8%	130%	138%	180%		
11	QH	19.0			0.7%	2.0%	6.1%	12.1%	21.6%				8.8%	23.4%	83.0%	85.6%	127%		
12	QTVAR	4.10				1.9%	4.1%	14.9%	18.1%					36.1%	97.9%	141%	206%		
13	QMJ	39.9			0.1%	0.9%	2.6%	6.9%	11.7%				4.0%	4.7%	10.0%	14.7%	17.8%		
14	QTVAR	1.78	0.26%	1.0%	1.9%	3.8%	9.2%	23.4%	33.4%		1.9%	17.7%	21.1%	75.5%	165%	246%	345%		
15	QMJ	60.2				0.4%	1.4%	6.9%	14.3%					3.7%	8.4%	15.1%	22.5%		
16	QMJ	104			0.2%	1.0%	2.1%	6.1%	10.8%				3.2%	8.1%	9.5%	17.4%	23.8%		
17	QMJ	189			0.1%	0.6%	2.0%	6.2%	15.2%				0.9%	5.5%	9.8%	16.9%	21.9%		
18	QMJ	42.5			0.4%	1.4%	3.3%	7.9%	13.6%				4.8%	6.5%	16.4%	20.7%	24.8%		
19	QTVAR	3.64			0.5%	2.2%	8.2%	21.9%	32.4%				6.1%	83.9%	159%	238%	373%		
20	QH	0.99				4.2%	5.4%	32.6%	32.9%				18.6%	93.6%	234%	305%	366%		
21	QMJ	44.6				0.4%	2.1%	3.9%	10.3%					6.6%	9.2%	11.7%	15.5%		
22	QMJ	13.5				1.0%	0.8%	9.2%	11.8%					7.6%	11.6%	16.8%	17.9%		
23	QTVAR	2.80		3.3%	5.6%	20.2%	10.2%	27.3%	56.7%			59.7%	136%	262%	116%	226%	360%		
24	QTVAR	11.9		0.9%	1.7%	5.7%	13.2%	25.4%					21.8%	160%	219%	338%	372%		
25a	QTVAR	31.5					3.8%	6.5%	16.1%					72%	88%	201%	271%	236%	
25b	QMJ	31.5			0.1%	0.4%													
26	QTVAR	13.8			0.1%	0.6%	2.5%	8.0%	22.4%					39.9%	77.7%	91.7%	141%	213%	
27	QH	2.96	0.32%	1.5%	2.1%	4.2%	7.9%	12.2%	18.3%		22.3%	30.2%	51.9%	86.3%	47.7%	76.1%	125%		
28	QMJ	47.4		0.1%	0.1%	0.5%	1.3%	3.9%	5.8%			0.6%	4.8%	7.1%	16.9%	25.7%	32.7%		
29	QMJ	34.0	0.02%	0.15%	0.2%	1.0%	1.1%	0.7%	2.9%	6.5%	0.1%	0.6%	2.9%	3.0%	8.1%	13.9%	16.0%	18.7%	
30	QH	2.54	0.04%	0.30%	0.6%	1.4%	3.5%	7.9%	13.5%	30.4%	1.7%	8.6%	13.7%	44.5%	49.4%	58.6%	69.5%	97.9%	
31	QMJ	56.5	0.17%	0.28%	0.29%	0.49%	0.68%	1.8%	4.4%	7.9%	0.6%	0.7%	1.3%	2.6%	5.7%	8.8%	17.4%	26.2%	
32	QMJ	19.4	0.13%	0.15%	0.27%	0.51%	0.73%	1.6%	4.4%	8.3%	0.6%	0.7%	2.2%	3.4%	5.0%	9.0%	15.1%	19.8%	
33	QTVAR	3.60	0.18%	0.80%	1.0%	2.0%	1.3%	6.9%	13.7%	17.8%	2.7%	8.6%	28.3%	26.6%	57.3%	133%	166%	197%	
34	QTVAR	6.34	0.09%	0.68%	1.0%	2.1%	6.8%	11.5%	27.5%	40.4%	5.5%	17.2%	33.6%	71.8%	173%	276%	340%	498%	
35	QTVAR	10.0			0.3%	1.5%	5.1%	14.3%	21.2%				5.2%	16.5%	38.7%	207%	237%	382%	
36	QH	1.60	0.05%	0.39%	0.8%	2.0%	6.6%	15.1%	37.1%	72.1%	1.5%	4.3%	11.8%	43.5%	56.3%	159%	218%	296%	
37a	QTVAR	19.7						5.25%	15.1%	29.3%		5.7%	13.7%	59.0%	121%	165%	250%	372%	
37b	QMJ	19.7		0.2%	0.4%	1.1%													
38a	QTVAR	16.1						1.7%	6.0%	12.9%				7.3%	19.7%	27.9%	64.6%	105%	
38b	QMJ	16.1	0.06%	0.2%	0.3%	0.6%						1.0%	1.3%						
39	QH	7.78		0.4%	1.1%	3.2%	8.8%	20.0%	28.5%				4.0%	17.7%	37.4%	55.2%	92.7%	119%	
40	QTVAR	8.40		0.4%	1.2%	6.8%	4.8%	19.1%	15.7%				28.6%	26.8%	37.3%	65.5%	86.4%	92.5%	
41	QH	4.68	0.42%	0.9%	2.0%	2.4%	3.7%	9.0%	19.1%			6.7%	16.4%	31.6%	29.3%	53.7%	59.7%	95.0%	
42	QH	3.17	0.11%	0.33%	0.9%	2.3%	4.5%	8.8%	16.2%	24.8%	5.1%	14.6%	20.3%	37.8%	44.6%	73.0%	121%	152%	
43	QTVAR	6.37		0.4%	1.6%	5.9%	5.9%	6.9%	11.0%				8.9%	15.4%	45.9%	56.0%	31.9%	71.2%	
44	QH	3.03		0.18%	0.5%	2.6%	6.2%	11.1%	30.0%	41.2%			6.2%	8.3%	61.1%	93.5%	159%	205%	
45	QH	5.60	0.09%	0.17%	0.5%	1.8%	3.8%	4.7%	9.2%	7.1%	0.6%	2.5%	4.6%	11.9%	17.1%	37.3%	51.7%	50.0%	
46	QH	6.53		0.19%	0.4%	1.5%	4.2%	7.1%	10.0%	22.2%		6.4%	23.5%	32.5%	43.6%	68.6%	77.9%	107%	
47	QH	6.56		0.4%	1.0%	3.6%	6.8%	15.8%	23.0%				6.2%	13.4%	47.2%	57.7%	86.3%	73.9%	
48	QMJ	106	0.05%	0.10%	0.2%	0.4%	1.1%	2.2%	6.3%	8.8%	0.1%	0.5%	1.4%	3.2%	6.5%	10.4%	18.2%	22.6%	
49	QMJ	20.2	0.06%	0.21%	0.2%	0.5%	1.0%	2.2%	5.1%	8.4%	0.5%	2.4%	3.4%	5.0%	7.5%	13.8%	20.2%	23.9%	
50	QMJ	21.2			0.5%	0.8%	1.8%	4.6%	8.7%				1.5%	3.8%	5.8%	9.4%	17.2%	23.1%	
51	QTVAR	3.86		0.5%	1.4%	5.8%	16.2%	16.9%	29.6%				5.6%	19.0%	31.6%	62.1%	87.5%	82.0%	
52	QTVAR	8.70		0.4%	0.9%	2.4%	4.8%	7.6%	11.7%				7.7%	20.4%	34.4%	31.1%	45.8%	59.9%	

Station	Type de Données	Module (m ³ /s)	Valeur de gradient de baisse (9 ^{ème} décile) sur les différentes gammes de variation								Valeur de gradient de hausse (9 ^{ème} décile) sur les différentes gammes de variation							
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
53	QH	5.48			0.5%	1.0%	3.4%	6.0%	13.3%	22.5%			8.0%	15.5%	41.8%	45.4%	80.5%	107%
54	QH	2.89		0.39%	0.8%	2.0%	2.8%	4.6%	15.7%	16.2%		1.4%	6.6%	16.5%	22.1%	35.3%	61.2%	75.9%
55a	QTVAR	17.7						3.2%	6.1%	8.8%				5.7%	16.5%	21.5%	36.3%	55.9%
55b	QMJ	17.7			0.1%	0.2%	1.0%						0.3%					
56	QH	8.21			0.3%	0.6%	2.9%	9.2%	15.0%	22.7%			1.9%	5.0%	20.7%	57.9%	108%	142%
57	QTVAR	13.3					0.4%	2.8%	2.1%	11.9%				0.7%	4.1%	9.5%	10.2%	15.5%
58	QTVAR	8.24			0.2%	0.7%	2.7%	5.5%	8.5%	9.5%			6.4%	19.4%	20.0%	31.2%	55.6%	58.9%
59	QMJ	38.10			0.2%	0.4%	0.8%	2.8%	5.6%	7.8%			1.0%	3.3%	7.4%	14.4%	17.5%	21.2%
60	QTVAR	10.6				0.4%	4.4%	11.3%	14.8%	31.4%				2.0%	32.7%	39.5%	41.1%	68.0%
61	QTVAR	2.70			1.5%	2.2%	9.2%	19.1%	32.0%	40.9%			9.3%	32.5%	154%	277%	105%	154%
62	QH	7.22				1.6%	3.2%	13.7%	33.6%	36.4%				14.9%	86.8%	177%	289%	184%
63	QTVAR	5.10				0.3%	2.7%	9.3%	51.9%	140%				1.4%	22.7%	89.6%	312%	528%
64	QMJ	27.5					0.1%	0.8%	3.4%	9.1%					0.5%	7.1%	9.3%	15.0%
65	QMJ	77.9					0.4%	1.6%	7.1%	8.5%					3.5%	6.0%	11.3%	15.8%
66	QTVAR	7.02			0.5%	0.9%	2.9%	5.3%	13.5%	18.7%			9.2%	30.5%	58.6%	88.5%	243%	258%
67	QTVAR	2.91			0.9%	1.6%	5.7%	9.3%	24.8%	53.5%			8.4%	12.0%	83.5%	177%	309%	431%
68	QTVAR	6.49	0.02%	0.11%	0.3%	0.5%	1.0%	1.9%	4.8%	6.3%	14.6%	11.4%	24.1%	30.3%	86.8%	118%	190%	264%
69	QTVAR	3.41				0.8%	5.6%	7.6%	6.5%	53.8%				17.8%	95.9%	155%	269%	304%
70	QTVAR	4.26			0.4%	1.1%	4.4%	6.0%	12%	25%			23.1%	90.2%	57.5%	79.3%	125%	130%
71a	QTVAR	17.7						3.7%	7.3%	16.7%			5.5%	46.3%	59.0%	38.1%	70.7%	163%
71b	QMJ	17.7		0.10%	0.2%	0.6%	1.0%					1.2%						
72	QTVAR	4.68			0.4%	1.2%	3.5%	8.8%	17.0%	35.2%			18.7%	36.1%	60.6%	126%	165%	285%
73	QH	5.38			0.0%	0.2%	0.6%	4.8%	17.1%	53.3%			0.3%	4.0%	12.1%	51.2%	84.2%	160%
74	QMJ	27.5					0.2%	0.7%	4.7%	17.1%					0.6%	4.7%	8.1%	18.5%
75	QTVAR	3.1			3.3%	7.5%	13.2%	18.2%	43.4%	85.6%			15.6%	43.9%	67.5%	141%	199%	275%
76	QTVAR	7.5				0.7%	2.8%	4.0%	12.1%	29.8%				18.3%	27.8%	53.7%	80.4%	109%
77	QTVAR	9.5			0.3%	0.9%	3.9%	10.3%	22.2%	40.7%			5.5%	15.8%	46.4%	105%	147%	190%
78	QH	14.1			0.4%	0.7%	2.9%	7.7%	20.8%	34.1%			22.1%	23.1%	43.9%	119%	160%	237%
79	QTVAR	7.7			0.3%	1.1%	3.1%	6.0%	14.2%	22.4%			6.1%	15.6%	41.6%	85.8%	123%	160%
80	QTVAR	4.57				0.8%	2.6%	5.9%	23.4%	58.0%				18.5%	33.4%	72.9%	88.6%	137%
81	QTVAR	6.89	0.05%	0.27%	0.9%	0.8%	1.4%	3.2%	7.9%	14.8%	1.0%	2.2%	10.2%	14.0%	28.5%	53.3%	74.1%	103%
82	QTVAR	9.37		0.17%	0.6%	1.5%	3.8%	7.7%	13.6%	23.1%		7.9%	21.6%	61.3%	77.6%	106%	151%	160%
83	QTVAR	13.8		0.10%	0.2%	0.5%	1.2%	3.4%	6.9%	8.9%		0.8%	6.2%	10.8%	22.5%	38.6%	61.8%	74.2%
84a	QTVAR	21.3						1.9%	5.6%	8.6%				3.8%	16.6%	30.7%	48.3%	56.5%
84b	QMJ	21.3			0.1%	0.2%	0.6%						0.6%					
85	QTVAR	52.8						2.2%	5.2%	8.2%				3.3%	10.1%	23.6%	39.8%	40.8%
85b	QMJ	52.8			0.2%	0.2%	0.7%						0.9%					
86	QTVAR	19.3		0.01%	0.1%	0.4%	0.9%	2.4%	5.3%	6.9%		0.1%	3.3%	8.4%	14.8%	26.3%	29.5%	23.1%
87	QTVAR	9.61	0.11%	0.29%	0.5%	1.0%	2.5%	6.6%	12.6%	19.5%	1.4%	10.1%	21.6%	45.8%	67.8%	143%	187%	245%
88a	QTVAR	33.9						1.9%	6.2%	13.4%				2.8%	7.9%	10.3%	10.0%	9.6%
88b	QMJ	33.9			0.1%	0.2%	0.7%						0.6%					
89	QTVAR	8.19		0.35%	0.5%	1.9%	3.7%	5.5%	5.6%	14.6%		0.9%	2.4%	11.0%	18.9%	37.4%	35.6%	43.8%
90a	QTVAR	24.7					1.4%	2.7%	9.0%	11.0%				8.8%	15.4%	30.0%	38.5%	39.0%
90b	QMJ	24.7	0.05%	0.12%	0.2%	0.3%					0.4%	0.9%	1.7%					
91a	QTVAR	37.6					1.3%	2.8%	6.4%	10.7%				0.6%	7.0%	12.7%	18.5%	21.4%
91b	QMJ	37.6				0.2%												
92	QTVAR	2.79		0.25%	0.9%	2.8%	7.9%	7.7%	12.4%	33.9%		6.3%	14.0%	41.6%	33.3%	35.2%	46.4%	65.4%
93	QTVAR	1.24		0.21%	0.7%	2.3%	3.9%	7.8%	27.6%			5.5%	7.5%	22.0%	19.4%	34.0%	53.0%	65.2%
94	QTVAR	2.93	0.26%	0.50%	1.2%	3.3%	8.2%	23.2%	44.2%	64.7%	18.3%	60.4%	386%	1382%	1409%	2260%	2751%	3088%
95	QTVAR	5.08	0.16%	0.54%	1.2%	2.0%	3.5%	7.0%	13.9%	27.0%	62.0%	126%	127%	124%	291%	495%	306%	716%
96	QTVAR	3.68		0.43%	0.9%	2.7%	6.8%	14.4%	29.1%	57.9%		4.1%	10.5%	70.6%	882%	273%	316%	454%
97	QTVAR	3.69		0.05%	0.5%	1.9%	4.2%	9.4%	32.9%	54.3%		13.0%	18.2%	42.5%	112%	252%	256%	473%

8.3. Annexe 3 : Tableaux détaillant la création des points pour les régressions

Baisse - Gamme de variation 8 (300% - 400% du module)

		Classe de module																	
		1		2		3		4		5		6							
		< 4 m ³ /s		4 - 8 m ³ /s		8 - 15 m ³ /s		15 - 30 m ³ /s		30 - 50 m ³ /s		> 50 m ³ /s							
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur			
Moyenne (M)				42.5%			33.1%			20.3%			12.6%			11.8%	11.4%		
Ecart-type (SD)				19.1%			27.2%			9.3%			6.5%			5.0%	2.7%		
M + 2 SD				80.7%			87.5%			38.8%			25.5%			21.8%	16.8%		
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	75	3.1	85.6%	63	5.1	140.4%	77	9.5	40.7%	37a	19.7	29.3%	3a	30.1	22.5%	17	189	15.2%
	2^{ème}	36	1.6	72.1%	10	6.1	58.7%	78	14.1	34.1%	11	19	21.6%	25a	31.5	16.1%	8	102	14.3%
	3^{ème}	94	2.9	64.7%	80	4.6	58.0%	60	10.6	31.4%	74	27.5	17.1%	18	42.5	13.6%	15	60.2	14.3%
	4^{ème}	96	3.7	57.9%	4	5.0	56.9%	24	11.9	25.4%	71a	17.7	16.7%	88a	33.9	13.4%	1a	54.8	13.3%
	5^{ème}	23	2.8	56.7%	73	5.4	53.3%	82	9.4	23.1%	38a	16.1	12.9%	13	39.9	11.7%	9	81.9	12.4%
	6^{ème}	97	3.7	54.3%	34	6.3	40.4%	56	8.2	22.7%	90a	24.7	11.0%	91a	37.6	10.7%	7	51.6	11.9%
	7^{ème}	69	3.4	53.8%	5	5.2	40.2%	26	13.8	22.4%	64	27.5	9.1%	21	44.6	10.3%	16	104	10.8%
	8^{ème}	67	2.9	53.5%	62	7.2	36.4%	35	10.0	21.2%	55a	17.7	8.8%	59	38.1	7.8%	48	106	8.8%
	9^{ème}	44	3.0	41.2%	72	4.7	35.2%	87	9.6	19.5%	6	19.7	8.8%	29	34	6.5%	65	77.9	8.5%
	10^{ème}	61	2.7	40.9%	76	7.5	29.8%	40	8.4	15.7%	50	21.2	8.7%	28	47.4	5.8%	85	52.8	8.2%
Valeurs adoptées			2.7	64.9%		5.2	57.9%		12.2	30.3%		21.4	18.5%		36.0	14.3%		50.0	14.6%

Baisse - Gamme de variation 7 (200% - 300% du module)

		Classe de module																	
		1		2		3		4		5		6							
		< 4 m ³ /s		4 - 8 m ³ /s		8 - 15 m ³ /s		15 - 30 m ³ /s		30 - 50 m ³ /s		> 50 m ³ /s							
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur			
Moyenne (M)				24.44%			17.38%			12.10%			6.74%			6.20%	6.63%		
Ecart-type (SD)				10.56%			10.43%			5.66%			3.25%			2.52%	1.31%		
M + 2 SD				45.57%			38.24%			23.41%			13.24%			11.24%	9.25%		
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	44.16%	63	5.1	51.94%	77	9.5	22.24%	37a	19.7	15.06%	3a	30.1	11.82%	8	102	9.20%
	2^{ème}	75	3.1	43.36%	62	7.2	33.59%	78	14.1	20.81%	11	19	12.12%	18	42.5	7.87%	9	81.9	8.04%
	3^{ème}	36	1.6	37.08%	4	5.0	29.39%	40	8.4	19.09%	90a	24.7	9.01%	13	39.9	6.94%	1a	54.8	7.32%
	4^{ème}	97	3.7	32.95%	10	6.1	28.83%	56	8.2	15.03%	71a	17.7	7.29%	25a	31.5	6.52%	65	77.9	7.06%
	5^{ème}	20	1.0	32.56%	34	6.3	27.50%	60	10.6	14.83%	55a	17.7	6.05%	91a	37.6	6.42%	15	60.2	6.89%
	6^{ème}	61	2.7	31.98%	80	4.6	23.38%	35	10.0	14.27%	38a	16.1	6.04%	88a	33.9	6.17%	7	51.6	6.30%
	7^{ème}	44	3.0	29.97%	39	7.8	20.04%	82	9.4	13.64%	6	19.7	5.74%	59	38.1	5.55%	48	106	6.26%
	8^{ème}	96	3.7	29.08%	5	5.2	18.94%	24	11.9	13.21%	84a	21.3	5.57%	21	44.6	3.93%	17	189	6.22%
	9^{ème}	93	1.2	27.62%	73	5.4	17.05%	87	9.6	12.61%	86	19.3	5.32%	28	47.4	3.93%	16	104	6.13%
	10^{ème}	23	2.8	27.30%	72	4.7	17.01%	22	13.5	9.23%	49	20.2	5.06%	29	34	2.86%	85	52.8	5.16%
Valeurs adoptées			2.5	41.53%		6.1	30.60%		10.7	20.71%		20.5	9.47%		38.0	7.11%		50.0	8.19%

Baisse - Gamme de variation 6 (100% - 200% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				10.87%			6.60%			5.86%			2.65%			2.55%			2.36%
Ecart-type (SD)				4.92%			2.86%			2.87%			1.55%			1.09%			0.99%
M + 2 SD				20.71%			12.32%			11.59%			5.74%			4.72%			4.33%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	23.23%	62	7.2	13.72%	60	10.6	11.30%	11	19	6.15%	3a	30.1	4.25%	8	102	4.95%
	2^{ème}	61	2.7	19.07%	10	6.1	11.59%	77	9.5	10.30%	37a	19.7	5.25%	25a	31.5	3.79%	9	81.9	3.16%
	3^{ème}	75	3.1	18.18%	34	6.3	11.50%	56	8.2	9.22%	71a	17.7	3.71%	18	42.5	3.28%	7	51.6	2.66%
	4^{ème}	51	3.9	16.17%	63	5.1	9.31%	82	9.4	7.73%	55a	17.7	3.23%	59	38.1	2.81%	85	52.8	2.21%
	5^{ème}	36	1.6	15.12%	5	5.2	9.06%	78	14.1	7.70%	6	19.7	2.86%	91a	37.6	2.76%	48	106	2.16%
	6^{ème}	96	3.7	14.42%	72	4.7	8.84%	87	9.6	6.59%	90a	24.7	2.70%	13	39.9	2.57%	16	104	2.14%
	7^{ème}	44	3.0	11.08%	39	7.8	8.76%	24	11.9	5.68%	86	19.3	2.43%	21	44.6	2.10%	17	189	1.97%
	8^{ème}	23	2.8	10.22%	46	6.5	7.06%	58	8.2	5.54%	49	20.2	2.19%	88a	33.9	1.95%	1a	54.8	1.96%
	9^{ème}	97	3.7	9.37%	95	5.1	7.01%	89	8.2	5.47%	84a	21.3	1.85%	28	47.4	1.34%	31	56.5	1.76%
	10^{ème}	67	2.9	9.30%	47	6.6	6.79%	35	10.0	5.10%	50	21.2	1.83%	29	34	0.68%	65	77.9	1.58%
Valeurs adoptées			3.2	17.81%		5.8	10.80%		9.4	10.27%		18.4	4.06%		34.7	3.77%		50.0	2.67%

Baisse - Gamme de variation 5 (50% - 100% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				6.19%			3.35%			2.66%			0.86%			0.89%			0.85%
Ecart-type (SD)				4.16%			1.46%			1.64%			0.48%			0.39%			0.39%
M + 2 SD				14.51%			6.26%			5.94%			1.82%			1.67%			1.63%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	23	2.8	20.17%	34	6.3	6.82%	40	8.4	6.79%	11	19	1.99%	18	42.5	1.41%	8	102	1.81%
	2^{ème}	75	3.1	13.23%	10	6.1	5.88%	60	10.6	4.44%	90a	24.7	1.39%	3b	30.1	1.34%	48	106	1.09%
	3^{ème}	61	2.7	9.21%	43	6.4	5.87%	77	9.5	3.90%	37b	19.7	1.09%	91a	37.6	1.33%	7	51.6	1.00%
	4^{ème}	94	2.9	8.24%	4	5.0	4.70%	82	9.4	3.80%	71b	17.7	1.05%	29	34	1.13%	16	104	0.98%
	5^{ème}	92	2.8	7.90%	70	4.3	4.39%	89	8.2	3.73%	49	20.2	1.02%	13	39.9	0.87%	9	81.9	0.93%
	6^{ème}	96	3.7	6.75%	46	6.5	4.20%	56	8.2	2.92%	55b	17.7	0.98%	59	38.1	0.81%	85b	52.8	0.73%
	7^{ème}	36	1.6	6.56%	45	5.6	3.85%	78	14.1	2.87%	86	19.3	0.86%	88b	33.9	0.67%	31	56.5	0.68%
	8^{ème}	44	3.0	6.18%	5	5.2	3.83%	58	8.2	2.68%	50	21.2	0.81%	28	47.4	0.50%	17	189	0.63%
	9^{ème}	51	3.9	5.77%	47	6.6	3.62%	87	9.6	2.47%	32	19.4	0.73%	25b	31.5	0.44%	1b	54.8	0.60%
	10^{ème}	67	2.9	5.74%	72	4.7	3.47%	52	8.7	2.42%	6	19.7	0.71%	21	44.6	0.43%	15	60.2	0.44%
Valeurs adoptées			2.9	10.23%		5.8	5.48%		9.8	4.05%		20.7	1.18%		36.7	1.36%		50.0	1.02%

Baisse - Gamme de variation 4 (25% - 50% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				2.44%			1.20%			0.84%			0.40%			0.33%			0.29%
Ecart-type (SD)				1.59%			0.56%			0.49%			0.16%			0.29%			0.18%
M + 2 SD				5.62%			2.32%			1.82%			0.73%			0.91%			0.65%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	75	3.1	7.55%	34	6.3	2.15%	89	8.2	1.94%	11	19	0.68%	29	34	1.01%	8	102	0.61%
	2^{ème}	23	2.8	5.59%	41	4.7	2.01%	82	9.4	1.53%	71b	17.7	0.61%	59	38.1	0.44%	31	56.5	0.49%
	3^{ème}	94	2.9	3.33%	4	5.0	2.01%	40	8.4	1.23%	50	21.2	0.52%	3b	30.1	0.43%	48	106	0.43%
	4^{ème}	92	2.8	2.81%	95	5.1	2.00%	87	9.6	0.95%	32	19.4	0.51%	18	42.5	0.35%	1b	54.8	0.29%
	5^{ème}	96	3.7	2.67%	45	5.6	1.78%	52	8.7	0.95%	49	20.2	0.48%	88b	33.9	0.23%	85b	52.8	0.24%
	6^{ème}	44	3.0	2.62%	5	5.2	1.66%	24	11.9	0.95%	37b	19.7	0.39%	91b	37.6	0.19%	7	51.6	0.20%
	7^{ème}	93	1.2	2.32%	62	7.2	1.58%	77	9.5	0.94%	86	19.3	0.37%	13	39.9	0.11%	16	104	0.17%
	8^{ème}	42	3.2	2.32%	43	6.4	1.56%	78	14.1	0.74%	90b	24.7	0.35%	25b	31.5	0.11%	17	189	0.14%
	9^{ème}	61	2.7	2.19%	46	6.5	1.50%	58	8.2	0.66%	38b	16.1	0.28%	28	47.4	0.08%	9	81.9	0.08%
	10^{ème}	27	3.0	2.08%	10	6.1	1.22%	56	8.2	0.56%	6	19.7	0.22%						
Valeurs adoptées			2.8	3.91%		5.3	2.06%		9.1	1.24%		19.3	0.61%		36.9	0.41%		50.0	0.51%

Baisse - Gamme de variation 3 (15% - 25% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				1.15%			0.57%			0.40%			0.16%			0.16%			0.20%
Ecart-type (SD)				0.84%			0.29%			0.13%			0.06%						
M + 2 SD				2.84%			1.16%			0.67%			0.28%						
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	75	3.1	3.31%	95	5.1	1.22%	82	9.4	0.61%	32	19.4	0.27%	29	34	0.24%	31	56.5	0.29%
	2^{ème}	23	2.8	3.32%	34	6.3	0.95%	89	8.2	0.54%	49	20.2	0.22%	59	38.1	0.23%	85b	52.8	0.21%
	3^{ème}	94	2.9	1.20%	41	4.7	0.93%	87	9.6	0.52%	71b	17.7	0.19%	88b	33.9	0.14%	48	106	0.19%
	4^{ème}	92	2.8	0.85%	81	6.9	0.87%	40	8.4	0.45%	90b	24.7	0.18%	28	47.4	0.05%	8	102	0.16%
	5^{ème}	96	3.7	0.87%	4	5.0	0.81%	78	14.1	0.41%	37b	19.7	0.17%				1b	54.8	0.15%
	6^{ème}	44	3.0	0.48%	5	5.2	0.77%	52	8.7	0.41%	38b	16.1	0.16%						
	7^{ème}	93	1.2	0.72%	45	5.6	0.54%	56	8.2	0.32%	6	19.7	0.15%						
	8^{ème}	42	3.2	0.91%	66	7.0	0.47%	77	9.5	0.30%	55b	17.7	0.11%						
	9^{ème}	61	2.7	1.52%	53	5.5	0.46%	83	13.8	0.25%	84b	21.3	0.09%						
	10^{ème}	27	3.0	1.52%	47	6.6	0.44%	58	8.2	0.20%	86	19.3	0.08%						
Valeurs adoptées			3.1	0.97%		6.0	0.92%		9.1	0.56%		19.1	0.23%		35.3	0.20%		50.0	0.19%

Hausse - Gamme de variation 8 (300% - 400% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				380%			211%			148%			76%			50.3%			23.1%
Ecart-type (SD)				635%			162%			117%			97%			70.8%			7.1%
M + 2 SD				1651%			536%			381.9%			270%			192%			37%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	3088%	95	5.1	716%	35	10.0	382.0%	37a	19.7	372%	25a	31.5	236.1%	85	52.8	40.8%
	2^{ème}	97	3.7	473%	63	5.1	528%	24	11.9	372%	71a	17.7	163%	3a	30.1	105.5%	8	102	28.0%
	3^{ème}	96	3.7	454%	34	6.3	498%	87	9.6	245%	11	19	127%	28	47.4	32.7%	31	56.5	26.2%
	4^{ème}	67	2.9	431%	5	5.2	355%	78	14.1	237%	38a	16.1	105%	18	42.5	24.8%	16	104	23.8%
	5^{ème}	19	3.6	373%	72	4.7	285%	26	13.8	213%	84a	21.3	56%	91a	37.6	21.4%	48	106	22.6%
	6^{ème}	20	1.0	366%	4	5.0	270%	77	9.5	190%	55a	17.7	56%	59	38.1	21.2%	15	60.2	22.5%
	7^{ème}	23	2.8	360%	68	6.5	264%	82	9.4	160%	90a	24.7	39%	29	34	18.7%	17	189	21.9%
	8^{ème}	14	1.8	345%	66	7.0	258%	56	8.2	142%	49	20.2	24%	13	39.9	17.8%	9	81.9	19.3%
	9^{ème}	69	3.4	304%	12	4.1	206%	40	8.4	93%	50	21.2	23%	21	44.6	15.5%	1a	54.8	16.9%
	10^{ème}	36	1.6	296%	62	7.2	184%	83	13.8	74%	86	19.3	23%	88a	33.9	9.6%	7	51.6	15.9%
Valeurs adoptées			3.4	452%		5.6	460%		11.9	285%		17.6	131%		40.0	54.3%		50.0	26.0%

Hausse - Gamme de variation 7 (200% - 300% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				301%			148%			114%			50%			48.7%			18.4%
Ecart-type (SD)				569%			92%			89%			62%			80.7%			7.4%
M + 2 SD				1438%			332%			292%			175%			210%			33%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	2751%	34	6.3	340%	24	11.9	338%	37a	19.7	250%	25a	31.5	270.7%	85	52.8	39.8%
	2^{ème}	96	3.7	316%	63	5.1	312%	35	10.0	237%	11	19	86%	3a	30.1	81.6%	8	102	19.2%
	3^{ème}	67	2.9	309%	95	5.1	306%	87	9.6	187%	71a	17.7	71%	28	47.4	25.7%	48	106	18.2%
	4^{ème}	20	1.0	305%	62	7.2	289%	78	14.1	160%	38a	16.1	65%	18	42.5	20.7%	31	56.5	17.4%
	5^{ème}	69	3.4	269%	5	5.2	256%	82	9.4	151%	84a	21.3	48%	91a	37.6	18.5%	16	104	17.4%
	6^{ème}	97	3.7	256%	66	7.0	243%	77	9.5	147%	90a	24.7	39%	59	38.1	17.5%	1a	54.8	17.3%
	7^{ème}	14	1.8	246%	68	6.5	190%	26	13.8	141%	55a	17.7	36%	29	34	16.0%	17	189	16.9%
	8^{ème}	19	3.6	238%	4	5.0	189%	56	8.2	108%	86	19.3	30%	13	39.9	14.7%	15	60.2	15.1%
	9^{ème}	23	2.8	226%	72	4.7	165%	40	8.4	86%	49	20.2	20%	21	44.6	11.7%	9	81.9	15.0%
	10^{ème}	36	1.6	218%	12	4.1	141%	83	13.8	62%	50	21.2	17%	88a	33.9	10.0%	7	51.6	14.3%
Valeurs adoptées			2.5	310%		5.8	302%		11.2	194%		17.6	74%		40.0	42.7%		50.0	18.3%

Hausse - Gamme de variation 6 (100% - 200% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				238%			107%			82%			34.1%			35.7%			11.4%
Ecart-type (SD)				470%			97%			64%			42.6%			59.4%			4.8%
M + 2 SD				1178%			301%			211%			119%			154.4%			21%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	2260%	95	5.1	495%	24	11.9	219%	37a	19.7	165.1%	25a	31.5	200.8%	85	52.8	23.6%
	2^{ème}	61	2.7	277%	34	6.3	276%	35	10.0	207%	11	19	83.0%	3a	30.1	52.0%	8	102	16.2%
	3^{ème}	96	3.7	273%	62	7.2	177%	87	9.6	143%	71a	17.7	38.1%	28	47.4	16.9%	1a	54.8	12.1%
	4^{ème}	97	3.7	252%	5	5.2	171%	78	14.1	119%	84a	21.3	30.7%	18	42.5	16.4%	7	51.6	10.6%
	5^{ème}	20	1.0	234%	10	6.1	130%	82	9.4	106%	90a	24.7	30.0%	59	38.1	14.4%	48	106	10.4%
	6^{ème}	67	2.9	177%	72	4.7	126%	77	9.5	105%	38a	16.1	27.9%	29	34	13.9%	17	189	9.8%
	7^{ème}	14	1.8	165%	68	6.5	118%	26	13.8	92%	86	19.3	26.3%	91a	37.6	12.7%	9	81.9	9.7%
	8^{ème}	36	1.6	159%	4	5.0	99%	40	8.4	65%	55a	17.7	21.5%	88a	33.9	10.3%	16	104	9.5%
	9^{ème}	19	3.6	159%	12	4.1	98%	56	8.2	58%	49	20.2	13.8%	13	39.9	10.0%	31	56.5	8.8%
	10^{ème}	44	3.0	159%	63	5.1	90%	60	10.6	39%	6	19.7	10.9%	21	44.6	9.2%	15	60.2	8.4%
Valeurs adoptées			3.4	267%		6.3	208%		11.2	156%		19.3	50.6%		40.0	28.4%		50.0	13.0%

Hausse - Gamme de variation 5 (50% - 100% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				182%			60%			44%			22.5%			16.1%			6.5%
Ecart-type (SD)				335%			58%			38%			31.7%			25.4%			2.5%
M + 2 SD				852%			177%			120%			85.9%			67.0%			11.5%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	1409%	95	5.1	291%	24	11.9	160%	37a	19.7	120.5%	25a	31.5	87.7%	85	52.8	10.1%
	2^{ème}	96	3.7	882%	34	6.3	173%	26	13.8	78%	71a	17.7	59.0%	3a	30.1	18.2%	8	102	10.1%
	3^{ème}	23	2.8	262%	5	5.2	95%	82	9.4	78%	11	19	23.4%	29	34	8.1%	7	51.6	9.1%
	4^{ème}	61	2.7	154%	62	7.2	87%	87	9.6	68%	38a	16.1	19.7%	88a	33.9	7.9%	16	104	8.1%
	5^{ème}	97	3.7	112%	68	6.5	87%	77	9.5	46%	84a	21.3	16.6%	59	38.1	7.4%	48	106	6.5%
	6^{ème}	69	3.4	96%	72	4.7	61%	78	14.1	44%	55a	17.7	16.5%	28	47.4	7.1%	9	81.9	5.9%
	7^{ème}	20	1.0	94%	66	7.0	59%	35	10.0	39%	90a	24.7	15.4%	91a	37.6	7.0%	31	56.5	5.7%
	8^{ème}	44	3.0	93%	70	4.3	58%	40	8.4	37%	86	19.3	14.8%	21	44.6	6.6%	17	189	5.5%
	9^{ème}	27	3.0	86%	10	6.1	51%	52	8.7	34%	6	19.7	9.5%	18	42.5	6.5%	15	60.2	3.7%
	10^{ème}	19	3.6	84%	4	5.0	48%	60	10.6	33%	49	20.2	7.5%	13	39.9	4.7%	65	77.9	3.5%
Valeurs adoptées			3.1	176%		6.3	118%		10.9	74%		17.6	34.0%		32.7	11.4%		50.0	9.7%

Hausse - Gamme de variation 4 (25% - 50% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				102%			29.0%			21.4%			13.6%			11.0%			3.33%
Ecart-type (SD)				294%			29.4%			16.7%			18.5%			22.9%			1.81%
M + 2 SD				691%			87.7%			54.8%			50.7%			56.8%			7%
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	1382%	95	5.1	124.4%	82	9.4	61.3%	37a	19.7	59.0%	25a	31.5	71.9%	8	102	6.43%
	2^{ème}	23	2.8	136%	70	4.3	90.2%	87	9.6	45.8%	71a	17.7	46.3%	28	47.4	4.8%	7	51.6	5.98%
	3^{ème}	96	3.7	71%	34	6.3	71.8%	26	13.8	39.9%	11	19	8.8%	18	42.5	4.8%	85	52.8	3.31%
	4^{ème}	44	3.0	61%	5	5.2	55.6%	40	8.4	26.8%	90a	24.7	8.8%	13	39.9	4.0%	16	104	3.25%
	5^{ème}	27	3.0	52%	72	4.7	36.1%	78	14.1	23.1%	86	19.3	8.4%	3b	30.1	3.8%	48	106	3.20%
	6^{ème}	30	2.5	44%	46	6.5	32.5%	24	11.9	21.8%	38a	16.1	7.3%	59	38.1	3.3%	31	56.5	2.59%
	7^{ème}	75	3.1	44%	41	4.7	31.6%	52	8.7	20.4%	55a	17.7	5.7%	29	34	3.0%	9	81.9	2.58%
	8^{ème}	36	1.6	43%	66	7.0	30.5%	58	8.2	19.4%	49	20.2	5.0%	88a	33.9	2.8%	1b	54.8	1.75%
	9^{ème}	97	3.7	43%	68	6.5	30.3%	35	10.0	16.5%	50	21.2	3.8%	91a	37.6	0.6%	17	189	0.88%
	10^{ème}	92	2.8	42%	80	4.6	18.5%	77	9.5	15.8%	84a	21.3	3.8%						
Valeurs adoptées			3.2	89%		5.4	54.5%		10.6	37.5%		20.5	21.3%		43.3	4.5%		50.0	5.24%

Hausse - Gamme de variation 3 (15% - 25% du module)

		Classe de module																	
		1			2			3			4			5			6		
		< 4 m ³ /s			4 - 8 m ³ /s			8 - 15 m ³ /s			15 - 30 m ³ /s			30 - 50 m ³ /s			> 50 m ³ /s		
		N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur	N°	Mod	Valeur
Moyenne (M)				37.3%			19.5%			11.7%			3.10%			1.30%			1.25%
Ecart-type (SD)				88.1%			28.3%			9.6%			3.83%						
M + 2 SD				213.5%			76.1%			31.0%			11%						
Valeurs les plus fortes	1^{ère} (max)	94	2.9	386.5%	95	5.1	126.9%	40	8.4	28.6%	37a	19.7	13.71%	29	34	2.95%	8	102	2.12%
	2^{ème}	23	2.8	59.7%	34	6.3	33.6%	78	14.1	22.1%	71a	17.7	5.46%	59	38.1	1.01%	48	106	1.40%
	3^{ème}	27	3.0	30.2%	68	6.5	24.1%	82	9.4	21.6%	49	20.2	3.39%	88b	33.9	0.64%	31	56.5	1.27%
	4^{ème}	33	3.6	28.3%	46	6.5	23.5%	87	9.6	21.6%	86	19.3	3.31%	28	47.4	0.62%	85b	52.8	0.88%
	5^{ème}	42	3.2	20.3%	70	4.3	23.1%	52	8.7	7.7%	32	19.4	2.16%				1b	54.8	0.56%
	6^{ème}	97	3.7	18.2%	5	5.2	22.3%	58	8.2	6.4%	90b	24.7	1.67%						
	7^{ème}	14	1.8	17.7%	72	4.7	18.7%	83	13.8	6.2%	50	21.2	1.46%						
	8^{ème}	75	3.1	15.6%	41	4.7	16.4%	77	9.5	5.5%	38b	16.1	1.26%						
	9^{ème}	92	2.8	14.0%	81	6.9	10.2%	35	10.0	5.2%	6	19.7	0.88%						
	10^{ème}	30	2.5	13.7%	66	7.0	9.2%	89	8.2	2.4%	84b	21.3	0.61%						
Valeurs adoptées			3.1	39.4%		6.5	27.1%		10.6	24.1%		19.1	4.05%		34.0	2.95%		50.0	2.12%

8.4. Annexe 4 : Liste des stations à l'hydrologie influencée identifiées

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)			Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
1	Pyrénées Adour-Garonne	64	Gave d'Ossau	Oloron-Sainte-Marie	19.7	DDE 64	Q6142910	215	361173	1802909	2000	2009	10	Station située à l'amont d'Oloron, 1-2 km en amont de la confluence avec le Gave d'Aspe.	Chaîne d'aménagements du Gave d'Ossau avec les retenues d'Artouse, Bioux et Fabrèges (U 24, 5.4 et 6.7 Mm ³) restituant les éclusées à l'usine de Geteu (26 m ³ /s). + Chaîne d'aménagements du Valentin avec les retenues d'Iscoo et d'Assouste restituant les eaux à l'usine d'Espalungue (3.1 m ³ /s). Démodulation partielle des éclusées par l'aménagement de Castet (25 m ³ /s, U 0.16 Mm ³). Eclusées retranscrites par des microcentrales.	40	203%	
2	Pyrénées Adour-Garonne	64	Gave d'Oloron	Oloron-Sainte-Marie	51.6	DDE 64	Q7002910	204	360293	1804085	2004	2009	6	Station située à l'aval d'Oloron, au niveau du pont de la voie ferrée	Chaîne d'aménagements sur le Gave d'Ossau (U tot = 36.1 Mm ³) et sur le Gave d'Aspe (Lac d'Estaens [U 2.8 Mm ³], Anglus et Peillhou [U 0.08 Mm ³]). Eclusées retranscrites par des microcentrales.	100	194%	
3	Pyrénées Adour-Garonne	64	Gave d'Oloron	Escos	102	DDE 64	Q7412910	30	329975	1832099	2004	2009	6	Station située en amont d'Escos, en aval de la confluence du Saison	Mm ³ , Anglus et Peillhou [U 0.08 Mm ³]). Eclusées retranscrites par des microcentrales.	150	147%	
4	Pyrénées Adour-Garonne	65	Gave de Pau	Saint-Pé-de-Bigorre	44.8	DREAL Aquitaine	Q4801010	337	397811	1792072	2004	2010	7	Station située en amont de Saint-Pé, au niveau du pont et du lieu-dit Rieulhès	Chaîne d'aménagements depuis les retenues amont de Migeolou (U 17 Mm ³), du Tech (U 1.02 Mm ³), coté Gave d'Arrens, des Gloriettes (U 2.65 Mm ³), de Cap de Long (U 66.6 Mm ³) et d'Escaubous (U 1.4 Mm ³), coté Gave de Gavarnie, dont les eaux sont notamment restituées aux centrales de Lau Balagnas (20.3 m ³ /s) et du Pont de la Reine (23 m ³ /s). Eclusées retranscrites par des microcentrales.	90	201%	
5	Pyrénées Adour-Garonne	64	Gave de Pau	Bérenx	81.9	DREAL Aquitaine	Q5501010	38	341740	1839321	2004	2010	7	Station située en amont du pont de l'autoroute, entre Baigts et Puyoo		160	195%	
6	Pyrénées Adour-Garonne	65	Adour	Asté	7.9	DREAL Aquitaine	Q0100010	600	422615	1784069	2004	2010	7	Station située au pont d'Asté	Lac de Greziolles (U 4.2 Mm ³) et barrage du Castillon (U 0.08 Mm ³) alimentant la centrale d'Artigues (4.95 m ³ /s), coté Adour de Gripp, dont les eaux sont notamment returbinaées aux centrales de Gripp (4 m ³ /s), puis de Campan (7.5 m ³ /s)	16	202%	
7	Pyrénées Adour-Garonne	65	Adour	Tarbes	9.2	DREAL Aquitaine	Q0120060	309	417099	1805893	2008	2010	3	Station située dans Tarbes, au Pont de la Mame		18	196%	
8	Pyrénées Adour-Garonne	31	Garonne	Saint-Béat	23.5	DREAL Midi-Pyrénées	O0010040	496	465449	1769443	2000	2010	11	Station située au second pont au niveau de Saint-Béat (N125), environ 3.5 km en aval de l'usine d'Arlous.	Chaîne d'aménagements dans la partie amont espagnole (U 23 Mm ³) se terminant par la centrale du Pont du Roy (37.5 m ³ /s), dont les éclusées sont reprises et partiellement démodulées par l'aménagement de Plan d'Arem (U 0.35 Mm ³ ; 34 m ³ /s)	70	298%	
9	Pyrénées Adour-Garonne	31	Garonne	Chaum Fronsac	30.9	DREAL Midi-Pyrénées	O0050010 O0050020	472 465	461874 461474	1772141 1773773	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de Chaum, environ 1.5 km en aval de la confluence de la Pique. Station abandonnée en 2008, remplacée par celle de Fronsac, située en aval du pont de la voie ferrée (2 km plus à l'aval)	Influence des aménagements de la Garonne amont, et de la Pique (Lac du portillon [U 16.7 Mm ³] et autres lacs captés, 7.11 m ³ /s, et Lac d'Oô, 4.75 m ³ /s)	90	291%	
10	Pyrénées Adour-Garonne	31	Garonne	Saint-Gaudens	51.0	DREAL Midi-Pyrénées	O0200020	361	467072	1789718	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de la D8 au niveau du village de Valentine, environ 400 m en aval de l'usine de Valentine, et donc en aval de la confluence de la Neste.	Influence des aménagements de la Garonne amont, de la Pique, et de la Neste (Oredon [T 7.27 Mm ³], Oule [T 16.6 Mm ³], Rioumajou [U 0.57 Mm ³], coté Neste d'Aure, Caillaouas [T 26.3 Mm ³], coté Neste du Louron)	150	294%	

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)		Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
11	Pyrénées Adour-Garonne	31	Garonne	Portet	189	DREAL Midi-Pyrénées	O1900010	147	525406	1836493	2004	2010	7	Station située au niveau de l'embarcadère du bac, 1 km en aval de la confluence de l'Ariège	Influence des aménagements de la Garonne amont, de la Pique, de la Neste, du Lez et du bassin de l'Ariège.	380	201%
12	Pyrénées Adour-Garonne	9	Lez	Bordes-sur-Lez	7.1	DREAL Midi-Pyrénées	O0444010	549	492996	1767504	2004	2008	5	Station située en aval du pont de Bordes-sur-Lez, environ 700 m en aval de l'usine de Bordes.	Etang d'Arraing (U 8.44 Mm ³) dont l'eau est turbiné à l'usine d'Eylie (3.6 m ³ /s). Eclusées reprises au barrage de Bonac et turbinées à l'usine de Bordes (8 m ³ /s)	14	196%
13	Pyrénées Adour-Garonne	9	Lez	Engomer	11.1	DREAL Midi-Pyrénées	O0484010	455	495211	1772687	2005	2010	6	Station située 200 m en amont du village d'Engomer.	Influence de l'Etang d'Arraing, remodelée par le barrage-usine de Castillon (T 0.55 Mm ³ , ?? m ³ /s)	22	198%
14	Pyrénées Adour-Garonne	9	Salat	Saint-Lizier	35.3	DREAL Midi-Pyrénées	O0502520	382	502293	1777255	2004	2010	7	Station située juste à l'aval de Saint-Girons, environ 500 m en aval de la confluence du Lez.	Influence de la chaîne d'aménagements sur le Lez (Etang d'Arraing et barrage de Castillon). Eclusées retranscrites par de nombreuses microcentrales sur le Lez et le Salat	50	142%
15	Pyrénées Adour-Garonne	31	Salat	Roquefort	42.5	DREAL Midi-Pyrénées	O0592510	270	488966	1795612	2004	2010	7	Station située 1 km en amont de la confluence avec la Garonne.		60	141%
16	Pyrénées Adour-Garonne	9	Ariège	Foix	39.7	DREAL Midi-Pyrénées	O1252510	375	540501	1773983	2004	2010	7	Station située dans Foix, au premier pont en amont de la confluence de l'Arget.	Influence des retenues de Gnioure, Izourt et Soulcem (U tot 65 Mm ³), coté Vicdessos, de Laparan et Riete (U tot 16.47 Mm ³) coté Aston, de Naguilhes, Teich et Goulours (U tot 42.94 Mm ³) coté Oriège, et du Lanoux, Sisca et Val d'Arques (U tot 68.02 Mm ³) coté Haute-Ariège. Ensemble des éclusées démodulées par l'aménagement de Garrabet (U 1.7 Mm ³) dont les eaux sont turbinées à l'usine de Ferrières (70 m ³ /s).	120	302%
17	Pyrénées Adour-Garonne	31	Ariège	Auterive	59.5	DREAL Midi-Pyrénées	O1712510	177	529375	1818932	2004	2010	7	Station située en aval d'Auterive, au niveau de la zone industrielle de Quilla.		150	252%
18	Pyrénées Adour-Garonne	9	Hers Vif	Roumengoux	7.1	DREAL Midi-Pyrénées	O1532910	305	567174	1786729	2009	2009	1	Station située en aval de Roumengoux (en amont de Mirepoix), au lieu-dit Borde de Faures, et donc en aval de la confluence du Touyre.	Influence des lachés depuis le lac de Montbel (T 60 Mm ³) Hydrologie peu perturbée (classe 0) en 2008 et 2009	10	140%
19	Pyrénées RMC	11	Aude	Belvianes et Cavirac	13.5	DDE 11	Y1112010	303	588398	1761503	2004	2010	7	Station située en aval de Belviane et Cavirac, entre les deux seuils.	Influences des aménagements du Capcir, Matemale (U 20.5 Mm ³) et Puyvalador (9.8 Mm ³) dont les éclusées sont restituées à l'usine de Nentilla (12.4 m ³ /s) + influence de la chaîne d'aménagements coté Bruyante,	35	259%
21	Pyrénées RMC	11	Aude	Carcassonne	20.1	DDE 11	Y1232010	96	601959	1801301	2008	2010	3	Station située dans Carcassonne, en aval du Pont Neuf.	Grandes Pâtures et Laurenti (U tot 1.72 Mm ³), dont les éclusées sont restituées à l'usine de Saint-Georges (5 m ³ /s).	40	199%
22	Pyrénées RMC	66	Têt	Mont-Louis	1.2	DDE 11	Y0404010	1700	576893	1726225	2009	2010	2	Station située en amont du village de Mont-Louis à environ 1,5 km en aval de la centrale des Aveillans	Centrale des Aveillans (? m ³ /s) turbinant l'eau du Lac des Bouillouses (T 17.5 Mm ³)	3.6	300%
23	Pyrénées RMC	66	Têt	Serdinya	5.3	DDE 11	Y0424010	525	598297	1729162	2008	2010	3	Station située juste en amont du village de Serdinya, et en aval de l'usine d'Olette	Chaîne d'aménagements sur la Têt depuis le lac des Bouillouses, dont les eaux sont là restituées par l'usine d'Olette (? m ³ /s)	8	151%
24	Pyrénées RMC	66	Têt	Marquixanes	8.5	DDE 11	Y0444010	244	612312	1737896	2008	2010	3	Station située en queue de retenue du barrage de Vinça, en aval du pont de Marquixanes (en aval de Prades).	Influence de la chaîne d'aménagements sur la Têt depuis le lac des Bouillouses.	10	117%

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)		Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
25	Massif central RMC	7	Ardèche	Pont-de-Labeaume	16.4	SPC Grand Delta	V5004010	295	755018	1964740	2008	2010	3	Station située au pont de Labeaume, juste à l'aval de la confluence de la Fontaulière.	Influence de l'usine de Monpezat (26.5 m ³ /s), turbinant les eaux des retenues de La Palisse (U 7.94 Mm ³) et Gage II (U 3.32 Mm ³), et les restituatant sur la Fontaulière. Transfert de BV.	40	244%
26	Massif central RMC	7	Ardèche	Vogüé	26.4	SPC Grand Delta	V5014010	143	764859	1951259	2008	2010	3	Station située juste à l'aval d'Aubenas, à l'amont de la confluence de l'Auzon.		55	208%
27	Massif central RMC	7	Ardèche	Saint-Martin	64.9	SPC Grand Delta	V5064010	46	776696	1926247	2008	2010	3	Station située en amont de Saint-Martin, au niveau du Rapide de Sauze.	Influence de l'usine de Monpezat sur la Fontaulière (26.5 m ³ /s) et de l'usine de Salleles sur le Chassezac (29 m ³ /s) (retenues de Villefort, Raschas, Roujanel, Saint-Margeurite et Malarce [U tot 42.91 Mm ³]).	100	154%
28	Massif central RMC	34	Orb	Vieussan	20.2	DREAL Languedoc-Rousillon	Y2554010	95	652578	1837103	2008	2010	3	Station située à l'aval de Vieussan, au lieu-dit Tombe, en aval de la confluence du Jaur.	Influence de l'usine de Montahut (19.8 m ³ /s) turbinant les eaux du Laouzas (T 44.1 Mm ³). Transfert de BV.	40	198%
29	Massif central Adour-Garonne	81	Thoré	Payrin-Augmontel	13.1	DREAL Midi-Pyrénées	O4384010	204	602858	1834949	2008	2010	3	Station située au pont de la N112, environ 1.5 km en aval de la confluence de l'Arn.	Influence de la chaîne d'aménagements sur l'Arn (Saint-Peyres [U 34.1 Mm ³], Sirous [U 0.23 Mm ³], dernière usine de Baous [13 m ³ /s])	40	305%
30	Massif central Adour-Garonne	81	Agout	Castres	17.9	DREAL Midi-Pyrénées	O4222520	164	593949	1845888	2002	2010	9	Station située à l'entrée de Castres, au lieu-dit Tutelle, en amont de la confluence du Thoré.	Influence de la chaîne d'aménagements sur l'Agout (La Raviège [U 42.95 Mm ³], Ponviel, Record et Luzières, dernière usine Carla 31.4 m ³ /s)	50	279%
31	Massif central Adour-Garonne	81	Agout	Saint-Lieux-lès-Lavaur	57	DREAL Midi-Pyrénées	O4802520	117	554298	1862241	2008	2010	3	Station située en amont de Saint-Lieux, au lieu-dit Le Port, soit environ 8 km en amont de la confluence avec le Tarn.	Influence des chaînes d'aménagements sur l'Arn (13 m ³ /s) et l'Agout (31.4 m ³ /s).	100	175%
32	Massif central Adour-Garonne	31	Tarn	Villemur-sur-Tarn	144.0	DREAL Midi-Pyrénées	O4931010	83	532342	1875790	2004	2010	7	Station située à l'aval de Villemur, au lieu-dit Derrocades (amont Montauban).	Influence des chaînes d'aménagements sur l'Arn (13 m ³ /s), sur l'Agout (31.4 m ³ /s) et sur le Tarn avec le Pinet, Le Truel, La Jourdanie, La Croux (U tot 13.2 Mm ³) et en dernier aménagement Rivières (U 19.4 Mm ³ , 165 m ³ /s) + influence du transfert depuis le BV du Viaur avec les eaux de Pont de Salars, Bage, Pareloup et Saint-Amans (U tot 189 Mm ³) turbinées à l'usine du Pouget (98.4 m ³ /s).	290	201%
33	Massif central Adour-Garonne	12	Viaur	Laguépie	15.0	DREAL Midi-Pyrénées	O5572910	146	570581	1904680	2008	2010	3	Station située en aval du pont de Saint-Martin-Laguépie, juste en amont de la confluence avec l'Aveyron.	Influence du barrage-usine de Thuriès (U 1.31 Mm ³ , 22 m ³ /s)	25	167%
34	Massif central Adour-Garonne	12	Lot	Enraygues Amont	33.7	DREAL Midi-Pyrénées	O7191510	228	619050	1959000	2008	2010	3	Station située en amont de la confluence de la Truyère, au lieu-dit Les Bouysses, environ 4 km en aval de l'usine de Golin hac	Influence de l'aménagement de Golin hac (U 4.3 Mm ³ , 86.2 m ³ /s), lui-même sous influence de l'aménagement de Castenau-Lassouts (20.2 Mm ³ , 97.2 m ³ /s)	100	297%
35	Massif central Adour-Garonne	12	Lot	Enraygues Roquepailhol	103.2	DREAL Midi-Pyrénées	O7701540	217	615870	1960640	2004	2010	7	Station située environ 2.5 km en aval de la confluence de la Truyère.	Influence cumulée de la chaîne d'aménagements sur le Lot (U tot 24.5 Mm ³ , dernière usine Golin hac 86.2 m ³ /s), et de la chaîne d'aménagement sur la Truyère (Grandval, Lanau, Sarrans, La Barthe, Monnes, L'Etang, Le Goul, Couesue, Maury et Cambeyrac, U tot 596 Mm ³ , avant-dernière usine Couesque 270 m ³ /s, dernière usine Cambeyrac 220 m ³ /s)	370	359%
37	Massif central Adour-Garonne	46	Lot	Faycelles	115.0	DREAL Midi-Pyrénées	O7971510	157	574488	1950673	2008	2010	3	Station située au niveau du seuil du lieu-dit Rocaval.		400	348%
38	Massif central Adour-Garonne	46	Lot	Cahors Lacombe	145.0	DREAL Midi-Pyrénées	O8231530	125	530319	1941504	2005	2010	6	Station située au niveau du seuil du lieu-dit Artix, à l'amont de Cahors.		450	310%

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)		Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
39	Massif central Adour-Garonne	46	Cère	Biars-sur-cère	25.9	SPC Dordogne	P1962910	133	560630	1990725	2000	2010	11	Station située au niveau du pont de Bretenoux (D803)	Influence de la chaîne d'aménagement sur la Cère, avec Saint-Etienne de Cantalès (U 100.6 Mm ³), Nepes (U 1.08 Mm ³), Candes (U 1.49 Mm ³) dont les éclusées sont restituées aux usines Laval de Cère I et II (36 et 43.9 m ³ /s) et le dernier aménagement Brugale (U 0.64 Mm ³ , 52.5 m ³ /s)	75	290%
40	Massif central Adour-Garonne	19	Maronne	Basteyroux	20.1	SPC Dordogne	P1592510	178	569222	2009247	1995	2010	16	Station située au niveau du pont de Basteyroux (D33).	Influence de la chaîne d'aménagements sur la Maronne, avec Enchanet (U 75.95 Mm ³), Gour Noir (U 4.58 Mm ³) et Hautefage (U 12.06 Mm ³ , 46 m ³ /s)	60	299%
41	Massif central Adour-Garonne	63	Dordogne	Saint-Sauves	3.6	DREAL Auvergne	P0010010	780	627370	2067090	2004	2010	7	Station située en aval du Pont de Saint-Sauves.	Influence de l'aménagement de la Bourboule (U 0.15 Mm ³ , 4 m ³ /s) et de l'usine de Saint-Sauves (4 m ³ /s). Hydrologie influencée au-delà du débit d'équipement ? (gestion des ouvrages évacuateurs ?, artefact de la station ?).	10	281%
42	Massif central Adour-Garonne	19	Dordogne	Argentat (≤ 2001) Argentat Croisy (≥ 2002)	106	SPC Dordogne	P1350010 P1350020	173	568971	2010283	2000	2010	11	Station située en amont du vieux pont d'Argentat	Influence de la chaîne d'aménagement sur la Dordogne, avec Bord-les-Orgues, Vaussaire, les Chaumettes, Triouzoune, Marèges, l'Aigle, Marillac, Chastang (U tot = 815 Mm ³) et dernier aménagement Argentat (U 5.58 Mm ³ , 340 m ³ /s).	400	377%
43	Massif central Adour-Garonne	19	Dordogne	Brivezac	131.0	SPC Dordogne	P1630010	144	561919	2001170	2000	2010	11	Station située en aval de Brivezac, au niveau du lieu-dit la Gendrie.	Influence des chaînes d'aménagements sur la Dordogne (340 m ³ /s) et la Maronne (46 m ³ /s)	480	366%
44	Massif central Adour-Garonne	46	Dordogne	Carennac	170	SPC Dordogne	P2070025	119	553138	1990117	2003	2010	8	Station située en amont de l'île de la Prade, à l'amont immédiat du seuil de Carennac, en aval de la confluence de la Cère et de la Bave.	Influence des chaînes d'aménagements sur la Dordogne (340 m ³ /s), la Maronne (46 m ³ /s) et la Cère (52.5 m ³ /s).	550	324%
45	Massif central Adour-Garonne	24	Dordogne	Cénac	189.0	SPC Dordogne	P2380010	65	510383	1978920	2003	2010	8	Station située au niveau du pont de Cénac (au niveau de Domme), et donc en amont de la confluence de la Vézère.		600	317%
46	Massif central Adour-Garonne	19	Vézère	Uzerche	15.1	SPC Dordogne	P3131020	286	539671	2047787	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de la D920, en aval de la confluence du Bradascou.	Influence des aménagements en chaîne de Monceaux-la virole (U 19.2 Mm ³ , 15.8 m ³ /s), de Treignac (U 6.84 Mm ³ , 27.3 m ³ /s) et de Peyrissac (U ? Mm ³ , 15 m ³ /s).	40	265%
47	Massif central Adour-Garonne	19	Vézère	Saint-Viance	19.1	SPC Dordogne	P3201020	102	530439	2024541	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de Saint-Viance (amont confluence de la Corrèze)	Influence de la chaîne d'aménagements amont (Monceaux, Peyrissac, Treignac) et de l'aménagement du Saillant (U 0.37 Mm ³ , 41.5 m ³ /s).	60	314%
48	Massif central Adour-Garonne	19	Vézère	Larche	48.9	SPC Dordogne	P4001010	90	527563	2014059	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de Larche, environ 8 km en aval de la confluence de la Corrèze.	Influence de la chaîne d'aménagements sur la Vézère, et de l'aménagement de Bar sur la Corrèze.	100	204%
49	Massif central Adour-Garonne	19	Corrèze	Tulle	10.4	SPC Dordogne	P3502510	214	556281	2030679	2002	2010	8	Station située à l'amont de Tulle, au niveau de la gendarmerie.	Influence de l'aménagement de Bar (U ? Mm ³ , ? m ³ /s), située environ 10 km en amont du Tulle.	20	192%
50	Massif central Adour-Garonne	19	Corrèze	Brive	21.2	SPC Dordogne	P3922510	100	534362	2018307	2002	2010	9	Station située à la sortie de Brive, environ 1.5 km en amont de la confluence avec la Vézère.	Année 2008 incomplète à la station de Tulle	30	142%

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)			Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
51	Massif central Loire-Bretagne	87	Taurion	Saint-Priest-Taurion	19.0	DREAL Limousin	L0321510	237	528273	2101145	2008	2010	3	Station située juste à l'aval de la centrale de Chauvant.	Influence de la chaîne d'aménagements sur le Taurion, avec La Roche Talamie (U 7.99 Mm ³ , 27.5 m ³ /s), l'Étroit (U 1.37 Mm ³ , 25 m ³ /s), Saint-Marc (U 11.68 Mm ³ , 53 m ³ /s) et Chauvan (U ? Mm ³ , 28 m ³ /s).	65	342%	
52	Massif central Loire-Bretagne	87	Vienne	Saint-Priest-Taurion	23.6	DREAL Limousin	L0140610	238	527528	2098730	2002	2010	9	Station située en amont du pont de Saint-Priest.	Influence de la chaîne d'aménagements sur la Maulde, avec Lavaud Gelade, Chammet, Faux la Montagne, Vassivière, Mont-Larron (U tot 113 Mm ³), Martinex, Fleix, Bujaleuf, Langleret, Villejoubert (U tot 0.91 Mm ³) et le dernier aménagement Laritge (U 0.58 Mm ³ , 22.5 m ³ /s).	50	212%	
53	Massif central Loire-Bretagne	87	Vienne	Palais-sur-Vienne	43.9	DREAL Limousin	L0400610	226	521546	2096055	2008	2010	3	Station située au pont de la D440, environ 4,5 km en aval de la confluence du Taurion.	Influence des chaînes d'aménagements sur le Taurion (28 voire 53 m ³ /s), et sur la Maulde (22.5 m ³ /s).	130	296%	
54	Massif central Loire-Bretagne	87	Vienne	Verneuil-sur-Vienne	60.2	DREAL Limousin	L0700610	187	503827	2094234	2008	2010	3	Station située au niveau du pont de la Gabie (D47)		160	266%	
55	Massif central Loire-Bretagne	23	Creuse	Aubusson	7.83	DREAL Limousin	L4100710	438	587344	2105580	2010	2010	1	Station située au niveau du pont de la Croix Blanche, à l'entrée d'Aubusson (à l'amont de la confluence de la Beauze), environ 4 km en aval de l'usine de Confolens.	Influence de l'aménagement de Confolens (barrage des Combes, U 3.55 Mm ³ , 8 m ³ /s)	20	255%	
56	Massif central Loire-Bretagne	23	Creuse	Glenic	12.7	DREAL Limousin	L4210710	310	567782	2136053	2001	2010	10	Station située au niveau du pont de la D940, en amont du barrage de Champsanglard.	Influence de l'aménagement de Confolens (barrage des Combes, U 3.55 Mm ³ , 8 m ³ /s), puis du barrage-usine de Chantegrêlle (U ? Mm ³ , ? m ³ /s)	25	197%	
57	Massif central Loire-Bretagne	23	Creuse	Fresselines	16.0	DREAL Limousin	L4220710	212	549424	2153359	2002	2010	9	Station située au pont de la D44, en amont de la retenue d'Eguzon.	Influence des aménagements amont (Confolens, Chantegrêlle) et de la chaîne de 3 barrage-usines de Champsanglard (U 1.48 Mm ³ , 45 m ³ /s), des Chezelles (U 0.27 Mm ³ , 45 m ³ /s) et de l'Age (U 0.93 Mm ³ , 45 m ³ /s).	50	313%	
59	Massif central Loire-Bretagne	36	Creuse	Ciron	35.9	SHPC Vienne-Thouet	L4710710	90	519812	2181921	2000	2010	11	Station située en amont de Ciron, au niveau du lieu-dit Scoury (en aval de la confluence Bouzanne).	Influence des aménagements en chaîne d'Eguzon (U 22.1 Mm ³ , 168 m ³ /s), Roche-au-Moine (U 2.07 Mm ³ , 75 m ³ /s) et Roche-Bat-l'Aigue (U 0.36 Mm ³ , 75 m ³ /s).	140	390%	
60	Massif central Loire-Bretagne	3	Cher	Saint-Victor	16.5	DREAL Centre	K5220910	193	620546	2154900	2001 puis 2004 à 2007		5	Station située au niveau du pont de la D302, en aval de Montluçon. Station arrêtée courant 2008 pour les débits.	Influence de l'usine de Teillet-Argenty (50.4 m ³ /s) turbinant l'eau du barrage de Rochebut (U 21.7 Mm ³), puis du barrage-usine du Prat (U 1.54 Mm ³ , 37.5 m ³ /s)	60	364%	
61	Massif central Loire-Bretagne	18	Cher	Saint-Amand-Montrond	29.3	DREAL Centre	K5400920	155	611783	2191802	2010	2010	1	Station située en amont du pont de la D951 et de la confluence de la Marmande. Station arrêtée pour les débits après mi-2008.	Année 2008 à l'hydrologie peu perturbée (classe 0) et année 2009 incomplète	80	273%	
62	Massif central Loire-Bretagne	63	Allier	Prades	20.8	DREAL Centre	K2240820	540	699140	2003968	2004	2010	7	Station située en aval du pont de Prades et en amont de la confluence de la Seuge	Influence de l'usine de Monistrol turbinant depuis le barrage de Poutès sur l'Allier (U 2.33 Mm ³ , 28 m ³ /s) et depuis le barrage du Pouzas et le barrage de La Valette sur l'Ance du Sud (10 m ³ /s).	50	240%	
63	Massif central Loire-Bretagne	43	Allier	Langeac	22.6	DREAL Centre	K2300810	495	690840	2013574	2008	2010	3	Station située au niveau du pont de Costet (D56), en aval de Langeac et de la microcentrale.		55	243%	

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)			Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)	Q max (m ³ /s et % du module)	
64	Massif central Loire-Bretagne	63	Sioule	Chateaufeuf-les-Bains	17.3	DREAL Auvergne	K3302010	600	643734	2114538	2000	2010	11	Station située au niveau du pont du lieu-dit Lachause.	Influence de l'aménagement des Fades-Besserve (U 67 Mm ³ , 48.7 m ³ /s), puis du barrage-usine de Queille (U 3.87 Mm ³ , 44.8 m ³ /s)	55	318%
65	Massif central Loire-Bretagne	3	Sioule	Ebreuil	20.9	DREAL Auvergne	K3322010	308	658579	2124295	2008	2010	3	Station située en aval du pont d'Ebreuil.		60	287%
67	Massif central Loire-Bretagne	43	Loire	Bas-en-Basset	38.0	DREAL Centre	K0550010	450	739757	2034330	2008	2010	3	Station située au niveau du pont de Gourdon, juste à l'aval de la confluence de l'Ance du Nord.	Influence de l'usine de L'Ance du Nord (12.5 m ³ /s) turbinant l'eau depuis le barrage de Passouira (U 0.32 Mm ³) sur l'Ance du Nord, et de la chaîne d'usines sur le Lignon du Sud depuis le barrage de Lavalette (T 40 Mm ³) : Versilhac (18 m ³ /s), Vendets (6.2 m ³ /s), Pont du Lignon I et II (6.9 et 11.5 m ³ /s)	80	211%
68	Massif central Loire-Bretagne	42	Loire	Feurs	44.9	DREAL Centre	K0700010	330	745718	2084518	2008	2010	3	Station située en aval du barrage de Feurs	Influence de l'aménagement de Grangent (U 46 Mm ³ , 86 m ³ /s)	100	223%
69	Massif central Loire-Bretagne	42	Loire	Villerest	67.5	DREAL Centre	K0910010	275	732250	2113011	2008	2010	3	Station située à l'aval de Villerest, au niveau du lieu-dit Vernay	Influence de l'aménagement de Villerest (U 128 Mm ³ , 150 m ³ /s)	160	237%
70	Massif central Loire-Bretagne	71	Loire	Digoin	88.8	DREAL Centre	K1180010	227	726418	2165557	2008	2010	3	Station située au niveau du pont-canal.		200	225%
71	Jura RMC	25	Doubs	Fournet-Blancheroche	20.2	DREAL Franche-Comté	U2112010	616	941581	2249221	2001	2010	10	Station située au niveau des seuils de La Rasse, juste en amont de la retenue du Refrain.	Influence de l'aménagement du Chatelôt (U 16 Mm ³ , 50 m ³ /s)	60	297%
72	Jura RMC	25	Doubs	Goumois	29.4	DREAL Franche-Comté	U2122010	487	948907	2262673	2000	2010	11	Station située en aval de Goumois, au niveau du lieu-dit La Forge.	Influence des aménagements du Chatelôt (U 16 Mm ³ , 50 m ³ /s), du Refrain (U 1.2 Mm ³ , 23 m ³ /s) et de la Goule (18 m ³ /s)	70	238%
73	Jura RMC	25	Doubs	Glère	34.1	DREAL Franche-Comté	U2142010	410	954131	2271037	2000	2010	11	Station située en amont de Glère, au niveau du lieu-dit Courvalon (à l'amont des barrages de Vaufrey et Gros Bois).		80	235%
74	Jura RMC	1	Ain	Pont-d'Ain	105.0	DREAL Rhône-Alpes	V2712010	235	832120	2120747	2000	2010	11	Station située au niveau même de Pont-d'Ain (en aval de la microcentrale)	Influence de la chaîne d'aménagements sur l'Ain, avec en tête le barrage de Vouglans (419.5 Mm ³ , 353 m ³ /s), puis les barrages de Saut-Mortier, Coiselet, Moux-Charmine, Ciez-Bolozon (U tot 12.7 Mm ³), et le dernier aménagement de l'Allement (U 2 Mm ³ , 220 m ³ /s).	360	343%
75	Jura RMC	1	Ain	Chasey-sur-Ain	123.0	DREAL Rhône-Alpes	V2942010	201	824776	2104822	2000	2010	11	Station située au niveau du Pont de Chazey.		400	325%

N	Massif Bassin	Dép	Cours d'eau	Nom Station	Mod (m ³ /s)	Producteur de données	Code	Altitude	Coordonnées Lambert II		Période analysée (début - fin - durée)			Commentaire	Aménagements influençant l'hydrologie (U et T : capacité utile et Totale des retenues)		Q max (m ³ /s et % du module)	
76	Alpes RMC	1	Rhône	Surjoux	384.0	DREAL Rhône-Alpes	V1020020	284	868970	2119350	2001	2010	10	Station située au niveau du pont de Surjoux, environ 3 km en aval de Genissiat.	Influence de l'aménagement de Genissiat (T 56 Mm ³ , 750 m ³ /s)	800	208%	
77	Alpes RMC	73	Isère	Moutiers	27.5	DREAL Rhône-Alpes	W0110010	474	927808	2062483	2004	2010	7	Station située dans Moutiers, 500 m en amont de la confluence des Dorons.	Influence des aménagements de la haute Isère : barrage de Tignes (U 223.8 Mm ³) avec notamment les usines de Brevières (52 m ³ /s) et Malgovert (50.7 m ³ /s). Eclusées retranscrites par les centrales de Plombières (24 m ³ /s) et Moutiers (23.7 m ³ /s)	75	273%	
78	Alpes RMC	73	Isère	Montmélian	121.0	DREAL Rhône-Alpes	W1110010	264	890689	2061978	2004	2010	7	Station située au niveau du pont de Montmélian	Influence des aménagement de la haute Isère (Tignes-Malgovert [U 223.8 Mm ³ , 50.7 m ³ /s]), sur l'Arly et le Doron de Beaufort (barrages de La Girotte, de La Gittaz, de Roselend et de Saint-Guerin [U tot 256 Mm ³] dont les éclusées sont restituées aux usines de La Bathie [55.6 m ³ /s] et Venton [13.2 m ³ /s]), et sur l'Arc (barrages de Plan d'Amont, Plan d'Aval, Mont Cenis et Bissorte [U tot 366 Mm ³]).	250	207%	
79	Alpes RMC	38	Isère	Grenoble	179.0	DREAL Rhône-Alpes	W1410010	207	866186	2027160	2008	2010	3	Station située dans Grenoble, en amont de la confluence du Drac.		350	196%	
80	Alpes RMC	5	Durance	Argentière-la-Bessée	27.5	DREAL PACA	X0130010	950	934251	1984067	2008	2010	3	Station située en aval d'Argentière, au pont de la D104, environ 1 km en aval de l'usine de l'Argentière.	Influence de l'usine d'Argentière (25 m ³ /s) turbinant l'eau de la Durance dérivée plus en amont, ainsi que l'eau dérivé sur la Gyronde et de l'usine du Fournel (2.5 m ³ /s) sur le torrent de Fournel.	75	273%	
81	Alpes RMC	6	Siagne	Pégomas	8.7	DIREN PACA	Y5534030	10	971079	1853909	2008	2010	3	Fleuve côtier se jetant à l'ouest de Cannes, station située au pont de la D109	Influence du barrage de Saint-Cassien (U 29 Mm ³), situé sur le Biançon, mais également alimenté par dérivation de l'eau de la Siagne, dont l'eau est turbinée à l'usine de Saint-Cassien (20 m ³ /s)	34	391%	
82	Corse RMC	2B	Golo	Volpajola	14.4	DIREN Corse	Y7212010	80	1178980	1748430	2006	2010	5	Station située au lieu-dit Barchetta, au pont de la D15. Apport de la Casaluna et de l'Asco entre l'usine de Castirla et la station.	Influence du barrage de Callacuccia (25 Mm ³) dont l'eau est turbinée à l'usine de Corsica (12.45 m ³ /s), reprise au barrage de Corsica (U 0.08 Mm ³) pour être turbinée à l'usine de Castirla (long TCC ; 11.65 m ³ /s).	30	208%	
84	Yonne Seine-Normandie	89	Cure	Foissy-lès-Vézelay	9.0	DREAL Bourgogne	H2142030	148	708814	2272602	2008	2010	3	Affluent RD de l'Yonne, confluent en amont d'Auxerre ; station située au pont de la D53.	Influence du barrage-usine de Malassis (26 m ³ /s), démodulant les éclusées de l'usine de Bois-de-Cure (33 m ³ /s) qui turbine l'eau stockée dans le barrage du Crescent (U 9.22 Mm ³)	35	388%	
85	Normandie Seine-Normandie	50	Sélune	Saint-Aubin-de-Terregatte	9.0	DIREN Basse-Normandie	I9221020	11	332290	2405912	2008	2010	3	Fleuve côtier normand, station située au pont de la D178, 3-4 km en aval du barrage de La Roche-qui-Boit	Influence des aménagement de Vezins (U 7.5 Mm ³ , 54 m ³ /s) et de La Roche-qui-Boit (22.5 m ³ /s).	36	400%	

8.5. Annexe 5 : Tableau récapitulatif des classements par expertise et des reclassements par l'analyse discriminante

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	BampI190	Bgrad90	Hausse	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*BampI190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1ere Classe	2nde Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2nde classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
1	2000	3	430	0.199	0.701	0.223	90	1.222	520	2.72	1.71	0.90	0.52	335.7	350.3	354.2	353.7	344.1	354.2	353.7	3	4	3+	OK	
1	2001	2	262	0.195	0.612	0.211	48	0.894	310	2.49	1.72	0.85	0.47	303.4	312.7	312.7	308.7	294.5	312.7	312.7	2	3	2+	OK	
1	2002	3	339	0.225	0.620	0.207	75	1.913	414	2.62	1.66	0.86	0.60	314.9	326.6	328.4	326.3	313.7	328.4	326.6	3	2	3-	OK	
1	2003	3	334	0.283	0.690	0.256	80	1.325	414	2.62	1.56	0.90	0.56	315.7	327.8	330.3	328.1	315.5	330.3	328.1	3	4	3+	OK	
1	2004	3	332	0.273	0.669	0.257	49	1.445	381	2.58	1.58	0.89	0.57	310.9	322.2	324.1	321.5	308.2	324.1	322.2	3	2	3-	OK	
1	2005	2	258	0.230	0.602	0.149	32	0.848	290	2.46	1.65	0.85	0.41	294.3	302.2	301.5	296.4	280.6	302.2	301.5	2	3	2+	OK	
1	2006	2	282	0.227	0.528	0.175	25	0.585	307	2.49	1.65	0.80	0.39	288.1	295.0	293.3	287.6	270.7	295.0	293.3	2	3	2+	OK	
1	2007	2	268	0.156	0.575	0.166	35	0.698	303	2.48	1.81	0.83	0.40	303.3	312.1	311.2	307.0	292.8	312.1	311.2	2	3	2+	OK	
1	2008	2	237	0.156	0.689	0.213	32	0.544	269	2.43	1.81	0.90	0.42	310.4	320.4	320.6	317.0	304.1	320.6	320.4	3	2	3-	Non	Oui
1	2009	2	150	0.159	0.515	0.280	44	0.726	194	2.29	1.81	0.79	0.49	276.8	281.6	277.9	271.4	253.6	281.6	277.9	2	3	2+	OK	
2	2004	3	367	0.312	0.443	0.386	343	0.818	710	2.85	1.52	0.73	0.57	307.5	318.4	319.8	317.2	302.5	319.8	318.4	3	2	3-	OK	
2	2005	2	284	0.331	0.409	0.153	176	0.235	460	2.66	1.49	0.71	0.30	278.5	284.1	281.9	275.2	255.8	284.1	281.9	2	3	2+	OK	
2	2006	2	332	0.298	0.367	0.196	251	0.236	583	2.77	1.54	0.67	0.35	285.4	292.1	290.4	284.7	266.2	292.1	290.4	2	3	2+	OK	
2	2007	2	402	0.273	0.351	0.176	336	0.232	738	2.87	1.58	0.65	0.32	295.0	303.0	302.1	297.3	280.1	303.0	302.1	2	3	2+	OK	
2	2008	2	215	0.333	0.415	0.160	153	0.259	368	2.57	1.49	0.71	0.31	269.5	273.8	270.6	263.0	242.5	273.8	270.6	2	3	2+	OK	
2	2009	2	140	0.369	0.416	0.380	133	0.726	273	2.44	1.45	0.71	0.56	256.7	259.8	255.8	248.0	226.2	259.8	256.7	2	1	2-	OK	
3	2004	1	84	0.285	0.274	0.041	18	0.164	102	2.01	1.56	0.57	0.14	189.5	180.3	167.0	150.7	118.6	189.5	180.3	1	2	1	OK	
3	2005	1	89	0.355	0.465	0.039	20	0.226	109	2.04	1.46	0.75	0.15	219.4	215.4	206.5	193.0	165.7	219.4	215.4	1	2	1	OK	
3	2006	1	54	0.325	0.414	0.041	11	0.165	65	1.81	1.50	0.71	0.14	191.2	182.5	170.1	153.6	122.5	191.2	182.5	1	2	1	OK	
3	2007	1	43	0.322	0.429	0.032	8	0.124	51	1.71	1.51	0.72	0.06	182.3	171.9	158.4	140.6	108.2	182.3	171.9	1	2	1	OK	
3	2008	1	34	0.489	0.605	0.036	6	0.178	40	1.60	1.33	0.85	0.07	183.4	173.9	162.0	144.1	112.2	183.4	173.9	1	2	1	OK	
3	2009	1	23	0.405	0.458	0.064	13	0.277	36	1.56	1.41	0.75	0.20	166.7	154.6	140.2	121.4	87.1	166.7	154.6	1	2	1	OK	
4	2004	3	523	0.286	0.437	0.191	433	0.357	956	2.98	1.56	0.73	0.36	319.5	331.7	333.8	331.6	318.1	333.8	331.7	3	2	3-	OK	
4	2005	3	455	0.323	0.472	0.161	307	0.327	762	2.88	1.50	0.76	0.33	310.9	321.8	323.4	320.1	305.4	323.4	321.8	3	2	3-	OK	
4	2006	3	502	0.264	0.364	0.128	331	0.252	833	2.92	1.59	0.67	0.28	303.0	312.1	311.9	307.7	291.6	312.1	311.9	2	3	2+	Non	Oui
4	2007	3	480	0.272	0.416	0.128	337	0.242	817	2.91	1.58	0.71	0.27	309.6	319.9	320.6	317.0	302.0	320.6	319.9	3	2	3-	OK	
4	2008	2	376	0.315	0.365	0.104	217	0.227	593	2.77	1.52	0.67	0.24	283.1	289.3	287.2	280.9	261.9	289.3	287.2	2	3	2+	OK	
4	2009	2	255	0.334	0.369	0.097	80	0.218	335	2.53	1.49	0.67	0.23	256.8	258.8	253.9	244.8	222.3	258.8	256.8	2	1	2-	OK	
4	2010	2	403	0.375	0.446	0.131	214	0.356	617	2.79	1.44	0.74	0.30	293.7	302.0	301.9	296.8	279.5	302.0	301.9	2	3	2+	OK	
5	2004	2	167	0.288	0.453	0.173	99	0.297	266	2.42	1.55	0.74	0.33	264.8	268.2	264.2	256.1	235.4	268.2	264.8	2	1	2-	OK	
5	2005	2	185	0.341	0.410	0.252	116	0.286	301	2.48	1.48	0.71	0.41	260.3	263.4	259.4	251.3	229.7	263.4	260.3	2	1	2-	OK	
5	2006	2	174	0.305	0.358	0.140	98	0.276	272	2.43	1.53	0.66	0.30	248.9	249.7	243.8	234.1	210.7	249.7	248.9	2	1	2-	OK	
5	2007	1	103	0.340	0.371	0.173	65	0.389	168	2.23	1.48	0.67	0.35	227.7	225.4	217.5	205.9	179.7	227.7	225.4	1	2	1	OK	
5	2008	1	92	0.337	0.373	0.148	42	0.317	134	2.13	1.49	0.68	0.31	217.9	214.0	204.9	192.0	164.5	217.9	214.0	1	2	1	OK	
5	2009	2	210	0.266	0.379	0.668	196	0.576	406	2.61	1.59	0.68	0.69	278.6	284.9	282.7	277.7	259.3	284.9	282.7	2	3	2+	OK	
5	2010	2	328	0.302	0.441	0.839	321	0.733	649	2.81	1.53	0.73	0.77	306.5	317.8	319.3	317.5	303.1	319.3	317.8	3	2	3-	Non	Oui

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi190	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Ba mpi190)	Log(1+5*Bgr ad90+Hgrad 90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
6	2004	2	275	0.312	0.583	0.233	0	0.000	275	2.44	1.52	0.83	0.34	280.9	286.9	285.3	278.6	260.5	286.9	285.3	2	3	2+	OK	
6	2005	2	390	0.238	0.516	0.281	0	0.000	390	2.59	1.63	0.79	0.38	295.8	304.0	303.2	298.4	282.3	304.0	303.2	2	3	2+	OK	
6	2006	2	335	0.273	0.563	0.295	0	0.000	335	2.53	1.58	0.82	0.39	291.4	299.1	298.3	293.0	276.4	299.1	298.3	2	3	2+	OK	
6	2007	2	313	0.288	0.477	0.269	0	0.000	313	2.50	1.55	0.76	0.37	275.7	280.9	278.3	271.4	252.3	280.9	278.3	2	3	2+	OK	
6	2008	2	408	0.297	0.445	0.233	0	0.000	408	2.61	1.54	0.74	0.34	281.8	287.9	285.9	279.7	261.1	287.9	285.9	2	3	2+	OK	
6	2009	2	290	0.334	0.511	0.366	3	1.554	293	2.47	1.49	0.79	0.45	274.5	280.0	277.8	271.2	252.1	280.0	277.8	2	3	2+	OK	
6	2010	2	285	0.416	0.494	0.364	15	1.144	300	2.48	1.40	0.77	0.60	269.4	274.8	272.8	266.3	246.5	274.8	272.8	2	3	2+	OK	
7	2008	1	64	0.294	0.302	0.125	0	0.000	64	1.81	1.54	0.60	0.21	174.6	163.2	148.5	130.9	97.2	174.6	163.2	1	2	1	OK	
7	2009	1	47	0.478	0.357	0.121	0	0.000	47	1.67	1.34	0.66	0.21	158.5	145.3	130.1	110.8	74.7	158.5	145.3	1	2	1	OK	
7	2010	1	73	0.487	0.352	0.125	0	0.000	73	1.86	1.33	0.65	0.21	176.6	166.3	153.2	135.8	102.1	176.6	166.3	1	2	1	OK	
8	2000	5	1511	0.262	0.626	0.569	869	1.571	2380	3.38	1.59	0.86	0.73	390.4	414.8	425.7	432.1	429.6	432.1	429.6	4	5	4+	Non	Oui
8	2001	5	1455	0.252	0.743	0.720	843	1.529	2298	3.36	1.61	0.93	0.79	402.3	428.7	441.1	448.8	448.4	448.8	448.4	4	5	4+	Non	Oui
8	2002	5	1288	0.277	0.848	0.863	644	3.319	1932	3.29	1.57	0.98	0.94	403.2	430.2	443.4	451.7	451.9	451.9	451.7	5	4	5	OK	
8	2003	5	1415	0.296	0.820	1.474	1002	3.733	2417	3.38	1.54	0.96	1.08	410.8	439.5	453.9	463.6	465.0	465.0	463.6	5	4	5	OK	
8	2004	5	1150	0.232	0.800	0.640	672	1.172	1822	3.26	1.64	0.95	0.73	398.7	424.2	436.0	443.0	442.2	443.0	442.2	4	5	4+	Non	Oui
8	2005	5	1063	0.272	1.156	0.786	667	1.369	1730	3.24	1.58	1.10	0.80	419.4	448.7	463.8	472.8	475.6	475.6	472.8	5	4	5	OK	
8	2006	5	1128	0.281	1.163	0.785	638	1.354	1766	3.25	1.56	1.10	0.80	419.9	449.3	464.5	473.6	476.4	476.4	473.6	5	4	5	OK	
8	2007	5	1380	0.286	0.813	0.749	883	1.181	2263	3.35	1.56	0.96	0.77	404.4	431.3	444.4	452.1	452.0	452.1	452.0	4	5	4+	Non	Oui
8	2008	5	1056	0.305	1.111	0.783	623	1.423	1679	3.23	1.53	1.08	0.80	412.2	440.6	455.1	463.4	465.1	465.1	463.4	5	4	5	OK	
8	2009	5	1171	0.331	1.300	0.919	813	1.478	1984	3.30	1.49	1.15	0.85	429.5	460.8	477.8	488.0	492.3	492.3	488.0	5	4	5	OK	
8	2010	5	1649	0.329	1.034	0.844	1219	1.638	2868	3.46	1.50	1.05	0.84	429.1	460.3	476.9	487.3	491.0	491.0	487.3	5	4	5	OK	
9	2004	4	747	0.294	0.587	0.285	394	1.456	1141	3.06	1.54	0.84	0.59	348.8	366.4	372.6	374.1	365.5	374.1	372.6	4	3	4-	OK	
9	2005	4	811	0.375	0.725	0.390	503	1.117	1314	3.12	1.44	0.92	0.61	363.4	383.6	392.4	395.3	388.9	395.3	392.4	4	3	4-	OK	
9	2006	4	878	0.366	0.693	0.337	493	1.143	1371	3.14	1.45	0.90	0.58	362.4	382.4	390.9	393.7	387.0	393.7	390.9	4	3	4-	OK	
9	2007	4	802	0.321	0.611	0.417	390	0.813	1192	3.08	1.51	0.85	0.59	351.2	369.2	376.0	377.7	369.5	377.7	376.0	4	3	4-	OK	
9	2008	4	829	0.392	0.823	0.434	514	0.984	1343	3.13	1.42	0.97	0.62	372.2	394.0	404.0	407.8	402.8	407.8	404.0	4	3	4-	OK	
9	2009	4	824	0.405	0.882	0.477	772	1.139	1596	3.20	1.41	0.99	0.66	384.3	408.2	419.7	424.9	421.7	424.9	421.7	4	5	4+	OK	
9	2010	4	795	0.405	0.796	0.547	808	1.290	1603	3.20	1.41	0.95	0.70	377.8	400.8	411.6	416.4	412.2	416.4	412.2	4	5	4+	OK	
10	2004	4	615	0.296	0.563	0.286	492	0.473	1107	3.04	1.54	0.82	0.46	343.0	359.2	364.5	364.9	355.2	364.9	364.5	4	3	4-	OK	
10	2005	4	688	0.303	0.503	0.371	583	0.491	1271	3.10	1.53	0.78	0.52	341.6	357.8	363.1	363.7	353.7	363.7	363.1	4	3	4-	OK	
10	2006	4	768	0.308	0.527	0.325	703	0.427	1471	3.17	1.52	0.80	0.48	350.4	367.9	374.2	375.5	366.7	375.5	374.2	4	3	4-	OK	
10	2007	4	486	0.292	0.451	0.259	373	0.384	859	2.93	1.55	0.74	0.43	317.1	329.0	331.1	328.9	315.3	331.1	329.0	3	2	3-	Non	Non
10	2008	4	585	0.362	0.595	0.334	507	0.584	1092	3.04	1.46	0.84	0.51	341.5	357.9	363.7	364.2	354.3	364.2	363.7	4	3	4-	OK	
10	2009	4	737	0.400	0.584	0.365	606	0.519	1343	3.13	1.41	0.84	0.52	346.9	364.3	371.0	372.1	362.8	372.1	371.0	4	3	4-	OK	
10	2010	4	555	0.432	0.607	0.586	449	0.719	1004	3.00	1.38	0.85	0.67	336.4	352.7	358.6	359.2	348.8	359.2	358.6	4	3	4-	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bamp190	Bgrad90	Hausses	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log((1+10/Bq base10)	Log((1+10*Bamp190)	Log((1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{me} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
11	2004	1	96	0.362	0.408	0.080	31	0.212	127	2.10	1.46	0.71	0.21	217.9	213.7	204.8	191.4	163.7	217.9	213.7	1	2	1	OK	
11	2005	1	143	0.294	0.392	0.060	38	0.299	181	2.26	1.54	0.69	0.20	236.4	234.9	227.4	215.9	190.9	236.4	234.9	1	2	1	OK	
11	2006	1	115	0.259	0.363	0.079	36	0.243	151	2.18	1.60	0.67	0.21	227.1	223.9	215.0	202.6	176.4	227.1	223.9	1	2	1	OK	
11	2007	1	101	0.254	0.392	0.103	28	0.298	129	2.11	1.61	0.69	0.26	225.9	222.7	213.7	201.4	175.2	225.9	222.7	1	2	1	OK	
11	2008	1	186	0.366	0.392	0.109	31	0.261	217	2.34	1.45	0.69	0.26	239.4	238.8	232.3	221.4	196.6	239.4	238.8	1	2	1	OK	
11	2009	1	159	0.376	0.330	0.102	31	0.236	190	2.28	1.44	0.63	0.24	222.1	218.7	210.1	197.6	170.1	222.1	218.7	1	2	1	OK	
11	2010	1	155	0.374	0.369	0.083	39	1.493	194	2.29	1.44	0.67	0.46	232.6	231.5	224.5	213.9	188.5	232.6	231.5	1	2	1	OK	
12	2004	3	230	0.258	0.631	0.599	41	2.757	271	2.43	1.60	0.86	0.83	296.5	306.1	306.6	303.5	288.8	306.6	306.1	3	2	3-	OK	
12	2005	3	434	0.370	0.662	0.859	63	1.954	497	2.70	1.45	0.88	0.86	317.5	331.1	334.9	334.3	322.2	334.9	334.3	3	4	3+	OK	
12	2006	3	271	0.244	0.670	0.696	52	2.763	323	2.51	1.62	0.89	0.86	310.2	322.0	324.0	322.5	309.9	324.0	322.5	3	4	3+	OK	
12	2007	3	272	0.255	0.598	0.617	48	1.988	320	2.51	1.60	0.84	0.78	299.9	309.9	310.6	307.8	293.3	310.6	309.9	3	2	3-	OK	
12	2008	3	407	0.331	0.665	0.731	101	1.717	508	2.71	1.49	0.88	0.80	321.0	334.8	338.7	338.2	326.5	338.7	338.2	3	4	3+	OK	
13	2005	3	319	0.212	0.874	0.352	27	0.742	346	2.54	1.68	0.99	0.54	331.6	345.8	349.7	348.7	339.0	349.7	348.7	3	4	3+	OK	
13	2006	4	454	0.136	0.768	0.441	223	0.847	677	2.83	1.87	0.94	0.61	364.7	383.7	390.1	392.8	387.8	392.8	390.1	4	3	4-	OK	
13	2007	4	877	0.117	0.721	0.413	584	0.890	1461	3.16	1.94	0.91	0.60	398.2	422.2	431.9	438.1	437.5	438.1	437.5	4	5	4+	OK	
13	2008	4	613	0.168	0.929	0.530	245	1.592	858	2.93	1.78	1.01	0.72	384.5	407.2	416.8	421.9	420.0	421.9	420.0	4	5	4+	OK	
13	2009	4	537	0.172	0.820	0.604	243	1.599	780	2.89	1.77	0.96	0.75	371.1	391.8	399.8	403.8	399.9	403.8	399.9	4	5	4+	OK	
13	2010	4	604	0.214	0.840	0.720	313	1.522	917	2.96	1.68	0.97	0.79	374.7	396.4	405.4	410.0	406.4	410.0	406.4	4	5	4+	OK	
14	2004	2	141	0.187	0.329	0.224	83	1.185	224	2.35	1.74	0.63	0.52	250.8	251.6	245.0	236.4	214.0	251.6	250.8	2	1	2-	OK	
14	2005	2	183	0.144	0.306	0.913	141	1.176	324	2.51	1.85	0.61	0.83	273.3	278.2	273.9	269.0	250.4	278.2	273.9	2	3	2+	OK	
14	2006	2	191	0.177	0.307	0.658	166	0.754	357	2.55	1.76	0.61	0.70	270.7	275.2	270.9	265.2	245.8	275.2	270.9	2	3	2+	OK	
14	2007	2	188	0.177	0.320	0.274	151	0.658	339	2.53	1.76	0.62	0.48	268.3	271.8	266.9	259.9	239.8	271.8	268.3	2	1	2-	OK	
14	2008	2	274	0.207	0.296	0.247	197	0.439	471	2.67	1.69	0.60	0.43	273.5	277.9	273.8	267.3	247.5	277.9	273.8	2	3	2+	OK	
14	2009	2	255	0.248	0.360	0.320	239	0.659	494	2.69	1.62	0.66	0.51	283.7	290.3	288.1	282.9	264.8	290.3	288.1	2	3	2+	OK	
14	2010	3	346	0.236	0.391	0.567	390	0.863	736	2.87	1.64	0.69	0.67	309.8	320.8	321.8	319.9	305.8	321.8	320.8	3	2	3-	OK	
15	2004	4	726	0.186	0.360	0.853	783	1.155	1509	3.18	1.74	0.66	0.81	344.1	360.7	365.1	367.4	358.1	367.4	365.1	4	3	4-	OK	
15	2005	4	718	0.215	0.336	0.804	768	1.759	1486	3.17	1.68	0.64	0.83	335.8	351.3	355.1	356.7	346.1	356.7	355.1	4	3	4-	OK	
15	2006	4	795	0.199	0.329	0.678	887	0.875	1682	3.23	1.71	0.63	0.72	340.6	356.5	360.5	362.1	352.0	362.1	360.5	4	3	4-	OK	
15	2007	4	653	0.186	0.294	0.546	672	0.725	1325	3.12	1.74	0.60	0.65	324.2	337.2	338.9	338.6	326.0	338.9	338.6	3	4	3+	Non	Oui
15	2008	4	767	0.205	0.293	0.602	755	0.800	1522	3.18	1.70	0.59	0.68	328.0	341.8	344.2	344.5	332.4	344.5	344.2	4	3	4-	OK	
15	2009	4	863	0.196	0.351	0.648	918	0.942	1781	3.25	1.72	0.65	0.71	347.4	364.3	369.0	371.3	362.2	371.3	369.0	4	3	4-	OK	
15	2010	4	1556	0.208	0.318	0.661	1601	1.376	3157	3.50	1.69	0.62	0.75	365.5	385.5	392.4	396.9	390.0	396.9	392.4	4	3	4-	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi90	Bgrad90	HausSES	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
16	2004	3	366	0.287	0.647	0.740	293	1.475	659	2.82	1.55	0.87	0.79	334.2	349.9	354.9	355.6	345.8	355.6	354.9	4	3	4-	Non	Oui
16	2005	4	737	0.317	0.580	1.175	790	2.176	1527	3.18	1.51	0.83	0.96	363.3	384.2	392.9	397.5	391.5	397.5	392.9	4	3	4-	OK	
16	2006	3	323	0.230	0.573	0.816	507	0.988	830	2.92	1.65	0.83	0.78	341.8	358.4	363.5	365.0	356.2	365.0	363.5	4	3	4-	Non	Oui
16	2007	2	118	0.195	0.499	0.472	88	0.635	206	2.31	1.72	0.78	0.60	273.4	278.3	274.8	268.5	250.2	278.3	274.8	2	3	2+	OK	
16	2008	3	203	0.276	0.571	0.774	172	1.434	375	2.57	1.57	0.83	0.80	301.9	312.4	313.5	311.0	296.7	313.5	312.4	3	2	3-	OK	
16	2009	4	482	0.348	0.491	6.801	489	7.613	971	2.99	1.47	0.77	1.63	337.9	356.7	363.6	368.7	360.2	368.7	363.6	4	3	4-	OK	
16	2010	3	256	0.225	0.523	0.805	264	1.321	520	2.72	1.66	0.79	0.80	315.9	328.3	330.3	329.4	316.9	330.3	329.4	3	4	3+	OK	
17	2004	1	88	0.237	0.550	0.076	49	0.458	137	2.14	1.64	0.81	0.26	252.6	253.5	247.8	237.8	216.0	253.5	252.6	2	1	2-	Non	Oui
17	2005	2	135	0.280	0.624	0.107	71	0.283	206	2.31	1.57	0.86	0.26	274.7	279.4	276.7	268.9	250.1	279.4	276.7	2	3	2+	OK	
17	2006	1	78	0.226	0.522	0.125	59	0.249	137	2.14	1.65	0.79	0.27	250.4	251.0	244.8	234.7	212.6	251.0	250.4	2	1	2-	Non	Oui
17	2007	1	47	0.235	0.602	0.102	21	0.325	68	1.83	1.64	0.85	0.26	227.9	224.8	216.4	203.8	178.9	227.9	224.8	1	2	1	OK	
17	2008	1	44	0.360	0.579	0.173	48	0.823	92	1.96	1.46	0.83	0.43	229.4	227.7	220.7	209.2	184.3	229.4	227.7	1	2	1	OK	
17	2009	1	102	0.301	0.320	0.088	51	0.296	153	2.18	1.53	0.62	0.24	216.5	211.9	202.1	188.9	160.8	216.5	211.9	1	2	1	OK	
17	2010	2	127	0.283	0.483	0.091	74	0.253	201	2.30	1.56	0.77	0.23	255.9	257.5	252.4	242.9	220.9	257.5	255.9	2	1	2-	OK	
18	2009	1	50	0.456	0.381	0.198	1	1.599	51	1.71	1.36	0.68	0.30	168.5	157.0	143.1	125.1	90.7	168.5	157.0	1	2	1	OK	
19	2004	2	208	0.247	0.661	0.163	1	0.373	209	2.32	1.62	0.88	0.26	282.5	288.3	286.3	279.2	261.7	288.3	286.3	2	3	2+	OK	
19	2005	3	316	0.265	0.744	0.150	1	8.466	317	2.50	1.59	0.93	0.24	307.0	316.8	317.8	313.2	299.0	317.8	316.8	3	2	3-	OK	
19	2006	3	294	0.252	0.760	0.189	25	1.232	319	2.50	1.61	0.93	0.50	313.3	324.7	326.6	323.7	311.0	326.6	324.7	3	2	3-	OK	
19	2007	3	270	0.241	0.657	0.216	55	1.291	325	2.51	1.63	0.88	0.53	305.5	315.6	316.4	313.0	299.0	316.4	315.6	3	2	3-	OK	
19	2008	3	437	0.250	0.704	0.203	64	0.924	501	2.70	1.61	0.91	0.47	327.7	341.3	344.8	343.3	332.3	344.8	343.3	3	4	3+	OK	
19	2009	3	507	0.266	0.714	0.247	89	0.987	596	2.78	1.59	0.91	0.51	335.1	350.1	354.6	354.1	344.1	354.6	354.1	3	4	3+	OK	
19	2010	3	417	0.313	0.717	0.221	32	0.989	449	2.65	1.52	0.91	0.49	318.5	331.0	334.1	331.8	319.4	334.1	331.8	3	4	3+	OK	
21	2008	2	296	0.176	0.420	0.057	14	0.228	310	2.49	1.76	0.72	0.18	277.9	282.1	278.1	270.6	251.7	282.1	278.1	2	3	2+	OK	
21	2009	2	247	0.211	0.384	0.058	4	0.339	251	2.40	1.69	0.68	0.11	257.2	258.2	252.1	242.3	220.1	258.2	257.2	2	1	2-	OK	
21	2010	2	262	0.257	0.427	0.062	2	0.774	264	2.42	1.60	0.72	0.12	261.2	263.2	258.1	248.7	227.1	263.2	261.2	2	1	2-	OK	
22	2009	4	129	0.184	2.298	0.576	2	1.786	131	2.12	1.74	1.38	0.59	364.1	383.5	391.9	393.3	390.5	393.3	391.9	4	3	4-	OK	
22	2010	4	104	0.193	2.064	0.478	0	0.000	104	2.02	1.72	1.34	0.53	344.0	360.1	366.1	365.3	359.4	366.1	365.3	3	4	3+	Non	Oui
23	2008	3	460	0.125	0.631	0.364	21	1.293	481	2.68	1.91	0.86	0.61	338.4	353.0	356.0	356.2	347.5	356.2	356.0	4	3	4-	Non	Oui
23	2009	3	317	0.289	0.763	0.309	0	0.000	317	2.50	1.55	0.94	0.41	308.4	319.0	320.6	316.8	303.2	320.6	319.0	3	2	3-	OK	
23	2010	2	154	0.222	0.654	0.212	0	0.000	154	2.19	1.66	0.88	0.31	271.7	275.7	272.3	264.3	245.6	275.7	272.3	2	3	2+	OK	
24	2008	1	214	0.248	0.413	0.096	13	0.675	227	2.36	1.62	0.71	0.33	255.8	257.5	252.1	243.1	221.2	257.5	255.8	2	1	2-	Non	Oui
24	2009	1	120	0.304	0.358	0.089	0	0.000	120	2.08	1.53	0.66	0.16	211.2	205.6	195.2	181.0	152.4	211.2	205.6	1	2	1	OK	
24	2010	1	139	0.289	0.318	0.075	0	0.000	139	2.14	1.55	0.62	0.14	211.6	205.9	195.3	181.1	152.3	211.6	205.9	1	2	1	OK	
25	2008	4	491	0.271	0.987	0.990	207	3.818	698	2.84	1.58	1.04	0.99	370.2	392.1	401.8	406.7	403.0	406.7	403.0	4	5	4+	OK	
25	2009	4	485	0.262	1.167	1.021	296	4.884	781	2.89	1.59	1.10	1.04	388.8	413.8	425.8	432.6	432.0	432.6	432.0	4	5	4+	OK	
25	2010	4	268	0.311	1.329	0.859	71	21.220	339	2.53	1.52	1.16	1.42	361.6	383.5	393.6	399.2	395.8	399.2	395.8	4	5	4+	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampil90	Bgrad90	HausSES	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampil90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
26	2008	3	326	0.287	0.661	0.166	126	0.647	452	2.66	1.55	0.88	0.39	314.3	325.7	327.8	324.7	311.5	327.8	325.7	3	2	3-	OK	
26	2009	3	272	0.298	0.685	0.152	120	0.694	392	2.59	1.54	0.89	0.39	309.3	320.1	321.7	318.1	304.2	321.7	320.1	3	2	3-	OK	
26	2010	3	227	0.105	0.664	0.112	69	0.462	296	2.47	1.98	0.88	0.31	321.5	332.3	332.5	329.5	318.2	332.5	332.3	3	2	3-	OK	
27	2008	1	96	0.245	0.456	0.051	39	0.151	135	2.13	1.62	0.75	0.15	237.3	235.5	227.8	215.9	191.4	237.3	235.5	1	2	1	OK	
27	2009	1	128	0.276	0.395	0.049	39	0.138	167	2.22	1.57	0.69	0.14	234.3	232.2	224.3	212.3	186.9	234.3	232.2	1	2	1	OK	
27	2010	1	99	0.324	0.444	0.046	13	0.147	112	2.05	1.50	0.74	0.14	219.8	215.6	206.6	193.0	165.8	219.8	215.6	1	2	1	OK	
28	2008	2	279	0.227	0.535	0.094	0	0.000	279	2.45	1.65	0.80	0.17	282.1	287.4	284.7	277.4	259.3	287.4	284.7	2	3	2+	OK	
28	2009	2	383	0.176	0.479	0.138	68	0.524	451	2.65	1.76	0.76	0.34	304.9	314.0	313.3	309.3	294.6	314.0	313.3	2	3	2+	OK	
28	2010	3	520	0.278	0.685	0.195	138	0.723	658	2.82	1.57	0.89	0.43	334.6	349.3	353.7	352.9	342.5	353.7	352.9	3	4	3+	OK	
29	2008	3	356	0.224	0.706	0.449	60	1.389	416	2.62	1.66	0.91	0.67	324.9	338.3	341.5	340.6	329.7	341.5	340.6	3	4	3+	OK	
29	2009	3	430	0.189	0.733	0.499	149	1.544	579	2.76	1.73	0.92	0.70	347.0	363.9	369.2	370.7	363.1	370.7	369.2	4	3	4-	Non	Oui
29	2010	2	157	0.188	0.519	0.325	48	1.371	205	2.31	1.73	0.79	0.60	276.6	281.8	278.7	272.7	254.9	281.8	278.7	2	3	2+	OK	
30	2002	4	505	0.141	1.193	0.216	44	0.915	549	2.74	1.86	1.11	0.48	384.5	406.3	415.3	419.1	417.4	419.1	417.4	4	5	4+	OK	
30	2003	4	351	0.115	0.965	0.358	155	0.794	506	2.70	1.95	1.03	0.55	372.0	391.7	398.7	401.6	398.3	401.6	398.7	4	3	4-	OK	
30	2004	5	562	0.137	1.174	0.415	327	1.323	889	2.95	1.87	1.11	0.64	407.2	433.1	444.9	451.7	453.4	453.4	451.7	5	4	5	OK	
30	2005	5	646	0.082	1.247	0.351	457	1.763	1103	3.04	2.09	1.13	0.65	435.2	464.8	478.4	488.0	494.2	494.2	488.0	5	4	5	OK	
30	2006	5	534	0.115	1.366	0.503	399	1.836	933	2.97	1.94	1.17	0.73	426.2	455.1	468.9	477.8	482.8	482.8	477.8	5	4	5	OK	
30	2007	5	676	0.131	1.429	0.372	387	1.900	1063	3.03	1.89	1.18	0.68	431.2	460.9	475.6	484.8	490.3	490.3	484.8	5	4	5	OK	
30	2008	5	848	0.131	1.343	0.427	628	1.669	1476	3.17	1.89	1.16	0.68	441.2	472.6	488.3	498.7	505.3	505.3	498.7	5	4	5	OK	
30	2009	5	744	0.134	1.227	0.406	518	1.748	1262	3.10	1.88	1.12	0.68	427.1	456.3	470.3	479.3	483.9	483.9	479.3	5	4	5	OK	
30	2010	5	877	0.135	1.218	0.404	645	1.681	1522	3.18	1.87	1.12	0.67	434.4	464.7	479.6	489.4	494.8	494.8	489.4	5	4	5	OK	
31	2008	3	550	0.163	0.460	0.554	341	2.263	891	2.95	1.79	0.75	0.78	339.6	355.2	358.9	360.4	351.1	360.4	358.9	4	3	4-	Non	Oui
31	2009	3	413	0.251	0.458	0.225	318	0.325	731	2.86	1.61	0.75	0.39	314.4	325.6	327.0	324.2	310.4	327.0	325.6	3	2	3-	OK	
31	2010	3	546	0.212	0.439	0.267	445	0.397	991	3.00	1.68	0.73	0.44	330.2	343.8	346.6	345.7	334.1	346.6	345.7	3	4	3+	OK	
32	2004	2	160	0.117	0.313	0.117	112	0.244	272	2.43	1.94	0.62	0.26	265.5	267.4	260.7	252.5	232.0	267.4	265.5	2	1	2-	OK	
32	2005	2	209	0.081	0.338	0.078	114	0.149	323	2.51	2.10	0.64	0.19	286.9	291.4	286.2	279.6	262.4	291.4	286.9	2	1	2-	OK	
32	2006	2	209	0.092	0.386	0.120	101	0.194	310	2.49	2.04	0.69	0.25	290.8	296.3	292.1	286.1	269.7	296.3	292.1	2	3	2+	OK	
32	2007	2	243	0.167	0.357	0.105	140	0.159	383	2.58	1.78	0.66	0.23	278.8	283.3	279.1	272.0	253.1	283.3	279.1	2	3	2+	OK	
32	2008	2	178	0.154	0.437	0.121	104	0.169	282	2.45	1.82	0.73	0.25	280.5	285.1	281.2	274.2	256.0	285.1	281.2	2	3	2+	OK	
32	2009	2	145	0.247	0.371	0.089	43	0.255	188	2.27	1.62	0.67	0.23	239.5	238.3	230.7	219.7	195.2	239.5	238.3	1	2	1	Non	Oui
32	2010	2	174	0.292	0.442	0.091	57	0.347	231	2.36	1.55	0.73	0.26	255.8	257.5	252.4	243.0	220.9	257.5	255.8	2	1	2-	OK	
33	2008	1	89	0.278	0.252	0.067	1	0.240	90	1.95	1.57	0.55	0.12	179.7	168.8	154.3	136.9	103.5	179.7	168.8	1	2	1	OK	
33	2009	1	127	0.242	0.316	0.072	7	1.253	134	2.13	1.63	0.62	0.13	214.2	208.6	197.8	183.9	155.6	214.2	208.6	1	2	1	OK	
33	2010	1	115	0.225	0.317	0.072	2	0.986	117	2.07	1.66	0.62	0.13	210.4	204.1	192.7	178.3	149.6	210.4	204.1	1	2	1	OK	
34	2008	5	550	0.117	1.816	2.174	538	2.717	1088	3.04	1.94	1.28	1.16	458.9	494.3	512.8	526.7	537.6	537.6	526.7	5	4	5	OK	
34	2009	5	713	0.108	1.552	2.475	685	3.169	1398	3.15	1.97	1.22	1.22	461.1	496.7	515.2	529.8	540.7	540.7	529.8	5	4	5	OK	
34	2010	5	441	0.075	1.873	0.667	420	1.898	861	2.94	2.13	1.30	0.79	458.4	491.9	508.7	520.8	531.4	531.4	520.8	5	4	5	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampil90	Bgrad90	Hausse	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampil90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
35	2004	5	474	0.144	1.104	0.454	456	0.827	930	2.97	1.85	1.08	0.61	403.1	428.4	439.7	446.0	446.9	446.9	446.0	5	4	5	OK	
35	2005	5	458	0.109	1.041	0.320	441	0.647	899	2.95	1.97	1.06	0.51	403.5	428.0	438.5	444.4	445.3	445.3	444.4	5	4	5	OK	
35	2006	5	441	0.109	1.159	0.454	419	0.835	860	2.93	1.97	1.10	0.61	410.5	436.5	448.0	455.0	457.3	457.3	455.0	5	4	5	OK	
35	2007	5	513	0.117	1.164	0.385	500	0.591	1013	3.01	1.94	1.10	0.55	415.4	442.1	454.2	461.5	464.2	464.2	461.5	5	4	5	OK	
35	2008	5	444	0.138	1.489	0.529	405	0.672	849	2.93	1.87	1.20	0.64	422.5	450.9	464.6	472.8	477.1	477.1	472.8	5	4	5	OK	
35	2009	5	472	0.112	1.216	0.385	474	0.675	946	2.98	1.95	1.12	0.56	416.8	443.7	455.9	463.3	466.4	466.4	463.3	5	4	5	OK	
35	2010	5	475	0.149	1.497	0.511	438	0.638	913	2.96	1.83	1.20	0.62	423.9	452.6	466.7	474.9	479.3	479.3	474.9	5	4	5	OK	
37	2008	5	504	0.103	1.327	0.565	425	0.911	929	2.97	1.99	1.15	0.68	426.3	454.9	468.2	477.0	481.9	481.9	477.0	5	4	5	OK	
37	2009	5	487	0.087	1.057	0.199	402	0.287	889	2.95	2.06	1.06	0.36	408.2	432.8	443.0	448.7	450.2	450.2	448.7	5	4	5	OK	
37	2010	5	487	0.123	1.186	0.291	399	0.432	886	2.95	1.91	1.11	0.46	408.5	433.9	445.3	451.4	453.1	453.1	451.4	5	4	5	OK	
38	2005	3	282	0.139	0.834	0.088	144	0.138	426	2.63	1.86	0.97	0.20	344.6	359.3	363.0	361.7	353.5	363.0	361.7	3	4	3+	OK	
38	2006	3	264	0.170	0.917	0.094	138	0.153	402	2.60	1.78	1.01	0.21	343.5	358.4	362.5	361.2	352.8	362.5	361.2	3	4	3+	OK	
38	2007	3	299	0.151	0.849	0.108	185	0.187	484	2.68	1.83	0.98	0.24	349.8	365.5	370.0	369.5	361.9	370.0	369.5	3	4	3+	OK	
38	2008	3	221	0.188	1.098	0.111	109	0.222	330	2.52	1.73	1.08	0.25	345.5	361.0	365.9	364.8	357.0	365.9	364.8	3	4	3+	OK	
38	2009	3	247	0.183	0.867	0.079	91	0.143	338	2.53	1.74	0.99	0.19	329.6	342.3	345.0	342.2	331.7	345.0	342.3	3	2	3-	OK	
38	2010	3	256	0.225	0.992	0.104	93	0.163	349	2.54	1.66	1.04	0.23	335.7	349.8	353.9	351.9	342.3	353.9	351.9	3	4	3+	OK	
39	2000	3	191	0.285	0.880	0.250	18	0.556	209	2.32	1.56	0.99	0.45	301.0	310.5	311.5	306.9	292.7	311.5	310.5	3	2	3-	OK	
39	2001	3	213	0.228	1.015	0.261	43	0.634	256	2.41	1.65	1.05	0.47	326.3	339.5	343.0	341.0	330.7	343.0	341.0	3	4	3+	OK	
39	2002	3	252	0.257	0.795	0.266	50	0.461	302	2.48	1.60	0.95	0.45	312.8	324.0	326.0	322.8	310.0	326.0	324.0	3	2	3-	OK	
39	2003	3	256	0.131	0.846	0.194	61	0.476	317	2.50	1.89	0.98	0.39	336.4	350.2	353.1	351.7	342.9	353.1	351.7	3	4	3+	OK	
39	2004	3	374	0.152	0.815	0.254	80	0.459	454	2.66	1.82	0.96	0.44	346.2	361.9	366.3	366.3	358.6	366.3	366.3	4	3	4-	Non	Oui
39	2005	3	260	0.425	0.973	0.279	78	0.520	338	2.53	1.39	1.03	0.46	319.2	332.3	336.5	333.9	321.9	336.5	333.9	3	4	3+	OK	
39	2006	3	355	0.136	1.012	0.280	54	0.592	409	2.61	1.87	1.05	0.48	360.4	378.3	384.3	385.7	380.6	385.7	384.3	4	3	4-	Non	Oui
39	2007	4	459	0.235	1.043	0.212	181	0.445	640	2.81	1.64	1.06	0.40	367.1	386.7	394.8	396.7	391.7	396.7	394.8	4	3	4-	OK	
39	2008	4	866	0.325	0.890	0.246	451	0.438	1317	3.12	1.50	1.00	0.43	379.4	401.6	411.7	415.3	411.3	415.3	411.7	4	3	4-	OK	
39	2009	4	910	0.297	0.822	0.222	553	0.413	1463	3.17	1.54	0.96	0.40	380.4	402.6	412.4	416.1	412.0	416.1	412.4	4	3	4-	OK	
39	2010	3	389	0.119	0.768	0.185	91	0.329	480	2.68	1.93	0.94	0.35	350.0	365.7	369.7	369.7	362.5	369.7	369.7	4	3	4-	Non	Oui

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bamp190	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bamp190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
40	1995	5	172	0.022	2.360	0.645	143	1.713	315	2.50	2.67	1.39	0.77	464.5	497.1	511.6	523.6	537.0	537.0	523.6	5	4	5	OK	
40	1996	5	278	0.028	2.332	0.596	221	0.879	499	2.70	2.55	1.39	0.69	475.5	510.1	526.4	539.2	553.6	553.6	539.2	5	4	5	OK	
40	1997	5	279	0.022	2.305	0.610	240	1.578	519	2.72	2.67	1.38	0.75	484.5	520.2	536.9	550.9	566.8	566.8	550.9	5	4	5	OK	
40	1998	5	261	0.051	2.253	0.766	200	1.579	461	2.66	2.29	1.37	0.81	454.9	487.4	503.1	514.6	525.6	525.6	514.6	5	4	5	OK	
40	1999	5	271	0.063	2.359	0.728	198	1.530	469	2.67	2.20	1.39	0.79	453.4	485.9	502.0	513.2	523.9	523.9	513.2	5	4	5	OK	
40	2000	5	267	0.068	2.100	0.875	202	1.458	469	2.67	2.17	1.34	0.83	443.1	474.2	489.2	499.7	508.8	508.8	499.7	5	4	5	OK	
40	2001	5	222	0.062	2.068	0.801	160	1.468	382	2.58	2.21	1.34	0.81	435.0	464.6	478.5	488.0	496.1	496.1	488.0	5	4	5	OK	
40	2002	5	275	0.056	1.826	0.501	182	0.927	457	2.66	2.26	1.28	0.65	434.5	463.5	476.5	485.4	492.9	492.9	485.4	5	4	5	OK	
40	2003	5	169	0.050	1.816	0.549	85	1.586	254	2.40	2.30	1.28	0.73	412.0	437.3	447.7	454.6	459.3	459.3	454.6	5	4	5	OK	
40	2004	5	310	0.050	1.893	0.571	176	1.146	486	2.69	2.30	1.30	0.70	443.4	473.7	487.7	497.7	506.6	506.6	497.7	5	4	5	OK	
40	2005	5	261	0.048	1.900	0.536	164	1.862	425	2.63	2.32	1.30	0.74	439.4	469.1	482.6	492.3	500.8	500.8	492.3	5	4	5	OK	
40	2006	5	210	0.101	2.102	0.619	141	1.226	351	2.55	2.00	1.34	0.73	418.6	446.1	459.2	466.8	472.0	472.0	466.8	5	4	5	OK	
40	2007	5	245	0.083	1.975	0.537	155	1.183	400	2.60	2.08	1.32	0.69	424.4	452.4	465.6	473.6	479.5	479.5	473.6	5	4	5	OK	
40	2008	5	197	0.075	1.967	0.631	130	1.133	327	2.51	2.13	1.32	0.72	418.4	445.4	457.6	465.2	470.5	470.5	465.2	5	4	5	OK	
40	2009	5	232	0.083	1.662	0.564	139	1.112	371	2.57	2.08	1.25	0.69	408.2	433.6	444.7	451.3	454.7	454.7	451.3	5	4	5	OK	
40	2010	5	181	0.130	1.643	0.839	125	1.316	306	2.49	1.89	1.24	0.81	388.4	411.7	421.9	427.1	427.6	427.6	427.1	5	4	5	OK	
41	2004	4	236	0.188	1.216	3.999	136	4.357	372	2.57	1.73	1.12	1.40	372.2	395.0	404.9	411.4	409.8	411.4	409.8	4	5	4+	OK	
41	2005	4	322	0.158	0.803	1.882	197	4.991	519	2.72	1.81	0.96	1.19	359.1	378.9	386.0	390.7	386.1	390.7	386.1	4	5	4+	OK	
41	2006	4	342	0.143	1.104	2.088	156	4.934	498	2.70	1.85	1.08	1.21	383.0	406.5	416.5	423.4	422.9	423.4	422.9	4	5	4+	OK	
41	2007	4	440	0.143	1.014	1.109	119	4.584	559	2.75	1.85	1.05	1.05	380.0	402.6	411.9	417.8	416.3	417.8	416.3	4	5	4+	OK	
41	2008	4	450	0.143	1.156	2.120	242	9.885	692	2.84	1.85	1.10	1.33	402.3	429.3	441.7	451.0	453.4	453.4	451.0	5	4	5	Non	Oui
41	2009	4	507	0.153	0.744	0.506	93	4.671	600	2.78	1.82	0.93	0.91	357.8	376.6	383.0	386.4	380.9	386.4	383.0	4	3	4-	OK	
41	2010	5	1059	0.154	0.801	2.648	639	7.231	1698	3.23	1.82	0.95	1.33	413.7	442.6	456.0	467.0	469.9	469.9	467.0	5	4	5	OK	
42	2000	3	145	0.591	1.611	0.411	112	0.542	257	2.41	1.25	1.23	0.56	336.5	353.2	360.8	360.0	351.3	360.8	360.0	3	4	3+	OK	
42	2001	3	81	0.492	1.386	0.485	73	0.551	154	2.19	1.33	1.17	0.60	308.0	319.9	323.8	320.4	307.8	323.8	320.4	3	4	3+	OK	
42	2002	3	106	0.396	1.358	0.418	93	0.563	199	2.30	1.42	1.16	0.56	323.0	336.9	341.9	339.8	329.3	341.9	339.8	3	4	3+	OK	
42	2003	3	59	0.261	1.616	0.395	65	0.484	124	2.09	1.59	1.23	0.54	325.6	339.2	343.6	341.3	332.0	343.6	341.3	3	4	3+	OK	
42	2004	3	83	0.453	1.273	0.297	80	0.384	163	2.21	1.36	1.14	0.46	304.7	315.6	318.6	314.2	300.8	318.6	315.6	3	2	3-	OK	
42	2005	3	92	0.483	1.366	0.348	56	0.533	148	2.17	1.34	1.17	0.51	304.6	315.7	319.1	314.9	301.7	319.1	315.7	3	2	3-	OK	
42	2006	3	82	0.323	1.284	0.279	56	0.351	138	2.14	1.50	1.14	0.44	306.5	317.1	319.4	315.0	302.3	319.4	317.1	3	2	3-	OK	
42	2007	3	78	0.485	1.633	0.358	63	0.376	141	2.15	1.33	1.24	0.50	315.4	328.3	333.0	329.7	318.3	333.0	329.7	3	4	3+	OK	
42	2008	3	53	0.377	1.467	0.344	54	0.347	107	2.03	1.44	1.20	0.49	301.7	311.8	314.3	309.5	296.3	314.3	311.8	3	2	3-	OK	
42	2009	3	83	0.435	1.378	0.322	78	0.378	161	2.21	1.38	1.17	0.48	311.2	323.1	326.9	323.2	310.9	326.9	323.2	3	4	3+	OK	
42	2010	3	114	0.489	1.649	0.365	90	0.488	204	2.31	1.33	1.24	0.52	332.5	348.1	354.8	353.3	344.3	354.8	353.3	3	4	3+	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bamp190	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bamp190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
43	2000	3	227	0.414	1.307	0.194	126	0.341	353	2.55	1.40	1.15	0.36	342.0	358.4	365.3	364.3	355.8	365.3	364.3	3	4	3+	OK	
43	2001	3	159	0.254	1.194	0.159	93	0.243	252	2.40	1.61	1.11	0.31	332.5	346.6	351.0	348.7	339.2	351.0	348.7	3	4	3+	OK	
43	2002	3	194	0.285	1.148	0.161	137	0.316	331	2.52	1.56	1.10	0.33	338.9	354.2	359.6	358.2	349.3	359.6	358.2	3	4	3+	OK	
43	2003	3	110	0.402	1.064	0.137	64	0.258	174	2.24	1.41	1.07	0.29	295.6	304.4	305.6	299.7	284.5	305.6	304.4	3	2	3-	OK	
43	2004	3	169	0.352	0.896	0.121	113	0.233	282	2.45	1.47	1.00	0.26	307.8	318.2	320.2	315.6	301.7	320.2	318.2	3	2	3-	OK	
43	2005	3	143	0.286	1.220	0.132	88	0.272	231	2.36	1.56	1.12	0.29	326.8	340.1	344.1	341.2	330.8	344.1	341.2	3	4	3+	OK	
43	2006	3	138	0.352	0.964	0.110	96	0.295	234	2.37	1.47	1.03	0.27	304.7	314.7	316.4	311.5	297.3	316.4	314.7	3	2	3-	OK	
43	2007	3	153	0.407	1.222	0.123	90	0.279	243	2.39	1.41	1.12	0.28	319.9	332.6	336.7	333.2	321.5	336.7	333.2	3	4	3+	OK	
43	2008	3	121	0.247	1.000	0.118	74	0.227	195	2.29	1.62	1.04	0.26	308.5	318.5	319.8	315.0	301.9	319.8	318.5	3	2	3-	OK	
43	2009	3	135	0.335	1.137	0.117	97	0.271	232	2.37	1.49	1.09	0.27	317.6	329.5	332.8	329.0	317.0	332.8	329.5	3	2	3-	OK	
43	2010	3	131	0.494	1.398	0.172	43	0.300	174	2.24	1.33	1.18	0.33	310.8	322.4	326.2	321.9	309.2	326.2	322.4	3	2	3-	OK	
44	2003	2	108	0.404	0.861	0.079	19	0.199	127	2.10	1.41	0.98	0.20	265.4	269.1	266.5	257.3	237.4	269.1	266.5	2	3	2+	OK	
44	2004	2	163	0.368	0.787	0.071	29	0.149	192	2.28	1.45	0.95	0.18	279.5	285.2	283.9	276.1	257.9	285.2	283.9	2	3	2+	OK	
44	2005	2	147	0.296	0.951	0.084	35	0.169	182	2.26	1.54	1.02	0.20	296.5	304.7	304.9	298.8	283.6	304.9	304.7	3	2	3-	Non	Oui
44	2006	2	140	0.395	0.829	0.077	18	0.149	158	2.20	1.42	0.97	0.19	272.8	277.6	275.7	267.3	248.3	277.6	275.7	2	3	2+	OK	
44	2007	2	159	0.419	0.976	0.090	27	0.172	186	2.27	1.40	1.03	0.21	290.3	298.1	298.6	291.9	275.6	298.6	298.1	3	2	3-	Non	Oui
44	2008	2	122	0.313	0.892	0.080	28	0.188	150	2.18	1.52	1.00	0.20	281.8	287.8	286.5	278.9	261.5	287.8	286.5	2	3	2+	OK	
44	2009	2	141	0.398	0.941	0.087	18	0.179	159	2.20	1.42	1.02	0.21	282.1	288.5	287.9	280.4	262.9	288.5	287.9	2	3	2+	OK	
44	2010	2	131	0.548	1.047	0.111	7	0.211	138	2.14	1.28	1.06	0.19	275.1	280.8	280.3	271.9	253.4	280.8	280.3	2	3	2+	OK	
45	2003	1	52	0.504	0.761	0.056	1	0.696	53	1.72	1.32	0.94	0.11	211.3	206.4	198.0	183.0	155.2	211.3	206.4	1	2	1	OK	
45	2004	1	75	0.456	0.602	0.039	0	0.000	75	1.88	1.36	0.85	0.08	212.7	207.8	199.0	184.2	156.2	212.7	207.8	1	2	1	OK	
45	2005	1	82	0.453	0.701	0.057	0	0.000	82	1.91	1.36	0.90	0.11	227.6	225.1	218.2	205.0	179.3	227.6	225.1	1	2	1	OK	
45	2006	1	68	0.518	0.717	0.047	0	0.000	68	1.83	1.31	0.91	0.09	217.3	213.4	205.6	191.2	164.1	217.3	213.4	1	2	1	OK	
45	2007	1	92	0.513	0.719	0.054	0	0.000	92	1.96	1.31	0.91	0.10	231.2	229.5	223.3	210.4	185.1	231.2	229.5	1	2	1	OK	
45	2008	1	62	0.435	0.676	0.047	0	0.000	62	1.79	1.38	0.89	0.09	213.6	208.8	200.2	185.4	157.8	213.6	208.8	1	2	1	OK	
45	2009	1	79	0.495	0.796	0.055	1	0.711	80	1.90	1.33	0.95	0.11	233.0	231.6	225.6	212.8	188.0	233.0	231.6	1	2	1	OK	
45	2010	1	83	0.770	0.855	0.067	0	0.000	83	1.92	1.15	0.98	0.12	228.7	227.3	222.1	208.9	183.3	228.7	227.3	1	2	1	OK	
46	2004	2	111	0.194	0.854	0.169	6	0.498	117	2.07	1.72	0.98	0.27	281.2	286.4	283.9	276.4	259.6	286.4	283.9	2	3	2+	OK	
46	2005	2	93	0.196	0.771	0.168	3	0.625	96	1.98	1.72	0.94	0.27	264.9	267.5	263.1	254.0	234.8	267.5	264.9	2	1	2-	OK	
46	2006	2	119	0.186	0.948	0.219	5	0.612	124	2.09	1.74	1.02	0.32	292.9	300.2	299.1	292.9	278.0	300.2	299.1	2	3	2+	OK	
46	2007	3	165	0.167	1.019	0.271	17	0.525	182	2.26	1.78	1.05	0.46	319.6	331.2	333.2	330.3	319.5	333.2	331.2	3	2	3-	OK	
46	2008	2	122	0.221	1.177	0.240	3	0.625	125	2.10	1.66	1.11	0.34	304.6	314.0	315.0	309.9	296.9	315.0	314.0	3	2	3-	Non	Oui
46	2009	2	99	0.202	0.752	0.197	7	0.818	106	2.03	1.70	0.93	0.30	267.2	270.3	266.2	257.6	238.6	270.3	267.2	2	1	2-	OK	
46	2010	2	91	0.194	0.695	0.219	6	2.384	97	1.99	1.72	0.90	0.32	259.2	261.0	255.9	246.6	226.5	261.0	259.2	2	1	2-	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bamp190	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bamp190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
47	2004	2	143	0.216	0.623	0.257	16	0.568	159	2.20	1.68	0.86	0.46	272.3	276.8	273.4	266.2	247.8	276.8	273.4	2	3	2+	OK	
47	2005	2	120	0.204	0.472	0.194	12	0.398	132	2.12	1.70	0.76	0.37	246.1	246.0	239.2	229.1	206.5	246.1	246.0	1	2	1	Non	Oui
47	2006	2	169	0.266	0.615	0.199	12	0.467	181	2.26	1.59	0.85	0.39	270.8	275.2	272.1	264.6	245.5	275.2	272.1	2	3	2+	OK	
47	2007	2	240	0.264	0.618	0.224	6	5.698	246	2.39	1.59	0.86	0.33	284.2	290.5	288.8	282.3	264.9	290.5	288.8	2	3	2+	OK	
47	2008	2	150	0.335	0.807	0.252	10	0.523	160	2.20	1.49	0.96	0.44	278.9	285.1	283.9	277.1	259.6	285.1	283.9	2	3	2+	OK	
47	2009	2	177	0.279	0.651	0.243	10	0.516	187	2.27	1.57	0.88	0.44	275.6	280.9	278.6	271.7	253.4	280.9	278.6	2	3	2+	OK	
47	2010	2	106	0.321	0.550	0.183	3	0.567	109	2.04	1.51	0.81	0.28	234.7	233.3	226.3	214.7	190.2	234.7	233.3	1	2	1	Non	Oui
48	2004	1	49	0.214	0.467	0.057	25	0.167	74	1.87	1.68	0.75	0.16	215.9	210.6	200.1	186.0	158.9	215.9	210.6	1	2	1	OK	
48	2005	1	32	0.296	0.294	0.048	10	0.115	42	1.62	1.54	0.60	0.13	153.4	138.5	121.3	101.1	64.4	153.4	138.5	1	2	1	OK	
48	2006	1	33	0.241	0.397	0.050	16	0.153	49	1.69	1.63	0.70	0.15	184.1	173.8	159.8	142.6	110.8	184.1	173.8	1	2	1	OK	
48	2007	1	50	0.463	0.432	0.060	10	0.214	60	1.78	1.35	0.73	0.18	181.8	172.2	159.7	142.5	109.9	181.8	172.2	1	2	1	OK	
48	2008	1	50	0.519	0.420	0.072	8	0.192	58	1.76	1.31	0.72	0.13	174.9	164.3	151.3	133.2	99.4	174.9	164.3	1	2	1	OK	
48	2009	1	43	0.416	0.427	0.061	15	0.154	58	1.76	1.40	0.72	0.16	182.1	172.4	159.7	142.4	109.9	182.1	172.4	1	2	1	OK	
48	2010	1	34	0.390	0.435	0.057	10	0.155	44	1.64	1.43	0.73	0.16	172.8	161.4	147.5	129.2	95.5	172.8	161.4	1	2	1	OK	
49	2002	1	151	0.143	0.380	0.079	0	0.000	151	2.18	1.85	0.68	0.14	244.7	243.3	234.8	223.7	200.5	244.7	243.3	1	2	1	OK	
49	2003	1	68	0.117	0.221	0.070	0	0.000	68	1.83	1.94	0.51	0.13	183.0	171.3	154.8	137.6	105.4	183.0	171.3	1	2	1	OK	
49	2004	1	59	0.136	0.387	0.095	3	0.516	62	1.79	1.87	0.69	0.17	208.3	201.0	188.3	173.5	145.6	208.3	201.0	1	2	1	OK	
49	2005	1	133	0.176	0.490	0.112	0	0.000	133	2.12	1.76	0.77	0.19	250.6	250.5	243.6	233.1	211.0	250.6	250.5	1	2	1	OK	
49	2006	1	128	0.202	0.487	0.124	0	0.000	128	2.11	1.70	0.77	0.21	245.1	244.4	237.2	226.3	203.3	245.1	244.4	1	2	1	OK	
49	2007	1	132	0.189	0.364	0.104	1	0.635	133	2.12	1.73	0.67	0.18	229.5	226.2	216.7	204.3	178.7	229.5	226.2	1	2	1	OK	
49	2009	1	103	0.186	0.275	0.080	0	0.000	103	2.01	1.74	0.57	0.15	201.4	193.4	180.4	165.2	135.3	201.4	193.4	1	2	1	OK	
49	2010	1	52	0.118	0.521	0.107	1	1.288	53	1.72	1.93	0.79	0.19	224.4	219.6	208.8	195.4	170.4	224.4	219.6	1	2	1	OK	
50	2002	1	68	0.268	0.521	0.182	10	0.775	78	1.89	1.58	0.79	0.43	222.8	219.5	211.0	198.7	173.0	222.8	219.5	1	2	1	OK	
50	2003	1	41	0.108	0.428	0.129	9	0.398	50	1.70	1.97	0.72	0.22	211.8	204.8	192.2	177.8	150.8	211.8	204.8	1	2	1	OK	
50	2004	1	54	0.253	0.530	0.171	12	0.584	66	1.82	1.61	0.80	0.39	217.6	213.3	204.0	191.0	164.6	217.6	213.3	1	2	1	OK	
50	2005	1	105	0.158	0.316	0.089	9	0.461	114	2.06	1.81	0.62	0.16	218.6	213.2	201.9	188.4	161.2	218.6	213.2	1	2	1	OK	
50	2006	1	100	0.227	0.408	0.125	16	0.575	116	2.06	1.65	0.71	0.34	227.9	225.0	216.2	204.3	178.8	227.9	225.0	1	2	1	OK	
50	2007	1	60	0.300	0.355	0.181	7	1.335	67	1.83	1.54	0.66	0.28	186.8	177.6	164.6	148.4	116.7	186.8	177.6	1	2	1	OK	
50	2008	1	50	0.262	0.218	0.086	2	0.150	52	1.72	1.59	0.50	0.16	149.4	133.7	115.5	95.2	57.6	149.4	133.7	1	2	1	OK	
50	2009	1	62	0.299	0.408	0.177	12	1.884	74	1.87	1.54	0.71	0.58	203.5	197.7	187.2	173.9	145.3	203.5	197.7	1	2	1	OK	
50	2010	1	29	0.197	0.390	0.146	4	0.374	33	1.52	1.71	0.69	0.24	172.0	159.7	144.0	125.8	92.8	172.0	159.7	1	2	1	OK	
51	2008	4	256	0.173	1.324	1.453	131	2.532	387	2.59	1.77	1.15	1.03	377.9	400.5	410.3	415.7	414.4	415.7	414.4	4	5	4+	OK	
51	2009	4	190	0.161	1.379	1.779	162	2.349	352	2.55	1.80	1.17	1.09	379.2	402.1	412.0	417.7	416.8	417.7	416.8	4	5	4+	OK	
51	2010	3	136	0.269	1.166	1.207	100	1.815	236	2.37	1.58	1.10	0.95	334.0	350.0	355.7	356.5	348.3	356.5	355.7	4	3	4-	Non	Oui

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi190	Bgrad90	HausSES	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
52	2002	3	436	0.298	0.405	0.492	232	1.674	668	2.82	1.54	0.70	0.71	301.9	312.2	313.0	310.5	295.2	313.0	312.2	3	2	3-	OK	
52	2003	3	584	0.222	0.357	0.545	452	1.353	1036	3.02	1.66	0.66	0.71	321.1	334.0	336.1	335.7	322.9	336.1	335.7	3	4	3+	OK	
52	2004	3	754	0.278	0.275	0.595	558	0.687	1312	3.12	1.57	0.57	0.67	309.7	320.9	322.0	320.5	305.4	322.0	320.9	3	2	3-	OK	
52	2005	4	1663	0.273	0.284	0.714	1369	0.686	3032	3.48	1.58	0.58	0.72	349.5	367.3	372.8	375.7	366.1	375.7	372.8	4	3	4-	OK	
52	2006	4	2060	0.334	0.266	0.582	1599	0.745	3659	3.56	1.49	0.56	0.67	348.1	365.8	371.6	374.2	363.9	374.2	371.6	4	3	4-	OK	
52	2007	3	788	0.367	0.338	0.407	492	0.597	1280	3.11	1.45	0.64	0.56	312.2	324.0	326.0	324.2	309.3	326.0	324.2	3	4	3+	OK	
52	2008	2	151	0.205	0.496	0.161	14	0.378	165	2.22	1.70	0.78	0.34	258.7	260.5	255.1	246.2	225.3	260.5	258.7	2	1	2-	OK	
52	2009	2	168	0.235	0.383	0.152	15	0.285	183	2.26	1.64	0.68	0.31	242.6	242.0	234.8	224.4	200.6	242.6	242.0	1	2	1	Non	Oui
52	2010	2	132	0.359	0.605	0.136	2	0.269	134	2.13	1.46	0.85	0.22	246.7	247.2	241.9	231.2	208.3	247.2	246.7	2	1	2-	OK	
53	2008	3	294	0.347	0.735	0.769	171	1.269	465	2.67	1.47	0.92	0.79	322.6	336.7	341.0	340.5	329.1	341.0	340.5	3	4	3+	OK	
53	2009	3	286	0.200	0.640	0.283	165	0.722	451	2.65	1.71	0.87	0.50	322.8	335.3	337.5	335.7	324.1	337.5	335.7	3	4	3+	OK	
53	2010	3	279	0.313	0.668	0.413	147	0.895	426	2.63	1.52	0.89	0.60	312.5	324.4	326.8	324.5	311.4	326.8	324.5	3	4	3+	OK	
54	2008	1	129	0.351	0.545	0.076	28	0.222	157	2.20	1.47	0.81	0.20	247.0	247.4	241.9	231.3	208.1	247.4	247.0	2	1	2-	Non	Oui
54	2009	1	156	0.249	0.447	0.071	41	0.143	197	2.29	1.61	0.74	0.17	252.6	253.3	247.3	237.2	214.7	253.3	252.6	2	1	2-	Non	Oui
54	2010	1	121	0.359	0.450	0.087	36	0.150	157	2.20	1.46	0.74	0.20	233.8	232.2	225.0	213.2	187.8	233.8	232.2	1	2	1	OK	
55	2010	5	615	0.027	1.255	1.923	440	2.666	1055	3.02	2.56	1.13	1.12	468.5	503.0	518.4	533.1	545.9	545.9	533.1	5	4	5	OK	
56	2001	2	174	0.220	0.663	0.099	13	4.628	187	2.27	1.67	0.88	0.79	287.2	294.9	293.9	289.7	274.0	294.9	293.9	2	3	2+	OK	
56	2002	2	275	0.147	0.659	0.085	19	0.557	294	2.47	1.84	0.88	0.30	311.5	321.2	321.2	317.2	304.1	321.2	321.2	2	3	2+	OK	
56	2003	2	170	0.142	0.675	0.087	8	0.445	178	2.25	1.85	0.89	0.16	290.3	296.2	293.5	286.6	270.6	296.2	293.5	2	3	2+	OK	
56	2004	2	205	0.185	0.644	0.084	15	0.619	220	2.34	1.74	0.87	0.31	291.2	298.1	296.3	290.4	274.4	298.1	296.3	2	3	2+	OK	
56	2005	2	186	0.178	0.543	0.078	3	0.547	189	2.28	1.76	0.81	0.14	272.0	275.2	270.8	262.2	243.0	275.2	272.0	2	1	2-	OK	
56	2006	2	251	0.260	0.599	0.103	4	4.230	255	2.41	1.60	0.84	0.18	282.3	288.0	285.7	278.5	260.5	288.0	285.7	2	3	2+	OK	
56	2007	2	293	0.269	0.680	0.094	2	8.598	295	2.47	1.58	0.89	0.17	296.3	304.2	303.7	297.8	281.8	304.2	303.7	2	3	2+	OK	
56	2008	2	197	0.222	0.649	0.095	3	0.696	200	2.30	1.66	0.87	0.17	281.0	286.2	283.5	275.9	258.1	286.2	283.5	2	3	2+	OK	
56	2009	2	305	0.215	0.574	0.143	8	11.679	313	2.50	1.68	0.83	0.23	294.2	301.5	300.2	294.4	278.2	301.5	300.2	2	3	2+	OK	
56	2010	2	253	0.186	0.605	0.099	9	0.715	262	2.42	1.74	0.85	0.18	292.9	299.7	297.8	291.5	275.3	299.7	297.8	2	3	2+	OK	
57	2002	4	294	0.110	0.930	0.150	112	1.197	406	2.61	1.96	1.01	0.47	359.7	377.1	382.4	383.7	378.5	383.7	382.4	4	3	4-	OK	
57	2003	3	195	0.122	1.031	0.130	44	1.371	239	2.38	1.92	1.05	0.48	341.1	355.8	359.4	358.7	351.2	359.4	358.7	3	4	3+	OK	
57	2004	4	309	0.113	0.982	0.180	102	1.186	411	2.61	1.95	1.03	0.49	363.7	381.9	387.8	389.6	385.0	389.6	387.8	4	3	4-	OK	
57	2005	4	332	0.116	0.969	0.212	65	1.169	397	2.60	1.94	1.03	0.51	360.7	378.5	384.2	385.7	380.8	385.7	384.2	4	3	4-	OK	
57	2006	4	365	0.123	1.335	0.318	128	1.514	493	2.69	1.92	1.16	0.61	393.3	416.7	426.7	431.8	432.0	432.0	431.8	5	4	5	Non	Oui
57	2007	5	504	0.117	1.492	0.271	129	1.389	633	2.80	1.94	1.20	0.57	413.3	439.7	451.9	458.8	461.9	461.9	458.8	5	4	5	OK	
57	2008	5	367	0.111	1.270	0.323	69	1.180	436	2.64	1.96	1.14	0.58	386.3	408.4	417.3	421.5	420.8	421.5	420.8	4	5	4+	Non	Oui
57	2009	5	332	0.111	2.158	0.335	173	1.832	505	2.70	1.96	1.35	0.65	433.2	463.0	477.9	486.7	493.6	493.6	486.7	5	4	5	OK	
57	2010	4	294	0.115	1.011	0.522	128	1.866	422	2.63	1.95	1.05	0.74	369.5	389.3	396.3	399.7	396.5	399.7	396.5	4	5	4+	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi90	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1ere Classe	2nde Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2nde classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
59	2000	2	61	0.304	1.198	0.112	5	1.333	66	1.82	1.53	1.11	0.19	267.5	271.1	268.4	259.0	240.5	271.1	268.4	2	3	2+	OK	
59	2001	2	55	0.102	1.047	0.137	16	1.272	71	1.85	1.99	1.06	0.47	293.1	299.8	297.6	291.8	278.2	299.8	297.6	2	3	2+	OK	
59	2002	1	47	0.262	0.678	0.107	1	0.119	48	1.68	1.59	0.89	0.19	216.8	212.0	202.6	188.4	162.1	216.8	212.0	1	2	1	OK	
59	2003	1	56	0.226	0.877	0.101	5	0.164	61	1.79	1.66	0.99	0.18	249.3	249.4	243.6	232.4	211.0	249.4	249.3	2	1	2-	Non	Oui
59	2004	2	82	0.183	1.179	0.119	6	0.894	88	1.94	1.75	1.11	0.20	292.5	299.3	298.2	291.2	276.6	299.3	298.2	2	3	2+	OK	
59	2005	2	65	0.210	1.298	0.078	1	0.832	66	1.82	1.69	1.15	0.14	282.5	287.9	286.0	277.7	261.7	287.9	286.0	2	3	2+	OK	
59	2006	2	69	0.174	1.123	0.112	15	0.159	84	1.92	1.77	1.09	0.24	288.7	294.9	293.3	286.1	270.9	294.9	293.3	2	3	2+	OK	
59	2007	3	114	0.161	1.223	0.116	33	0.173	147	2.17	1.80	1.12	0.24	321.7	333.1	335.0	331.2	320.7	335.0	333.1	3	2	3-	OK	
59	2008	3	91	0.265	1.281	0.124	17	0.172	108	2.03	1.59	1.14	0.25	298.4	306.9	307.6	301.5	287.5	307.6	306.9	3	2	3-	OK	
59	2009	3	86	0.184	1.131	0.102	16	0.181	102	2.01	1.74	1.09	0.23	296.1	303.6	302.9	296.5	282.3	303.6	302.9	2	3	2+	Non	Oui
59	2010	3	83	0.184	1.275	0.117	14	0.157	97	1.99	1.74	1.14	0.24	302.8	311.5	311.7	305.9	292.8	311.7	311.5	3	2	3-	OK	
60	2001	4	416	0.144	0.812	0.852	138	1.286	554	2.74	1.85	0.96	0.82	360.8	379.8	386.3	389.5	384.5	389.5	386.3	4	3	4-	OK	
60	2004	2	93	0.128	0.948	0.165	1	0.136	94	1.97	1.90	1.02	0.26	289.8	295.8	293.3	286.4	271.5	295.8	293.3	2	3	2+	OK	
60	2005	2	82	0.123	0.976	0.186	3	1.148	85	1.93	1.92	1.03	0.29	288.8	294.7	292.1	285.2	270.2	294.7	292.1	2	3	2+	OK	
60	2006	3	155	0.107	1.034	0.153	11	0.375	166	2.22	1.98	1.05	0.33	326.8	338.6	340.1	337.2	327.7	340.1	338.6	3	2	3-	OK	
60	2007	3	177	0.118	1.182	0.177	15	2.739	192	2.28	1.93	1.11	0.67	344.4	360.1	364.5	364.8	358.4	364.8	364.5	4	3	4-	Non	Oui
61	2010	1	27	0.325	0.363	0.029	0	0.000	27	1.43	1.50	0.67	0.06	143.4	126.7	108.7	87.0	49.1	143.4	126.7	1	2	1	OK	
62	2004	2	374	0.204	0.354	0.079	4	1.422	378	2.58	1.70	0.66	0.14	271.6	275.0	270.4	262.3	242.0	275.0	271.6	2	1	2-	OK	
62	2005	2	271	0.218	0.363	0.083	5	0.749	276	2.44	1.67	0.67	0.15	257.5	258.8	252.7	243.2	221.0	258.8	257.5	2	1	2-	OK	
62	2006	2	530	0.205	0.350	0.074	16	0.276	546	2.74	1.70	0.65	0.22	287.8	294.0	291.3	285.2	267.2	294.0	291.3	2	3	2+	OK	
62	2007	2	702	0.220	0.323	0.078	30	0.312	732	2.86	1.67	0.63	0.23	294.3	301.6	299.7	294.5	277.1	301.6	299.7	2	3	2+	OK	
62	2008	2	393	0.234	0.452	0.104	7	0.328	400	2.60	1.64	0.74	0.18	286.3	292.4	290.0	283.5	265.5	292.4	290.0	2	3	2+	OK	
62	2009	2	436	0.218	0.356	0.094	17	0.357	453	2.66	1.67	0.66	0.26	279.7	284.8	281.4	274.7	255.6	284.8	281.4	2	3	2+	OK	
62	2010	2	515	0.218	0.597	0.133	14	0.668	529	2.72	1.67	0.84	0.37	321.2	333.2	335.3	332.8	320.6	335.3	333.2	3	2	3-	Non	Oui
63	2008	2	396	0.224	0.419	0.094	144	0.686	540	2.73	1.66	0.71	0.33	297.6	305.8	304.8	300.1	283.8	305.8	304.8	2	3	2+	OK	
63	2009	2	466	0.231	0.442	0.070	135	0.462	601	2.78	1.65	0.73	0.26	304.2	313.3	313.0	308.7	293.2	313.3	313.0	2	3	2+	OK	
63	2010	2	474	0.307	0.588	0.147	30	0.762	504	2.70	1.53	0.84	0.40	309.4	320.2	321.8	318.4	304.1	321.8	320.2	3	2	3-	Non	Oui

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi90	Bgrad90	Hausses	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
64	2000	2	62	0.296	1.088	0.296	10	0.527	72	1.86	1.54	1.07	0.48	268.4	272.9	270.6	262.6	244.6	272.9	270.6	2	3	2+	OK	
64	2001	2	49	0.231	1.169	0.368	6	1.751	55	1.74	1.65	1.10	0.45	268.0	271.9	269.0	260.7	243.0	271.9	269.0	2	3	2+	OK	
64	2002	2	41	0.328	0.832	0.329	11	0.445	52	1.72	1.50	0.97	0.49	232.5	231.3	224.9	213.5	190.1	232.5	231.3	1	2	1	Non	Oui
64	2003	2	21	0.349	1.069	0.694	7	0.645	28	1.45	1.47	1.07	0.65	223.3	221.3	214.6	202.6	178.8	223.3	221.3	1	2	1	Non	Oui
64	2004	2	49	0.320	0.800	0.522	20	0.764	69	1.84	1.51	0.95	0.64	244.6	245.8	240.9	231.5	209.8	245.8	244.6	2	1	2-	OK	
64	2005	2	58	0.298	1.126	0.681	17	0.750	75	1.88	1.54	1.09	0.71	275.4	281.6	280.5	274.2	257.6	281.6	280.5	2	3	2+	OK	
64	2006	3	109	0.316	0.928	0.555	23	1.189	132	2.12	1.51	1.01	0.70	284.7	292.5	292.3	287.2	271.3	292.5	292.3	2	3	2+	Non	Oui
64	2007	3	119	0.316	1.134	0.298	10	0.424	129	2.11	1.51	1.09	0.46	295.3	304.2	305.1	299.8	285.3	305.1	304.2	3	2	3-	OK	
64	2008	3	85	0.289	1.126	0.320	14	0.526	99	2.00	1.55	1.09	0.50	285.8	293.0	292.7	286.5	270.9	293.0	292.7	2	3	2+	Non	Oui
64	2009	3	98	0.297	0.961	0.463	34	0.569	132	2.12	1.54	1.03	0.59	287.6	295.4	295.3	289.9	274.3	295.4	295.3	2	3	2+	Non	Oui
64	2010	2	63	0.325	0.758	0.480	11	0.520	74	1.87	1.50	0.93	0.59	243.0	243.7	238.6	228.8	206.7	243.7	243.0	2	1	2-	OK	
65	2008	2	85	0.285	0.864	0.117	1	0.479	86	1.93	1.56	0.98	0.20	257.5	259.4	255.1	244.9	224.4	259.4	257.5	2	1	2-	OK	
65	2009	2	90	0.264	0.856	0.113	7	0.649	97	1.99	1.59	0.98	0.19	264.1	266.9	263.1	253.6	234.0	266.9	264.1	2	1	2-	OK	
65	2010	1	53	0.285	0.681	0.106	0	0.000	53	1.72	1.56	0.89	0.18	219.3	215.0	206.1	192.2	166.1	219.3	215.0	1	2	1	OK	
67	2008	1	152	0.292	0.405	0.057	24	0.225	176	2.25	1.55	0.70	0.18	237.1	235.7	228.2	216.7	191.8	237.1	235.7	1	2	1	OK	
67	2009	1	144	0.184	0.309	0.053	80	0.135	224	2.35	1.74	0.61	0.15	242.9	241.5	233.3	222.3	198.0	242.9	241.5	1	2	1	OK	
67	2010	1	202	0.255	0.322	0.055	76	0.184	278	2.44	1.60	0.63	0.16	246.5	246.3	239.3	228.9	204.9	246.5	246.3	1	2	1	OK	
68	2008	4	303	0.207	1.193	0.148	249	0.374	552	2.74	1.69	1.11	0.32	372.7	392.9	401.3	403.2	399.3	403.2	401.3	4	3	4-	OK	
68	2009	4	240	0.148	0.998	0.128	203	0.343	443	2.65	1.84	1.04	0.30	358.5	375.8	381.6	382.0	376.1	382.0	381.6	4	3	4-	OK	
68	2010	4	306	0.208	1.175	0.129	232	0.373	538	2.73	1.69	1.11	0.31	370.1	389.8	397.9	399.5	395.1	399.5	397.9	4	3	4-	OK	
69	2008	2	114	0.237	1.053	0.199	103	0.295	217	2.34	1.64	1.06	0.36	319.3	331.2	333.9	330.6	319.2	333.9	331.2	3	2	3-	Non	Oui
69	2009	2	55	0.193	0.902	0.225	53	0.245	108	2.03	1.72	1.00	0.37	282.9	288.8	286.6	279.8	263.5	288.8	286.6	2	3	2+	OK	
69	2010	2	107	0.197	0.933	0.243	131	0.311	238	2.38	1.71	1.01	0.40	320.0	331.9	334.1	331.1	319.9	334.1	331.9	3	2	3-	Non	Oui
70	2008	1	59	0.358	0.798	0.046	4	0.161	63	1.80	1.46	0.95	0.09	230.8	228.5	221.5	208.3	183.6	230.8	228.5	1	2	1	OK	
70	2009	1	35	0.302	0.666	0.044	4	0.887	39	1.59	1.53	0.88	0.09	201.6	194.3	183.3	167.2	138.4	201.6	194.3	1	2	1	OK	
70	2010	1	66	0.348	0.651	0.051	0	0.000	66	1.82	1.47	0.88	0.10	219.6	215.5	206.9	192.7	166.2	219.6	215.5	1	2	1	OK	
71	2001	4	285	0.094	1.161	0.169	66	0.396	351	2.55	2.03	1.10	0.35	372.1	391.0	397.4	399.1	396.0	399.1	397.4	4	3	4-	OK	
71	2002	4	240	0.087	1.078	0.156	44	0.327	284	2.45	2.07	1.07	0.32	359.1	375.7	380.3	380.7	375.7	380.7	380.3	4	3	4-	OK	
71	2003	4	305	0.079	0.886	0.136	38	0.274	343	2.54	2.10	0.99	0.29	355.4	371.1	374.8	374.8	368.9	374.8	374.8	4	3	4-	OK	
71	2004	4	268	0.089	0.940	0.128	17	0.254	285	2.45	2.05	1.02	0.28	348.1	362.9	366.1	365.3	358.4	366.1	365.3	3	4	3+	Non	Oui
71	2005	4	317	0.089	1.279	0.175	17	0.311	334	2.52	2.05	1.14	0.34	378.2	397.9	404.9	407.2	405.2	407.2	405.2	4	5	4+	OK	
71	2006	4	223	0.144	1.342	0.178	12	0.373	235	2.37	1.85	1.16	0.35	353.6	370.2	375.8	375.6	369.9	375.8	375.6	3	4	3+	Non	Oui
71	2007	5	236	0.146	1.975	0.270	32	0.468	268	2.43	1.84	1.32	0.45	388.8	411.5	421.6	425.1	425.2	425.2	425.1	5	4	5	OK	
71	2008	5	268	0.151	2.035	0.260	40	0.477	308	2.49	1.83	1.33	0.44	396.3	420.1	431.2	435.5	436.5	436.5	435.5	5	4	5	OK	
71	2009	5	237	0.149	1.947	0.239	32	0.434	269	2.43	1.83	1.31	0.42	387.1	409.3	419.3	422.5	422.2	422.5	422.2	4	5	4+	Non	Oui
71	2010	5	252	0.158	2.025	0.232	13	0.428	265	2.42	1.81	1.33	0.41	387.7	410.1	420.3	423.6	423.4	423.6	423.4	4	5	4+	Non	Oui

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi90	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1ere Classe	2nde Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2nde classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
72	2000	2	134	0.226	0.476	0.117	28	0.246	162	2.21	1.66	0.76	0.26	251.7	252.4	246.3	236.4	214.2	252.4	251.7	2	1	2-	OK	
72	2001	2	120	0.249	0.677	0.126	9	0.513	129	2.11	1.61	0.89	0.21	262.0	264.5	260.0	250.7	230.4	264.5	262.0	2	1	2-	OK	
72	2002	2	116	0.203	0.597	0.110	19	0.198	135	2.13	1.70	0.84	0.24	261.3	263.3	258.2	248.9	228.6	263.3	261.3	2	1	2-	OK	
72	2003	2	112	0.183	0.617	0.141	33	0.333	145	2.16	1.75	0.86	0.31	270.2	273.6	269.4	261.3	242.4	273.6	270.2	2	1	2-	OK	
72	2004	2	164	0.205	0.613	0.127	45	0.352	209	2.32	1.70	0.85	0.30	282.8	288.4	285.9	279.0	261.7	288.4	285.9	2	3	2+	OK	
72	2005	2	165	0.191	0.923	0.110	8	0.296	173	2.24	1.73	1.01	0.19	303.4	312.0	311.9	306.3	292.5	312.0	311.9	2	3	2+	OK	
72	2006	2	151	0.201	1.031	0.128	11	0.250	162	2.21	1.71	1.05	0.28	308.1	317.8	318.6	313.8	300.9	318.6	317.8	3	2	3-	Non	Oui
72	2007	3	192	0.235	1.533	0.159	11	0.448	203	2.31	1.64	1.21	0.35	343.9	359.7	365.6	364.4	357.2	365.6	364.4	3	4	3+	OK	
72	2008	3	217	0.261	1.344	0.137	7	0.345	224	2.35	1.59	1.16	0.23	334.3	348.4	353.1	350.5	341.4	353.1	350.5	3	4	3+	OK	
72	2009	3	174	0.276	1.427	0.152	9	0.338	183	2.26	1.57	1.18	0.25	328.5	341.9	346.1	343.0	333.2	346.1	343.0	3	4	3+	OK	
72	2010	3	192	0.241	1.356	0.141	23	0.339	215	2.33	1.63	1.16	0.31	336.3	350.8	355.6	353.7	345.0	355.6	353.7	3	4	3+	OK	
73	2000	1	99	0.239	0.370	0.047	9	0.127	108	2.03	1.63	0.67	0.09	214.1	208.4	197.7	183.4	155.3	214.1	208.4	1	2	1	OK	
73	2001	1	96	0.293	0.528	0.050	8	0.198	104	2.02	1.55	0.80	0.10	230.0	227.2	219.2	206.3	180.8	230.0	227.2	1	2	1	OK	
73	2002	1	94	0.245	0.517	0.046	8	0.135	102	2.01	1.62	0.79	0.09	232.4	229.7	221.4	208.7	183.6	232.4	229.7	1	2	1	OK	
73	2003	1	98	0.224	0.432	0.050	6	0.154	104	2.02	1.66	0.73	0.10	224.0	219.9	210.2	196.8	170.4	224.0	219.9	1	2	1	OK	
73	2004	1	128	0.219	0.483	0.047	16	0.177	144	2.16	1.67	0.77	0.15	246.8	246.4	239.5	228.5	205.5	246.8	246.4	1	2	1	OK	
73	2005	2	146	0.228	0.647	0.054	19	0.168	165	2.22	1.65	0.87	0.16	271.5	275.1	271.4	262.8	243.7	275.1	271.5	2	1	2-	OK	
73	2006	2	132	0.237	0.848	0.065	16	0.194	148	2.17	1.64	0.98	0.18	284.7	290.6	288.9	281.5	264.7	290.6	288.9	2	3	2+	OK	
73	2007	3	167	0.343	1.151	0.108	33	0.554	200	2.30	1.48	1.10	0.32	312.0	323.2	326.0	321.8	309.2	326.0	323.2	3	2	3-	OK	
73	2008	3	210	0.238	0.987	0.081	13	0.190	223	2.35	1.63	1.04	0.20	313.8	324.4	326.1	321.7	309.1	326.1	324.4	3	2	3-	OK	
73	2009	3	169	0.202	1.047	0.087	52	0.258	221	2.34	1.70	1.06	0.23	322.3	334.1	336.5	332.9	321.8	336.5	334.1	3	2	3-	OK	
73	2010	3	171	0.231	1.028	0.076	23	0.326	194	2.29	1.65	1.05	0.23	311.7	322.0	323.6	319.0	306.3	323.6	322.0	3	2	3-	OK	
74	2000	4	193	0.106	1.148	0.210	145	0.316	338	2.53	1.98	1.10	0.37	366.7	385.0	391.0	392.4	388.5	392.4	391.0	4	3	4-	OK	
74	2001	4	223	0.118	1.194	0.195	170	0.298	393	2.59	1.93	1.11	0.36	373.0	392.4	399.5	401.4	398.2	401.4	399.5	4	3	4-	OK	
74	2002	4	196	0.121	1.032	0.164	134	0.274	330	2.52	1.92	1.05	0.32	353.6	369.9	374.7	374.6	368.4	374.7	374.6	3	4	3+	Non	Oui
74	2003	3	125	0.196	1.302	0.185	79	0.282	204	2.31	1.72	1.15	0.34	336.8	351.2	355.6	353.8	345.4	355.6	353.8	3	4	3+	OK	
74	2004	4	203	0.156	1.106	0.180	151	0.242	354	2.55	1.81	1.08	0.33	355.2	372.2	377.8	378.0	371.9	378.0	377.8	4	3	4-	OK	
74	2005	4	189	0.166	1.023	0.198	133	0.194	322	2.51	1.79	1.05	0.34	343.7	358.9	363.4	362.5	354.6	363.4	362.5	3	4	3+	Non	Oui
74	2006	4	154	0.171	0.960	0.194	111	0.227	265	2.42	1.77	1.03	0.34	329.9	342.9	345.8	343.6	333.7	345.8	343.6	3	4	3+	Non	Oui
74	2007	4	223	0.209	1.287	0.198	185	0.257	408	2.61	1.69	1.14	0.35	364.9	384.0	391.7	392.9	388.1	392.9	391.7	4	3	4-	OK	
74	2008	4	252	0.235	1.198	0.221	198	0.285	450	2.65	1.64	1.11	0.38	361.2	379.9	387.4	388.5	383.0	388.5	387.4	4	3	4-	OK	
74	2009	4	222	0.174	1.134	0.209	177	0.243	399	2.60	1.77	1.09	0.36	359.7	377.6	384.1	384.9	379.4	384.9	384.1	4	3	4-	OK	
74	2010	4	192	0.177	1.151	0.211	164	0.269	356	2.55	1.76	1.10	0.37	355.3	372.6	378.6	379.0	372.9	379.0	378.6	4	3	4-	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi90	Bgrad90	Haussees	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi90)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
75	2000	3	117	0.237	0.968	0.095	27	0.165	144	2.16	1.64	1.03	0.21	293.4	300.8	300.2	293.7	278.5	300.8	300.2	2	3	2+	Non	Oui
75	2001	3	156	0.231	1.041	0.090	50	0.166	206	2.31	1.65	1.06	0.21	315.0	325.8	327.7	323.3	311.1	327.7	325.8	3	2	3-	OK	
75	2002	3	119	0.240	0.988	0.082	44	0.131	163	2.21	1.63	1.04	0.19	299.7	308.0	308.2	302.2	287.7	308.2	308.0	3	2	3-	OK	
75	2003	2	78	0.304	1.093	0.094	19	0.211	97	1.99	1.53	1.08	0.23	278.2	283.6	282.1	274.0	256.8	283.6	282.1	2	3	2+	OK	
75	2004	3	136	0.230	0.901	0.087	40	0.136	176	2.25	1.65	1.00	0.20	297.7	305.7	305.4	299.3	284.5	305.7	305.4	2	3	2+	Non	Oui
75	2005	3	135	0.206	0.814	0.089	43	0.138	178	2.25	1.70	0.96	0.20	294.0	301.2	300.1	293.8	278.3	301.2	300.1	2	3	2+	Non	Oui
75	2006	2	115	0.222	0.802	0.086	35	0.159	150	2.18	1.66	0.96	0.20	283.3	289.0	286.8	279.4	262.4	289.0	286.8	2	3	2+	OK	
75	2007	3	143	0.225	1.227	0.091	51	0.166	194	2.29	1.66	1.12	0.21	325.0	337.3	340.5	336.9	326.4	340.5	337.3	3	2	3-	OK	
75	2008	3	188	0.242	1.009	0.107	65	0.178	253	2.40	1.63	1.04	0.23	320.9	332.8	335.4	331.8	320.3	335.4	332.8	3	2	3-	OK	
75	2009	3	144	0.208	1.029	0.098	51	0.183	195	2.29	1.69	1.05	0.22	314.7	325.3	326.9	322.5	310.4	326.9	325.3	3	2	3-	OK	
75	2010	3	126	0.209	1.120	0.091	32	0.143	158	2.20	1.69	1.09	0.20	311.1	321.1	322.3	317.4	304.9	322.3	321.1	3	2	3-	OK	
76	2001	4	543	0.284	0.914	0.357	485	0.514	1028	3.01	1.56	1.01	0.52	375.0	396.5	406.0	409.4	405.2	409.4	406.0	4	3	4-	OK	
76	2002	4	360	0.286	1.209	0.232	310	0.345	670	2.83	1.56	1.12	0.40	374.6	395.7	405.3	407.9	404.0	407.9	405.3	4	3	4-	OK	
76	2003	5	541	0.020	1.247	0.240	461	0.312	1002	3.00	2.71	1.13	0.40	466.0	497.5	510.7	521.9	533.3	533.3	521.9	5	4	5	OK	
76	2004	5	522	0.026	1.252	0.230	471	0.326	993	3.00	2.58	1.13	0.39	458.1	488.8	501.8	512.2	522.2	522.2	512.2	5	4	5	OK	
76	2005	5	597	0.026	1.238	0.186	551	0.277	1148	3.06	2.59	1.13	0.34	463.7	495.2	508.6	519.4	530.1	530.1	519.4	5	4	5	OK	
76	2006	5	509	0.032	1.210	0.169	427	0.248	936	2.97	2.50	1.12	0.32	446.8	475.9	487.9	497.0	505.1	505.1	497.0	5	4	5	OK	
76	2007	5	447	0.031	1.327	0.172	389	0.262	836	2.92	2.51	1.15	0.33	449.2	478.7	491.1	500.3	509.0	509.0	500.3	5	4	5	OK	
76	2008	5	516	0.035	1.404	0.296	457	0.384	973	2.99	2.46	1.18	0.46	458.7	490.2	504.2	514.9	525.1	525.1	514.9	5	4	5	OK	
76	2009	5	544	0.038	1.492	0.213	492	0.332	1036	3.02	2.42	1.20	0.38	462.7	494.7	509.3	520.1	530.7	530.7	520.1	5	4	5	OK	
76	2010	5	579	0.028	1.569	0.257	522	0.550	1101	3.04	2.56	1.22	0.45	478.4	512.7	528.4	541.0	554.3	554.3	541.0	5	4	5	OK	
77	2004	4	526	0.290	0.962	0.484	395	0.719	921	2.96	1.55	1.03	0.62	374.4	396.1	405.8	409.5	405.5	409.5	405.8	4	3	4-	OK	
77	2005	4	485	0.290	0.883	0.293	301	0.727	786	2.90	1.55	0.99	0.50	360.0	379.1	386.9	388.7	382.4	388.7	386.9	4	3	4-	OK	
77	2006	4	616	0.292	0.925	0.505	414	0.894	1030	3.01	1.55	1.01	0.65	376.7	398.8	408.8	412.9	409.2	412.9	409.2	4	5	4+	OK	
77	2007	4	538	0.305	0.866	0.378	258	0.886	796	2.90	1.53	0.99	0.58	358.7	377.9	385.7	387.8	381.3	387.8	385.7	4	3	4-	OK	
77	2008	4	658	0.221	0.916	0.520	471	1.883	1129	3.05	1.66	1.01	0.74	388.5	412.3	423.0	428.7	427.0	428.7	427.0	4	5	4+	OK	
77	2009	5	893	0.241	1.131	0.641	732	1.189	1625	3.21	1.63	1.09	0.73	417.4	446.0	460.4	468.9	471.4	471.4	468.9	5	4	5	OK	
77	2010	5	1013	0.236	1.123	0.664	865	1.444	1878	3.27	1.64	1.09	0.76	424.2	453.9	469.1	478.4	481.9	481.9	478.4	5	4	5	OK	
78	2004	3	643	0.261	0.537	0.201	516	0.315	1159	3.06	1.60	0.80	0.37	344.0	359.9	364.9	365.0	355.2	365.0	364.9	4	3	4-	Non	Oui
78	2005	3	507	0.237	0.490	0.114	382	0.219	889	2.95	1.64	0.77	0.25	327.3	340.2	342.7	340.6	328.4	342.7	340.6	3	4	3+	OK	
78	2006	3	569	0.278	0.545	0.349	460	0.349	1029	3.01	1.57	0.81	0.49	339.6	355.3	360.1	360.3	350.2	360.3	360.1	4	3	4-	Non	Oui
78	2007	3	474	0.300	0.554	0.112	282	0.267	756	2.88	1.54	0.82	0.26	322.2	334.6	337.3	334.7	321.8	337.3	334.7	3	4	3+	OK	
78	2008	3	478	0.377	0.554	0.144	319	0.266	797	2.90	1.44	0.82	0.30	319.1	331.4	334.4	331.7	318.2	334.4	331.7	3	4	3+	OK	
78	2009	3	467	0.345	0.529	0.129	284	0.264	751	2.88	1.48	0.80	0.28	315.5	327.1	329.3	326.2	312.1	329.3	327.1	3	2	3-	OK	
78	2010	3	402	0.365	0.597	0.138	210	0.373	612	2.79	1.45	0.84	0.31	313.4	324.9	327.2	323.9	309.9	327.2	324.9	3	2	3-	OK	

N° station	Année	Classement par expertise	Valeurs des paramètres pris en compte dans l'analyse discriminante							Valeurs transformées des paramètres				Reclassement par l'analyse discriminante											
			Baisses	Bqbase10	Bampi190	Bgrad90	Hausse	Hgrad90	NbTot	Log(NbTot)	Log(1+10/Bq base10)	Log(1+10*Bampi190)	Log(1+5*Bgrad90+Hgrad90)	Score des fonctions de classement					Score maximum	2eme score	1 ^{ere} Classe	2 ^{nde} Classe	Classe finale	Adequation avec le classement par expertise	Sinon adéquat de la 2 ^{nde} classe
														Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5							
79	2008	1	209	0.429	0.486	0.051	8	0.148	217	2.34	1.39	0.77	0.10	247.2	247.7	242.5	231.6	207.7	247.7	247.2	2	1	2-	Non	Oui
79	2009	1	216	0.447	0.413	0.051	8	0.118	224	2.35	1.37	0.71	0.10	237.1	236.0	229.6	217.8	192.3	237.1	236.0	1	2	1	OK	
79	2010	1	195	0.456	0.395	0.047	4	0.117	199	2.30	1.36	0.69	0.09	228.5	226.0	218.6	205.9	179.1	228.5	226.0	1	2	1	OK	
80	2008	1	206	0.245	0.285	0.150	9	0.241	215	2.33	1.62	0.59	0.24	230.1	227.4	218.5	206.8	180.6	230.1	227.4	1	2	1	OK	
80	2009	2	305	0.260	0.307	0.243	141	0.545	446	2.65	1.60	0.61	0.44	267.5	271.3	267.2	260.1	239.3	271.3	267.5	2	1	2-	OK	
80	2010	2	278	0.276	0.362	0.264	186	0.738	464	2.67	1.57	0.66	0.49	278.1	283.9	281.3	275.5	256.4	283.9	281.3	2	3	2+	OK	
81	2008	5	413	0.125	2.581	0.764	216	2.375	629	2.80	1.91	1.43	0.86	455.7	489.9	508.2	520.1	530.6	530.6	520.1	5	4	5	OK	
81	2009	5	368	0.169	2.449	1.096	122	1.867	490	2.69	1.78	1.41	0.92	433.5	464.8	481.4	491.4	498.6	498.6	491.4	5	4	5	OK	
81	2010	5	235	0.200	2.506	0.915	71	2.348	306	2.49	1.71	1.42	0.90	409.8	437.4	451.7	459.2	463.1	463.1	459.2	5	4	5	OK	
82	2006	3	347	0.147	0.678	0.142	100	0.933	447	2.65	1.84	0.89	0.42	333.5	347.1	349.7	348.5	338.7	349.7	348.5	3	4	3+	OK	
82	2007	3	403	0.179	0.632	0.174	86	0.834	489	2.69	1.76	0.86	0.43	327.6	340.5	342.9	341.3	330.3	342.9	341.3	3	4	3+	OK	
82	2008	2	246	0.192	0.680	0.157	29	0.927	275	2.44	1.72	0.89	0.43	305.3	314.8	314.9	310.9	297.1	314.9	314.8	3	2	3-	Non	Oui
82	2009	2	253	0.149	0.729	0.135	42	0.884	295	2.47	1.83	0.92	0.41	319.7	331.1	332.2	329.5	318.0	332.2	331.1	3	2	3-	Non	Oui
82	2010	2	200	0.134	0.678	0.118	36	0.749	236	2.37	1.88	0.89	0.37	307.1	316.1	315.5	311.3	298.0	316.1	315.5	2	3	2+	OK	
84	2008	2	52	0.240	1.173	0.306	0	0.000	52	1.72	1.63	1.10	0.40	264.1	267.4	264.1	255.1	236.8	267.4	264.1	2	1	2-	OK	
84	2009	2	51	0.184	0.842	0.275	0	0.000	51	1.71	1.74	0.97	0.38	246.2	246.1	239.6	229.0	207.8	246.2	246.1	1	2	1	Non	Oui
84	2010	2	37	0.220	1.002	0.340	0	0.000	37	1.57	1.67	1.04	0.43	240.4	239.8	233.4	222.3	200.6	240.4	239.8	1	2	1	Non	Oui
85	2008	1	43	0.311	0.880	0.256	0	0.000	43	1.63	1.52	0.99	0.36	227.8	225.5	218.3	205.7	181.6	227.8	225.5	1	2	1	OK	
85	2009	1	28	0.364	0.548	0.176	0	0.000	28	1.45	1.45	0.81	0.27	171.1	159.6	145.8	127.5	94.5	171.1	159.6	1	2	1	OK	
85	2010	1	21	0.424	0.733	0.145	0	0.000	21	1.32	1.39	0.92	0.24	173.7	162.9	150.0	131.6	99.3	173.7	162.9	1	2	1	OK	