



HAL
open science

Caractérisation des altérations physiques et de leurs conséquences écologiques sur les rivières du bassin Seine-Normandie. Phase I: cours d'eau de la craie

Jérôme Belliard, Marie-Bernadette Albert, Frédéric Gob, Amandine Zahm,
Eric Sauquet, Clotaire Catalogne

► To cite this version:

Jérôme Belliard, Marie-Bernadette Albert, Frédéric Gob, Amandine Zahm, Eric Sauquet, et al.. Caractérisation des altérations physiques et de leurs conséquences écologiques sur les rivières du bassin Seine-Normandie. Phase I: cours d'eau de la craie. [Rapport Technique] irstea. 2009, pp.122. hal-02594478

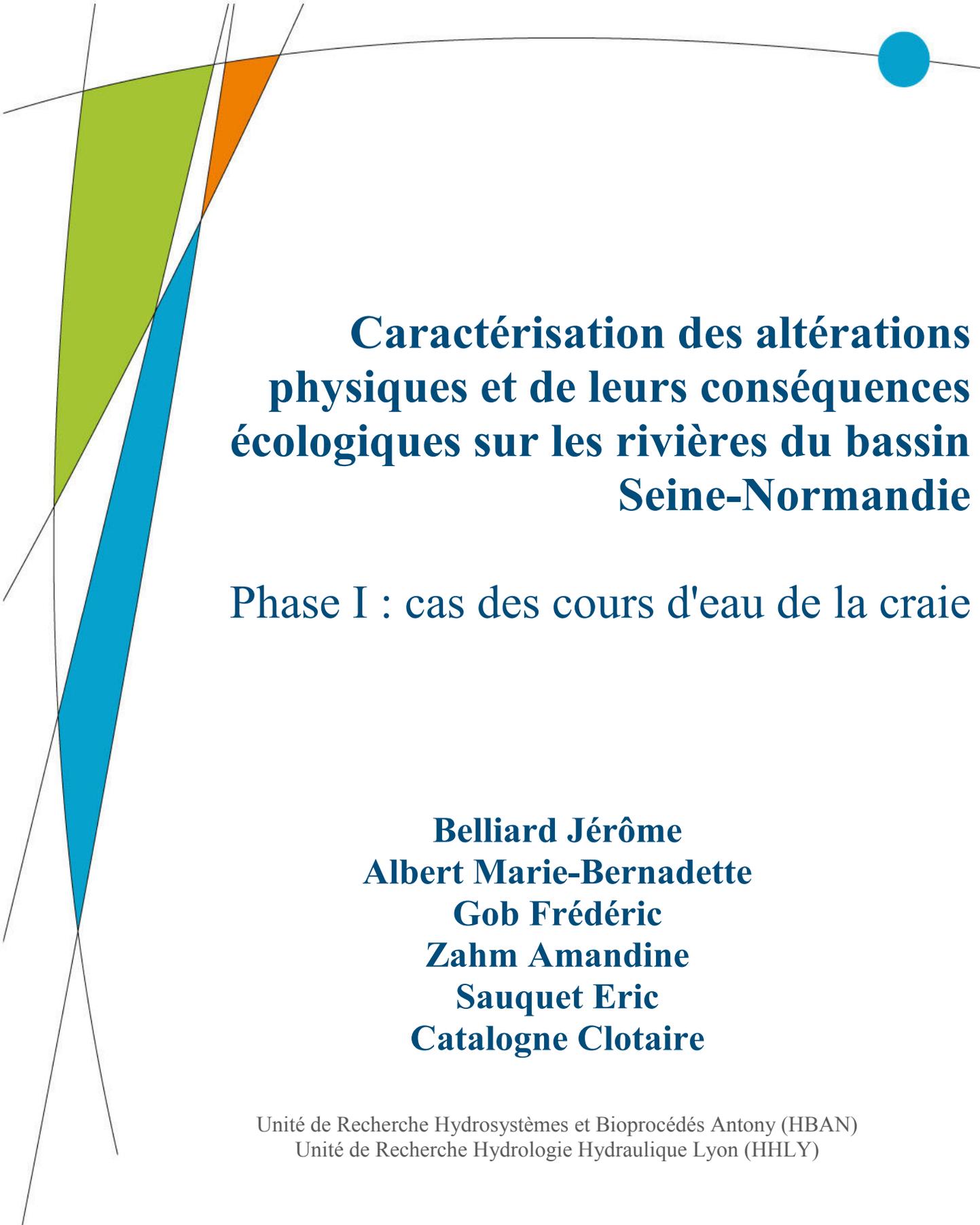
HAL Id: hal-02594478

<https://hal.inrae.fr/hal-02594478>

Submitted on 15 May 2020

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.



Caractérisation des altérations physiques et de leurs conséquences écologiques sur les rivières du bassin Seine-Normandie

Phase I : cas des cours d'eau de la craie

**Belliard Jérôme
Albert Marie-Bernadette
Gob Frédéric
Zahm Amandine
Sauquet Eric
Catalogne Clotaire**

Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés Antony (HBAN)
Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique Lyon (HHLy)



Caractérisation des altérations physiques et de leurs conséquences écologiques sur les rivières du bassin Seine-Normandie

Phase I : cas des cours d'eau de la craie

Convention d'aide financière 071564 AESN / Cemagref

Rapport final 1^{ère} phase – octobre 2009

Ont participé à l'étude :

Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés - Antony, équipe Hydroécologie Fluviale :

Jérôme BELLIARD
Frédéric GOB
Marie-B. ALBERT
Amandine ZAHM
Guillaume GORGES
Daniel MIRA
Guilherm JAN
Evelyne TALÈS

Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique – Lyon, équipe Hydrologie des Bassins Versants :

Eric SAUQUET
Clotaire CATALOGNE

Résumé

La présente étude vise à améliorer les connaissances concernant les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau du bassin Seine-Normandie. Plus précisément elle s'articule autour des trois questions suivantes : (1) déterminer les caractéristiques morphologiques des cours d'eau en situation naturelle et identifier les facteurs qui les contrôlent, (2) estimer dans quelle mesure les aménagements anthropiques modifient ces caractéristiques physiques et (3) évaluer si les altérations physiques des cours d'eau s'accompagnent ou non de modifications au niveau de communautés biologiques.

Ces questions ont été abordées sur une partie relativement homogène du bassin correspondant aux formations géologiques crayeuses rencontrées à la fois à l'Est (Champagne et régions adjacentes) et à l'ouest (Normandie) du territoire de l'Agence Seine-Normandie, l'objectif à plus long terme étant de couvrir l'ensemble du bassin. Sur cette zone d'étude, 29 sites naturels et 11 sites dégradés (rectifications ou recalibrages) ont été sélectionnés et ont été décrits du point de vue de leurs caractéristiques physiques et du substrat. Le travail consacré aux impacts biologiques a été restreint à une partie seulement de ces stations (10 sites naturels et 10 sites dégradés) et s'est focalisé sur les peuplements piscicoles.

Dans un premier temps, le rapport présente le protocole de mesure des caractéristiques physiques mis en œuvre pour le suivi des sites.

Un travail spécifique visant à décrire l'hydrologie des cours de la Craie du bassin Seine-Normandie a par ailleurs été mené.

Les résultats obtenus ont permis de définir les valeurs observées pour quelques descripteurs physiques pour les tronçons de cours d'eau naturels. Des modèles statistiques reliant ces descripteurs à des variables globales (surface de bassin, région, importance des crues) permettent (1) d'entrevoir les facteurs naturels qui contrôlent la morphologie des cours d'eau et (2) de prédire dans une certaine mesure les valeurs caractéristiques physiques des cours d'eau en situation naturelles. Les travaux menés plus spécifiquement sur le substrat tendent à prouver que sur ce type de cours d'eau, la charge de fond reste peu ou pas mobilisable y compris pour des valeurs de débit atteignant le plein bord.

Pour certaines caractéristiques physiques (débit de plein bord, profondeur des mouilles, largeur, ratio largeur/profondeur) les valeurs observées en moyenne sur les cours d'eau dégradés s'écartent sensiblement de celles observées sur les cours d'eau naturels, mais, pour les descripteurs concernés, les gammes de valeurs observées restent toutefois largement chevauchantes entre sites naturels et dégradés. La prise en compte conjointe de plusieurs descripteurs permet en revanche de distinguer sans ambiguïté les sites naturels des sites dégradés sur la seule base de leurs caractéristiques physiques.

Les impacts des dégradations physiques des cours d'eau sur la structure des peuplements de poissons ont été abordés par le biais des indices poissons français (IPR) et européen (EFI). Ces impacts n'apparaissent pas de manière systématique et restent en général d'ampleur limitée. Ce résultat demande néanmoins confirmation en raison du faible nombre de stations abordées dans cette première phase de l'étude.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Introduction | 7 |
| 1 Méthodes | 9 |
| 1.1 Problématique..... | 9 |
| 1.2 Choix des descripteurs | 10 |
| 1.2.1 Descripteurs synthétiques de l'hydromorphologie | 10 |
| 1.2.2 Descripteurs de l'hydrologie..... | 13 |
| 1.2.3 Descripteurs de la granulométrie..... | 15 |
| 1.2.4 Descripteurs complémentaires de l'habitat : abris, ripisylve... .. | 16 |
| 1.3 Protocole de terrain associé : | 17 |
| 1.4 Région étudiée..... | 21 |
| 1.4.1 Caractéristiques générales des cours d'eau de la craie | 21 |
| 1.4.2 Caractéristiques hydrologiques (étude exploratoire)..... | 24 |
| 1.5 Sélection des stations étudiées | 41 |
| 1.6 Reconstitution des variables hydrologiques caractéristiques en sites non jaugés | 46 |
| 1.6.1 Ecoulements annuels | 46 |
| 1.6.2 Courbes des débits classés..... | 47 |
| 1.6.3 Débits instantanés de période de retour 2 ans | 48 |
| 1.7 Données piscicoles | 48 |
| 2 Résultats | 50 |
| 2.1 Test du protocole..... | 50 |
| 2.2 Hydrologie..... | 52 |
| 2.3 Morphologie | 53 |
| 2.3.1 Débits de plein bord | 54 |
| 2.3.2 Autres caractéristiques morphologiques | 60 |
| 2.3.3 Diversité des formes du lit | 62 |
| 2.4 Substrat..... | 65 |
| 2.4.1 Caractéristiques du substrat..... | 65 |
| 2.4.2 Dynamique du substrat..... | 68 |
| 2.4.3 Puissance spécifique à plein bord..... | 71 |
| 2.5 Distinction entre situations naturelles et altérées sur la base de critères physiques. | 73 |
| 2.5.1 Démarche | 73 |
| 2.5.2 Résultats | 75 |
| 2.6 Peuplements de poissons | 79 |
| Conclusions et perspectives après la 1ère phase | 86 |
| Bibliographie..... | 89 |
| Liste des figures et des tableaux..... | 92 |
| Liste des annexes..... | 96 |

Introduction

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) en cours de mise en œuvre définit un nouveau contexte en matière de politique de l'eau reposant notamment sur une gestion globale et intégrée des milieux aquatiques. Pour ce qui concerne les cours d'eau, la DCE vise à l'atteinte d'un bon état écologique à l'horizon 2015¹, objectif défini pour l'essentiel sur la base de la situation des communautés biologiques en place, les caractéristiques physicochimiques de l'eau, l'hydrologie et la morphologie des cours d'eau étant considérés comme les facteurs de contrôle ("supports") des communautés vivantes. Parmi les différents compartiments (biologiques, chimiques et physiques) susceptibles d'être utilisés pour caractériser l'état des cours d'eau, ceux relevant des caractéristiques hydromorphologiques sont sans doute actuellement les moins bien connus au niveau du territoire français et plus particulièrement sur le bassin Seine-Normandie.

Pour autant, de nombreux travaux témoignent de l'importance des caractéristiques physiques des cours d'eau pour façonner les communautés vivantes en place. Certains d'entre eux montrent en particulier que l'action de l'homme, en transformant les caractéristiques physiques des cours d'eau est susceptible d'induire des modifications parfois très importantes des communautés animales ou végétales.

Dans ce contexte, sous l'impulsion du Ministère chargé de l'environnement, le Cemagref a défini les bases d'un audit sur la qualité physique des cours d'eau (SYRAH) actuellement en cours de réalisation à l'échelle de la France. Au terme de ce travail, le SYRAH, sur la base d'une analyse des pressions repérables à partir d'outils cartographiques (principaux obstacles, rectifications du cours, atteinte à la ripisylve, urbanisation du bassin versant, etc.) offrira un état des lieux global des cours d'eau français permettant la mise en évidence des principales sources d'altérations physiques. Cet outil permettra, in fine, un repérage à grande échelle des zones présentant potentiellement les risques d'altération les plus forts et devrait faciliter la définition de secteurs prioritaires nécessitant une intervention pour un retour au bon état écologique.

Au-delà de cette étape d'identification des secteurs de cours d'eau potentiellement altérés sur le plan physique, la mise en œuvre de démarches efficaces de restauration de l'état écologique dans les cours d'eau passe par une meilleure connaissance des caractéristiques physiques des cours d'eau en situation naturelle et une clarification préalable des liens entre altérations physiques et qualité écologique impliquant nécessairement une approche des phénomènes à une échelle plus locale.

C'est sur la base de ce constat et de l'identification des besoins en termes de connaissances qui en découlent que le présent projet a été défini². En premier lieu, ce projet, en se basant sur des variables de réponse calculées à l'échelle du tronçon tels le débit plein bord³, les relations de géométrie hydraulique et le substrat, vise à déterminer les caractéristiques morphologiques des cours d'eau en situation naturelle (c'est-à-dire peu influencée par l'action de l'homme) et examiner dans quelle mesure ces caractéristiques obéissent à des modèles régionaux ou, au contraire, dépendent de contraintes locales. Dans un second temps, à partir de l'étude de situations altérées, ce projet cherche à évaluer les modifications des caractéristiques physiques des cours d'eau induites par les aménagements anthropiques en comparaison avec les situations de référence définies précédemment. Le troisième volet de ce projet cherche à

¹ Pour certains cours d'eau, compte tenu des conditions naturelles locales et des activités humaines en jeu, des reports de délais et/ou des objectifs différents (bon potentiel écologique) peuvent être envisagés.

² Ce projet s'intègre dans l'accord cadre de coopération entre le Cemagref et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

³ Débit atteint par le cours d'eau juste avant son débordement dans la plaine alluviale ; voir paragraphe 1.2.1 pour plus de précisions.

déterminer de quelle manière les altérations physiques des cours d'eau s'accompagnent ou non de modifications au niveau de communautés biologiques.

En abordant ces questions, ce projet vise d'une part à combler les lacunes concernant la connaissance des caractéristiques physiques des cours d'eau du bassin Seine-Normandie en lien avec les communautés vivantes qu'elles abritent et, d'autre part, à fournir des éléments qui permettront d'orienter et d'optimiser les actions de gestion et de restauration des cours d'eau.

A terme, ce projet a vocation à aborder l'intégralité du territoire du bassin Seine-Normandie. Dans le cadre de la présente convention d'étude, le travail a volontairement été limité à une partie du bassin relativement homogène du point de vue géologique et correspondant aux formations crayeuses rencontrées à la fois dans la région champenoise et en Normandie.

De même le volet consacré aux communautés biologiques a été restreint aux communautés de poissons même si le travail déjà engagé permet d'envisager les possibilités d'un élargissement à d'autres communautés et notamment aux macro-invertébrés.

Le présent document constitue un rapport d'étape présentant l'avancement du projet. Il fournit notamment des éléments concernant le choix des sites d'étude, les protocoles de mesure mis en œuvre et les premiers résultats obtenus.

1 Méthodes

1.1 Problématique

L'habitat aquatique, défini comme l'espace physique utilisé par les organismes pour accomplir leurs différentes fonctions vitales, est contrôlé, à différentes échelles de temps, par le régime hydrologique (Figure 1). Sur le court terme, à travers les variations des conditions hydrauliques (hauteur d'eau, vitesse ...), le débit affecte directement les processus biologiques et notamment la répartition des organismes à l'intérieur du cours d'eau. Sur le long terme, le régime hydrologique en lien notamment avec les épisodes de crues, façonne et maintient la morphologie du lit mineur et du substrat.

La morphologie des cours d'eau alluviaux est déterminée par l'interaction entre l'écoulement et les matériaux érodables. Cette interaction gouverne alors les processus de mise en mouvement, de transport - par charriage ou suspension - et de dépôts dans le lit mineur et la plaine d'inondation.

Lorsque les flux hydriques et sédimentaires sont globalement constants (réguliers), ce système d'auto-ajustement morphologique conduit à une situation d'équilibre dynamique du cours d'eau qui se caractérise par une instabilité locale mais une stabilité globale de la morphologie du cours d'eau à l'échelle du tronçon.

En revanche l'action de l'homme en agissant directement sur la morphologie du cours d'eau ou en modifiant les conditions de flux hydrique ou sédimentaire rompt l'équilibre dynamique naturel et peut aboutir soit à une situation de déséquilibre durable, soit via la mise en place de nouveaux processus d'auto-ajustement à une nouvelle situation d'équilibre différente de la situation initiale.

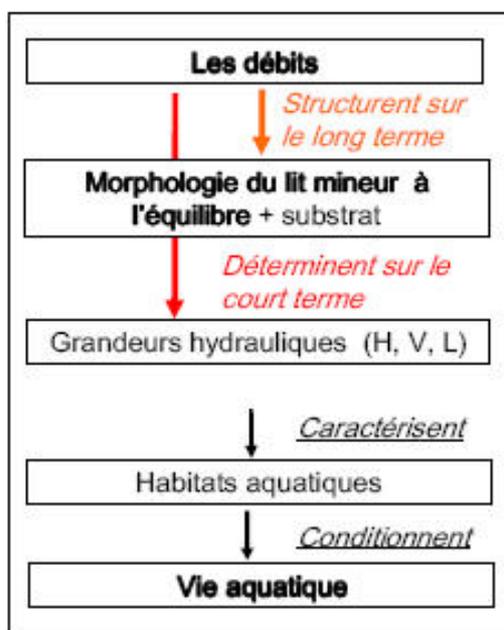


Figure 1 : Représentation simplifiée des différents niveaux de contrôle des débits sur la morphologie des cours d'eau et l'habitat des organismes aquatiques (d'après O. Navratil)

Sur cette base, et en s'inspirant des travaux développés par O. Navratil (2005), notre projet se propose d'aborder, à l'échelle de tronçons de cours d'eau, un ensemble de descripteurs morphologiques et notamment le débit de pleins bords, les relations de géométrie hydraulique et le substrat.

Dans un premier temps, en étudiant ces descripteurs sur un ensemble de stations ne subissant pas (ou n'ayant pas subi) de transformations anthropiques significatives, et supposées a priori en situation d'équilibre dynamique, notre objectif est de déterminer les caractéristiques morphologiques des cours d'eau en situation de référence, et de comprendre comment ces caractéristiques évoluent de l'amont vers l'aval, en fonction du contexte régional ou de contraintes locales.

Dans un second temps, en abordant ces mêmes descripteurs sur un ensemble de stations transformées par l'homme, nous cherchons à déterminer comment et avec quelle ampleur la morphologie des cours d'eau peut être affectée.

Enfin en travaillant sur un ensemble de stations naturelles et altérées couplant données morphologiques et données biologiques nous cherchons à déterminer comment les altérations de la morphologie du cours d'eau peuvent se traduire au niveau des communautés vivantes.

1.2 Choix des descripteurs

Les descripteurs doivent répondre à plusieurs exigences :

- ils doivent permettre de faire le lien entre les variables de contrôle du fonctionnement physique des cours d'eau, dont la plupart se situent à l'échelle du bassin versant, et les variables de réponse biologiques qui se situent à l'échelle de l'habitat. Ce lien passe par les débits, qui expriment la production du bassin versant et façonnent le lit des cours d'eau et les habitats.
- ils doivent aussi permettre de distinguer, dans les différences entre cours d'eau, ce qui relève de la variabilité naturelle et ce qui relève d'altérations anthropiques.

Nous nous sommes donc orientés vers une "panoplie" de descripteurs synthétiques issus d'une part des connaissances acquises en géomorphologie et hydraulique fluviales sur les mécanismes d'ajustement du lit en rivières alluviales « naturelles » et d'autre part des descripteurs locaux des conditions d'habitat physique (substrat, abris, ripisylve...) qu'on sait très importants pour la biologie.

1.2.1 Descripteurs synthétiques de l'hydromorphologie

Ces descripteurs, ainsi que le protocole de mesure associé, ont déjà été testés dans le cadre d'une thèse de doctorat effectuée au Cemagref Lyon par Oldrich Navratil (2005). Ce travail avait débouché sur le choix d'une échelle de description (échelle stationnelle) et de deux descripteurs synthétiques de la morphologie du lit à cette échelle : le débit de plein bord et la géométrie hydraulique.

1.2.1.1 *Choix de l'échelle de description :*

Les cours d'eau façonnés en conditions naturelles présentent une variabilité spatiale de leur morphologie et des conditions d'habitat mais une variabilité qui n'est pas due au hasard : elle est structurée par une alternance régulière de faciès résultant de l'auto-ajustement du lit sous l'action de la dissipation d'énergie hydraulique. L'échelle de description des variables hydrauliques et morphologiques doit permettre de décrire cette variabilité spatiale mais aussi de la résumer dans des paramètres moyens représentatifs du tronçon que l'on puisse coupler à l'hydrologie pour décrire la variabilité temporelle.

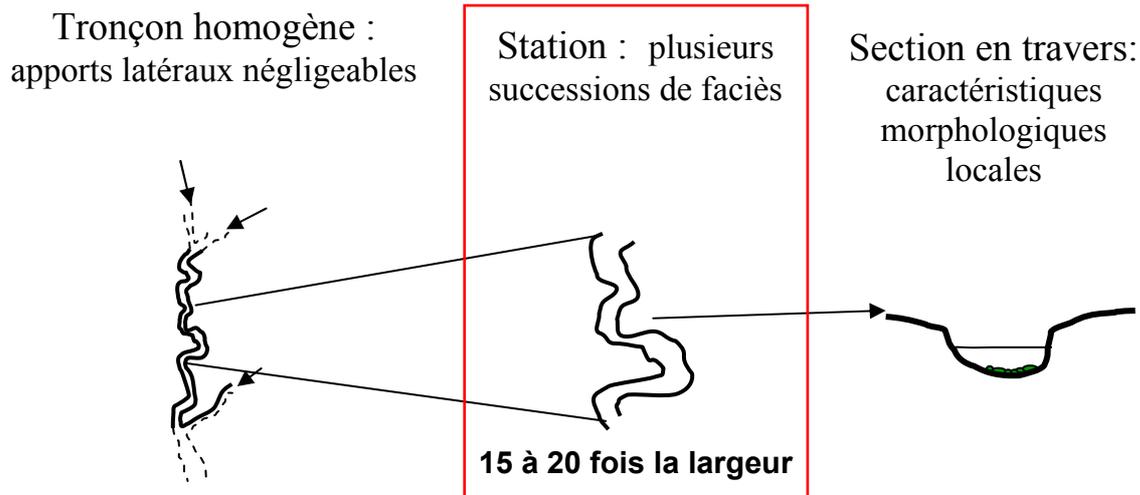


Figure 2 : Echelles de description des variables hydrauliques et morphologiques (d'après O. Navratil)

En cours d'eau "naturels" la prise de mesures sur 20 transects espacés régulièrement d'une distance équivalente à la largeur à plein bord, sur un linéaire de 15 à 20 fois la largeur à plein bord est adéquate pour obtenir des valeurs moyennes stabilisées représentatives du tronçon (si lui-même est homogène en termes d'hydrologie, de géologie, de pente de la vallée, de ripisylve...), et aussi avoir une bonne idée de la variabilité spatiale, même si c'est insuffisant pour stabiliser la variance (Navratil, 2005) (Figure 2). Cela rejoint tout à fait les "standards" utilisés dans les pays anglo-saxons, tant par les géomorphologues que par les hydrobiologistes (c'est l'équivalent de 2 ou 3 séquences radier / mouille). Evidemment ces propriétés de structuration régulière n'existent pas pour les tronçons soumis à des altérations de la morphologie et/ou du régime hydrologique et en toute rigueur on ne peut pas dire qu'un échantillon de longueur donnée puisse être représentatif d'un tronçon anthropisé. Cependant, nous appliquerons quand même le même protocole d'échantillonnage à titre indicatif, pour comparer des sites dégradés et des sites "naturels".

Sauf difficulté pratique, nous réaliserons les mesures sur 20 transects. Des tests seront ensuite réalisés pour comparer les résultats avec seulement 15 transects⁴.

1.2.1.2 le débit de pleins bords (Qpb) :

La valeur du Qpb représente la capacité d'évacuation du lit mineur à plein bord (juste avant débordement dans la plaine alluviale) et caractérise donc globalement la morphologie du lit mineur en intégrant l'effet conjugué de la pente, du gabarit et de la rugosité. Il est à la charnière entre le fonctionnement du bassin versant et le fonctionnement du lit mineur. Il constitue une "variable-clé" de l'hydromorphologie, calculée "en routine" pour toutes les stations de jaugeage et de mesure de terrain sur les cours d'eau aux Etats-Unis.

⁴ Ce principe de description de la morphologie du lit fondée sur des mesures par transects régulièrement espacés sur la station a été repris dans le cadre du protocole CARHY-CE (protocole standardisé d'acquisition de données hydromorphologiques quantitatives sur le terrain) récemment développé sous la coordination de l'ONEMA. Ce protocole constitue une application simplifiée du protocole appliqué dans le cadre de notre étude. Il repose notamment sur des mesures portant sur 15 transects, les tests réalisés à partir de notre travail ayant montré que le passage de 20 à 15 transects affectait peu l'estimation de la plupart des variables morphologiques à l'échelle de la station.



Des relations exprimant une bonne corrélation entre la valeur du Q_{pb} et la surface du bassin versant ont été établies dans des régions ou des types de rivières homogènes par exemple en différenciant sols perméables et imperméables (Petit, Navratil...). En reportant sur les mêmes graphes les valeurs de Q_{pb} obtenues sur des rivières anthropisées (modification de la morphologie à l'aval d'un barrage, modification des débits de crue suite à l'urbanisation par exemple), il a été constaté que ces valeurs s'écartaient notablement du modèle d'ajustement trouvé pour les rivières "naturelles" de la même région. Ceci suggère une utilisation possible des débits à pleins bords pour aider à identifier (voire quantifier) des altérations de la morphologie des cours d'eau.

Un autre intérêt, pour les problématiques de mobilisation du substrat et de restauration, est de calculer la puissance développée par le cours d'eau à ce débit caractéristique.

La fréquence du Q_{pb} permet de resituer celui-ci dans le régime hydrologique du cours d'eau et de caractériser le degré de connexion latérale lit mineur / lit majeur. Ce qui peut être également un indicateur précieux du degré d'altération de l'hydrosystème.

La détermination de la valeur du Q_{pb} se fait par différentes méthodes :

- observation directe si on a la chance d'être présent un jour où l'écoulement se situe à pleins bords
- détermination sur le terrain du niveau "pleins bords" dans chaque transect et mesure des caractéristiques géométriques du lit à ce niveau puis utilisation des relations de géométrie hydraulique établies sur les mesures hydrauliques à deux débits (cf ci-dessous)
- à défaut de disposer de deux situations hydrauliques observées à deux débits différents, estimation à l'aide d'un modèle hydraulique (dans notre cas, le modèle 1D dénommé Fluvia mis au point au Cemagref par Jean-Pierre Baume et Michel Poirson)

1.2.1.3 la géométrie hydraulique :

Permet d'exprimer les variables hydrauliques moyennes dans une section en travers de cours d'eau (largeur mouillée, hauteur d'eau, vitesse...) en fonction du débit et donc de relier la géométrie du lit aux débits et de remonter ainsi au signal hydrologique. Cette méthode à l'origine utilisée à l'échelle d'une section en travers a été étendue à l'échelle d'une station en travaillant sur la section moyenne.

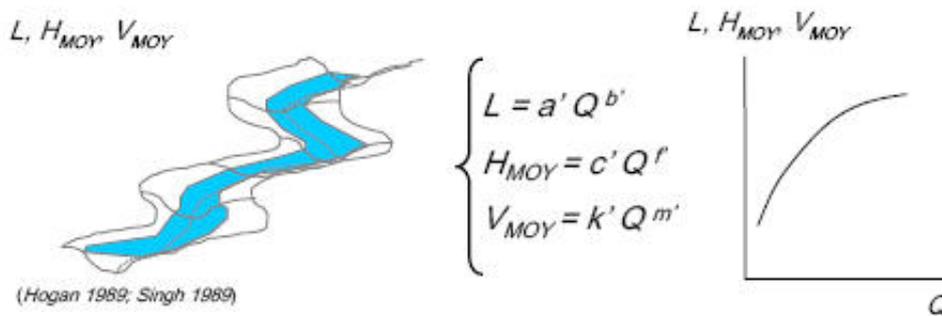


Figure 3 : Relations de géométrie hydraulique (avec L la largeur, H la profondeur et V la vitesse).

En première approximation, on peut ajuster une loi puissance unique entre un débit "nul" et le débit à pleins bords pour décrire l'évolution des différents paramètres hydrauliques dans la section en travers en fonction du débit (Figure 3). Bien entendu, cette relation n'est plus valable au-delà du débordement.

Ces relations de géométrie hydraulique permettent :

- d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des grandeurs hydrauliques et morphologiques (taille, forme de la section en travers)
- de déterminer le Q_{pb} et d'analyser les causes d'écart au Q_{pb} de référence pour les rivières naturelles (enfouissement du lit, élargissement du lit...)
- de fournir les données physiques pour utiliser certains modèles d'habitat (Estimhab)

Elles ont l'avantage de pouvoir être établies uniquement à partir de mesures de terrain. Leur établissement nécessite en principe au moins deux campagnes de mesures hydrauliques à deux débits différents et même aussi différents que possible (un débit de hautes eaux est recommandé pour ne pas extrapoler la courbe trop loin d'un débit observé). Elles peuvent être affinées par des campagnes à d'autres débits comme une courbe de tarage.

Les mesures de terrain doivent permettre de calculer, pour chaque situation observée :

- les largeurs mouillées et les hauteurs d'eau moyennes dans chaque transect
- le débit correspondant (obtenu en réalisant un jaugeage ou par lecture de la hauteur d'eau à l'échelle s'il y a une station pérenne de la banque de données HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) à proximité.

Elles doivent également permettre de calculer les largeurs et profondeurs à pleins bords.

1.2.1.4 Autres descripteurs de la morphologie :

Les données récoltées sur le terrain permettent de tester d'autres descripteurs tels que le rapport Largeur / Profondeur du lit à plein bord ou d'analyser la variabilité du fond (diversité des faciès). La pente du lit mineur et celle de la ligne d'eau sont également des paramètres clés à déterminer.

1.2.2 Descripteurs de l'hydrologie

1.2.2.1 La courbe des débits classés

Les courbes des débits classés (CDC) traduisent en termes de fréquence la probabilité qu'un débit donné soit atteint ou dépassé quel que soit l'instant de l'année (Figure 4).

Dans le but de resituer en fréquence le débit de pleins bords, la courbe des débits classés s'est révélée finalement un bon outil (Navratil 2005, Navratil et al, 2006) compte-tenu de la fréquence souvent élevée du débit de pleins bords estimé (atteint ou dépassé plusieurs jours

par an en moyenne). Cette courbe des débits classés permet de resituer également en fréquence tout débit caractéristique présentant un intérêt pour le fonctionnement physique ou biologique : débit seuil de mise en mouvement des matériaux du lit, débit critique pour telle ou telle fonction biologique...

Nous utilisons deux méthodes pour estimer la courbe des débits classés (CDC) :

- lorsqu'il existe une station HYDRO à proximité immédiate du site d'étude, la CDC est établie directement à partir des chroniques de débit disponibles à cette station

- à défaut, la CDC est reconstituée par une méthode mise au point au Cemagref – Lyon (Catalogne, 2007). Cette méthode utilise un jeu de 129 stations HYDRO validées sur le bassin Seine-Normandie : elle consiste à attribuer la fréquence de débit classé de la station la plus proche pondérée par le rapport des surfaces, la station la plus proche étant définie parmi les 129 stations de référence en fonction de la distance entre centre de gravité des bassins versants du site cible et de la station de référence. La qualité de la reconstitution dépend de la distance à la station de référence (la corrélation des informations de débit et de fréquence au dépassement entre deux sites diminue lorsque la distance croît) et de l'erreur d'estimation des surfaces de bassin versant.

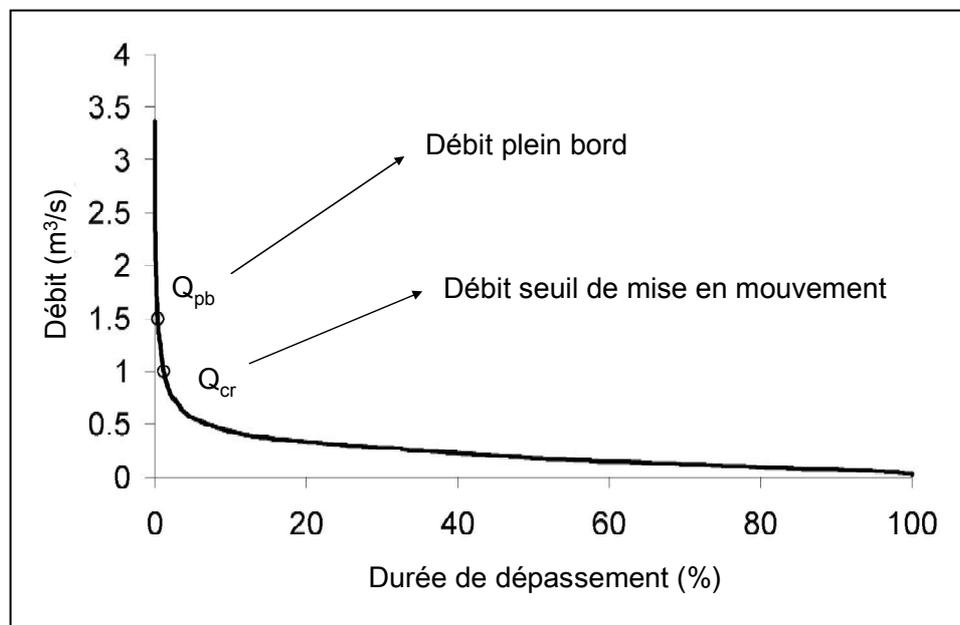


Figure 4 : exemple de courbe de débits classés.

1.2.2.2 L'indice d'écoulement de base (Base Flow Index BFI)

Compte-tenu du rôle important joué par les relations nappe / rivière dans cette région crayeuse, il a paru important de chercher à introduire des descripteurs qui pourraient aider à rendre compte de cet aspect. Le "Base Flow Index" (BFI) a paru un bon candidat...

Le *BFI* est révélateur de l'existence de stocks qui influencent la variabilité du signal de manière plus ou moins prononcée. Cet indicateur varie entre 0 et 100%. Plus il est élevé, plus les stocks sont importants. Sur un bassin pluvial, un *BFI* proche de 100% est révélateur d'une forte composante souterraine sur les débits du cours d'eau. En zone de montagne, un *BFI* élevé peut être obtenu sur des écoulements influencés majoritairement par la fonte des neiges.

Divers algorithmes existent pour estimer la *BFI* à partir d'une série temporelle de débits (Nathan et McMahon, 1990 ; Tallaksen et Van Lanen, 2004). L'algorithme utilisé est celui de (Tallaksen et Van Lanen, 2004). Le débit de base est estimé par interpolation linéaire entre n points constituant les minima locaux de n périodes non recouvrantes d'une durée égale à 5 jours prises sur l'ensemble de la chronique. Le *BFI* est la moyenne des débits de base (courbe en bleu de la figure 5) divisée par le module du cours d'eau.

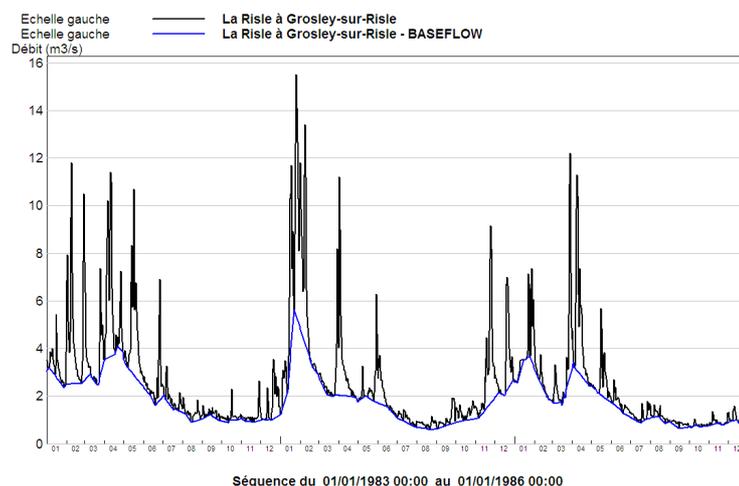


Figure 5 : Exemple de répartition entre débit total (courbe noire) et débit de base (courbe bleue).

1.2.2.3 Autres descripteurs de l'hydrologie :

Seront calculés également les descripteurs classiques suivants : module QA, débit de pointe de la crue de période de retour 2 ans (QIXA2), soit en utilisant directement les chroniques à la station HYDRO lorsqu'il y en a une, soit en reconstituant les valeurs par des méthodes de transfert.

La pluie annuelle moyenne de bassin sera également calculée à partir des données de Météo-France disponibles.

L'étude exploratoire menée sur une cinquantaine de stations HYDRO pour caractériser le fonctionnement hydrologique régional (cf chapitre 1.4.2) et les résultats de l'étude ouvriront sans doute de nouvelles pistes pour la mise au point d'autres descripteurs permettant de mieux appréhender les liens entre hydrologie et morphologie.

1.2.3 Descripteurs de la granulométrie

La taille et les caractéristiques du substrat des rivières étudiées sont également examinées. Le substrat est un élément important qui peut être considéré à la fois comme un paramètre de contrôle et de réponse. La taille et la structure des particules qui composent le fond de la rivière contrôlent en effet les capacités de réponse des cours d'eau aux évolutions naturelles ou anthropiques du système (perturbation du régime hydrologique, arrêt du transit sédimentaire, etc.). Le couplage énergie de la rivière/taille des sédiments conditionne les possibles évolutions morphologiques du lit suite à des perturbations. Une rivière de plaine, à faible énergie, s'écoulant sur un substrat très grossier ne pourra par exemple que très difficilement creuser son lit (incision) pour permettre le passage de crues plus importantes.

Lorsque l'énergie du cours est suffisamment importante pour mettre en mouvement les particules, les caractéristiques du substrat (taille, structure) pourront être modifiées suite aux perturbations subies par le milieu.

Pour permettre de comparer objectivement les cours d'eau et de calculer des puissances spécifiques critiques, en référence aux méthodes éprouvées en géomorphologie fluviale, nous avons choisi de décrire la courbe granulométrique des matériaux de surface constituant les seuils (Figure 6). Ceux-ci reflètent généralement les matériaux du lit les plus couramment transportés.

Cette description est basée sur un échantillonnage statistique : 100 éléments pris à un pas constant déterminé en fonction de la taille des plus gros éléments. Le substrat est généralement caractérisé par le D_{50} (diamètre médian des particules), le D_{90} ou le D_{84} (pour la fraction grossière) et le D_{16} (pour la fraction fine).

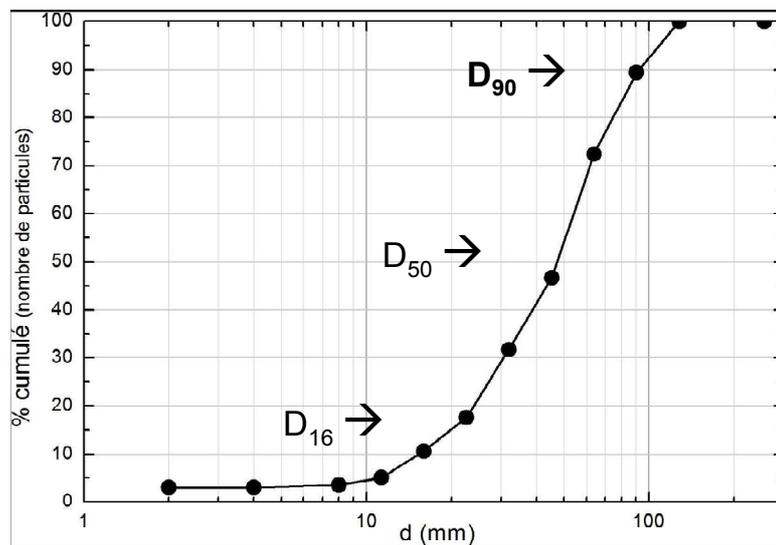


Figure 6 : Exemple de courbe granulométrique.

1.2.4 Descripteurs complémentaires de l'habitat : abris, ripisylve...

En complément des descripteurs hydrauliques et du substrat qui constituent des éléments essentiels pour caractériser l'habitat des espèces de poissons, des indications susceptibles d'influencer fortement la distribution et l'abondance des espèces ont également été notées. Ces indications concernent en particulier la présence d'une ripisylve, l'abondance d'abris (végétation rivulaire, embâcles, végétation aquatique) et l'existence d'un colmatage des fonds par des particules minérales ou organiques ou des développements algaux.

1.3 Protocole de terrain associé :

Objectif : description de 20 transects espacés de Lpb (largeur à plein bord, estimée grossièrement) sur un linéaire de 20 x Lpb, à deux débits différents, un débit "faible" Q1 et un débit de préférence de hautes eaux Q2.

Première étape : choix du linéaire constituant la station (très important). Veiller à ce que cette station soit représentative du tronçon courant, dépourvue de singularité (ouvrage tel que déversoir, pont...), non soumise à influence hydraulique aval, ... La présence d'une station HYDRO est un "plus" important (évite d'avoir à effectuer les jaugeages pour estimer le débit).

Opérations élémentaires :

- **Positionnement et marquage des transects**, enfoncement de piquets de bois (d'une trentaine de cm) qui serviront de repères topo ; cette mise en place est effectuée lors de la première campagne de terrain (généralement à Q1)
- **Lever de la topographie du lit et des berges** (transects + profil en

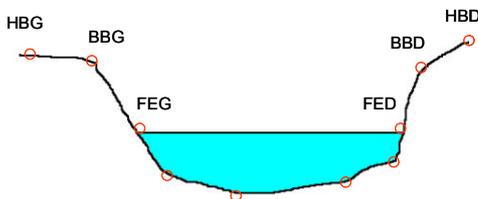


Figure 7 : Les différents points de levé topographique.

long du fond) : ce sont en priorité les points correspondant à des changements de pente dans la géométrie de la section qui sont relevés (cf. Figure 7 ci-contre), avec une attention particulière pour les points dits "Fleur d'eau" (FED et FEG, points de contact entre la rive et la surface libre de l'écoulement qui serviront à déterminer le niveau d'eau) et les points dits "bords de berge" (BBD et BBG) qui serviront à déterminer les débits de plein bord : ce lever est

réalisé une seule fois, en principe à Q1 ; il permet de tracer les sections en travers du lit où l'on pourra reporter les niveaux d'eau à tous les débits et calculer les hauteurs d'eau. Ces levés sont effectués à l'aide d'un tachéomètre et/ou d'un GPS différentiel.



- **Lever de la cote de l'eau dans chaque transect à Q1 et Q2** (avec raccordement aux piquets à chaque fois) ; à noter qu'au débit Q2, il n'y a plus qu'à prendre la différence de niveau entre piquets et surface de l'eau ; les mesures peuvent donc être effectuées depuis la berge sans avoir à rentrer dans l'eau (permet de travailler à un débit Q2 élevé, y compris proche du plein bord)

- **Détermination du débit Q1 et du débit Q2**



S'il existe une station HYDRO à proximité immédiate, la hauteur d'eau à l'échelle est relevée et l'on demande ensuite la courbe de tarage à la DIREN gestionnaire de la station.

A défaut, il faut réaliser un jaugeage.

Il importe de choisir soigneusement la section de jaugeage, au besoin hors de la station morphologique : tronçon rectiligne, le plus régulier possible, sans végétation aquatique ni sous-berges ou obstacles à l'écoulement, au moins au niveau de la section de jaugeage et à son aval immédiat.

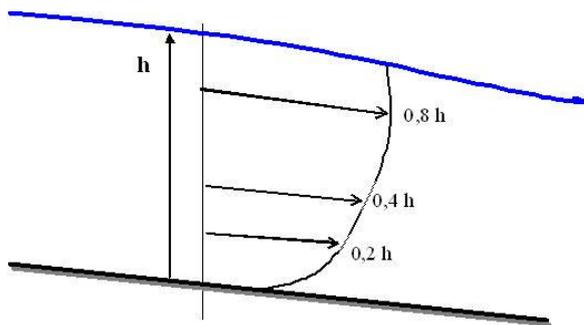


Figure 8 : Les 3 niveaux de mesure de vitesse.

Le matériel utilisé est un courantomètre électromagnétique.

Nous effectuons 3 mesures de vitesse par verticale (à 0.2h, 0.4h et 0.8h, h étant la hauteur d'eau) sur un pas de temps de 30 secondes (Figure 8).

Le nombre de verticales est adapté en fonction de la largeur et de l'homogénéité de la section (une douzaine de verticales en général).

- **Détermination de la courbe granulométrique**

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer la taille des particules composant le lit de la rivière. La distribution granulométrique des sédiments fins est mesurée par tamisage d'un échantillon prélevé sur le terrain (à l'aide d'un filet surber). Le poids de cet échantillon doit être au moins égal à 100 fois le poids du plus gros élément présent sur le dépôt analysé. Le tamisage se fait sur le terrain pour les éléments les plus grossiers puis en laboratoire pour la fraction fine (gravier, sable, limon et argile).



Cette méthode peut difficilement être appliquée à des sédiments de taille plus importante, car elle nécessite le prélèvement de volumes d'échantillon représentatif très conséquents. De ce fait, la mesure granulométrique en rivières graveleuses se fait généralement à partir d'échantillonnages de surface, qui ne prennent en compte que les particules directement exposées aux contraintes hydrauliques. La méthode de référence adoptée pour nos mesures, dite méthode de Wolman, consiste à prélever une centaine de particules au moyen d'une ligne positionnée sur la surface de collecte. Cette méthode consiste à mesurer l'axe b (axe intermédiaire) des particules situées exactement à intervalles réguliers le long d'une trajectoire rectiligne (suivant une ligne de courant par exemple) ou en zigzag. La ligne de collecte est matérialisée par un décimètre que l'on déplace dans le lit, le pas d'échantillonnage est généralement fixé à deux fois l'axe b de

la particule la plus grosse. Le nombre minimal de particules à prélever doit être compris entre 100 et 200 et l'axe *b* est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse.

- **Description complémentaire de la ripisylve, des abris...**

Cette partie du protocole a été réalisée uniquement sur les stations ayant fait l'objet d'échantillonnage piscicole.

Elle consiste à relever en ensemble de caractéristiques au niveau de chacun des transects sur une bande d'environ 2m de largeur.

Pour chaque transect sont notées:

- la présence éventuelle au niveau des deux berges :
 - d'une ripisylve
 - d'abris sous berges
 - d'abris de type racines ou branchage
- l'importance au niveau du chenal (évaluation par une note de 0 à 10 en fonction de l'importance du recouvrement) :
 - des embâcles
 - des macrophytes aquatiques
 - des dépôts organiques
 - des dépôts minéraux
 - des développements d'algues.

L'objectif n'est pas ici de fournir une évaluation détaillée de ces différents paramètres d'habitat mais d'avantage de pouvoir situer les stations les unes par rapport aux autres en fonction du développement de la ripisylve, de l'abondance des abris et du colmatage du substrat, critères qui peuvent fortement influencer la répartition des espèces piscicoles.

Conditions de réalisation (temps passé, moyens nécessaires)

Tableau 1 : Evaluation des moyens nécessaires à la réalisation des différentes étapes du protocole.

| | Tâches | Temps (en h) | Moyens humains | Moyens Matériels |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|----------------|-------------------------|
| Etape 1 : Basses eaux (Q1) | Levé des Profils en travers | 2 à 6 | 2 | GPS / tachéo / niveau |
| | Débit (si jaugeage) | 0,25 à 1 | 2 | Courantomètre |
| | Granulométrie | 0,75 | 2 | Pied à coulisse / tamis |
| | Relevé abris, dépôts, ripisylve... | 0,5 à 1 | 1 | |
| Etape 2 : Hautes eaux (Q2) | Levé du niveau d'eau | 0,5 à 1 | 2 | GPS / tachéo / niveau |
| | Débit (si jaugeage) | 0,25 à 1 | 2 | Courantomètre |

La campagne de mesures au débit Q1 mobilise donc 4 personnes pendant 2 à 6 heures, tandis que la campagne au deuxième débit Q2 mobilise seulement 2 personnes pendant 1 à 2 heures.

Les facteurs d'accroissement du temps passé sont en premier lieu les difficultés d'accès et de cheminement (végétation, clôtures...) et en second lieu la taille et la profondeur du cours d'eau.

1.4 Région étudiée

Le présent projet a vocation à aborder l'ensemble du territoire du bassin Seine-Normandie. Dans sa première phase, qui fait l'objet du présent rapport, et afin d'éprouver l'approche et les protocoles mis en œuvre, la démarche a été initiée sur une portion du bassin seulement. Le choix de la zone d'étude a été établi en discussion étroite avec l'AESN et s'est finalement porté sur la partie du bassin correspondant aux formations géologiques du Crétacé supérieur (correspondant à l'HER de niveau 2 "Tables HER de niveau 2 "Tables calcaires – auréole crétacé"). Ce choix a notamment été motivé par les conditions suivantes :

- il s'agit d'une des régions les plus étendue à l'échelle du bassin Seine-Normandie qui concerne plus de la moitié des directions territoriales de l'AESN (4/6)
- les conditions naturelles, notamment du point de vue géologique climatique, y sont relativement homogènes ce qui limite le champ de variation des facteurs de contrôle de la morphologie des cours d'eau
- cette région abrite des portions de territoire relativement préservées laissant présager a priori la possibilité de trouver des cours d'eau faiblement impactés sur le plan de l'hydromorphologie. (pour la construction des « modèles de référence »)

Nous avons essentiellement travaillé sur les affluents de la Vanne, de la Seine, de l'Aube, de la Marne, de l'Aisne en Champagne et de l'Eure, de l'Iton, de la Risle, de la Touque et de la Seine en Normandie. Plusieurs petits cours d'eau côtiers ont également été inclus dans l'étude. Ces cours d'eau présentent les caractéristiques communes de s'écouler sur un substrat crayeux et d'avoir un régime fortement influencé par les écoulements souterrains.

1.4.1 Caractéristiques générales des cours d'eau de la craie

1.4.1.1 Caractéristiques abiotiques

Les cours d'eau de la craie présentent des caractéristiques morphologiques, hydrogéologiques et hydrologiques originales qui conditionnent fortement leur fonctionnement écologique et l'organisation de leurs biocœnoses (Berrie 1992). Ces cours d'eau ont fait l'objet de nombreux travaux et publications tant sur les aspects abiotiques que biotiques, notamment pour ce qui concerne les cours d'eau du sud de l'Angleterre, qui, en raison de leur proximité, présentent des similitudes fortes avec ceux rencontrés sur le bassin Seine Normandie.

L'un des traits marquants des cours d'eau de la craie, qui conditionne fortement leur fonctionnement global, est lié à l'importance de l'alimentation par la nappe souterraine (Sear et al. 1999). Ainsi, pour un ensemble de cours d'eau anglais coulant sur substrat crayeux, le BFI (base flow index) , qui traduit la part de l'alimentation souterraine dans le débit du cours d'eau, varie de 0,53 à 0,99 (moyenne de 0,83) (Sear et al. 1999) ce qui représente des valeurs particulièrement élevées y compris en comparaison avec d'autres cours d'eau présentant également des alimentations souterraines.

En lien avec l'importance des apports souterrains, les cours d'eau de la craie présentent une très faible densité de drainage, le réseau hydrographique étant généralement constitué d'un axe principal avec des tributaires peu développés voire inexistantes (Sear et al. 1999). Les

parties apicales du réseau hydrographique sont parfois intermittentes, leur mise en eau dépendant du niveau de la nappe de la craie.

L'alimentation par la nappe entraîne également une grande stabilité saisonnière et inter annuelle des conditions environnementales. Les contrastes entre bas débits et hauts débits sont relativement peu marqués, par ailleurs, les périodes de bas et hauts débits sont décalées dans le temps par rapport à des cours d'eau dont l'alimentation de surface est prépondérante. La température de l'eau varie généralement peu entre saisons mais aussi entre années. Pour plusieurs cours d'eau du sud de l'Angleterre une relation a été établie entre la température moyenne mensuelle de l'eau et la température moyenne mensuelle de l'air selon l'équation suivante (Mackey et Berrie 1991) :

$$T_{\text{eau}} = 4,29 + 0,55 T_{\text{air}}$$

Cette équation confirme que la température de l'eau des rivières de la craie est plutôt chaude en hiver et plutôt froide en été. En l'extrapolant aux cours d'eau du bassin de la Seine pour lesquels la température moyenne de l'air du mois le plus chaud (juillet) se situe autour de 18 à 20°C, on peut donc considérer que la température moyenne de l'eau au mois de juillet se situe autour de 14 à 15 °C ce qui est sensiblement moins que pour les cours d'eau dont l'alimentation est essentiellement superficielle. Pour ces derniers, la relation température de l'eau / température de l'air s'approche en effet du rapport 1:1 (Caissie 2006).

Les eaux des rivières de la craie sont fortement minéralisées, particulièrement riches en carbonates de calcium en lien avec la nature des substrats géologiques qu'elles traversent, et leur composition chimique est relativement stable au cours du temps. Il s'agit également d'eaux naturellement riches en nutriments notamment en phosphore (Ladle et Westlake 1976) (richesse encore accentuée par les apports anthropiques), et pauvres en MES donc faiblement turbides. Les cours d'eau de la craie se caractérisent par une faible capacité de transport des sédiments y compris en MES (Walling et Amos 1999, Heywood et Walling 2003). Néanmoins, l'apport de MES en provenance des bassins versants (en lien avec l'activité agricole) est cité comme un problème de plus en plus fréquent notamment pour certains cours d'eau de Normandie (et à l'image de la situation du sud de la Grande Bretagne (Walling et Amos 1999)). A noter que la forte minéralisation de l'eau peut conduire à des phénomènes de concrétionnement des fonds par des tufs (Sear et al. 1999). Ce phénomène, en partie lié à l'activité métabolique algale semble s'accroître lors d'un enrichissement par les nutriments (phosphore notamment).

D'un point de vue géomorphologique, la stabilité du régime hydrologique semble influencer la forme du profil en travers de la rivière. Une étude de trois cours d'eau de plaine a montré que les cours d'eau situés sur la craie avaient une géométrie qui permettait le passage avant débordement de crues de fréquence plus rare que celle de cours d'eau s'écoulant sur des terrains imperméables (Sear et al., 1999). Whiting et Stamm (1995) remettent toutefois en question cette observation mais pointent une série de traits caractéristiques de ces rivières dominées par les écoulements souterrains : un rapport largeur/profondeur élevé, un manque de bancs alluviaux, un faible taux de transport solide, une grande stabilité des grands débris organiques (troncs, etc.) présents sur le fond du lit, des faibles valeurs de forces tractrices et un débit plein bord atteint ou approché fréquemment conduisant à une relative saturation des sols de la plaine alluviale.

Une étude exploratoire fouillée de l'hydrologie de la zone étudiée est présentée dans la suite du document (sous-chapitre 2.4.2).

1.4.1.2 Caractéristiques biologiques

D'un point de vue biologique, ces cours d'eau abritent des biocénoses considérées comme particulièrement riches et abondantes (Berrie 1992, Petts et al. 1999).

1/ Concernant les macrophytes :

En raison de la stabilité hydrologique, de la transparence des eaux et de leurs richesses en nutriment, les macrophytes immergés (*Ranunculus* notamment) sont bien développés allant parfois jusqu'à recouvrir la totalité de la surface du cours d'eau (Pinder 1992). Cette situation prévaut notamment dans le cas de cours d'eau environnés de prairies et /ou dont la largeur est suffisamment grande pour qu'ils bénéficient d'un éclaircissement important. Sur les petits cours d'eau bordés par une ripisylve développée, les herbiers aquatiques restent en revanche très limités. La biomasse végétale aquatique est généralement largement dominée par les plantes supérieures (à titre d'exemple, Flynn et al. (2002), pour un affluent de la Tamise, citent des biomasses (matière sèche) de 200 et 21 g m⁻² respectivement pour les macrophytes et le périphyton). En ralentissant les vitesses d'écoulement, les macrophytes peuvent ainsi jouer un rôle d'abri hydraulique important pour la faune aquatique (Marshall et Westlake 1990). L'abondance des macrophytes conduit parfois à un entretien par faucardage susceptible de perturber l'écosystème (Ladle et Westlake 1976).

2/ Concernant les macro-invertébrés :

Les cours d'eau de la craie sont également connus pour la richesse et l'abondance de leurs communautés de macroinvertébrés (Ladle 1972). Pour partie, cette richesse semble liée à l'abondance des macrophytes susceptibles de servir à la fois d'habitats et de source de nourriture (Pinder 1992). Ainsi, la diminution des macrophytes sur un cours d'eau anglais (consécutif à un développement de la ripisylve) s'est accompagnée d'une diminution des populations d'invertébrés (ainsi que d'un réajustement de la structure trophique de la communauté) (Wright et al. 2003). Bien que les conditions hydrologiques soient relativement stables, les variations inter annuelles des débits peuvent induire des variations au niveau des communautés de macro-invertébrés (Wood et al. 2001). Ces variations sont particulièrement sensibles en période de sécheresse, (Wright et al. 2004) alors que les hauts débits ne semblent pas entraîner de modifications très significatives. Après une période de sécheresse, on assiste en général à une recolonisation rapide de la communauté d'invertébrés initiale après retour de conditions hydrologiques favorables, y compris sur des secteurs ayant subi des assècs (Wright et Symes 1999, Wood et Petts 1999). Les communautés d'invertébrés montrent également des variations saisonnières d'abondance avec deux pics en mai/juin puis novembre/décembre qui ne correspondent pas au maximum de développement de la végétation (été) (Wright 1992).

3/ Concernant les poissons :

L'un des traits marquants des peuplements piscicoles des cours d'eau de la craie se manifeste par l'abondance des espèces d'eau froide et des salmonidés en particulier, en lien direct avec la faiblesse des températures estivales de l'eau (Berrie 1992). Ainsi, Arrignon (1972) a montré que pour les cours d'eau de la craie du nord ouest de la France, en raison de leur régime thermique particulier, il existait un décalage vers l'aval du schéma de zonation piscicole des cours d'eau défini pour le reste de l'Europe tempérée (Huet 1949). A largeur et pente de cours d'eau équivalentes, les zones à truite sont alors beaucoup plus développées que sur d'autres régions. A l'inverse, ces faibles températures estivales limitent à l'évidence la colonisation des espèces les plus thermophiles.

La stabilité des conditions environnementales et en particulier des débits s'accompagne d'une stabilité des populations et des peuplements (Belliard 1998).

La forte disponibilité des ressources alimentaires (invertébrés) se traduit par une croissance très rapide des poissons. Particulièrement bien décrit pour la truite (Mann et al 1989, Berrie et al 1998), ce phénomène a également été observé chez d'autres espèces comme la loche franche (Mills et al. 1983). Cette forte croissance s'accompagne de modification de certains traits biologiques impliqués dans la dynamique des populations et notamment un abaissement de l'âge à la maturité et une réduction de la durée de vie (Mills et al. 1983).

Sur ces cours d'eau, pour les salmonidés, la faible disponibilité de zones de frayères (granulométrie grossière + courant) est fréquemment citée comme le facteur limitant (Mann et al 1989). Cette faible disponibilité de zones de frayères peut provenir notamment de l'absence de sédiments grossiers, de phénomènes de concrétionnement des zones de graviers, d'un colmatage des frayères par les sédiments fins (Acornley et Sear 1999) ou, plus globalement, du faible développement du réseau hydrographique limitant les possibilités de trouver des frayères sur des petits affluents. Ainsi, sur ces rivières, le cycle biologique de la truite se déroule essentiellement sur l'axe principal et implique des déplacements relativement limités (Solomon et Templeton 1976). Ceci contraste avec la situation plus communément observée sur les cours d'eau dont le réseau hydrographique est bien développé, et dans lesquels les petits affluents jouent un rôle essentiel pour la reproduction de cette espèce.

Sur ces cours d'eau, outre les macrophytes, les embâcles semblent jouer un rôle important d'abris pour les poissons (Copp et Bennetts 1996).

1.4.2 Caractéristiques hydrologiques (étude exploratoire)

Une étude exploratoire a été menée dans le but de caractériser du point de vue hydrologique les sites tests retenus, par rapport à d'autres zones du bassin Seine-Normandie, et également de voir s'il y a des différences entre eux ou si les comportements sont très homogènes sur l'ensemble de la zone du crétacé supérieur. Cette analyse repose sur un examen des caractéristiques de débits au droit de 49 stations hydrométriques (dont 11 se situent au droit des sites-tests) afin d'identifier des propriétés émergentes. Cette caractérisation a été faite au travers de variables descriptives sur des régimes *a priori* les plus pertinents pour le lien hydrologie / morphologie (moyennes eaux, crues) et a cherché également à cerner le degré de relation avec la nappe, aspect *a priori* très important dans ce contexte géologique.

1.4.2.1 Les stations hydrométriques utilisées

Tableau 2 : Tableau des stations hydrométriques utilisées (en grisé celles qui se situent en Champagne).

| Surface (km ²) | Code | Station | X (km) | Y (km) | Longueur de la chronique (an) | Données disponibles | Département |
|----------------------------|----------|-------------------------------------|--------|---------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| 693 | G0402020 | La Bresle à Ponts-et-Marais | 536.25 | 2561.48 | 9.7 | 1999 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 265 | G1003010 | L'Yères à Touffreville-sur-Eu | 528.39 | 2556.42 | 30.4 | 1978 - 2008 | Seine-Maritime (76) |
| 324 | G2203010 | L'Eaulne à Martin-Église | 514.05 | 2545.4 | 2.9 | 2005 - 2008 | Seine-Maritime (76) |
| 50.7 | G4002020 | La Saane à Val-de-Saône | 500.87 | 2523.82 | 12.0 | 1997 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 93.3 | G5002010 | Le Dun au Bourg-Dun [Le Pont Blanc] | 496.14 | 2543.29 | 13.4 | 1995 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 349 | G6003010 | Le Durdent à Vittefleury | 477.26 | 2537.09 | 23.7 | 1985 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 146 | G7002020 | La Valmont à Colleville | 463.75 | 2529.50 | 3.5 | 2005 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 89.8 | G7103010 | La Ganzeville à Ganzeville | 460.92 | 2528.37 | 29.0 | 1980 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 116 | G9103020 | La Lézarde à Montivilliers | 444.25 | 2507.27 | 6.4 | 2003 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 160 | H1503510 | L'Huitrelle à Lhuître | 741.42 | 2398.30 | 10.5 | 1997 - 2008 | Aube (10) |
| 87 | H1503910 | L'Herbissonne à Allibaudières | 730.43 | 2399.44 | 36.2 | 1970 - 2006 | Aube (10) |
| 187 | H1513210 | La Barbuisse à Pouan-les-Vallées | 727.52 | 2394.57 | 36.8 | 1970 - 2007 | Aube (10) |
| 320 | H1603010 | La Superbe à Saint-Saturnin | 715.68 | 2402.87 | 36.2 | 1970 - 2007 | Marne (51) |

| | | | | | | | |
|------|----------|---------------------------------------|--------|---------|------|--------------------|---------------------|
| 159 | H1713010 | L'Ardusson à Saint-Aubin | 690.52 | 2386.82 | 36.6 | 1970 – 2007 | Aube (10) |
| 347 | H2602010 | La Vanne à Paisy-Cosdon | 701.73 | 2361.29 | 25.9 | 1970 - 1996 | Aube (10) |
| 866 | H2622010 | La Vanne à Pont-sur-Vanne | 682.17 | 2354.52 | 39.7 | 1963 - 2009 | Yonne (89) |
| 150 | H5204210 | La Coole à Écury-sur-Coole | 746.93 | 2435.62 | 6.3 | 1996 – 2006 | Marne (51) |
| 105 | H5213310 | La Soude à Soudron | 737.01 | 2428.35 | 38.2 | 1968 - 2009 | Marne (51) |
| 322 | H6303810 | La Retourne à Poilcourt-Sydney | 728.12 | 2492.86 | 18.8 | 1970 - 1989 | Ardennes (08) |
| 322 | H6303820 | La Retourne à Houdilcourt | 729.72 | 2493.27 | 8.9 | 1970 - 1991 - 1999 | Ardennes (08) |
| 475 | H6313010 | La Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers | 744.26 | 2479.88 | 7.1 | 1968 - 1975 | Marne (51) |
| 802 | H6313020 | La Suipe à Orainville | 722.56 | 2488.67 | 40.0 | 1968 - 2008 | Aisne (02) |
| 486 | H6313030 | La Suipe à Selles | 742.05 | 2480.55 | 18.1 | 1968 - 1989 - 2008 | Marne (51) |
| 89 | H6313210 | Le Py à Dontrien | 751.2 | 2473.82 | 19.0 | 1969 - 1988 | Marne (51) |
| 286 | H6402010 | La Vesle à Bouy | 747.22 | 2456.45 | 33.4 | 1967 - 2007 | Marne (51) |
| 416 | H6402020 | La Vesle à Sept-Saulx | 739.32 | 2463.74 | 3.2 | 1982 - 1985 | Marne (51) |
| 603 | H6402030 | La Vesle à Puisieux | 730.25 | 2469.10 | 22.4 | 1983 - 2006 | Marne (51) |
| 446 | H6402040 | La Vesle à Beaumont-sur-Vesle | 735.05 | 2466.04 | 16.2 | 1985 - 2002 | Marne (51) |
| 762 | H6412010 | La Vesle à Saint-Brice-Courcelles | 719.69 | 2475.4 | 27.9 | 1968 - 2006 | Marne (51) |
| 828 | H6412020 | La Vesle à Châlons-sur-Vesle | 715.47 | 2476.77 | 25.6 | 1967 - 2002 | Marne (51) |
| 327 | H9021010 | L'Eure à Saint-Luperce | 522.58 | 2383.88 | 41.5 | 1965 - 2009 | Eure-et-Loir (28) |
| 490 | H9202010 | L'Avre à Acon | 511.45 | 2418.39 | 37.4 | 1972 - 2009 | Eure (27) |
| 880 | H9222010 | L'Avre à Muzy | 525.86 | 2418.01 | 31.0 | 1971 – 2008 | Eure (27) |
| 108 | H9402020 | L'Iton à Crulai | 477.14 | 2413.97 | 28.8 | 1980 - 2009 | Orne (61) |
| 1030 | H9402030 | L'Iton à Normanville | 513.33 | 2454.27 | 17 | 1990 - 2009 | Eure (27) |
| 159 | H9402040 | L'Iton à Bourth | 487.53 | 2420.72 | 9.6 | 1999 - 2009 | Eure (27) |
| 210 | H9913020 | Le Cailly à Notre-Dame-de-Bondeville | 506.50 | 2499.78 | 36.7 | 1963 - 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 28.5 | H9913030 | Le Cailly à Cailly [Cailly] | 519.34 | 2509.68 | 10.3 | 1998 – 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 208 | H9923010 | L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay] | 495.56 | 2501.16 | 33.6 | 1965 - 1999 | Seine-Maritime (76) |
| 157 | H9923020 | L'Austreberthe à Saint-Paër | 497.46 | 2503.32 | 11.6 | 1997 – 2009 | Seine-Maritime (76) |
| 118 | H9943420 | Le Commerce à Gruchet-le-Valasse | 466.10 | 2507.65 | 13.8 | 1994 – 2008 | Seine-Maritime (76) |
| 147 | I0011010 | La Risle à Rai | 471.01 | 2417.87 | 41.6 | 1965 - 2009 | Orne (61) |
| 494 | I0031010 | La Risle à Grosley-sur-Risle | 488.52 | 2451.35 | 14.5 | 1970 – 1988 | Eure (27) |
| 19.3 | I0034010 | Le Vernet à Glos-la-Ferrière | 472.76 | 2430.34 | 17.9 | 1978 - 1996 | Orne (61) |
| 3.2 | I0034110 | Le Val de Launay à Glos-la-Ferrière | 472.08 | 2429.55 | 17.8 | 1978 - 1996 | Orne (61) |
| 65.2 | I0102010 | La Charentonne à Bocquencé | 463.89 | 2429.33 | 27.6 | 1980 – 2008 | Orne (61) |
| 79.2 | I0113010 | Le Guiel à Montreuil-l'Argillé | 464.24 | 2440.12 | 29.2 | 1978 – 2008 | Eure (27) |
| 257 | I0122010 | La Charentonne à Ferrières-St-Hilaire | 471.01 | 2448.39 | 33.4 | 1970 - 2003 | Eure (27) |
| 66.7 | I0233110 | La Corbie à Toutainville | 464.33 | 2487.7 | 15.7 | 1973 – 1997 | Eure (27) |

Les stations concernées sont localisées dans la zone géologique du crétacé supérieur, 21 en Champagne, 28 en Normandie (cf; carte de la Figure 9). Compte tenu de la disponibilité des données, il ne sera pas possible de faire une analyse du régime des crues pour la Coole à Écury-sur-Coole, ni pour l'Eaulne à Martin-Église, la Vesle à Sept-Saulx, la Valmont à Colleville, La Lézarde à Montivilliers et la Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers (séries de longueur inférieure à 8 ans). Les statistiques sur les moyennes eaux et les courbes des débits classés pour ces bassins sont également à prendre avec précaution.

1.4.2.2 *Le régime des moyennes eaux*

Les termes classiques du bilan hydrologique aux échelles mensuelle et annuelle ont été calculés. Ils renseignent sur la dynamique et la variabilité saisonnière des écoulements. Les contrastes saisonniers sont plus ou moins marqués selon le bassin (cf. graphes en annexe 1). Le cours d'eau le plus régulier est la Corbie à Toutainville.

Replaçons les bassins et leur régime dans la variabilité des allures rencontrées sur le bassin (Figure 9). La classification a été obtenue sur un jeu de données national sur la base

des coefficients mensuels de débits (QM divisé par la somme des douze QM). Seules les classes effectivement représentées ont été conservées dans la figure. Les classes 1 et 3 sont majoritaires (elles regroupent chacune environ 20 représentants localisés principalement en Normandie pour la classe 1 et en Champagne pour la classe 3). Les autres stations se répartissent entre les classes 2, 4 et 5. La forte proportion de bassins dans la classe 1 s'explique par la forte contribution souterraine qui se manifeste sur les variables mensuelles par une faible variabilité au cours de l'année.

Tableau 3 : Caractéristiques hydrologiques des sites – Débits moyens mensuels et annuels bruts.

| Code | QM (m ³ /s) | | | | | | | | | | | | QA (m ³ /s) |
|----------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | |
| G0402020 | 8.14 | 8.46 | 8.95 | 8.77 | 8.16 | 7.38 | 6.86 | 6.38 | 5.91 | 6.16 | 6.79 | 7.72 | 7.51 |
| G1003010 | 3.42 | 3.78 | 3.76 | 3.69 | 3.26 | 2.69 | 2.26 | 1.97 | 1.87 | 1.92 | 2.26 | 2.83 | 2.81 |
| G2203010 | 3.40 | 3.59 | 4.81 | 4.99 | 3.79 | 3.25 | 2.40 | 2.19 | 2.11 | 2.56 | 2.44 | 3.39 | 3.24 |
| G4002020 | 0.53 | 0.50 | 0.53 | 0.53 | 0.55 | 0.51 | 0.50 | 0.46 | 0.44 | 0.45 | 0.46 | 0.51 | 0.50 |
| G5002010 | 0.34 | 0.24 | 0.25 | 0.23 | 0.26 | 0.23 | 0.21 | 0.22 | 0.22 | 0.24 | 0.28 | 0.29 | 0.25 |
| G6003010 | 4.09 | 4.06 | 4.06 | 4.06 | 4.01 | 3.91 | 3.82 | 3.71 | 3.66 | 3.78 | 3.89 | 4.04 | 3.93 |
| G7002020 | 0.76 | 0.75 | 0.79 | 0.79 | 0.77 | 0.81 | 0.81 | 0.74 | 0.73 | 0.80 | 0.76 | 0.83 | 0.78 |
| G7103010 | 0.84 | 0.85 | 0.88 | 0.88 | 0.89 | 0.88 | 0.84 | 0.80 | 0.78 | 0.79 | 0.80 | 0.83 | 0.84 |
| G9103020 | 1.03 | 1.02 | 1.03 | 0.99 | 0.98 | 1.08 | 1.02 | 1.01 | 0.94 | 1.02 | 1.00 | 1.07 | 1.02 |
| H1503510 | 1.36 | 1.70 | 1.97 | 1.91 | 1.58 | 1.08 | 0.73 | 0.52 | 0.46 | 0.50 | 0.62 | 0.88 | 1.08 |
| H1503910 | 0.39 | 0.56 | 0.65 | 0.65 | 0.54 | 0.36 | 0.20 | 0.11 | 0.07 | 0.08 | 0.13 | 0.21 | 0.33 |
| H1513210 | 0.88 | 1.14 | 1.30 | 1.35 | 1.20 | 0.89 | 0.61 | 0.42 | 0.31 | 0.29 | 0.35 | 0.57 | 0.78 |
| H1603010 | 2.38 | 2.94 | 3.10 | 2.91 | 2.19 | 1.37 | 0.77 | 0.53 | 0.46 | 0.62 | 0.99 | 1.61 | 1.66 |
| H1713010 | 0.84 | 1.05 | 1.16 | 1.18 | 1.00 | 0.68 | 0.39 | 0.26 | 0.25 | 0.33 | 0.45 | 0.62 | 0.68 |
| H2602010 | 2.10 | 2.53 | 2.64 | 2.73 | 2.54 | 2.09 | 1.63 | 1.31 | 1.18 | 1.24 | 1.36 | 1.65 | 1.91 |
| H2622010 | 6.40 | 6.94 | 7.12 | 7.12 | 6.47 | 5.30 | 4.38 | 4.01 | 3.81 | 4.06 | 4.51 | 5.32 | 5.40 |
| H5204210 | 0.39 | 0.71 | 1.02 | 0.95 | 0.80 | 0.57 | 0.25 | 0.08 | 0.04 | 0.04 | 0.09 | 0.18 | 0.43 |
| H5213310 | 0.67 | 1.00 | 1.13 | 1.09 | 0.87 | 0.58 | 0.34 | 0.19 | 0.14 | 0.15 | 0.20 | 0.36 | 0.56 |
| H6303810 | 2.01 | 2.55 | 2.67 | 2.73 | 2.29 | 1.70 | 1.17 | 0.96 | 0.92 | 0.95 | 1.27 | 1.58 | 1.73 |
| H6303820 | 2.05 | 2.49 | 2.57 | 2.49 | 1.95 | 1.30 | 0.78 | 0.52 | 0.52 | 0.65 | 0.95 | 1.39 | 1.46 |
| H6313010 | 2.72 | 3.28 | 4.19 | 3.85 | 3.30 | 2.50 | 1.74 | 1.37 | 1.16 | 1.40 | 1.77 | 2.78 | 2.75 |
| H6313020 | 4.81 | 6.27 | 7.16 | 7.28 | 6.25 | 4.56 | 3.06 | 2.17 | 1.80 | 1.83 | 2.32 | 3.33 | 4.28 |
| H6313030 | 3.56 | 4.39 | 4.99 | 4.91 | 4.06 | 2.94 | 1.96 | 1.36 | 1.13 | 1.18 | 1.55 | 2.32 | 2.84 |
| H6313210 | 0.53 | 0.71 | 0.85 | 0.91 | 0.86 | 0.70 | 0.51 | 0.38 | 0.32 | 0.32 | 0.37 | 0.43 | 0.57 |
| H6402010 | 1.89 | 2.58 | 2.96 | 2.83 | 2.19 | 1.38 | 0.77 | 0.49 | 0.37 | 0.37 | 0.59 | 1.06 | 1.50 |
| H6402020 | 2.79 | 3.89 | 4.07 | 4.13 | 3.85 | 2.74 | 1.74 | 1.12 | 0.55 | 0.59 | 1.14 | 1.92 | 2.28 |
| H6402030 | 3.69 | 4.76 | 5.34 | 5.15 | 3.99 | 2.43 | 1.53 | 0.99 | 0.86 | 1.03 | 1.46 | 2.37 | 2.79 |
| H6402040 | 3.21 | 3.99 | 4.18 | 4.21 | 3.31 | 1.89 | 1.21 | 0.84 | 0.74 | 0.88 | 1.24 | 2.03 | 2.31 |
| H6412010 | 3.94 | 5.05 | 5.85 | 5.83 | 4.40 | 3.13 | 2.25 | 1.50 | 1.21 | 1.18 | 1.68 | 2.62 | 3.18 |
| H6412020 | 5.09 | 6.42 | 7.25 | 7.23 | 5.82 | 4.05 | 2.95 | 2.24 | 2.10 | 2.18 | 2.69 | 3.84 | 4.39 |
| H9021010 | 3.42 | 3.61 | 2.88 | 1.64 | 1.03 | 0.57 | 0.48 | 0.36 | 0.38 | 0.70 | 1.19 | 2.57 | 1.59 |
| H9202010 | 3.62 | 3.98 | 3.67 | 3.10 | 2.67 | 2.02 | 1.66 | 1.46 | 1.50 | 1.77 | 1.95 | 2.71 | 2.50 |
| H9222010 | 5.31 | 5.41 | 5.36 | 4.54 | 3.68 | 2.81 | 2.34 | 2.10 | 2.13 | 2.52 | 2.94 | 3.93 | 3.59 |
| H9402020 | 1.74 | 1.39 | 1.28 | 0.88 | 0.64 | 0.42 | 0.38 | 0.29 | 0.31 | 0.54 | 0.81 | 1.39 | 0.84 |
| H9402030 | 4.93 | 4.80 | 4.41 | 3.88 | 3.37 | 2.98 | 2.79 | 2.62 | 2.56 | 2.73 | 3.27 | 4.04 | 3.53 |
| H9402040 | 2.41 | 2.17 | 2.27 | 1.31 | 1.04 | 0.66 | 0.73 | 0.58 | 0.49 | 0.80 | 1.47 | 2.25 | 1.35 |
| H9913020 | 2.64 | 2.90 | 2.98 | 2.91 | 2.90 | 2.68 | 2.52 | 2.34 | 2.19 | 2.13 | 2.30 | 2.48 | 2.66 |
| H9913030 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.18 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.16 |
| H9923010 | 1.95 | 2.07 | 2.05 | 2.04 | 2.02 | 1.95 | 1.85 | 1.75 | 1.66 | 1.65 | 1.69 | 1.82 | 1.93 |
| H9923020 | 2.09 | 1.99 | 2.09 | 2.08 | 2.08 | 2.02 | 1.77 | 1.64 | 1.54 | 1.56 | 1.63 | 1.91 | 1.87 |
| H9943420 | 0.22 | 0.25 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 0.25 | 0.24 | 0.23 | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.25 | 0.24 |
| I0011010 | 2.34 | 2.43 | 2.07 | 1.44 | 1.19 | 0.89 | 0.77 | 0.64 | 0.63 | 0.94 | 1.35 | 1.97 | 1.40 |
| I0031010 | 3.99 | 4.09 | 3.64 | 3.29 | 2.67 | 1.84 | 1.39 | 0.91 | 0.88 | 1.41 | 1.96 | 3.17 | 2.44 |
| I0034010 | 0.30 | 0.27 | 0.20 | 0.13 | 0.06 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.21 | 0.10 |
| I0034110 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I0102010 | 1.07 | 0.89 | 0.82 | 0.59 | 0.42 | 0.26 | 0.21 | 0.16 | 0.19 | 0.37 | 0.55 | 0.99 | 0.54 |
| I0113010 | 0.91 | 0.97 | 0.93 | 0.81 | 0.71 | 0.59 | 0.54 | 0.49 | 0.47 | 0.51 | 0.60 | 0.81 | 0.69 |
| I0122010 | 3.04 | 3.17 | 2.88 | 2.45 | 2.13 | 1.72 | 1.59 | 1.35 | 1.42 | 1.66 | 2.07 | 2.64 | 2.17 |
| I0233110 | 0.93 | 0.83 | 0.76 | 0.73 | 0.69 | 0.70 | 0.67 | 0.64 | 0.65 | 0.67 | 0.76 | 0.85 | 0.74 |

Les bassins les moins productifs à l'échelle annuelle (cf. les valeurs exprimées en l/s/km² du Tableau 4) sont les bassins situés au centre du Bassin Parisien. Une pluviométrie moins abondante est en partie responsable des différences entre bassins. La côte Normande est plus arrosée que la partie continentale, en absence de relief.

Tableau 4 : Caractéristiques hydrologiques des sites – Débits mensuels moyens spécifiques et BFI .

| Code | QM (l/s/km ²) | | | | | | | | | | | | BFI |
|----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | |
| G0402020 | 11.75 | 12.21 | 12.91 | 12.66 | 11.78 | 10.65 | 9.90 | 9.20 | 8.53 | 8.89 | 9.80 | 11.13 | 0.958 |
| G1003010 | 12.92 | 14.28 | 14.20 | 13.94 | 12.29 | 10.14 | 8.54 | 7.43 | 7.07 | 7.24 | 8.54 | 10.68 | 0.964 |
| G2203010 | 10.49 | 11.07 | 14.85 | 15.41 | 11.71 | 10.03 | 7.40 | 6.76 | 6.52 | 7.91 | 7.54 | 10.46 | 0.952 |
| G4002020 | 10.37 | 9.82 | 10.51 | 10.43 | 10.81 | 10.10 | 9.94 | 8.99 | 8.74 | 8.86 | 9.07 | 10.12 | 0.94 |
| G5002010 | 3.67 | 2.52 | 2.72 | 2.43 | 2.79 | 2.45 | 2.28 | 2.33 | 2.34 | 2.54 | 3.01 | 3.15 | 0.849 |
| G6003010 | 11.71 | 11.64 | 11.62 | 11.62 | 11.50 | 11.21 | 10.94 | 10.62 | 10.49 | 10.84 | 11.16 | 11.58 | 0.966 |
| G7002020 | 5.19 | 5.12 | 5.38 | 5.38 | 5.27 | 5.57 | 5.55 | 5.06 | 5.01 | 5.47 | 5.18 | 5.71 | 0.972 |
| G7103010 | 9.31 | 9.49 | 9.77 | 9.77 | 9.93 | 9.74 | 9.40 | 8.91 | 8.73 | 8.75 | 8.86 | 9.20 | 0.956 |
| G9103020 | 8.84 | 8.82 | 8.89 | 8.50 | 8.47 | 9.33 | 8.78 | 8.71 | 8.06 | 8.83 | 8.64 | 9.22 | 0.938 |
| H1503510 | 8.49 | 10.60 | 12.29 | 11.95 | 9.87 | 6.74 | 4.54 | 3.23 | 2.84 | 3.13 | 3.84 | 5.51 | 0.979 |
| H1503910 | 4.49 | 6.47 | 7.52 | 7.51 | 6.21 | 4.16 | 2.26 | 1.24 | 0.77 | 0.86 | 1.47 | 2.46 | 0.975 |
| H1513210 | 4.69 | 6.10 | 6.95 | 7.20 | 6.42 | 4.76 | 3.27 | 2.25 | 1.67 | 1.57 | 1.88 | 3.06 | 0.967 |
| H1603010 | 7.45 | 9.20 | 9.69 | 9.08 | 6.85 | 4.27 | 2.41 | 1.67 | 1.45 | 1.93 | 3.08 | 5.03 | 0.969 |
| H1713010 | 5.27 | 6.60 | 7.28 | 7.43 | 6.30 | 4.25 | 2.45 | 1.64 | 1.54 | 2.06 | 2.83 | 3.92 | 0.941 |
| H2602010 | 6.05 | 7.30 | 7.62 | 7.88 | 7.31 | 6.03 | 4.69 | 3.76 | 3.39 | 3.57 | 3.93 | 4.76 | 0.955 |
| H2622010 | 7.39 | 8.02 | 8.22 | 8.22 | 7.47 | 6.12 | 5.06 | 4.63 | 4.40 | 4.69 | 5.21 | 6.14 | 0.95 |
| H5204210 | 2.61 | 4.72 | 6.81 | 6.33 | 5.36 | 3.77 | 1.65 | 0.53 | 0.29 | 0.25 | 0.59 | 1.18 | 0.970 |
| H5213310 | 6.37 | 9.54 | 10.76 | 10.34 | 8.32 | 5.50 | 3.19 | 1.84 | 1.33 | 1.38 | 1.91 | 3.45 | 0.906 |
| H6303810 | 6.23 | 7.93 | 8.28 | 8.48 | 7.11 | 5.27 | 3.65 | 2.99 | 2.86 | 2.94 | 3.94 | 4.92 | 0.971 |
| H6303820 | 6.35 | 7.72 | 7.98 | 7.73 | 6.07 | 4.02 | 2.42 | 1.62 | 1.61 | 2.02 | 2.95 | 4.32 | 0.973 |
| H6313010 | 5.73 | 6.91 | 8.82 | 8.09 | 6.94 | 5.27 | 3.66 | 2.87 | 2.44 | 2.95 | 3.73 | 5.85 | 0.948 |
| H6313020 | 6.00 | 7.82 | 8.92 | 9.08 | 7.79 | 5.69 | 3.82 | 2.71 | 2.25 | 2.28 | 2.89 | 4.15 | 0.981 |
| H6313030 | 7.31 | 9.02 | 10.26 | 10.09 | 8.36 | 6.06 | 4.04 | 2.80 | 2.32 | 2.42 | 3.19 | 4.77 | 0.975 |
| H6313210 | 5.91 | 8.01 | 9.51 | 10.25 | 9.62 | 7.83 | 5.71 | 4.21 | 3.61 | 3.55 | 4.20 | 4.79 | 0.976 |
| H6402010 | 6.60 | 9.01 | 10.36 | 9.90 | 7.66 | 4.81 | 2.70 | 1.71 | 1.31 | 1.30 | 2.05 | 3.69 | 0.977 |
| H6402020 | 6.70 | 9.35 | 9.78 | 9.92 | 9.25 | 6.58 | 4.17 | 2.69 | 1.31 | 1.43 | 2.73 | 4.61 | 0.947 |
| H6402030 | 6.12 | 7.90 | 8.86 | 8.54 | 6.62 | 4.03 | 2.54 | 1.65 | 1.43 | 1.71 | 2.42 | 3.93 | 0.958 |
| H6402040 | 7.20 | 8.95 | 9.36 | 9.44 | 7.42 | 4.24 | 2.70 | 1.88 | 1.67 | 1.98 | 2.78 | 4.54 | 0.967 |
| H6412010 | 5.16 | 6.62 | 7.68 | 7.64 | 5.77 | 4.10 | 2.96 | 1.97 | 1.59 | 1.55 | 2.20 | 3.44 | 0.892 |
| H6412020 | 6.14 | 7.76 | 8.75 | 8.73 | 7.03 | 4.89 | 3.57 | 2.70 | 2.54 | 2.64 | 3.25 | 4.64 | 0.92 |
| H9021010 | 10.46 | 11.04 | 8.81 | 5.00 | 3.14 | 1.73 | 1.46 | 1.09 | 1.15 | 2.15 | 3.64 | 7.85 | 0.443 |
| H9202010 | 7.39 | 8.12 | 7.50 | 6.32 | 5.44 | 4.12 | 3.39 | 2.97 | 3.07 | 3.61 | 3.99 | 5.54 | 0.832 |
| H9222010 | 6.04 | 6.15 | 6.09 | 5.16 | 4.18 | 3.19 | 2.65 | 2.39 | 2.41 | 2.87 | 3.34 | 4.46 | 0.835 |
| H9402020 | 16.14 | 12.88 | 11.81 | 8.11 | 5.92 | 3.93 | 3.50 | 2.68 | 2.85 | 5.04 | 7.49 | 12.83 | 0.528 |
| H9402030 | 4.79 | 4.66 | 4.28 | 3.77 | 3.27 | 2.89 | 2.70 | 2.54 | 2.49 | 2.65 | 3.18 | 3.92 | 0.978 |
| H9402040 | 15.13 | 13.64 | 14.29 | 8.22 | 6.55 | 4.12 | 4.62 | 3.64 | 3.09 | 5.04 | 9.25 | 14.17 | 0.602 |
| H9913020 | 12.55 | 13.82 | 14.18 | 13.84 | 13.80 | 12.77 | 12.00 | 11.14 | 10.43 | 10.15 | 10.96 | 11.82 | 0.94 |
| H9913030 | 5.47 | 6.21 | 7.19 | 7.79 | 7.51 | 6.88 | 6.14 | 5.16 | 4.11 | 3.68 | 3.68 | 4.56 | 0.962 |
| H9923010 | 9.39 | 9.94 | 9.88 | 9.83 | 9.69 | 9.37 | 8.90 | 8.39 | 8.00 | 7.94 | 8.11 | 8.75 | 0.965 |
| H9923020 | 13.29 | 12.69 | 13.34 | 13.24 | 13.25 | 12.84 | 11.29 | 10.44 | 9.79 | 9.92 | 10.39 | 12.17 | 0.953 |
| H9943420 | 1.88 | 2.14 | 2.28 | 2.23 | 2.16 | 2.08 | 2.03 | 1.92 | 1.81 | 1.85 | 1.75 | 2.08 | 0.847 |
| I0011010 | 15.93 | 16.55 | 14.05 | 9.80 | 8.06 | 6.03 | 5.24 | 4.33 | 4.25 | 6.40 | 9.16 | 13.42 | 0.627 |
| I0031010 | 8.07 | 8.28 | 7.36 | 6.66 | 5.40 | 3.72 | 2.81 | 1.85 | 1.79 | 2.86 | 3.96 | 6.43 | 0.668 |
| I0034010 | 15.44 | 13.94 | 10.31 | 6.58 | 3.26 | 1.19 | 0.10 | 0.47 | 0.10 | 0.67 | 2.07 | 10.88 | 0.214 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| I0034110 | 20.00 | 17.19 | 12.81 | 8.13 | 4.69 | 2.19 | 0.63 | 0.63 | 0.31 | 1.56 | 3.75 | 15.63 | 0.283 |
| I0102010 | 16.38 | 13.57 | 12.52 | 9.03 | 6.44 | 4.03 | 3.14 | 2.50 | 2.91 | 5.72 | 8.47 | 15.15 | 0.466 |
| I0113010 | 11.50 | 12.23 | 11.69 | 10.16 | 8.96 | 7.46 | 6.77 | 6.17 | 5.96 | 6.45 | 7.59 | 10.20 | 0.866 |
| I0122010 | 11.82 | 12.34 | 11.19 | 9.54 | 8.28 | 6.68 | 6.19 | 5.27 | 5.52 | 6.47 | 8.06 | 10.25 | 0.756 |
| I0233110 | 13.88 | 12.46 | 11.45 | 10.88 | 10.28 | 10.48 | 9.97 | 9.52 | 9.69 | 10.03 | 11.41 | 12.79 | 0.907 |

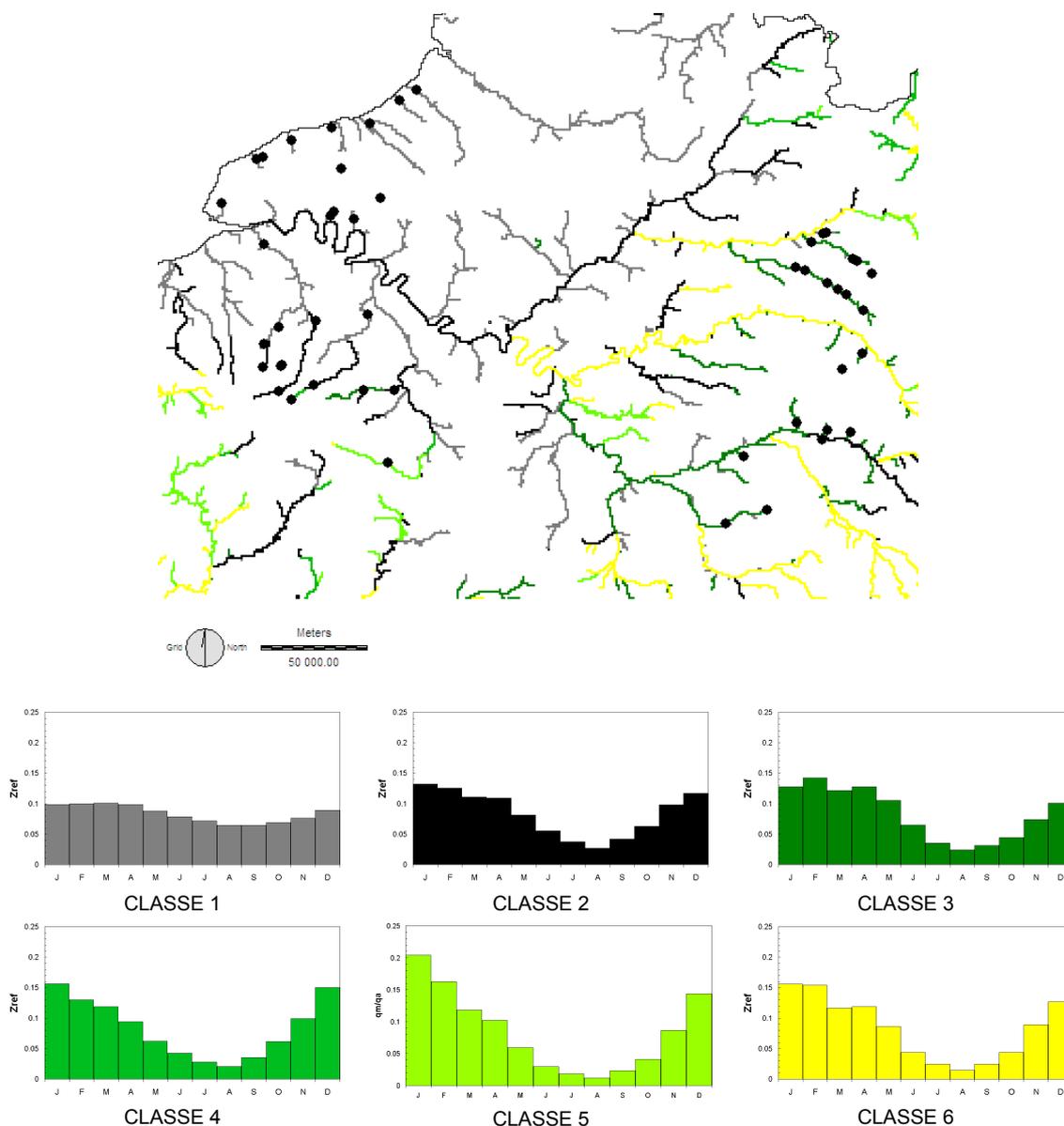


Figure 9 : Régime hydrologique associé aux coefficients mensuels moyens de débit - Fond de carte extrait de Sauquet et al. (2008).

Les graphes des débits moyens mensuels de chaque station sont regroupés en annexe 1. La variable *BFI* (Base Flow Index) est également calculée (Tableau 4 ci-dessus). 75% des bassins analysés affichent des valeurs de *BFI* supérieures ou égales à 0.85. Le pouvoir tampon et régulateur du souterrain s'exprime fortement sur le régime hydrologique de surface de ces cours d'eau. Un secteur en Normandie concentre des valeurs faibles : le Vernet à Glos-la-Ferrière (I0034010), le Val de Launay à Glos-la-Ferrière (I0034110), la Risle à Grosley-sur-Risle (I0031010), la Risle à Rai (I0011010), la Charentonne à Bocquencé (I0102010) et l'Eure à St-Luperce (H9021010), mis en grisé sur le tableau 4.

Nous retrouvons sur la carte une cohérence géographique, et même géologique, avec une structure spatiale en auréoles qui font écho à la succession des formations plus ou moins perméables (calcaire, craies et argiles).

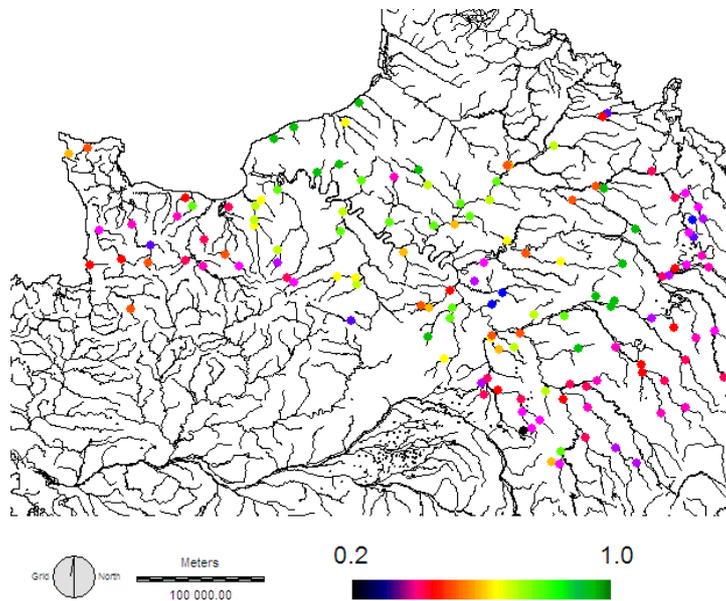


Figure 10 : Valeurs du BFI en 133 sites jaugés (d'après Chopart, 2006).

En complément, une carte des pluies annuelles de bassin est proposée en Figure 11. La variabilité spatiale est expliquée par la distance à la mer et le relief. La pluviométrie est plus importante près de la côte et en zone d'altitude que dans le Bassin Parisien.

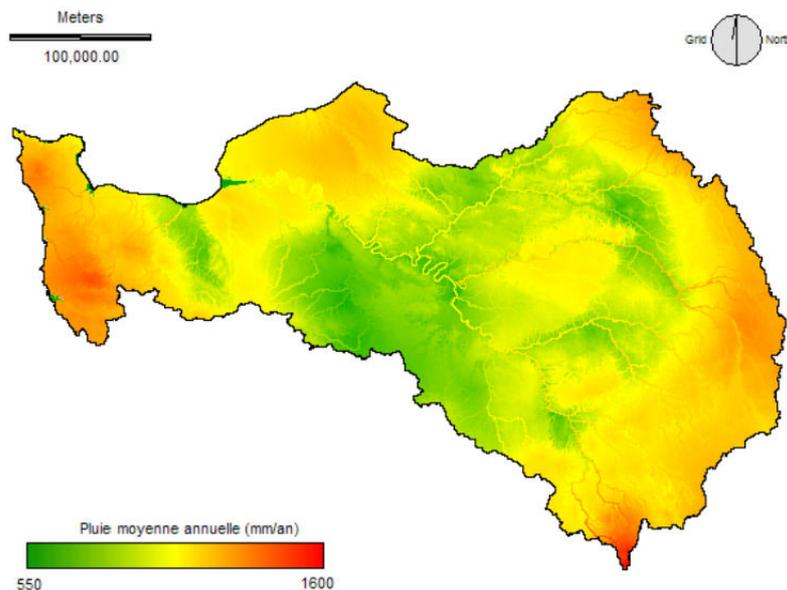


Figure 11 : Carte de la pluie de bassin (d'après Catalogne, 2007).

Tableau 5: Statistiques sur le module et le BFI sur les secteurs examinés.

| Secteur | Moyenne des QA (l/s/km ²) | Moyenne des BFI |
|---|---------------------------------------|-----------------|
| Bassin Seine Normandie (estimé sur 129 stations) | 8.79 | 0.714 |
| Fleuves côtiers (G) et affluents Seine rive droite | 8.53 | 0.940 |
| Champagne | 5.11 | 0.957 |
| Cours d'eau normands (I) et affluents Seine rive gauche | 6.95 | 0.643 |

Dans l'ensemble, les secteurs examinés présentent des valeurs de BFI plus élevées que la moyenne calculée sur l'ensemble du bassin Seine Normandie (sur 129 stations), exceptés les cours d'eau normands et affluents rive droite. Si on s'intéresse au QA exprimé en l/s/km², les trois secteurs distingués présentent des apports annuels bien différenciés ; sur cette caractéristique on identifie un lien avec la pluviométrie (la Champagne est moins arrosée).

1.4.2.3 Les courbes de débits classés (CDC)

Dans notre application, les CDC sont obtenues par classement de l'ensemble des débits horaires de la chronique en ordre décroissant. Chaque débit Q est associé à une fréquence F dite « empirique » encore appelée fréquence au dépassement lorsqu'elle est exprimée en pourcentage :

$$\text{Prob}(x \geq Q) = F(Q) = \frac{r}{N}$$

où N est le nombre total d'observations et r le rang de l'observation Q .

Les débits horaires sont calculés par agrégation des valeurs de la série au pas de temps variable. Les courbes obtenues peuvent être comparées à celles proposées dans les fiches de synthèse de la banque HYDRO. Elles sont quasiment identiques sauf sur les valeurs extrêmes. Une manière de les comparer est de diviser les courbes par le débit moyen annuel (Figure 12). On distingue les courbes avec une pente prononcée (au régime très contrasté, ex. le Vernet à Glos-la-Ferrière et le Val de Launay à Glos-la-Ferrière en vert et bleu) des courbes avec une pente peu marquée (au régime peu contrasté, ex. la Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers en rouge).

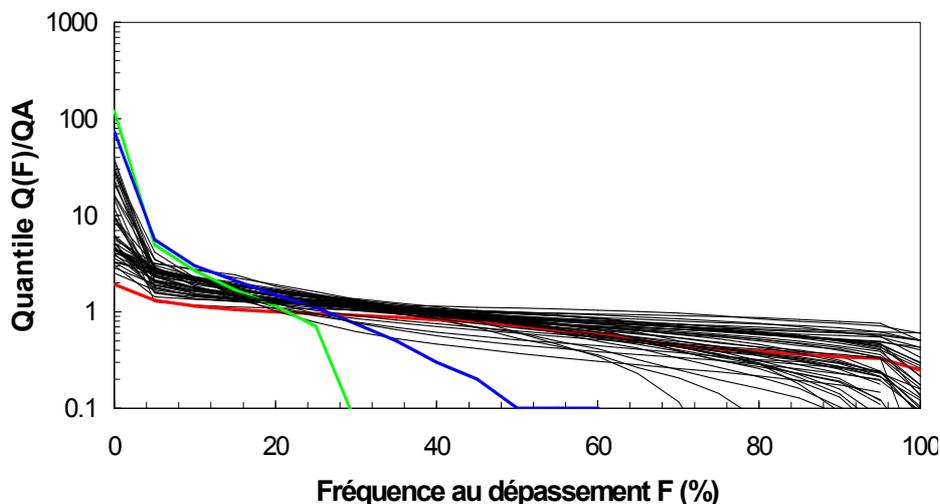


Figure 12 : Courbes des débits classés.

Dans un secteur comme celui du Bassin Parisien, où le substratum globalement perméable favorise grandement les échanges entre les cours d'eau et les aquifères, la variabilité des comportements hydrologiques est fortement influencée par l'existence ou non d'une composante souterraine jouant un rôle régulateur sur les débits. A ce titre un lien significatif a été mis en évidence par Catalogne (2007) sur un jeu de 129 stations entre le gradient des courbes des débits classés sur le secteur et le *BFI*, et plus secondairement avec la pluviométrie annuelle et l'altitude moyenne du bassin. L'allure des CDC peut ainsi fournir une vision relativement complémentaire à celle du *BFI* concernant l'existence d'une éventuelle composante souterraine.

Pour illustrer cette idée Catalogne et Sauquet (2009) ont cherché à résumer l'allure des CDC par un indice de concavité. Leur choix s'est porté sur le rapport :

$$\alpha = (Q_{99} - Q_x) / (Q_1 - Q_x)$$

Cet indice, qui traduit en réalité le rapport de deux pentes, se montre particulièrement pertinent avec l'emploi du quantile de fréquence au dépassement $Q_x = Q_{10}$ qui marque, sur la plupart des courbes, le point d'inflexion entre un tronçon à fort accroissement entre Q_1 et Q_{10} et un tronçon à plus faible pente entre Q_{10} et Q_{99} . Il prend une valeur fortement négative lorsque la courbe présente une faible concavité (régime amorti par un facteur de régulation), et proche de zéro lorsque la concavité est forte (comportement contrasté et réactif).

La cartographie de cet indice à l'échelle de la France montre qu'il est fortement structuré dans l'espace (Figure 13) et suggère une délimitation relativement efficace de régions hydrologiques types. Sur le bassin Seine-Normandie, α évolue entre -3.85 et -0.28. La moyenne observée est de -0.82 pour un écart-type de 0.46. Une analyse des valeurs α sur les sous-secteurs considérés montre :

- la prédominance de régimes fortement régulés par les apports souterrains sur les cours d'eau côtiers, de la Seine rive droite et de Champagne (α moyen de -1.27, -1.53 et -1.54 et α minimum de -0.79, -1.07 et -0.96 respectivement),
- une variabilité des comportements relativement forte pour les affluents de la Seine rive gauche liée à l'existence de pertes très localisées (α évolue entre -0.27 et -1.84),
- au contraire une forte homogénéité de comportements (réactifs) pour les cours d'eau Normands (α moyen de -0.46 pour un écart type de 0.17) dénotant l'absence d'une composante souterraine significative (substratum imperméable).

On notera que l'existence de débits nuls pour un cours d'eau possédant un indice de concavité fortement négatif n'est pas forcément contradictoire. Il s'agit du cas notamment de très petits cours d'eau dont le débit se trouve presque exclusivement assuré par le drainage de la nappe, lors d'une baisse importante du niveau de cette dernière, le cours s'assèche.

Afin de faire un lien entre variables hydrologiques, nous avons représenté le *BFI* en fonction de l'indice de concavité. La Figure 14 ci-dessous permet de confirmer l'existence d'une relation assez nette entre ces deux grandeurs : on constate à ce titre une plus forte discrimination des comportements très amortis par l'emploi de l'indice de concavité tandis que le *BFI* permet une meilleure ségrégation des comportements plus réactifs.

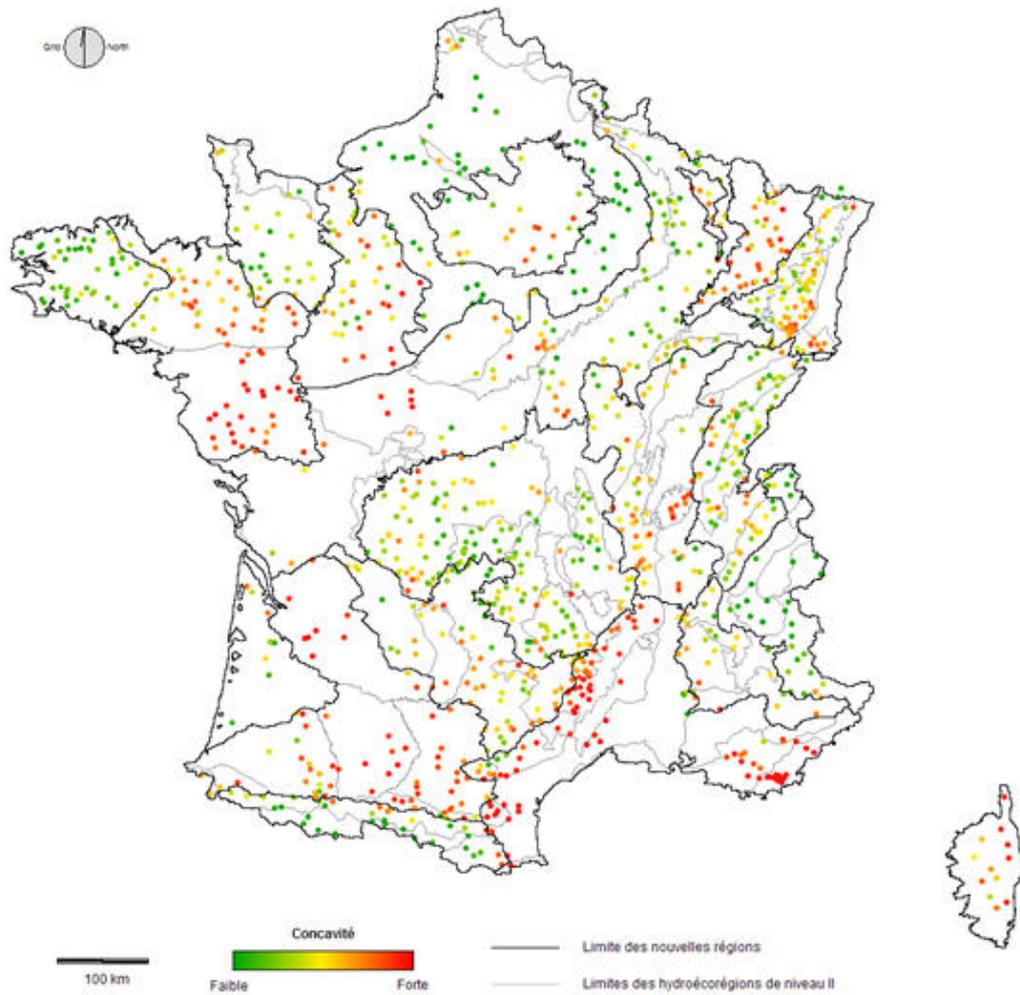


Figure 13 : Valeur de l'indice de concavité sur un fond de carte présentant les contours des hydroécocorégions de niveau 2 (en gris) et les regroupements en régions hydrologiques types suggérés par Catalogne et Sauquet (2009).

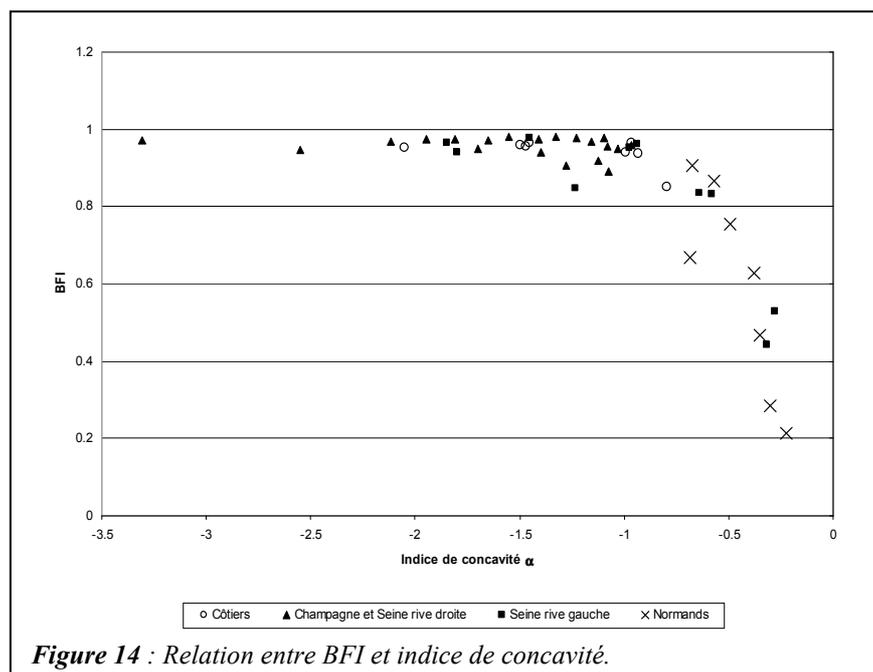


Figure 14 : Relation entre BFI et indice de concavité.

1.4.2.4 *Le régime des crues*

Pour décrire le régime des crues, plusieurs variables extraites des hydrogrammes peuvent être examinées. Nous retiendrons : une durée caractéristique de crue renseignant la dynamique et le débit maximal instantané ou débit de pointe Q_{max} caractérisant l'intensité de la crue.

1.4.2.4.1 La durée caractéristique de crue

Plusieurs définitions pour une durée de crue sont possibles. Celle que nous avons retenue est obtenue à partir d'une sélection d'hydrogrammes sur une fenêtre autour des pics de crues majeures. Pour chaque station, nous avons extrait l'événement majeur de chaque année hydrologique. Puis nous avons rendu adimensionnels les hydrogrammes en divisant chacun d'entre eux par le débit de pointe Q_{max} . Tous les hydrogrammes normés ont donc un débit maximal égal à 1. A partir de cet échantillon de crues normées, nous construisons un hydrogramme supposé représentatif du régime de crue par simple moyenne arithmétique.

Finalement, θ est la durée de dépassement de $Q/Q_{max} = 0.5$ pour l'hydrogramme normé moyen.

Cette méthodologie a pour but de caractériser la dynamique de ruissellement contribuant aux écoulements en crue.

Ci-dessous (Figure 15) sont présentés deux exemples bien différenciés : l'Ardusson à Saint-Aubin, qui ne connaît pratiquement pas de véritables épisodes de crue, et la Charentonne à Bocquencé.

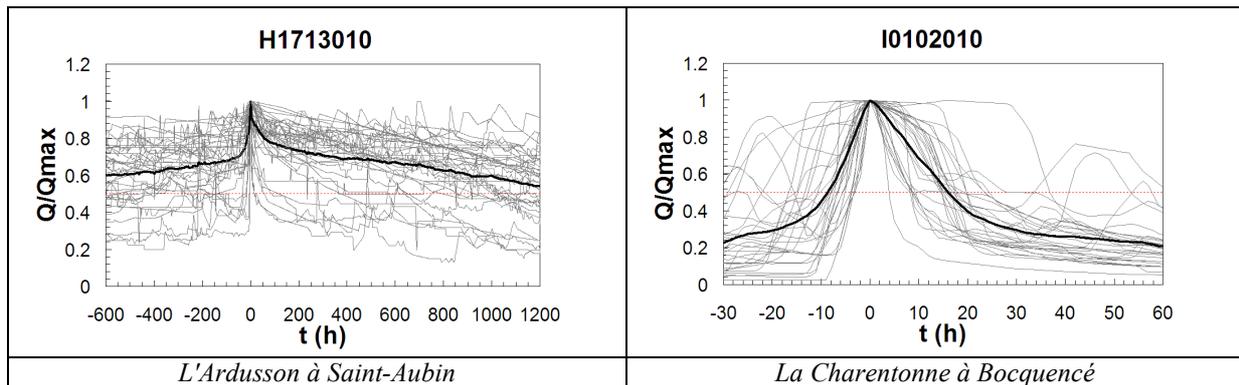


Figure 15 : Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) sur les débits observés.

L'ensemble des graphiques sont présentés en annexe 2. Ce mode de représentation permet d'illustrer de manière frappante l'influence de l'écoulement de base et de comparer les comportements des différents cours d'eau, les valeurs de débit étant normées par le débit maximum. Par simple observation des formes d'hydrogramme, on voit que les rivières de Champagne ont toutes une composante de ruissellement très peu marquée en crue par rapport à la composante souterraine. Seules font exception deux stations sur la Vesle situées à Saint-Brice Courcelles et à Chalons-sur-Vesle. Des informations sur le comportement atypique de la Vesle ont été prises auprès de M. François Dahy en charge de l'hydrométrie de la DREAL Champagne-Ardenne. Il nous a confirmé que les stations aval de la Vesle sont sous influence importante de l'agglomération de Reims. Notamment, la station de Saint Brice est située juste à l'aval de l'agglomération, et la Vesle récupère donc tous les ruissellements (déversoirs d'orage), ce qui explique des pics de crue importants qu'on retrouve donc sur les graphiques et sur les durées de crue calculées.

Le paramètre θ caractérisant la durée de crue a été calculé (cf. Tableau 6). La procédure appliquée aux débits observés fournit des valeurs aberrantes de durée caractéristique de crue. Les allures des hydrogrammes sont très bruitées. Parfois, l'hydrogramme moyen propose des valeurs toujours supérieures au seuil 0.5 pendant plus de 20 jours.

Cette méthode de calcul est plutôt adaptée aux bassins pour lesquels le débit de base ne représente qu'une faible proportion de l'écoulement en crue. Nous avons donc tenté d'identifier des durées de crue en adaptant la méthode. Cette adaptation consiste à soustraire à la chronique des débits l'écoulement de base calculé précédemment et à traiter la nouvelle chronique comme une série temporelle de débit (sélection des épisodes majeurs, normalisation et calcul de la durée sur l'épisode moyen).

Oter la composante souterraine permet de réduire le bruit et d'obtenir des durées caractéristiques de crue réalistes (Voir Tableau 6 ci-dessous).

| Code | Station | θ (h) avec Q | θ (h) avec $Q-BFI$ | Surface (km ²) |
|----------|---|-----------------------|---------------------------|----------------------------|
| G0402020 | La Bresle à Ponts-et-Marais [Ponts-et-Marais] | >1000 | 48 | 693 |
| G1003010 | L'Yères à Touffreville-sur-Eu | >1000 | 16 | 265 |
| G2203010 | L'Eaulne à Martin-Église | >1000 | 19 | 324 |
| G4002020 | La Saane à Val-de-Saâne | 8 | 7 | 50.7 |
| G5002010 | Le Dun au Bourg-Dun [Le Pont Blanc] | 4 | 4 | 93.3 |
| G6003010 | Le Durdent à Vitteflour | >1000 | 17 | 349 |
| G7002020 | La Valmont à Colleville | 134 | 19 | 146 |
| G7103010 | La Ganzeville à Ganzeville | 178 | 11 | 89.8 |
| G9103020 | La Lézarde à Montvilliers | 8 | 3 | 116 |
| H1503510 | L'Huitrelle à Lhuître | >1000 | 30 | 160 |
| H1503910 | L'Herbissonne à Allibaudières | >1000 | 44 | 87 |
| H1513210 | La Barbuise à Pouan-les-Vallées | >1000 | 55 | 187 |
| H1603010 | La Superbe à Saint-Saturnin | >1000 | 56 | 320 |
| H1713010 | L'Ardusson à Saint-Aubin | >1000 | 45 | 159 |
| H2602010 | La Vanne à Paisy-Cosdon | >1000 | 29 | 347 |
| H2622010 | La Vanne à Pont-sur-Vanne | >1000 | 35 | 866 |
| H5204210 | La Coole à Écurey-sur-Coole | >1000 | 62 | 150 |
| H5213310 | La Soude à Soudron | >1000 | 27 | 105 |
| H6303810 | La Retourne à Poilcourt-Sydney | >1000 | 60 | 322 |
| H6303820 | La Retourne à Houdilcourt | >1000 | 52 | 322 |
| H6313010 | La Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers | >1000 | 55 | 475 |
| H6313020 | La Suipe à Orainville | >1000 | 59 | 802 |
| H6313030 | La Suipe à Selles | >1000 | 26 | 486 |
| H6313210 | Le Py à Dontrien | >1000 | 15 | 89 |
| H6402010 | La Vesle à Bouy | >1000 | 44 | 286 |
| H6402020 | La Vesle à Sept-Saulx | >1000 | 54 | 416 |
| H6402030 | La Vesle à Puisieulx | >1000 | 54 | 603 |
| H6402040 | La Vesle à Beaumont-sur-Vesle | >1000 | 36 | 446 |
| H6412010 | La Vesle à Saint-Brice-Courcelles | 9 | 6 | 762 |
| H6412020 | La Vesle à Châlons-sur-Vesle | 33 | 6 | 828 |
| H9021010 | L'Eure à Saint-Luperce | 62 | 57 | 327 |
| H9202010 | L'Avre à Acon | 91 | 54 | 490 |
| H9222010 | L'Avre à Muzy | 127 | 69 | 880 |
| H9402020 | L'Iton à Crulai | 34 | 32 | 108 |
| H9402030 | L'Iton à Normanville | 499 | 96 | 1030 |
| H9402040 | L'Iton à Bourth | 39 | 35 | 159 |
| H9913020 | Le Cailly à Notre-Dame-de-Bondeville | >1000 | 8 | 210 |
| H9913030 | Le Cailly à Cailly [Cailly] | 2 | 1 | 28.5 |
| H9923010 | L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay] | 12 | 7 | 208 |
| H9923020 | L'Austreberthe à Saint-Paër | 4 | 3 | 157 |

| | | | | |
|----------|--|----|----|------|
| H9943420 | Le Commerce à Gruchet-le-Valasse | 1 | 1 | 118 |
| I0011010 | La Risle à Rai | 27 | 23 | 147 |
| I0031010 | La Risle à Grosley-sur-Risle | 64 | 48 | 494 |
| I0034010 | Le Vernet à Glos-la-Ferrière | 9 | 9 | 19.3 |
| I0034110 | Le Val de Launay à Glos-la-Ferrière | 13 | 12 | 3.2 |
| I0102010 | La Charentonne à Bocquencé | 23 | 24 | 65.2 |
| I0113010 | Le Guïel à Montreuil-l'Argillé | 17 | 15 | 79.2 |
| I0122010 | La Charentonne à Ferrières-Saint-Hilaire | 33 | 26 | 257 |
| I0233110 | La Corbie à Toutainville | 12 | 10 | 66.7 |

Tableau 6 : Durées caractéristiques selon la chronique exploitée (avec et sans la composante souterraine) ; en grisé, les rivières de Champagne.

Ci-dessous (Figure 16), sont présentés sous forme de graphique les résultats obtenus en ôtant la composante souterraine pour l'Ardusson et la Charentonne.

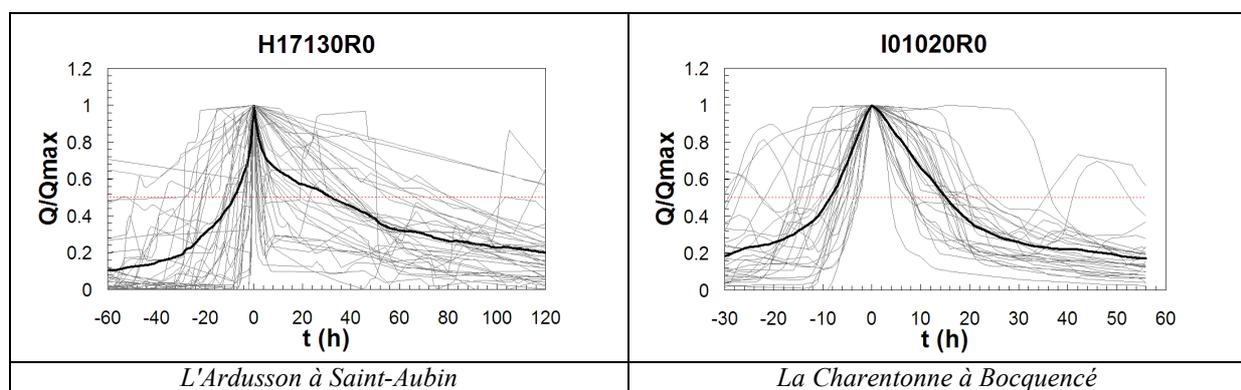


Figure 16 : Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) sur les débits privés de la composante souterraine.

Nous avons également vérifié la cohérence en traçant les durées obtenues après filtrage en fonction de la surface drainée (Figure 17). Une tendance à l'augmentation de la durée avec la surface se dégage (temps de concentration allongé). Les durées finalement retenues sont celles correspondant au seul débit de ruissellement (débit total amputé de la composante souterraine $Q - \text{BFI}$) figurant dans le tableau 6).

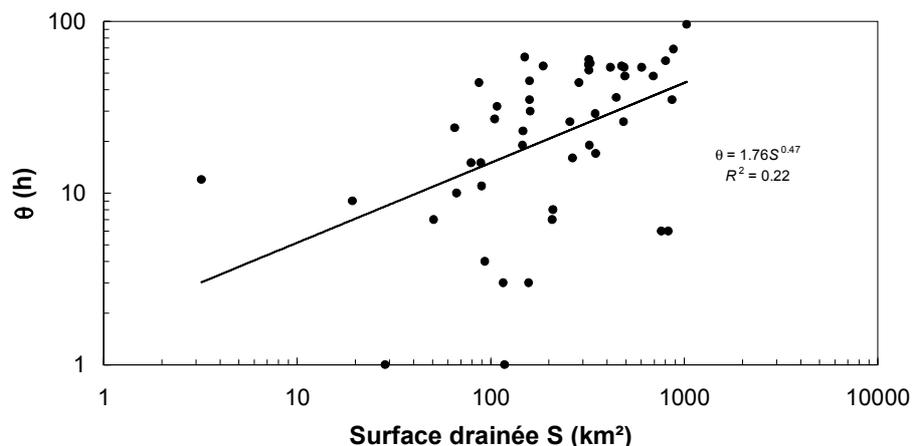


Figure 17 : Lien entre surface et durée caractéristique calculée sur la chronique $Q - \text{BFI}$.

1.4.2.4.2 Les débits instantanés maximaux

L'objectif est d'ajuster un modèle probabiliste F sur les échantillons de données X , c'est-à-dire la détermination d'une probabilité de non-dépassement de la valeur x pour la variable X :

$$Prob(X \leq x) = F(x)$$

Il est possible de calculer le quantile $x(T)$ de période de retour T associé à la loi F .

La première étape consiste à former un échantillon représentatif, c'est-à-dire à sélectionner les valeurs numériques sur lesquelles seront établies les statistiques, à partir des séries temporelles. Nous avons privilégié la méthode d'échantillonnage par valeur supérieure à un seuil. Elle consiste à retenir la valeur maximale d'un ensemble d'événements indépendants ayant dépassé un seuil donné. Elle offre une plus grande souplesse et robustesse puisqu'elle permet de rassembler un plus grand nombre d'événements sélectionnés et si le seuil est suffisamment élevé, seuls les événements majeurs seront capturés. Cette méthode est jugée plus fiable que la méthode des maxima annuels. Cependant l'extraction des valeurs selon l'approche sup-seuil est délicate (Lang *et al.*, 1999, Lang et Lavabre, 2008).

L'échantillon obtenu quelle que soit la méthode doit répondre à plusieurs critères :

- les valeurs extraites doivent être indépendantes, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas être issues d'un même événement et l'une ne doit pas être conditionnée par l'autre ;
- les propriétés statistiques doivent être stationnaires dans le temps, c'est-à-dire que les valeurs fortes ou faibles doivent être réparties de manière homogène dans le temps.

Pour l'échantillonnage sup-seuil, trois paramètres : le seuil S , α et la durée D^* alimentent une procédure d'extraction semi-automatique.

Les seuils de dépassement S sont fixés de sorte à sélectionner un nombre moyen d'événements par an prédéterminé, pour chaque station. Ici, nous avons choisi un nombre moyen d'événements objectif de 1 par an, du fait de la difficulté d'identifier des épisodes indépendants. α est conditionné par le débit de base pour les débits. D^* est la durée minimale entre deux pics à considérer pour qu'ils soient jugés indépendants. La valeur guide ici est $D^* = \theta$ donnée par $Q-BFI$.

Des tests statistiques viennent valider les caractères d'indépendance des épisodes, de stationnarité du processus d'occurrence des événements extrêmes.

La seconde étape est l'inférence statistique, pour le calcul des paramètres d'une loi choisie au préalable, si possible sur des considérations théoriques. Le choix d'une distribution n'est pas totalement libre. Pour ce qui concerne l'analyse des valeurs fortes, la théorie des valeurs extrêmes oriente le choix de F . La loi exponentielle est un choix possible, elle a été retenue ici :

$$x(T) = a_X + b_X \ln(T)$$

où a_X et b_X sont les paramètres de position et d'échelle (ou gradex) à ajuster.

Les aspects processus seront examinés au travers des dates d'occurrence des crues ayant engendré les pics les plus forts. Nous avons repris les épisodes sup-seuils identifiés pour la constitution des échantillons des pics de crue et isolé la date d'occurrence du maximum de chaque épisode. Pour chaque mois, nous avons comptabilisé le nombre d'événements. Majoritairement, les bassins présentent un caractère saisonnier marqué avec des événements concentrés en hiver ou printemps. La Vesle à Saint-Brice-Courcelles (H6412010), le Cailly à Cailly [Cailly] (H9913030) et à Notre-Dame-de-Bondeville (H9913020), l'Austreberthe à

Saint-Paër (H9923020) et le Commerce à Gruchet-le-Valasse (H9943420) se démarquent par la présence de crues en été, dues vraisemblablement à des influences anthropiques (zones urbaines, pompages...).

La figure 18 ci-dessous présente l'exemple de l'Ardusson et de la Charentonne.

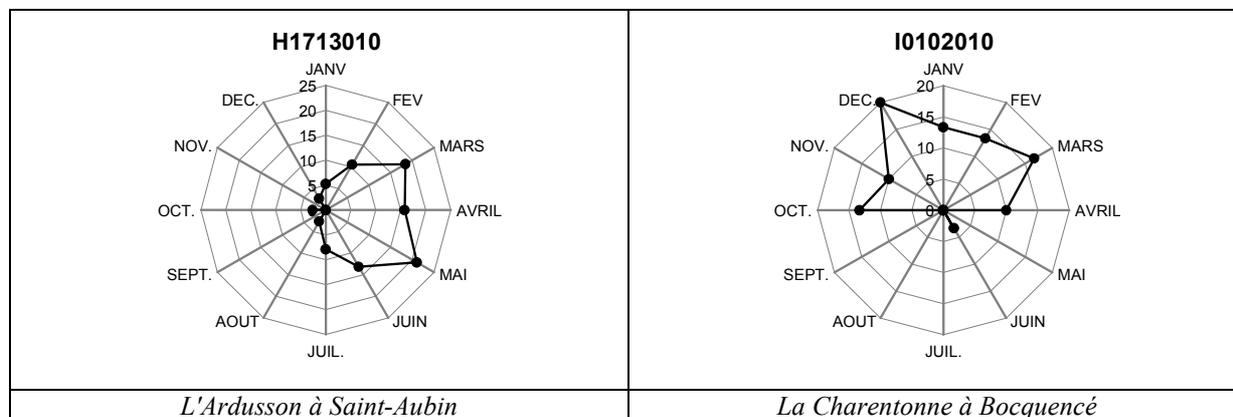


Figure 18 : Saisonnalité des crues, selon la date des maxima échantillonnés selon la méthode sup-seuil.

La loi exponentielle donne relativement satisfaction, les ajustements sont acceptables. En extrapolation, les lois peuvent fournir des valeurs aberrantes (en particulier, il se peut que pour $T < 1$ an, les quantiles soient négatifs). Le Tableau 7 présente les quantiles des débits de pointe estimés pour les crues de période de retour 2 ans, 5 ans et 10 ans. La figure 19 illustre les ajustements effectués sur l'Ardusson et la Charentonne. L'ensemble des ajustements effectués sont présentés en annexe 3 ; ils n'ont pu être effectués sur la Coole à Écurey-sur-Coole, l'Eaulne à Martin-Église, la Vesle à Sept-Saulx, la Valmont à Colleville, La Lézarde à Montivilliers et la Suipe à Pontfaverger-Moronvilliers, les chroniques disponibles étant trop courtes (séries de longueur inférieure à 8 ans).

Tableau 7 : Quantiles de débit de pointe $QIXA(T)$ estimés par la loi exponentielle pour différentes périodes de retour (m^3/s).

| Code | Station | Surface (km ²) | QIXA2 (m ³ /s) | QIXA5 (m ³ /s) | QIXA10 (m ³ /s) |
|----------|---|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| G0402020 | La Bresle à Ponts-et-Marais [Ponts-et-Marais] | 693 | 13.88 | 15.76 | 17.19 |
| G1003010 | L'Yères à Touffreville-sur-Eu | 265 | 7.07 | 9.02 | 10.50 |
| G4002020 | La Saane à Val-de-Saâne | 50.7 | 5.19 | 10.51 | 14.54 |
| G5002010 | Le Dun au Bourg-Dun [Le Pont Blanc] | 93.3 | 5.01 | 6.56 | 7.73 |
| G6003010 | Le Durdent à Vittefleury | 349 | 6.81 | 11.14 | 14.41 |
| G7103010 | La Ganzeville à Ganzeville | 89.8 | 1.88 | 3.25 | 4.29 |
| H1503510 | L'Huitrelle à Lhuitre | 160 | 2.31 | 3.33 | 4.10 |
| H1503910 | L'Herbissonne à Allibaudières | 87 | 0.78 | 1.12 | 1.38 |
| H1513210 | La Barbuise à Pouan-les-Vallées | 187 | 1.65 | 2.33 | 2.85 |
| H1603010 | La Superbe à Saint-Saturnin | 320 | 4.00 | 5.04 | 5.82 |
| H1713010 | L'Ardusson à Saint-Aubin | 159 | 1.77 | 2.42 | 2.90 |
| H2602010 | La Vanne à Paisy-Cosdon | 347 | 3.91 | 5.07 | 5.95 |
| H2622010 | La Vanne à Pont-sur-Vanne | 866 | 9.42 | 12.56 | 14.92 |
| H5213310 | La Soude à Soudron | 105 | 1.35 | 1.78 | 2.10 |
| H6303810 | La Retourne à Poilcourt-Sydney | 322 | 1.35 | 1.78 | 2.10 |
| H6303820 | La Retourne à Houdilcourt | 322 | 2.60 | 3.55 | 4.27 |

| | | | | | |
|----------|--|------|-------|-------|-------|
| H6313020 | La Suipe à Orainville | 802 | 7.80 | 10.04 | 11.73 |
| H6313030 | La Suipe à Selles | 486 | 5.47 | 7.95 | 9.82 |
| H6313210 | Le Py à Dontrien | 89 | 1.14 | 1.46 | 1.70 |
| H6402010 | La Vesle à Bouy | 286 | 2.98 | 3.87 | 4.54 |
| H6402030 | La Vesle à Puisieulx | 603 | 6.80 | 8.64 | 10.03 |
| H6402040 | La Vesle à Beaumont-sur-Vesle | 446 | 4.95 | 6.28 | 7.29 |
| H6412010 | La Vesle à Saint-Brice-Courcelles | 762 | 18.34 | 24.03 | 28.33 |
| H6412020 | La Vesle à Châlons-sur-Vesle | 828 | 15.65 | 18.32 | 20.34 |
| H9021010 | L'Eure à Saint-Luperce | 327 | 23.78 | 34.91 | 43.33 |
| H9202010 | L'Avre à Acon | 490 | 14.46 | 17.71 | 20.17 |
| H9222010 | L'Avre à Muzy | 880 | 17.50 | 22.12 | 25.62 |
| H9402020 | L'Iton à Crulai | 108 | 14.46 | 17.71 | 20.17 |
| H9402030 | L'Iton à Normanville | 1030 | 9.17 | 10.98 | 12.35 |
| H9402040 | L'Iton à Bourth | 159 | 13.02 | 17.20 | 20.37 |
| H9913020 | Le Cailly à Notre-Dame-de-Bondeville | 210 | 6.15 | 7.67 | 8.83 |
| H9913030 | Le Cailly à Cailly [Cailly] | 28.5 | 1.63 | 2.63 | 3.38 |
| H9923010 | L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay] | 208 | 6.03 | 7.38 | 8.40 |
| H9923020 | L'Austreberthe à Saint-Paër | 157 | 10.87 | 14.18 | 16.68 |
| H9943420 | Le Commerce à Gruchet-le-Valasse | 118 | 5.15 | 5.85 | 6.39 |
| I0011010 | La Risle à Rai | 147 | 20.08 | 24.32 | 27.54 |
| I0031010 | La Risle à Grosley-sur-Risle | 494 | 18.56 | 24.12 | 28.32 |
| I0034010 | Le Vernet à Glos-la-Ferrière | 19.3 | 7.70 | 10.23 | 12.15 |
| I0034110 | Le Val de Launay à Glos-la-Ferrière | 3.2 | 0.82 | 1.00 | 1.14 |
| I0102010 | La Charentonne à Bocquencé | 65.2 | 10.05 | 11.24 | 12.15 |
| I0113010 | Le Guiel à Montreuil-l'Argillé | 79.2 | 7.14 | 12.75 | 17.00 |
| I0122010 | La Charentonne à Ferrières-Saint-Hilaire | 257 | 18.70 | 27.02 | 33.31 |
| I0233110 | La Corbie à Toutainville | 66.7 | 4.87 | 7.62 | 9.70 |

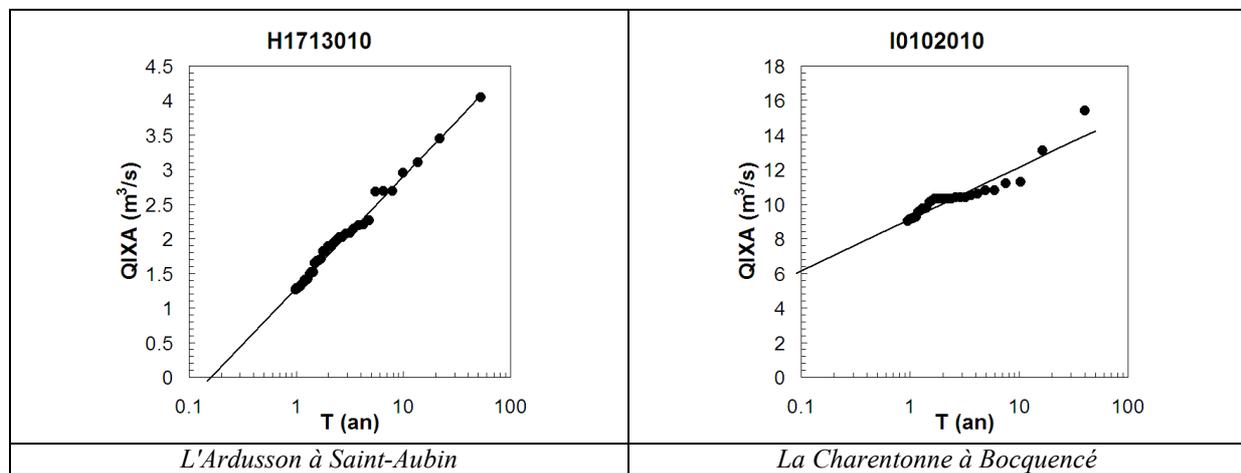


Figure 19 : Ajustements à la loi exponentielle.

1.4.2.5 Conclusion

Cette étude exploratoire est riche d'enseignements : les différents éclairages utilisés ont permis de mettre en évidence des différences de comportement hydrologique qui n'apparaissent pas sous un seul angle.

Le calcul du "Base Flow Index", qui est réalisé sur l'ensemble de la chronique des débits, confirme que les cours d'eau de cette zone géologique du crétacé supérieur sont très inféodés au fonctionnement de la nappe mais permet de noter que c'est moins le cas pour les cours d'eau du bassin amont de la Risle. Cependant, même pour les cours d'eau ayant une part équivalente de l'écoulement venant du souterrain, le fonctionnement hydrologique n'est pas le même. Le calcul des débits moyens mensuels montre que certains ont malgré tout une variabilité saisonnière (ceux situés en Champagne et une partie de ceux situés en Normandie, et pas seulement sur le bassin de la Risle) alors que d'autres sont extrêmement réguliers tout au long de l'année (fleuves côtiers, affluents de la Seine). Enfin l'extraction des hydrogrammes de crue fait apparaître qu'à l'échelle des événements de crue, il y a de grandes différences entre les cours d'eau de notre (petit) échantillon situés en Champagne, qui n'ont pratiquement aucune crue de ruissellement mais seulement des montées d'eau de la nappe, et les cours d'eau de notre échantillon situés en Normandie qui ont des crues de ruissellement et même parfois des crues très brutales.

Ainsi par exemple le Cailly peut avoir à la fois un BFI de 0,962, traduisant une très forte dépendance des débits à la nappe, et des pics de crue très brefs et intenses qui s'y surajoutent ponctuellement, comme on peut le constater sur le graphe de la Figure 20 ci-dessous.

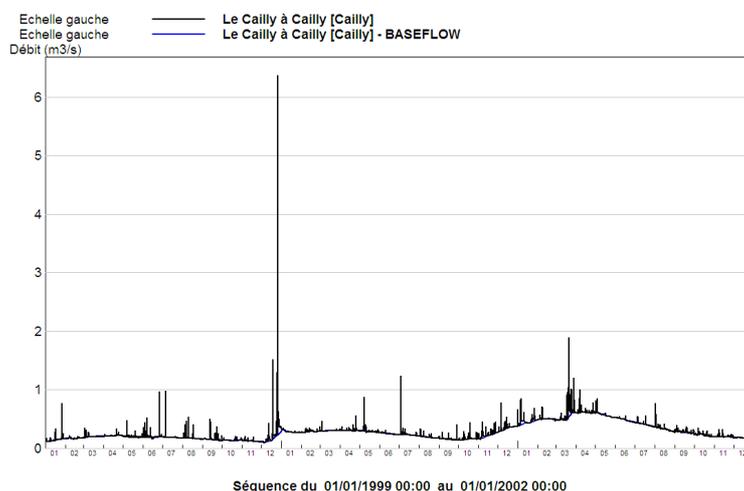


Figure 20 – Partition entre débit total et débit de base, exemple du Cailly.

Même si la zone d'étude choisie semble relativement homogène d'un point de vue géologique, elle ne l'est en tout cas pas d'un point de vue hydrologique et si l'on voit se dessiner ici au niveau des crues une particularité des cours d'eau de Champagne étudiés, on ne peut parler d'une simple opposition entre cours d'eau normands et cours d'eau champenois : en Normandie il n'y a pas qu'un seul "profil" bien typé mais plusieurs (amont du bassin de la Risle, fleuves côtiers, affluents de la Seine...) avec des évolutions en continu de l'un à l'autre...

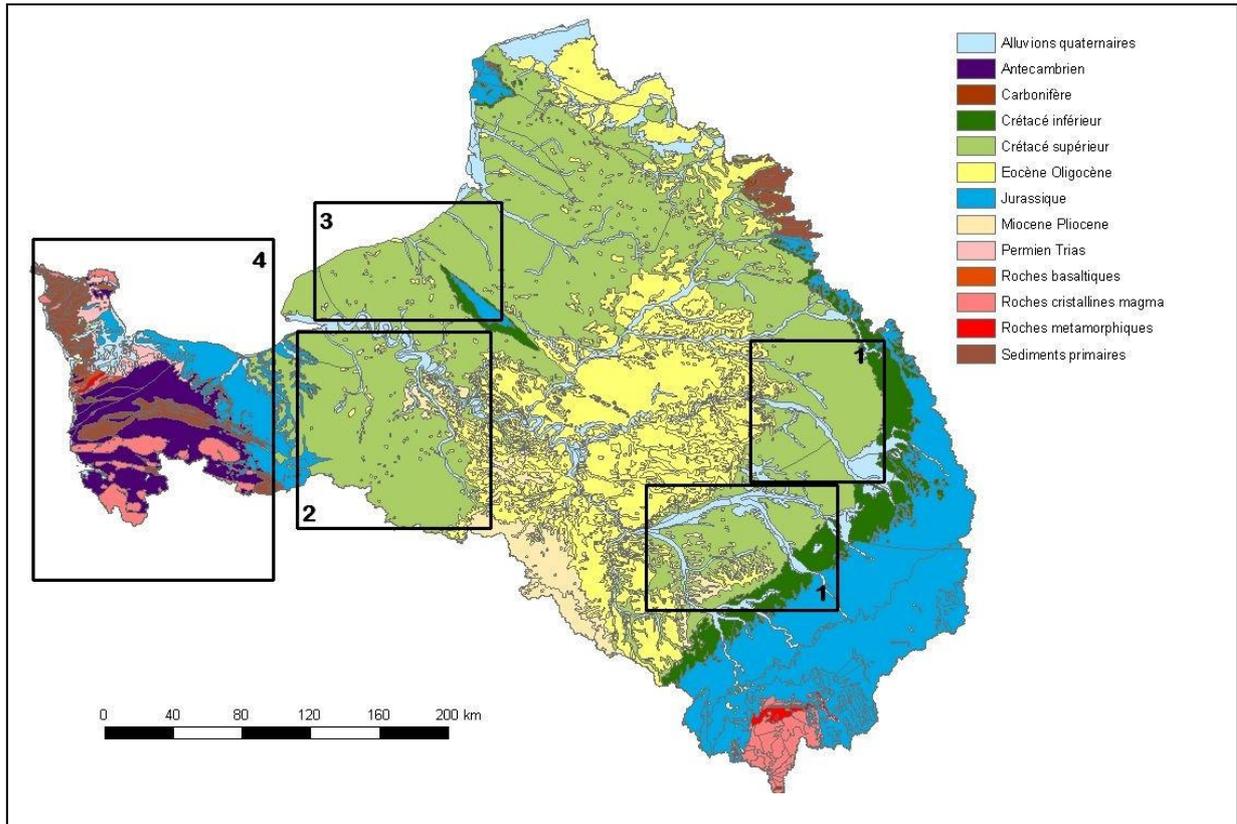


Figure 21 : carte géologique.

La carte géologique ci-dessus permet de caractériser les régions examinées :

- 1 et 3 sont des zones de résurgence généralisée avec l'existence localement de très petits cours d'eau à débit presque exclusivement assuré par les débordements de nappe (en l'occurrence les nappes alluviales superficielles de la Marne, de l'Yonne et de l'Aube) ;
- 2 est également une zone de résurgence mais avec d'importants tronçons affectés par des pertes à l'amont (ex : l'Iton, la Risle) et résurgence principalement à l'aval ;
- 4 (hors de la zone crayeuse étudiée ici) a un comportement hydrologique révélateur d'un substratum imperméable.

L'étude précédente a montré que les sites présentent des similitudes sur certaines caractéristiques mises en évidence sur les sous-secteurs 1, 2 et 3 identifiés à l'intérieur de la zone du crétacé. Certaines d'entre elles sont pilotées par la pluie (QA) ou par le souterrain (indice de concavité). Il est délicat de parler d'homogénéité « en absolu » sur l'ensemble de ces secteurs. En effet, il n'a pas été possible de faire émerger des propriétés communes à tous les bassins avec une géologie de type calcaire / craie du crétacé supérieur. L'identification d'une variable explicative de la morphologie permettra peut-être de montrer quels sont les processus (de surface ou non) à l'origine de la morphologie.

1.5 Sélection des stations étudiées

Dans cette première phase de l'étude une trentaine de stations naturelles et une dizaine de stations anthropisées ont été étudiées. Etant donné l'étendue de la zone et le nombre de sites, il n'a pas été possible de faire une étude approfondie préalable de chaque cours d'eau avant leur sélection. Nous avons prospecté la zone sur carte puis sur le terrain, pour enfin choisir les stations en fonction d'un ensemble de critères.

D'un point de vue général, les stations, qu'elles soient naturelles ou anthropisées, devaient remplir les conditions suivantes :

- un écoulement non-influencé par des prélèvements ou des restitutions, par un obstacle à l'écoulement (barrage, seuil, bief, etc.)
- un chenal unique (pas d'île, de confluence, de dérivation, de large fossé de drainage, etc.)
- l'absence de sources de pollution apparente directement en amont de la station
- la possibilité de prospecter la station à pied (facilité de mise en œuvre du protocole de mesure)

Pour ce qui concerne les stations naturelles les critères suivants ont également été retenus :

- une sinuosité bien marquée (absence de signes de rectification ou de recalibrage)
- une absence d'endiguement, de protections de berge, d'ouvrages tels que des ponts, de route, etc.
- l'absence de substrat artificiel
- l'absence de colmatage organique excessif

Pour les stations anthropisées les stations peuvent présenter éventuellement de légers aménagement des berges (protection légère des berges ou coupe de la berge à 45 degré voire présence de rehaussement de l'une ou des deux berges).

Dans ce travail nous nous sommes concentrés sur l'impact des rectifications du tracé et ou des recalibrages. Depuis des décennies, les cours d'eau du bassin de la Seine ont subi ce type de transformations pour lutter contre les inondations ou l'érosion des terrains agricoles, permettre l'exploitation agricole ou la mise en place de réseaux routier ou ferroviaire, ou encore à des fins industrielles (apport en eau, production d'énergie, etc.). Pour toutes ces raisons, les aménagements ont généralement conduit à la suppression des méandres, à l'élargissement et à l'approfondissement du chenal.

En plaine, les cours d'eau de faible pente présentent en général une sinuosité naturellement assez forte. Le caractère rectiligne du tracé est donc un très bon indicateur d'une anthropisation d'un cours d'eau. Le seul critère de sinuosité ne permet toutefois pas de déterminer si la rectification du tracé est plus ou moins ancienne et si elle s'est accompagnée d'un recalibrage de chenal mais c'est toutefois un moyen rapide de faire la distinction entre les stations naturelles et les stations dégradées. Ce critère a d'ailleurs très souvent été utilisé dans la littérature pour mettre en évidence une anthropisation et a été retenu comme critère discriminant dans le projet SYRAH développé en collaboration entre le Cemagref et le Ministère de l'écologie.

Un autre élément déterminant pour le choix des stations a été l'absence de perturbation à l'écoulement tels que barrages, seuils, épis, etc. L'utilisation de courbes de géométrie hydraulique et d'un modèle hydraulique demande en effet de pouvoir réaliser des observations

de hauteur d'eau, largeur, vitesse à plusieurs débits sans perturbation. Il était donc très important de se situer à une distance respectable des ponts, seuils, etc. qui ralentissent l'écoulement et ainsi perturbent les lignes d'eau. De même, pour simplifier l'étude hydraulique, nous avons choisi de ne travailler sur des stations où le cours d'eau n'est composé que d'un seul chenal.

Afin d'alléger les campagnes de mesure sur le terrain et de reconstituer le contexte hydrologique de la station nous avons privilégié les sites d'étude présentant une station hydrométrique à proximité.

De même, notre prospection a été guidée par la présence éventuelle de stations de pêche électrique de l'Onema (notamment données du réseau RHP). Malheureusement dans un grand nombre de cas, ces stations ne répondaient pas aux critères que nous nous étions fixés notamment en termes d'obstacle à l'écoulement et d'anthropisation.

Un dernier élément à prendre en considération est la qualité physico chimique de l'eau. Cette étude porte en effet sur les dégradations de l'environnement physique du cours d'eau mais le rôle de la qualité de l'eau ne peut évidemment pas être occulté. Nous avons dès lors essayé de travailler sur des stations de bonne qualité ou tout au moins des stations de qualité comparable.

Aux termes de notre prospection, 152 stations ont été visitées à travers l'ensemble de la région crétacé supérieur du Bassin parisien (Figure 22). Parmi celles-ci toutes les tailles de cours d'eau ont été considérées, de bassin versants de quelques kilomètres carrés à plus de 1000 km².

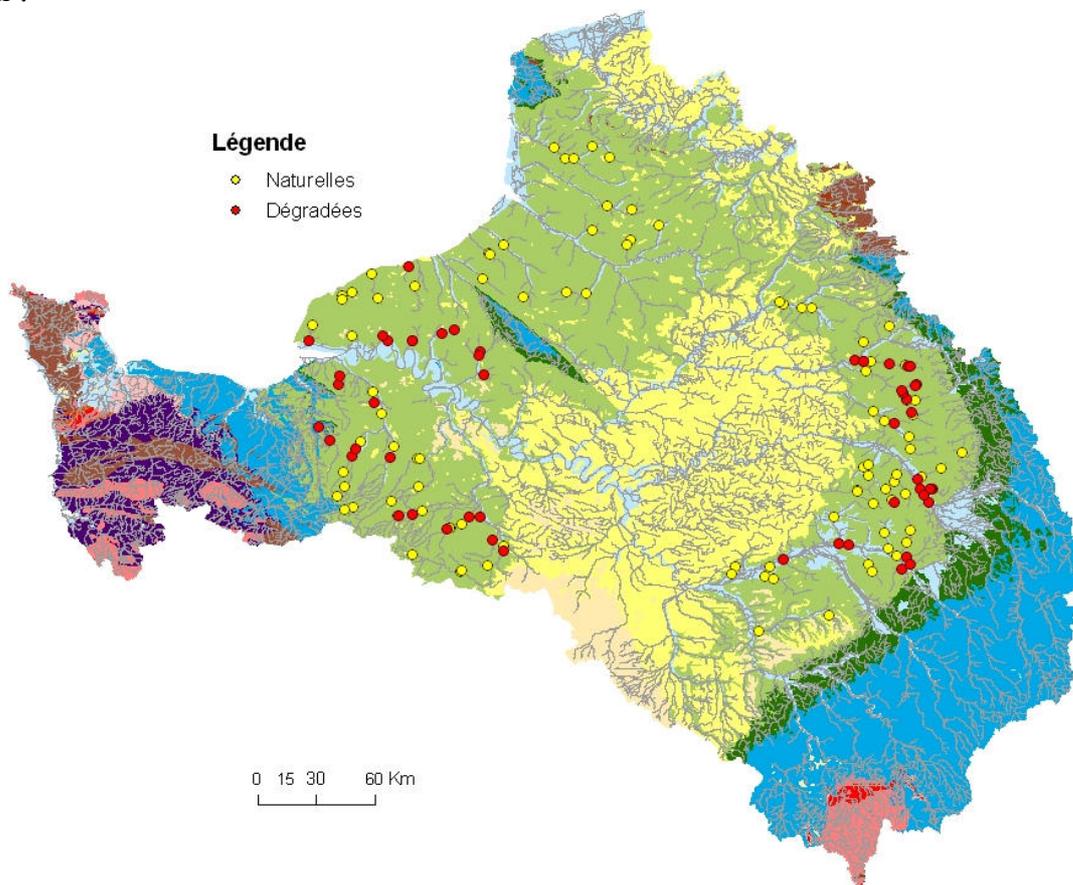


Figure 22 : Localisation des 152 stations prospectées.

39 stations ont finalement été retenues (Tableau 8, Figures 23 à 25): 28 naturelles (13 en Champagne et 15 en Normandie) et 11 dégradées (5 en Champagne et 6 Normandie). La plus petite à une superficie de 9 km² et la plus grande de 1030 km². Onze de ces stations (en gras dans le tableau) disposent d'une station hydrométrique DIREN : elles ont fait partie des 49 stations hydrométriques utilisées pour l'étude hydrologique exploratoire régionale présentée au 1.4.2.

Tableau 8: Tableau récapitulatif des stations étudiées.

| | Type | Région | Rivière | Station | Code | Dpt | Surface BV (km ²) |
|----|----------------|------------------|---------------------|------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------|
| 1 | Naturel | Champagne | Ancre | Estissac | ANCR | 10 | 81 |
| 2 | Naturel | Champagne | Barbuise | Voué | BARB | 10 | 120 |
| 3 | Naturel | Champagne | Coole | Fontaine | COO1 | 51 | 69 |
| 4 | Naturel | Champagne | Coole | Ecury-sur-Coole | COO2 | 51 | 153 |
| 5 | Naturel | Champagne | Moivre | Pogny (1) | MOI1 | 51 | 152 |
| 6 | Naturel | Champagne | Py | Saint-Souplet-sur-Py | PY | 51 | 72 |
| 7 | Naturel | Champagne | Vesle | Prunay | VESL | 51 | 549 |
| 8 | Naturel | Champagne | Somme | Ecury-le-Repos | SOMM | 51 | 124 |
| 9 | Naturel | Champagne | Ardusson | Saint-Aubin | ARDU | 10 | 170 |
| 10 | Naturel | Champagne | Nosle | Paisy-Cosdon | NOSL | 10 | 101 |
| 11 | Naturel | Champagne | Vanne | Neuville-sur-Vannes | VANN | 10 | 281 |
| 12 | Naturel | Champagne | Soude | Soudron | SOUD | 51 | 102 |
| 13 | Naturel | Champagne | Noblette | Bussy-le-Château | NOBL | 51 | 50 |
| 14 | Naturel | Normandie | Blaise | Saint-Ange | BLAI | 28 | 194 |
| 15 | Naturel | Normandie | Avre | Bourg l'Abbé | AVRE | 27 | 885 |
| 16 | Naturel | Normandie | Chaudefontaine | Touquettes | CHAU | 61 | 9 |
| 17 | Naturel | Normandie | Risle | Prés de la Forge | RISL | 27 | 478 |
| 18 | Naturel | Normandie | Charentonne | La Gonfrière | CHAR | 61 | 66 |
| 19 | Naturel | Normandie | Guiël | Verneusses | GUIE | 27 | 67 |
| 20 | Naturel | Normandie | Corbie | Fort-Moville | CORB | 27 | 25 |
| 21 | Naturel | Normandie | Ganzeville | Tourville-les-Iffs | GANZ | 76 | 82 |
| 22 | Naturel | Normandie | Yères | Villy-sur-Yères | YERE | 76 | 172 |
| 23 | Naturel | Normandie | Ru d'Haudricourt | Haudricourt | HAUD | 76 | 51 |
| 24 | Naturel | Normandie | Eaulne | Envermeu | EAUL | 76 | 250 |
| 25 | Naturel | Normandie | Calonne | Annerolles | CALO | 27 | 69 |
| 26 | Naturel | Normandie | Livet | Beaufai | LIVE | 61 | 13 |
| 27 | Naturel | Normandie | Sébec | Saint Siméon | SEBE | 27 | 10 |
| 28 | Naturel | Normandie | Iton | St Germain des angles | ITON | 27 | 1029 |
| 29 | Dégradé | Champagne | Superbe | Saint-Saturnin | SUPE | 51 | 347 |
| 30 | Dégradé | Champagne | Fion | Aulnay-l'Aître | FION | 51 | 94 |
| 31 | Dégradé | Champagne | Longsol | Verricourt | LONG | 10 | 97 |
| 32 | Dégradé | Champagne | Moivre | Pogny (2) | MOI2 | 51 | 155 |
| 33 | Dégradé | Champagne | Ravet | Aulnay | RAVE | 10 | 55 |
| 34 | Dégradé | Normandie | Lieure | Rosay-sur-Lieure | LIEU | 27 | 67 |
| 35 | Dégradé | Normandie | Commerce | Gruchet-le-Valasse | COMM | 76 | 123 |
| 36 | Dégradé | Normandie | Austreberthe | Villers-Ecalles | AUST | 76 | 156 |
| 37 | Dégradé | Normandie | Cailly | Cailly | CAIL | 76 | 29 |
| 38 | Dégradé | Normandie | Dun | Bourg Dun | DUN | 76 | 123 |
| 39 | Dégradé | Normandie | Clerette | Clères | CLER | 76 | 53 |

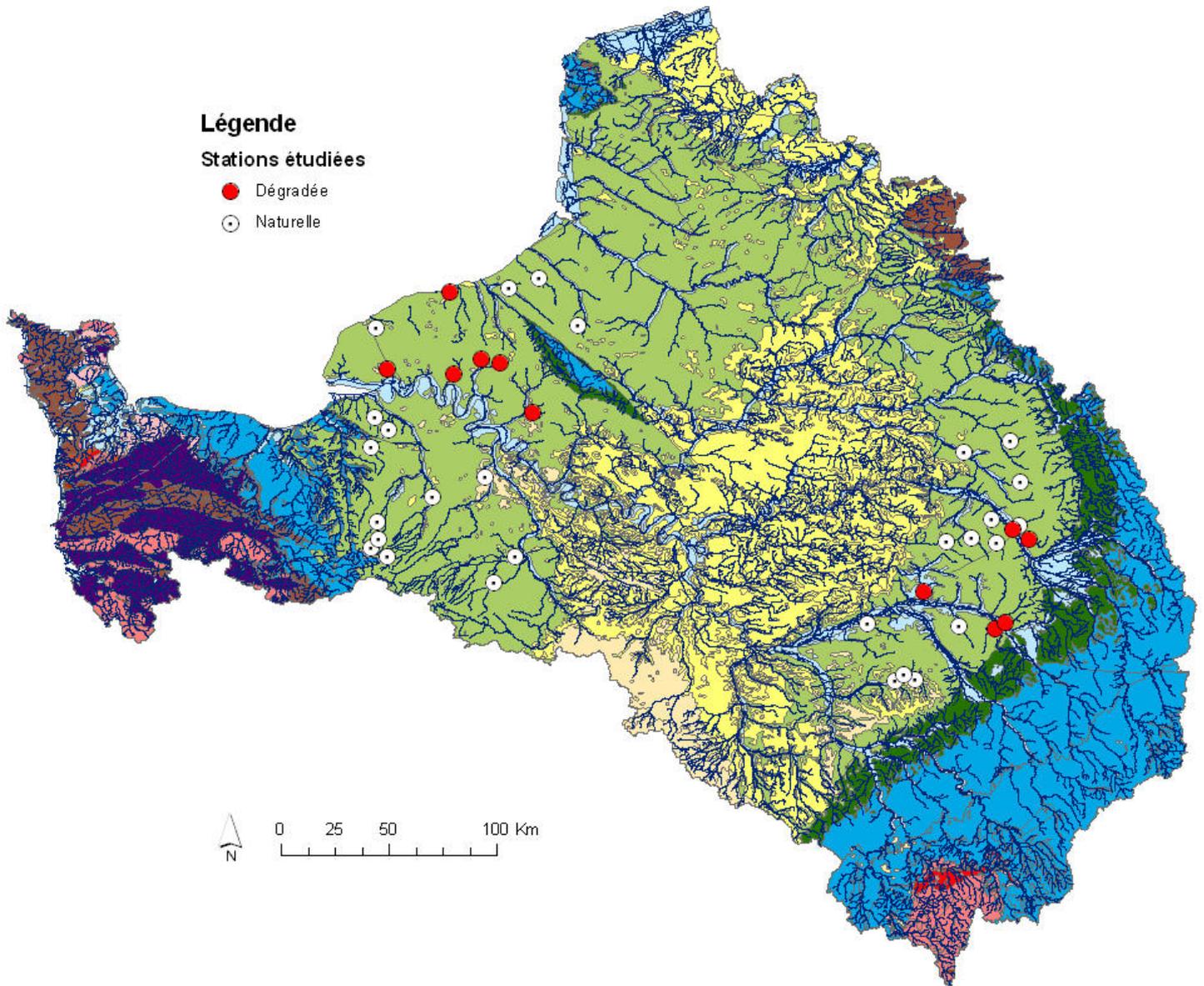


Figure 23 : Localisation des 39 stations étudiées.

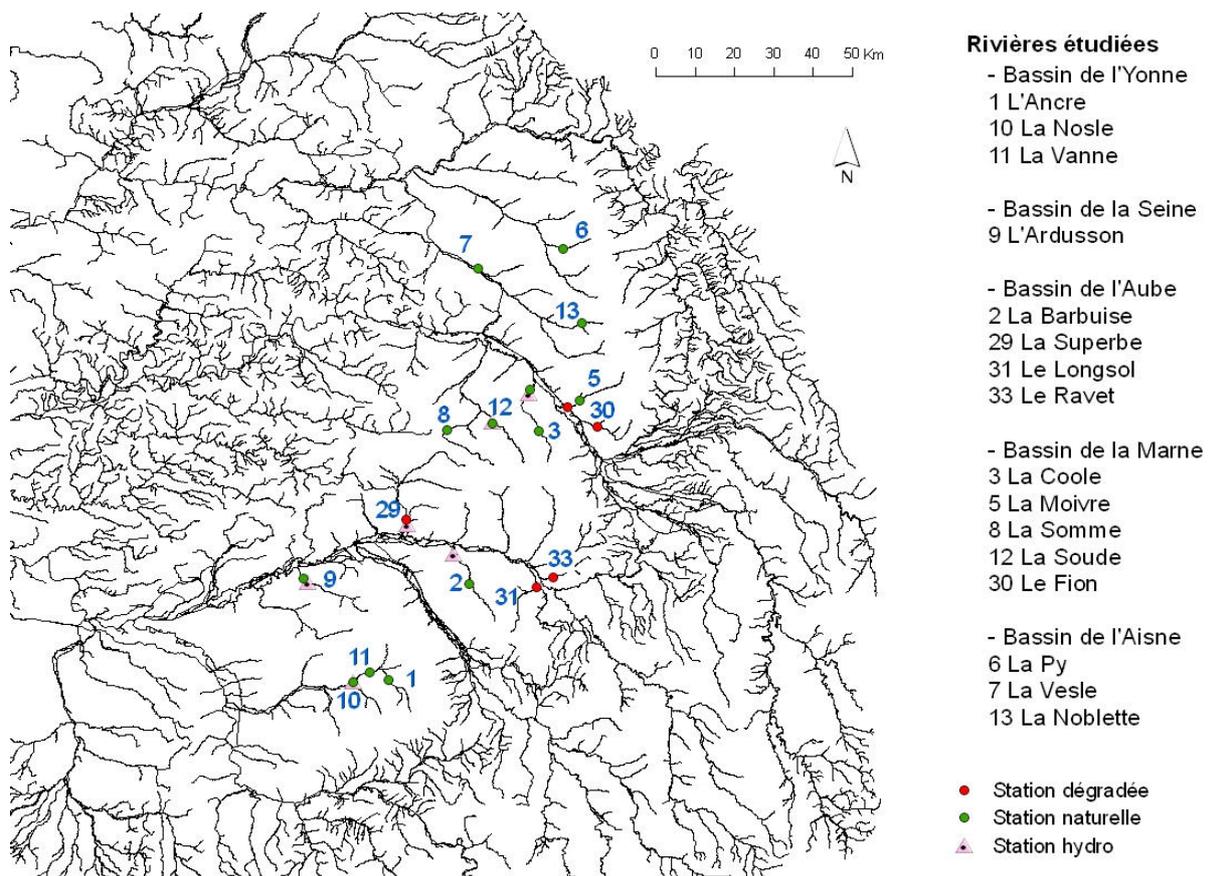


Figure 24 : Localisation des stations de Champagne.

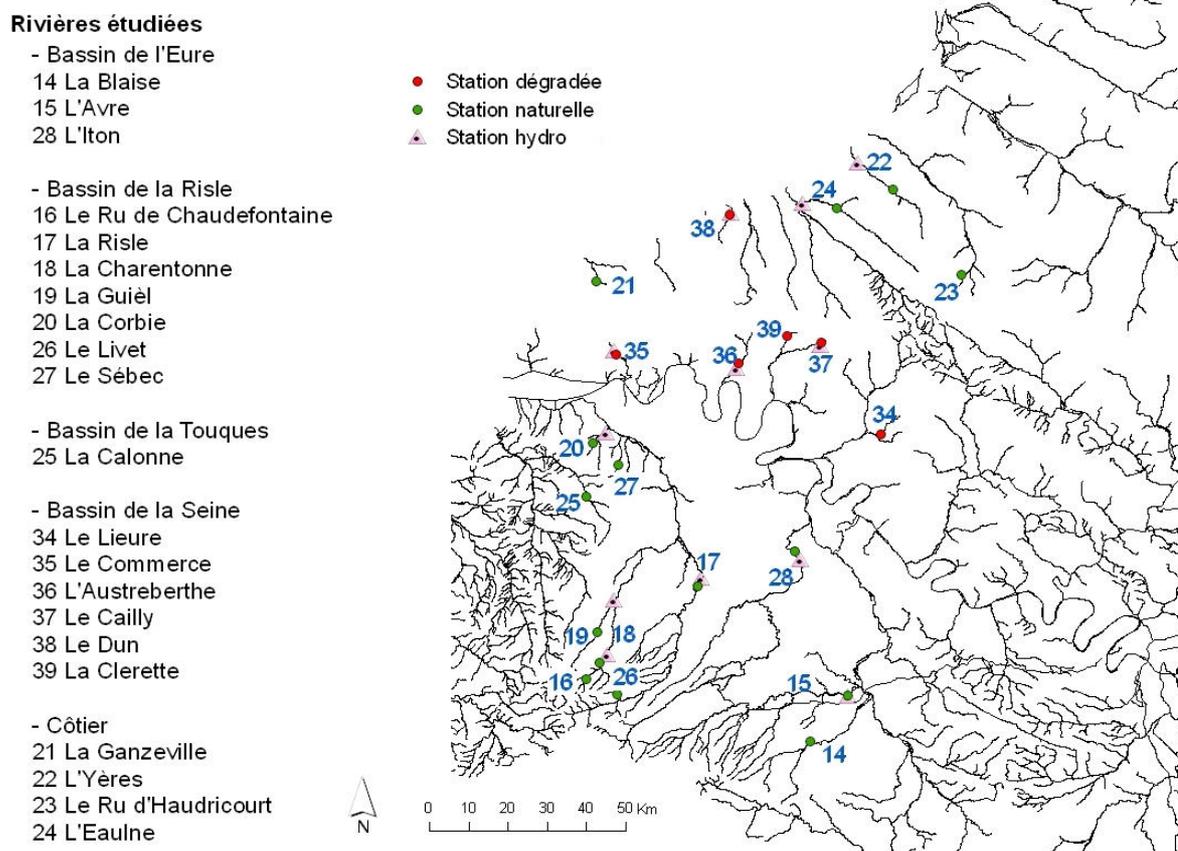


Figure 25 : Localisation des stations de Normandie.

1.6 Reconstitution des variables hydrologiques caractéristiques en sites non jaugés

Seules onze de nos trente-neuf stations hydromorphologiques sont équipées d'une station hydrométrique (voir tableau 8). Des méthodes de transfert développées par le Cemagref-Lyon vont nous permettre de reconstituer – de manière approchée - les descripteurs recherchés.

1.6.1 Ecoulements annuels

La variable d'intérêt $q\tilde{a}$ est la production annuelle d'écoulement par secteur géographique. Les valeurs sont approchées sur le jeu de données par les contributions entre stations de mesure ou directement par les valeurs observées au droit des stations pour les bassins de tête. $q\tilde{a}$ est estimé en sommant une valeur issue d'une formulation empirique établie sur les observations et un terme correcteur, écart local à la formulation, interpolé :

$$q\tilde{a} = q\tilde{a}^* + \varepsilon$$

$q\tilde{a}^*$ est issu d'une relation empirique entre $q\tilde{a}$ et un ensemble de variables dont une description spatiale sur le domaine étudié est connue :

$$q\tilde{a}^* = g(X_1, X_2, \dots, X_K)$$

et ε est le résidu de la relation empirique ajustée, estimé sur les sites jaugés. La valeur du résidu est obtenue par pondération d'observations voisines. Les poids sont obtenus par une technique apparentée au krigeage qui s'appuie sur la notion de proximité. Compte tenu de la variable étudiée, une distance entre secteurs appropriée a été définie. Les débits sont estimés par agrégation le long du réseau hydrographique des contributions.

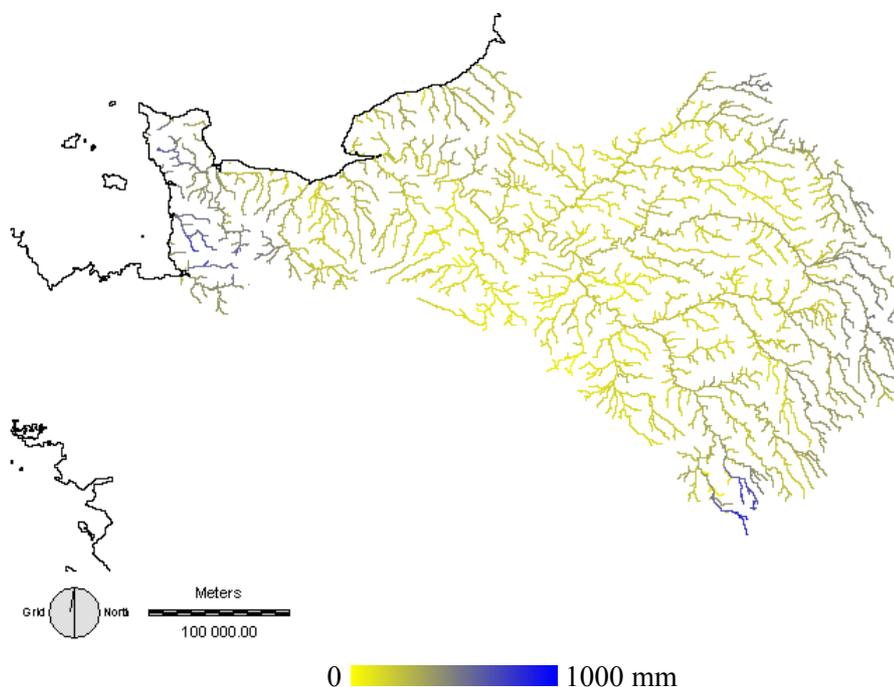


Figure 26 : Carte des modules le long du réseau hydrographique principal

Les valeurs proposées sont issues des travaux du Cemagref - Lyon effectués pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, présentés dans le rapport de fin de première année (Cemagref, 2008). Elles pourront être réactualisées dans les phases ultérieures du projet.

1.6.2 Courbes des débits classés

De nombreuses méthodes d'estimation des CDC en site non jaugé ont été examinées par Catalogne (2007) sur le bassin Seine-Normandie à l'aide d'un jeu de 129 chroniques hydrométriques jugées représentatives (longueur des chroniques suffisantes, régimes non influencés, mesures jugées fiable par le gestionnaire).

Parmi ces approches, on citera l'emploi de techniques géostatistiques et la mise au point de relations régionales entre propriétés géo-morpho-climatiques des bassins versants et deux paramètres permettant une bonne description mathématique des CDC.

Toutefois, il est apparu que les performances les plus satisfaisantes étaient obtenues par attribution en tout point du réseau hydrographique de la CDC observée à la station la plus proche, le critère de proximité ayant été défini comme la distance séparant les centres de gravité des deux bassins (i.e. bassin cible, bassin de référence). La proximité géographique apparaît ainsi par nature comme le principal facteur explicatif de comportements hydrologiques analogues (i.e. dans un secteur dépourvu de fortes discontinuités, deux bassins proches possèdent de fait des caractéristiques géo-morpho-climatiques voisines à l'origine de processus de génération de l'écoulement similaires). D'autre part, afin de tenir compte de l'effet d'échelle liée à la surface drainée, il a été nécessaire de pondérer la CDC de référence par le rapport de surface des deux bassins versants.

Les incertitudes liées à l'emploi de cette approche ont été quantifiées par validation croisée sur 15 quantiles de fréquence au dépassement : 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99 %.

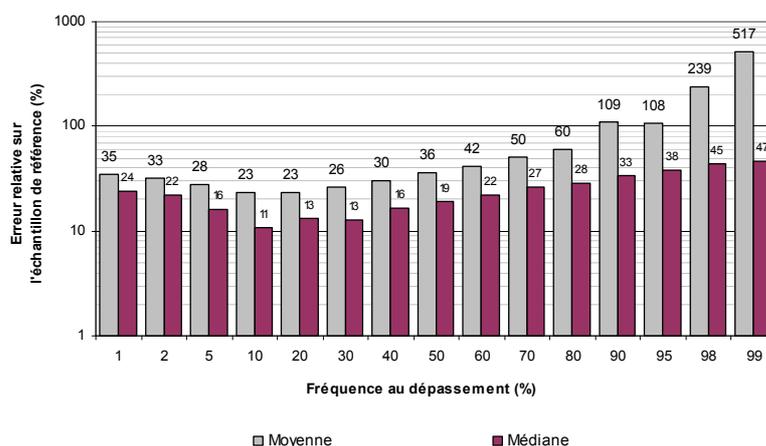


Figure 27 : Erreur de reconstitution des courbes de débits classés par quantile

La comparaison des valeurs d'erreurs moyennes et médianes montre essentiellement la possibilité de fortes erreurs sur la gamme de fréquence au dépassement supérieure à 90 % (faibles débits), les sites concernés étant principalement ceux qui présentent des débits nuls ou très faibles (comportements souvent très localisés difficiles à restituer en régionalisation).

Pour finir, cette approche possède la propriété de transférer directement la valeur de l'indice de concavité de la station de référence au site cible. On constate que sur le jeu de données utilisé les ordres de grandeur ne sont pas toujours correctement respectés traduisant ainsi les limites du critère de proximité géographique à rendre compte de la complexité des mécanismes d'échanges nappe/rivière.

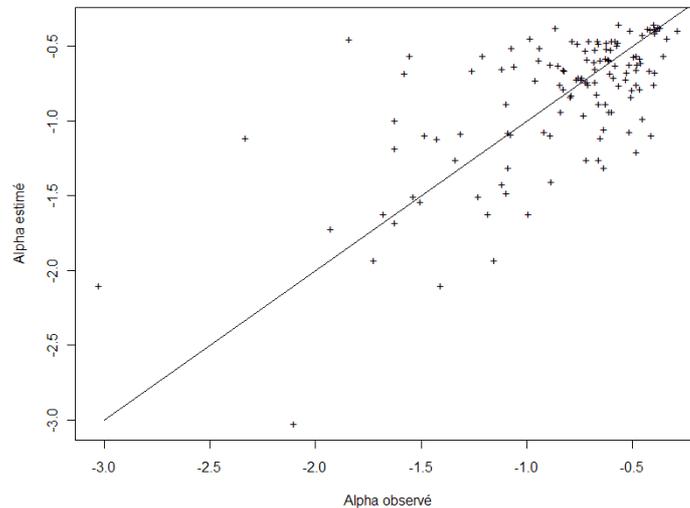


Figure 28 : Indice de concavité α : valeurs reconstituées versus valeurs observées sur les sites-tests

1.6.3 Débits instantanés de période de retour 2 ans

La procédure adoptée pour l'estimation des débits instantanés de période de retour 2 ans se rapproche fortement de celle employée pour l'estimation des courbes de débits classés. Le choix d'une station de référence est basé sur le même critère de proximité géographique. En revanche afin de tenir compte des mécanismes spécifiques à la génération des crues qui considèrent une surface contributive au ruissellement généralement inférieure à la surface totale du bassin (lié à l'anisotropie des précipitations), le rapport des surfaces permettant de respecter l'effet d'échelle liée à la surface drainée a été élevé à la puissance 0.8^5 (cf. également la méthode CRUPEDIX (CTGREF, 1980)).

Nota bene : Pour l'application de la reconstitution des CDC et du QIXA2 aux sites expérimentaux retenus dans cette étude et afin d'assurer une plus forte cohérence de nos estimations, il a été choisi de ne conserver comme stations de référence que des sites drainant un bassin placé dans un contexte géologique analogue (i.e. calcaires et craies du crétacé supérieur).

1.7 Données piscicoles

Initialement, l'existence d'inventaires piscicoles et en particulier de suivis à long terme avait été définie comme un critère important pour le choix des sites d'études. Il est rapidement apparu que ce critère ne pouvait être que rarement respecté dans la mesure où une grande partie des stations ayant fait l'objet de suivis piscicoles présentaient des singularités (aval

⁵ Traduit également l'augmentation de la surface contributive avec la surface du bassin.

d'ouvrage, aménagements ponctuels comme des enrochements, des seuils ...) qui les rendaient incompatibles avec la caractérisation hydromorphologique envisagée.

Cette situation nous a donc conduit à réaliser des pêches électriques complémentaires sur une partie des stations de référence pour compléter les données existantes et de manière systématique sur toutes les stations altérées pour lesquelles aucune donnée "poissons" n'était disponible.

Au total nous disposons donc de données concernant les peuplements de poissons sur un ensemble de 10 stations naturelles et 9 stations dégradées. (Tab. 9);

Tableau 9 : Liste des stations pour lesquelles des données piscicoles sont disponibles. * : stations disposant d'un suivi long terme (stations suivies dans le cadre du RHP).

| Rivière | Station | Type | Origine des données | |
|------------------|--------------------------|-----------|---------------------|---|
| Ancre | Estissac | Naturelle | ONEMA | * |
| Vesle | Prunay | Naturelle | ONEMA | * |
| Corbie | Fort-Moville | Naturelle | ONEMA | |
| Yères | Villy le bas | Naturelle | ONEMA | * |
| Ru d'Haudricourt | Haudricourt | Naturelle | ONEMA | * |
| Avre | Bourg l'Abbé | Naturelle | ONEMA | |
| Guiel | Verneusses | Naturelle | ONEMA | |
| Nosle | Aix en Othe ⁶ | Naturelle | ONEMA | |
| Coole | Ecury | Naturelle | Cemagref | |
| Py | Saint-Souplet-sur-Py | Naturelle | Cemagref | |
| Longsol | Verricourt | Dégradée | ONEMA | |
| Moivre | Pogny | Dégradée | Cemagref | |
| Fion | Aulnay-l'Aître | Dégradée | Cemagref | |
| Ravet | Aulnay | Dégradée | Cemagref | |
| Superbe | Saint-Saturnin | Dégradée | Cemagref | |
| Austreberthe | Villers-Ecalle | Dégradée | Cemagref | |
| Cailly | Cailly | Dégradée | Cemagref | |
| Dun | Bourg Dun | Dégradée | Cemagref | |
| Lieure | Rosay-sur-Lieure | Dégradée | Cemagref | |

Les pêches que nous avons mises en œuvre ont été réalisées conformément aux protocoles actuellement utilisés par l'ONEMA dans le cadre des réseaux de suivi, à savoir :

- pour les cours d'eau de largeur inférieure à 8 -10 m, l'intégralité de la station est prospectée, le nombre d'anodes étant adapté à la taille de la rivière (1 anode pour 4 à 5m de largeur) (pêche complète).
- pour les cours d'eau plus larges, les stations sont prospectées de manière partielle, le protocole d'échantillonnage consistant à répartir sur la station plusieurs dizaines d'unités d'échantillonnages (évaluées à environ 10 m² chacune) de façon à couvrir la diversité d'habitats présents.

Les poissons ainsi échantillonnés font ensuite l'objet d'une identification et de mesures biométriques individuelles.

⁶ Sur la Nosle, la station disposant de données piscicoles est située en amont de la station pour laquelle le descriptif morphologique a été réalisé. Compte tenu de la proximité de deux sites, nous avons considéré qu'il était pertinent d'utiliser les données piscicoles dans le cadre de ce projet.

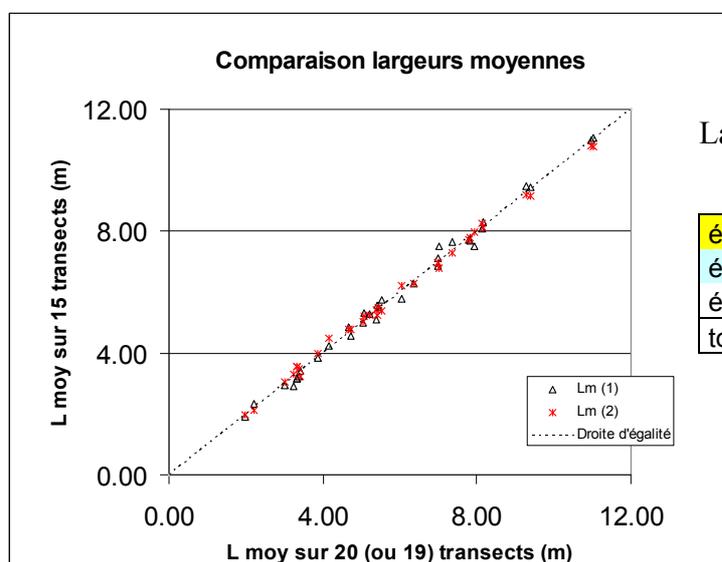
2 Résultats

2.1 Test du protocole

Dans le but de pouvoir éventuellement alléger le protocole de recueil de données sur le terrain (participation à la mise au point du protocole CARHYCE dans le cadre du groupe de travail piloté par l'ONEMA), nous avons effectué un test sur le nombre de transects : quels sont les écarts sur les paramètres moyens à l'échelle de la station si on prend les mesures sur 15 transects au lieu de 20 ?

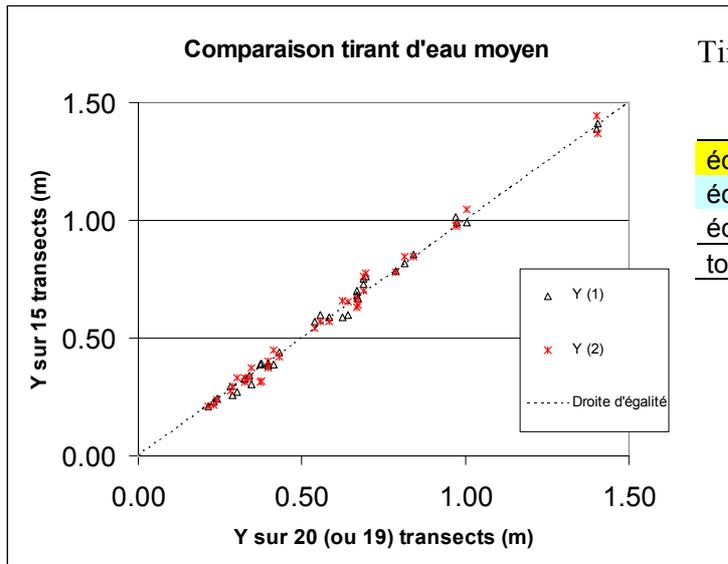
Dans notre jeu de données nous avons donc retiré 5 transects (une fois à l'amont, une fois à l'aval) et comparé les moyennes sur la station pour les paramètres hydrauliques les plus courants (largeur au miroir, tirant d'eau, surface mouillée, hauteur d'eau moyenne). Nous avons fait cet exercice pour toutes les stations où nous avons mesuré 20 (ou parfois 19) transects et pour chaque débit où nous l'avions fait. Au total cela faisait 25 stations, dont 10 observées à 2 débits, ce qui nous a permis de réaliser le test sur 35 x 2 cas.

Nous avons visualisé les résultats sur les graphiques ci-dessous et synthétisé les écarts en faisant 3 grandes classes : écart à la référence de 10 à 20 %, de 5 à 10 % et inférieur à 5 %, la référence étant le paramètre calculé avec la totalité des 20 (ou 19) transects (il se trouve qu'aucun écart n'a dépassé 20 % dans nos cas testés). Et nous avons simplement comptabilisé le nombre de cas qui tombaient dans chaque classe.



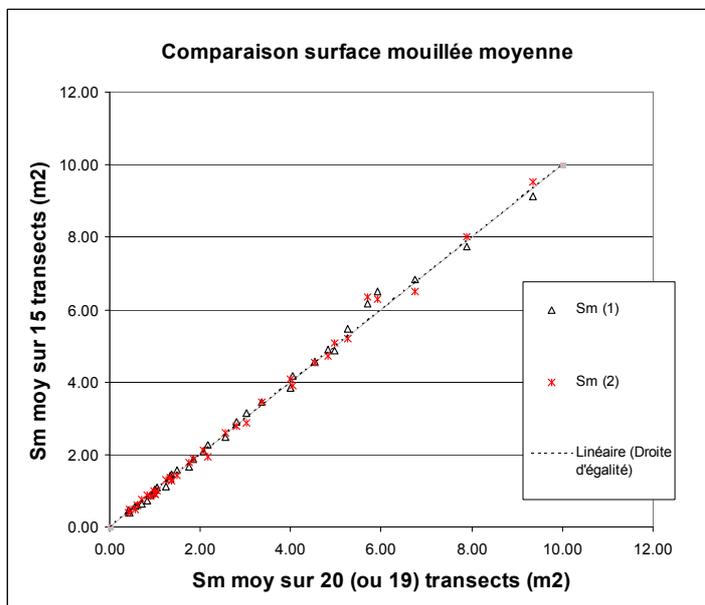
Largeurs au miroir :

| | Nombre de cas | % du total |
|----------------------------|---------------|------------|
| écart à la réf de 10 à 20% | 2 | 2.9 |
| écart à la réf de 5 à 10 % | 6 | 8.6 |
| écart à la réf < 5 % | 62 | 88.6 |
| total | 70 | 100.0 |



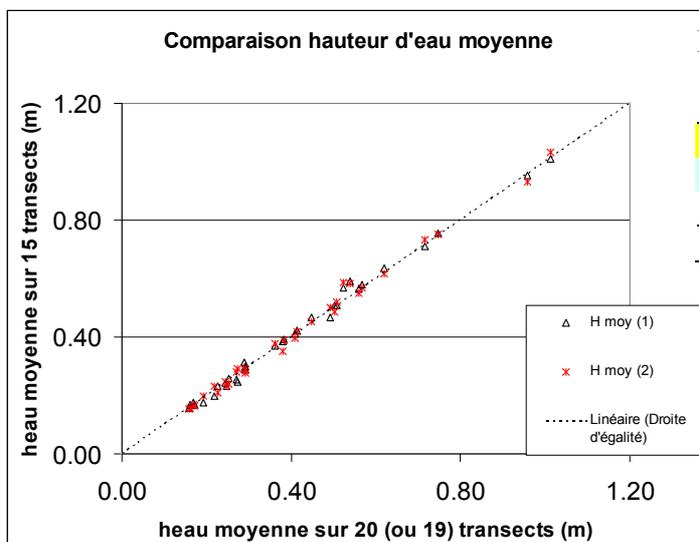
Tirant d'eau :

| | Nombre de cas | % du total |
|----------------------------|---------------|------------|
| écart à la réf de 10 à 20% | 7 | 10.0 |
| écart à la réf de 5 à 10 % | 17 | 24.3 |
| écart à la réf < 5 % | 46 | 65.7 |
| total | 70 | 100.0 |



Surface mouillée :

| | Nombre de cas | % du total |
|----------------------------|---------------|------------|
| écart à la réf de 10 à 20% | 7 | 10.0 |
| écart à la réf de 5 à 10 % | 15 | 21.4 |
| écart à la réf < 5 % | 48 | 68.6 |
| total | 70 | 100.0 |



Hauteur d'eau moyenne :

| | Nombre de cas | % du total |
|----------------------------|---------------|------------|
| écart à la réf de 10 à 20% | 2 | 2.9 |
| écart à la réf de 5 à 10 % | 15 | 21.4 |
| écart à la réf < 5 % | 53 | 75.7 |
| total | 70 | 100.0 |

Figure 26 : Résultats du test sur le protocole.

Au vu de ces résultats il apparaît que, sur les cours d'eau testés, s'en tenir à 15 transects ne dégrade pas "énormément" les moyennes qu'on peut en tirer à l'échelle de la station pour les paramètres hydrauliques, notamment ceux les plus employés, largeur et hauteur d'eau moyenne : pour les largeurs mouillées, les écarts sont de moins de 5 % dans 88,6 % des cas, pour les hauteurs moyennes, c'est dans 75,7 % des cas.

Et si l'on regarde en détail les cas où les écarts sont les plus importants, on constate que ce sont souvent des cas où il y a une tendance amont / aval (élargissement progressif, contrôle aval de la ligne d'eau...). Pour les stations choisies comme étant "naturelles", on devrait éviter ces cas de figure et sélectionner la station sur une zone aux faciès réguliers, sans discontinuités ni influence aval (mais il peut y avoir l'influence d'embâcles par exemple, surtout en cours d'eau de très petite taille). Cependant, lorsqu'il s'agit d'étudier des sites anthropisés, la non-régularité des formes et des conditions hydrauliques est souvent consubstantielle à ces sites (protections de berges, seuils...) et il est parfois difficile de disposer d'une zone homogène où implanter la station. Dans le cas des sites anthropisés, le fait même de vouloir calculer une moyenne sur un tronçon est sujet à caution, qu'on choisisse de le faire sur 15 ou 20 transects. Mais même si la "moyenne" qu'on calcule n'est pas forcément représentative d'un linéaire, la comparaison qu'on peut faire avec les sites "naturels" peut donner des indications éclairantes et suffisantes pour la gestion.

2.2 Hydrologie

Les variables hydrologiques ont été reconstituées sur les 39 sites expérimentaux par les méthodes de transfert présentées au 1.6.

Ont été reconstituées les valeurs des modules (QA) et débits de pointe de la crue biennale (QIXA2) et calculé le ratio QIXA2 / QA qui donne une idée de la magnitude des crues par rapport aux écoulements moyens.

Sur les sites où nous disposons d'une station hydrométrique, nous avons comparé les valeurs reconstituées par transfert aux valeurs estimées à partir des enregistrements à la station hydrométrique (en gras dans le tableau 10 ci-dessous). Il est apparu que les écarts pouvaient être importants (d'un facteur 2, voire 4 pour le Commerce à Gruchet-le-Valasse) avec un effet d'amplification sur le ratio QIXA2 / QA (écart de 1 à 20 pour le Commerce). Les méthodes de transfert ont tendance à "lisser" les comportements et donc à "gommer" les particularités, notamment celles qui peuvent être liées aux altérations du fonctionnement hydromorphologique. Ceci est un peu gênant vis-à-vis de l'objectif de notre étude qui est précisément de mettre en évidence l'effet de ces altérations. C'est pourquoi nous avons fait le choix de conserver les valeurs estimées à partir des enregistrements aux stations HYDRO lorsque nous en disposons. NB : pour la Coole à Ecury-sur-Coole, le QIXA2 n'a pu être calculé à partir des données enregistrées à la station HYDRO faute de durée de chronique suffisante ; nous avons donc adopté, pour cette station, les valeurs reconstituées.

Tableau 10 : Débits caractéristiques QIXA2 et QA reconstitués et valeurs retenues (en gras : valeurs calculées à partir des enregistrements à la station HYDRO)

| N° | Rivière | Station | Type | valeurs reconstituées | | | valeurs retenues | | |
|----|----------|----------|---------|------------------------------|---------------------------|---------------|------------------------------|---------------------------|---------------|
| | | | | QIXA2 (m ³ /s) | QA (m ³ /s) | QIXA2 / QA | QIXA2 (m ³ /s) | QA (m ³ /s) | QIXA2 / QA |
| 1 | Ancre | Estissac | Naturel | 1.217 | 0.418 | 2.92 | 1.217 | 0.418 | 2.92 |
| 2 | Barbuise | Voué | Naturel | 1.157 | 0.537 | 2.15 | 1.157 | 0.537 | 2.15 |
| 3 | Coole | Fontaine | Naturel | 0.961 | 0.360 | 2.67 | 0.961 | 0.360 | 2.67 |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------------|------------------------------|----------------|--------|-------|-------|---------------|--------------|--------------|
| 4 | Coole | Ecury-sur-Coole | Naturel | 1.822 | 0.804 | 2.27 | 1.822 | 0.804 | 2.27 |
| 5 | Moivre | Pogny (1) | Naturel | 1.794 | 1.017 | 1.76 | 1.794 | 1.017 | 1.76 |
| 6 | Py | Saint-Souplet-sur-Py | Naturel | 1.186 | 0.434 | 2.73 | 1.186 | 0.434 | 2.73 |
| 7 | Vesle | Prunay | Naturel | 5.014 | 2.627 | 1.91 | 5.014 | 2.627 | 1.91 |
| 8 | Somme | Ecury-le-Repos | Naturel | 1.546 | 0.702 | 2.20 | 1.546 | 0.702 | 2.20 |
| 9 | Ardusson | Saint-Aubin | Naturel | 1.867 | 0.793 | 2.35 | 1.770 | 0.680 | 2.60 |
| 10 | Nosle | Paisy-Cosdon | Naturel | 1.451 | 0.538 | 2.70 | 1.451 | 0.538 | 2.70 |
| 11 | Vanne | Neuville-sur-Vannes | Naturel | 3.303 | 1.456 | 2.27 | 3.303 | 1.456 | 2.27 |
| 12 | Soude | Soudron | Naturel | 1.315 | 0.577 | 2.28 | 1.340 | 0.560 | 2.39 |
| 13 | Noblette | Bussy-le-Château | Naturel | 0.739 | 0.266 | 2.78 | 0.739 | 0.266 | 2.78 |
| 14 | Blaise | Saint-Ange | Naturel | 7.636 | 0.931 | 8.20 | 7.636 | 0.931 | 8.20 |
| 15 | Avre | Bourg l'Abbé | Naturel | 17.576 | 3.613 | 4.86 | 17.500 | 3.590 | 4.87 |
| 16 | Chaudefontaine | Touquettes | Naturel | 1.998 | 0.069 | 28.96 | 1.998 | 0.069 | 28.96 |
| 17 | Risle | Prés de la Forge | Naturel | 49.453 | 3.048 | 16.23 | 49.453 | 3.048 | 16.23 |
| 18 | Charentonne | La Gonfrière | Naturel | 10.157 | 0.506 | 20.06 | 10.050 | 0.540 | 18.61 |
| 19 | Guiël | Verneusses | Naturel | 6.238 | 0.565 | 11.04 | 6.238 | 0.565 | 11.04 |
| 20 | Corbie | Fort-Moville | Naturel | 2.339 | 0.270 | 8.66 | 2.339 | 0.270 | 8.66 |
| 21 | Ganzeville | Tourville-les-Ifs | Naturel | 1.753 | 0.691 | 2.54 | 1.753 | 0.691 | 2.54 |
| 22 | Yères | Villy-sur-Yères | Naturel | 4.996 | 1.908 | 2.62 | 4.996 | 1.908 | 2.62 |
| 23 | Ru d'Haudricourt | Haudricourt | Naturel | 1.876 | 0.382 | 4.91 | 1.876 | 0.382 | 4.91 |
| 24 | Eaulne | Envermeu | Naturel | 6.748 | 2.472 | 2.73 | 6.748 | 2.472 | 2.73 |
| 25 | Calonne | Annerolles | Naturel | 5.304 | 0.672 | 7.89 | 5.304 | 0.672 | 7.89 |
| 26 | Livet | Beaufai | Naturel | 2.811 | 0.101 | 27.72 | 2.811 | 0.101 | 27.72 |
| 27 | Sébec | Saint Siméon | Naturel | 1.141 | 0.099 | 11.52 | 1.141 | 0.099 | 11.52 |
| 28 | Iton | St Germain des angles | Naturel | 9.018 | 4.183 | 2.16 | 9.170 | 3.530 | 2.60 |
| 29 | Superbe | Saint-Saturin | Dégradé | 4.268 | 1.840 | 2.32 | 4.000 | 1.660 | 2.41 |
| 30 | Fion | Aulnay-l'Aître | Dégradé | 1.220 | 0.585 | 2.09 | 1.220 | 0.585 | 2.09 |
| 31 | Longsol | Verricourt | Dégradé | 0.977 | 0.496 | 1.97 | 0.977 | 0.496 | 1.97 |
| 32 | Moivre | Pogny (2) | Dégradé | 1.847 | 1.037 | 1.78 | 1.847 | 1.037 | 1.78 |
| 33 | Ravet | Aulnay | Dégradé | 0.623 | 0.402 | 1.55 | 0.623 | 0.402 | 1.55 |
| 34 | Lieure | Rosay-sur-Lieure | Dégradé | 1.487 | 0.680 | 2.19 | 1.487 | 0.680 | 2.19 |
| 35 | Commerce | Gruchet-le-Valasse | Dégradé | 2.421 | 1.023 | 2.37 | 5.150 | 0.240 | 21.46 |
| 36 | Austreberthe | Villers-Ecalle | Dégradé | 4.788 | 1.572 | 3.05 | 10.300 | 1.870 | 5.51 |
| 37 | Cailly | Cailly | Dégradé | 0.771 | 0.347 | 2.23 | 1.630 | 0.160 | 10.19 |
| 38 | Dun | Bourg Dun | Dégradé | 2.369 | 0.351 | 6.76 | 2.645 | 0.250 | 10.58 |
| 39 | Clerette | Clères | Dégradé | 1.253 | 0.615 | 2.04 | 1.253 | 0.615 | 2.04 |

Les courbes de débits classées (CDC) reconstituées ont été résumées par 15 quantiles de fréquence au dépassement représentatifs (1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99 %). De la même façon nous avons conservé les CDC issues des chroniques enregistrées aux stations hydrométriques lorsque nous en disposons. Les graphiques correspondants figurent sur les fiches descriptives de chaque station (annexe 8).

2.3 Morphologie

Au sein d'une région hydrologiquement, géologiquement et géomorphologiquement homogène, de nombreuses études ont montré que les cours d'eau avaient des caractéristiques hydromorphologiques voisines. Ainsi, en conditions naturelles et dans une région homogène, la largeur, les profondeurs, les écoulements (débit à plein bord), etc. varient, en théorie, essentiellement en fonction de la taille du bassin versant. Notre étude a pour objectif la

comparaison des paramètres physiques de tronçons de cours d'eau qui ont subi des altérations avec des tronçons naturels (ou considérés comme tels). Pour ce faire nous nous sommes basés sur cette propriété des cours d'eau afin de déterminer dans quelle mesure l'anthropisation avait modifié les paramètres morphologiques du système.

Cette partie est consacrée à l'examen des caractéristiques morphologiques des stations naturelles et fournit des premiers éléments de comparaison avec les situations altérées. Ces éléments sont repris et ré-analysés dans la partie 2.5 plus particulièrement consacrée à l'optimisation de la discrimination des situations naturelles versus altérées sur la base de leurs caractéristiques physiques et à partir d'outils statistiques.

2.3.1 Débits de plein bord

2.3.1.1 Valeur des débits de plein bord

Nous avons eu la chance, sur l'Ardusson à Saint-Aubin, d'observer *de visu* une situation d'écoulement à plein bord en ayant une station hydrométrique à proximité. Sur les autres sites, la valeur du Qpb a été estimée de la façon suivante :

- lorsque nous disposions d'observations de la ligne d'eau à deux débits bien distincts (un débit de basses ou moyennes eaux Q1 et un débit de hautes eaux Q2), nous avons utilisé les relations de géométrie hydraulique (cf. 1.2.1) ; le Qpb a été calculé par ajustement d'une loi puissance reliant la hauteur d'eau moyenne sur la station et le débit, calée sur les deux couples (Q1, hauteur d'eau moyenne à Q1) et (Q2, hauteur d'eau moyenne à Q2) ;
- lorsque nous n'avons pu disposer de ces deux séries d'observations (pas de périodes de hautes eaux propices pour réaliser les mesures au second débit), nous avons eu recours à une modélisation hydraulique 1D pour estimer le Qpb ; le modèle utilisé est le modèle Fluvia, modèle de calcul de ligne d'eau mis au point au Cemagref (Baume et Poirson, 1984) ; le calcul se fait en deux étapes : une première étape de calage du modèle sur la ligne d'eau observée à Q1 – qui permet d'ajuster le coefficient de Strickler représentatif de la résistance à l'écoulement – et une deuxième étape de simulation pour déterminer le débit qui s'ajuste le mieux par rapport au niveau de plein bord relevé sur le terrain. Voir en annexe 4 l'exemple de la Soude.

Nous avons vérifié sur 10 stations où nous avons les deux lignes d'eau observées à Q1 et Q2 et où nous avons donc pu appliquer les deux méthodes que les écarts entre la valeur du Qpb donnée par le modèle Fluvia et celle donnée par la géométrie hydraulique étaient dans une gamme de précision tout à fait acceptable - de l'ordre de 10 % en général, 20 % maximum sur les plus petits débits plein bord (Ancre et ru de Chaudefontaine) - et qu'il n'y avait pas de biais systématique dû au modèle (les écarts sont aussi bien en positif qu'en négatif).

Les valeurs ainsi calculées sont présentées dans le tableau 11 ci-après ainsi que sur les fiches descriptives de chaque station regroupées en annexe 8.

Sur deux stations nous n'avons pas de résultat pour l'instant : le Fion, où nous n'avons pas encore pu faire les mesures et le Longsol où il n'a pas été possible de caler le modèle hydraulique avec la seule observation de la ligne d'eau à Q1.

A partir de ces valeurs estimées du Qpb, la première étape de travail a consisté à l'élaboration d'une situation de référence définie à partir d'une trentaine de sites naturels choisis dans la couronne du Crétacé supérieur du Bassin Parisien. En première approche cette zone paraissait homogène, mais ce n'est toutefois pas tout à fait le cas, puisque sa partie normande est composée de craie à silex alors que la partie champenoise est caractérisée par de la craie sans

silex. On a vu aussi se manifester ces différences d'un point de vue hydrologique, notamment sur les processus de crue (cf. 1.4.2 étude hydrologique)

La première courbe de référence a été construite à partir du débit à plein bord, variable d'auto-ajustement du cours d'eau qui intègre l'ensemble des paramètres hydromorphologiques et résulte directement de la géométrie hydraulique du tronçon. La Figure 30 montre l'évolution du débit à plein bord en fonction de la taille du bassin versant pour les 28 sites réputés naturels de la région du Crétacé supérieur. Même si une relation se dessine le coefficient de corrélation est toutefois assez faible ($r^2 = 0,36$).

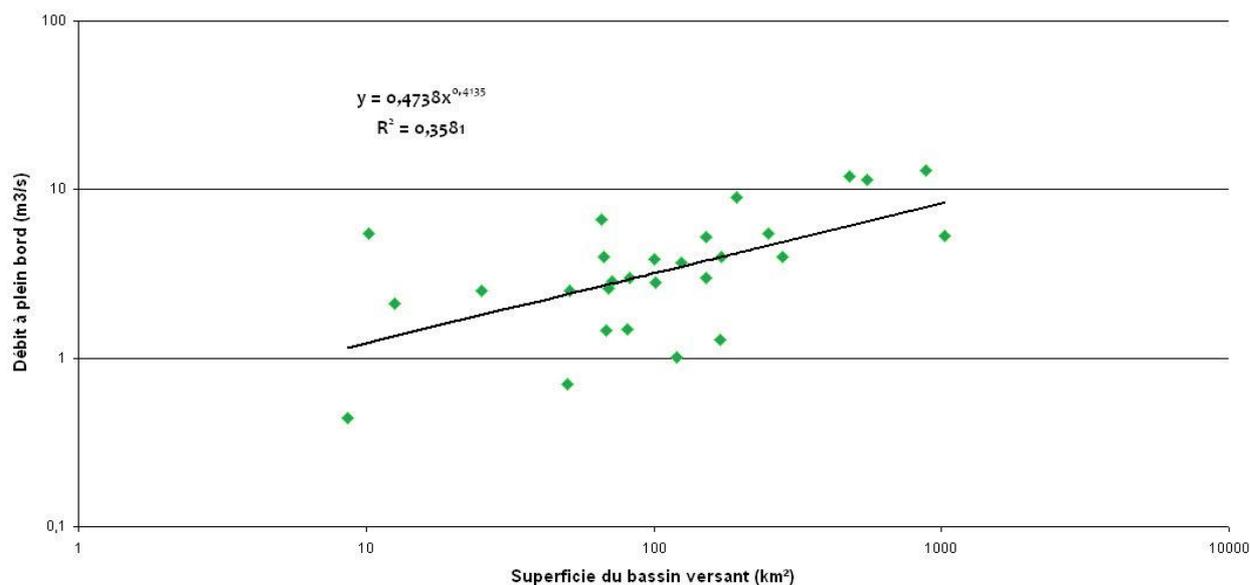


Figure 30 : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant pour l'ensemble des sites naturels.

Lorsqu'on se penche plus en détail sur chaque point, trois sous-ensembles semblent se dégager (Figure 31) :

- Trois cours d'eau de Champagne sont légèrement décalés dans le bas de la courbe: la Noblette, la Barbuise et l'Ardusson. Ils présentent tous trois des caractéristiques communes, avec des berges très basses et une connexion qui semble forte entre la plaine alluviale et la nappe (cf. photos des fiches stations). Les hydrogrammes de crue sont particulièrement plats indiquant une quasi-absence de crues dues au ruissellement et une part très importante de l'écoulement souterrain (cf. annexe 2).
- Trois autres points ont également une position marginale, au-dessus de la courbe. Outre le fait que ces trois cours d'eau se situent tous dans la partie sud de la Normandie, ils ne présentent pas réellement de caractéristiques communes. La Charentonne est fortement incisée dans sa plaine alluviale ce qui pourrait s'expliquer par le fait qu'elle se situe en bordure de zone du Crétacé supérieur. Le bassin de la Blaise a, quant à lui, connu une forte activité industrielle, plusieurs sites de hauts fourneaux ont été directement implantés en bordure de cours d'eau. Ils pourraient avoir perturbé les écoulements ou plus probablement le transit de sédiments (on observe un armurage du fond du lit). Le Sébec est lui aussi fortement incisé dans sa plaine alluviale mais son bassin ne se situe pas en bordure de zone. Il se situe par contre en aval d'un village pour la traversée duquel la rivière a été

aménagée (tracé rectiligne accélérant les écoulements). Dans ces conditions, il semble raisonnable d'écarter ces trois points de l'échantillon de référence.

- Tous les autres points peuvent être rassemblés dans un ensemble relativement homogène. Même si l'écart à la référence peut être parfois important, particulièrement pour les petits cours d'eau, le coefficient de corrélation est alors bien meilleur, $r^2 = 0.71$.

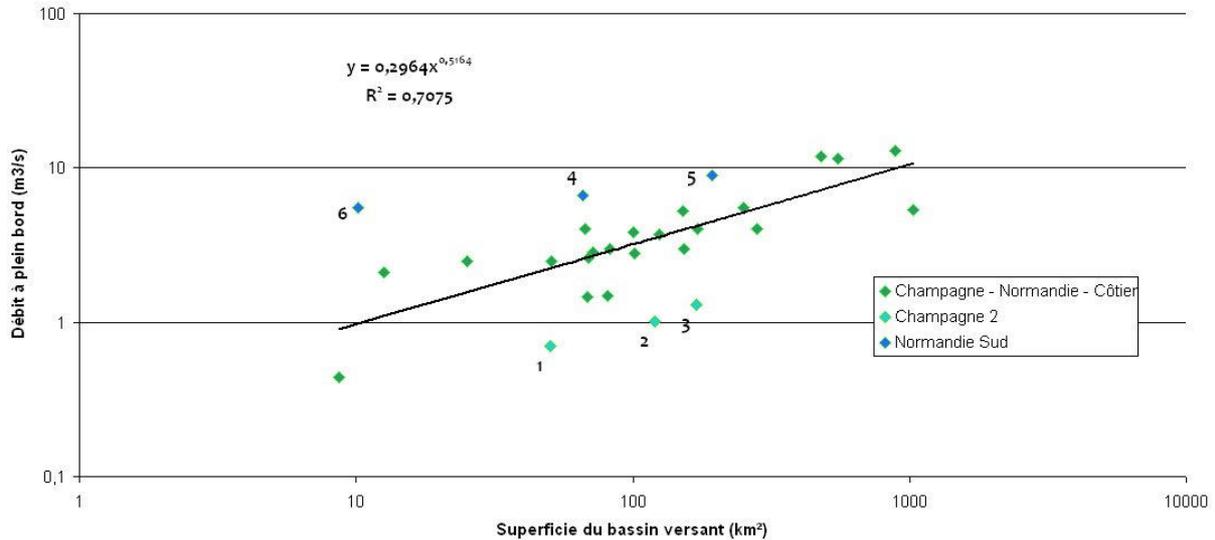


Figure 31 : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant. (1) Noblette, (2) Barbuise, (3) Ardusson, (4) Charentonne, (5) Blaise, (6) Sébec.

La courbe de référence ainsi obtenue (après élimination des points marginaux) a été comparée aux résultats d'autres études réalisées en France et en Belgique (Figure 32). On constate tout d'abord que les cours d'eau étudiés dans ce travail ont un comportement proche de ceux présentés par Navratil (2005). Ce dernier a travaillé sur des cours d'eau du centre de la France s'écoulant principalement sur des substrats perméables. Les deux autres courbes de la figure 29 représentent l'évolution du débit plein bord en fonction de la taille de bassins versants plutôt imperméables en Ardenne belge d'une part et dans l'Yzeron d'autre part (Petit *et al.*, 2005 et Navratil, 2008). Ces courbes s'écartent significativement de celles réalisées sur des terrains perméables. Ainsi, pour une taille de bassin versant donnée, le débit plein bord sera plus important sur les terrains imperméables que sur des terrains perméables. Ceci s'explique logiquement par le rôle tampon joué par la nappe phréatique qui retient une partie plus ou moins importante des écoulements.

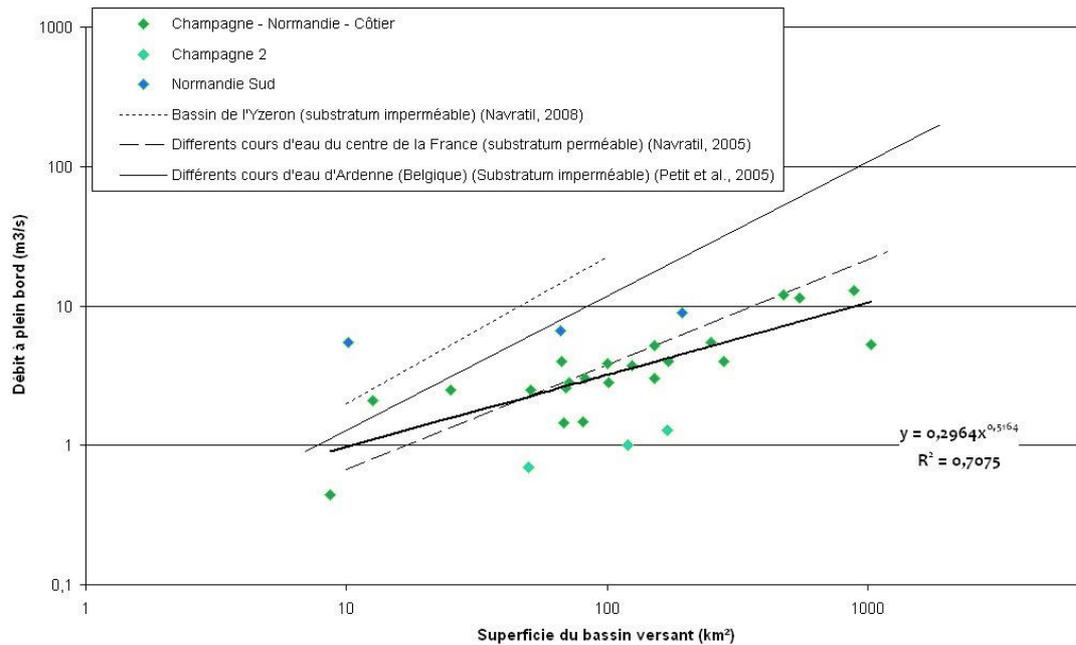


Figure 32 : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant dans différents contextes régionaux. Cette comparaison nous permet de valider notre courbe de référence moyenne mais pose également plusieurs questions :

- Il apparaît en effet cohérent d'avoir exclu le Sébec qui se situe au-delà des courbes réalisées en terrain imperméable. Par contre, la position du Livet, qui se situe directement sous le Sébec, pose question. Tout comme la Charentonne, il se trouve en limite sud de la zone et son bassin pourrait-être influencé.
- La pente de notre courbe de référence est sensiblement plus faible que celle des autres courbes ce qui pourrait laisser penser que le point de l'Iton (bassin de superficie proche de 1000 km²) aurait des caractéristiques proches des trois points atypiques de Champagne, dans le prolongement desquels il se trouve. Son bassin est d'ailleurs fortement influencé par des phénomènes karstiques.

Dix stations altérées ont pour l'instant été étudiées. Elles ont toutes un tracé plus ou moins rectiligne suite à une intervention humaine qui a supprimé la méandration. Nous n'avons pas d'informations précises sur ces interventions et les sites ont été sélectionnés en premier lieu sur carte en fonction du caractère rectiligne du tracé. A l'analyse de la Figure 33, on remarque que 7 stations sur 10 se situent au dessus de la courbe de référence, indiquant qu'elles ont un débit plein bord plus grand qu'attendu. Les rectifications de tracé semblent donc confirmées et ont été accompagnées d'une augmentation du gabarit. Toutefois, outre le Cailly et la Clérette qui s'écartent clairement de la courbe de référence, les résidus (écart à la courbe de référence) des autres stations sont relativement faibles. Le Lieure, le Dun, le Commerce, la Moivre et l'Austreberthe sont contenus dans la limite supérieure du nuage de points de la courbe de référence. Le Ravet et la Superbe se situent quant à eux sur la courbe, n'indiquant pas de différences par rapport aux sites naturels. A noter toutefois que ces cours d'eau sont situés en Champagne et que s'ils n'étaient pas morphologiquement altérés, ils seraient susceptibles d'avoir un fonctionnement similaire à celui de l'Ardusson, de la Barbuise et de la Noblette, qui se démarquent clairement de la courbe d'ajustement tracée, comme on le voit sur la figure 31. D'un point de vue hydrologique en tout cas, on voit bien cette similitude de fonctionnement sur la station hydrométrique de la Superbe, qui a fait partie des stations hydrométriques

analysées dans l'étude exploratoire (sous-chapitre 1.4.2). Le Longsol est lui tout à fait particulier et doit, pour l'instant, être exclu de l'analyse. En effet, le second débit n'ayant encore pu être observé, le débit de plein bord est estimé par modélisation hydraulique ; or la pente du lit, quasi nulle, ne permet pas une estimation fiable par cette procédure.

Cette analyse des débits de plein bord permet de vérifier que les stations considérées a priori comme dégradées ont une morphologie différente de l'ensemble des stations naturelles. L'écart à la référence reste toutefois assez faible indiquant que les cours d'eau n'ont pas connu une modification drastique de leur capacité d'évacuation des débits.

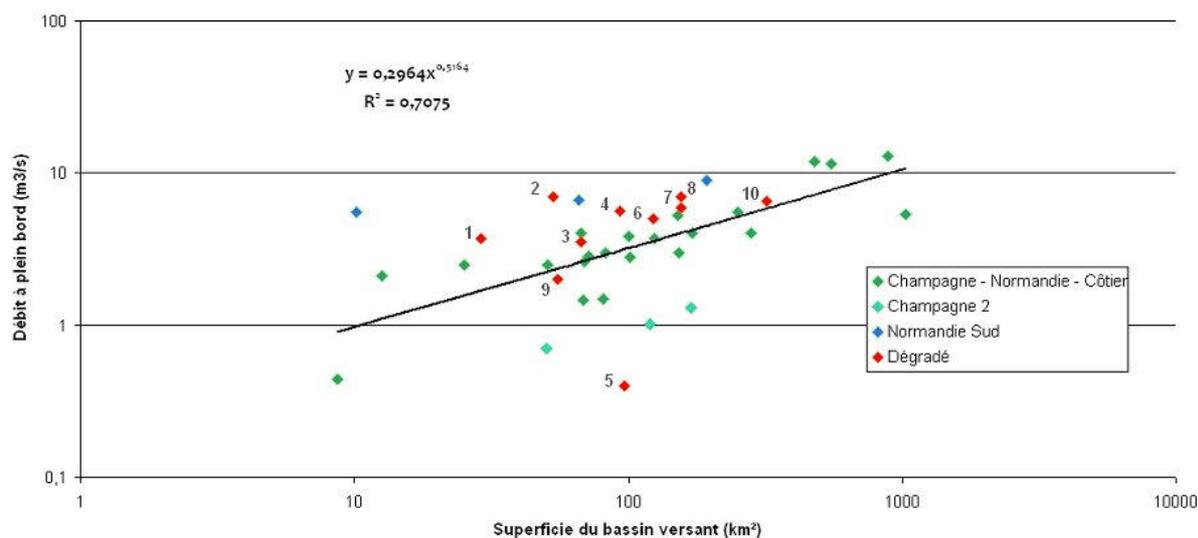


Figure 33 : Evolution du débit à plein bord en fonction de la taille du bassin versant pour les stations naturelles et dégradées. (1) Cailly, (2) Clérette, (3) Lieure, (4) Dun, (5) Longsol, (6) Commerce, (7) Moivre, (8) Austreberthe, (9) Ravet, (10) Superbe. La droite fournit la tendance du modèle de référence obtenu après élimination des points marginaux (voir figure 31).

2.3.1.2 Fréquence des débits de plein bord

Nous avons tenté de situer en fréquence les débits de plein bord ci-dessus estimés, d'une part en essayant de les replacer sur les courbes de débits classés reconstituées au niveau de chaque station, d'autre part en les comparant aux débits de pointe de la crue biennale, eux aussi reconstitués sur chaque station (cf. 2.2 Hydrologie).

Les graphes des courbes de débits classés avec positionnement du débit plein bord figurent dans les fiches descriptives de chaque station en annexe 8.

Tableau 11 : Fréquence au dépassement du Q_{pb} et comparaison avec le $QIXA2$ reconstitué (en gras : valeurs calculées à partir des enregistrements à la station HYDRO)

| N° | Rivière | Station | Type | QIXA2 (m³/s) | Qpb (m³/s) | Méthode calcul Qpb* | Qpb / QIXA2 | Fréquence au dépassement du Qpb (en % du temps) |
|----|----------|----------------------|---------|--------------|------------|---------------------|-------------|---|
| 1 | Ancre | Estissac | Naturel | 1.217 | 1.48 | GH | 1.22 | < 1 % |
| 2 | Barbuise | Voué | Naturel | 1.157 | 1.01 | GH | 0.87 | 15 % |
| 3 | Coole | Fontaine | Naturel | 0.961 | 1.45 | GH | 1.51 | < 1 % |
| 4 | Coole | Ecury-sur-Coole | Naturel | 1.822 | 3.00 | GH | 1.65 | < 1 % |
| 5 | Moivre | Pogny (1) | Naturel | 1.794 | 5.21 | GH | 2.90 | << 1% |
| 6 | Py | Saint-Souplet-sur-Py | Naturel | 1.186 | 2.83 | GH | 2.39 | << 1% |

| | | | | | | | | |
|----|---------------------|------------------------------|----------------|---------------|-------|---------|------|-----------------|
| 7 | Vesle | Prunay | Naturel | 5.014 | 11.40 | GH | 2.27 | < 1 % |
| 8 | Somme | Ecury-le-Repos | Naturel | 1.546 | 3.70 | GH | 2.39 | << 1 % |
| 9 | Ardusson | Saint-Aubin | Naturel | 1.770 | 1.29 | Observé | 0.73 | 15 % |
| 10 | Nosle | Paisy-Cosdon | Naturel | 1.451 | 3.84 | GH | 2.65 | << 1 % |
| 11 | Vanne | Neuville-sur-Vannes | Naturel | 3.303 | 4.00 | Fluvia | 1.21 | Entre 2 et 5 % |
| 12 | Soude | Soudron | Naturel | 1.340 | 2.80 | Fluvia | 2.09 | < 1 % |
| 13 | Noblette | Bussy-le-Château | Naturel | 0.739 | 0.70 | Fluvia | 0.95 | Entre 5 et 10 % |
| 14 | Blaise | Saint-Ange | Naturel | 7.636 | 9.00 | Fluvia | 1.18 | << 1 % |
| 15 | Avre | Bourg l'Abbé | Naturel | 17.500 | 12.89 | GH | 0.74 | Entre 1 et 2 % |
| 16 | Chaudefontaine | Touquettes | Naturel | 1.998 | 0.44 | GH | 0.22 | Entre 1 et 2 % |
| 17 | Risle | Prés de la Forge | Naturel | 49.453 | 11.91 | GH | 0.24 | Entre 5 et 10 % |
| 18 | Charentonne | La Gonfrière | Naturel | 10.050 | 6.62 | GH | 0.66 | << 1 % |
| 19 | Guïèl | Verneusses | Naturel | 6.238 | 4 | Fluvia | 0.64 | << 1 % |
| 20 | Corbie | Fort-Moville | Naturel | 2.339 | 2.50 | Fluvia | 1.07 | << 1 % |
| 21 | Ganzeville | Tourville-les-Ifs | Naturel | 1.753 | 3.00 | Fluvia | 1.71 | << 1 % |
| 22 | Yères | Villy-sur-Yères | Naturel | 4.996 | 4.00 | Fluvia | 0.80 | Entre 2 et 5 % |
| 23 | Ru d'Haudricourt | Haudricourt | Naturel | 1.876 | 2.50 | Fluvia | 1.33 | < 1 % |
| 24 | Eaulne | Envermeu | Naturel | 6.748 | 5.51 | GH | 0.82 | 5 % |
| 25 | Calonne | Annerolles | Naturel | 5.304 | 2.60 | Fluvia | 0.49 | < 1 % |
| 26 | Livet | Beaufai | Naturel | 2.811 | 2.10 | Fluvia | 0.75 | << 1 % |
| 27 | Sébec | Saint Siméon | Naturel | 1.141 | 5.50 | Fluvia | 4.82 | << 1 % |
| 28 | Iton | St Germain des angles | Naturel | 9.170 | 5.30 | Fluvia | 0.58 | 14 % |
| 29 | Superbe | Saint-Saturnin | Dégradé | 4.000 | 6.53 | GH | 1.63 | < 1 % |
| 30 | Fion | Aulnay-l'Aître | Dégradé | 1.220 | | | | |
| 31 | Longsol | Verricourt | Dégradé | 0.977 | | | | |
| 32 | Moivre | Pogny (2) | Dégradé | 1.847 | 5.85 | GH | 3.17 | << 1 % |
| 33 | Ravet | Aulnay | Dégradé | 0.623 | 2.00 | Fluvia | 3.21 | << 1 % |
| 34 | Lieure | Rosay-sur-Lieure | Dégradé | 1.487 | 3.50 | Fluvia | 2.35 | << 1 % |
| 35 | Commerce | Gruchet-le-Valasse | Dégradé | 5.150 | 5.00 | Fluvia | 0.97 | << 1 % |
| 36 | Austreberthe | Villers-Ecalle | Dégradé | 10.300 | 7.00 | Fluvia | 0.68 | << 1 % |
| 37 | Cailly | Cailly | Dégradé | 1.630 | 3.70 | Fluvia | 2.27 | << 1 % |
| 38 | Dun | Bourg Dun | Dégradé | 2.645 | 5.60 | Fluvia | 2.12 | << 1 % |
| 39 | Clerette | Clères | Dégradé | 1.253 | 7.00 | Fluvia | 5.59 | << 1 % |

* GH = Géométrie Hydraulique

On constate que les fréquences de dépassement du débit plein bord sont très variables, y compris entre stations réputées naturelles. Sans surprise, la Barbuise et l'Ardusson qui se distinguaient déjà par leur faible valeur de Qpb présentent une très forte fréquence de débordement : le Qpb est dépassé en moyenne 15 % du temps soit de l'ordre de 55 jours par an... C'est également le cas pour l'Iton. Ensuite nous trouvons trois stations – la Noblette, l'Eaulne et la Risle - où le Qpb est dépassé en moyenne entre 5 et 10 % du temps, soit entre 18 et 36 jours par an. Quatre autres stations – la Vanne, l'Avre, le ru de Chaudefontaine et l'Yères – voient leur Qpb dépassé entre 1 et 5 % du temps. Pour toutes les autres stations, le Qpb est dépassé moins de 1 % du temps, voire beaucoup moins. Mais la reconstitution des courbes de débits classés s'arrêtant au quantile 1 % n'a pas permis d'être plus précis sur ces fréquences de débordement ("précision" qui aurait pu se révéler illusoire compte-tenu des erreurs liées à la méthode de reconstitution).

Au-delà nous disposons comme point de comparaison des valeurs du QIXA2 – débit de pointe de la crue biennale - la plupart du temps reconstituées (avec les marges d'erreur soulignées au chapitre 1.6.2). Le calcul du ratio Qpb / QIXA2 sur les 37 stations où les deux valeurs sont

disponibles montre une grande variabilité des valeurs de Qpb de part et d'autre de la valeur du QIXA2 : sur 15 des stations, le Qpb est inférieur au QIXA2, sur 22 il lui est supérieur.

2.3.2 Autres caractéristiques morphologiques

Afin d'enrichir l'analyse, le même exercice a été réalisé avec d'autres paramètres morphométriques. La Figure 34 A et B montre l'évolution de la largeur moyenne à plein bord en fonction de la superficie du bassin versant. On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre ces deux paramètres (ceci tenant au fait que l'on se situe dans la même géologie, les mêmes gammes de pluviométrie et de pente de cours d'eau). Les rivières normandes et champenoises ont par ailleurs la même évolution. La largeur moyenne à plein bord apparaît moins sensible que le débit à plein bord, les sous-ensembles mis en évidence précédemment ne sont en effet pas visibles sur cette figure. Seul le point du Sébec (en bleu sur la Figure 34) n'a pas été intégré pour tracer la droite de régression.

On remarque que la largeur à plein bord des cours d'eau dégradés tend à être plus faible que celle des cours d'eau naturels (points majoritairement en dessous de la droite de référence) Cette tendance pourrait s'expliquer soit par une modification directe causée par le recalibrage soit par un processus de réajustement du lit consécutif aux travaux (ce qui semble assez peu probable étant donné les faibles puissances, voir point 2.4.3.).

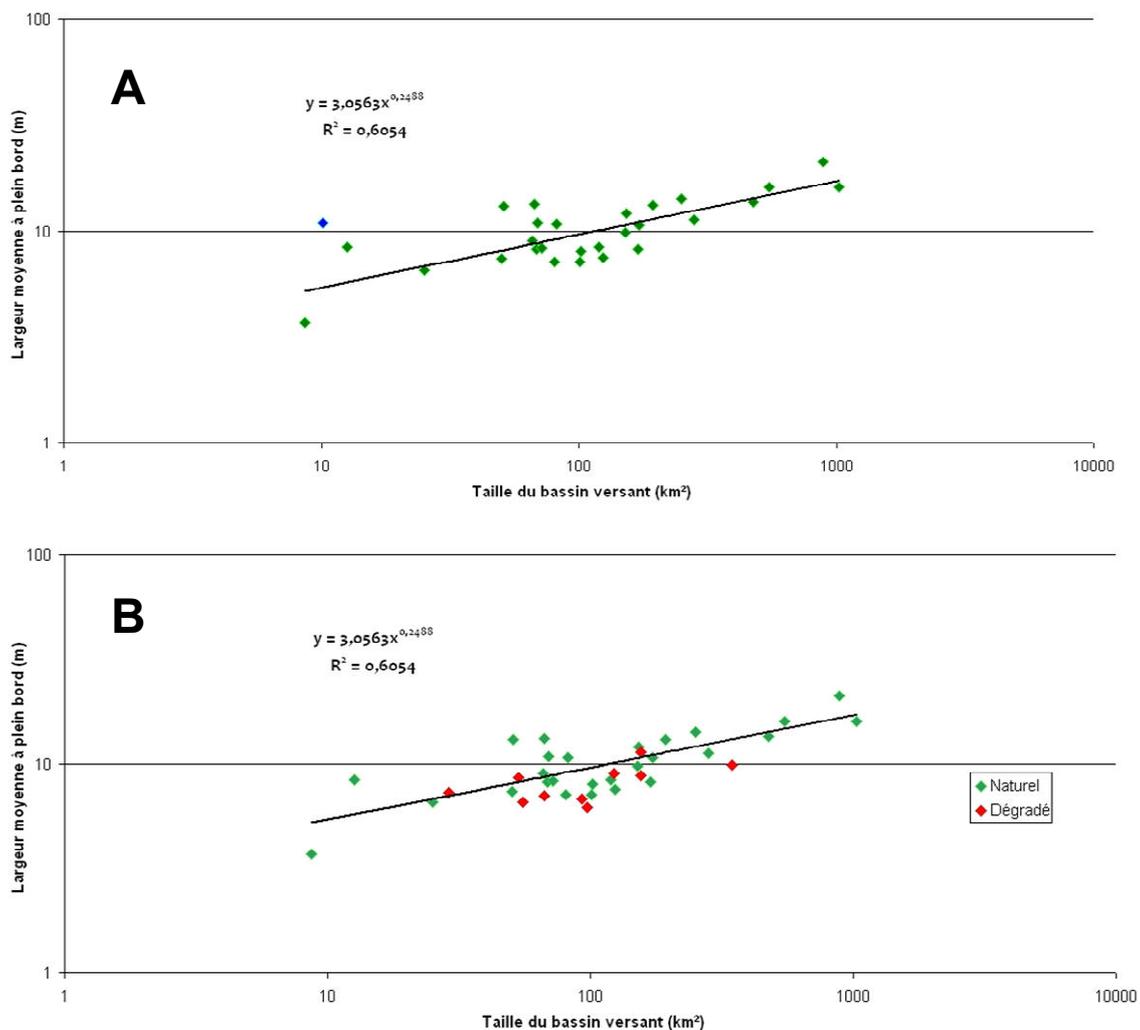


Figure 34 : Evolution de la largeur moyenne à plein bord en fonction de la taille du bassin versant: A pour les stations naturelles, B pour les stations naturelles et les stations dégradées.

Sur les hauteurs moyennes à plein bord (Figure 35), la différence entre les cours d'eau naturels et dégradés n'apparaît pas forte. La moitié des stations (le Cailly, la Clérette, le Dun, l'Austreberthe et la Moivre) semblent pourtant avoir une profondeur plus importante qu'attendue. Les autres ne se distinguent pas vraiment des stations naturelles.

Le rapport largeur/profondeur est traditionnellement utilisé pour caractériser la forme du chenal des cours d'eau. Il est calculé à partir de la largeur et de la profondeur moyenne au plein bord. Il évolue avec le débit, la pente et la taille des particules qui composent le lit (Knighton, 1998). Nous avons considéré les rivières de Normandie et de Champagne indépendamment. Sur les deux graphiques de la figure 36, on peut voir que les rivières dégradées ont des rapports largeur/profondeur globalement plus faibles que les stations naturelles.

A ce stade de l'analyse, on peut donc d'ores et déjà conclure que les rivières dégradées étudiées ici ont subi une rectification de tracé qui n'a pas affecté drastiquement la géométrie du lit (ce ne sont pas des exemples caricaturaux !). Les différents graphiques présentés ici montrent toutefois que cette géométrie a été modifiée. Les cours d'eau altérés sont globalement plus profonds et moins larges qu'en conditions naturelles et le débit plein bord est plus important dans une majorité des cas.

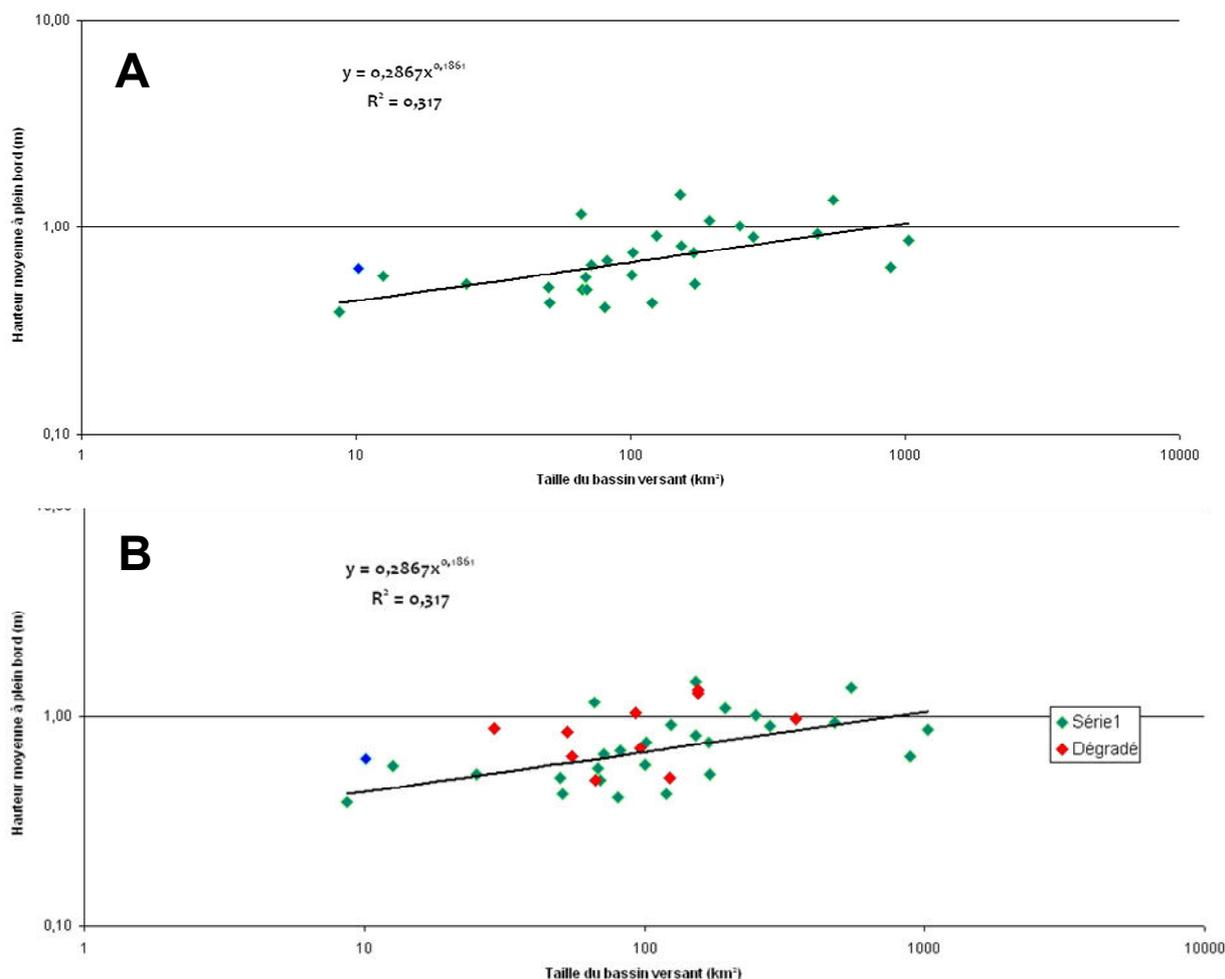


Figure 35 : Evolution de la hauteur moyenne à plein bord en fonction de la taille du bassin versant: A pour les stations naturelles, B pour les stations naturelles et les stations dégradées.

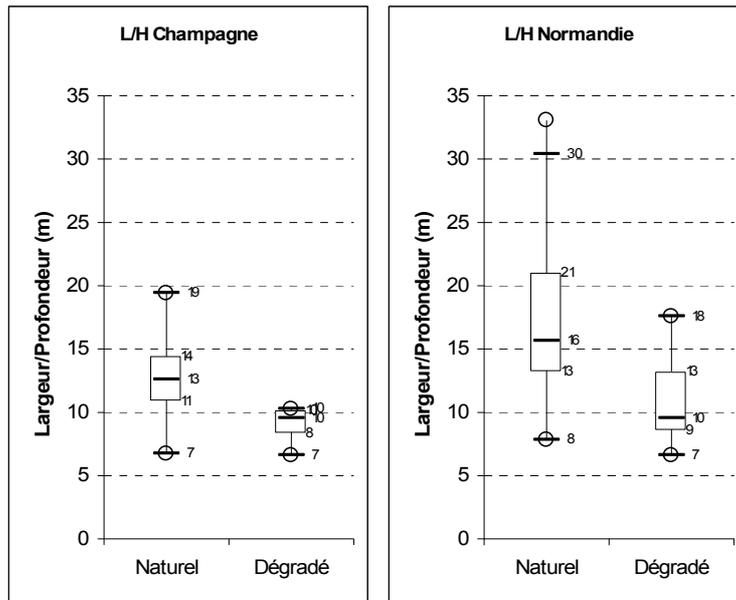


Figure 36 : Rapport largeur/profondeur des stations de Champagne et de Normandie.

2.3.3 Diversité des formes du lit

La rectification du tracé des rivières dégradées s'est accompagnée d'une légère modification de la géométrie des lits avec un chenal moins large et plus profond et des débits à plein bord globalement plus importants. Nous avons voulu également vérifier dans quelle mesure l'anthropisation des stations avait engendré une perte de diversité de formes. Les rivières à méandres offrent naturellement une grande diversité de faciès en terme de profondeur, vitesse et substrat avec des zones de plus faible vitesse et de plus grande profondeur (mouille) qui alternent avec des radiers moins profonds et plus courants (seuil). Cette diversité de faciès est très importante pour la biocénose car elle sous-tend la diversité des espèces.

Afin de quantifier cette diversité, nous nous sommes intéressés à la variabilité des profondeurs d'une part et à la profondeur des mouilles d'autre part. Nous avons essayé de déterminer dans quelle mesure les lits anthropisés étaient plus plats et plus réguliers qu'en conditions naturelles. La variabilité des profondeurs a été approchée grâce au coefficient de variation ($CV = \text{écart type}/\text{moyenne}$) des profondeurs moyennes à Q_1 (bas débit) au niveau de chaque profil en travers.

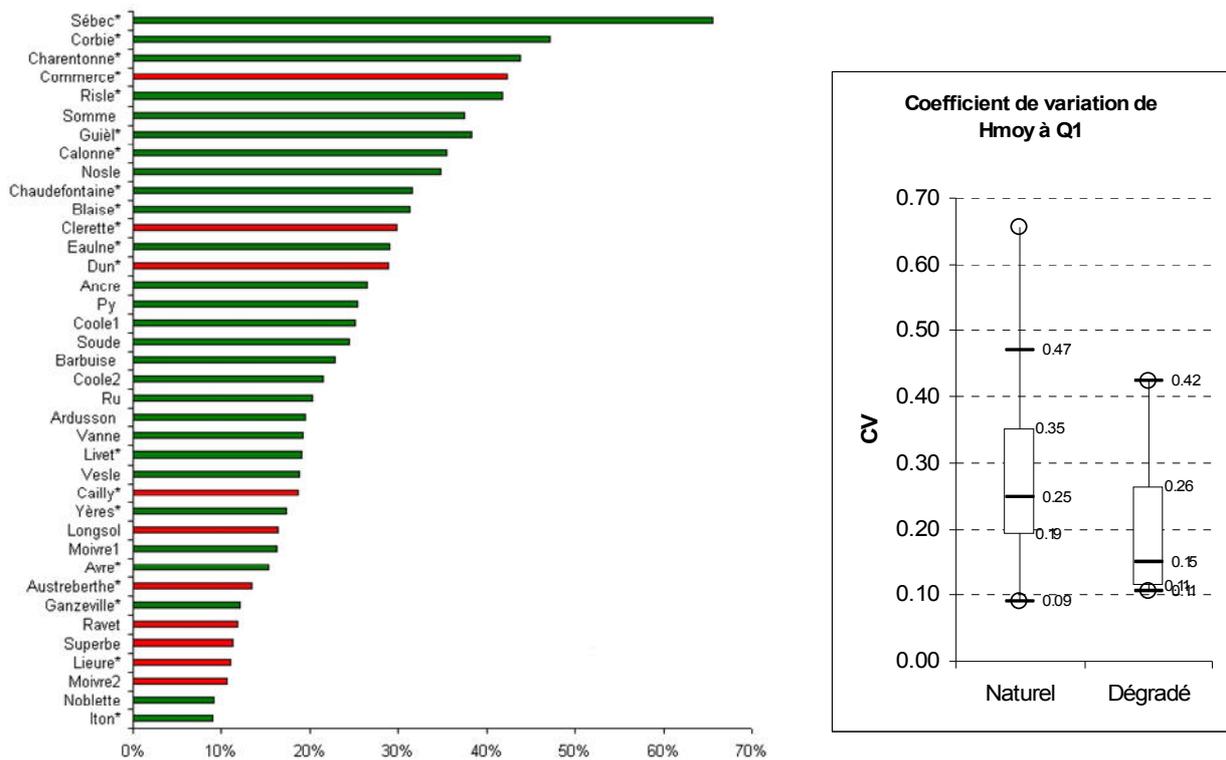


Figure 37 : Coefficient de variation de la hauteur moyenne à Q1. Les stations marquées d'un * se situent en Normandie.

On remarque sur la figure 37 qu'il existe naturellement une grande diversité entre les stations et que les rivières caillouteuses de Normandie ont des coefficients de variation plus élevés qu'en Champagne. Ce qui s'explique probablement par la plus grande sinuosité des rivières sableuses. Dans ces cours d'eau, le gradient de profondeur se marque plutôt latéralement alors qu'il est longitudinal dans les rivières caillouteuses plus rectilignes (alternance seuil-mouille). En travaillant avec la hauteur moyenne des profils en travers, la diversité latérale ne peut être appréhendée. Quoi qu'il en soit, les rivières dégradées (en rouge sur le graphique) ont, dans l'ensemble, une variabilité de profondeur plus faible. Ce qui semble indiquer que ces stations ont un lit plutôt plus plat. Le Commerce, la Clérette et le Dun se distinguent des autres cours d'eau dégradés avec un CV au dessus de la moyenne.

Afin de compléter cette analyse, le fond des lits a été inspecté plus attentivement à partir des profils en long : en complément des levés topographiques par transect, nous avons en effet levé un profil en long du fond du lit (point bas de l'écoulement) précis sur tout le linéaire de la station. En système naturel, les cours d'eau du bassin de la Seine font partie de la catégorie des rivières à seuil-mouille, c'est-à-dire que leur lit se découpe en séquences seuil-mouille régulièrement espacées de 5 à 7 fois la largeur (Figure 38). La profondeur des mouilles a été déterminée suivant la méthodologie proposée par Carling et Orr (2000). La droite de régression passant par le nuage de points formant le profil en long est tracée. Les "seuils" se situent au-dessus de la droite, les "mouilles" sont en dessous. La profondeur des mouilles correspond à la distance maximale entre la droite de régression et le profil en long (résidus).

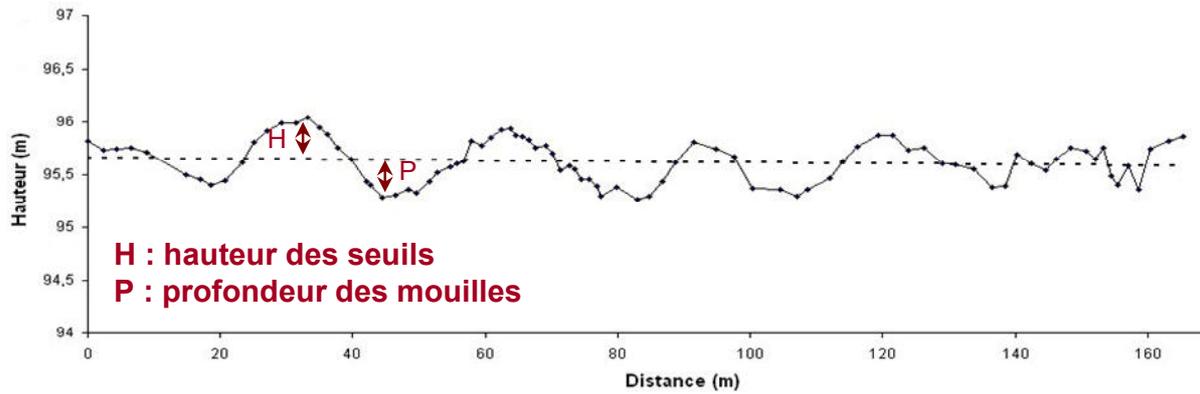


Figure 38 : Profil en long et découpage du fond du lit en seuils et mouilles.

La figure 39 renseigne sur la moyenne de la profondeur des mouilles pour chaque station. On observe une corrélation globalement faible entre la taille du bassin versant et la profondeur des mouilles. Parmi les sites naturels, seuls l'Iton, le Ru d'Haudricourt, la Noblette, la Barbuise et le Ru de Chaudefontaine ont des mouilles proportionnellement moins profondes. Les points des cours d'eau dégradés sont eux systématiquement sous la courbe définie pour les stations naturelles. Leurs mouilles sont donc moins profondes et ils ont des lits plus plats.

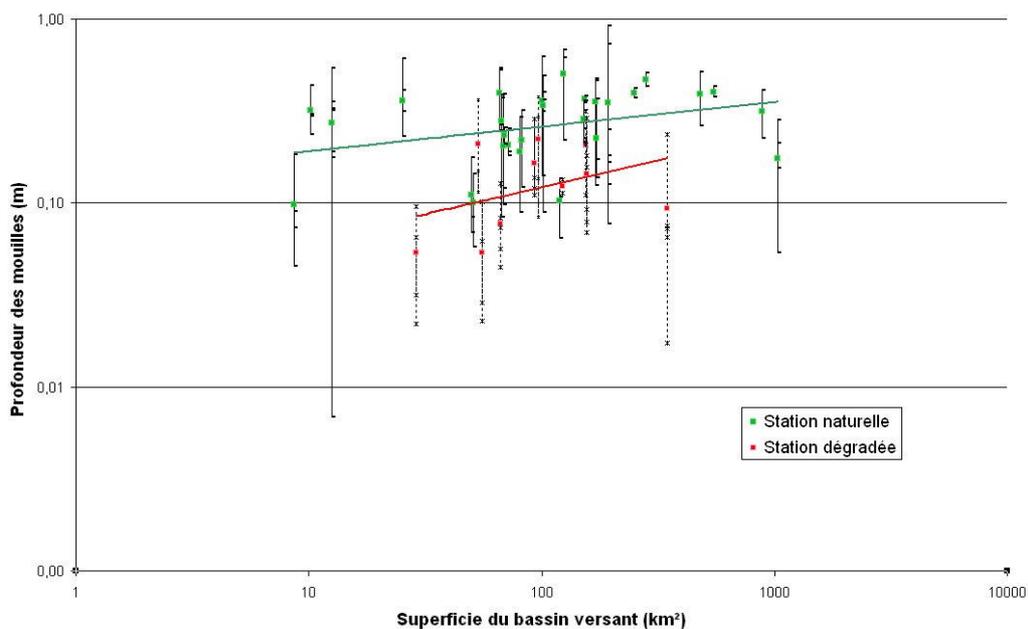


Figure 39 : Profondeur des mouilles des stations naturelles et des stations dégradées. Les points rouges et verts correspondent à la profondeur moyenne calculée par station et les traits verticaux à la dispersion des profondeurs sur chaque station.

2.4 Substrat

2.4.1 Caractéristiques du substrat

La granulométrie est un élément déterminant lorsqu'on s'intéresse à l'hydromorphologie des cours d'eau. Elle agit à la fois comme une variable de contrôle et de réponse. Une perturbation de l'équilibre du système suite à l'élargissement du chenal, à un changement du régime hydrologique, à l'interruption de l'apport sédimentaire, etc. pourra entraîner une transformation des propriétés (taille, structure, etc.) des particules qui composent le fond du lit. A l'inverse, ces dernières conditionnent la réponse du cours d'eau aux pressions. Citons par exemple, la présence de gros éléments (galets, blocs) ou d'un pavage qui préviendront l'incision et / ou favoriseront l'érosion latérale.

Une granulométrie des seuils a été réalisée sur chacune des stations étudiées (Figure 40). En fonction de la taille du substrat, les particules ont directement été mesurées sur place (technique de Wolman) ou ont été ramenées au laboratoire pour être tamisées (voir point 1.2.3.). La première des techniques a tendance à légèrement surestimer la taille de la fraction fine du substrat. Il faudra en tenir compte dans l'analyse des résultats. Par ailleurs, la taille de l'échantillon à tamiser est dictée par la taille du plus gros élément présent sur le dépôt. Pour des raisons matérielles, il n'a pas toujours été possible de prélever un échantillon statistiquement représentatif (plusieurs dizaines de kilos de sédiment à prélever). Dans ce cas, la précision des granulométries est légèrement moins bonne que celle de la majorité des sites.

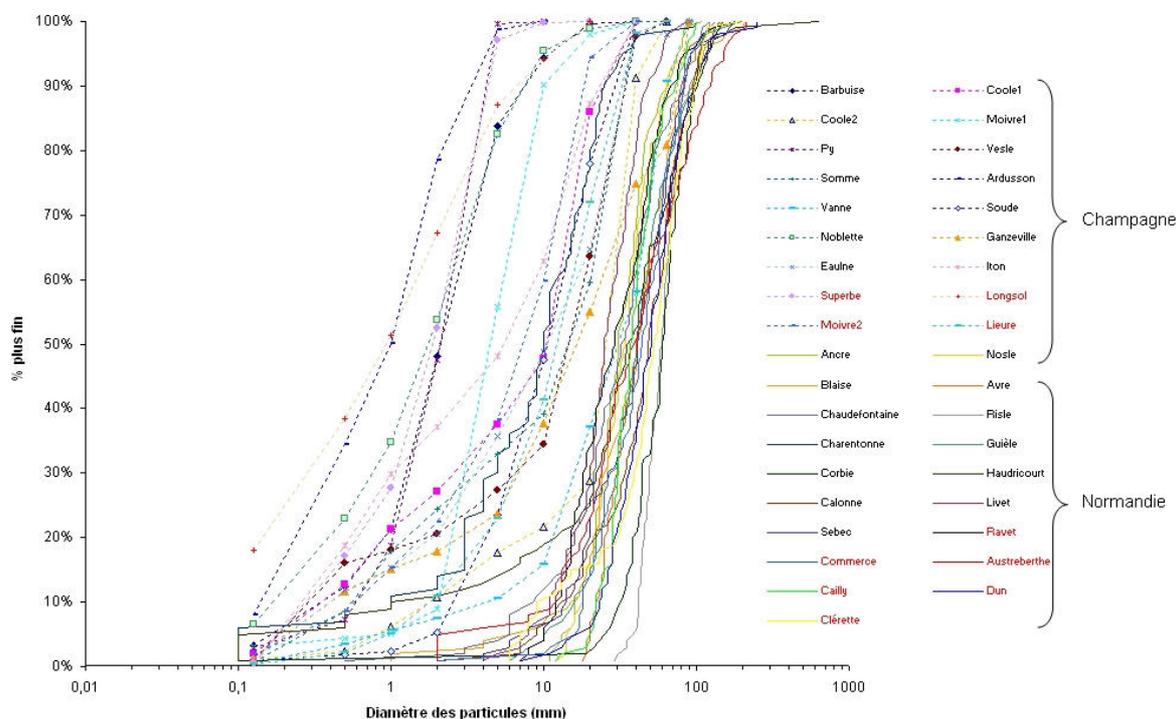


Figure 40 : Courbes granulométriques des cours d'eau étudiés. Les courbes en trait plein ont été réalisées en suivant la technique de Wolman et celles en traits pointillés ont été réalisées par tamisage. Dans la légende, les noms des cours d'eau en rouge correspondent aux cours d'eau dégradés.

On remarque sur cette figure qu'il existe trois populations de stations (Tableau 12) : les cours d'eau caillouteux (D50 compris entre 2 et 6 cm) situés majoritairement en Normandie, les

cours d'eaux graveleux (D50 compris entre 2 mm et 3 cm) et les cours d'eau sableux (D50 inférieur à 2 mm). La Vanne, le Ru d'Haudricourt, la Coole aval, et la Ganzeville ont une position intermédiaire avec à la fois des éléments sablo-graveleux et des cailloux. La courbe granulométrique de ces cours d'eau démarre avec les courbes des rivières sablo-graveleuses et se termine avec les courbes des stations caillouteuses. Par ailleurs, en première analyse, les cours d'eau dégradés ne semblent pas se démarquer de l'ensemble des stations.

Tableau 12 : Caractéristiques granulométriques des stations.

| N° ordre | Type | Région | Riviere | D16 | D50 | D90 |
|----------|------|-----------|------------------|-----|-----|-----|
| 1 | Nat | Champagne | Ancre | 21 | 31 | 65 |
| 2 | Nat | Champagne | Barbuise | 0,7 | 2 | 8 |
| 3 | Nat | Champagne | Coole amont | 0,7 | 10 | 25 |
| 4 | Nat | Champagne | Coole aval | 4 | 30 | 40 |
| 5 | Nat | Champagne | Moivre | 2 | 4 | 10 |
| 6 | Nat | Champagne | Py | 0,9 | 1 | 4 |
| 7 | Nat | Champagne | Vesle | 0,5 | 15 | 35 |
| 8 | Nat | Champagne | Somme | 0,9 | 15 | 35 |
| 9 | Nat | Champagne | Ardusson | 0,2 | 1 | 3 |
| 10 | Nat | Champagne | Nosle | 20 | 34 | 64 |
| 11 | Nat | Champagne | Vanne | 10 | 30 | 65 |
| 12 | Nat | Champagne | Soude | 3 | 10 | 29 |
| 13 | Nat | Champagne | Noblette | 0,3 | 2 | 8 |
| 14 | Nat | Normandie | Blaise | 20 | 41 | 93 |
| 15 | Nat | Normandie | Avre | 25 | 40 | 82 |
| 16 | Nat | Normandie | Chaudefontaine | 14 | 32 | 79 |
| 17 | Nat | Normandie | Risle | 44 | 60 | 90 |
| 18 | Nat | Normandie | Charentonne | 3 | 11 | 25 |
| 19 | Nat | Normandie | Guiël | 21 | 41 | 97 |
| 20 | Nat | Normandie | Corbie | 38 | 60 | 102 |
| 21 | Nat | Normandie | Ganzeville | 1 | 17 | 75 |
| 22 | Nat | Normandie | Yères | | 31 | |
| 23 | Nat | Normandie | Ru d'Haudricourt | 7 | 35 | 98 |
| 24 | Nat | Normandie | Eaulne | 1 | 10 | 35 |
| 25 | Nat | Normandie | Calonne | 18 | 48 | 95 |
| 26 | Nat | Normandie | Livet | 14 | 25 | 48 |
| 27 | Nat | Normandie | Sébec | 18 | 41 | 84 |
| 28 | Nat | Normandie | Iton | 0,4 | 5 | 25 |
| 29 | Deg | Champagne | Superbe | 0,5 | 2 | 4 |
| 30 | Deg | Champagne | Fion | | | |
| 31 | Deg | Champagne | Longsol | 0,1 | 0,5 | 7 |
| 32 | Deg | Champagne | Moivre | 1 | 7 | 18 |
| 33 | Deg | Champagne | Ravet | 15 | 29 | 68 |
| 34 | Deg | Normandie | Lieure | 3 | 11 | 35 |
| 35 | Deg | Normandie | Commerce | 21 | 44 | 84 |
| 36 | Deg | Normandie | Austreberthe | 14 | 39 | 123 |
| 37 | Deg | Normandie | Cailly | 28 | 37 | 72 |
| 38 | Deg | Normandie | Dun | 28 | 51 | 99 |
| 39 | Deg | Normandie | Clerette | 23 | 53 | 99 |

L'indice de classement (sorting index) d'un dépôt permet de rendre compte de l'hétérogénéité des dépôts. Il est basé sur le rapport entre le diamètre médian et les percentiles

caractéristiques des fractions fines et grossières. Il existe plusieurs types d'indices, le plus utilisé est celui de Folk and Ward qui permet de classer les dépôts en 7 catégories (Bunte et Abt, 2001):

$$SI = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6}$$

où le diamètre des particules est représenté en échelle ϕ ($\phi = -\text{Log}_2 D$) avec ϕ_{84} , ϕ_{16} , ϕ_{95} et ϕ_5 respectivement les percentiles 84, 16, 95 et 5 des distributions granulométriques (cf. figure 41). Selon cet indice, plus SI est grand, moins le dépôt est bien classé et donc plus il est hétérogène.

Sur les 39 stations étudiées, 8 ont un très mauvais indice de classement indiquant une grande hétérogénéité de substrat (Figure 41). Elles concernent majoritairement des cours d'eau sableux et sablo-graveleux. Les cours d'eau caillouteux sont quant à eux mieux classés avec un indice de classement qui peut être considéré comme moyen à bon. Sans pouvoir établir un lien direct, le mauvais classement des dépôts peut être rapproché d'un éventuel colmatage. Un mauvais classement est en effet signe d'une source secondaire de sédiment qui perturbe la tendance naturelle à l'affinage de la charge vers l'aval. Cet apport peut être dû à un affluent, des apports latéraux (érosion de berge, traversée de gorge) mais également à un apport en sédiment fin par exemple dans un bassin agricole. La Figure 41 ne peut être directement interprétée comme révélatrice du colmatage mais met toutefois en évidence les stations éventuellement problématiques. La Figure 42 illustre cette situation. Les courbes granulométriques de 4 stations caractérisées par un indice de classement élevé (Figure 41) montrent en effet une part importante (20 à 30 %) d'éléments fins ($D < 1\text{mm}$). Alors que la Soude et la Moivre amont ont un substrat mieux classé (SI proche de 1) et une part de fines proportionnellement moins importante.

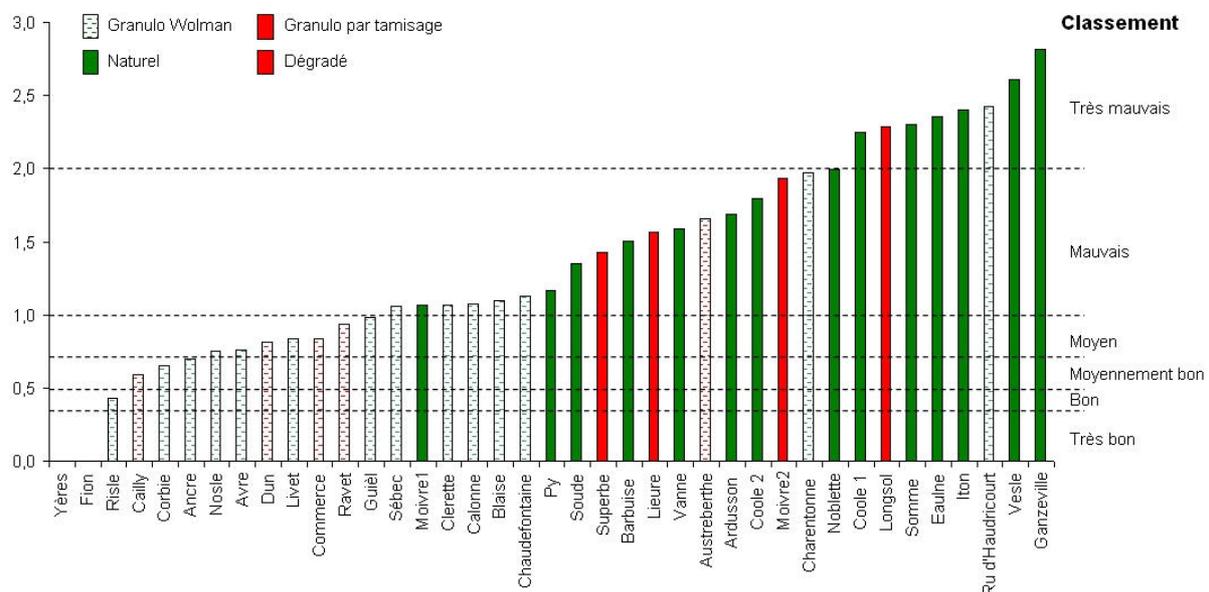


Figure 41 : Indice de Folk and Ward traduisant le classement granulométrique des dépôts. Plus la valeur de l'indice est importante, moins le classement est bon et plus le dépôt est hétérogène.

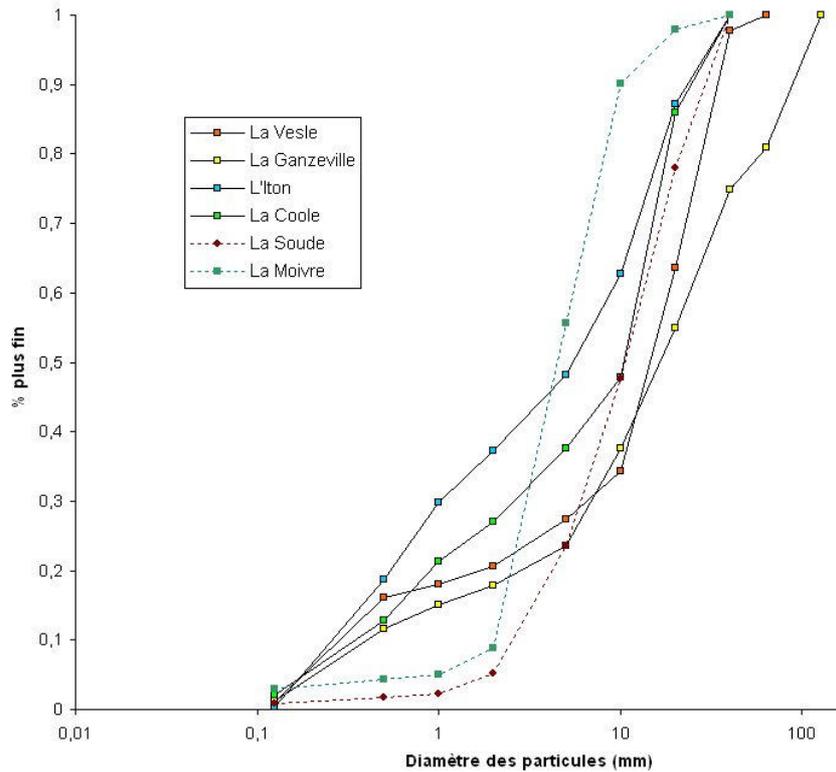


Figure 42 : Courbes granulométriques de 6 stations, 2 dont l'indice de classement est plutôt petit (trait pointillé) et 4 avec un indice élevé (trait plein).

2.4.2 Dynamique du substrat

Afin d'évaluer la dynamique du substrat de certains cours d'eau, des marquages de la charge de fond ont été réalisés sur plusieurs stations à charge caillouteuse : la Nosle, l'Yères, le Dun, le Cailly et l'Avre. Plusieurs centaines d'éléments de toutes tailles ont été prélevés sur ces rivières puis ont été lavés, séchés, peints et réintroduits sur le lit des cours d'eau (Figure 43). Cette technique est très fréquemment utilisée par les scientifiques bien qu'elle surestime légèrement la mobilisation. En effet, le fait de sortir les particules de la rivière puis de les y redéposer déstructure le lit. La structure du dépôt (imbrication des particules, pavage, tuilage), qui peut être plus ou moins importante selon les situations, ralentit habituellement la mise en mouvement des particules et n'est pas prise en compte avec ce type de marquage. Des marquages in situ, qui permettent d'éviter ce problème, ne sont malheureusement pas possibles sur ces cours d'eau puisque les dépôts sont immergés tout au long de l'année. Dans le futur, d'autres techniques, comme l'utilisation de marqueurs magnétiques (Pit Tag), pourraient être envisagées.



Figure 43 : Marquage de la charge de fond du Cailly avant mobilisation (A) et du Dun après une faible mobilisation (B).

A l'exception de la Nosle, chaque station est associée à une station hydrométrique située à proximité qui enregistre les débits. Ceci permet de déterminer le débit critique au-delà duquel la charge de fond est mobilisée. Sur la Nosle, une échelle limnimétrique à maxima a été installée (Figure 44). Cette échelle renseigne sur le niveau maximum atteint par les crues, traduit ensuite, grâce à une série de jaugeages, en débit maximum.



Figure 44 : Echelle à maxima installée sur la Nosle.

Pour l'instant, seuls deux marquages ont été mobilisés, celui de la Nosle et celui du Dun. Ailleurs, aucune crue n'a été suffisamment importante pour mettre en mouvement les cailloux peints (Tableau 13). A l'heure actuelle on ne peut donc pas dire grand-chose sur les marquages de l'Yères, l'Avre et le Cailly. Des puissances de 2 à 10 W/m² ne sont évidemment pas suffisantes pour mobiliser des particules de 3 à 4 cm de diamètre.

Tableau 13 : Suivi des marquages ; * : $Q_{\text{iax}2}$ reconstitué.

| | Injection | Dernier suivi | Debit max (date) | Debit max (m3/s) | Q_{max}/Q_b | $Q_{\text{IXA}2}$ | ω max (W/m ²) | Mobilisation |
|--------|------------|---------------|------------------|------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|--------------|
| Yères | 19/03/2008 | 12/01/2009 | 28/05/2008 | 5,36 | 1,3 | 5* | 8 | Non |
| Avre | 04/11/2008 | 18/02/2009 | 24/01/2009 | 8,60 | 0,66 | 17,5 | 10 | Non |
| Cailly | 17/11/2008 | 12/01/2009 | 06/12/2009 | 0,22 | 0,06 | 1,6 | 2 | Non |
| Dun | 18/11/2008 | 12/01/2009 | 03/12/2008 | 3,00 | 0,53 | 2,6 | 15 | Oui |
| Nosle | 29/01/2008 | 05/03/2009 | | 2,45 | 0,8 | 1,45* | 26 | Oui |

Sur le Dun, une petite crue a partiellement mobilisé l'injection trois semaines après sa mise en place. Seuls quelques éléments ont été déplacés mais certains d'entre eux ont parcouru plusieurs mètres (Figure 45A). Ceux-ci sont relativement gros avec une taille variant de 39 à 66 mm. Le faible nombre de particules mobilisées nous pousse à considérer ce débit comme la limite basse du seuil de mise en mouvement. On ne peut pas réellement considérer que le lit du Dun connaît une réelle réorganisation pour un tel débit. Particulièrement lorsqu'on sait que l'injection de cailloux marqués surestime la mobilisation. Lors de cette crue, le débit maximum instantané a atteint 3 m³/s (0,53 Q_b), ce qui correspond à une puissance spécifique de 15 W/m². La puissance spécifique est une simple relation liant le débit (Q), la pente (s) et la largeur (w) :

$$\omega = \frac{\rho g Q s}{w}$$

ρ et g sont deux constantes, respectivement, la masse volumique de l'eau et l'accélération de la pesanteur. C'est un descripteur simple, facile à utiliser et largement employé dans la littérature internationale. Cette crue aurait une récurrence supérieure à deux ans et la mobilisation généralisée du lit se produirait donc plus exceptionnellement encore.

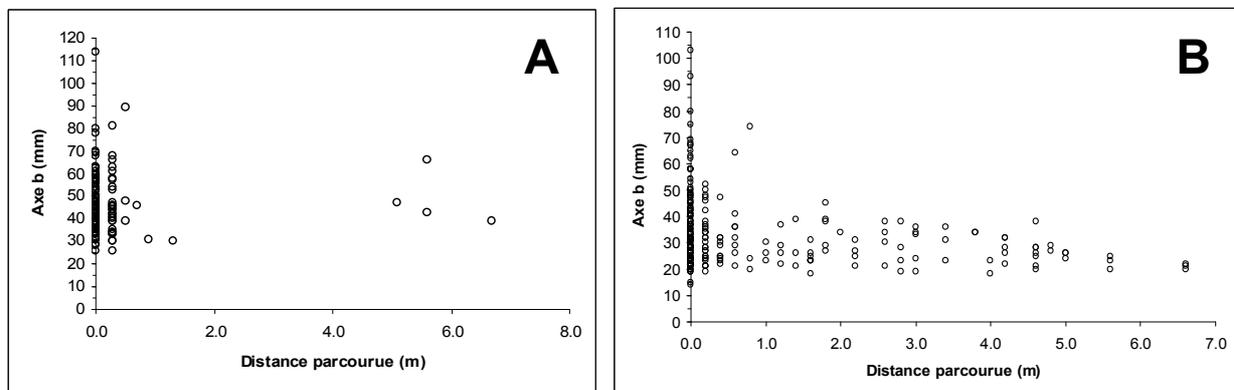


Figure 45 : Distances parcourues par les particules mobilisées pour les marquages du Dun (A) et de la Nosle (B).

Sur la Nosle, des cailloux marqués ont également été retrouvés sur environ 7 m mais le nombre de particules mobilisées a été beaucoup plus important (Figure 45B). La distribution de la taille des éléments mobilisés en fonction de la distance parcourue correspond au schéma classique, c'est-à-dire une décroissance de la taille sur les premiers mètres puis une stabilisation autour d'un palier. Dans ce cas, on voit une particule de 74 mm d'axe b qui a parcouru près d'1 m puis une atténuation de la taille jusqu'à un palier autour de 30 mm. Le palier est révélateur de ce qui compose le gros du débit solide et correspond dans ce cas au D_{50} du cours d'eau (34 mm).

En l'absence de station hydrométrique on ne connaît pas la valeur exacte du débit mobilisateur. Par contre grâce à l'échelle à maxima nous connaissons la hauteur d'eau maximale atteinte sans mobilisation et la hauteur maximale atteinte entre deux relevés de l'échelle et durant laquelle la mobilisation s'est produite. En transformant les hauteurs en débits à partir de la relation de géométrie hydraulique établie sur la station, on dispose donc d'une fourchette de débits dans laquelle se trouve le débit de mise en mouvement. La mobilisation s'est produite entre 1 et 2,45 m³/s (0,3 – 0,8 Q_{pb}) c'est-à-dire pour une puissance spécifique comprise entre 16,5 et 26,5 W/m². La crue biennale sur la Nosle serait de l'ordre de 1,45 m³/s. La charge de fond de ces deux cours d'eau a donc été mobilisée pour une puissance spécifique comprise entre 15 et 25 W/m².

Différentes études ont récemment proposé des relations empiriques permettant de déterminer la puissance spécifique critique nécessaire pour mobiliser une particule de diamètre donné. Bien que ces relations soient difficilement transposables d'un cours d'eau à l'autre, elles donnent de bons repères et des ordres de grandeur.

Ainsi, 15 à 25 W/m² pour mobiliser des particules de 30 à 40 mm de diamètre sont des valeurs tout à fait cohérentes avec ce que l'on peut trouver dans la littérature. En effet, une étude réalisée sur plusieurs rivières du sud de la Belgique propose notamment une relation pour le Meuse aux caractéristiques proches de celles de la Nosle et du Dun (Petit et al., 2005).

$$\omega_{ci} = 0.01D^{2.05}$$

avec D le diamètre des particules mobilisées exprimé en mm. Sur ce cours d'eau, les cailloux de 30 mm nécessitent une puissance de 10 W/m² pour être transportés et ceux de 40 mm une puissance de 20 W/m². On est donc dans le même ordre de grandeur.

Le nombre de marquages est pour l'instant un peu faible pour tirer de réelles conclusions. On peut toutefois déjà noter que :

- sur la Nosle et le Dun, il a fallu la crue biennale pour initier le transport de la charge de fond;
- sur l'Yères, une crue supérieure à la crue biennale (proche de la quinquennale) n'a produit qu'une très faible puissance spécifique, insuffisante pour mobiliser le marquage;
- les autres cours d'eau marqués n'ont pour l'instant pas connu de crue réellement importante, on ne peut donc tirer aucune conclusion.

Les cas de la Nosle, du Dun et de l'Yères sont intéressants car ils montrent que la mobilisation de la charge de fond caillouteuse y est moins fréquente que ce qu'on observe dans d'autres régions. La mobilisation du substrat est en effet généralement observée entre 0,5 à 0,8 Q_b c'est-à-dire lors d'une crue inférieure à la crue annuelle (Petit *et al.*, 2006). Dans notre étude, le ratio 0,5-0,8 Q_b semble se vérifier mais la fréquence du débit plein bord et donc du charriage est beaucoup moins importante.

2.4.3 Puissance spécifique à plein bord

La puissance spécifique a été utilisée pour caractériser la dynamique des cours d'eau en termes de transport de la charge de fond mais également en termes de style fluvial, de caractérisation du chenal et de dynamique des méandres (Fergusson, 1981; Bravard, 1991; Van den Berg, 1995). Par ailleurs, Brookes (1988) a utilisé la puissance spécifique pour étudier les évolutions et les adaptations des chenaux suite à l'intervention humaine sur les hydrosystèmes. Les cours d'eau dont la puissance à plein bord ne dépasse pas 15 W/m² ont généralement des chenaux inactifs et des méandres libres plutôt figés. Sous 35 W/m², les

rivières sont incapables d'auto-ajustement en réponse à des aménagements ou à des contraintes extérieures. Il faut des puissances à plein bord supérieures à 50 W/m² pour voir apparaître une réelle dynamique des chenaux et une capacité d'auto-ajustement. Lorsque la puissance spécifique augmente encore, on passe alors à d'autres systèmes fluviaux comme le tressage voire l'organisation en *step-pool* lorsque ω dépasse 200 W/m². Il convient de noter que la taille des sédiments qui composent le lit des rivières peut faire bouger ces limites théoriques (Petit *et al.*, 2007).

Les puissances spécifiques à plein bord ont été calculées pour les 28 stations et sont dans l'ensemble assez faibles (Figure 46). Parmi les stations naturelles, seuls cinq cours d'eau normands ont une puissance à plein bord supérieure à 15 W/m² et peuvent donc être réellement considérés comme ayant un chenal actif. La Corbie et le Sébec sont potentiellement les plus actifs avec des puissances supérieures à 45 W/m². Toutes les autres stations ont des puissances à plein bord très faibles particulièrement en Champagne et parmi les fleuves côtiers haut-normands. Sur le court-terme, l'auto-ajustement de ces tronçons de cours d'eau semble pratiquement impossible. Ils s'écoulent donc dans des lits qui n'évoluent quasiment pas.

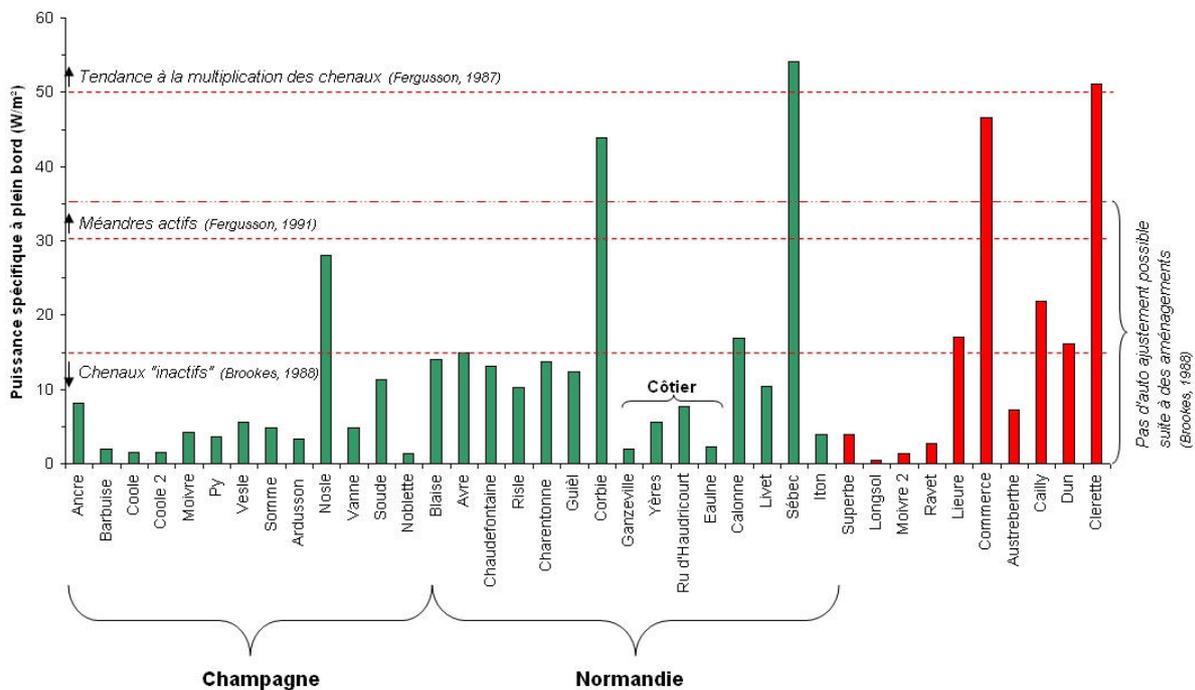


Figure 46 : Puissances spécifiques à plein bord des 39 stations étudiées.

Les stations dégradées champenoises ne se distinguent pas réellement des stations naturelles. Par contre, en Normandie, l'aménagement des lits a conduit à une augmentation de la puissance au plein bord ce qui se conçoit aisément puisqu'on a vu que, suite aux aménagements, le débit plein bord a, dans l'ensemble, été augmenté sans réel élargissement du chenal. Toutefois, seuls le Commerce et la Clérétte ont théoriquement des puissances suffisamment importantes pour pouvoir réellement refaçonner leur lit.

2.5 Distinction entre situations naturelles et altérées sur la base de critères physiques

2.5.1 Démarche

Cette partie reprend des éléments présentés dans le chapitre précédent. Son objectif est de déterminer sur des bases statistiques dans quelle mesure les caractéristiques morphologiques (et de substrat) des cours d'eau dégradés sont différentes de celles des cours d'eau considérés comme naturels. Il s'agit, en d'autres termes, de déterminer s'il est possible de distinguer les sites naturels des sites dégradés sur la base de leurs caractéristiques physiques.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons mis en œuvre une démarche reposant sur trois étapes successives.

La première étape consiste à établir, pour les sites naturels, des relations statistiques entre les variables décrivant la morphologie et le substrat, d'une part, et, d'autre part, un ensemble de variables choisies pour rendre compte des facteurs de contrôle globaux. Nous avons sélectionné a priori 4 variables susceptibles de rendre compte de ces facteurs de contrôle (1) la surface de bassin versant amont (SBV), (2) une variable catégorielle régionale (REG) (distinction entre l'est – "la Champagne" - et l'ouest – "la Normandie"-) et deux variables décrivant le comportement hydrologique des systèmes étudiés, (3) le BFI et (4) le ratio entre le débit de pointe de retour 2 ans et le module (QIXA2/QA).

Comme dans les parties précédentes, la surface de bassin versant amont (SBV) est utilisée comme indicateur de la taille du système. L'ensemble des sites étudiés sont situés sur substrat géologique crayeux, mais il existe néanmoins des différences sensibles entre l'est et l'ouest de la zone d'étude. La partie normande se caractérise en effet par une couverture limoneuse importante et la présence systématique de nodules de silex piégés dans la craie. Nous avons vu précédemment que ces caractéristiques, que l'on ne retrouve pas avec la même ampleur dans la partie est, sont susceptibles d'influer fortement sur la composition du substrat du cours d'eau mais aussi, plus largement, sur sa morphologie. C'est pour cette raison que la variable REG a été intégrée. Les deux variables hydrologiques rendent compte de phénomènes sensiblement différents : le BFI est un indicateur de l'importance de l'alimentation souterraine tout au long de l'année, alors que le ratio QIXA2/QA constitue un indicateur de l'ampleur des phénomènes de crues. Sur les 27 stations naturelles étudiées ici⁷, on constate qu'il existe un lien étroit entre ces deux variables ($r = -0.83$) ce qui nous a conduit à n'en retenir qu'une seule dans la suite de la démarche. Considérant que les crues constituent potentiellement un élément de contrôle important de la morphologie des cours d'eau, c'est la variable QIXA2/QA qui a été retenue ; elle est en outre plus facilement accessible (données figurant sur la fiche de synthèse des stations hydrométriques de la banque HYDRO). A l'échelle de la région étudiée, on constate que les valeurs de QIXA2/QA les plus élevées (et les valeurs de BFI les plus faibles) s'observent au sud de la Normandie, zone où la couche géologique crayeuse est la moins épaisse.

⁷ Une station considérée initialement comme naturelle, le Sébec, a été écartée de l'analyse pour les raisons exposées plus tôt (aval immédiat d'un secteur fortement aménagé).

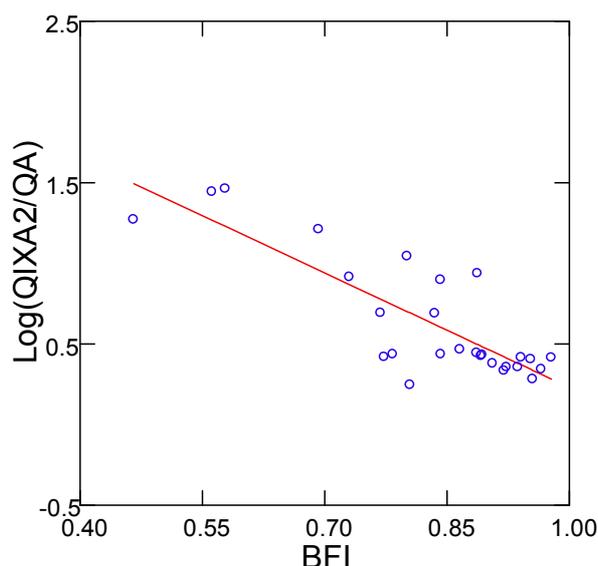


Figure 47 : Variation du ratio $QIXA2/QA$ en fonction du BFI. La droite rouge donne la tendance de la relation obtenue par régression linéaire.

Les variables descriptives du substrat et de la morphologie utilisées par la suite sont les suivantes :

- le diamètre médian du substrat observé sur radier (D50)
- le débit de plein bord Q_{pb}
- la largeur moyenne en eau à plein bord (L)
- la hauteur d'eau moyenne à plein bord (H)
- le ratio largeur profondeur (L/H)
- la profondeur moyenne des mouilles (Pmouille)
- le coefficient de variation de la hauteur d'eau moyenne par transect à bas débit (CV_Hmoy)
- le coefficient de variation du nombre de Froude par transect à bas débit (CV_Froude)

Nous avons établi des modèles de régressions linéaires exprimant chacune des 8 variables morphologiques ci-dessus en fonction des 3 variables indépendantes évoquées précédemment (SBV, REG, $QIXA2/QA$). Une procédure pas à pas est appliquée de façon à ne retenir dans les modèles que les variables ayant un effet significatif.

Au final, ces modèles permettent donc d'estimer les valeurs des 8 variables attendues en situation de référence compte tenu des conditions environnementales globales décrites par les 3 variables suivantes : SBV, REG et $QIXA2/QA$.

La seconde étape consiste à déterminer, pour chacune des 8 variables morphologiques, dans quelle mesure les valeurs observées sur les sites dégradés⁸ sont significativement différentes de celles observées sur les sites naturels. Pour ce faire, pour chaque variable morphologique et pour l'ensemble des stations (naturelles et dégradées) nous avons calculé l'écart entre la valeur prédite par le modèle de référence et la valeur réellement observée sur la station. Dans le cas des sites naturels qui ont servi à caler les modèles, les écarts valeurs observées / valeurs prédites (résidus du modèle) se distribuent autour de la valeur 0 (c'est-à-dire qu'en moyenne, la valeur prédite par le modèle est égale à la valeur observée sur la station). Si l'altération a un effet sur la variable morphologique considérée, la distribution des écarts valeur observée / valeur calculée sur les sites dégradés devrait donc être différente de la distribution observée

⁸ Deux stations dégradées ont été écartées à ce stade de l'analyse : le Fion, en raison de l'absence de certains descripteurs morphologiques et le Longsol en raison de l'impossibilité d'évaluer correctement le débit de plein bord (voir point 2.3.1.).

pour les sites naturels. Pour chaque variable, nous avons mis en œuvre des analyses de variance pour évaluer si les écarts entre valeurs observées et valeurs prédites différaient significativement entre stations naturelles et stations dégradées.

Cette seconde étape permet d'identifier les descripteurs morphologiques pour lesquels les valeurs observées sur les sites dégradés s'écartent de celles observées sur les sites naturels. D'une manière générale, les résultats qui sont présentés par la suite montrent que si certaines variables prises individuellement présentent des différences entre sites naturels et altérés, ces différences se marquent de manière globale mais qu'il existe une gamme de valeurs plus ou moins étendue de chevauchement entre les deux groupes de sites ne permettant pas de les distinguer de manière non ambiguë sur la base d'une seule variable. C'est à partir de ce constat qu'une **troisième étape** a été mise en œuvre, dans l'optique de déterminer si la prise en compte conjointe de plusieurs variables morphologiques permettait d'améliorer la distinction entre sites naturels et dégradés. Comme dans l'étape précédente, cette étape se base sur les écarts valeurs observées / valeurs prédites par les modèles de référence pour les 8 descripteurs morphologiques. Ces variables sont soumises à une analyse discriminante visant à optimiser la distinction entre sites dégradés et naturels. Sans entrer dans les détails méthodologiques, l'analyse discriminante définit une combinaison linéaire des variables initiales qui maximise la distinction entre les deux groupes de stations. Cette analyse est couplée à une procédure de sélection pas à pas des variables de manière à réduire au minimum le nombre de variables incluses dans l'analyse. Ainsi, au final, une variable n'est intégrée que si elle permet d'améliorer de manière significative la discrimination entre les 2 groupes de stations.

2.5.2 Résultats

2.5.2.1 *Etape 1 : modèles pour les sites de référence*

Les résultats des régressions linéaires entre variables morphologique et variables explicatives sont résumés dans le tableau 14. Ils confirment largement les résultats exposés dans les parties 3.2. et 3.3. Chacune des 8 variables morphologiques est significativement liée à au moins une des 3 variables indépendantes SBV, REG et QIXA2/QA.

Tableau 14 : Résumé des régressions linéaires multiples des 8 variables morphologiques en fonction de SBV, REG et QIXA2/QA. * : variable préalablement transformée en Log10 avant analyse.

| | r ² | Constante | | SBV * | | REG | | QIXA2/QA * | |
|-------------------|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|
| | | Coeff | p | Coeff | p | Coeff | p | Coeff | p |
| D50 * | 0,268 | 0,887 | 0,000 | | | 0,540 | 0,006 | | |
| Qpb * | 0,640 | -1,155 | 0,000 | 0,685 | 0,000 | | | 0,369 | 0,013 |
| L * | 0,737 | 0,405 | 0,000 | 0,260 | 0,000 | 0,111 | 0,002 | | |
| H * | 0,317 | -0,543 | 0,000 | 0,186 | 0,002 | | | | |
| H/L | 0,165 | 12,774 | 0,000 | | | 5,145 | 0,036 | | |
| Pmouille * | 0,155 | -0,934 | 0,000 | 0,170 | 0,042 | | | | |
| CV_Hmoy | 0,274 | 0,163 | 0,000 | | | | | 0,147 | 0,005 |
| CV_Froude | 0,319 | 0,195 | 0,001 | | | | | 0,239 | 0,002 |

La granulométrie, vue à travers le D50, montre essentiellement des variations régionales, le substrat étant globalement plus grossier sur les stations normandes, en lien probable avec la présence de silex (Fig 48). La part de variation expliquée par le modèle reste néanmoins

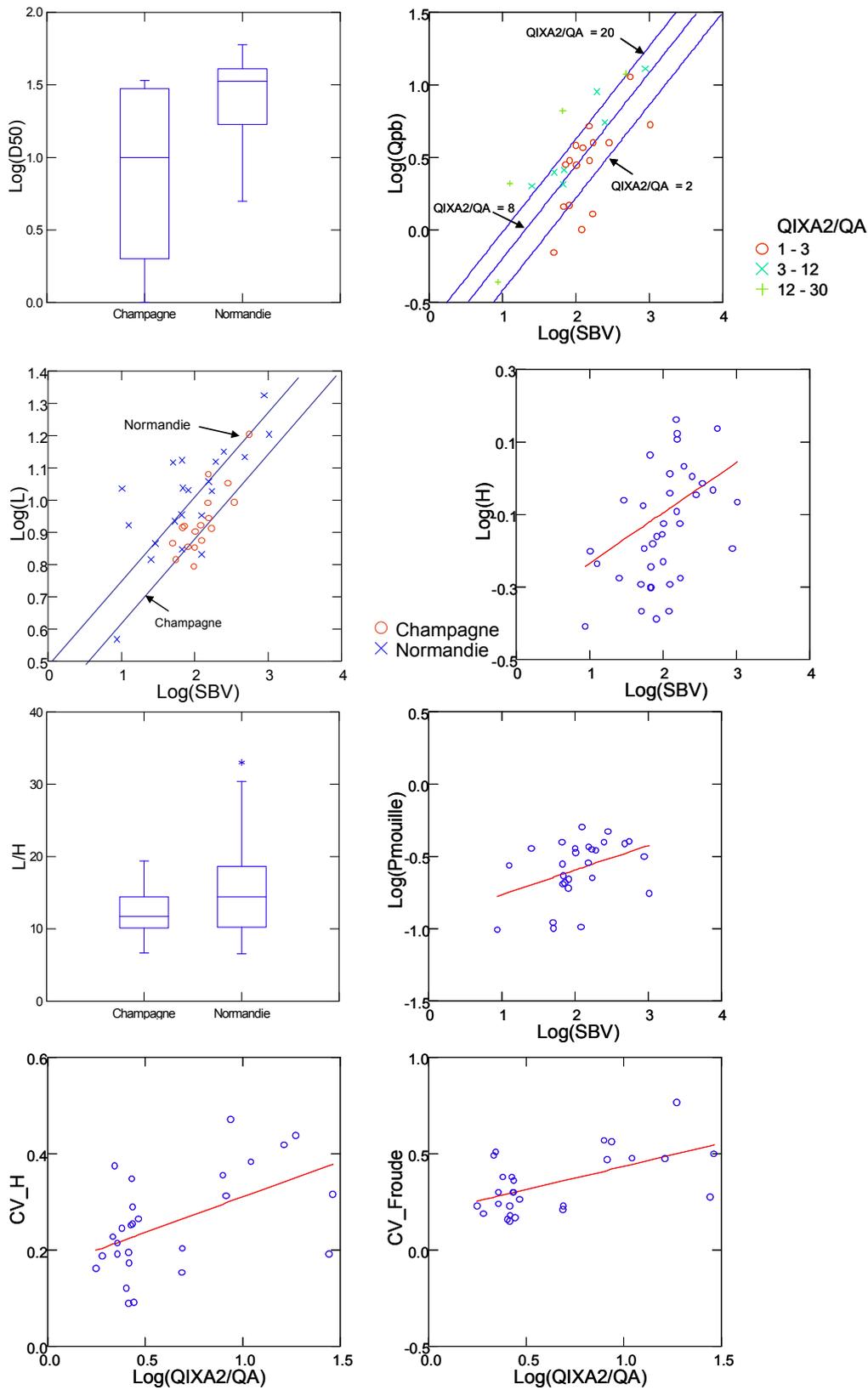


Figure 48 : Variations des différentes variables morphologiques en fonction des variables retenues dans les modèles de régression. Les droites donnent les tendances obtenues dans les modèles de régression linéaire.

modeste ($r^2 = 0,268$) témoignant d'une importante variation inter-stationnelle à l'intérieur de chaque région.

Conformément aux résultats précédents, le débit de plein bord augmente avec la surface du bassin versant. Le modèle inclut également la variable QIXA2/QA ce qui indique qu'à surface de bassin équivalente, les cours d'eau présentant des régimes hydrologiques caractérisés par des crues peu contrastées ont, en moyenne, des débits de plein bord plus faibles (Figure 48).

La largeur du cours d'eau évolue également avec la surface du bassin versant. Le terme REG est inclus dans le modèle traduisant le fait qu'à surface de bassin égale les cours d'eau normands tendent à être plus larges.

La hauteur d'eau (H) augmente avec le bassin versant tandis que le ratio L/H varie essentiellement en fonction de la région, les valeurs les plus fortes étant observées pour les cours d'eau normands.

La profondeur des mouilles tend à croître avec la surface de bassin versant. Cette tendance reste néanmoins relativement peu accentuée ($r^2 = 0.155$), une grande variabilité inter-stationnelle étant observée.

Les deux paramètres traduisant la diversité des conditions d'habitat sur la station (CV_Hmoy et CV_Froude), n'évoluent pas de manière significative en fonction de la taille du cours d'eau. En revanche, ils augmentent avec QIXA2/QA. En d'autres termes, ces relations indiquent que les cours d'eau caractérisés par des débits de crue peu contrastés présentent des profondeurs et conditions d'écoulement relativement homogènes à l'échelle du tronçon, et qu'à l'inverse les cours d'eau caractérisés par des épisodes de crues plus marquées présentent une plus grande diversité d'écoulements et de profondeurs.

2.5.2.2 *Etape 2 : Ecart entre situations naturelles et situations altérées, analyses par variables*

Les écarts entre valeurs observées et valeurs prédites par les 8 modèles de référence précédents en fonction du caractère naturel ou dégradé des stations sont représentés à la figure 49. Dans un certain nombre de cas, une fois pris en compte l'effet des 3 variables intégrées dans les modèles de référence, un certain nombre de variables montrent des écarts significatifs entre situations naturelles et altérées. Ainsi, les cours d'eau naturels présentent globalement : un débit de plein bord plus faible, une largeur plus importante, un ratio L/H plus élevé, et des mouilles plus profondes que les cours d'eau altérés par les aménagements. A l'inverse aucune différence n'est perceptible entre les deux types de cours d'eau en ce qui concerne la taille du substrat (D50). Les représentations graphiques tendent à montrer que les cours d'eau naturels présentent également des hauteurs d'eau moins fortes et une variabilité plus importante, à l'échelle du tronçon, des conditions d'écoulement (CV_Froude) et des profondeurs (CV_Hmoy) que les cours d'eau altérés. Ces différences restent néanmoins non significatives d'un point de vue statistique.

Il convient de noter que pour les 4 variables montrant des différences significatives ($p < 0,05$) entre les deux groupes de stations, les gammes de valeurs observées pour les stations naturelles et dégradées restent largement chevauchantes, ce qui ne permet donc pas la distinction des sites altérés sur la base d'une seule variable.

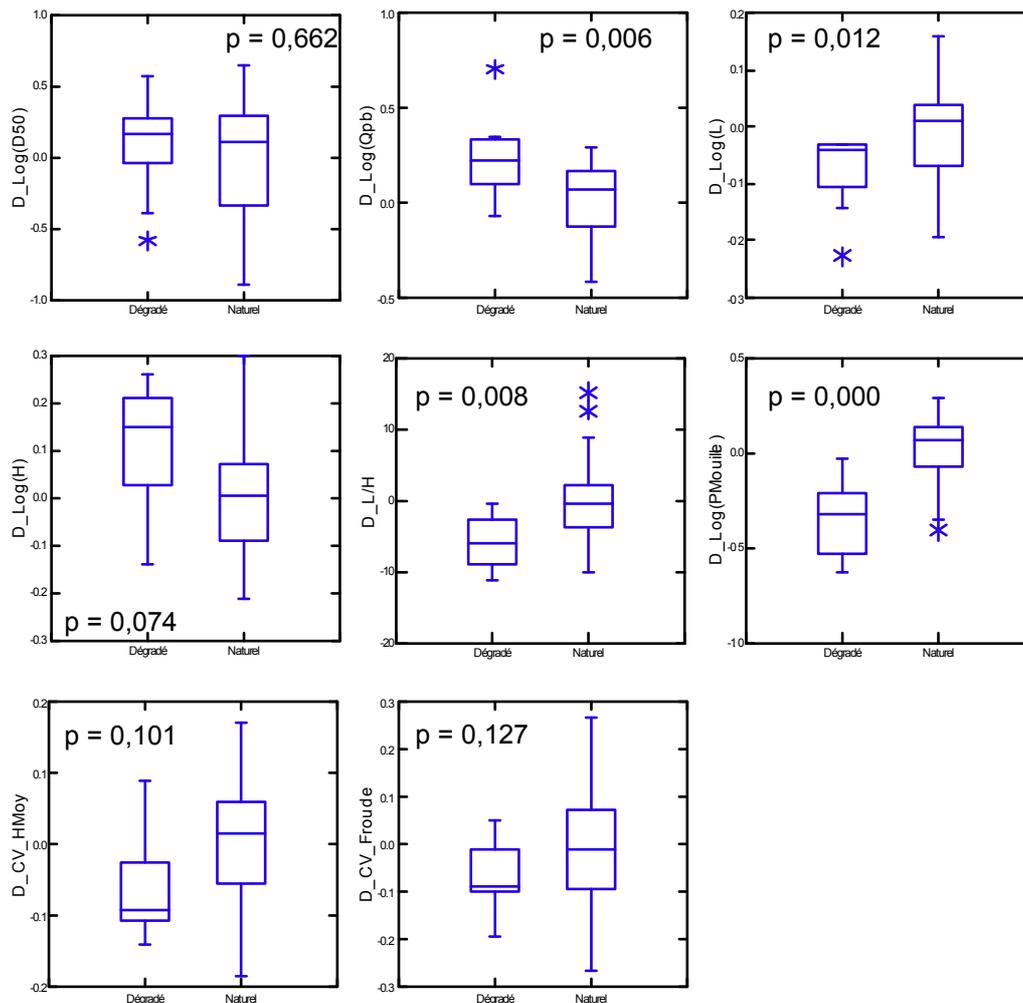


Figure 49 : Différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles de référence⁹ pour les 8 variables morphologiques en fonction du caractère naturel ou dégradé des sites étudiés. Les valeurs de p indiquées correspondent aux valeurs de probabilités associées aux ANOVA testant l'existence d'un éventuel effet "type de station" (naturel vs dégradé).

2.5.2.3 Etape 3 : Analyse discriminante

L'analyse discriminante visant à distinguer les stations naturelles des stations altérées sur la base des différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles de référence aboutit à la sélection de 3 variables : $D_Log(Pmouille)$, $D_Log(Qpb)$ et $D_Log(L)$ (Tableau 14). Elle définit un axe factoriel correspondant à une combinaison linéaire de ces 3 variables qui permet d'optimiser la distinction entre les deux groupes de stations.

Sur cet axe les stations naturelles tendent à présenter des coordonnées négatives tandis que les stations altérées présentent des coordonnées positives. En d'autres termes, les coordonnées des stations altérées sont d'autant plus positives que leurs caractéristiques morphologiques s'écartent de celles des stations naturelles (Figure 50).

⁹ Pour chaque variable, les différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles sont notées sous la forme " D_XXX " XXX correspondant au nom de la variable morphologique considérée.

Tableau 14 : Fonction discriminante issue de l'analyse discriminante visant à distinguer les stations naturelles des stations altérées sur la base des différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles de référence (valeur propre : 2,760 ; corrélation canonique 0,857). Les variables sont indiquées dans l'ordre où elles ont été intégrées dans l'analyse).

| | Coefficient | F ratio | p |
|-----------------|-------------|---------|-------|
| Constante | -0,944 | | |
| R_Log(Pmouille) | -5,235 | 21,957 | 0,000 |
| R_Log(Qpb) | 4,905 | 29,995 | 0,000 |
| R_Log(L) | -8,298 | 29,440 | 0,000 |

Sur le jeu de données étudié, l'analyse discriminante permet de distinguer sans ambiguïté (100% de bonne classification) les stations altérées des naturelles. Ainsi, par rapport aux résultats présentés dans l'étape précédente, la prise en compte conjointe de plusieurs variables morphologiques permet d'améliorer très sensiblement la distinction entre les deux groupes de stations.

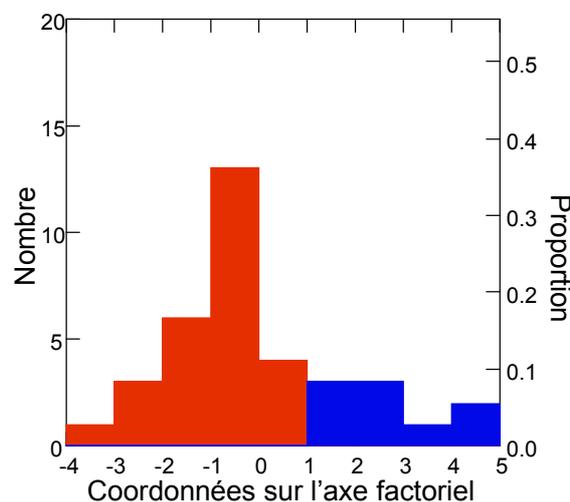


Figure 50 : Distribution des valeurs des coordonnées factorielles définies par l'analyse discriminante pour les différents sites. Les sites naturels apparaissent en rouge et les sites dégradés en bleu.

2.6 Peuplements de poissons

Pour analyser les données piscicoles nous avons eu recours aux outils développés dans le cadre de la mise au point de deux bio-indicateurs basés sur les poissons : l'indice poisson rivière (IPR) normalisé au niveau de l'AFNOR et l'indice poisson européen EFI (European Fish Index), plus récemment développé et applicable à l'échelle européenne, dans le but de comparer les stations altérées aux stations de référence.

Ces deux indicateurs obéissent à des principes de construction très voisins : dans un premier temps, la composition des peuplements en situation de référence est modélisée à partir d'outils statistiques (le calage des modèles est basé sur un jeu de stations de calibration pas ou peu impactées par l'homme sur lesquelles la composition des peuplements piscicoles est connue). Cette étape permet ainsi de prédire en tout point du réseau hydrographique et à partir des

caractéristiques naturelles du cours d'eau la composition du peuplement attendue en l'absence de modifications anthropiques significatives. Dans un deuxième temps, la composition du peuplement observé sur un site donné est comparée à la situation de référence obtenue par modélisation. Les deux indices mesurent de manière plus ou moins directe l'écart entre situation observée et situation de référence, cet écart étant supposé d'autant plus grand que l'impact de l'homme sur le cours d'eau - et donc sur la communauté piscicole qu'il abrite - est important. A souligner que l'IPR et l'EFI sont deux indices multiparamétriques c'est-à-dire qu'à la base, ils sont constitués d'un ensemble de métriques qui décrivent différents aspects de la structure et la composition du peuplement. L'IPR est composé de 7 métriques ; l'EFI en comporte 10 (Tableau 16).

Tableau 16 : liste des métriques intervenant dans le calcul de l'IPR et de l'EFI. Les flèches indiquent le sens attendu de variation de chaque métrique avec l'augmentation des pressions anthropiques.

| IPR | | EFI | |
|-------------------------------------|--------|---|---|
| 1- Nombre total d'espèces | ↗ ou ↘ | 1- Densité d'espèces insectivores | ↘ |
| 2- Nombre d'espèces rhéophiles | ↘ | 2- Densité d'espèces omnivores | ↗ |
| 3- Nombre d'espèces lithophiles | ↘ | 3- Densité d'espèces phytophiles | ↗ |
| 4- Densité d'individus tolérants | ↗ | 4- Abondance relative des espèces lithophiles | ↘ |
| 5- Densité d'individus invertivores | ↘ | 5- Nombre d'espèces benthiques | ↘ |
| 6- Densité d'individus omnivores | ↗ | 6- Nombre d'espèces rhéophiles | ↘ |
| 7- Densité totale d'individus | ↗ ou ↘ | 7- Nombre relatif d'espèces intolérantes | ↘ |
| | | 8- Nombre relatif d'espèces tolérantes | ↗ |
| | | 9- Nombre d'espèces diadromes | ↘ |
| | | 10- Nombre d'espèces potamodromes | ↘ |

A souligner que par construction l'IPR peut varier théoriquement entre 0 et l'infini¹⁰, la note de 0 correspondant à une conformité parfaite à la référence, tandis que l'EFI varie de 0 à 1, la note de 1 correspondant à une conformité parfaite à la référence

Deux stations ont été écartées des résultats présentés par la suite :

- le Fion à Aulnay-l'Aître (station dégradée), l'ensemble des variables environnementales nécessaires au calcul des 2 indices n'étant pas disponibles à ce stade
- la Coole à Ecury (station considérée comme naturelle), le résultat de la pêche ayant révélé une situation très dégradée du peuplement en place (très forte abondance de la loche franche - espèce tolérante - et absence complète de certaines espèces sensibles comme le chabot ou la truite) indiquant très probablement l'existence d'une source d'altération importante (problème de qualité d'eau, de toxiques ?) non identifiée a priori.

L'examen des valeurs d'indices en fonction du contexte des stations (naturelles vs altérées) appelle un certain nombre de remarques (Figure 51). De manière globale, les stations dégradées tendent à avoir des valeurs IPR plus fortes et des valeurs d'EFI plus faibles que les stations naturelles ce qui confirme que les altérations physiques des cours d'eau se traduisent, au moins dans certains cas, par une modification des peuplements détectable par les indices biologiques classiquement utilisés. Cette différence ne peut toutefois pas être testée statistiquement en raison du faible nombre d'observations considérées. Cependant cette tendance générale n'est pas systématique. Ainsi, la moitié des stations dégradées présente des

¹⁰ Dans la pratique l'IPR dépasse rarement une valeur de 100 y compris dans les situations les plus dégradées.

valeurs d'indice tout à fait comparables à celles observées sur les stations naturelles ce qui tend à prouver que dans certains cas, les altérations physiques des cours d'eau ne s'accompagnent pas de modifications fortes au niveau des peuplements de poissons (ou au moins au niveau des métriques impliquées dans le calcul des indices).

Il est important de noter également qu'il n'existe pas de concordance systématique entre les valeurs d'IPR et d'EFI notamment pour les stations altérées. Ainsi dans certains cas une valeur élevée d'IPR semble indiquer une dégradation du peuplement mais ne se retrouve pas au niveau du score d'EFI, la situation inverse pouvant également se présenter.

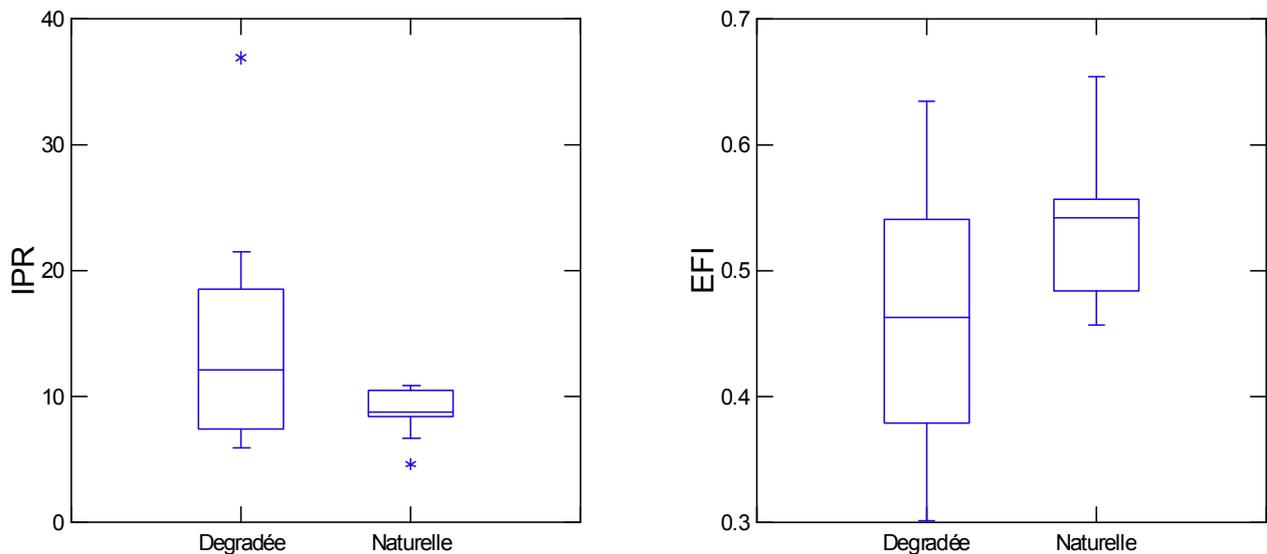


Figure 51 : Distributions des valeurs d'IPR et d'EFI pour les stations naturelles et dégradées.

L'examen des valeurs des différentes métriques des deux indices en fonctions du caractère dégradés ou non de la station ne montre pas de différences très tranchées (Figure 52 et 53). Graphiquement, les différences qui apparaissent les plus marquées concernent la métrique "densité d'individus invertivores" de l'EFI. Cette observation est confirmée par une analyse discriminante visant à distinguer les deux groupes de stations, réalisée sur le tableau de scores des métriques des deux indices et dans laquelle seule une variable, la métrique "densité d'espèces insectivores", est intégrée par la procédure de sélection pas à pas (valeur propre : 0,370 ; corrélation canonique : 0,520 ; probabilité associée à l'analyse : 0,027). La capacité de l'analyse discriminante à distinguer les deux groupes de stations reste faible (67 % de bonne classification) du fait notamment que la dégradation morphologique ne se traduit pas toujours au niveau des valeurs de la métrique "densité d'espèces insectivores" (ou plus largement au niveau d'autres métriques).

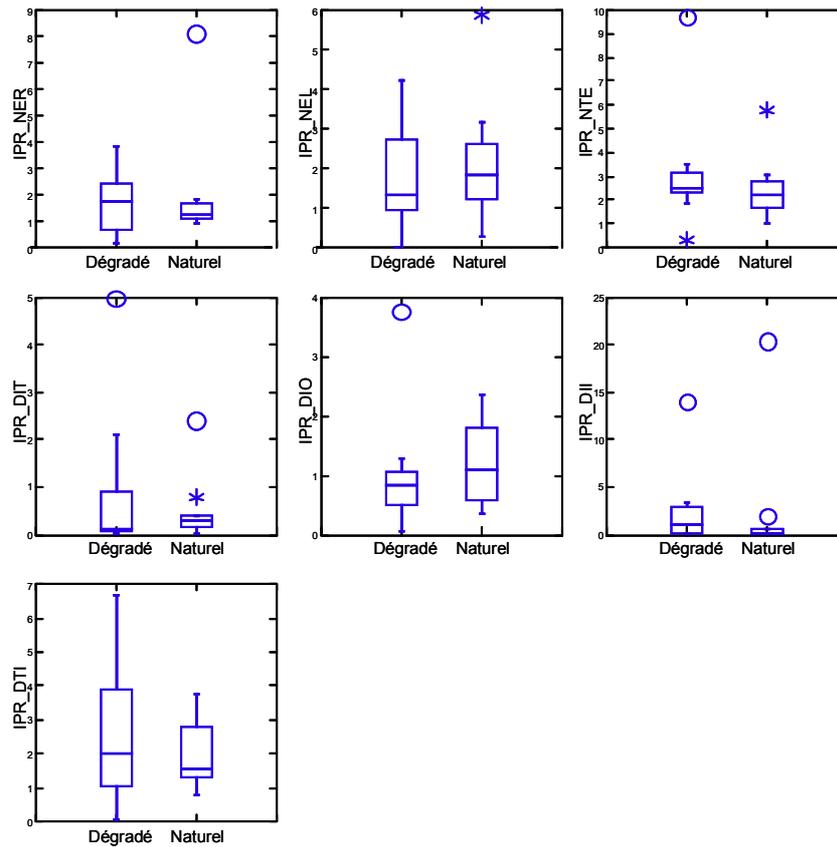


Figure 52 : Distribution des valeurs des 7 métriques de l'IPR en fonction du caractère naturel ou dégradé des stations.

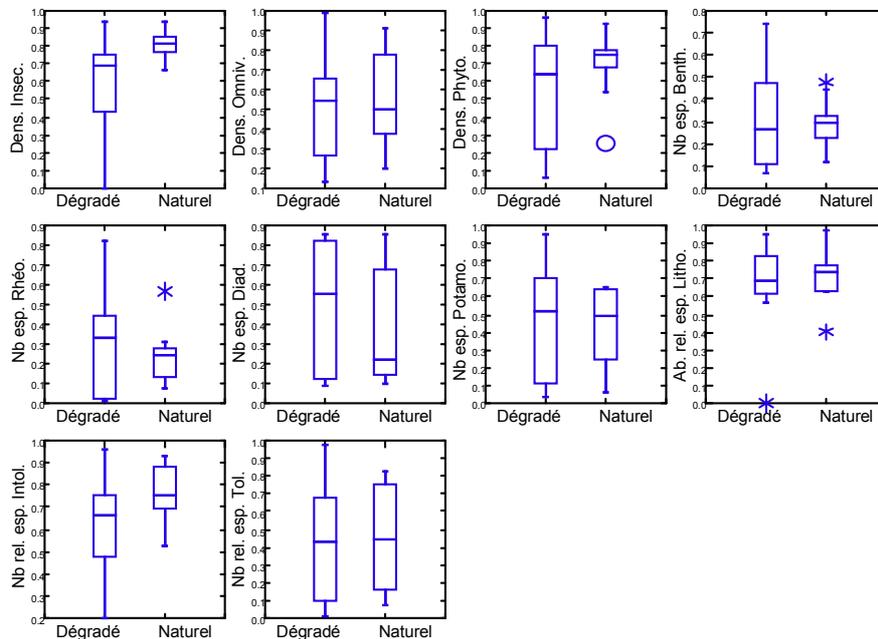


Figure 53 : Distribution des valeurs des 10 métriques de l'EFI en fonction du caractère naturel ou dégradé des stations.

Une question essentielle soulevée par ces premiers résultats concerne l'existence d'un lien entre ampleur des dégradations physiques et ampleur des altérations au niveau des peuplements ; en d'autres termes, les stations pour lesquelles les modifications

morphologiques apparaissent les plus grandes correspondent-elles aux situations pour lesquelles les altérations sont les plus fortes au niveau du peuplement piscicole ?

Pour répondre à cette interrogation, nous avons mis en relation les scores d'indice IPR ou EFI d'une part, et les coordonnées factorielles des stations obtenues dans l'analyse discriminante menée sur les variables morphologiques évoquée au point 2.5.2.3.¹¹. Cette analyse n'a pu être menée que sur un nombre restreint de sites (n=16) pour lesquels nous disposions d'une valeur d'indices poisson et dont la prise de données morphologiques était suffisante pour les inclure dans l'analyse discriminante. Les tendances observées sont conformes aux résultats attendus à savoir une augmentation des valeurs d'IPR et une diminution des valeurs d'EFI quand les coordonnées factorielles de l'analyse discriminante augmentent. Cependant ces tendances restent ténues et non significatives d'un point de vue statistique. On constate notamment que les fortes valeurs de coordonnées factorielles ne s'accompagnent pas toujours de fortes valeurs d'IPR ou de faibles valeurs d'EFI, en d'autre terme, les milieux présentant les altérations morphologiques les plus marquées ne sont pas toujours ceux qui présentent les peuplements piscicoles les plus altérés.

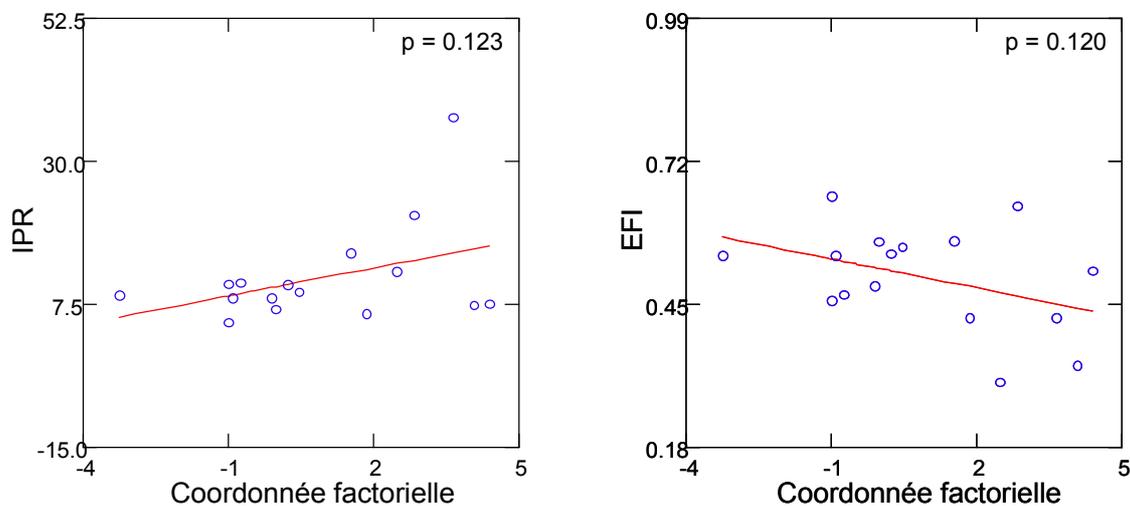


Figure 54 : Variations des valeurs d'IPR et d'EFI en fonction des coordonnées factorielles obtenues par l'analyse discriminante menée sur les variables morphologiques. Les droites correspondent aux tendances obtenues grâce à des modèles par régression linéaire. Les valeurs de p correspondent aux valeurs de probabilité associées à ces régressions.

Globalement les résultats obtenus ci-dessus montrent que la dégradation morphologique des cours d'eau peut s'accompagner d'altérations au niveau des peuplements mais (1) ces altérations restent en général relativement modérées (mis à part un cas [situation jugée très mauvaise par l'IPR] les classes de qualité associées aux valeurs d'indice poissons observées correspondent à une situation considérée au pire comme médiocre) et (2) elles n'apparaissent pas systématiques, certaines situations fortement dégradées sur le plan de la morphologie conservant des valeurs d'indice poissons satisfaisantes. A ce stade, il convient de rester prudent vis-à-vis de ces résultats et de leur possibilité de généralisation en raison d'une part du nombre relativement faible de stations sur lesquelles nous avons pu travailler et d'autre part du fait que notre zone d'étude concerne un type de cours d'eau relativement particulier et que nous n'avons abordé qu'un certain type de dégradation de l'hydromorphologie (rectification du lit). Néanmoins, dans une certaine mesure, ce constat concorde avec des résultats obtenus

¹¹ Pour mémoire, cette analyse aboutissait à la définition d'un axe permettant de maximiser la distinction entre stations naturelles et stations dégradées, des stations dégradées, présentant des coordonnées d'autant plus positives que leurs caractéristiques morphologiques s'écartent de celles des stations naturelles.

précédemment qui concluent que les bioindicateurs poissons (et notamment l'EFI) répondent plus efficacement aux altérations de la qualité d'eau qu'aux dégradations physiques des cours d'eau (Schmutz et al. 2007).

Différents éléments nous semblent pouvoir expliquer la relative faiblesse des réponses biologiques observées dans le cas présent :

- 1- **le contexte général des sites d'étude.** La sélection des sites étudiés a été réalisée avant tout en fonction des caractéristiques morphologiques du cours d'eau considérées à une échelle relativement locale. Ainsi une station considérée comme naturelle peut être environnée de secteurs ayant subi des transformations morphologiques évidentes ; à l'inverse une station dégradée peut se situer sur un tronçon modifié morphologiquement sur une longueur relativement restreinte mais située dans un contexte plus large globalement bien préservé. De telles situations tendent bien entendu à réduire les différences biologiques entre les sites naturels et altérés et ce d'autant plus chez les poissons qu'il s'agit d'organismes présentant des fortes capacités de déplacement. Dans le même registre l'effet des altérations morphologiques sur les communautés de poissons est susceptible d'être masqué par des phénomènes de colonisation à partir de milieux connectés proches et notamment de grand cours d'eau. C'est ce qui semble se produire sur le site d'étude situé sur la Superbe qui abrite une communauté de poissons particulièrement riche dont une partie des espèces pourrait provenir de l'Aube située à proximité immédiate. Ainsi on peut penser que des organismes moins mobiles que les poissons comme les macroinvertébrés seraient susceptibles de montrer des différences entre sites naturels et altérés beaucoup plus marquées.
- 2- **les descripteurs poissons utilisés.** Nous avons opté pour analyser le compartiment peuplement piscicole via les outils et modèles développés dans le cadre des indices poissons français et européen. Ce choix a été notamment dicté par la possibilité offerte par ces outils de s'affranchir, au moins pour partie, de la variabilité naturelle des peuplements, cet enjeu étant d'autant plus fort que nous travaillions sur un nombre très réduit de sites présentant a priori des différences marquées au niveau des peuplements dont une part importante pouvait provenir de facteurs de contrôle naturels. Ainsi, même si les métriques utilisées balaient un large éventail de la diversité fonctionnelle des peuplements, il est possible que d'autres caractéristiques des peuplements, non prises en compte ici, répondent mieux aux types d'altérations morphologiques appréhendés dans la présente étude. Aborder efficacement l'impact sur d'autres caractéristiques des peuplements nécessiterait de travailler sur un volume beaucoup plus important de données de manière à pouvoir distinguer les impacts anthropiques de l'effet des facteurs de contrôle naturels.
- 3- **la nature des cours d'eau étudiés.** Notre travail se limite à ce stade aux cours d'eau de la craie qui sont des cours d'eau assez particuliers du point de vue de leur fonctionnement et de leur morphologie. Naturellement, ces cours d'eau présentent une morphologie apparaissant relativement homogène en comparaison de cours d'eau coulant sur d'autres substrats géologiques. Dans ce contexte, il est possible que les effets biologiques des aménagements physiques soient moindres sur ce type de cours d'eau.
- 4- **un effet d'atténuation de la végétation rivulaire et aquatique.** L'information sur la présence de végétation aquatique, de débris ligneux dans le cours d'eau, et de végétation rivulaire a été recueillie sur les différents sites étudiés. L'influence de ces structures sur le compartiment piscicole n'a pas été examinée en détail du fait notamment du faible nombre de sites concernés. Ces structures végétales sont susceptibles d'influer fortement sur les poissons dans la mesure où ils jouent un rôle de

ressources alimentaires directes ou indirectes (invertébrés), d'abris, et contribuent à diversifier les conditions d'habitat. Le maintien (ou le développement) de végétation aquatique et rivulaire est donc susceptible d'atténuer les effets des dégradations morphologiques sur les peuplements de poissons. Cette question est d'autant plus aigüe sur nos sites d'études que les cours d'eau de la craie sont connus pour abriter une forte abondance de végétation aquatique y compris dans les cas où la rivière a été transformée sur le plan morphologique. Cette situation semble se présenter sur certains des sites étudiés comme par exemple le Cailly ou la Lieure, fortement dégradés du point de vue morphologique mais qui conservent (1) une granulométrie non colmatée et (2) une abondante végétation aquatique et/ou des abris importants liés à la végétation rivulaire qui abritent des populations de truites et de chabots (espèces caractéristiques de ce type de cours d'eau) abondantes et équilibrées et par conséquent présentent des valeurs d'indices poissons satisfaisantes.

- 5- **l'influence possible de l'âge des aménagements.** Un certain nombre de travaux tendent à prouver que l'impact d'un aménagement physique sur les communautés vivantes en place se réduit au cours du temps. Un tel phénomène peut influencer nos résultats dans la mesure où certains sites étudiés sont le fruit d'aménagements très anciens, les riverains n'ayant plus la mémoire des travaux responsables des transformations morphologiques. Nous n'avons pas testé ce lien possible entre ampleur des altérations des peuplements et âge des aménagements physiques faute de données de datation des aménagements réalisés sur nos sites d'étude.

Conclusions et perspectives après la 1ère phase

Après un peu plus de deux années de travail, la première phase de cette étude est aujourd'hui terminée. En se focalisant sur une région géologiquement et hydrologiquement homogène, l'auréole Crétacé supérieur du bassin parisien, ce projet avait trois principaux objectifs :

- en se basant sur des variables de réponse calculées à l'échelle du tronçon (le débit plein bord, les relations de géométrie hydraulique et le substrat), définir les caractéristiques morphologiques des cours d'eau en situation "naturelle" (c'est-à-dire peu influencée par l'action de l'homme) et examiner dans quelle mesure ces caractéristiques obéissent à des modèles régionaux ou, au contraire, dépendent de contraintes locales.
- Dans un second temps, à partir de l'étude de situations altérées, ce projet cherchait à évaluer les modifications des caractéristiques physiques des cours d'eau induites par les aménagements anthropiques (rectification de tracé et recalibrage) en comparaison avec les situations de référence définies précédemment.
- Le troisième volet de ce projet cherchait à déterminer de quelle manière les altérations physiques des cours d'eau s'accompagnent ou non de modifications au niveau de communautés biologiques (principalement les populations piscicoles).

Pour pouvoir atteindre ces trois principaux objectifs, il est rapidement apparu qu'un effort particulier devait également être réalisé sur l'aspect hydrologie. Etant donné le rôle important joué par les écoulements souterrains sur les bassins étudiés, une analyse approfondie des variables hydrologiques a été entreprise en collaboration avec E. Sauquet et C. Catalogne du Cemagref de Lyon. Cette analyse a mis en évidence une certaine diversité au sein de la région que nous espérions a priori pouvoir considérer comme homogène. Au final, les variables les plus discriminantes (BFI, QIXA2/QA) ont été isolées.

Au terme de cette première phase, un total de 39 stations (28 naturelles et 11 altérées) ont été étudiées. Un protocole de terrain a été défini et testé. Il a permis la collecte d'un grand nombre de données sur la morphologie, l'hydraulique, l'hydrologie et la composition du substrat des stations. Les caractéristiques morphologiques des cours d'eau étudiés ont alors pu être déterminées. Huit variables morphologiques ont été considérées : le diamètre médian du substrat, le débit plein bord, la largeur à plein bord, la hauteur à plein bord, le rapport hauteur/largeur, la profondeur des mouilles, le coefficient de variation de la hauteur moyenne à bas débit et le coefficient de variation du nombre de Froude.

A partir de celle-ci, des modèles régionaux applicables à la zone Crétacé supérieur du Bassin parisien ont clairement été mis en évidence. Ainsi chacune des 8 variables morphologiques est significativement liée à au moins une des 3 variables indépendantes utilisées pour la construction des modèles, la surface du bassin versant, la région (Normandie/Champagne) et

l'hydrologie (à travers le rapport QIXA2/QA). En fonction des variables considérées, des sous-régions semblent également se dessiner sans toutefois remettre en cause le modèle général.

Lorsqu'on compare les stations altérées avec les modèles de référence on observe des situations différentes en fonction des variables considérées. Si la largeur, le débit à plein bord, le rapport hauteur/largeur et la profondeur des mouilles permettent, dans la majorité des cas, de faire la distinction entre station naturelle et station altérée, les autres variables sont moins discriminantes. Au final il apparaît que les stations altérées ont en moyenne des débits plein bord plus importants, un chenal moins large et des mouilles moins marquées. Il convient toutefois de noter que pour ces quatre variables, apparemment discriminantes, l'écart entre altéré et naturel n'est pas net : les gammes de valeurs restent largement chevauchantes entre les deux groupes. Une distinction précise des sites altérés sur la base d'une seule variable n'est dès lors pas possible.

Par contre, lorsque la profondeur des mouilles, le débit plein bord et la largeur sont prises en compte conjointement, les stations altérées peuvent être isolées très clairement des stations naturelles. En considérant ces trois variables, la totalité des sites altérés se distinguent des sites naturels.

Malgré un nombre restreint de stations pour lesquelles nous disposons de données piscicoles, l'examen des indices poissons français et européen confirme que les altérations physiques des cours d'eau se traduisent, au moins dans certains cas, par une modification des peuplements. Globalement on observe que les stations s'écartant le plus du modèle d'un point de vue physique ont les moins bonnes notes d'indices poissons. Cette constatation doit toutefois être nuancée car il ne s'agit que d'une tendance non significative au point de vue statistique. La moitié des stations dégradées présente en effet des valeurs d'indice tout à fait comparable à celles observées sur les stations naturelles, indiquant que dans ce cas, les altérations physiques ne s'accompagnent pas de fortes modifications au niveau des peuplements de poissons.

Au final, on observe une relative faiblesse des réponses biologiques qui peut sans doute s'expliquer par le contexte général des sites d'étude (altération locale), les descripteurs poissons utilisés, la nature des cours d'eau étudiés, un effet d'atténuation dû à la végétation rivulaire et aquatique et l'influence possible de l'âge des aménagements.

Au terme de ce travail, les résultats obtenus nous apparaissent intéressants et prometteurs. Ils interdisent malheureusement la mise au point d'abaques permettant une identification rapide des situations altérées à partir d'un paramètre morphologique comme la largeur ou même le débit plein bord. Mais ils semblent autoriser la mise en place d'une sorte d'indice d'altération basé sur une combinaison de paramètres morphologiques (vers un "indice hydromorphologique" ?). Moyennant la prise en compte de plusieurs caractéristiques-clés de la morphologie (ici la largeur, le débit plein bord et la profondeur des mouilles), il devrait être possible de déterminer si tel ou tel tronçon de cours d'eau nécessite, d'un point de vue physique, une restauration de son cours.

Ces observations ne s'appliquent pour l'instant qu'à un nombre limité de cours d'eau du bassin de la Seine (rivières de la craie). La seconde phase de l'étude aura pour but d'étendre notre recherche à l'ensemble du bassin. Il sera important de déterminer dans quelle mesure

- les modèles construits durant la phase 1 sont transposables aux autres régions,

- les variables mises en évidence sont également pertinentes dans d'autres types de cours d'eau
- la distinction entre cours d'eau naturels et altérés est possible sur la base des trois mêmes variables, la largeur, le débit plein bord et la profondeur des mouilles. Ailleurs, la profondeur moyenne ou le substrat joueront peut-être un rôle plus important.

Après cette première phase, le lien entre altération physique et état écologique n'est malheureusement toujours pas évident. Pour différentes raisons, notamment le nombre restreint de données, nous ne pouvons que pointer une tendance montrant une relation de cause à effet entre altération physique et populations piscicoles. La phase II de l'étude permettra d'enrichir le jeu de données et les traitements sur les populations piscicoles. En travaillant sur un plus grand nombre de sites une tendance plus nette devrait se dessiner. Une autre piste envisagée durant cette première phase mais qui n'a pu être mise en œuvre jusqu'ici faute de données disponibles, devrait également permettre d'enrichir nos résultats : il serait intéressant d'étendre notre analyse à d'autres compartiments biologiques comme celui des macroinvertébrés. Moins mobiles que les poissons, ces organismes sont certainement un meilleur indicateur des conditions locales et seraient susceptibles de montrer des différences entre sites naturels et altérés beaucoup plus marquées, surtout lorsque les altérations de cours d'eau ne se font ressentir que sur de courts linéaires.

Bibliographie

- Acornley, R.M., Sear, D.A. 1999. Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes*, **13**, 447-458.
- Arrignon, J. 1972. Zonation piscicole de quelques cours d'eau normands. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **18**, 1135-1146.
- Baume, J.-P., Poirson, M. 1984. Modélisation numérique d'un écoulement permanent dans un réseau hydraulique maillé à surface libre, en régime fluvial. *La Houille Blanche*, t1/2, 95-100
- Belliard, J. 1998 Réseau Hydrobiologique et Piscicole. Synthèse des données 1998 sur le Bassin Seine-Normandie.
- Berrie, A.D. 1992. The chalk-stream environment. *Hydrobiologia*, **248**, 3-9.
- Berrie, A.D., McLeish, P.R., Mackey, A.P. 1998. Population structure, growth and biomass of brown trout, *Salmo trutta*, at three sites in the River Kennet, England. *Polskie Archiwum Hydrobiologii* **45**, 173-183.
- Bravard, J.-P., 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières? *La Houille Blanche*, **7**, 515-521.
- Brookes, A., 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. Wiley, Chichester, 326 p.,
- Bunte, K., Abt, S.R., 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses of sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. RMRS-GTR-74, USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station, General Technical Report 74. 428p.
- Caissie, D. 2006. The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology*, **51** 1389-1406.
- Carling, P.A., Orr, H.G., 2000. Morphology of riffle-pool sequences in the river Severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**, 369-384.
- Catalogne, C., 2007. Régionalisation des courbes de débits classés sur le bassin Seine-Normandie. Rapport de stage, Master 1 - Hydrogéologie et environnement Université d'Avignon. Cemagref Lyon, 62 pages.
- Catalogne, C., Sauquet, E., 2009. Interpolation des courbes de débits classés. Rapport d'avancement Cemagref-Onema, 72 p.
- Cemagref, 2008. Cartographie des débits de référence sur le bassin Seine Normandie. Rapport de fin de première phase (juin 2007-juin 2008), 66 p.
- Chopart, S., 2006. Interpolation des caractéristiques d'étiage et développements méthodologiques pour la valorisation des jaugeages épisodiques. Rapport de stage, ISTIL. Cemagref Lyon, 68 pages.
- Copp, G.H., Bennetts, T.A. 1996. Short-term effects of removing riparian and instream cover on barbel (*Barbus barbus*) and other fish populations in a stretch of English chalk stream. *Folia Zoologica*, **45**, 283-288.
- CTGREF, 1980. Estimation du débit de crue décennal sur un bassin versant non jaugé : la méthode CRUPEDIX, Informations techniques, décembre 1980, 40-3.
- Fergusson R., 1981. Channel forms and channel changes. In: J. Lewin (Ed), British rivers. G. Allen & Unwin, Londres, pp. 90-125.
- Flynn, N.J., Snook, D.L., Wade, A.J., Jarvie, H.P. 2002. Macrophyte and periphyton dynamics in a UK Cretaceous chalk stream: The River Kennet, a tributary of the Thames. *Science of the Total Environment*, **282-283**, 143-157.
- Houbrechts, G., Hallot, E., Gob, F., Mols, J., Deféchereux, O., Petit, F., 2006. Fréquence et importance du charriage dans les rivières ardennaises. *Géographie Physique et Quaternaire*, **60**, 241-252.
- Huet, M. 1949. Aperçu des relations entre la pente et les populations des eaux courantes *Schweizerische Zeitschrift Fur Hydrologie*, **11**, 333-351.

- Ladle, M., Bass, J.A.B., Jenkins, W.R. 1972. Studies on production and food consumption by the larval simuliidae (Diptera) of a chalk stream. *Hydrobiologia*, **39**, 429-448.
- Ladle, M., Westlake, D.F. 1976. Rivières crayeuses de l'Angleterre et activités humaines *Bul. Franc. de Pisciculture*, **48**, 189-207.
- Lang, M., Lavabre, J., 2008. Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondations. 134 pages + annexes.
- Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, **225**, 103-117.
- Mann, R.H.K., Blackburn, J.H., Beaumont, W.R.C. 1989. The ecology of brown trout *Salmo trutta* in English chalk streams. *Freshwater Biology*, **21**, 57-70.
- Marshall, E.J.P., Westlake, D.F. 1990. Water velocities around water plants in chalk streams. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, **25**, 279-289.
- Mills, C.A., Welton, J.S., Rendle, E.L. 1983. The age, growth and reproduction of the stone loach *Noemacheilus barbatulus* (L.) in a Dorset chalk stream. *Freshwater Biology*, **13**, 283-292.
- Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses. *Water Resources Research*, **26**, 1465-1473.
- Navratil, O. 2005. Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques. Thèse de doctorat, INPG-Cemagref, 320 pp.
- Navratil, O., Albert, M-B., Hérouin, E., Gresillon, J-M., 2006. Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches. *Earth surface processes and landforms*, **31**, 1345-1363.
- Navratil, O., Albert, M-B., 2008. Using bankfull discharge to quantify the effects of urbanization on river morphology: study of the Yzeron river basin (France). Poster à l'Assemblée générale de l'European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-11055.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G., Assani, A. A., 2005. Critical specific stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, **69**, 92-101.
- Petit, F., Hallot, E., Houbrechts, G., Levecq, Y., Mols, J., Peeters A., Van Campenhout, J., 2007. La typologie et les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau Wallons. Actes du colloque La gestion physique des cours d'eau : bilan d'une décennie d'ingénierie écologique, GIREA, Université de Liège, Namur, 2007. 7-16.
- Petts, G.E., Bickerton, M.A., Crawford, C., Lerner, D.N., Evans, D. 1999. Flow management to sustain groundwater-dominated stream ecosystems. *Hydrological Processes*, **13**, 497-513.
- Pinder, L.C.V. 1992. Biology of epiphytic Chironomidae (Diptera:Nematocera) in chalk streams. *Hydrobiologia* 248, 39-51.
- Sauquet, E., Gottschalk, L., Krasovskaia, I., 2008. Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research*, **39**, 5-6, 403 - 423.
- Sear, D.A., Armitage, P.D., Dawson, F.H., 1999. Groundwater dominated rivers. *Hydrological Processes*, **13**, 255-276.
- Schmutz, S., Cowx I.G., Haidvogel G., Pont D. 2007. Fish-based methods for assessing European running waters: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, **14**, 369-380
- Solomon, D.J., Templeton, R.G. 1976. Movements of brown trout *Salmo trutta* L. in a chalk stream. *Journal of Fish Biology*, **9**, 411-423.
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J., 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in water science* 48, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 579 pages.
- Van den Berg, J. H., 1995. Prediction of alluvial pattern of perennial streams. *Geomorphology*, **12**, 259-279.
- Walling, D.E., Amos, C.M. 1999. Source, storage and mobilisation of fine sediment in a chalk stream system. *Hydrological Processes*, **13**, 323-340.
- Whiting, P.J., Stamm, J., 1995. The hydrology and form of spring-dominated channels. *Geomorphology*, **12**, 233-240.
- Wood, P.J., Agnew, M.D., Petts, G.E. 2001. Hydro-ecological variability within a groundwater dominated stream. *IAHS-AISH Publication*, **266**, 151-160.
- Wood, P.J., Petts, G.E. 1999. The influence of drought on chalk stream macroinvertebrates. *Hydrological Processes*, **13**, 387-399.
- Wright, J.F. 1992. Spatial and temporal occurrence of invertebrates in a chalk stream, Berkshire, England. *Hydrobiologia*, **248**, 11-30.

- Wright, J.F., Clarke, R.T., Gunn, R.J.M., Kneebone, N.T., Davy-Bowker, J. 2004. Impact of major changes in flow regime on the macroinvertebrate assemblages of four chalk stream sites, 1997-2001. *River Research and Applications*, **20**, 775-794.
- Wright, J.F., Clarke, R.T., Gunn, R.J.M., Winder, J.M., Kneebone, N.T., Davy-Bowker, J. 2003. Response of the flora and macroinvertebrate fauna of a chalk stream site to changes in management. *Freshwater Biology*, **48**, 894-911.
- Wright, J.F., Symes, K.L. 1999. A nine-year study of the macroinvertebrate fauna of a chalk stream. *Hydrological Processes*, **13**, 371-385.

Liste des figures et des tableaux

Liste des Figures

- Figure 1** : Représentation simplifiée des différents niveaux de contrôle des débits sur la morphologie des cours d'eau et l'habitat des organismes aquatiques.
- Figure 2** : Echelles de description des variables hydrauliques et morphologiques.
- Figure 3** : Relations de géométrie hydraulique.
- Figure 4** : Exemple de courbe de débits classés.
- Figure 5** : Exemple de répartition entre débit total (courbe noire) et débit de base (courbe bleue).
- Figure 6** : Exemple de courbe granulométrique.
- Figure 7** : Les différents points de levé topographique.
- Figure 8** : Les 3 niveaux de mesure de vitesse.
- Figure 9** : Régime hydrologique associé aux coefficients mensuels moyens de débit - Fond de carte extrait de Sauquet et al. (2008).
- Figure 10** : Valeurs du BFI en 133 sites jaugés (d'après Chopart, 2006).
- Figure 11** : Carte de la pluie de bassin (d'après Catalogne, 2007).
- Figure 12** : Courbes des débits classés
- Figure 13** : Valeur de l'indice de concavité sur un fond de carte présentant les contours des hydroécotopes de niveau 2 (en gris) et les regroupements en régions hydrologiques types suggérés par Catalogne et Sauquet (2009)
- Figure 14** : Relation entre BFI et indice de concavité.
- Figure 15** : Hydrogrammes de crue normés (en gris) et **forme moyenne (en noir)** sur les débits observés.
- Figure 16** : Hydrogrammes de crue normés (en gris) et **forme moyenne (en noir)** sur les débits privés de la composante souterraine.
- Figure 17** : Lien entre surface et durée caractéristique calculée sur la chronique Q-BFI.
- Figure 18** : Saisonnalité des crues, selon la date des maxima échantillonnés selon la méthode sup-seuil.

- Figure 19** : Ajustements à la loi exponentielle.
- Figure 20** : Partition entre débit total et débit de base, exemple du Cailly.
- Figure 21** : Carte géologique.
- Figure 22** : Localisation des 152 stations prospectées.
- Figure 23** : Localisation des 39 stations étudiées.
- Figure 24** : Localisation des stations de Champagne.
- Figure 25** : Localisation des stations de Normandie.
- Figure 26** : Carte des modules le long du réseau hydrographique principal
- Figure 27** : Erreur de reconstitution des courbes de débits classés par quantile.
- Figure 28** : Indice de concavité α : valeurs reconstituées versus valeurs observées sur les sites-tests.
- Figure 29** : Résultats du test sur le protocole.
- Figure 30** : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant pour l'ensemble des sites naturels.
- Figure 31** : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant. (1) Noblette, (2) Barbuise, (3) Ardusson, (4) Charentonne, (5) Blaise, (6) Sébec.
- Figure 32** : Evolution du débit à plein bord avec la taille du bassin versant dans différents contextes régionaux.
- Figure 33** : Evolution du débit à plein bord en fonction de la taille du bassin versant pour les stations naturelles et dégradées. (1) Cailly, (2) Clérette, (3) Lieure, (4) Dun, (5) Longsol, (6) Commerce, (7) Moivre, (8) Austreberthe, (9) Ravet, (10) Superbe. La droite fournit la tendance du modèle de référence obtenu après élimination des points marginaux (voir figure 28).
- Figure 34** : Evolution de la largeur moyenne à plein bord en fonction de la taille du bassin versant: A pour les stations naturelles, B pour les stations naturelles et les stations dégradées.
- Figure 35** : Evolution de la hauteur moyenne à plein bord en fonction de la taille du bassin versant: A pour les stations naturelles, B pour les stations naturelles et les stations dégradées.
- Figure 36** : Rapport largeur/profondeur des stations de Champagne et de Normandie.
- Figure 37** : Coefficient de variation de la hauteur moyenne à Q1. Les stations marquées d'un * se situent en Normandie.
- Figure 38** : Profil en long et découpage du fond du lit en seuils et mouilles.
- Figure 39**: Profondeur des mouilles des stations naturelles et des stations dégradées. Les points rouge et vers correspondent à la profondeur moyenne calculées par station et les traits verticaux à la dispersion des profondeurs sur chaque station.
- Figure 40** : Courbes granulométriques des cours d'eau étudiés. Les courbes en trait plein ont été réalisées en suivant la technique de Wolman et celles en traits pointillés ont été réalisées par tamisage. Dans la légende, les noms des cours d'eau en rouge correspondent aux cours d'eau dégradés.

Figure 41 : Indice de Folk and Ward traduisant le classement granulométrique des dépôts. Plus la valeur de l'indice est importante, moins le classement est bon et plus le dépôt est hétérogène.

Figure 42 : Courbes granulométriques de 6 stations, 2 dont l'indice de classement est plutôt petit (trait pointillé) et 4 avec un indice élevé (trait plein).

Figure 43 : Marquage de la charge de fond du Cailly avant mobilisation (A) et du Dun après une faible mobilisation (B).

Figure 44 : Echelle à maxima installée sur la Nosle.

Figure 45 : Distances parcourues par les particules mobilisées pour les marquages du Dun (A) et de la Nosle (B).

Figure 46 : Puissances spécifiques à plein bord des 39 stations étudiées.

Figure 47 : Variation du ratio QIXA2/QA en fonction du BFI. La droite rouge donne la tendance de la relation obtenue par régression linéaire.

Figure 48 : Variations des différentes variables morphologiques en fonction des variables retenues dans les modèles de régression. Les droites donnent les tendances obtenues dans les modèles de régression linéaire.

Figure 49 : Différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles de référence pour les 8 variables morphologiques en fonction du caractère naturel ou dégradé des sites étudiés. Les valeurs de p indiquées correspondent aux valeurs de probabilités associées aux ANOVA testant l'existence d'un éventuel effet type de station (naturel vs dégradé).

Figure 50 : Distribution des valeurs des coordonnées factorielles définies par l'analyse discriminante pour les différents sites. Les sites naturels apparaissent en rouge et les sites dégradés en bleu.

Figure 51 : Distributions des valeurs d'IPR et d'EFI pour les stations naturelles et dégradées.

Figure 52 : Distribution des valeurs des 7 métriques de l'IPR en fonction du caractère naturel ou dégradé des stations.

Figure 53 : Distribution des valeurs des 10 métriques de l'EFI en fonction du caractère naturel ou dégradé des stations.

Figure 54 : Variations des valeurs d'IPR et d'EFI en fonction des coordonnées factorielles obtenues par l'analyse discriminante menée sur les variables morphologiques. Les droites correspondent aux tendances obtenues grâce à des modèles par régression linéaire. Les valeurs de p correspondent aux valeurs de probabilité associées à ces régressions.

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Evaluation des moyens nécessaires à la réalisation des différentes étapes du protocole.

Tableau 2 : Tableau des stations hydrométriques utilisées (en grisé celles qui se situent en Champagne).

Tableau 3 : Caractéristiques hydrologiques des sites – Débits moyens mensuels et annuels bruts.

Tableau 4 : Caractéristiques hydrologiques des sites – Débits mensuels moyens spécifiques et BFI.

Tableau 5: Statistiques sur le module et le BFI sur les secteurs examinés.

Tableau 6 : Durées caractéristiques selon la chronique exploitée (avec et sans la composante souterraine) ; en grisé les rivières de Champagne.

Tableau 7 : Quantiles de débit de pointe QIXA(T) estimés par la loi exponentielle pour différentes périodes de retour (m^3/s).

Tableau 8: Tableau récapitulatif des stations étudiées.

Tableau 9 : Liste des stations pour lesquelles des données piscicoles sont disponibles.

* : stations disposant d'un suivi long terme (stations suivies dans le cadre du RHP).

Tableau 10 : Débits caractéristiques QIXA2 et QA reconstitués et valeurs retenues (**en gras : valeurs calculées à partir des enregistrements à la station HYDRO**).

Tableau 11 : Fréquence au dépassement du Q_{pb} et comparaison avec le QIXA2 reconstitué (**en gras : valeurs calculées à partir des enregistrements à la station HYDRO**).

Tableau 12 : Caractéristiques granulométriques des stations.

Tableau 13 : Suivi des marquages.

Tableau 14 : Résumé des régressions linéaire multiple des 8 variables morphologique en fonction de SBV, REG et QIXA2/QA. * : variable préalablement transformée en Log10 avant analyse.

Tableau 15 : Fonction discriminante issue de l'analyse discriminante visant à distinguer les stations naturelles des stations altérées sur la base des différences entre valeurs observées et valeurs prédites par les modèles de référence (valeur propre : 2,760 ; corrélation canonique 0,857). Les variables sont indiquées dans l'ordre où elles ont été intégrées dans l'analyse).

Tableau 16 : Liste des métriques intervenant dans le calcul de l'IPR et de l'EFI. Les flèches indiquent le sens attendu de variation de chaque métrique avec l'augmentation des pressions anthropiques.

Liste des annexes

Hydrologie :

Annexe 1 : Variation des débits mensuels moyens.

Annexe 2 : Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés.

Annexe 3 : Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil.

Hydraulique :

Annexe 4 : Détermination du Qpb par modélisation hydraulique : exemple de la Soude

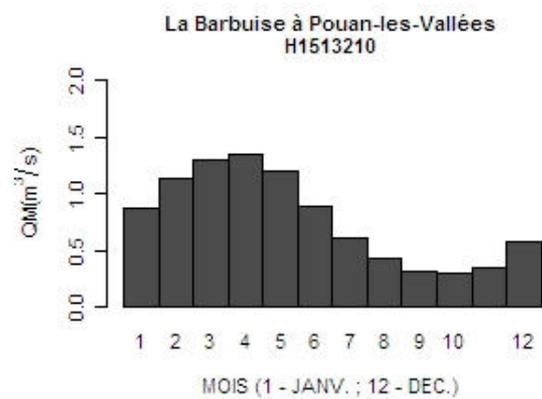
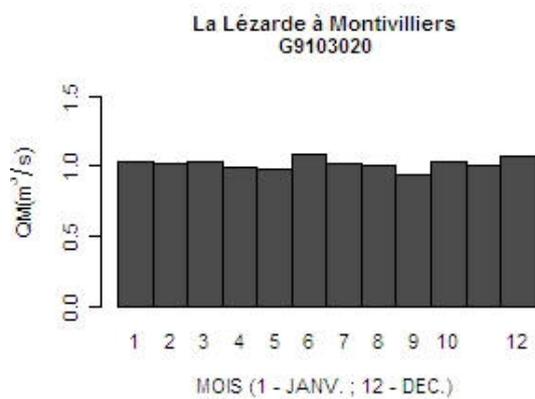
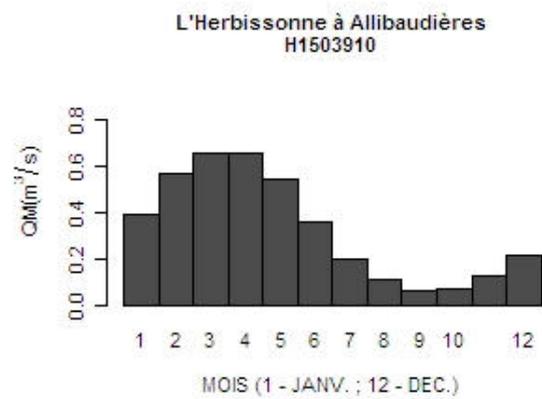
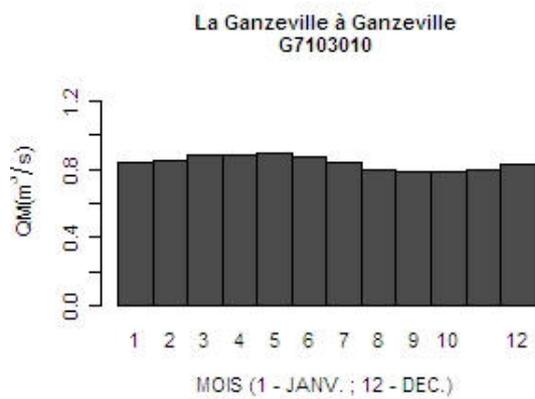
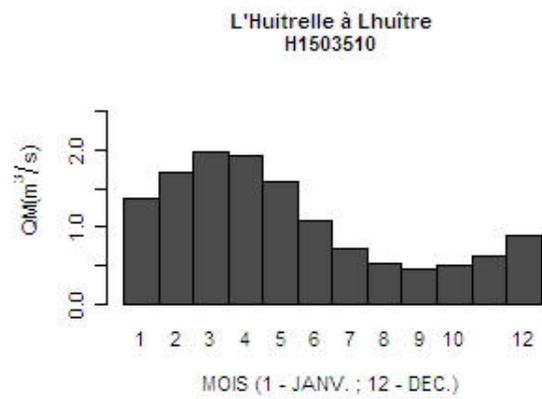
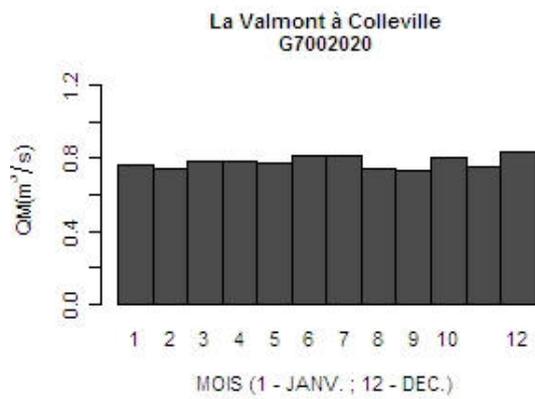
Stations étudiées : (document séparé)

Annexe 5 : Tableau récapitulatif des stations d'étude

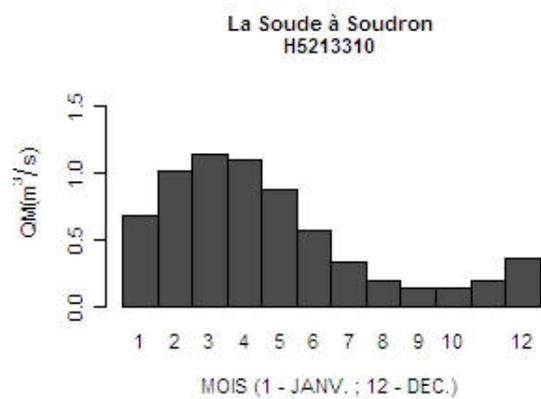
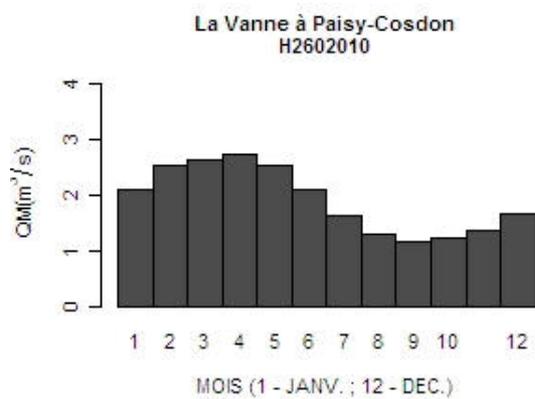
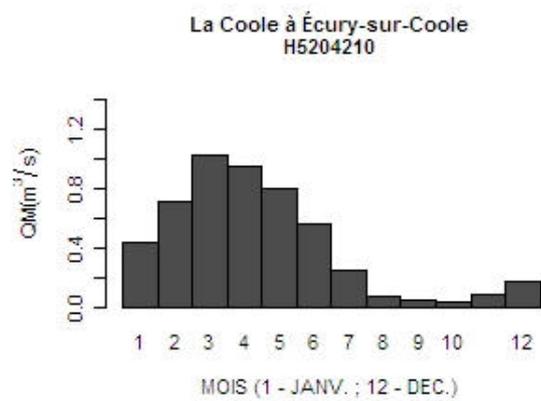
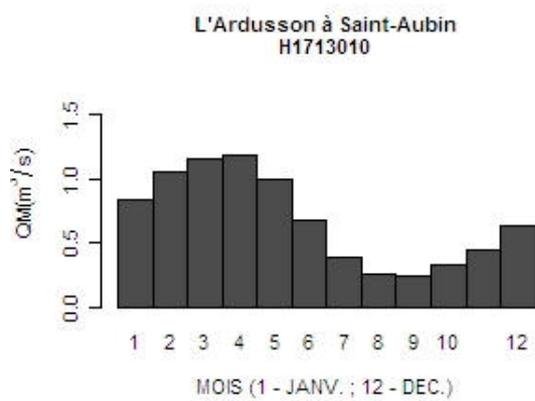
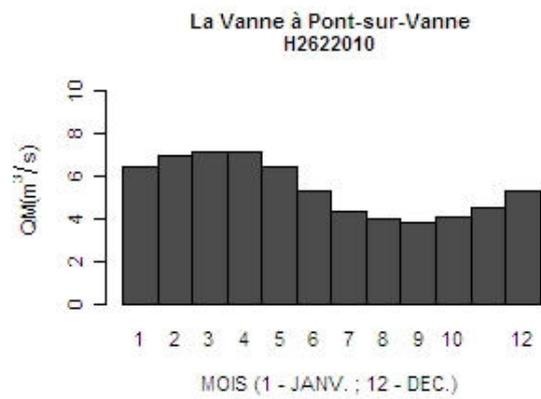
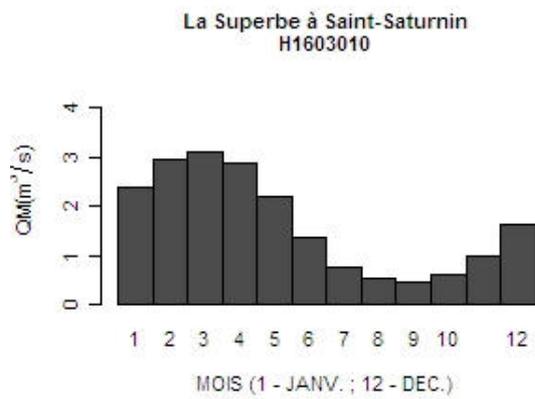
Annexe 6 : Localisation sur la carte géologique

Annexe 7 : Localisation sur le réseau hydrographique

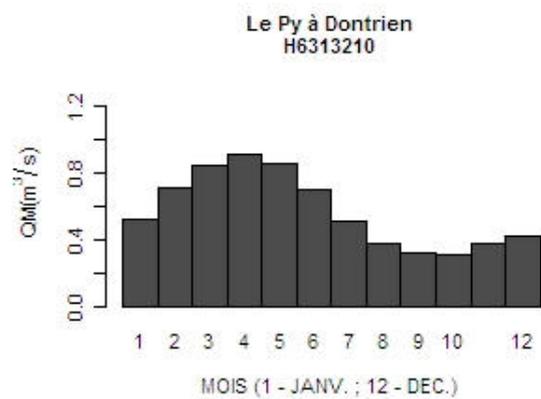
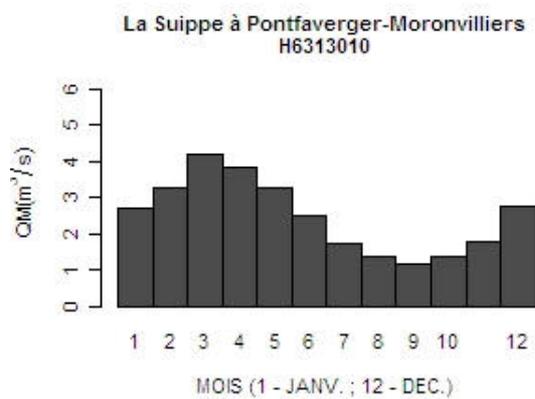
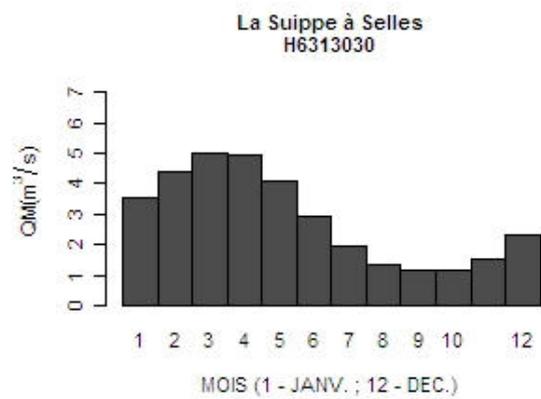
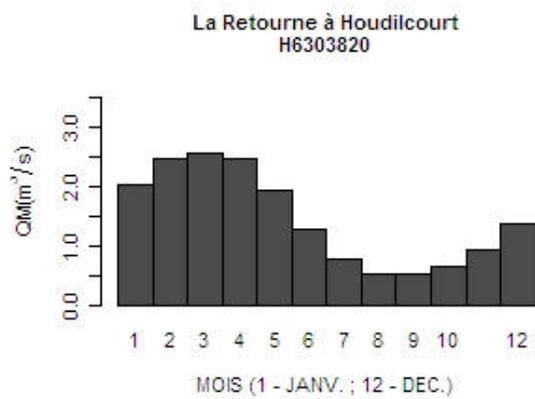
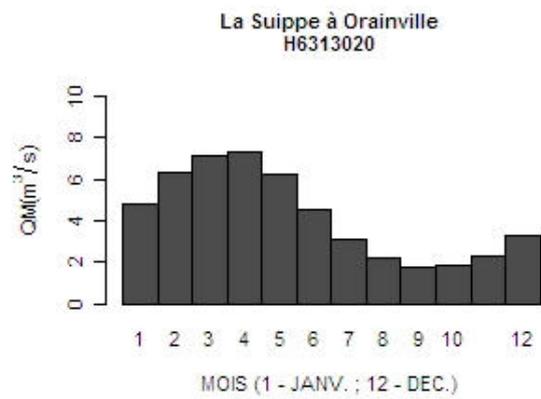
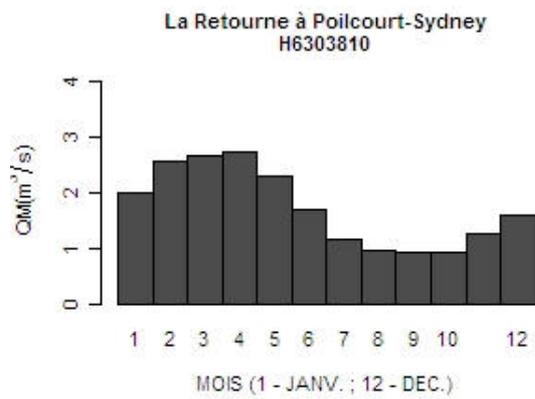
Annexe 8 : Fiches par stations, dans l'ordre de numérotation du tableau en annexe 5



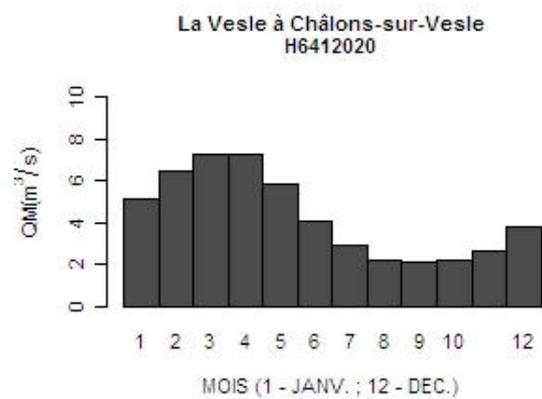
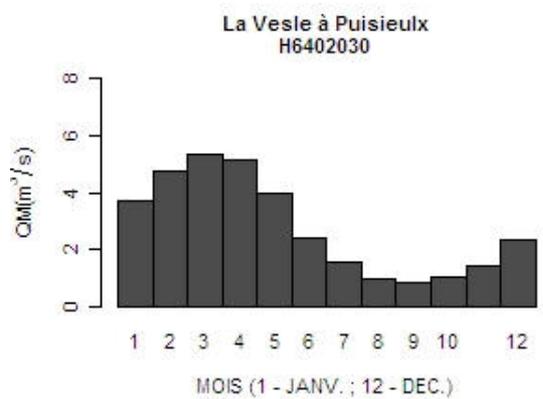
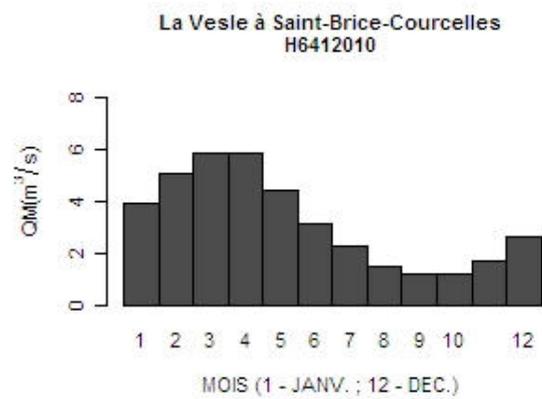
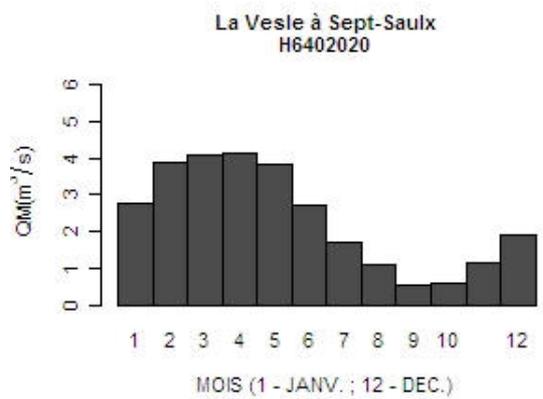
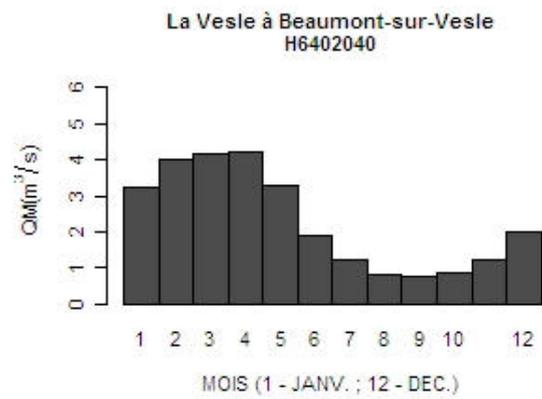
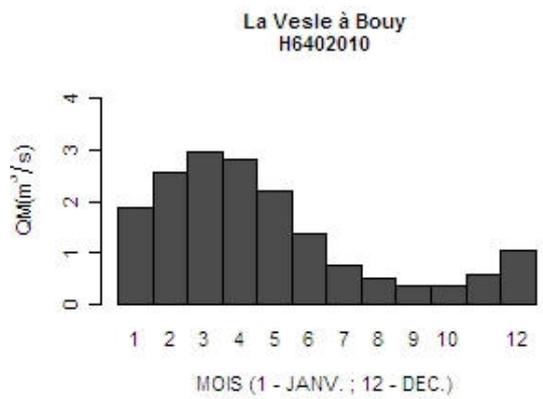
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



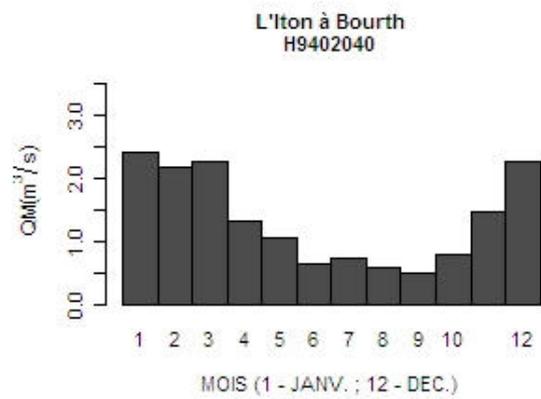
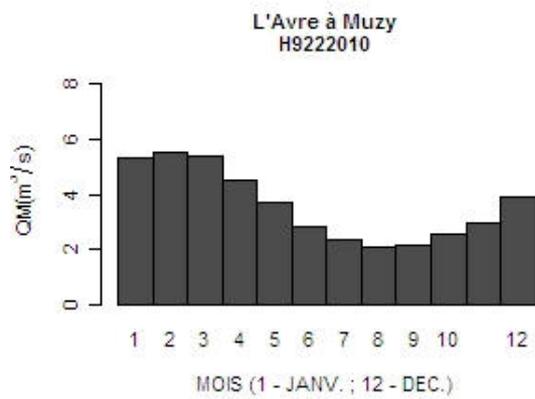
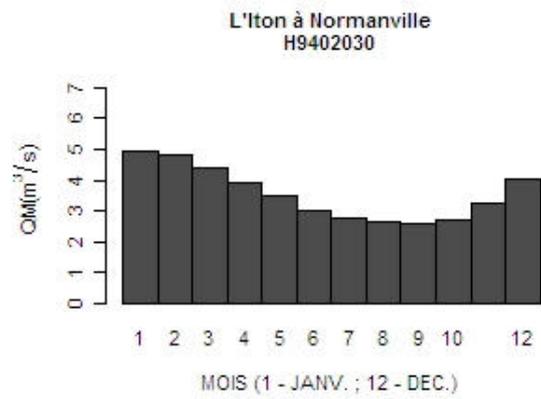
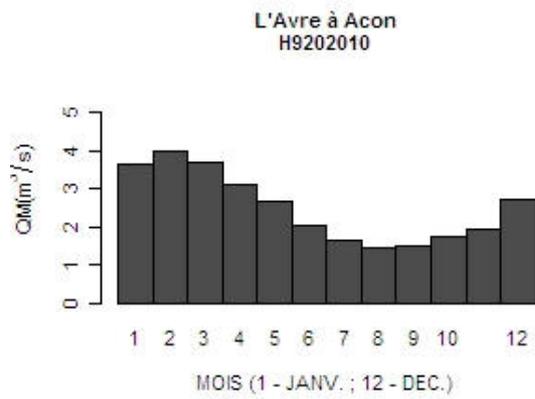
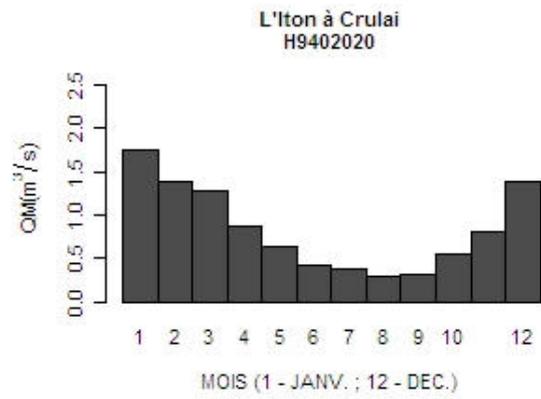
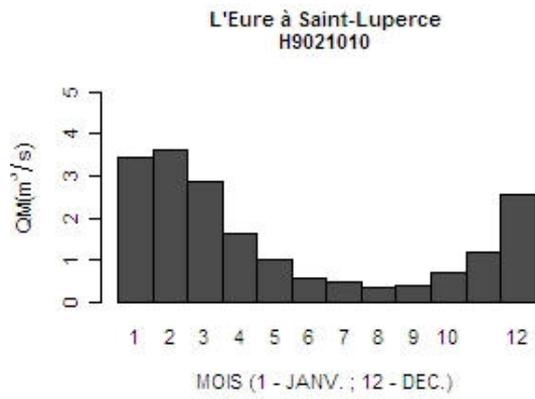
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



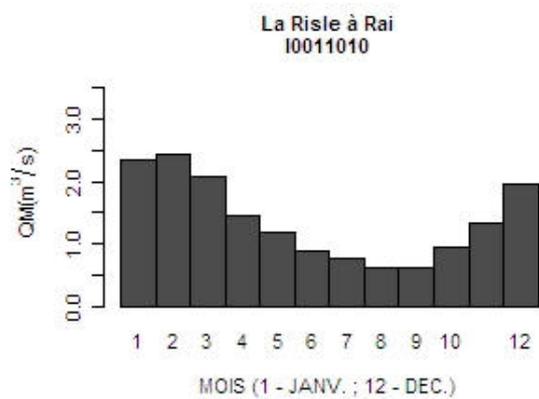
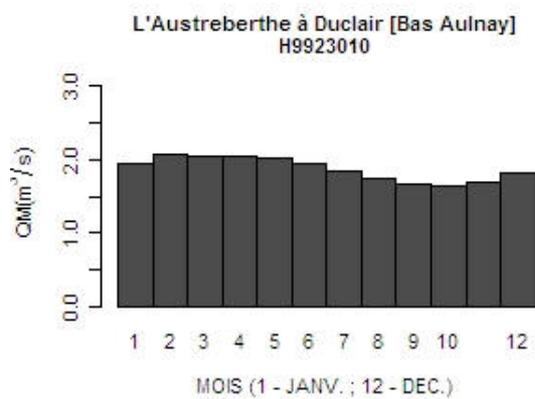
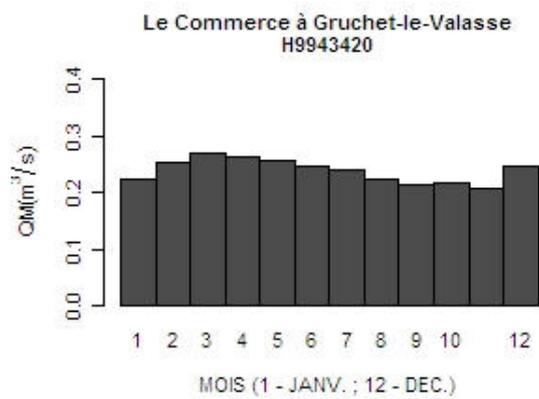
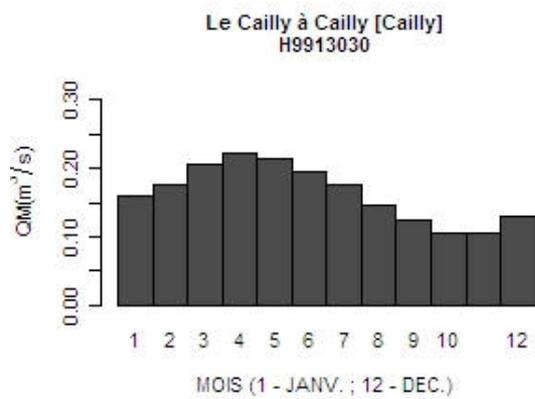
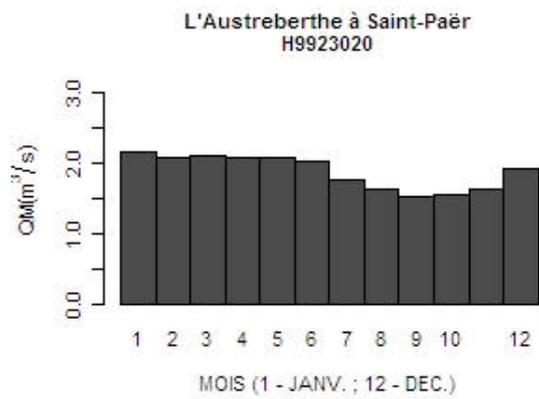
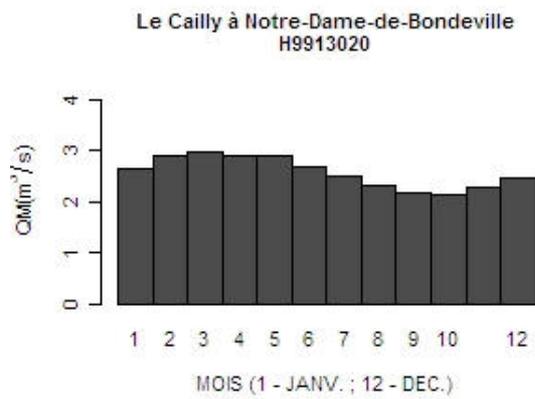
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



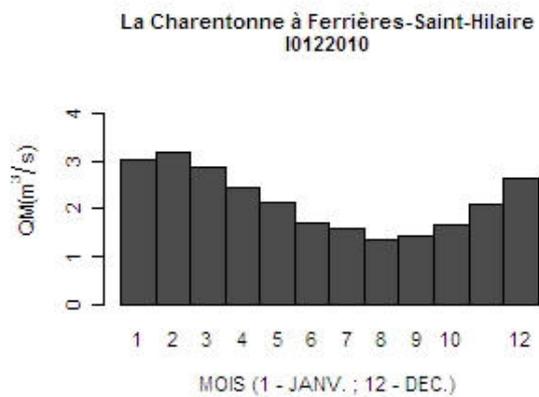
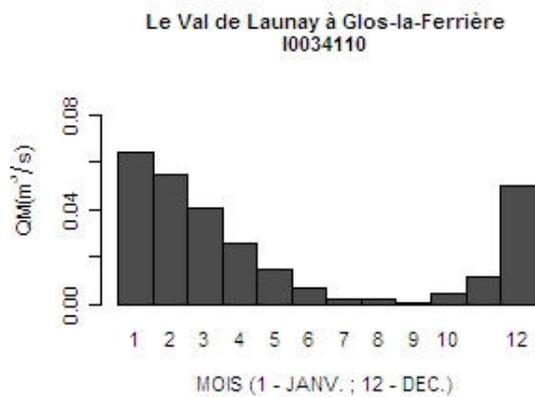
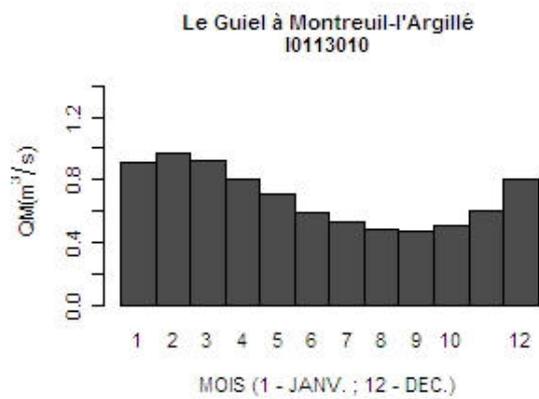
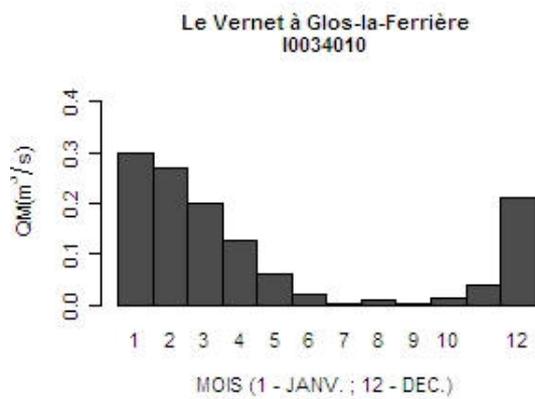
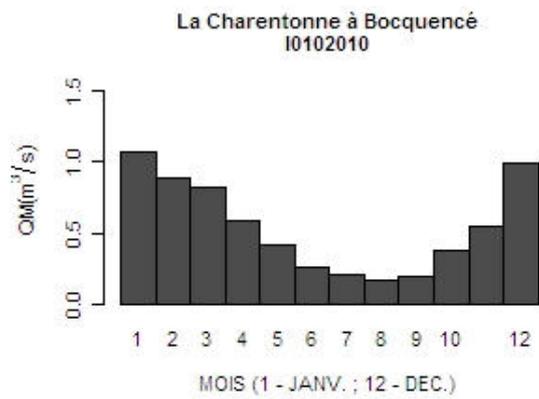
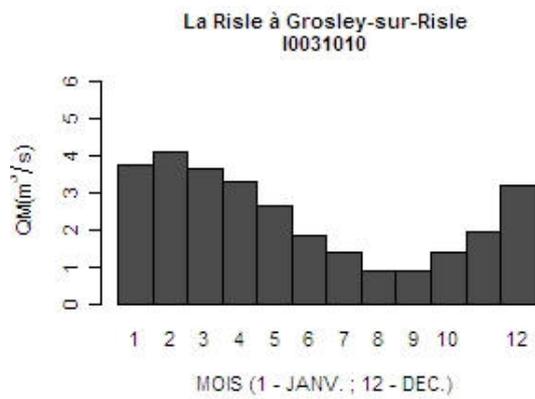
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



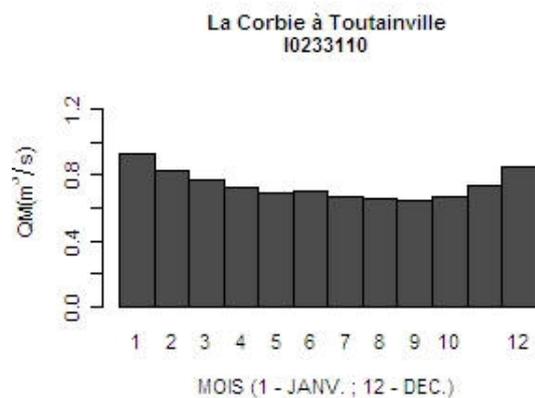
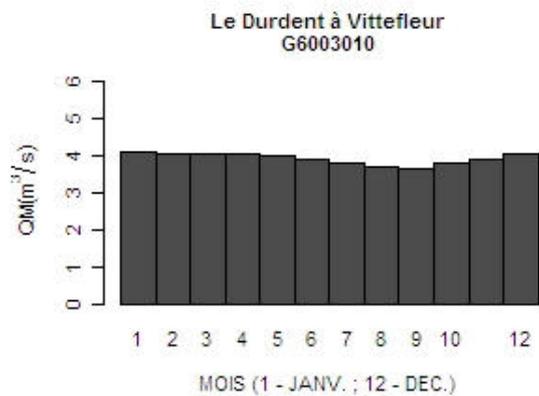
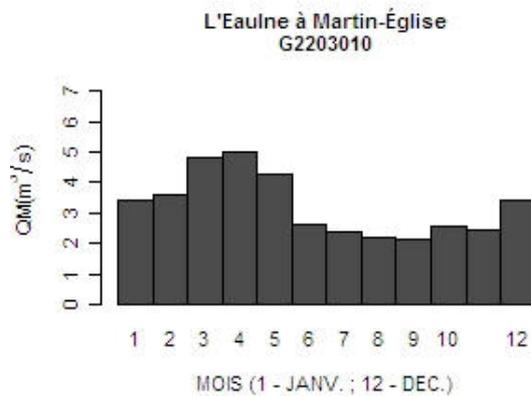
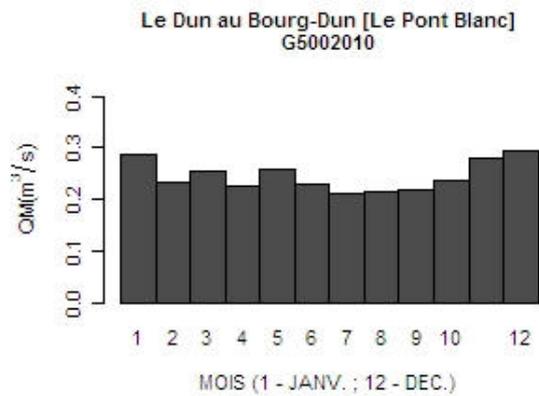
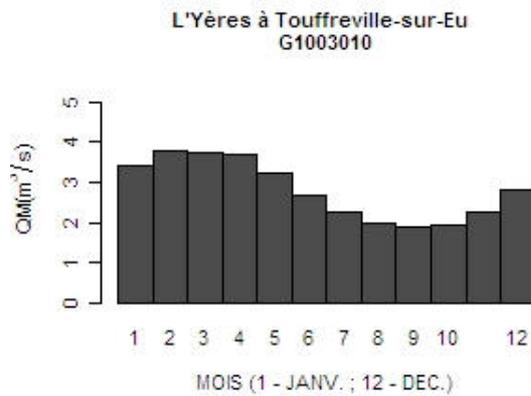
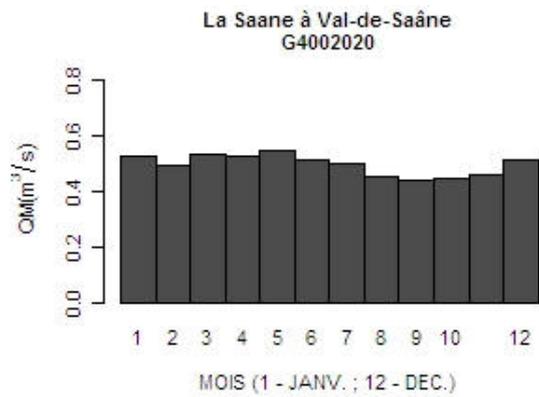
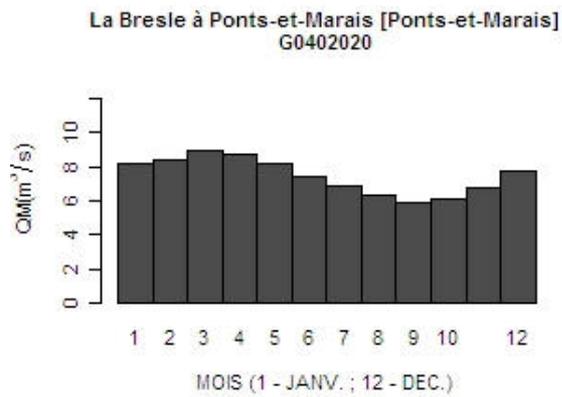
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



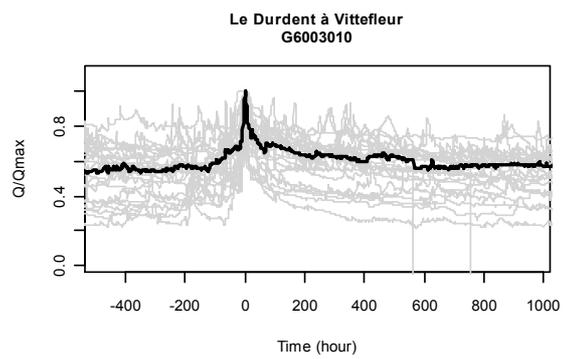
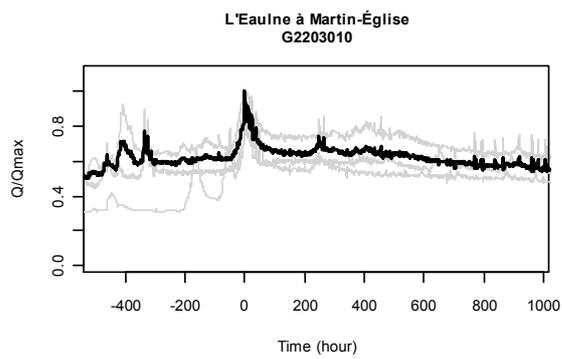
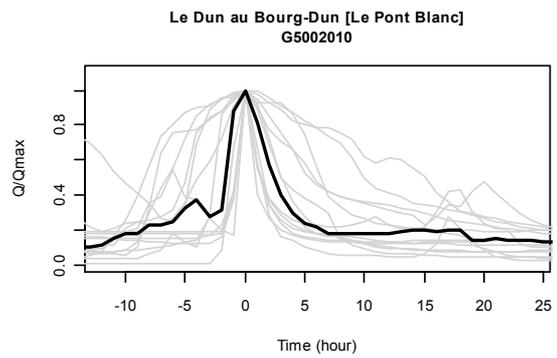
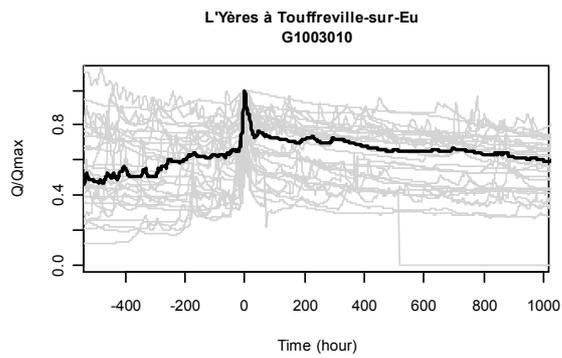
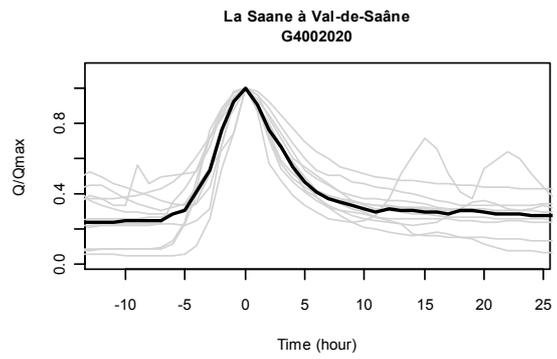
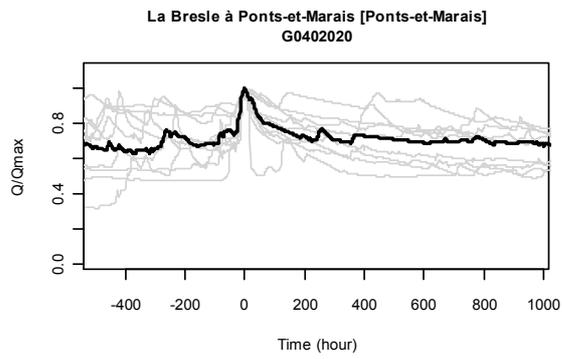
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



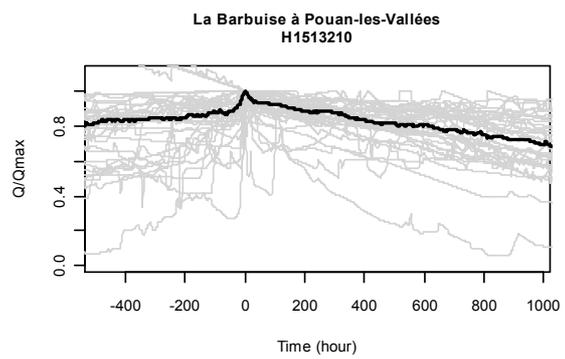
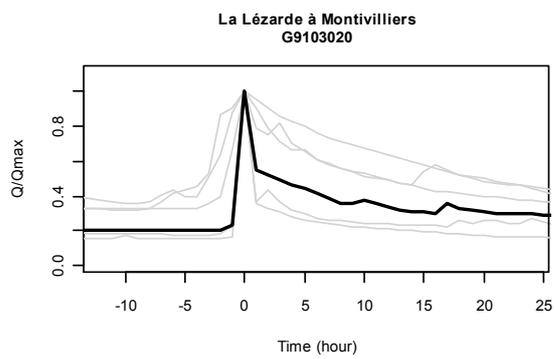
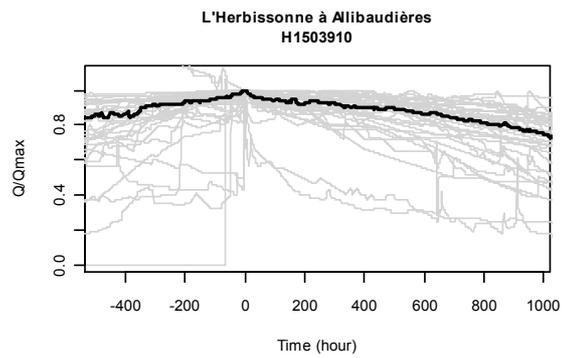
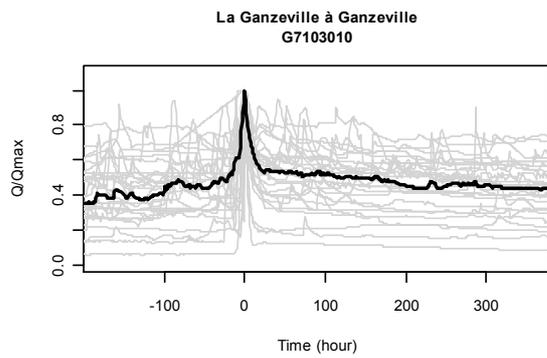
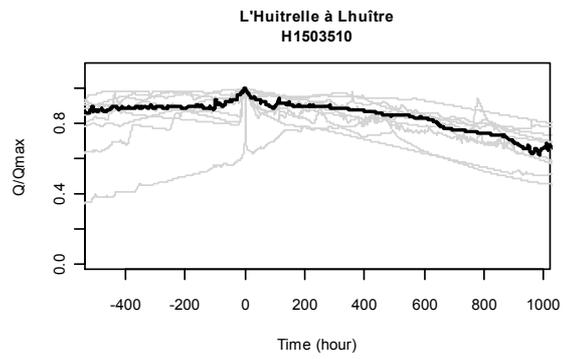
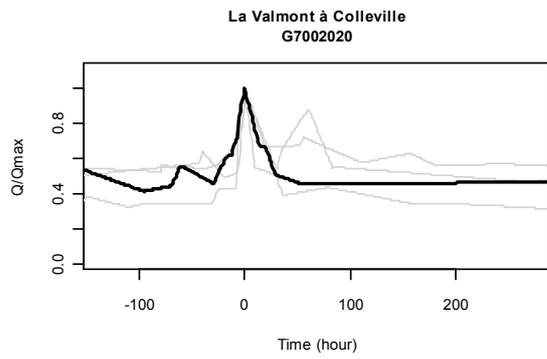
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



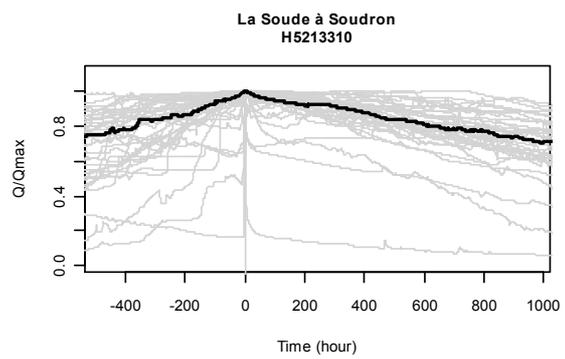
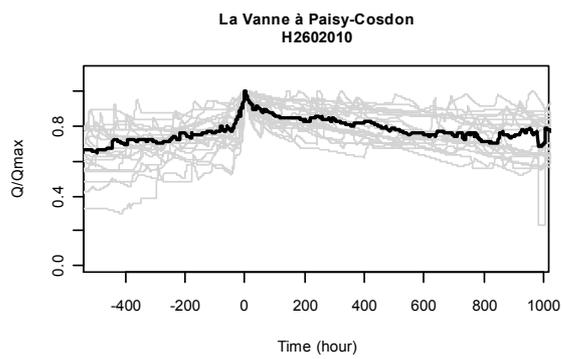
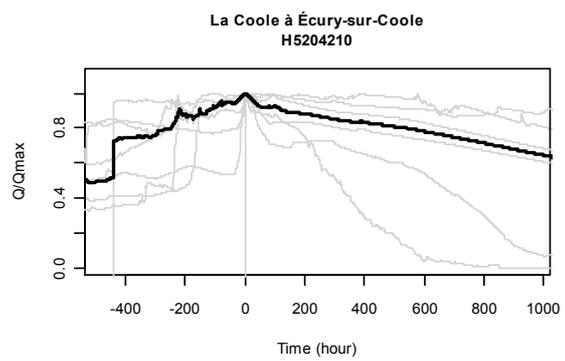
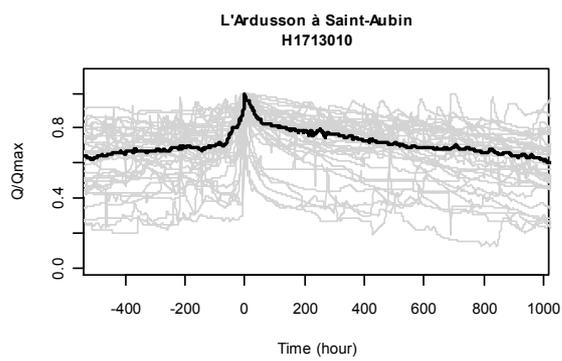
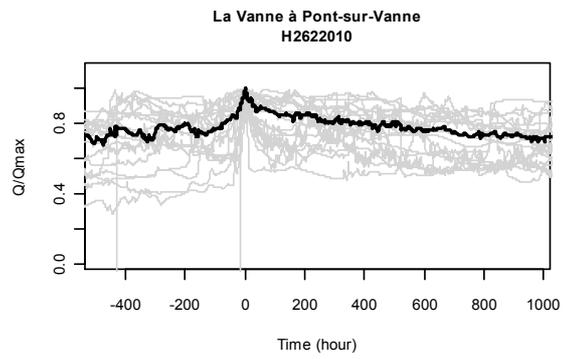
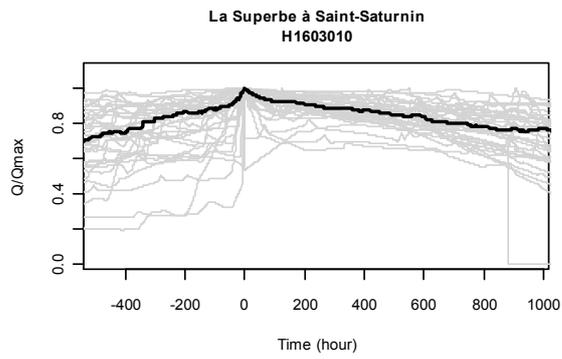
Annexe 1 - Variation des débits mensuels moyens



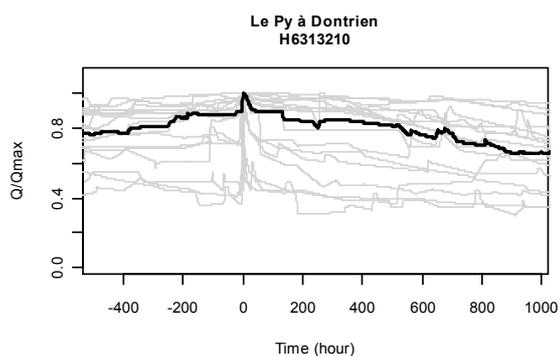
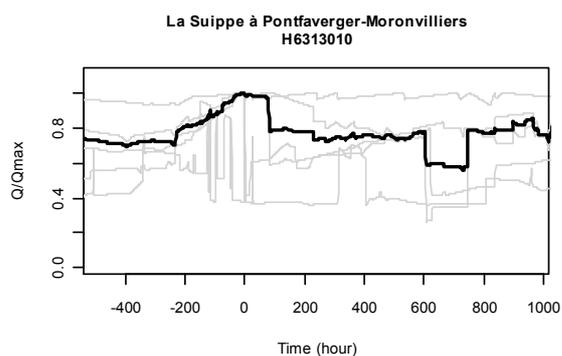
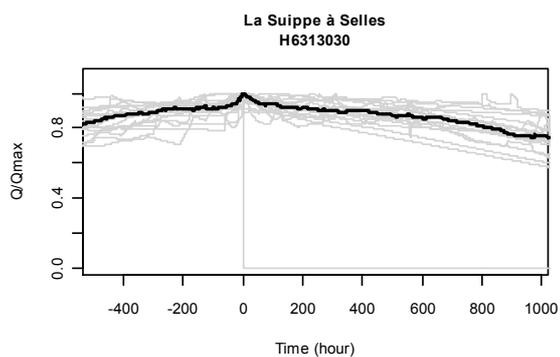
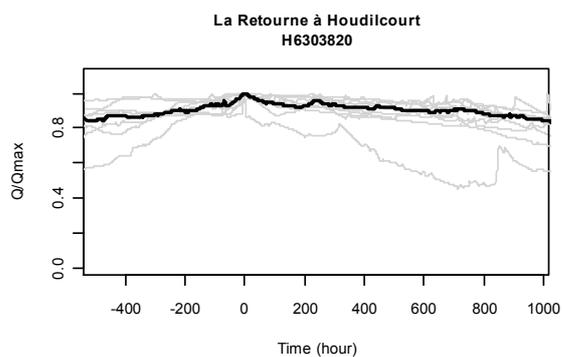
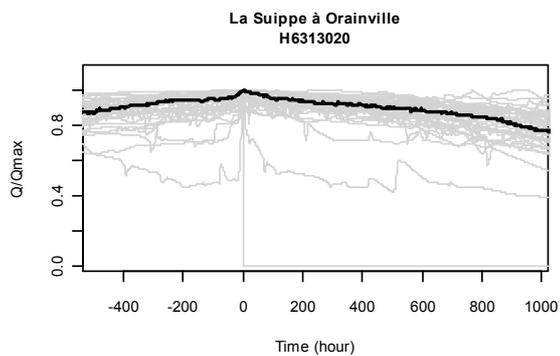
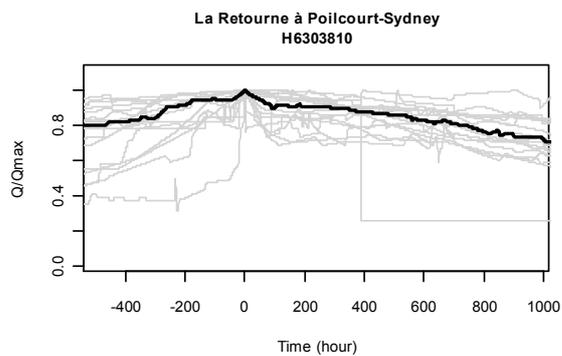
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



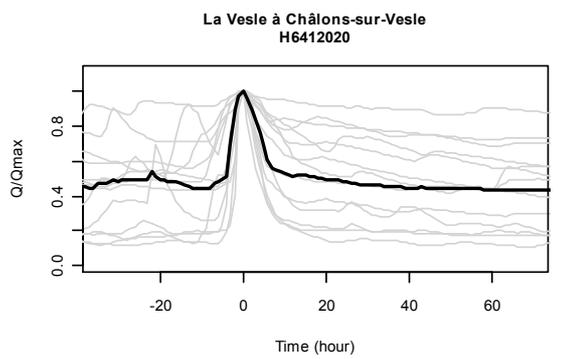
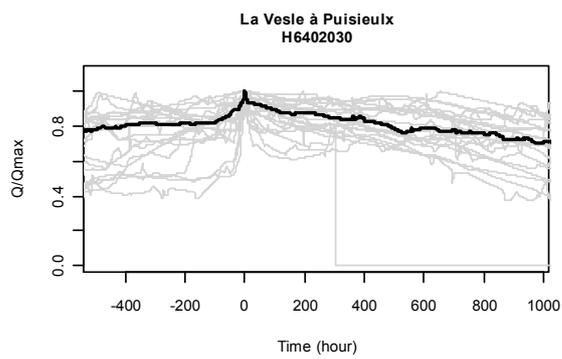
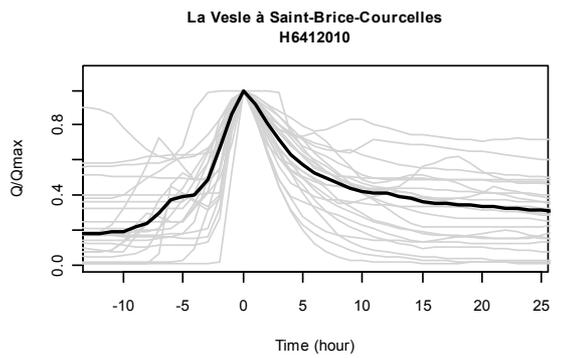
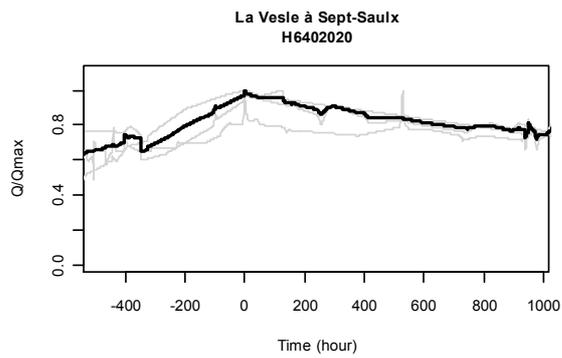
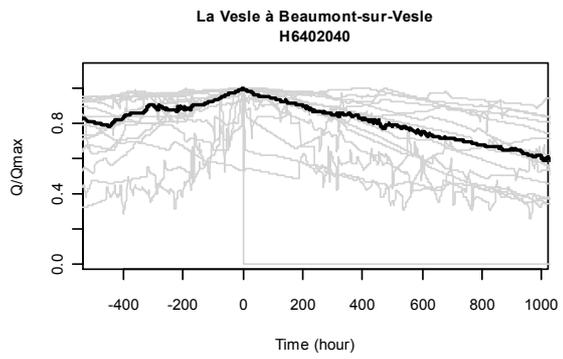
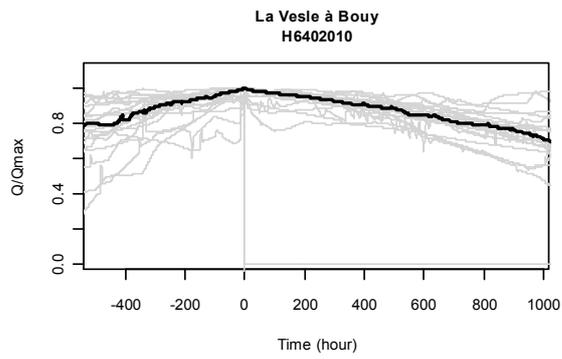
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



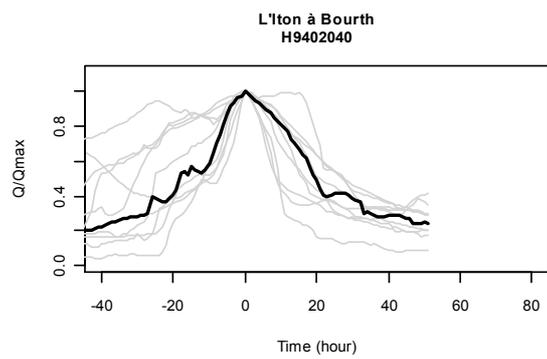
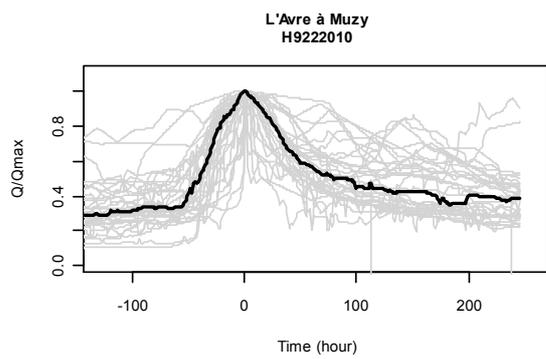
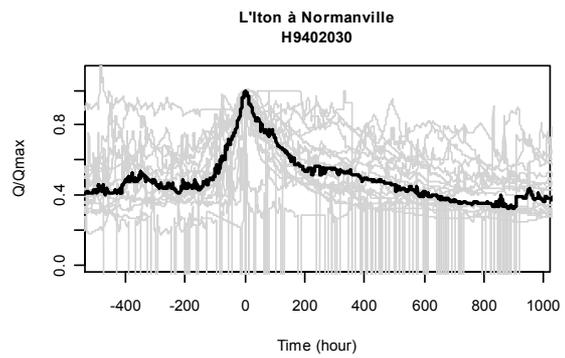
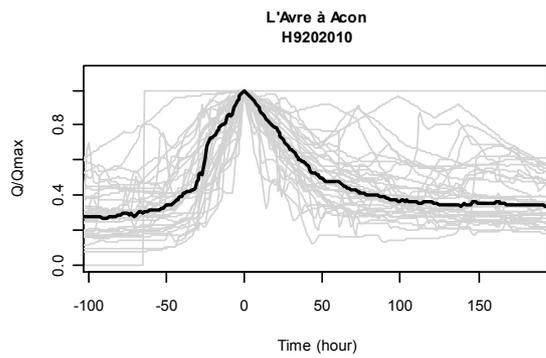
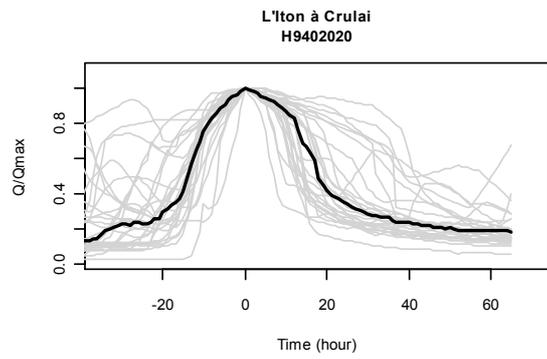
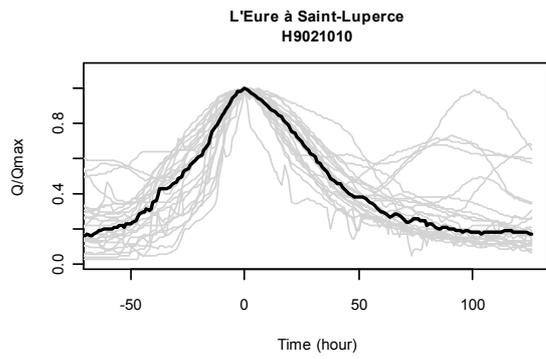
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



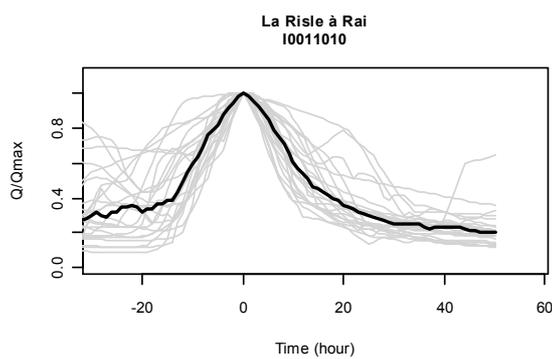
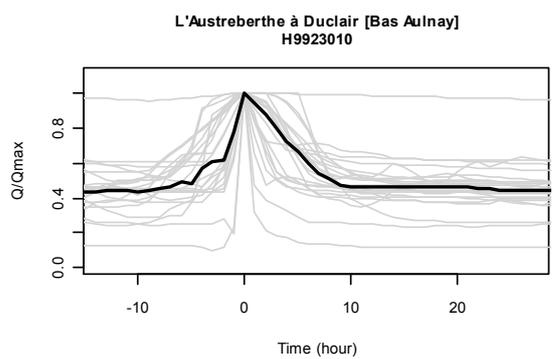
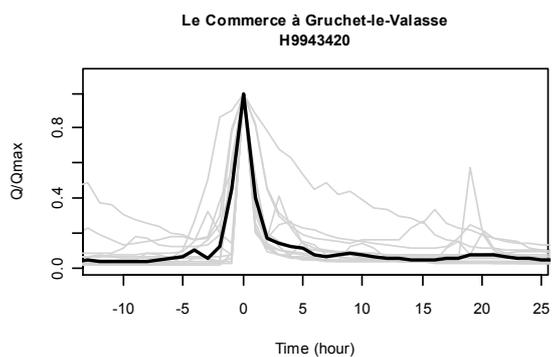
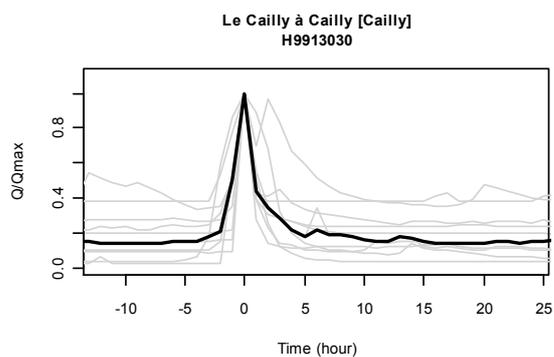
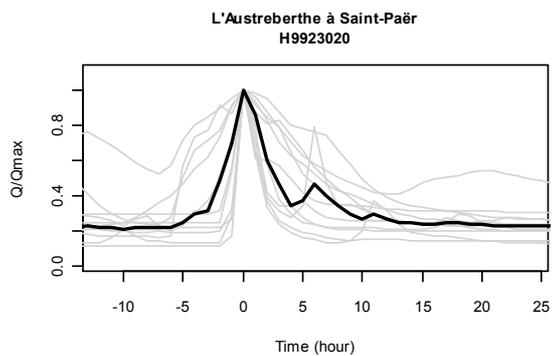
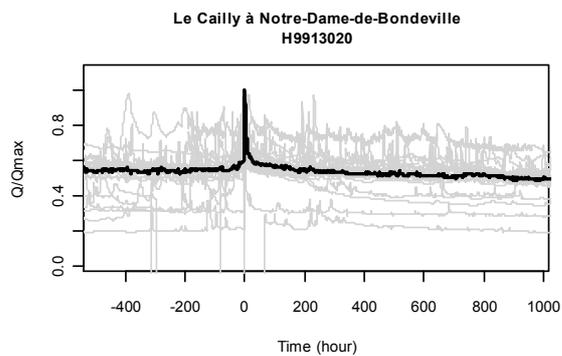
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



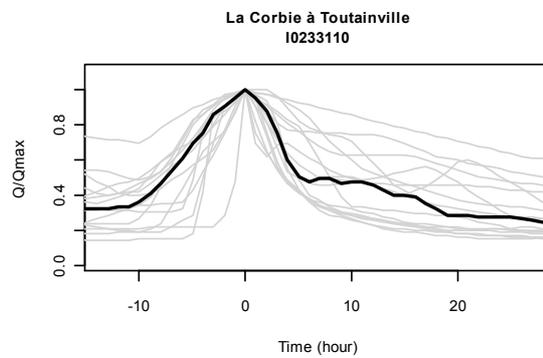
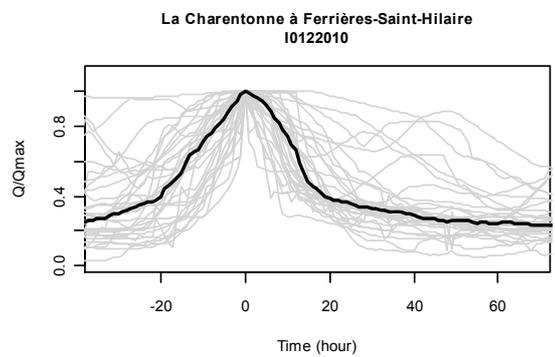
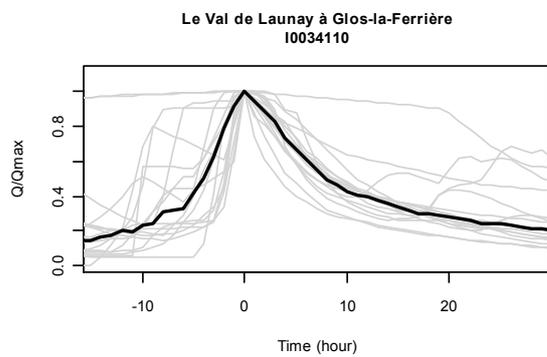
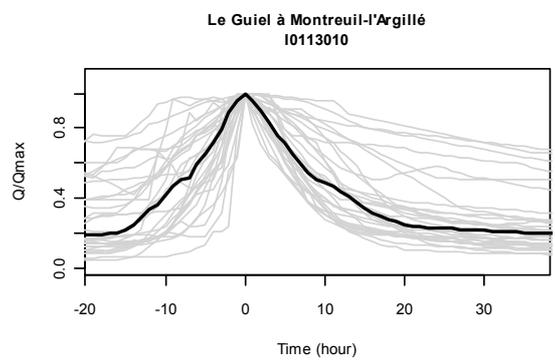
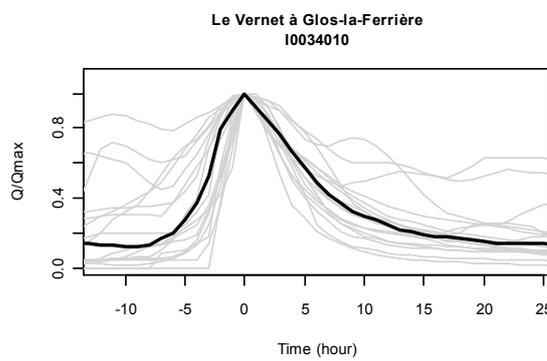
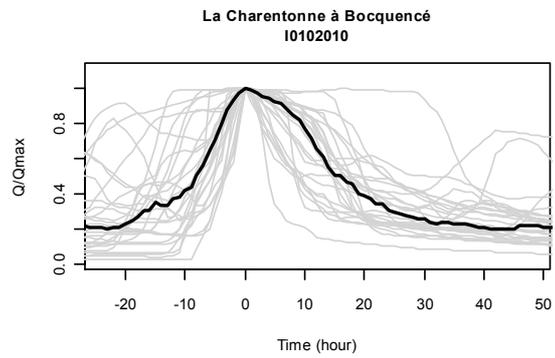
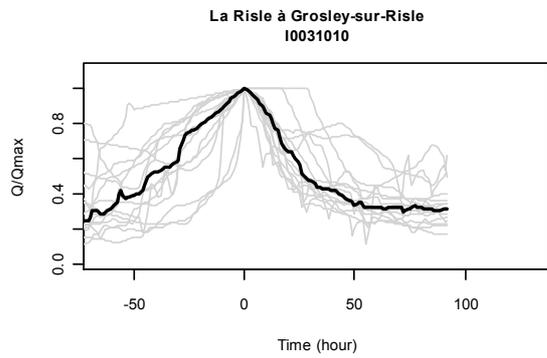
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



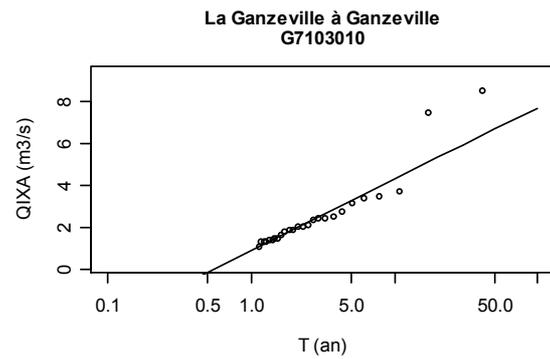
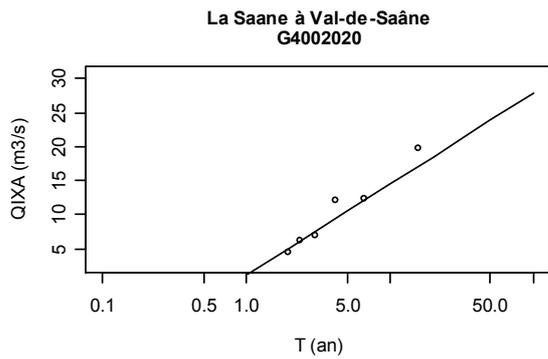
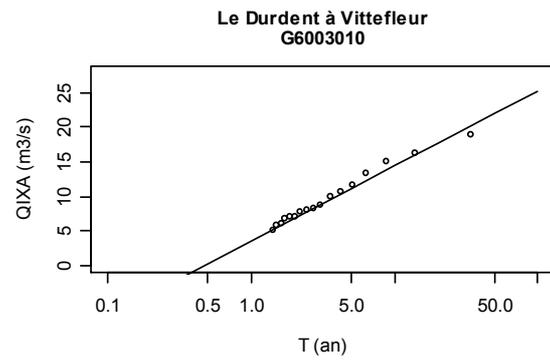
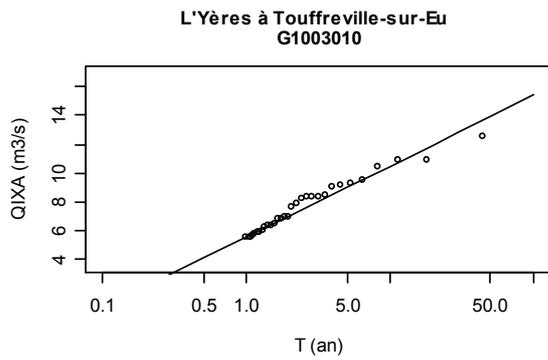
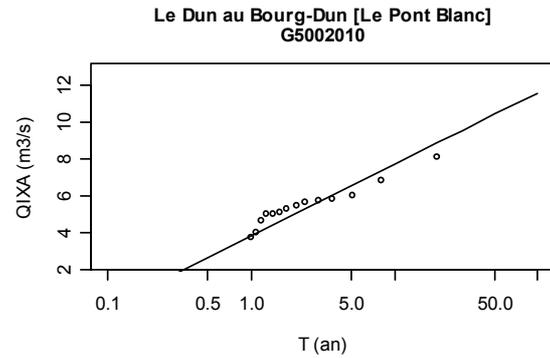
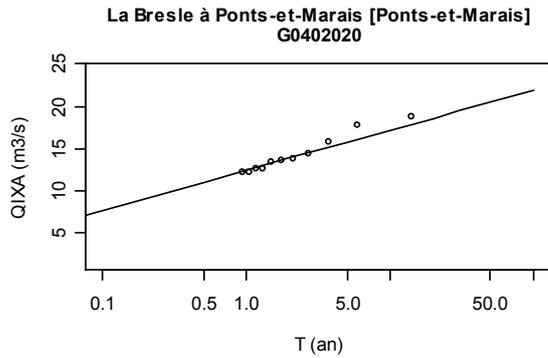
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



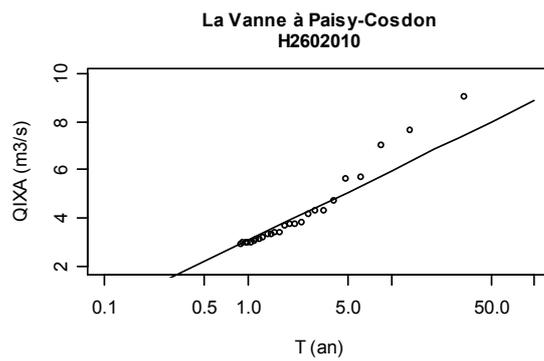
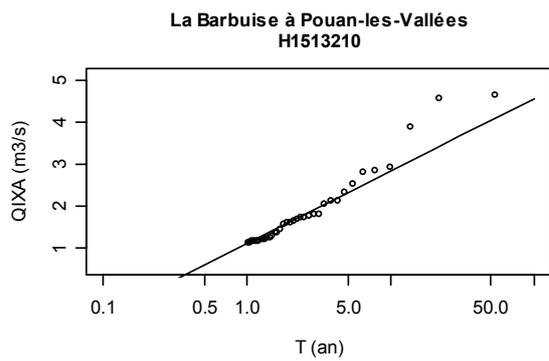
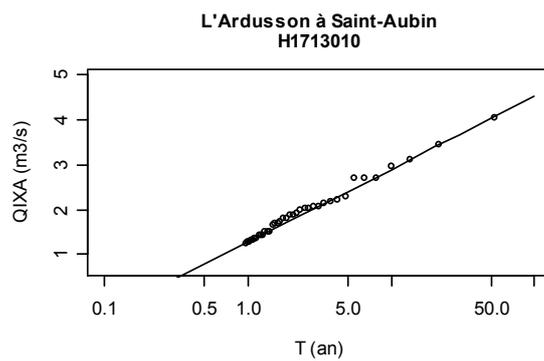
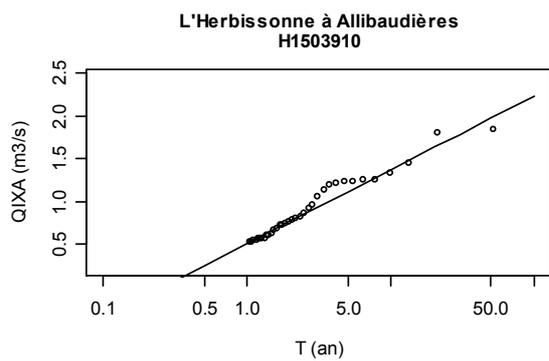
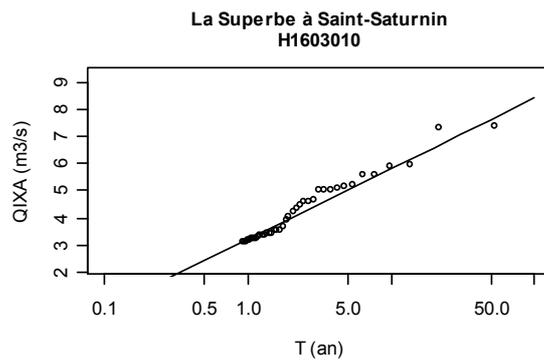
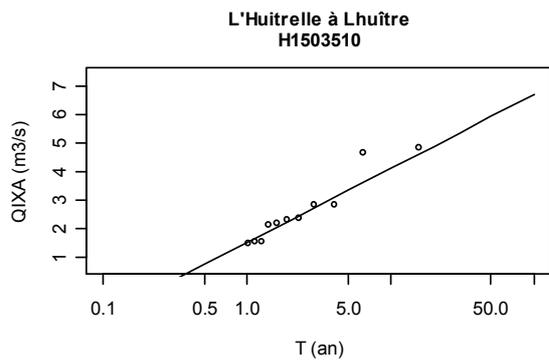
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



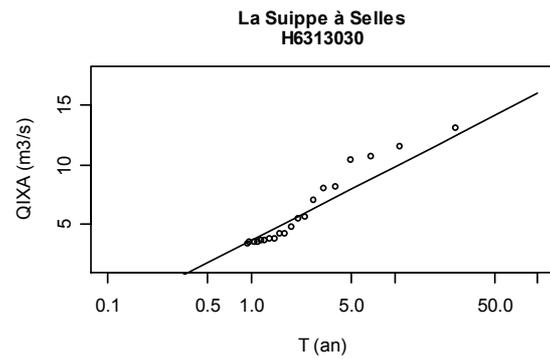
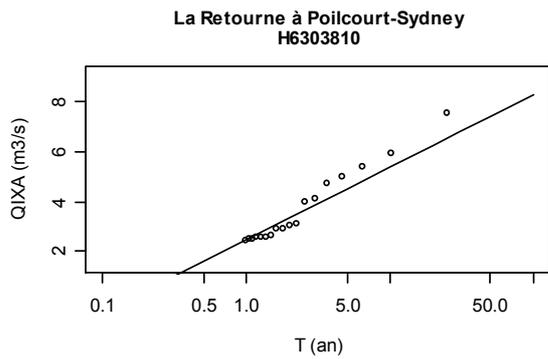
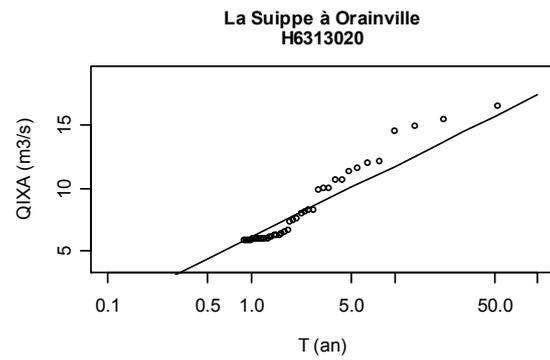
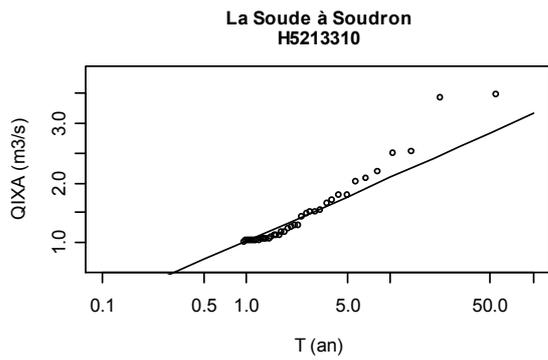
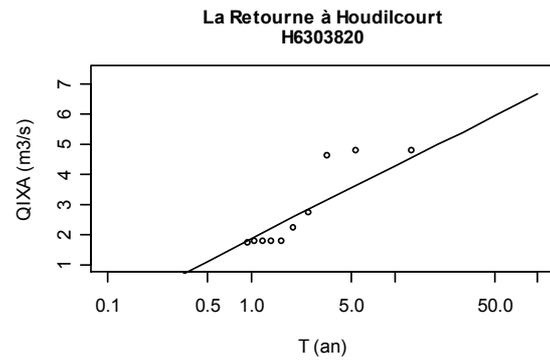
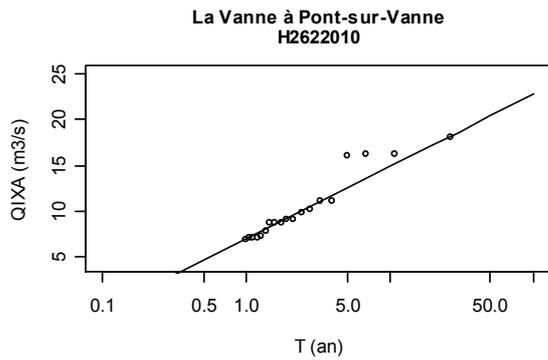
Annexe 2 – Hydrogrammes de crue normés (en gris) et forme moyenne (en noir) calculés sur les débits observés



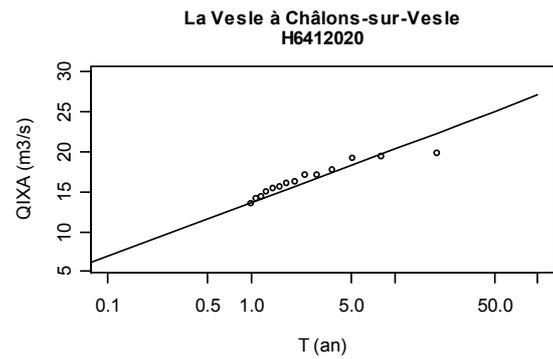
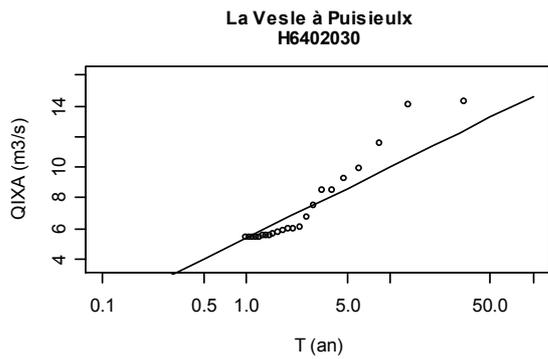
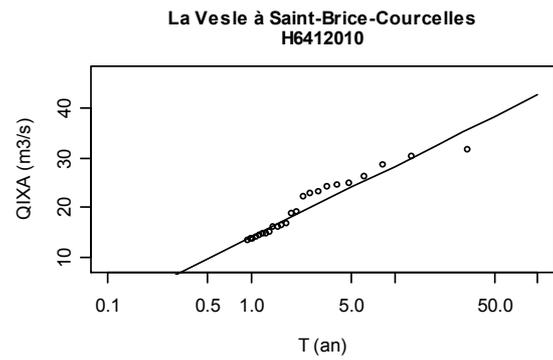
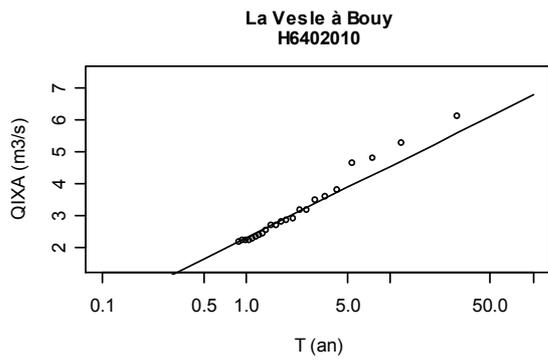
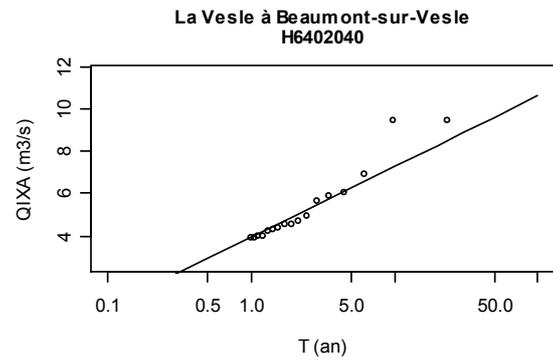
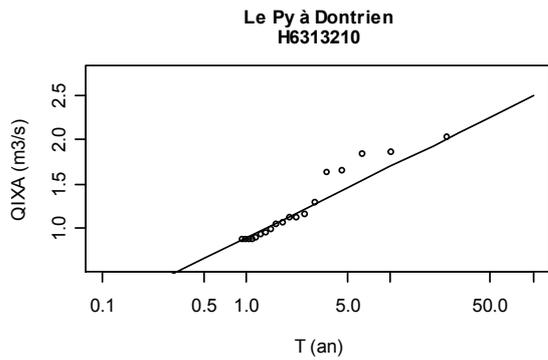
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



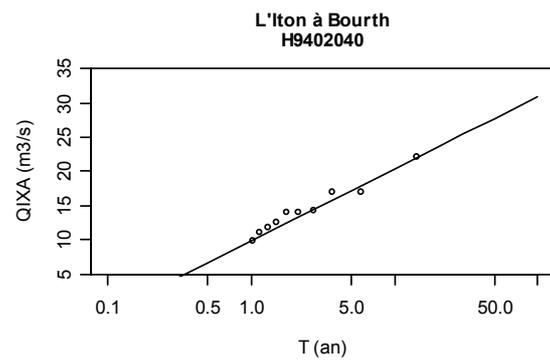
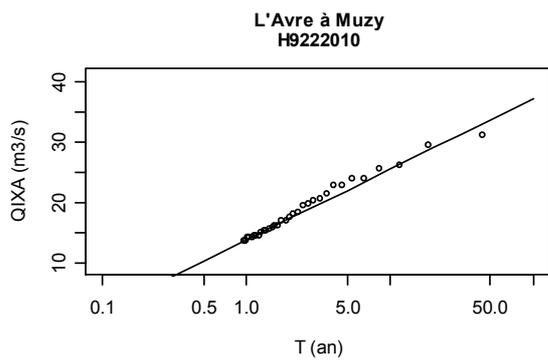
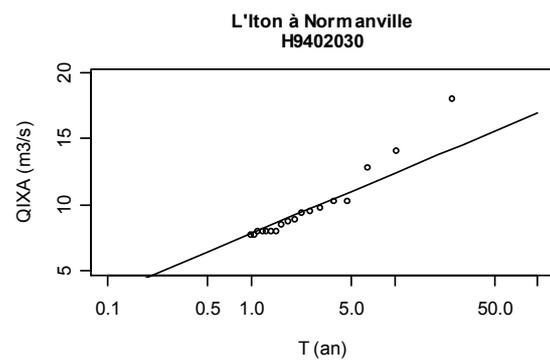
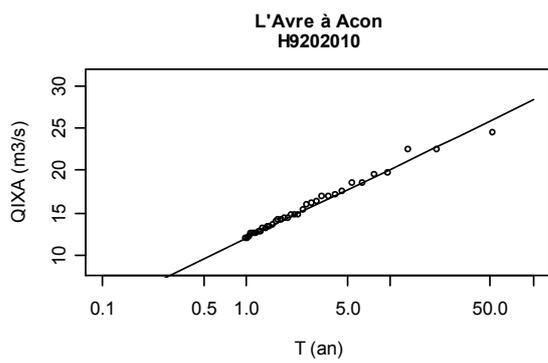
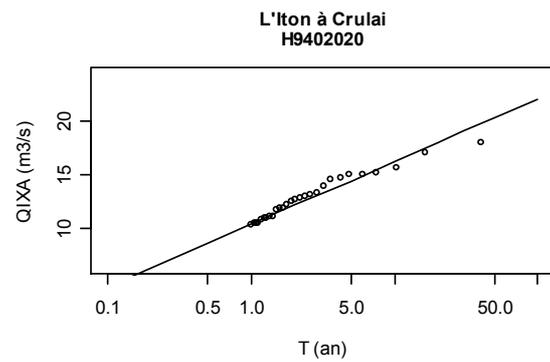
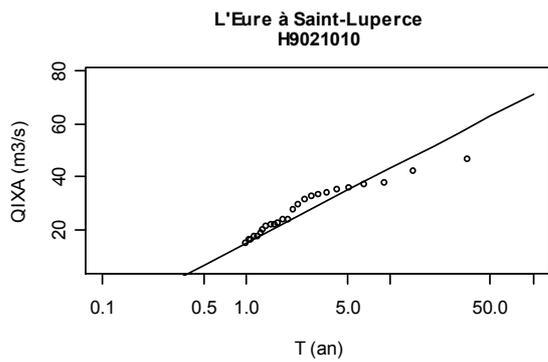
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



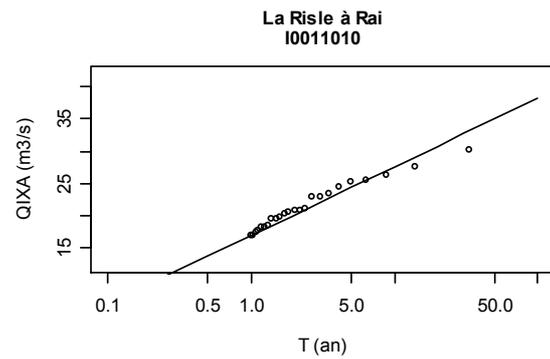
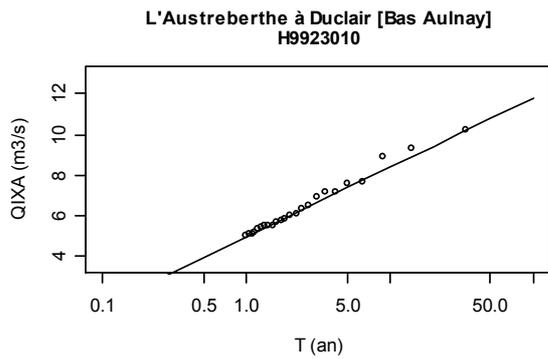
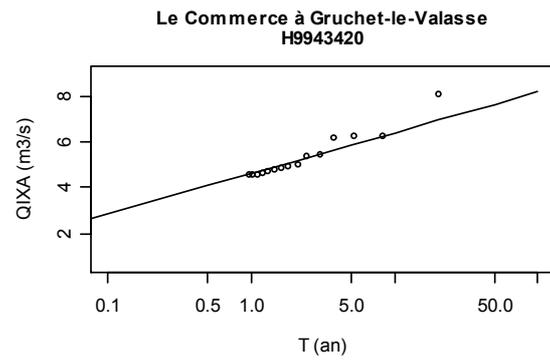
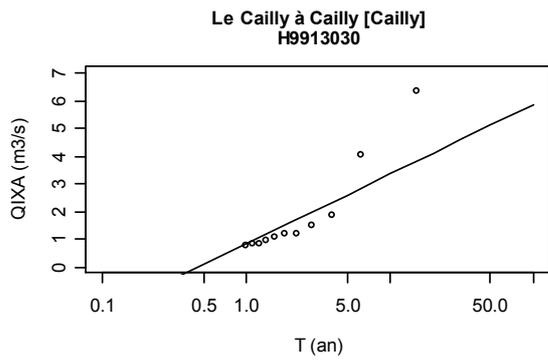
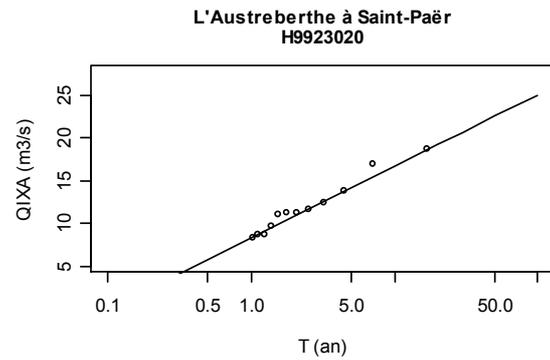
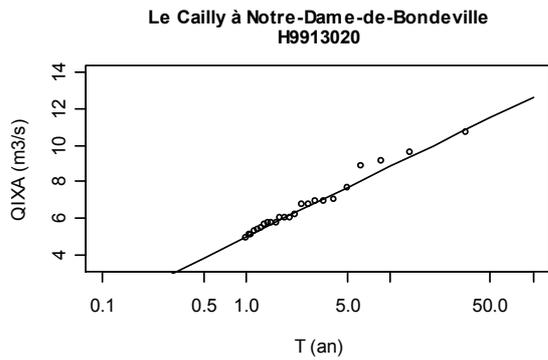
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



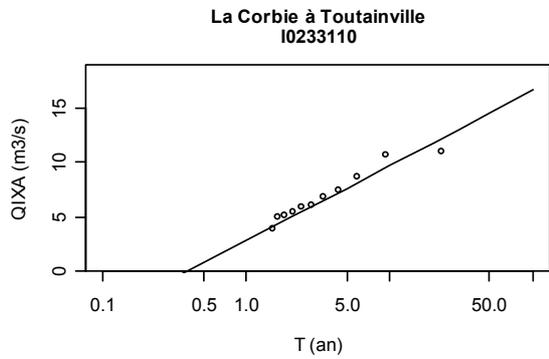
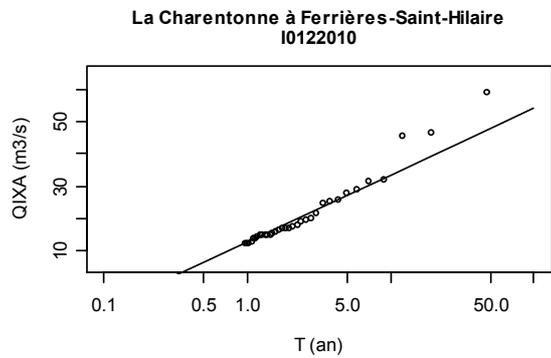
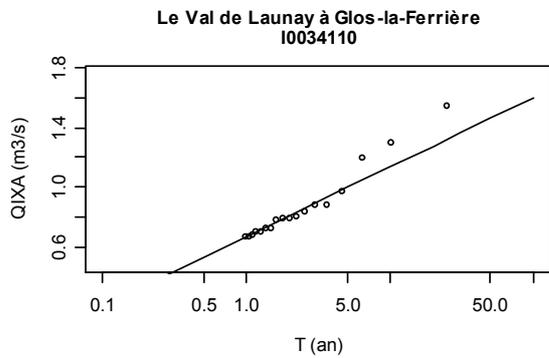
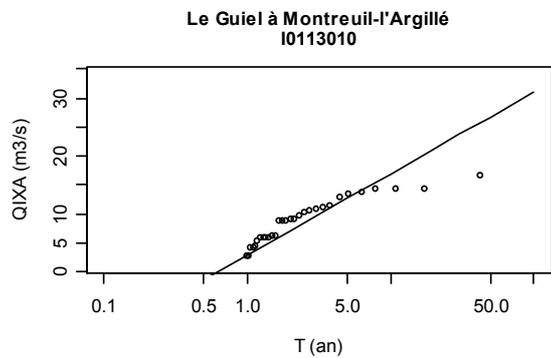
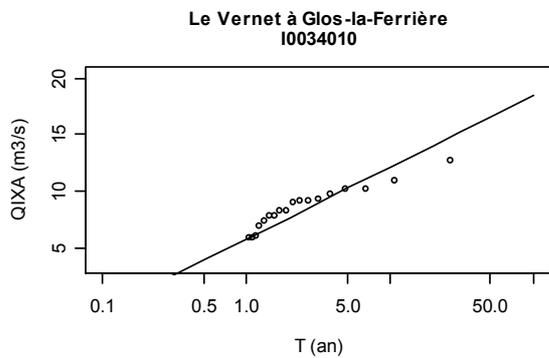
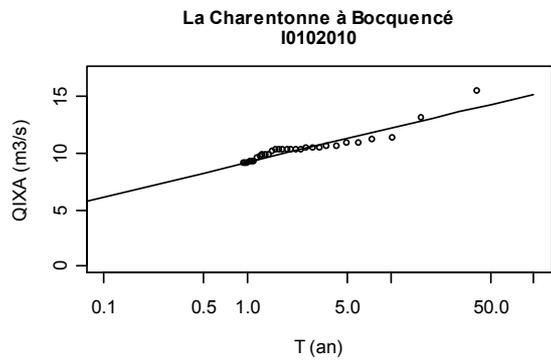
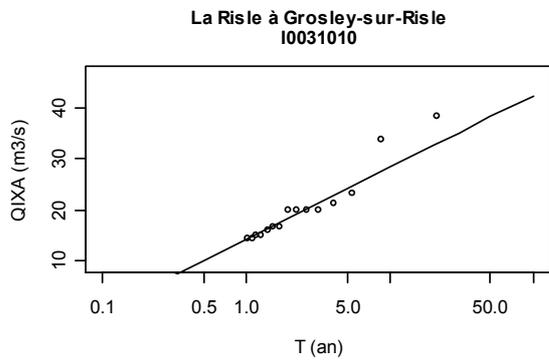
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



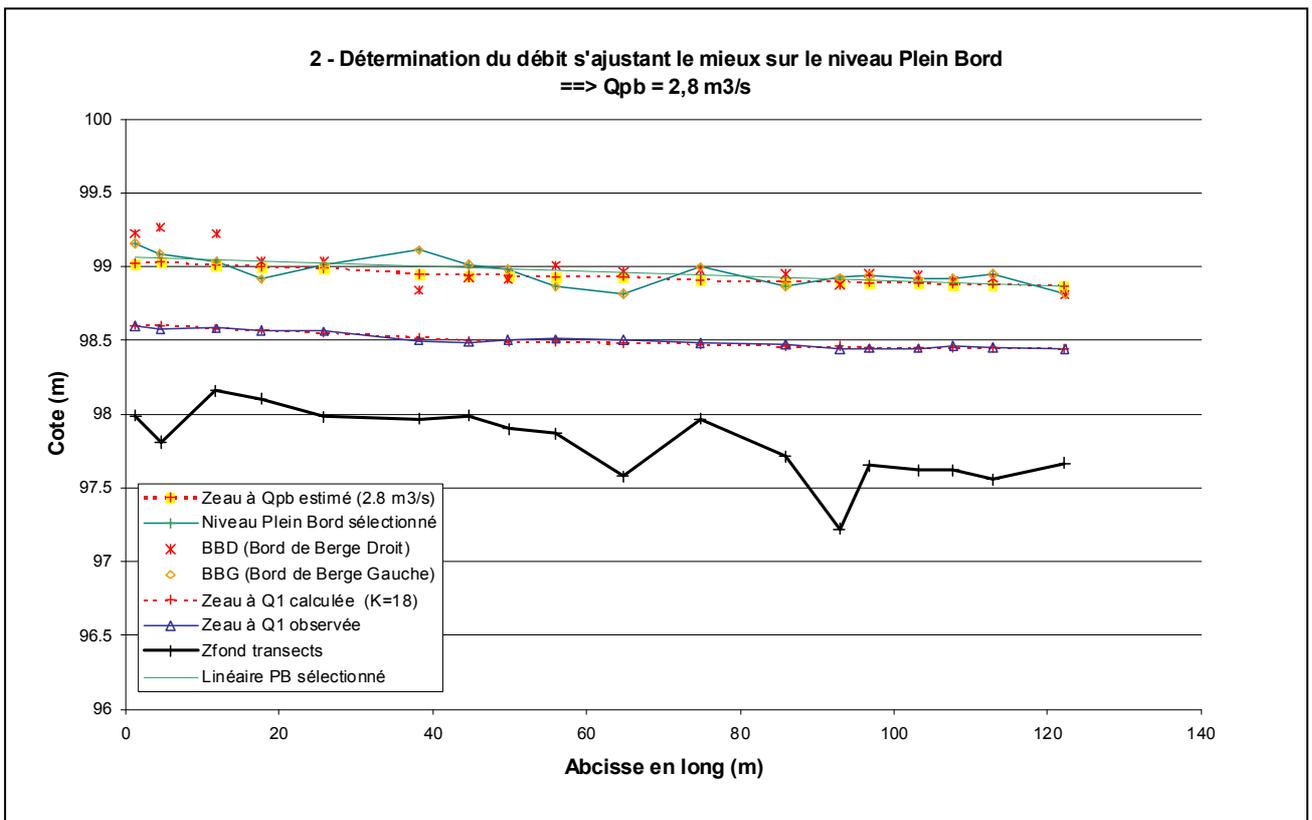
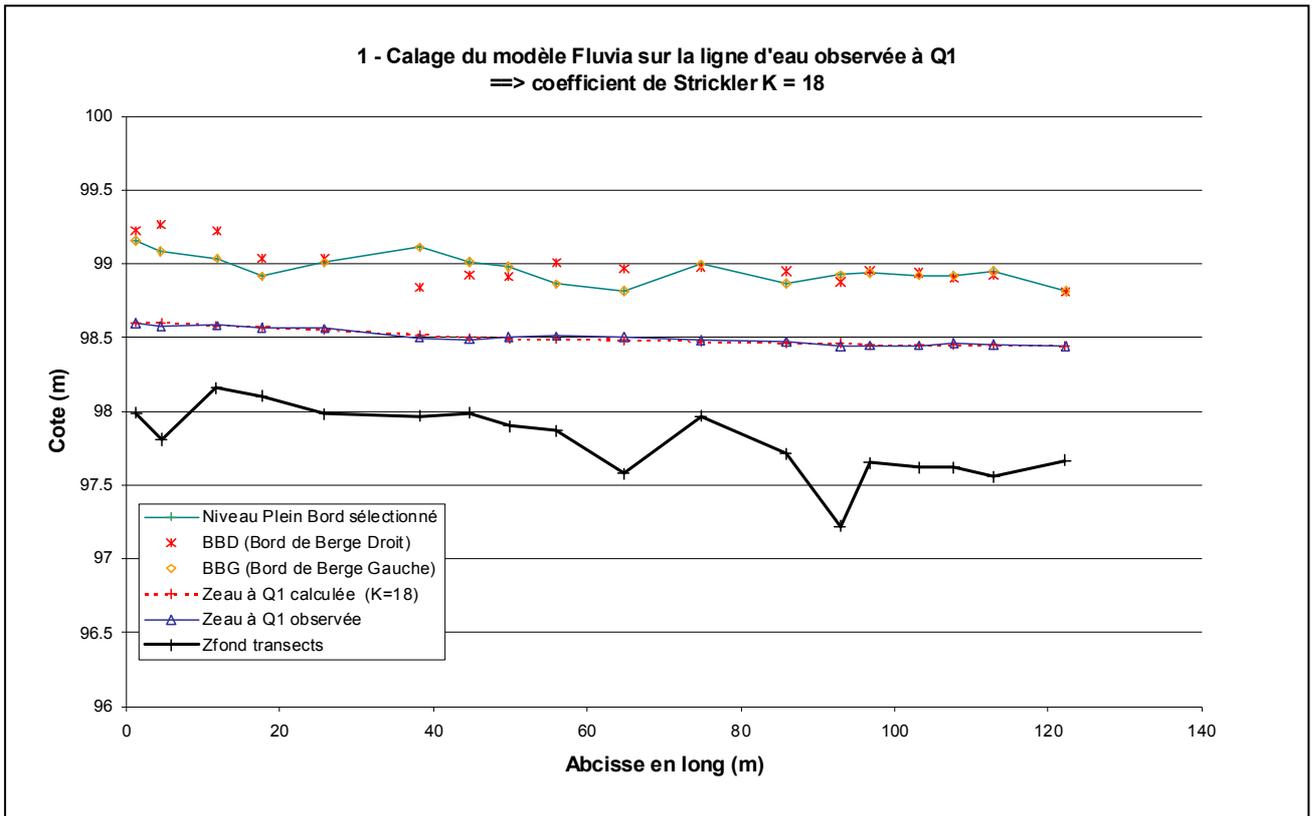
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



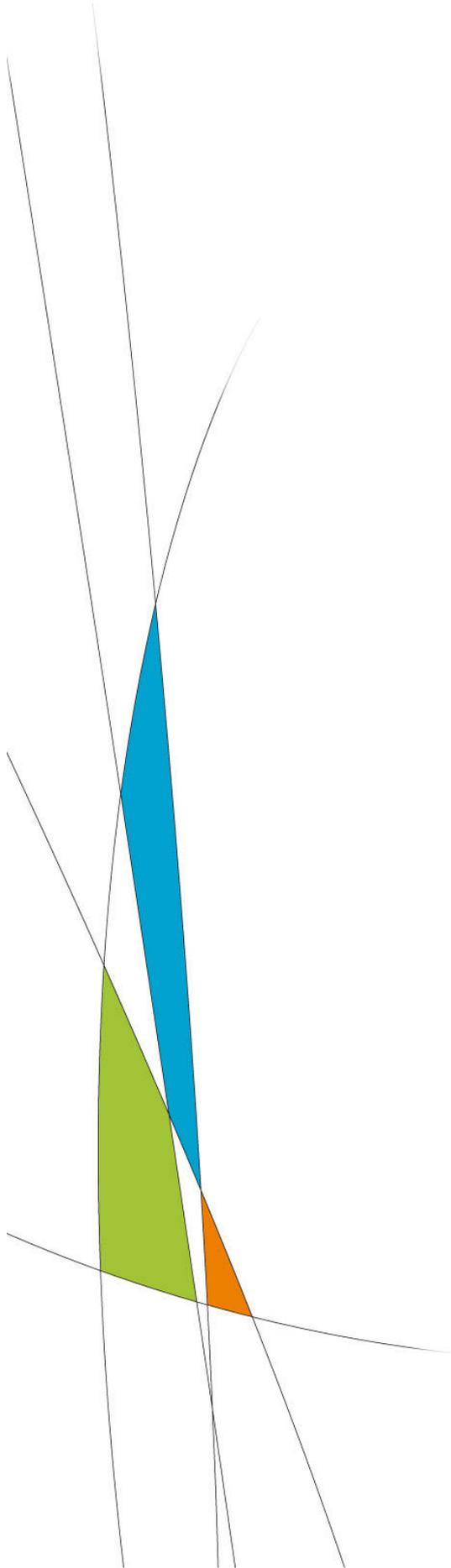
Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



Annexe 3 – Ajustements à la loi exponentielle des échantillons de valeurs sup-seuil



Annexe 4 – Détermination du Q_{pb} par modélisation hydraulique : exemple de la Soude



Direction générale
Parc de Tourvoie
BP 44 - 92163 Antony cedex
Tél. 01 40 96 61 21
Fax 01 40 96 62 25
www.cemagref.fr