



## Evaluation scientifique de l'impact de l'hydroélectricité dans le Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises



Station d'écologie expérimentale du CNRS à Moulis, 09200 Saint Giron

Mathieu FOURNIER, Johanna MESQUITA, Alain MANGIN





# TABLE DES MATIERES



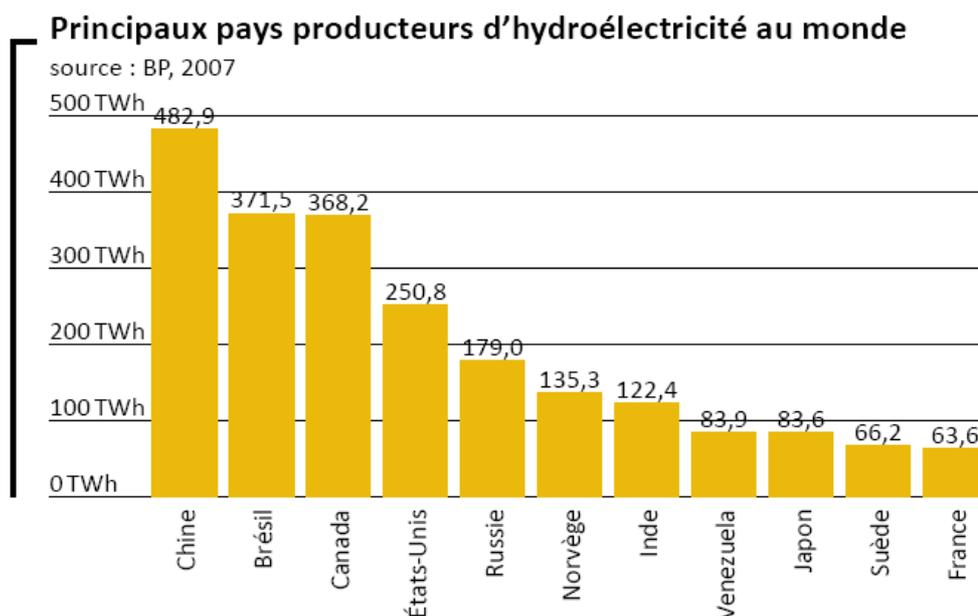
<b><i>I</i></b>	<b><i>Introduction</i></b>	<b>7</b>
<b><i>II</i></b>	<b><i>L'énergie hydroélectrique : définitions, contexte et attentes</i></b>	<b>9</b>
<b>II.A</b>	<b>L'énergie hydraulique : Quelques généralités</b>	<b>10</b>
<b>II.B</b>	<b>Formes de production d'énergie hydroélectrique : les différentes formes d'aménagements</b>	<b>10</b>
1.	Les centrales dites gravitaires	10
2.	Les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)	11
<b>II.C</b>	<b>Deux grands types de centrales hydroélectriques : grande et petite hydraulique</b>	<b>12</b>
1.	Grande hydraulique	13
2.	La petite hydraulique	14
<b>II.D</b>	<b>Contexte et attentes</b>	<b>16</b>
1.	Le cadre juridique relatif à l'énergie hydraulique	16
2.	Objectifs de la commande et contexte de l'étude	22
<b><i>III</i></b>	<b><i>Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques</i></b>	<b>24</b>
<b>III.A</b>	<b>Etat des lieux concernant l'impact des ouvrages hydroélectriques sur l'environnement</b>	<b>24</b>
1.	Liste synthétique des types d'impacts issus de l'implantation d'un barrage	25
2.	Mesures correctives et compensatoires	39
<b>III.B</b>	<b>Synthèse sur l'impact économique de l'énergie hydroélectrique</b>	<b>41</b>
1.	La fiscalité	41
1.a)	La taxe professionnelle et la taxe sur les propriétés bâties	42
1.b)	Les redevances liées à l'activité de production hydroélectrique	42
2.	Evaluation économique	46
2.a)	Les coûts directs de l'hydroélectricité	51
2.b)	L'analyse par observation des prix de marché	55
<b><i>IV</i></b>	<b><i>Proposition d'outils et de méthodes pour l'analyse de projets hydroélectriques</i></b>	<b>60</b>
<b>IV.A</b>	<b>Etat des lieux de l'existant</b>	<b>60</b>
1.	Aspects réglementaires	60
2.	Analyse du régime du cours d'eau et du potentiel hydroélectrique	66
3.	Densité d'aménagements et de cours d'eau court-circuités	73

4. Influence du cumul des ouvrages	76
<b>IV.B Etude de la morphologie naturelle des cours d'eau : incidence des ouvrages 83</b>	
1. Le profil en long	83
2. Intégrale hypsométrique	91
3. La densité de drainage	93
<b>IV.C Etude de la variabilité hydrologique : influence des barrages sur les variables de contrôle 95</b>	
1. Variabilité hydrologique des séries de débit	95
2. Observations des perturbations du fonctionnement des hydrosystèmes	111
3. Analyse de l'hydrogramme : paramètres hydrologiques affectés et lien avec les écosystèmes	123
<b>V Etat écologique des cours d'eau (Indice IBGN et IP) 134</b>	
<b>V.A Indice Biologique Global Normalisé :IBGN 134</b>	
<b>V.B Indice biologique diatomées : IBD 137</b>	
<b>V.C Indice Poisson Rivière: IPR 138</b>	
<b>V.D Débit réservé 148</b>	
<b>VI Conclusion 153</b>	
<b>Bibliographie 155</b>	
<b>Liste des figures 159</b>	
<b>Liste des tableaux 162</b>	
<b>Glossaire 163</b>	

## I Introduction

Les barrages sont nombreux dans les Pyrénées. Le plus souvent construits entre **1930** et **1960**, ils ont profondément modifié les règles de vie des vallées. Ils ont été l'occasion de créer des routes, une activité nouvelle, modifier des itinéraires. Ils sont souvent un but ou un point de départ de randonnées estivales ou hivernales. L'énergie hydroélectrique, qui en est tirée, est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de **contestations environnementales**, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone.

L'hydroélectricité est la 2ème source d'énergie mondiale (environ 3000 TWh<sup>1</sup> produits en 2005 ce qui correspond à 16% de la production totale d'énergie). De plus, elle a la particularité d'être présente sur tous les continents et d'y être répartie de façon homogène. La France arrive en troisième position en Europe derrière la Norvège et la Suède dont les gisements sont très importants ; ce qui illustre le fort niveau d'équipement français.



**Figure I-1 Pays producteurs d'énergie hydroélectrique (représenté selon la part de la production).**

L'hydroélectricité est également 2ème au classement des installations de production d'énergie en France avec un total de 63.6 TWh produits en 2007 (soit 11% de l'énergie française produite, le nucléaire en représentant 78%). Les principales régions productrices d'énergie hydroélectrique sont Rhône-Alpes (39%), Midi Pyrénées (16,7%), PACA (14,6%) et Alsace (11,4%).

<sup>1</sup> TWh = Téra (1012) watt heure

Aujourd'hui la plupart des cours d'eau en Ariège ont été aménagés pour différents usages liés aux activités anthropiques : hydroélectricité, protection contre les inondations des zones urbaines et agricoles etc. La question des impacts des aménagements et des usages des cours d'eau sur l'écosystème aquatique est donc explicitement posée. En effet, aménager une rivière signifie modifier en profondeur les paramètres morphologiques et hydrologiques qui lui sont propres. Au-delà, c'est toute la vie aquatique liée à l'écosystème qui est perturbée de façon plus ou moins irréversible surtout dans un contexte de changement global. De plus, face à la demande toujours croissante en énergie, les demandes de construction de centrales et microcentrales sont de plus en plus nombreuses. Il est donc nécessaire aujourd'hui de fournir aux décideurs des outils performants pour évaluer de façon objective l'ensemble des projets soumis à évaluation. Il est donc ici question de faire l'état des lieux sur la situation de l'Ariège en terme d'hydroélectricité, ainsi que de fournir une grille d'évaluation pour les futurs ouvrages basée sur une méthodologie performante et à partir de données chiffrées qui se veulent objectives.

Cette étude synthétise et cartographie tout d'abord les différents aménagements et l'état écologique des rivières du Salat et de l'Ariège en amont de Foix, d'autre part fait un diagnostic hydrologique et morphologique des rivières aménagées. Avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), des modèles numériques de terrain (MNT) et des logiciels informatiques de calcul, de véritables outils de gestion des cours d'eau sont mis au point et ont été intégrés dans la grille d'évaluation proposée.

## **II L'énergie hydroélectrique : définitions, contexte et attentes**

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins...). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

La force motrice de l'eau est utilisée depuis des siècles : les moulins à eau moulaient le grain, actionnaient les soufflets de forge... Quant aux grands barrages hydrauliques, réalisés dans les années 50, ils sont venus contribuer à l'effort d'autonomie énergétique de la France, lui permettant d'afficher aujourd'hui près de 15 % de production d'électricité à partir des énergies renouvelables. L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone.

Cette énergie est également utilisée pour alimenter des sites isolés (une ou deux habitations, un atelier d'artisan, une grange...) ou produire de l'électricité, vendue à plus petite échelle.

On parle alors de petite centrale hydraulique (puissance allant de 500 kW à 10 MW), de micro-centrale (de 50 kW à 500 kW), voire de pico-centrale (moins de 50 kW).

Ces petites centrales participent :

- à la production électrique nationale à hauteur de 1,5 %
- à la production d'origine hydraulique à hauteur de 10 %

La région Midi-Pyrénées possède le plus grand nombre de centrales hydrauliques de petites puissances (près de 400 - 500 MW de puissance installée), grâce aux réservoirs d'eau que constituent la chaîne des Pyrénées et le Massif Central. La gestion de ces installations est assurée par des producteurs autonomes sous forme de concession ou d'autorisation.

L'énergie hydraulique est une des énergies renouvelables les plus difficiles à développer aujourd'hui en France. Les enjeux environnementaux en terme de protection des cours d'eau limitent les perspectives d'ouverture de nouveaux sites. De nombreux cours d'eau sont classés, excluant tout nouvel aménagement. Certaines opérations récentes exploitent l'énergie de l'eau déjà canalisée : réseaux d'adduction ou d'irrigation (encore faut-il que le potentiel en terme de puissance soit là). Il faut tenir compte également des droits de propriétés de l'eau et des berges. Il est à noter qu'un groupe de travail interministériel étudie la simplification de ces procédures.

## **II.A L'énergie hydraulique : Quelques généralités**

Les barrages permettent de capter l'énergie du cycle de l'eau. Ils transforment l'écoulement de l'eau en énergie électrique. Cet écoulement à la surface de la Terre représente un potentiel énergétique considérable.

Les avantages de l'hydroélectricité sont présentés comme ceci : longévité des ouvrages, modicité d'entretien, souplesse de fonctionnement (association favorable avec d'autres énergies intermittentes), possibilité d'associer la production à d'autres usages (écrêtement ou laminage des crues, soutien des étiages (lorsque le cours d'eau est à son plus bas niveau, vers la fin de l'été), alimentation urbaine...), source nationale ou locale, renouvelable et propre. Il semble cependant que certains de ces avantages sont discutables et ne contrebalancent pas les inconvénients.

En France, du fait de nos montagnes et de notre climat tempéré, les barrages constituent l'essentiel de nos sources d'énergies renouvelables. L'équipement des grands sites aménageables est presque achevé. La capacité de production atteint au total 25 GW en 2000 et cette même année les barrages ont produit 72.5 TWh d'électricité. La part de l'hydraulique dans la production totale d'électricité se réduit depuis. L'eau retenue par ces barrages constitue un stock d'énergie électrique qui peut à tout moment être injectée dans le réseau EDF. Les barrages sont donc très complémentaires des autres énergies intermittentes ou peu adaptables. Par exemple, la complémentarité avec l'énergie nucléaire est indiscutable lors des pics de consommation au cœur de l'hiver.

## **II.B Formes de production d'énergie hydroélectrique : les différentes formes d'aménagements**

Il existe **trois formes principales de production** d'énergie hydroélectrique :

### **1. Les centrales dites gravitaires**

Centrales pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont uniquement gravitaires. Les centrales gravitaires sont celles mettant à profit l'écoulement de l'eau au long d'une dénivellation du sol. On peut les classer selon trois types de fonctionnement, déterminant un service différent pour le système électrique. Ce classement se fait en fonction de la constante de vidage, qui correspond au temps théorique qui serait nécessaire pour vider la réserve en turbinant à la puissance maximale. On distingue ainsi :

#### **Au fil de l'eau :**

-les centrales dites "**au fil de l'eau**", dont la constante de vidage est généralement inférieure à 2 heures. Les centrales au fil de l'eau, principalement installées dans des zones de plaines présentent pour ces raisons des retenues de faible hauteur. Elles utilisent le débit du fleuve tel qu'il se présente, sans capacité significative de modulation par stockage. Elles fournissent une énergie de

base très peu coûteuse. Elles sont typiques des aménagements réalisés sur les fleuves importants comme le Rhône et le Rhin.

**Avec retenue (barrages ou lacs) :**

-les centrales "**éclusées**" dont la constante de vidage est comprise entre 2 et 200 heures. Les centrales éclusées présentent des lacs plus importants, leur permettant une modulation dans la journée voire la semaine. Leur gestion permet de suivre la variation de la consommation sur ces horizons de temps (pics de consommation du matin et du soir, différence entre jours ouvrés et week- end...). Elles sont typiques des aménagements réalisés en moyenne montagne.

-les "**lacs**" (ou réservoirs), dont la constante de vidage est supérieure à 200 heures. Les centrales-lacs correspondent aux ouvrages présentant les réservoirs les plus importants. Ceux-ci permettent un stockage saisonnier de l'eau, et une modulation de la production pour passer les pics de charge de consommation électrique : l'été pour les pays où la pointe de consommation est déterminée par la climatisation, l'hiver pour ceux où elle est déterminée par le chauffage. Ces centrales sont typiques des aménagements réalisés en moyenne et haute montagne.

## **2. Les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)**

Les STEP pour lesquelles un dispositif artificiel permet de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Celles ci comprennent d'ailleurs fréquemment une partie gravitaire. Ces centrales, en plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, comportent un mode pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse, par exemple la nuit, pour la redistribuer, en mode turbinage, lors des pics de consommation.

On doit également distinguer la puissance de l'installation selon la hauteur de chute et du débit de l'eau. On distingue alors deux types de centrales hydroélectriques. Les barrages ou centrales de haute chute (grande hauteur, faible débit) et de moyenne chute (dénivelé moyen, débit assez important) dans les régions montagneuses. D'autre part, on trouve sur les cours d'eau les centrales de basse chute (dénivelé faible, fort débit). L'hydroélectricité revêt dans les grands réseaux interconnectés une importance fondamentale, dans la mesure où les centrales à haute chute (barrages) permettent de répondre aux brusques variations de la demande en électricité (Figure II-1).

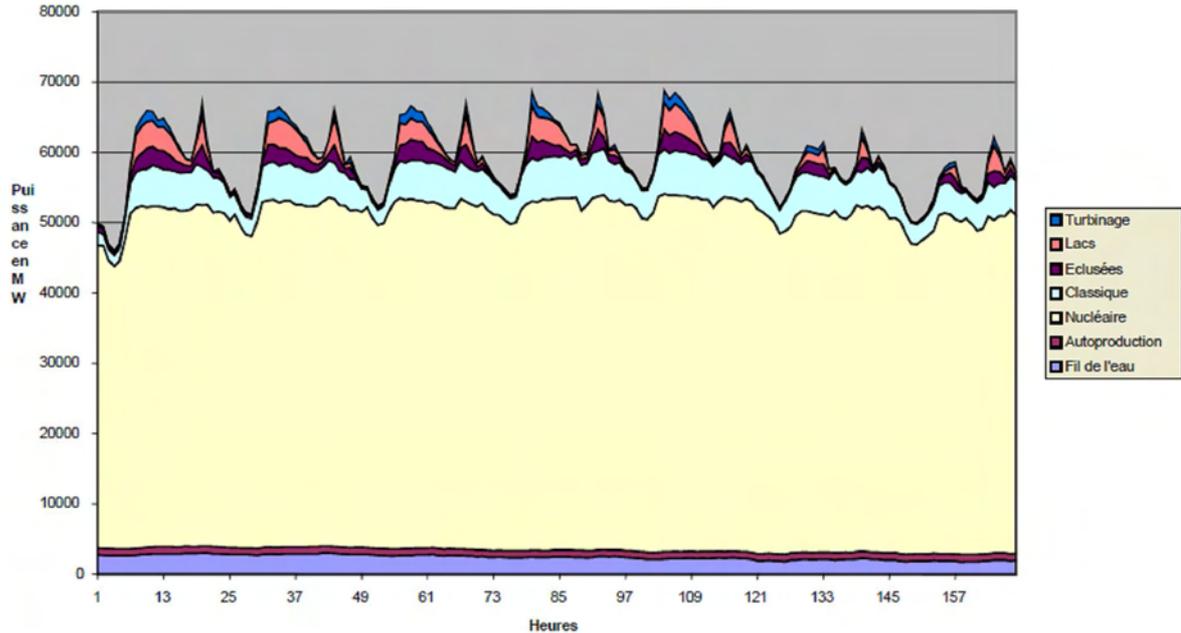


Figure II-1 Exemple de la production d'électricité durant une semaine en automne 2003. (Ministère de l'économie et des finances et de l'industrie, RET, 2006).

## II.C Deux grands types de centrales hydroélectriques : grande et petite hydraulique

Le terme "centrale hydraulique" recouvre une très large gamme de types et tailles d'installations. Depuis les très petites turbines installées sur l'arrivée d'eau potable des chalets de montagne, permettant l'autonomie électrique, jusqu'aux très grands barrages qui ont nécessité de noyer des vallées entières.

Les centrales hydrauliques sont classées en deux familles : celle de la grande hydraulique et celle de la petite hydraulique. La petite hydraulique est elle-même divisée en plusieurs types de centrales, la pico et la micro-hydraulique. Ce classement est réalisé en fonction de la puissance fournie par les centrales (Tableau II-1).

	Pico-hydraulique	Micro-hydraulique	Petite-hydraulique	Grande-hydraulique
Puissance	2 kW à 50 kW	50 kW à 500 kW	500 kW à 10 MW	> 10 Mw

Tableau II-1 Différents types de centrales hydroélectriques.

## 1. Grande hydraulique

L'énergie hydraulique est utilisée depuis des siècles pour produire de l'énergie mécanique. L'hydroélectricité commence à se développer dans les années 1880 (invention en France de la turbine en 1827) et les turbines électriques ont quasi complètement remplacé les usages mécaniques à la fin du XIXe siècle en Europe. Le développement des réseaux et la recherche d'économies d'échelle aboutissent au développement de la grande hydraulique dès les années 30 au détriment des petites installations. Aujourd'hui, le développement des grands barrages se fait essentiellement en Asie et Amérique du Sud et soulève de nombreuses questions d'environnement et de respect des populations. Dans le cas de la grande hydraulique, ceux-ci sont liés soit à l'énorme énergie potentielle accumulée derrière les barrages de haute chute.

Les points les plus sensibles des grands barrages sont :

- L'appui du barrage sur la fondation naturelle
- Le risque de glissement de terrain dans le lac de retenue, notamment en cas de séisme.
- Le risque de dégradation progressive du barrage lui-même provoqué par des infiltrations d'eau, ou par le vieillissement des matériaux constitutifs.
- Dans le cas des barrages en terre, ou de berges des canaux d'amenée, le risque d'érosion interne et d'apparition de renards, capables de dégénérer rapidement en rupture de l'ouvrage.

Les conséquences d'une rupture de barrage (ou de canal) pourraient être dramatiques pour les installations et les populations qui se trouvent en aval. Aussi, des précautions très importantes doivent être prises pour assurer la surveillance des points sensibles (surveillance géologique des terrains, détection d'infiltrations d'eau, visites périodiques des ouvrages par des experts), et des plans d'urgence préparés pour assurer dans les meilleures conditions l'évacuation des populations concernées en cas d'alerte.

Les grands ouvrages hydrauliques sont réalisés là où c'est possible, et ne sont pas nécessairement à proximité des lieux de consommation électrique. De nombreux cas de figure sont possibles:

- Insertion dans un réseau important très haute tension (THT) :En Europe occidentale, et notamment en France, les distances entre les zones de montagne et les lieux de consommation sont certes importantes, mais le réseau THT a progressivement été renforcé et la production hydraulique est écoulee directement dans ce réseau.

- Transport de l'électricité à grande distance en courant continu :  
Dans quelques cas, les capacités de production sont à la fois très importantes et très éloignées des lieux de consommation. C'est le cas notamment au Québec et au Brésil. Dans ces deux cas, le transport à grande distance doit se faire en courant continu afin de diminuer les pertes en lignes. Le courant continu est transformé en courant alternatif.

- Localisation d'industries grosses consommatrices à proximité :

Aux débuts de l'utilisation de l'énergie hydraulique, on a implanté les industries consommatrices dans les vallées de montagne, à proximité des ouvrages. En France par exemple, l'électro métallurgie s'est implantée dans les vallées de la Maurienne et de la Romanche.

La problématique de l'utilisation de l'électricité produite par la grande hydraulique est au cœur du développement de cette forme d'énergie dans les pays en développement. Le potentiel hydraulique de certains de ces pays, en Asie, en Amérique du Sud et en Afrique, est considérable mais les réseaux de transport sont quasi inexistant. Tout projet de développement doit donc prendre en compte à la fois les ouvrages hydrauliques eux-mêmes, les consommateurs visés, et le transport.

Le potentiel hydraulique techniquement réalisable dans le monde est considérable. Encore faut-il que l'électricité produite ait des clients, et qu'elle puisse leur être amenée à un coût compétitif avec les autres formes d'énergie. On est donc amené à distinguer le "techniquement faisable" de l'"économiquement faisable" dans les conditions actuelles. On observe un écart important entre ce qui est techniquement faisable et ce qui l'est économiquement. Cet écart peut être dû soit aux inconvénients de tel ou tel aménagement, au coût trop élevé d'un ouvrage, à l'absence de clients à proximité, ou aux difficultés de financement, quelles qu'en soient les raisons (instabilité politique de la région, politique des institutions financières, etc.)

## 2. La petite hydraulique

Aucune définition officielle n'a été établie pour les petits ouvrages. On considère alors que les ouvrages inférieurs à 10 mètres de haut sont des petits barrages.

Le terme de « petite hydraulique » désigne communément des installations de **capacité inférieure ou égale à 10 MW** (petites centrales hydroélectriques ; PCH). Ce seuil, lié à des considérations administratives ou juridiques, diffère selon les pays : au Brésil ou en Chine, ces limites peuvent atteindre 50 MW.

Les petites centrales sont elles-mêmes divisées en plusieurs catégories dont la définition n'est pas établie de manière arrêtée. Ces catégories sont pourtant importantes puisque, suivant la puissance, les caractéristiques techniques, institutionnelles, opérationnelles et financières des aménagements sont très différentes. Voici, ci-dessous, une catégorisation qui est communément admise (Figure II-2) :

Catégorie	Puissance installée	Caractéristiques
Hydraulique artisanale	-	Roues à eau. Utilisation de la force mécanique
Pré-électrification	< 1 kW	Charge de batteries avec une installation "dynamo" (courant continu) sur roue à eau
"Kits" hydro-domestiques	50 Watt - 2 kW	appareils compacts "prêts à brancher". Installation simple réalisable par l'utilisateur
Pico-centrales	(1) 2 - 50 kW	Approche technique et planification simplifiées : les rendements sont moyens
Micro-centrales	50 - 500 kW	Approche technique et planification simplifiées : les rendements sont moyens
"Petites centrales"	500 kW - 10 MW	Niveau technique international

**Figure II-2 Tableau des catégories de petites centrales, (Ministère de l'économie et des finances et de l'industrie, RET, 2006).**

Remarque:

- Certaines instances internationales mettent la limite des micro-centrales à 300 kW, d'autres à 1 MW ;
- Certaines sources définissent des "mini-centrales" entre 500 kW et 2'000 kW ;
- Aux États-Unis on parle de "Petite Hydraulique" jusqu'à 30 MW.

Il n'existe pas de définition universelle du terme « petite centrale hydroélectrique ». Selon les définitions locales, ce terme peut couvrir des capacités nominales de quelques kilowatts à 50 mégawatts ou plus. Toutefois, la puissance installée n'est pas toujours un bon indicateur de la taille d'un projet. Une « petite centrale » hydroélectrique à basse chute est loin d'être petite, car en général les projets à basse chute ont besoin d'un volume d'eau beaucoup plus important et de plus grosses turbines que des projets à haute chute.

Les perspectives de développement de la petite hydraulique sont étroitement liées au contexte réglementaire constitué par la directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001 qui constitue le texte de référence en matière d'énergie renouvelable. La directive comprend notamment les points suivants :

- La directive fixe un objectif global de 22 % pour la part d'électricité renouvelable consommée dans l'Union en 2010. En ce qui concerne la France, cet objectif est de **21%**, alors que la part d'électricité renouvelable atteint 15% en 1999 ;
- Un régime de soutien pour le développement des sources d'énergie renouvelables sera appliqué dans chacun des états membres, pour compenser le fait que les énergies « classiques » n'internalisent pas les coûts externes liés aux effets sur la santé et l'environnement.
- Un mécanisme de garantie d'origine de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables sera appliqué au plus tard le 27 octobre 2003. La garantie d'origine ne garantit pas forcément l'accès au régime de soutien ;

- Les états membres prennent les mesures nécessaires pour faire en sorte que les opérateurs de systèmes de transport et de distribution présents sur le territoire garantissent le transport et la distribution de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

Plus récemment, l'arrêté du 15 décembre 2009 relatif à la programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité a fixé comme objectif, concernant la production la production hydroélectrique en France métropolitaine, d'accroître l'énergie produite en moyenne sur une année de 3 TWh et d'augmenter la puissance installée de 3 000 MW au 31 décembre 2020.

## **II.D Contexte et attentes**

### **1. Le cadre juridique relatif à l'énergie hydraulique**

#### 1. a) Objectifs Nationaux

Les enjeux liés à l'hydroélectricité doivent s'apprécier au regard des principaux objectifs de la **politique énergétique française**. Ceux-ci sont désormais énoncés par **la loi de programme du 13 juillet 2005**. Dans ce contexte, l'hydroélectricité, fait aujourd'hui partie d'une composante incontournable de part : (i) une politique de développement des énergies renouvelables, (ii) de renforcement de la sécurité d'approvisionnement en développant les énergies nationales et (iii) de lutte contre l'effet de serre. A ce titre, elle constitue une énergie du développement durable. (Rapport Dambrine, 2006), puisque l'hydraulique est une filière de production d'électricité qui n'émet pas de gaz à effet de serre. Pour fixer les idées, si les **70 TWh** de production française annuelle moyenne d'électricité d'origine hydraulique étaient produits à partir de centrales à charbon, cela conduirait à un surcroît d'émissions de gaz à effet de serre de compris entre 55 et 70 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub> par an. Ce chiffre est à rapprocher des émissions totales de gaz à effet de serre en France qui sont de l'ordre de 560 millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>. Autrement dit, le potentiel hydroélectrique français permet, dans les conditions actuelles de déduire de 10 à 12 % les émissions nationales de gaz à effet de serre. L'objectif inscrit dans la loi de division par 4, d'ici 2050, des émissions de gaz à effet de serre, confère donc une importance toute particulière à l'hydroélectricité.

Par ailleurs, en application de la directive « Sources d'énergies renouvelables (SER) » **n° 2001/77/CE du 27 septembre 2001**, la France s'est engagée à atteindre un objectif de 21 % pour la part d'électricité d'origine renouvelable dans la consommation française en 2010, contre 14 % en 2004. Loin d'être acquis, cet objectif supposera non seulement une forte mobilisation de nouvelles sources d'électricité d'origine renouvelable, mais également de maintenir ou d'augmenter la production d'hydroélectricité.

De plus, suite à la **loi de 2005** fixant les orientations de la politique énergétique française (**loi POPE**<sup>2</sup>), la valorisation de l'eau pour le développement de la production d'électricité d'origine renouvelable a été inscrite dans le Code de l'Environnement. Ce travail fait suite au rapport de

---

<sup>2</sup> Loi de programmation de la politique énergétique française, loi n°2005-781 du 13 juillet 2005

l'inspection générale du ministère de l'industrie sur les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France publié en mars 2006 (dit Rapport DAMBRINE). Ce rapport évaluait le potentiel de production annuelle à 13,4 TWh en tenant compte des différents enjeux environnementaux et du gisement hydraulique (**Tableau II-2**).

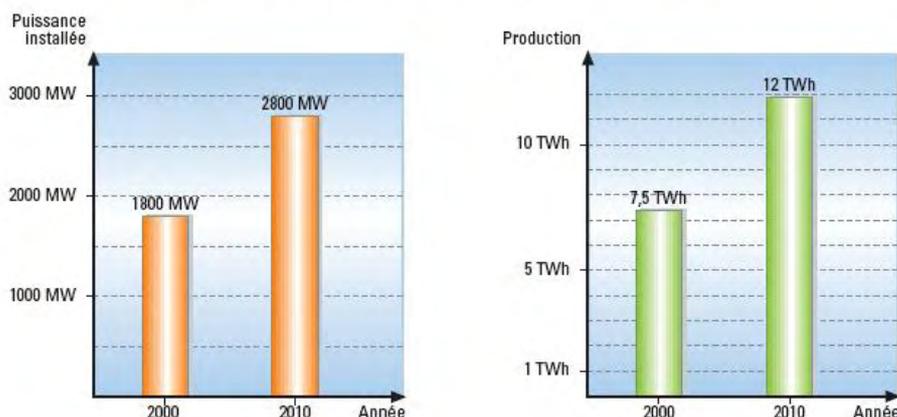
La stratégie nationale pour l'**hydroélectricité** est avant tout le **maintien** du niveau de production **hydroélectrique** et **son développement** partout où il est compatible avec les objectifs de maintien du bon état des milieux aquatiques.

Contraintes	Répartition du potentiel suivant les contraintes environnementales (en TWh/an)
Sous total du potentiel sans contrainte sur ZNIEFF et autres	13,4
Potentiel sans contrainte	Dont 3,5
Potentiel situé sur ZNIEFF	Dont 9,9
Potentiel situé sur parcs naturels (yc ZPS)	4,7
Potentiel situé sur SIC	0,7
Potentiel situé sur rivières réservées	9,6
Potentiel Total	28,4

**Tableau II-2 Impact potentiel des contraintes environnementales (Rapport DAMBRINE)**

En matière de **productible**, l'objectif (0-7 TWh d'ici 2015, voire 10 TWh d'ici 2020) reste modeste dans sa contribution globale, puisqu'il ne correspondrait, dans le meilleur des cas, qu'à 10 % du chemin à parcourir entre les 12 % actuels et les 21 % à atteindre (comprenant toutes les énergies renouvelables solaires, éolien...). Ce potentiel supplémentaire de développement est du même ordre de grandeur que les marges d'incertitudes sur l'évolution de la consommation d'ici là, mais il n'en reste pas moins important à mobiliser (**Figure II-3**).

**Objectifs pour la petite hydraulique à l'horizon 2010**



\* Les chiffres diffèrent entre sources de données ; on parle parfois d'une production annuelle de 5 TWh et d'une puissance installée de 1 200 MW.

**Figure II-3 Selon l'ADEME, la petite hydraulique devrait produire 4 à 5 TWh supplémentaires pour respecter la directive européenne sur l'électricité renouvelable. L'objectif, à l'horizon 2010, est d'installer 1 000 MW de PCH, dont 200 à 300 MW en rénovant et optimisant les ouvrages existants.**

1. b) Encadrement juridique des projets hydroélectriques

Un certain nombre de lois (Européennes à nationales) protègent et réglementent la mise en place de nouveaux ouvrages (Figure II-4). :

**Européennes :**

- **Loi sur l'eau du 3 janvier 1992**

La loi se fixe un objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau et introduit la préservation des écosystèmes, la protection contre les pollutions et la restauration de la qualité au même niveau que le développement de la ressource, sa valorisation économique et sa répartition entre les usages. La loi sur l'eau s'est adaptée à la jurisprudence et précise que les fondés en titre sont considérés au même titre que les ouvrages autorisés, ce qui permet de leur imposer des prescriptions par voie d'arrêter complémentaire de manière à préserver les intérêts visés par la loi et notamment le respect des équilibres biologiques.

- **La directive cadre européenne sur l'eau**

La Directive cadre sur l'eau, du 23 octobre 2000, établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, fixe des objectifs ambitieux de bon état ou de bon potentiel des eaux en 2015. La première étape de la démarche consiste en un classement des différentes « masses d'eau existantes » en masses d'eau naturelles, masses d'eau fortement modifiées et masses d'eau artificielles. La directive cadre sur l'eau conduit à une approche fondamentalement différente dans la recherche d'une bonne qualité des eaux. Ne fixant pas de mesure a priori, elle fixe des objectifs de résultat. De ce fait, les mesures à prendre sont à apprécier par leurs effets sur l'écologie des cours d'eau. Toutefois, la directive cadre sur l'eau est fondée sur le principe du développement durable : par conséquent, les mesures qui seront prises en son nom devront trouver un juste équilibre avec les autres dimensions du développement durable (développement économique, progrès social) et avec les autres politiques communautaires dont, notamment, celles de l'énergie et de la promotion des énergies renouvelables. La directive a été transposée en droit français par la loi du 21 avril 2004.

- **Loi sur l'eau et les milieux aquatiques**

Suite à la convention de Berne, relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel en Europe, le conseil des ministres de la Communauté Economique Européenne a adopté la Directive « Faune-Flore-Habitats » (*ou Directive 92/43*), *le 21 mai 1992*. Cette directive concerne la conservation des habitats naturels ainsi que la faune et la flore sauvages. L'objectif est de favoriser le maintien de la biodiversité, tout en tenant compte des exigences économiques, sociales, culturelles et régionales pour contribuer au développement durable.

### **Nationales :**

On observe, au cours des dernières décennies, une évolution du contexte législatif en France (Figure II-4).

- **Loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique.**

Cette loi précise que « Nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'Etat. » (Article 1). Elle définit 3 différents régimes d'exploitation des centrales hydroélectriques :

-**L'autorisation** : ce régime est accordé par arrêté préfectoral, pour les puissances inférieures à 4500 kW (500 kW avant la loi de 1980). Le délai maximal pour une autorisation est fixé à 75 ans avec possibilité de renouvellement. On observe actuellement que ce délai est plutôt ramené à 30 ans, ce qui permet d'obliger le pétitionnaire à se mettre en conformité avec la nouvelle réglementation.

-**La concession** : ce régime est accordé aux chutes dont la puissance maximale brute (PMB) est supérieure ou égale à 4500 kW. Elle est octroyée par décret en conseil d'Etat pour les PMB supérieures à 100 MW et par arrêté préfectoral pour les PMB comprises entre 4,5 et 100 MW.

-**Les installations fondées en titre et les chutes de moins de 150 kW.** Les installations justifiant d'un droit fondé en titre et celles qui étaient autorisées avant le 16 octobre 1919 dont la PMB est inférieure à 150 kW peuvent être exploitées conformément à leur titre d'origine, sans modification ou limitation de durée.

- **Loi sur la protection de la nature de 1976**

La loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, modifiée par la loi du 2 février 1995, est aujourd'hui intégrée pour partie avec ses décrets d'application dans le Code de l'environnement. Elle pose les bases de la protection de la nature en France, en donnant les moyens de protéger les espèces et les milieux. Elle fixe les différents statuts de protection, et prévoit les peines consécutives aux infractions. Enfin, elle interdit l'introduction dans le milieu naturel d'espèces non indigènes.

- **La loi sur les économies d'énergie de 1980**

La loi sur les économies d'énergie de 1980 a modifié l'article 2 de la loi de 1919. Sur certains cours d'eau et tronçons de cours d'eau, dont la liste est fixée par décret en Conseil d'Etat, aucune autorisation ou concession nouvelle ne peut être donnée pour l'installation d'ouvrages hydroélectriques. Ce sont les « rivières réservées ».

- **Loi Pêche du 29 juin 1984**

Cette loi a apporté des modifications pour l'insertion environnementale des centrales hydroélectriques, notamment : le débit maintenu dans la rivière à l'aval du barrage doit être suffisant pour garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces piscicoles. (Il ne peut pas être inférieur au dixième du module pour les nouveaux ouvrages ou lors du renouvellement des titres). Sur certains cours d'eau classés, tout ouvrage doit comporter des

dispositifs assurant la circulation des poissons migrateurs (passes à poisson, glissières de dévalaison).

- **loi sur l'eau et les milieux aquatiques**

La production d'électricité ayant des conséquences sur l'environnement, le projet de loi sur l'eau voté en première lecture à l'assemblée nationale le 30 mai 2006, propose les orientations suivantes:

\_ La déconcentration et simplification des procédures pour le classement de certaines rivières de façon à préserver les secteurs les plus emblématiques (rivières réservées sur lesquelles aucun nouvel ouvrage ne pourra être autorisé) et de façon à assurer la continuité écologique exigée par la Directive Cadre Européenne sur l'eau.

\_ L'obligation à compter du 1er janvier 2014 des règles du 1/10ème et du 1/20ème pour les débits réservés : règle du 1/20ème directement applicable à tous les cours d'eau dont le module est supérieur à 80 m<sup>3</sup>/s et aux ouvrages hydroélectriques qui, par leur capacité de modulation, contribuent à la production d'électricité en période de pointe de consommation. Ailleurs, s'appliquera la règle du 1/10ème.

\_ L'assouplissement de la réglementation actuelle sur les « débits réservés » en offrant la possibilité de passer à la notion de « régime réservé » : possibilité de variations des valeurs du débit minimal à respecter dans les cours d'eau au droit d'un ouvrage au cours de l'année.

\_ La possibilité d'appliquer un débit réservé inférieur sur les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau dits à « fonctionnement atypique » (exemple : secteurs de cours d'eau où les retenues hydroélectriques se succèdent de façon très rapprochée, secteurs karstiques).

\_ L'encouragement à la création d'ouvrages à buts multiples et utilisation partielle des réservoirs hydroélectriques à des fins autres qu'énergétiques chaque fois que possible (soutien d'étiage, irrigation et production d'eau potable).

- **Loi du 13 juillet 2005 (loi POPE)**

La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE) vise à préserver la santé humaine et l'environnement (art. 1er). Elle a adopté des mesures destinées à diversifier les sources d'approvisionnement énergétiques en veillant à limiter les perturbations engendrées par les ouvrages hydroélectriques sur les cours d'eau (art 2). Elle prévoit également (art 41 et suivants) :

\_ L'inscription dans le Code de l'environnement de la valorisation de l'eau pour le développement de la production d'électricité d'origine renouvelable, et la contribution de sa puissance à la sécurité du système électrique. L'énergie hydraulique devient plus qu'une ressource économique ;

\_ La mise en oeuvre d'un bilan énergétique préalablement aux actes administratifs relatifs à la gestion de la ressource en eau. Cela devrait permettre de prendre en compte de façon équilibrée la lutte contre l'effet de serre et l'amélioration de l'état des milieux aquatiques ;

\_ Une évaluation du potentiel hydraulique par zone géographique rendue publique par le ministre de l'Industrie ;

\_ La prise en compte de l'évaluation du potentiel hydroélectrique par les SDAGE et les SAGE4. Ces documents de gestion des eaux pourront équilibrer leurs orientations avec la lutte contre l'effet de serre;

- \_ La possibilité d'accroître de 20% la puissance installée des centrales existantes avec le même titre sur simple déclaration ;
- \_ La mise en oeuvre d'une procédure simplifiée pour la délivrance de l'autorisation de turbinage des débits réservés ;
- \_ Cette simplification s'applique également pour l'exploitation de l'énergie hydraulique des ouvrages construits initialement aux seules fins de régulation hydraulique.



Figure II-4 Schéma de l'évolution du contexte législatif et réglementaire

### 1. c) Situation régionale

A l'échelle locale le bassin Adour-Garonne, est déjà très équipé en installations hydroélectriques du fait de son relief, puisqu'il fournit 15 TWh/an, soit 25 % du productible national et 32 % de la capacité installée en puissance (8000 MW) sur 20 % du territoire. Les très grandes installations concentrent 80 % des capacités. Pour le reste, compte tenu du fort taux d'équipement du bassin, 55 % de ce potentiel se situe sur des cours d'eau très protégés en 2007 (niveau de protection : cours d'eau réservés) et ne sont donc pas mobilisables juridiquement. Les 45 % restants représentent 6TWh de potentiel qu'il n'est donc pas interdit de mobiliser dans le bassin Adour-Garonne. Parmi ces 6TWh, on trouve des cours d'eau ne faisant l'objet d'aucune protection spécifique réglementaire (normalement mobilisable), ce qui représente 17 % du productible et 22 % de la puissance actuels du bassin Adour-Garonne, soit 37 % des objectifs nationaux 2015 de la PPI. (Eaucéa, 2007). L'inventaire des projets portés par les principaux opérateurs hydroélectriques, totalisent 6,6 TWh, dont 1/3 environ situé en dehors des zones de protection maximale, soit 2,1 TWh mobilisables.

Les rivières Ariège et Salat s'inscrivent dans le site d'intérêt communautaire FR 7301822 « Garonne, Ariège, Hers, Salat, Pique et Neste », constitué du réseau hydrographique de la Garonne et de ses principaux affluents en Midi-Pyrénées.

Ce site a été retenu de par le grand intérêt de son réseau hydrographique pour les poissons migrateurs (zones de frayères potentielles et réelles pour le saumon atlantique qui fait l'objet d'alevinages réguliers et dont les adultes peuvent atteindre Foix sur l'Ariège, Carbonne sur la Garonne, suite aux équipements en échelles à poissons des barrages sur le cours aval, Document de synthèse NATURA 2000 - **Site FR7301822** - « Rivière Ariège »). Les espèces listées dans la directive et présentes sur le **site FR 7301822** sont :

- pour les mammifères : la Barbastelle, le Desman des Pyrénées, le Grand Murin, le Grand Rhinolophe, la Loutre d'Europe, le Minioptère de Schreibers, le Petit Murin, le Petit Rhinolophe, le Rhinolophe Euryale, le Vespertilion de Bechstein, le Vespertilion à oreilles échancrées,
- pour les amphibiens et reptiles : la Cistude d'Europe,
- pour les poissons : le Barbeau méridional, la Bouvière, le Chabot, la Grande Alose, la Lamproie de Planer, la Lamproie marine, le Saumon atlantique et le Toxostome,
- pour les invertébrés : la Cordulie à corps fin, l'Ecrevisse à pieds blancs, le Grand Capricorne et le Lucane cerf-volant.

## 2. Objectifs de la commande et contexte de l'étude

Dans le contexte actuel, l'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable permettant à la fois d'ajuster les pics de consommation et de diminuer les gaz à effet de serre. Pour ces raisons, il y a donc aujourd'hui un net regain d'intérêt pour l'hydroélectricité, notamment depuis le plan de relance annoncé en 2008 par le ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.

Cependant, le développement de la production hydroélectrique doit faire face aux conflits d'usages liés à l'utilisation agricole, industrielle, domestique et récréative de l'eau et concilier ces objectifs avec ceux définis par la Directive cadre européenne sur l'eau de 2000<sup>3</sup> et la loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006<sup>4</sup> afin d'assurer la **préservation des milieux aquatiques et l'atteinte du bon état écologique des eaux**. Parmi les critères à respecter figure celui de la continuité écologique (libre circulation des poissons et d'autres espèces animales, non blocage du transport des sédiments). En effet, ressource renouvelable, l'hydroélectricité nécessite l'aménagement d'un certain nombre d'installations qui ont une emprise environnementale parfois très forte. De plus, l'exploitation du potentiel hydroélectrique a un impact parfois important sur le fonctionnement des cours d'eau et sur les écosystèmes aquatiques. Ces impacts sont très différents selon i) le type (fil de l'eau, éclusées, barrage de lac, STEP) et ii) la puissance (grande hydraulique de **10 à 50 MW**, petite hydraulique de **100 kW à 10 MW** et la très petite hydraulique de **10 kW à 100kw**) des exploitations générant ainsi des installations et des emprises environnementales très différentes.

En Ariège (Figure II-5), département déjà fortement équipé en aménagements hydroélectriques, un potentiel est encore mobilisable, notamment par le biais de la petite et de la très petite hydroélectricité avec des ouvrages au fil de l'eau, et par ailleurs un certain nombre de grands ouvrages arrivent au stade du renouvellement de leur concession. De ce fait, les services de l'Etat reçoivent actuellement de nombreux dossiers de demandes d'autorisation d'exploitations hydroélectriques (nouveaux aménagements, augmentation de puissance, renouvellement, rééquipement d'ouvrages abandonnés). Dans ce contexte, afin de faire le point sur la situation et les impacts de l'hydroélectricité en Ariège, il a été décidé de réaliser une étude visant à :

- 1) Référencer les ouvrages existants,

---

<sup>3</sup> Directive cadre européenne sur l'eau, n° 2000/60/CE du 23 octobre 2000

<sup>4</sup> Loi sur l'eau et les milieux aquatiques, loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006

- 2) Faire un état des lieux, un diagnostic des connaissances concernant les impacts des ouvrages,
- 3) Evaluer les impacts hydrologique, écologique et économique de l'hydroélectricité sur le territoire du Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises (avec les données à disposition),
- 4) Etablir une grille de lecture pour l'instruction des dossiers de futurs projets.

Cette étude est restreinte aux bassins versants du Salat et de l'Ariège en amont de Foix.

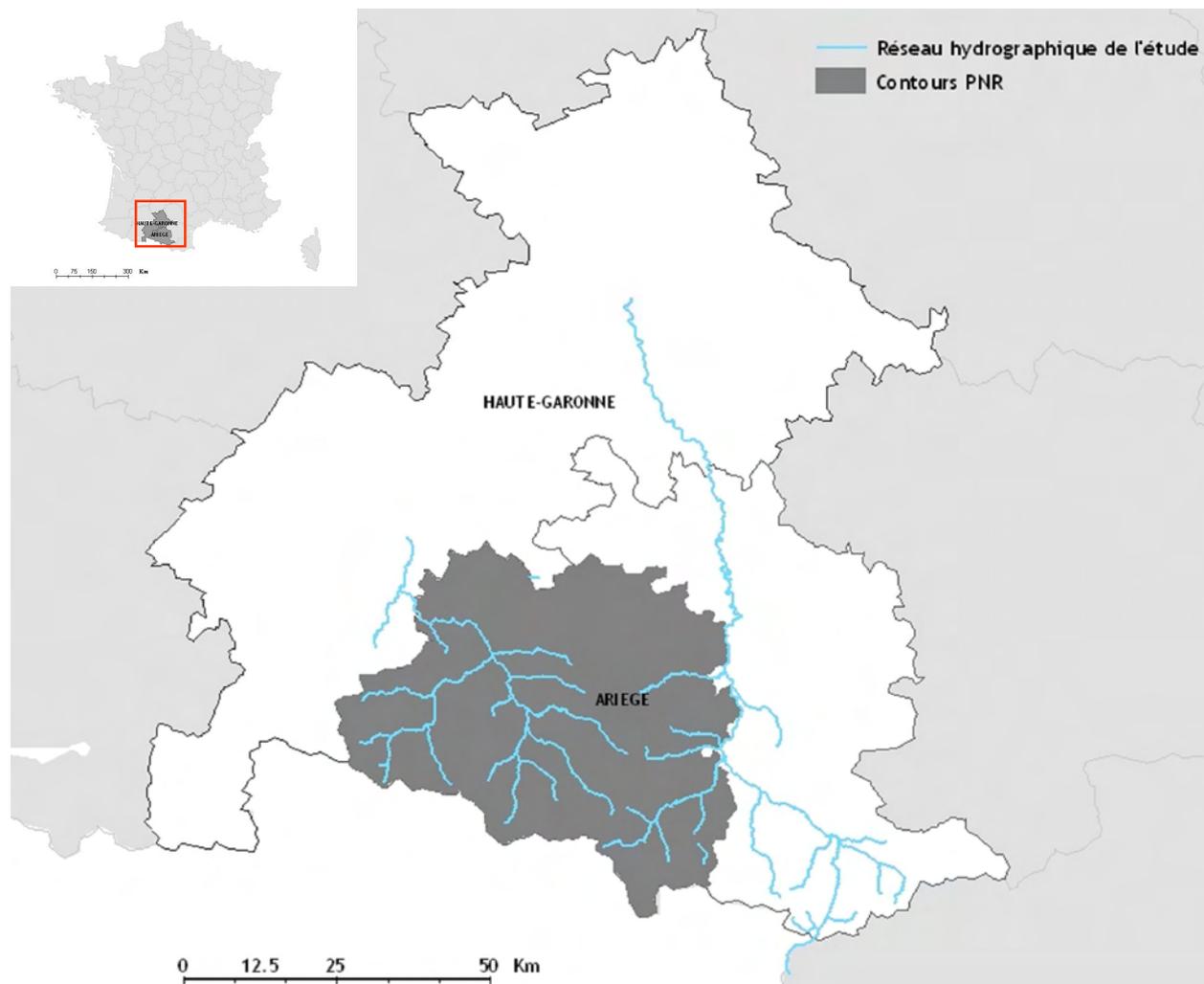


Figure II-5 Carte de positionnement du parc naturel régional (PNR) et du réseau hydrographique étudié.

### **III Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques**

#### **III.A Etat des lieux concernant l'impact des ouvrages hydroélectriques sur l'environnement**

Comme la plupart des activités humaines et industrielles, l'exploitation de l'énergie hydraulique présente des avantages et des inconvénients, tant pour l'environnement, pour la santé et pour les aspects sociaux.

Les impacts des aménagements hydroélectriques sur l'écoulement des eaux, le transport des sédiments et la morphodynamique, peuvent être observés à l'échelle locale, mais également (effets cumulés des chaînes de barrages, fonctionnement par éclusées, transferts de bassin versant,...) à une échelle plus grande, sur tout ou partie d'un bassin. Un ouvrage transforme la rivière en plan d'eau, modifiant les écoulements, le transport des matériaux et perturbant l'écosystème associé. L'accumulation des sédiments pénalise la gestion des plans d'eau. Les vidanges réalisées en étiage, ou les chasses de dégravage en période de crues, transfèrent vers l'aval une partie des sédiments accumulés. Ces relargages de matière, parfois massifs, ont des conséquences sur la faune aquatique (en particulier les juvéniles) et sur la capacité d'autoépuration du cours d'eau.

Le SDAGE prend en compte les orientations de la politique énergétique nationale définie par la loi de programme du 19 juillet 2005, notamment celles visant le développement de la production hydroélectrique. Ce développement doit rester compatible avec les objectifs de la DCE et les prescriptions de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006. La production d'énergie hydroélectrique, par la création de barrages de retenue, de dérivations et par la modification du régime des eaux (débits réservés, fonctionnement par éclusées), perturbe le fonctionnement naturel des milieux aquatiques. D'autres aménagements hydrauliques peuvent avoir certains effets comparables, notamment des barrages de soutien d'étiage. La nature et la gravité des impacts liés aux aménagements hydroélectriques dépendent de la nature et des modalités d'exploitation des aménagements, des caractéristiques hydromorphologiques et biologiques des cours d'eau et de la nature ou de l'intensité des autres usages qui s'y exercent.

Les barrages sont source de polémiques, car ces grands travaux ont une incidence très marquée sur le paysage, l'espace social humain et les écosystèmes qu'ils investissent. Voici une synthèse de ce qui est noté dans la bibliographie comme principales conséquences des barrages sur l'environnement :

## 1. Liste synthétique des types d'impacts issus de l'implantation d'un barrage

Le nombre de publications concernant les effets des barrages a augmenté en même temps que le nombre de barrages dans le monde. Dans les années 1950 à 1980 les grands barrages sont perçus comme des symboles de prouesses technologiques, ils sont aujourd'hui très critiqués. Jusqu'au milieu des années 1970, les seules informations faisant état des impacts des ouvrages ne portent que sur les problèmes d'incision et d'exhaussement. Les premières descriptions fines des ajustements morphologiques et écologiques associés à ces ouvrages remontent au début des années 1980 (Brandt, 2000a, 2000b ; Williams et Wolman, 1984 ; Galay, 1983). Ces ouvrages modifient plus ou moins les variables de contrôle (débit liquide et solide), et affectent les variables d'ajustement en aval (Assani et Petit, 2004). Petts (1980) classe ainsi les effets à l'aval des barrages en trois ordres. Les impacts de premier ordre concernent les débits liquides et solides, deuxième ordre se réfèrent aux changements morphologiques du chenal, et enfin troisième ordre incluent les effets rétro-actifs des changements morphologiques sur le fonctionnement écologique.

### 1. a) Impacts observés quel que soit l'aménagement

- **Modification du transfert sédimentaire** : A l'échelle planétaire des études récentes (Lemarchand, 2005), donnent les premières mesures de l'impact des barrages sur l'environnement à l'échelle planétaire. Les changements de débits ont modifié les transferts de matière des continents vers les océans. La quantité de sédiments atteignant les côtes a considérablement baissé alors que la quantité de sédiments charriés par les cours d'eau a globalement augmenté en raison de l'érosion accrue des sols due aux activités humaines. Les scientifiques estiment que 1 à 3 milliards de tonnes de carbone seraient ainsi séquestrées dans les sédiments retenus. Il en serait de même des nitrates et des phosphates. Ces phénomènes ont d'ores et déjà largement modifiés les écosystèmes marins côtiers

Dans la majorité des cas, la tête de bassin versant fournit plus de 75% de la charge de fond des cours d'eau (Church, 2002). L'implantation de centrales hydroélectriques lorsqu'elles ne sont pas équipées de rampes à sédiments interrompent le transfert de sédiments (Sherrard et Reskine, 1991 ; Vericat et Batalla, 2006). A l'échelle mondiale, plus de 50 % des flux sédimentaires des bassins régulés sont piégés par des barrages (Vörösmarty et al., 2003). Les plus gros ouvrages vont jusqu'à piéger 99 % de la charge totale ce qui n'est pas le cas des petites infrastructures. La perte de pente provoque une décantation de la charge transportée dans le bief amont, jusqu'à son comblement en l'absence de chasses. Dans bien des cas, ce problème pourrait être résolu par une manoeuvre adaptée des vannes. Les quantités de sédiments accumulés dans les biefs sont parfois telles que l'ouverture est impossible sans une préparation préalable (curage par aspiration par exemple).

- **Modification de la morphologie du paysage** : la grande variabilité des réponses morphologiques reflète la complexité des relations existantes entre l'altération des régimes de crue, fréquences des crues capables de transporter les sédiments et la quantité de sédiments

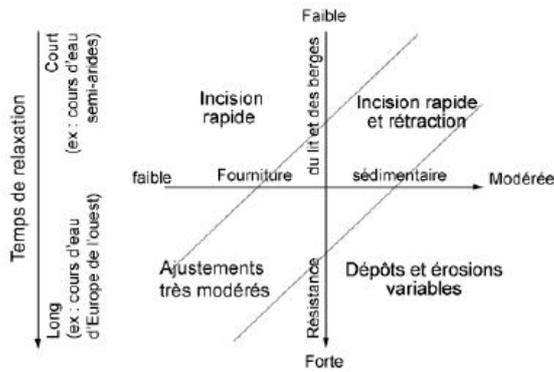
disponibles (Phillips et al., 2005). Les ajustements morphologiques peuvent également affecter les deltas aux embouchures des fleuves, les affluents. Les ajustements morphologiques affectent à la fois les profils verticaux et latéraux des lits fluviaux. La mobilité verticale dépend des conditions d'écoulement, si elles restent assez fortes pour maintenir une capacité de transport on observe des processus d'érosion et d'incision, dans le cas contraire on observe un exhaussement du lit du cours d'eau. Wolman, 1967 suggère que la fluctuation des réponses des chenaux est liée à l'amplitude des modifications des écoulements. Ainsi il montre que si le rapport entre les débits avant et après régulation est égal ou excède 0.9, les cours d'eau connaissent une incision. En revanche si ce rapport est inférieur à 0.75 alors les lits s'exhausent. Les réponses sont cependant variables sur un même cours d'eau selon les secteurs, mais aussi en fonction de la résistance du chenal. L'incision des cours d'eau est particulièrement développée lorsque les ouvrages sont trop petits pour jouer un rôle sur l'écrêtage des crues, mais suffisamment conséquents pour piéger les sédiments, les capacités de transport du cours d'eau sont maintenues mais les apports de sédiments sont considérablement réduits.

La modification du taux de sinuosité est également montrée (dans le cas de rivières à méandres). Par exemple la diminution de la variabilité des largeurs ou de la mobilité en plan pouvaient être la première réponse d'un chenal à la construction d'un ouvrage (Richard et al., 2005).

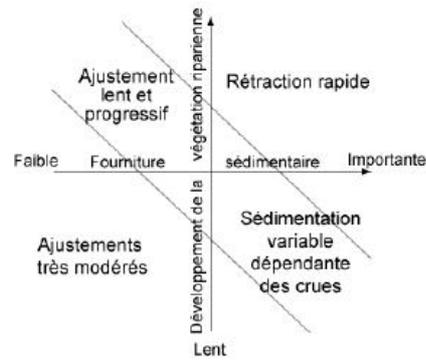
D'autres facteurs internes ou externes au chenal, ont potentiellement la capacité d'orienter ou influencer l'ajustement morphologique des cours d'eau. Ces facteurs sont la nature des sédiments, la présence ou absence de végétation, la géologie du bassin versant, la géométrie du chenal et la taille de l'ouvrage, le nombre d'ouvrages... Ainsi une même modification des débits liquides/solides peut entraîner différents ajustements (Figure III-1).

Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

A) Réponse du chenal à une importante réduction des entrées sédimentaires



B) Réponse du chenal à une importante réduction des écoulements



C) Réponse du chenal à une importante réduction des écoulements à l'aval d'un affluent

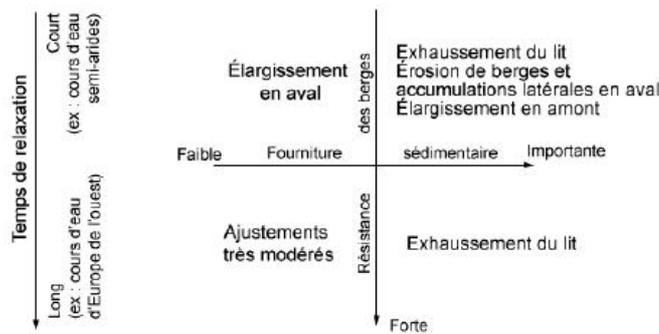


Figure III-1 Evolution du lit d'un cours d'eau après la construction d'un barrage (d'après Petts et Gurnell, 2005).

- Influence sur la température de l'eau :** la présence d'ouvrages modifie le comportement thermique de l'eau : réchauffement progressif de l'eau lors des crues de printemps, inertie thermique de l'eau stockée dans les réservoirs, développement de stratifications thermiques (Balliard et al., 1995). Les eaux de restitution issues des couches profondes peuvent, par exemple, entraîner un refroidissement artificiel durable du cours d'eau en aval d'un ouvrage. Au contraire un réchauffement des eaux peut être observé lors des réductions artificielles des débits. L'importance des effets de ces facteurs thermiques dépend essentiellement des conditions climatiques, de l'utilisation ou non d'équipements de « déstratification » et de la rapidité des vidanges des réservoirs (Webb et Walling, 1997). Même si la pente reste un facteur prépondérant de la structuration des peuplements piscicoles, la température reste un paramètre déterminant de la distribution à petite échelle des espèces. Ainsi, en aval des barrages, plusieurs exemples de l'influence du refroidissement des eaux de restitution entraînant une dérive des peuplements vers des composantes davantage salmonicoles ont déjà été observés (Huet et al., 1969 ; CEMAGREF, 1982) Ces modifications thermiques peuvent masquer les indices (température de l'eau, débit) qui permettent aux espèces piscicoles de retrouver les zones de frai (Bravards et Petts, 1993). Dans ce

cas les poissons peuvent même être retardés et ce qui peut les empêcher d'accomplir leur cycle de reproduction. Enfin, ces variations de température des eaux des cours d'eau sont susceptibles de provoquer des chocs thermiques, notamment si les ouvrages fonctionnent par éclusés d'eau froide durant les étiages estivaux (Bravard et Petts, 1993). Ainsi, en 1976, des mortalités d'ombres ont été enregistrées sur l'Ain du fait des lâchers biquotidiens d'eau hypolimniques froides. Cependant, dans des contextes fortement aménagés et pollués comme le bassin de la Seine, les barrages de navigation jouent un rôle indéniable sur la ré-oxudation de l'eau et ont donc un effet positif sur les populations piscicoles en leur servant de refuge ; De plus, en accélérant parfois les vitesses d'écoulement, ces barrages compensent localement l'absence d'habitats lotiques et permettent le maintien de certaines espèces sensibles dans les secteurs navigués (Boët et al., 1998).

- **Modification de la végétation riveraine** : des les années 1960, on constate que la régulation des débits permet le développement de stades arbustifs et arborescents favorisant des dépôts, le piégeage des sédiments et ainsi le rétrécissement du chenal (Azami et al., 2004). Ces processus sont surtout observés dans le cas de chenaux larges et peu profonds avant la construction des barrages, que l'on rencontre souvent dans les milieux semi-arides (Williams et Wolman, 1984). La végétation joue un rôle actif dans la modification des chenaux à travers toute une gamme de processus (Figure III-2).

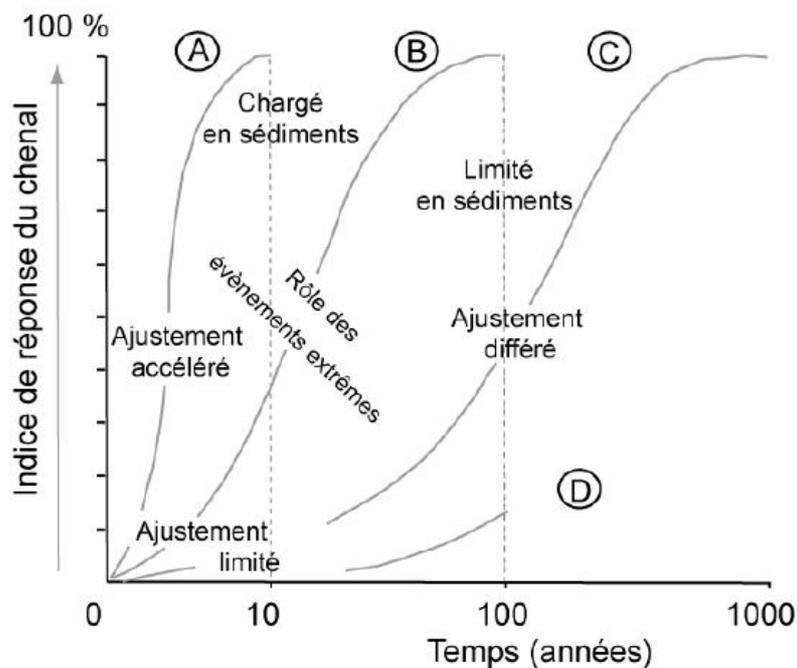


Figure III-2 Trajectoire de la métamorphose fluviale en lien avec la colonisation et la croissance végétale (d'après Gurnelle et Petts, 2002).

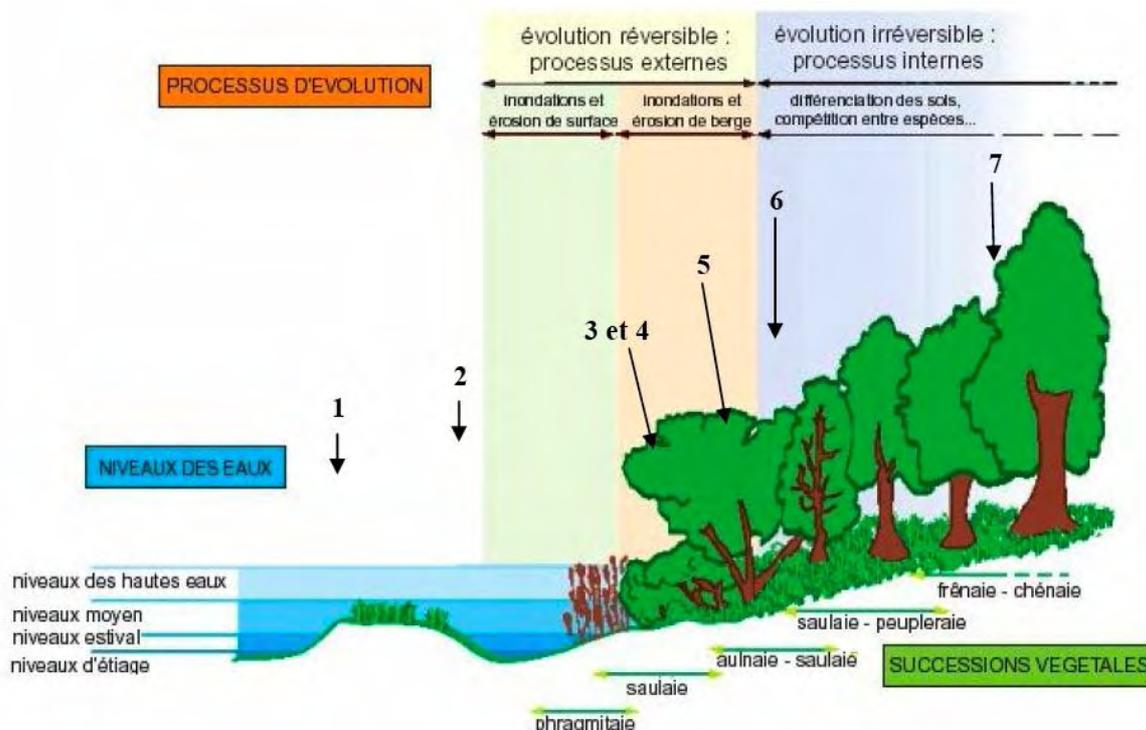
Dans le **cas A**, le changement est rapide et facilité par la reprise de croissance rapide de la végétation ligneuse à partir de bois flotté (souvent des arbres entiers) que par la croissance des propagules présentes dans les sédiments fins déposés dans les zones de retour d'eau, ou dans les zones abritées par les dépôts ligneux. Le développement de la végétation joue un rôle important en influençant les modèles de sédimentation et d'érosion pendant la métamorphose fluviale.

Dans le **cas B**, le bois flotté est mort et son seul impact est de favoriser les dépôts de sédiments contribuant au développement des propagules abritées par les accumulations de bois.

Dans le **cas C**, le développement de la végétation est limité à quelques graines dispersées et à des fragments de végétation capables de reprendre leur croissance. Les modifications dans le chenal sont dominées par les processus géomorphologiques.

Dans le **cas D**, les changements dans le chenal liés à une réduction des débits liquides sont très lents et connaissent de faibles ajustements, les dimensions du chenal avant régulation, relique de l'état antérieur, sont maintenues.

- **Impacts sur l'érosion des berges et de la côte :** La ripisylve est la formation végétale naturelle située sur la rive soulignant le bord du lit mineur, allant d'un simple liseré végétal ou pouvant représenter une véritable forêt alluviale de plusieurs dizaines de mètres (Figure III-3). C'est un milieu inféodé à la rivière très riche en diversité floristique qu'il est important de préserver. Du bas vers le haut de la berge, la différence de résistance au courant instaure un étagement de la flore.



1 : végétations immergées de la rivière (24.44)

2 : formations associées aux bancs de sédiments éventuellement exondés dans le lit de la rivière (24.21, 24.31, 24.52)

3 :	bordure mince de végétation des ceintures péri-aquatiques (53.16, 53.4)
4 :	associés à la ripisylve, des ourlets et mégaphorbiaies (37.715, 37.72)
5 :	éventuellement, si la dynamique fluviale le permet, une formation à saules régulièrement rajeunie (44.12, 44.13)
6 :	ripisylve en lien avec le système fluvial (44.33) ou un fourré s'il y a eu coupe à blanc puis régénération (31.8)
7 :	partie généralement hors lit mineur composée soit d'une forêt de bois durs (41.5) soit d'une zone agricole (83)

**Figure III-3 Répartition de la ripisylve sur les berges d'un cours d'eau (extraite du DOCOB Ariège et modifiée)**

Les crues sont le facteur qui conditionne la forme et la nature des berges. Le passage de la végétation à bois tendre, dite pionnière, à celle à bois dur, terminale, se fait de manière naturelle. Problème lors de la raréfaction des crues due à l'activité anthropique les peuplements à bois dur (frêne, chêne ormes) envahissent le centre du lit où ils peuvent évincer les espèces à bois tendre (Saules et Peupliers Noirs) qui ne peuvent plus se développer à l'ombre de ceux-ci. Telles les Forêts galeries à saules blancs : 44.13 / 91E0 (1)\* qui sont un Habitat prioritaire (*Salicion albae*). Les travaux hydrauliques modifiant le régime des inondations peuvent entraîner ou accélérer l'évolution vers une forêt à bois dur. Il sera également important de s'assurer de la pertinence des aménagements lourds réalisés (enrochements, barrages, seuils...) et d'éviter les travaux qui comportent des risques de modification du régime des eaux, du sol et des inondations. De plus en l'absence de crues, la végétation perd peu à peu son caractère inféodé à l'eau et devient d'avantage terrestre. En résulte une perte de diversité. Il est donc important de conserver au maximum le rythme naturel des crues.

- **Fragmentation des écosystèmes** : Toute la chaîne alimentaire, et non une seule espèce, peut être modifiée à la suite d'une altération des débits naturels. Les conditions extrêmes induisent en effet un stress important sur les communautés biologiques et, dans certaines limites de tolérance, peuvent fortement accroître la biodiversité (Magilligan et Nislow, 2005). La perturbation est donc une composante importante de l'écologie et les ajustements d'amplitude et de périodicité des écoulements mobilisant les sédiments du lit peuvent contribuer à réduire l'hétérogénéité de la faune de lit et affecter l'ensemble des communautés de la chaîne alimentaire (Power et al., 1996). Ces communautés peuvent connaître des changements d'espèces et des modifications de leurs caractéristiques propres. Dans ce cas, on observe une augmentation significative de la population de certaines espèces aux dépens d'autres espèces et de la diversité. De nombreuses espèces lacustres ont ainsi colonisé des cours d'eau avec succès (Poff et al., 1997). De même, les peuplements invertébrés et benthiques nécessitent un minimum de perturbations pour que leur diversité se maintienne. Ils répondent plus rapidement aux perturbations hydrogéomorphologiques et sont de bons indicateurs du degré de dégradation d'un milieu (Wootton et al., 1996). Ces espèces sont donc peu présentes dans les milieux où les fortes crues ont été

Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

laminées et où la sédimentation s'accélère, processus souvent rencontrés à l'aval de barrages. De plus, la réduction de la fréquence des perturbations du substrat, causée par la régulation des débits, peut réduire la diversité des invertébrés en augmentant le degré d'exclusion compétitive par les espèces dominantes mais sensibles aux perturbations (Wootton et al., 1996).

Dans de nombreux écosystèmes terrestres et d'eaux intérieures, les activités humaines ont provoqué la fragmentation des habitats. Les zones d'habitat réduites qui en résultent ne peuvent subvenir qu'aux besoins de populations d'espèces plus petites, qui deviennent par conséquent plus susceptibles de s'éteindre au niveau local. Les forêts et les systèmes fluviaux constituent deux systèmes dont le niveau de fragmentation, élevé dans les deux cas, est relativement facile à évaluer.

Dans les systèmes fluviaux, par exemple, les réservoirs influent de manière non négligeable sur le flux de l'eau, sur sa qualité et sur sa biodiversité, en particulier pour les espèces migratrices. Parmi les effets négatifs des barrages sur les écosystèmes figurent la destruction d'écosystèmes terrestres par inondation, les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que de profonds changements au niveau des espèces aquatiques. Une étude des effets imputables aux barrages a été menée au niveau mondial et s'est penchée sur 60% des rivières de la planète pour en évaluer les éventuelles fragmentations et modifications du ruissellement (Figure III-4).

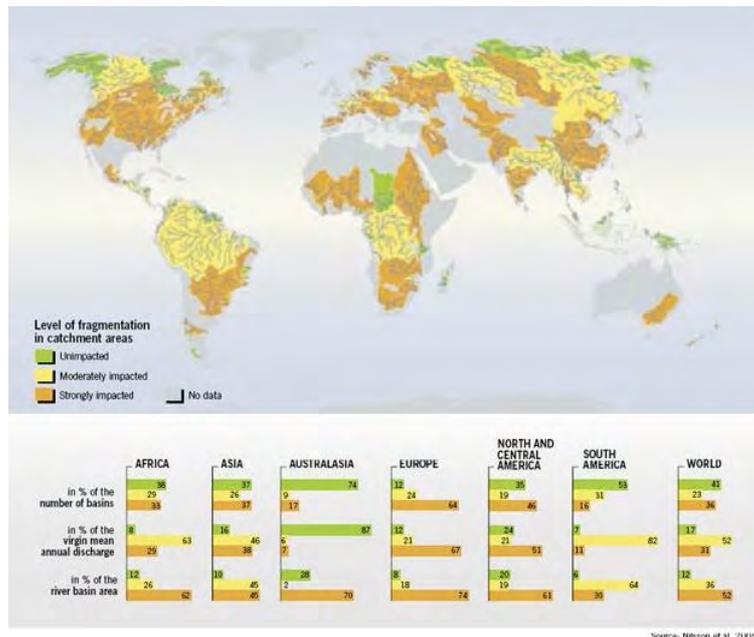


Figure III-4 Fragmentation et modifications du ruissellement en lien avec l'implantation d'ouvrages hydroélectriques dans le monde (CBD (Global Biodiversity Outlook ), 2006).

Selon cette étude, plus de la moitié des grands systèmes fluviaux analysés sont affectés par la présence de barrages et plus d'un tiers par la fragmentation des rivières et la régularisation de leur débit. Seul 12 % des systèmes fluviaux étudiés ne sont pas touchés.

Lors de l'implantation d'une centrale hydroélectrique avec retenue la zone occupée par le réservoir est submergée : la faune et la flore qui vivaient dans ce secteur se retrouvent donc anéantie par ce

changement d'habitat. Par ailleurs, lorsqu'il existe des personnes vivant dans ces secteurs, elles devront quitter les lieux et être expropriées.

Leur intensité dépend du type d'aménagement, des modalités de gestion, des opérations de maintenance et d'entretien, de la hauteur de chute, du marnage et du rapport entre le débit d'équipement et le module :

- La création d'un plan d'eau, à l'amont du barrage, entraîne la suppression de l'habitat initial de la rivière au profit d'un écosystème de type « lac » ;
- Dans les secteurs influencés par l'activité hydroélectrique, les biocénoses sont affaiblies et déstabilisées avec une perte de productivité biologique ;
- Dans les secteurs sous influence des éclusées une instabilité des biocénoses, des échouages et des piégeages d'alevins, des exondations d'habitat peuvent apparaître ;
- Les obstacles édifiés dans le lit des cours d'eau entravent le brassage génétique ;
- Lors de la dévalaison, une fraction des effectifs dévalants transite par les turbines ; le taux de mortalité dépend de la taille du poisson et du type de turbine ;
- La présence des grands aménagements entraîne une forte artificialisation des débits ; les perturbations sur le milieu sont donc importantes.

Un aménagement modeste « apparaît » moins pénalisant mais le cumul de petits aménagements peut aboutir à l'interruption de la continuité écologique en raison de l'efficacité partielle des dispositifs de franchissement.

#### 1. b) Impacts particuliers de la grande hydraulique

- **Modification de la qualité de l'eau** : la présence de retenues modifie aussi la qualité de l'eau et son régime thermique. On constate ces modifications dans la retenue et dans la rivière à l'aval :

- dans la retenue, une augmentation de la minéralisation de l'eau, des risques d'eutrophisation, une stratification thermique et des risques de fermentation anaérobie ;

- à l'aval des grands barrages, la température de l'eau est plus froide en été et plus chaude en hiver que naturellement ;

- au cours des opérations de vidanges qui sont de plus en plus rares, des possibilités de dégradation de la qualité.

- **Modification de flux** (impact sur les débits des cours d'eau) : Il est toujours délicat d'établir un lien entre une infrastructure hydroélectrique mise en place et les perturbations des écoulements. Cette relation est en effet masquée par d'autres paramètres forçant (variabilité climatique, changement climatique, gestion de l'installation...) qui empêche la généralisation. Magilligan et Nislow (2005) ont cependant dégagé 3 règles concernant les ouvrages avec retenue en fonction du paramètre hydrologique considéré:

- réduction des pics de crue**, l'impact le plus courant, est indépendante des types de barrage ou des régions hydrologiques considérées. L'amplitude des crues après régulation semble globalement liée aux conditions de remplissage de réservoir.

-**augmentation de la variabilité temporelle** des débits (variabilité hydrologique) : tend à se produire surtout dans les régions caractérisées par une seule saison de forte hydraulité (fonte des neiges par exemple).

-**modification des débits mensuels** semble être plus dépendant des types de barrages que les autres paramètres. Pour les petits barrages servant généralement d'excruteur de crues, les régimes d'écoulement ne changent pas après aménagement. Par contre, les ouvrages ayant seulement une fonction de production hydroélectrique affectent visiblement les débits mensuels.

- **Modification de la sédimentation** : la taille des particules composant le lit joue un rôle crucial dans la nature des ajustements (Gaeuman et al., 2005). L'observation des différentes réponses à une même fluctuation des débits liquides permet de constater que les tronçons sableux ont eu tendance à répondre rapidement à toutes les perturbations par un changement rapide de l'élévation du fond du chenal, l'ajustement de la largeur intervenant ensuite. Ce dernier paramètre est en revanche majeur sur les tronçons à charge grossière. Dans ce contexte, le lit ne s'exhausse que dans le cas d'importantes fournitures sédimentaires très localisées résultant notamment de l'érosion des berges, dont la granulométrie est semblable à celle des particules composant le fond du lit. L'incision ne se produit alors que durant les fortes crues. Les secteurs à charge grossière sont donc plus résistants à l'incision que les secteurs sableux, les débits nécessaires à la mise en mouvement du sédiment étant beaucoup moins fréquents.

Il est donc indéniable que la création d'un plan d'eau à l'amont d'un barrage provoque un dépôt de sédiment et un envasement (Duband, 1995 et Remini et al., 1997). En effet, les rivières (affluents des retenues) transportent d'importantes quantités de sédiments qui alimentent en alluvions les plaines des basses vallées. L'importance de ce transport varie énormément selon la morphologie du bassin versant, et selon le régime des débits de la rivière car il dépend de la saison et de la variabilité interrannuelle des apports. Les cours d'eau transportent des matériaux grossiers (graviers, galets) et des sédiments fins (sable, argile) ; le mécanisme d'alluvionnement des retenues est fonction du type de retenue. Les sédiments grossiers sont le plus souvent transportés par charriage sur le fond, et ayant une vitesse de chute importante ils se déposent en queue de retenue. Le transport des sédiments fins est plus compliqué à appréhender selon que l'écoulement amont est torrentiel donc susceptible d'engendrer un courant de densité et de transporter les vases jusqu'au pied du barrage, ou, que l'écoulement est fluvial avec une dispersion des vases dans toute la retenue. Les courants de densité sont les principales causes d'envasement des grandes retenues. La principale difficulté, dans l'étude des modifications du transport sédimentaire, est l'appréciation des apports en matériaux solides à l'amont de la retenue, car il n'existe pas de relation directe entre le débit du cours d'eau et le flux de matières en suspension. Seule l'accumulation de données par retour d'expérience et la réalisation de modèles de sédimentation (Carlos et al., 1995), peuvent permettre d'améliorer les méthodes d'exploitation des retenues face à cette situation d'envasement. Liés à la sédimentation des particules en suspension dans l'eau, certains éléments chimiques se retrouvent ainsi piégés (Poirel et al., 1993 et Rofes et al., 1991). Ces éléments

chimiques, parfois toxiques pour le milieu (métaux lourds, pesticides), proviennent des re-dépôts atmosphériques et des nombreux flux polluants d'origine industrielle ou agricole situés en amont sur le bassin versant. Les concentrations mesurées lors des épisodes de vidanges sont certes élevées, mais restent bien souvent en deçà des concentrations susceptibles de provoquer des effets à court terme sur les populations vivant au sein du cours d'eau en aval. Ces polluants sont donc transférés à l'occasion de la vidange après avoir été temporairement stockés dans la retenue. La gestion de ces pollutions doit donc se faire en termes de charge globale pour les écosystèmes en s'intéressant aux éventuels effets chroniques sur les communautés vivantes.

- **Modification des profils de vitesse** : la présence d'un barrage modifie les écoulements sur toute la longueur du remous. Les radiers et plats courants disparaissent au profit des profonds lenticules. La succession des barrages conduit à une perte de pente qui varie selon les tronçons. Dans ce cas extrême, la rivière a un profil en marches d'escalier, suite de faciès lenticules séparés par de petites chutes. Cette altération de la dynamique fluviale entraîne une simplification des habitats et de l'hospitalité : envasement, disparition des frayères. La répartition longitudinale des peuplements se trouve déséquilibrée et on observe une dérive typologique des rivières salmonicoles, les espèces les plus sensibles (truite, chabot, chevesne) régressant au profit d'espèces moins exigeantes comme le gardon, l'ablette ou la perche. Le blocage de la libre circulation des poissons interdit la présence des grands migrateurs et est directement préjudiciable aux espèces qui doivent effectuer des déplacements longitudinaux au cours de leur cycle biologique, en particulier la truite qui remonte sur le chevelu amont pour frayer. Le non respect des débits réservés est un facteur aggravant. Les inventaires piscicoles réalisés dans le cadre du RHP (cf. p. 29) et utilisés pour l'élaboration des PDPG font état de contextes et de peuplements systématiquement perturbés en raison de la présence des ouvrages.

- **Modification de l'écosystème aquatique** : la formation du réservoir a des effets sur l'écosystème aquatique qui peuvent être découpés en trois étapes. En effet, du point de vue physico-chimique, on a pu distinguer trois phases dans la formation du réservoir.

-La première, extrêmement dynamique, qui correspondait à la période de remplissage fut caractérisée par une déficience en oxygène du fait de la dégradation des matières organiques mais aussi par une grande disponibilité des aliments pour les poissons. L'inondation progressive des parties amont au barrage fournit à beaucoup d'espèces de poissons des conditions très favorables pour leur développement et la production piscicole augmente fortement durant cette phase. Les espèces opportunistes sont favorisées.

-La deuxième phase correspondait à la stabilisation physique du corps d'eau. La couche oxygénée s'est épaissie progressivement, la transparence a augmenté et une production de plancton s'est mise en place. Le milieu fonctionne alors comme un filtre vis-à-vis des différentes populations de poissons. Seules les espèces qui ont les capacités de s'adapter au milieu lacustre parviennent à se maintenir. La production piscicole a diminué et le peuplement était dominé par un petit nombre d'espèces omnivores, les premières à s'adapter à une alimentation basée sur des proies aquatiques.

-Lors de la dernière phase, que l'on peut appeler la stabilisation écologique, les peuplements de poissons se sont équilibrés par le développement d'espèces spécialisées (prédateurs ichtyophages, végétariens) qui entraînent en compétition avec les espèces omnivores.

Une des conséquences de cet effet de filtre imposé aux peuplements par la mise en place du lac est l'absence dans le réservoir d'un certain nombre d'espèces présentes dans la rivière.

- **Impacts des vidanges des barrages :**

Cet impact peut simplement être visuel ou concerner les cours d'eau, au niveau quantitatif et/ou qualitatif, pouvant perturber la vie aquatique faunistique et/ou floristique. Construire des retenues sur des rivières ou à proximité, c'est stocker de l'eau pendant un certain temps pour la redistribuer. Il est opéré un transfert en volume d'eau d'une période de l'année pendant laquelle il y a abondance à une autre où il y a pénurie, ou d'une année à l'autre pour satisfaire des besoins et usages nationaux, régionaux, locaux qui sont parfois antagonistes dans la gestion des ressources en eau, en lissant ainsi les aléas saisonniers et climatiques de la météorologie (Duband, 1989). Les différents usages de ce stock d'eau peuvent être : production d'énergie électrique (consommation industrielle et domestique), irrigation (agriculture), soutien des étiages (agriculture, eau potable), alimentation en eau potable, écrêtement des crues (sécurité), loisirs nautiques (tourisme), pollution accidentelle (sécurité), hydrobiologie (environnement). Il est évident que ces aménagements en rivières, qu'ils soient de petite ou de grande capacité, ont une incidence sur le régime d'écoulement puisqu'ils peuvent modifier plus ou moins temporairement l'hydrologie naturelle des cours d'eau. Les modifications ne concernent pas seulement les aspects quantitatifs mais aussi les aspects qualitatifs : les matières en suspension, les sédiments, l'évaporation, les paramètres physico-chimiques, tels que la température de l'eau, l'oxygène dissous..., la vie piscicole, la flore et la faune aquatique, en observant que chaque fois un nouvel équilibre s'instaure.

On sait que les vidanges décennales des barrages ont pour objectif d'assurer la sécurité de l'ouvrage par visite des parties immergées. La vidange consiste à retirer tout ou partie de l'eau stockée par ouverture des vannes de fond du barrage. Cette opération remet en suspension dans l'eau une partie des couches superficielles des sédiments déposés dans le lac depuis sa mise en eau (Gosse, 1991). Les concentrations de matières en suspension (MES) augmentent alors temporairement dans la rivière, en aval du barrage, en y provoquant des déficits d'oxygène dissous et en y apportant des éléments indésirables en excès (ammoniac, fer, manganèse, phosphore, parfois métaux lourds et pesticides). Cet ensemble de changements des caractéristiques physico-chimiques du milieu est de nature à gêner certains usages de l'eau, comme par exemple la production d'eau potable.

De plus, le principal obstacle à la prévision de l'évolution des concentrations des matières en suspension dans une rivière à l'aval d'un barrage vidangé est l'impossibilité de connaître leur niveau possible à la sortie du barrage (Gosse, 1991). En effet, cela supposerait l'utilisation d'un modèle d'érosion du lac vidangé, tâche difficilement réalisable actuellement, vu la complexité de certains processus : entraînement des vases et éboulement des bancs de dépôts mis hors d'eau lors de la vidange. On constate également l'apparition d'une forte coloration de l'eau en fin de vidange,

puisque les processus de photosynthèse ne peuvent pas intervenir significativement dans le bilan en oxygène dissous durant la vidange.

Une étude de Rofes et al., (1991), montre également la relation entre les MES et le taux d'oxygène dissous, mais cette fois exprimé comme un déficit d'oxygène. Lors de cette étude les mesures sont effectuées au niveau de deux stations (1 et 2) correspondant à des temps de transit respectifs de 40 et 110 minutes depuis le barrage. A l'issue de la période de mesures, les graphiques réalisés (Figure III-5) montrent que le déficit en oxygène dissous est plus important après un transit de 110 minutes qu'après un transit de 40 minutes, tout en restant proportionnel à la concentration de MES. D'autres types de substances proviennent de la décomposition de la matière vivante ou sont des composés fortement réducteurs issus de rejets industriels. La remise en suspension de telles substances lors des vidanges se traduira par une forte demande en oxygène et le relargage d'ammoniaque, dont la forme non ionisée  $\text{NH}_3$  est très toxique notamment pour les poissons (Poirel et al., 1993). L'équilibre de dissociation de  $\text{NH}_4^+$  est fortement influencé par l'acidité du milieu, il convient donc de tenir compte à la fois de la concentration d'azote ammoniacal et du pH pour connaître la toxicité de ce composé. Un pH acide favorise la protonation de  $\text{NH}_3$  en  $\text{NH}_4^+$ , l'acidification du milieu au moment du passage du culot sédimentaire est donc un facteur de nature à limiter la toxicité du rejet.

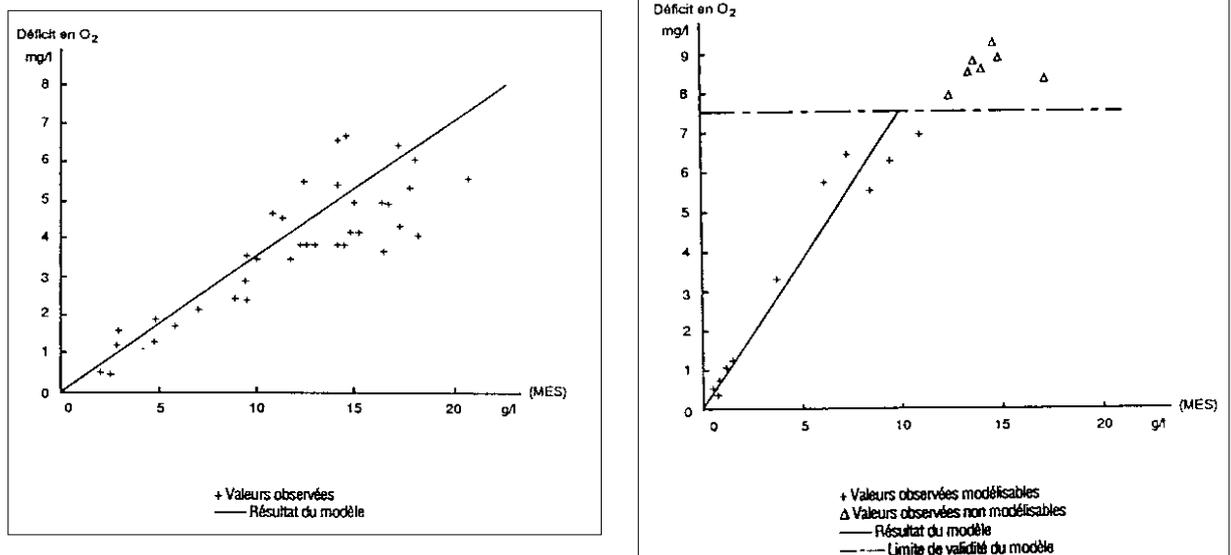


Figure III-5 Relation entre le déficit en oxygène dissous et le taux de MES à la station 1 et 2 (Rofes et al., 1991).

Les vidanges décennales sont l'occasion de contrôles et de travaux d'entretien visant à assurer la pérennité et la sécurité de l'ouvrage. De plus, des chasses et transparences en fortes eaux sont effectuées régulièrement dans le but de faire transiter les sédiments et regagner de la capacité de stockage. Celles-ci engendrent pour le milieu naturel des pollutions de type accidentel plus ou moins importantes selon les types d'ouvrage, leur environnement et la gestion de la vidange (Cravero et al, 1989 ; Poirel et al, 1993).

Poirel et al (1993) ont étudié les principaux effets des vidanges suite à une soixantaine de retours d'expériences. Ils déterminent 5 phases dans la vidange et y associent des risques spécifiques pour les différents paramètres physico-chimiques :

- L'abaissement du plan jusqu'à une cote minimum d'exploitation sans risque particulier.
- L'ouverture de la vanne de fond se traduisant par un changement de composition de l'eau par l'entraînement des sédiments situés immédiatement devant celle-ci. On observe un pic de matières en suspension (MES) ainsi qu'une baisse en O<sub>2</sub> dissous, une acidification des eaux et un relargage des composés chimiques avec une température plus froide. Si les paramètres chimiques se propagent faiblement vers l'aval, le pic de MES se transfère quelquefois en s'amplifiant car l'augmentation de débit dans un tronçon court-circuité provoque le nettoyage des berges.
- Abaissement du plan d'eau de durée très variable présentant des risques faibles correspondant soit à des crues, soit à un mélange d'eau de surface et de fond lorsqu'une thermocline était établie. En queue de retenue, des sédiments sont remis en suspension, consomment l'O<sub>2</sub> dissous et relarguent différents composés. Ce bouchon vaseux constitue une barrière physico-chimiques difficilement franchissable par les poissons. Il avance au fur et à mesure de la baisse du plan d'eau jusqu'à arriver dans la vanne de fond.
- Le passage du culot correspondant au moment où la retenue est pratiquement vide et où la rivière recrée son lit dans les sédiments. C'est la phase de risque maximum avec apport d'eau interstitielle venant du ressuyage des vases, caractérisée par l'entraînement de sédiments, l'effondrement de talus et le relargage de composés chimiques. La durée de cette phase est relativement brève. Lors du passage du culot, les MES augmentent de façon très importante et soudaine. Elles consomment l'O<sub>2</sub> dissous et relarguent différents polluants dont l'azote ammoniacal et les métaux (Bouchard et al, 1986). On assiste également à un pic de conductivité et une baisse du pH. Cette phase correspond généralement à l'arrivée des poissons du lac dans la vanne de fond et aux conditions les plus sévères pour l'environnement.
- La phase d'à sec, de durée très variables selon les travaux, se caractérise par un risque lié aux crues.

Les sédiments transités induisent, lors du passage du culot et à l'ouverture de la vanne de fond, de fortes teneurs à l'aval en MES, consomment de l'O<sub>2</sub> dissous et relarguent différents polluants comme l'azote ammoniacal et des métaux. Ces teneurs élevées en MES et surtout le déficit en O<sub>2</sub> dissous sont à l'origine de la grande majorité des problèmes rencontrés lors des vidanges, notamment pour la faune benthique de l'aval et la faune piscicole de la retenue. Poirel et al (1993) montrent que le manque d'O<sub>2</sub> dissous (moins de 2mg/l) est plus souvent à l'origine des problèmes environnementaux que les fortes concentrations en MES (plus de 30g/l). Ainsi, lors du passage du culot, 20% des vidanges engendrent plus de 30g/l de MES, et 30% des vidanges présentent des minimums d'O<sub>2</sub> dissous à moins de 2mg/l. En étudiant les effets cumulés, c'est environ 40% des vidanges qui induiraient des dégradations importantes de la qualité des eaux à court terme et à

l'aval immédiat du barrage. Le transfert du déficit en O<sub>2</sub> dissous dépend du caractère plus ou moins consommateur des sédiments, qui peut aller de 0 à 5 mg/L d'O<sub>2</sub> dissous pour 1 g/l de sédiment, des capacités de réoxygénation du milieu, fonction de la pente du cours d'eau, des seuils, des cascades, et du temps de brassage du mélange eau-sédiment. Généralement, après une demi-heure de temps de transfert, les phénomènes de réoxygénation deviennent supérieurs aux phénomènes de consommation d'oxygène ce qui limite l'impact dans l'espace. Pour les MES, le transfert se fait de façon différente avec les fractions fines du sédiment qui voyagent dans la masse d'eau et les fractions plus grossières qui se déplacent par une succession de dépôt et de reprise en comblant progressivement les zones de faible vitesse. Cela se traduit par un étalement du pic et un abattement du flux total, notamment pour les rivières présentant des successions de seuils. La présence en aval d'un autre barrage a pour effet de complètement amortir le pic de MES (Poirel et al., 1993).

Afin de limiter l'impact des vidanges des barrages, la procédure LIVRE (Limitation de l'Impact des Vidanges de Retenues sur l'Environnement) d'aide à la décision a été mise en place (Cardinal, 1988). Elle est articulée autour de 4 étapes :

- définition des objectifs sur le plan environnemental, définition des mesures préliminaires avant la vidange permettant de préciser les risques réels, définition des mesures correctrices permettant de diminuer les impacts de la vidange.
- Définition d'un protocole de gestion du plan d'eau et d'un protocole de suivi de la qualité des eaux en temps réel tenant compte des objectifs et de l'évaluation des risques.
- Adaptation du protocole de gestion en cours de vidange avec prise en compte des aléas.
- Collecte, archivage des informations, évaluation des impacts de la vidange et organisation du retour d'expérience.

Cette procédure prévient les impacts et tend à les faire diminuer. Cependant, elle ne les empêche pas et des impacts notables sur le biotope ont été reconnus lors des vidanges et transparences des barrages de Garrabet et de Castillon lors de la dernière décennie.

#### 1. c) Impacts particuliers de la petite hydraulique

- **Peu d'effet sur les flux** (sauf tronçons court-circuité) : Diminution du débit du cours d'eau sur une centaine de mètres entre la prise d'eau de la centrale et le canal de restitution (ou canal de fuite), le cours d'eau restant inchangé en amont et en aval de l'ouvrage. L'impact sur la flore n'est que partiel et local (une centaine de mètres). Dans la mesure où certains cours d'eau connaissent une circulation de poissons, des dispositions particulières, comme un débit minimum imposé dans le lit original du cours d'eau et l'installation d'une « échelle à poisson » peuvent être envisagés le cas échéant. Cependant, vu les importantes déclivités des cours d'eau visés par ce type d'ouvrage (parfois des chutes d'eau), il est rare que des poissons y circulent.

- **Rupture de la continuité écologique** : lorsque de nombreux seuils ponctuent les rivières. Certains ont été créés, il y a plusieurs siècles, pour la navigation (Lot,

Charente,...), ou à des fins énergétiques (moulins,...). Ils sont pour la plupart équipés aujourd'hui de micro-centrales électriques (on en compte environ 600). Ces obstacles, grands ou petits, ont souvent rompu les équilibres biologiques des cours d'eau, notamment la circulation des poissons migrateurs (Garonne, Dordogne, Lot, Adour, Gaves, Tarn,...), mais aussi la circulation des matériaux constituant le lit des rivières. Le régime des eaux est notablement perturbé sur de nombreuses rivières de faible, moyenne ou grande importance. Il en est de même pour la présence de grandes retenues de stockage et de nombreuses prises d'eau, de même que la création de dérivations laissent un grand nombre de tronçons de rivières sous débits réservés. Certains de ces tronçons sont soumis par ailleurs à de fréquentes éclusées, ce qui contribue à renforcer l'impact négatif de l'exploitation hydraulique sur les milieux aquatiques.

Or le **patrimoine des poissons grands migrateurs en Adour-Garonne** reste le seul en Europe à accueillir l'ensemble des 8 espèces patrimoniales de poissons grands migrateurs amphihalins: la grande alose, l'alose feinte, la lamproie marine, la lamproie fluviatile, le saumon atlantique, la truite de mer, l'anguille et l'esturgeon européen. Ces espèces symboliques contribuent à la préservation de la biodiversité et constituent des bio-indicateurs pertinents et intégrateurs de la qualité des milieux et de leur bon fonctionnement à l'échelle d'un grand bassin. Les objectifs du SDAGE sont différenciés et adaptés par espèce et définis dans un plan de gestion visant notamment :

- la restauration des espèces en voie de disparition (saumon et esturgeon) ;
- pour l'ensemble des espèces, la préservation des habitats, la restauration de l'hydrologie et de la continuité écologique, l'adaptation de la pression de pêche à l'état des stocks, le suivi et l'évaluation des populations ;

## 2. Mesures correctives et compensatoires

Plusieurs adaptations existent pour limiter l'impact des centrales hydroélectriques sur l'état écologique des cours d'eau :

-> Pour éviter d'assécher les frayères dans le lit mineur et maintenir un débit minimum biologique l'été et l'automne, le maintien d'un débit minimum à l'aval immédiat des centrales.

-> Pour limiter le risque environnemental fort de noyer les cordons rivulaires (pièges potentiels pour les poissons), limitation des débits maximums turbinés de printemps. Cette disposition de seuil maximum de débit au printemps est d'autant plus importante que le milieu est sensible, c'est à dire en pleine période d'émergence des salmonidés. Ce moment, variable suivant les années, devra être étudié.

-> Pour limiter l'impact des baisses de débits sur les populations de poissons et les invertébrés, une troisième mesure concerne les gradients à la baisse de débit.

Pour tenter de rendre écologique ces ouvrages sur les cours d'eau accueillant des espèces piscicoles migratrices, le législateur a établi une obligation d'assurer la circulation des poissons migrateurs à

la montée des cours d'eau ainsi qu'à la dévalaison. Cela se concrétise par la construction de dispositifs de franchissement du barrage (appelés « passes à poissons »), permettant normalement à toutes les espèces migratrices présentes dans le cours d'eau de se déplacer librement vers l'aval ou vers l'amont, afin de rejoindre les zones de croissance des adultes et les zones de frayères.

Les structures qui permettent aux poissons de franchir les barrages sont de deux types :

• **Les structures de montaison :**

Ce sont par exemple des échelles à poisson ; des ascenseurs à poisson ; des passes à bassin ; des passes à ralentisseurs ; des rivières artificielles.

Un poisson qui arrive à la base de l'échelle s'engagera dans la passe. Arrivé devant le déflecteur perpendiculaire, dont la fonction est de casser le courant, il pourra se reposer devant et ainsi remonter de déflecteur en déflecteur en haut du barrage.

• **Les structures de dévalaison :**

Certains poissons, comme le saumon, qui se reproduisent en rivière mais qui vivent en mer doivent quitter les zones de frayères pour retrouver la mer. Ils devront alors passer de l'amont des barrages à l'aval sans dommages. De ce fait, sur les barrages, des dispositifs ont été mis en place pour permettre aux petits poissons en dévalaison de franchir l'obstacle sans passer par les turbines de production électriques.

### **III.B Synthèse sur l'impact économique de l'énergie hydroélectrique**

L'énergie hydraulique est caractérisée par des investissements élevés, mais des coûts de fonctionnement très faibles, car le "combustible" est gratuit et l'entretien réduit. Les dépenses d'investissements dépendent très fortement des caractéristiques de l'aménagement, et des dépenses annexes liées aux problèmes sociaux et environnementaux. Il est de ce fait pratiquement impossible de donner des chiffres normatifs.

A titre d'exemple, on peut considérer qu'un coût d'investissement de 1000 \$ par kW installé correspond à un site favorable. Le coût d'investissement d'une centrale complète utilisant une turbine à gaz à cycle combiné est d'environ 300 \$ par kW installé auxquels il faut ajouter le prix du gaz, soit entre 20\$ et 30\$ par MWH produit. Une fois amortis, les aménagements hydrauliques procurent une rente très importante, compte tenu de leurs très faibles coûts d'exploitation.

Le coût de construction d'une centrale hydroélectrique est naturellement fortement dépendant de sa taille et de son type.

- **Sur les grandes installations**, le coût du kWh produit est de l'ordre de 0,022 € en moyenne, mais il peut monter jusqu'à 0,1 € pour les pico-centrales (puissance inférieure à 100 kW).

- Le coût des **petites centrales** Si on prend l'exemple d'une centrale de basse chute (5 m de dénivelé, débit de 550 l/s) d'une puissance de 20 kW équipant une ferme, l'installation coûte entre 30 000 et 90 000 €.

- **Une pico centrale** de haute chute (100 m de dénivelé, débit de 2,5 l/s) de 2 kW équipant un refuge coûte entre 5 000 et 15 000 €, auxquels il faut rajouter le coût des études environnementales, qui peuvent faire doubler le prix de l'installation.

Ce qui suit est la synthèse du travail effectué par Aude Barrière sur l'évaluation économique des ouvrages hydroélectriques (Barrière, 2009)

#### **1. La fiscalité**

En ce qui concerne la fiscalité, il convient tout d'abord de définir les termes taxe et redevance. La taxe est une contrepartie monétaire d'un service rendu par une personne publique. La redevance est un paiement devant avoir lieu de manière régulière, en échange d'un droit d'usage d'un service. Il existe quatre types de contributions applicables à une centrale hydroélectrique :

- les taxes locales : taxe professionnelle et taxe foncière sur les propriétés bâties, perçues au profit de la commune d'implantation de l'équipement.

- les redevances qui s'appliquent si la centrale hydroélectrique est concédée, perçues au profit de l'Etat et dans une moindre mesure du département et de la commune.

- la redevance pour prise d'eau sur le domaine public fluvial, au profit de la commune s'il s'agit du domaine public communal.
- les redevances à caractère environnemental perçues au profit de l'agence de l'eau<sup>5</sup>.

#### 1.a) La taxe professionnelle et la taxe sur les propriétés bâties

L'exploitation d'un aménagement hydroélectrique concourt à l'amélioration ou au maintien des finances locales et régionales par le biais de la taxe professionnelle et de la taxe foncière.

- **La taxe professionnelle** : La taxe professionnelle, créée par une loi du 29 juillet 1975, est l'un des quatre impôts directs locaux perçus par les collectivités territoriales. Elle ne concerne que les entreprises et est due chaque année. La base d'imposition de la taxe professionnelle est calculée à partir de la valeur locative de l'ensemble des immobilisations corporelles dont a disposé le redevable pour les besoins de sa profession. La base est calculée au niveau de chaque établissement en fonction de la valeur locative et d'un abattement général de 16 % sur la base brute. La base de taxe professionnelle apparaît comme étant un bon indicateur du potentiel économique du territoire à l'échelle communale. Le propriétaire d'une centrale hydroélectrique est soumis à la taxe professionnelle si cette centrale est utilisée par une personne physique ou morale pour son activité professionnelle, c'est-à-dire dans un but lucratif. Les centrales hydroélectriques ne comptent pas parmi les activités bénéficiant d'exonérations temporaires ou permanentes.

- **La taxe foncière sur les propriétés bâties** : La taxe foncière est un impôt local dû tous les ans par le propriétaire d'un bien immobilier. Le propriétaire est également soumis à la taxe foncière sur les propriétés bâties. La base d'imposition pour les ouvrages hydroélectriques correspond à 50% de la valeur locative cadastrale.

#### 1.b) Les redevances liées à l'activité de production hydroélectrique

Selon la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique, « nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'Etat ». Il existe donc deux régimes d'exploitation d'une installation hydroélectrique : le régime de la concession et celui de l'autorisation. Le régime de la concession implique des redevances spécifiques. Sont placées sous le régime de la concession les entreprises dont la puissance (produit de la hauteur de chute par le débit maximum de la dérivation) excède 4500 kW. Les autres entreprises relèvent du régime de l'autorisation.

Le fait d'exploiter une entreprise hydraulique sans concession est puni d'une amende de 75 000 €. Le fait de l'exploiter sans autorisation est puni d'une amende de 18 000 €. Les installations hydroélectriques concédées sont soumises à trois redevances :

---

<sup>5</sup> Voir annexe 8 sur les agences de l'eau.

### Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

- une redevance fixe fondée sur un indice de l'électricité à haute tension, perçue au profit de l'Etat. Cette redevance est d'un montant faible.
- une redevance proportionnelle au nombre de *kWh* produits par la centrale génératrice, répartie à raison de 2/3 pour l'Etat, 1/6 pour le département et 1/6 pour les communes.
- une redevance sur le chiffre d'affaire perçue au profit de l'Etat, introduite par la loi n°2006-1771 de finances rectificative pour 2006, qui peut aller jusqu'à 25% du chiffre d'affaire, mais ne s'applique que lors du renouvellement de la concession (à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2007).

#### Les redevances pour occupation et utilisation du domaine public

- **La redevance pour occupation du domaine public** : L'article L2125-1 du code général de la propriété des personnes publiques prévoit que toute occupation ou utilisation du domaine public d'une personne publique donne lieu au paiement d'une redevance. En l'occurrence, le passage d'une conduite dans la rivière peut donner lieu au paiement de cette redevance. Celle-ci doit tenir compte des avantages de toute nature procurés au titulaire de l'autorisation. Elle est payable d'avance et annuellement. Toutefois, le bénéficiaire peut :

- être admis à se libérer par le versement d'acomptes.
- être tenu de se libérer par le versement de la redevance due soit pour toute la durée de l'autorisation si cette durée n'excède pas cinq ans, soit pour une période quinquennale dans le cas contraire.

- **La redevance pour prise d'eau sur le domaine public des collectivités** : En outre, selon l'article L2125-7 du même code, les titulaires d'autorisations de prise d'eau sur le domaine public fluvial appartenant ou confié en gestion à une collectivité territoriale sont assujettis à payer une redevance perçue au profit de celle-ci. Elle est établie par délibération de l'assemblée délibérante de la collectivité. En vertu de l'article 16 du Décret n°2005-992 du 16 août 2005, lorsque les autorisations de prises d'eau concernent un ouvrage hydroélectrique autorisé en application de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique, cette redevance est égale au produit de la puissance maximale brute autorisée de la chute par un taux de base ne pouvant dépasser 18,3 € par *kW*. La collectivité peut prévoir des abattements particuliers dans le cas de prises d'eau destinées à un usage agricole ou industriel ou à des usages d'intérêt public. Ces deux redevances (pour occupation du domaine public et pour prise d'eau) sont cumulables, sous réserve de ne pas dépasser un montant égal à 3 % du chiffre d'affaires annuel procuré par l'ouvrage l'année précédant l'année d'imposition.

#### Les redevances des agences de l'eau

Les installations hydroélectriques, qu'elles soient concédées ou autorisées, sont soumises aux redevances perçues au profit des agences de l'eau (article 84 de la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques). Ces redevances ont été rénovées par la loi sur l'eau du 30 décembre 2006. Cette loi répond aux objectifs de la directive cadre européenne sur l'eau. Elle propose des outils nouveaux et efficaces pour assurer la protection du milieu aquatique, et prévoit notamment à compter du 1<sup>er</sup> Janvier 2008, la perception de redevances :

- pour prélèvement d'eau destiné au fonctionnement d'installations hydroélectriques.
- pour obstacle sur les cours d'eau.
- pour stockage d'eau en période d'étiage.

• **La redevance pour prélèvement d'eau destiné au fonctionnement d'une installation hydroélectrique :** Cette redevance est due par toute personne exploitant une installation hydroélectrique, dont le volume d'eau turbiné dans l'année est supérieur à un million de mètres cubes ( $m^3$ ). Le principe de cette redevance dont l'assiette est proportionnelle à l'énergie produite est analogue à l'ancien dispositif en vigueur sur le bassin Adour-Garonne avant l'instauration de la LEMA . Lorsque le prélèvement est destiné au fonctionnement d'une installation hydroélectrique, cette redevance est assise sur le produit du volume d'eau turbiné dans l'année exprimé en mètres cubes par hauteur totale de chute brute de l'installation telle qu'elle figure dans le titre administratif, exprimée en mètres.

$$\text{Redevance} = \text{assiette} * \text{taux}$$

L'assiette est le produit du volume d'eau turbiné<sup>6</sup> dans l'année en  $m^3$  par la hauteur de chute de l'installation en mètre. Le taux par million de  $m^3$  et par mètre de chute est fixé par l'agence de l'eau. Ce taux est multiplié par 1,5 lorsque l'installation ne fonctionne pas au fil de l'eau<sup>7</sup>. Sur le bassin Adour-Garonne pour l'année 2009 le taux moyen de base est de l'ordre de 0.25€/MWh.

• **La redevance pour stockage d'eau en période d'étiage :** Cette redevance est due par toute personne qui procède au stockage de tout ou partie du volume écoulé d'un cours d'eau en période d'étiage, sous réserve que la capacité de l'installation soit supérieure à un million de  $m^3$ . elle a vocation à pénaliser les gestionnaires qui stockent de l'eau dans leur réservoir en période d'étiage au moment où les autres usages et les milieux aquatiques en ont le plus besoin.

$$\text{Redevance} = \text{assiette} * \text{taux}$$

Elle est assise sur le volume d'eau stocké pendant l'étiage. Ce volume correspond à la différence entre le volume stocké en fin de période et celui stocké en début de période. Le taux de la redevance est fixé par chaque agence de l'eau dans la limite maximale de 0,01€ par  $m^3$ . Cette redevance est perçue par l'agence de l'eau du bassin concerné.

• **La redevance pour obstacle sur les cours d'eau :** Cette redevance est due par tout propriétaire d'un ouvrage qui constitue un obstacle continu entre les deux rives d'un cours d'eau, à l'exception des ouvrages :

- faisant partie d'installations hydroélectriques ; les ouvrages hydroélectriques en sont donc exonérés.

---

<sup>6</sup> En l'absence de la connaissance de ce volume, la formule suivante sera appliquée :  $V = 367 \frac{E}{H r}$ , avec E= énergie électrique produite (kWh), H = hauteur de chute brute, r = rendement global de l'installation.

<sup>7</sup> Les installations qui ne fonctionnent pas au fil de l'eau sont celles dont le titre administratif autorise le fonctionnement par éclusées.

### Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

- dont la dénivellation<sup>8</sup> est inférieure à 5 mètres.
- implantés sur les cours d'eau dont le débit moyen interannuel est inférieur à 0,3m<sup>3</sup>/s au droit de l'obstacle.

Les redevances versées au Ministère de l'Environnement et du Développement Durable

La redevance piscicole est versée au Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. L'annexe du décret n°95-1205 du 6 novembre 1995, approuvant le modèle de règlement d'eau des entreprises autorisées à utiliser l'énergie hydraulique, présente dans son article 9 « les dispositions pour compenser les atteintes que la présence et le fonctionnement de l'ouvrage apportent à la vie, à la circulation et à la reproduction des espèces de poissons, ainsi qu'au milieu aquatique ». La compensation est versée soit au titre de l'alevinage, soit au titre d'actions de restauration ou de participation à des programmes existants sur le cours d'eau où est située l'usine.

Pour cela, l'industriel dispose de plusieurs options :

- fournir des alevins.
- se libérer de la compensation en versant au Trésor Public une somme correspondant à la valeur d'une quantité d'alevins de truite fario (*Salmo trutta fario*) de 6 mois, à titre de fond de concours. Le montant est actualisé sur décision du Ministre de l'Environnement (en 2001, le prix de la truitelle fario de 6 mois est fixé à 126,90 € le mille et l'ombrette de 6 mois à 552,13 € le mille).
- se libérer de la compensation en aménageant des « dispositifs propres à assurer la libre circulation des poissons » comme par exemple grâce à des passes à poissons. En 1992, le montant total des sommes versées aux Associations Agréées de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques<sup>9</sup> (AAPPMA) au titre des compensations s'élève à 400 000 € au niveau national (CLER, 1994).

Les tarifs de rachat d'EDF pour la production d'hydroélectricité<sup>10</sup>

En ce qui concerne la production d'électricité à partir d'une source hydraulique, EDF est tenue de racheter la production à un tarif fixé par arrêté. Cependant, il faut distinguer les contrats signés avant 2006 et les nouveaux contrats (**Tableau III-1**).

	<b>Contrats signés avant 2006 (application de l'arrêté du 25 Juin 2001)</b>	<b>Nouveaux contrats (application de l'arrêté du 1<sup>er</sup> Mars 2007)</b>
<b>Tarif en c€/kWh</b>	5,49 à 6,10	6,07
<b>+ Prime à la régularité en hiver</b>	0 à 1,52	0 à 1,68
<b>+ Prime petites installations</b>	0	0,50 à 2,50

**Tableau III-1/ Tarif de rachat de l'hydroélectricité par EDF** Source : Meeddat

<sup>8</sup> La dénivellation est la différence de cote entre les lignes d'eau amont et aval de l'ouvrage. La cote amont correspond au niveau maximal de remplissage de la retenue. La cote aval est le niveau moyen du cours d'eau au plus près de la retenue.

<sup>9</sup> Voir annexe 9 sur les AAPPMA.

<sup>10</sup> Voir annexe 10 sur l'arrêté du 1<sup>er</sup> Mars 2007 fixant les conditions d'achat d'électricité produite par des installations utilisant l'énergie hydraulique des lacs, cours d'eau et mers.

## 2. Evaluation économique

L'appréciation des impacts d'un projet sur l'environnement socio- économique est un élément déterminant pour l'élaboration d'un projet hydroélectrique. L'évaluation monétaire, directe ou indirecte, des bénéfices et des dommages environnementaux fait partie intégrante du processus décisionnel pour tout projet. L'évaluation économique des biens environnementaux va bien au-delà de la simple production d'un chiffre représentant la valeur du bien évalué, puisqu'elle est aussi un intéressant outil d'appui à la décision :

- l'ordre de grandeur des bénéfices engendrés par la protection de l'environnement, alimente de nombreux débats et réflexions autour de l'environnement et permet ainsi de mettre en lumière l'importance relative des différents services générés par l'environnement.

- l'évaluation économique, en particulier quand elle se base sur des enquêtes auprès d'acteurs et/ou de citoyens, permet également d'appréhender les perceptions, compréhensions et connaissances des enjeux clés de la gestion de l'environnement.

En effet, tout projet va entraîner des externalités, c'est-à-dire lorsqu'une activité induit des coûts (externalités négatives) ou des bénéfices (externalités positives) pour un autre agent qui n'est pas impliqué. PIGOU en donne une définition plus précise : « l'essence du phénomène est qu'une personne A en même temps qu'elle fournit à une autre personne B un service déterminé pour lequel elle reçoit un paiement, procure par la même occasion des avantages ou des inconvénients d'une nature telle qu'un paiement ne puisse être imposé à ceux qui en bénéficient, ni une compensation prélevée au profit de ceux qui en souffrent. »

Il convient alors à la société d'internaliser une externalité négative, c'est-à-dire de prendre en compte dans ses calculs d'opportunité, les coûts associés à la dépollution ou à la dégradation de l'environnement. L'utilisation de cette notion pour analyser les problèmes d'environnement a été amenée par PIGOU, qui proposait leur correction par des taxes visant à amener le coût privé, supporté par l'agent qui fait le choix, au niveau du coût social supporté, du fait de ce choix, par l'ensemble des agents. Cela nous donne l'équation suivante:  $CS = CP + EE$  .

Avec CS : coût social

CP : coût privé

EE : externalité environnementale

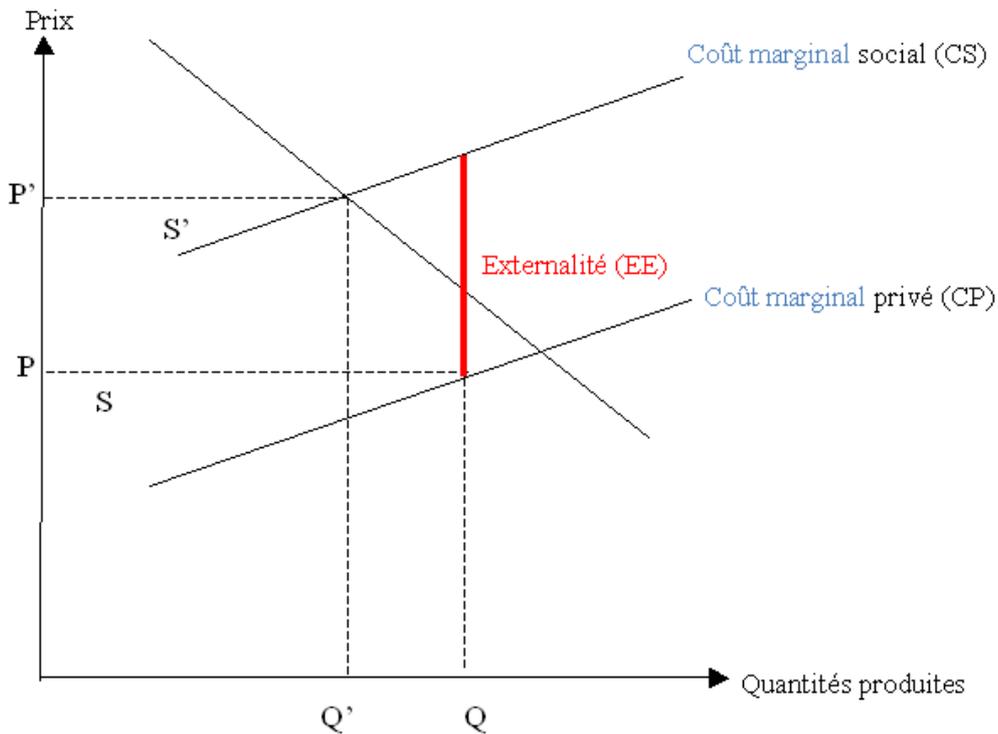


Figure III-6 Coût des externalités (Barrière, 2009)

On suppose une activité de production quelconque. A l'équilibre, une quantité  $Q$  sera produite pour un prix  $P$ . On suppose l'existence d'une externalité, donc le prix  $P$  ne reflète pas la totalité des coûts engendrés par la production. Par conséquent, le coût privé de production doit être augmenté des éléments du coût social, ce qui se traduit par un glissement de la courbe d'offre de  $S$  à  $S'$ , c'est-à-dire par le passage du coût marginal privé au coût marginal social. L'internalisation de cette externalité engendre un nouveau prix  $P'$ , plus élevé que  $P$  et d'une quantité produite moindre. En résumé, l'externalité est l'écart entre le coût social et le coût privé.

Un projet de production d'hydroélectricité entraîne des impacts sur l'environnement et représente un coût social ou collectif. Le plus souvent, cet impact échappe au calcul économique, son coût est externalisé. Il n'existe pas de reconnaissance économique (établissement d'un prix et d'un marché, paiement, rémunération) des fonctions écologiques et des services environnementaux rendus par les écosystèmes. Ces services sont les avantages que nous tirons de la nature gratuitement (purification de l'eau, régulation du climat...).

Toute forme de vie s'intègre dans un écosystème, ce dernier étant composé d'un ensemble d'êtres vivants (biote) et de leur milieu non biologique. La vie humaine ne serait pas possible sans la purification de l'eau et de l'air, le cycle des nutriments et le maintien de la biodiversité ; la nature fournit gratuitement ces services écosystémiques. Ces services sont de nature économique, car ils possèdent une valeur économique : ils offrent des bénéfices aux êtres humains. Ces biens publics<sup>11</sup> n'ont généralement pas de marché ou de prix. Leur disparition n'est donc pas prise en compte par

<sup>11</sup> Voir annexe 15 sur les biens publics.

notre système économique actuel. Les écosystèmes naturels et cultivés apportent des produits et des services aux sociétés humaines, ils ont une forte valeur écologique mais aussi économique et socioculturelle. Le premier article (Costanza et al, 1997) conclut que la biosphère rapporte à l'Homme 33 trillions de dollars par ans. Ces services écosystémiques sont divisés en quatre catégories :

- les services d'approvisionnement qui permettent la production de biens marchands valorisés par les circuits économiques (matières premières : bois, eau ; minerais...) Ils peuvent être retranscrits grâce à la quantité de biens issus des écosystèmes.
- les services culturels qui permettent la fourniture de biens et services dans le domaine social (promenades, randonnées...) On peut les quantifier via la fréquentation.
- les services de régulation tels que le piégeage de carbone ou l'épuration des eaux. Leur comptabilisation se fait à travers des modèles basés sur des observations et sur de la prédiction.
- les services de soutien. Ils sont la condition du maintien des conditions favorables à la vie sur Terre, avec notamment les cycles biogéochimiques<sup>12</sup> des éléments (nutritifs ou non). Ils contribuent notamment à l'entretien des équilibres écologiques locaux et globaux, à la stabilité de la production d'oxygène atmosphérique et du climat global, à la formation et la stabilité des sols, au cycle entretenu des éléments et à l'offre d'habitat pour toutes les espèces.

Les services écosystémiques

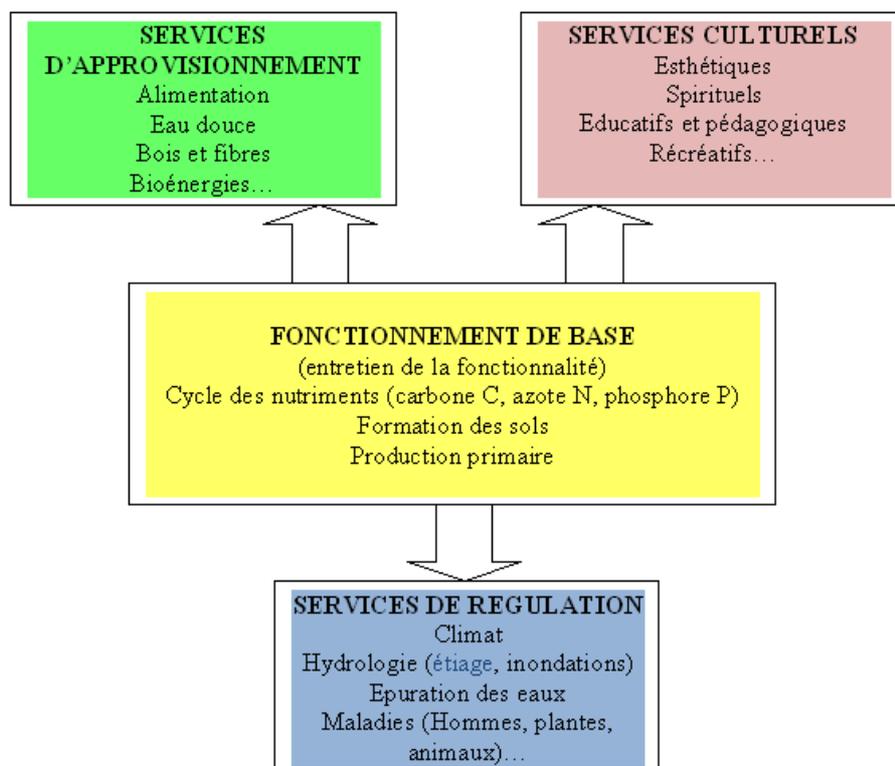


Figure III-7 Les services écosystémiques (Barrière, 2009)

<sup>12</sup> Un cycle biogéochimique est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère. Par exemple le cycle de l'eau, de l'oxygène, du carbone, de l'azote...

Il convient alors de valoriser les dommages infligés par les activités humaines pour pouvoir internaliser les coûts environnementaux. L'évaluation de la rentabilité socio-économique d'un projet vise à apprécier l'intérêt qu'il présente à la fois pour l'investisseur, mais aussi pour l'ensemble de la collectivité. Les dommages sont les pertes encourues par les agents économiques comme conséquences directes d'une dégradation donnée (observée ou potentielle) de la qualité de l'environnement. Ces pertes sont exprimées à travers deux étapes :

- d'abord des effets qualitatifs et quantitatifs physiques, c'est-à-dire non monétaires.
- puis en monnaie afin de permettre une estimation globale et des comparaisons entre des situations alternatives.

Les dommages monétaires correspondant à un effet donné sont les sommes d'argent nécessaires pour apporter une compensation aux agents économiques qui ont subi un préjudice. Ils se décomposent en deux catégories:

- les pertes financières : modification du niveau de dépenses résultant des modifications dans la qualité de l'environnement. Ces coûts permettent de s'adapter à la dégradation mais pas nécessairement de la neutraliser intégralement. Dans le cas de l'hydroélectricité, les pertes financières peuvent être dues à la diminution de la production électrique.

- pertes d'aménités: à caractère immatériel (diminution de services non marchands tels que la santé, le plaisir, le confort...) et résiduel (différence entre le dommage monétaire total et les pertes financières comptabilisées). En ce qui concerne l'hydroélectricité, cela peut être l'impossibilité de pratiquer une activité sur un cours d'eau aménagé, ou de pêcher.

La notion de Valeur Economique Totale (VET) fournit une mesure globale de la valeur économique de tout actif environnemental. Elle se décompose en valeur d'usage et en valeur de non-usage. Les valeurs d'usage se composent des valeurs d'usage direct et indirect et de la valeur d'option ; ce sont des valeurs anthropocentriques instrumentales<sup>13</sup>. Les valeurs de non-usage intègrent la valeur de legs et la valeur d'existence ; ce sont des valeurs anthropocentriques intrinsèques<sup>14</sup>. Les différents types de valeur d'un actif naturel :

- Valeur économique totale : somme de tous les types de valeur d'usage et de non-usage d'un bien ou d'un service.
- Valeur d'usage : valeur retirée de l'utilisation d'un bien ou d'un service. Elle correspond à l'utilisation effective (par exemple la pêche), envisagée (pêche prévue dans l'avenir) ou possible du bien en question.
- Valeur d'option : valeur accordée par des personnes à la possibilité de pouvoir bénéficier d'un bien dans le futur, même si elles ne l'utilisent pas actuellement.
- Valeur de non-usage : valeur qui n'est pas associée à un usage réel, ou même à la possibilité d'utiliser un bien ou un service. Valeur relative à la satisfaction de savoir qu'un actif ou un état de fait désirable existe. Les personnes veulent préserver un bien qu'ils n'utilisent pas

---

<sup>13</sup> La valeur anthropocentrique instrumentale correspond à ce que l'on entend par « valeur économique totale d'usage et de non-usage ».

<sup>14</sup> La valeur anthropocentrique intrinsèque correspond au fait que les ressources naturelles ont une valeur en soi mais cette forme de valeur reste anthropocentrique car c'est l'être humain qui l'accorde aux éléments naturels.

effectivement, qu'ils n'envisagent pas d'utiliser ou qu'il est impossible d'utiliser. Ces valeurs sont souvent liées aux notions, de justice, ou de respect de la Nature et permettent de justifier la protection d'espèces ou de sites naturels connus.

- Valeur de legs : valeur accordée au fait de savoir que les générations futures pourront bénéficier du bien étudié.

- Valeur altruiste : valeur reflétant le souci de rendre le bien concerné accessible à d'autres personnes de la génération du moment.

- Valeur patrimoniale : valeur reflétant le souci d'assurer à la prochaine génération et aux générations suivantes la possibilité d'utiliser le bien en question.

- Valeur d'existence : valeur accordée par des personnes au fait de savoir qu'un bien existe, même si elles ne le verront ou ne l'utiliseront jamais, par exemple pour le desman des Pyrénées ou l'euprocte des Pyrénées. Les motivations peuvent varier et inclure un intérêt pour le bien lui-même ou un souci de protection conduisant à se sentir responsable du bien lui-même.

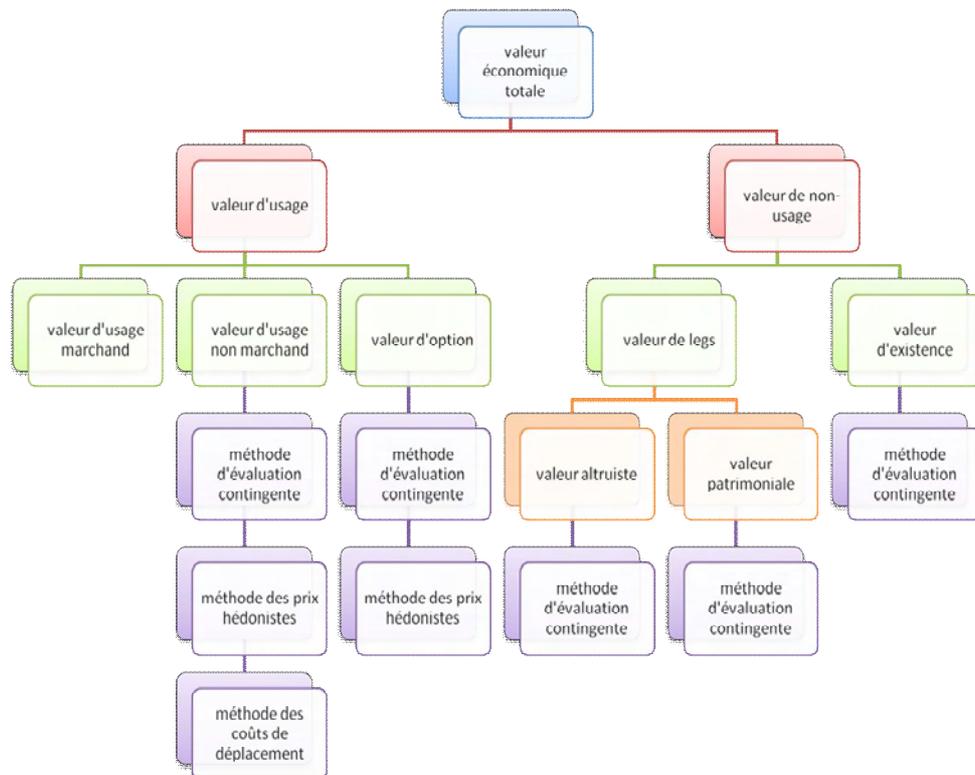


Figure III-8 Valeur économique totale d'un bien naturel (Barrière, 2009)

Les usages de l'eau se différencient selon qu'elle est employée comme agent (de transport, d'échange de matière ou d'énergie), ou comme milieu ou espace (de vie, d'activité, de protection). Les premiers requièrent surtout un flux d'eau, les seconds un volume. La ressource eau permet de nombreux usages, qui parfois sont incompatibles. Alors apparaît un conflit d'usage autour de la ressource. On différencie les utilisations caprices, qui détournent l'eau du milieu naturel et les utilisations in situ qui ne détournent pas l'eau du milieu naturel mais qui utilisent sur place certains potentiels fonctionnels de l'eau.

	<b>Utilisations caprices</b>	<b>Utilisations in situ</b>
<b>Usages actifs (eau-agent)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- usages alimentaires (humains, animaux, cultures)</li> <li>- irrigation, arrosage</li> <li>- lavage, lessivage</li> <li>- chauffage, refroidissement</li> <li>- usages hydrauliques (avec dérivation)</li> <li>- incorporation à des produits</li> <li>- usages chimiques</li> <li>- usages thermomécaniques</li> <li>- processus de fabrication divers</li> <li>- usage offensif (projectile)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- usages hydrauliques au fil de l'eau</li> <li>- flottage</li> <li>- certains lavages</li> <li>- usages visuels (décor d'eau mobile)</li> </ul>
<b>Usages passifs (eau-milieu)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- usages aquatiques hors milieu (bassin aquarium)</li> <li>- navigation (canaux)</li> <li>- baignade, nautisme (piscines, plans d'eau artificiels)</li> <li>- défense, barrière (aux radiations...)</li> <li>- usages visuels (pièces d'eau décoratives)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- usages aquatiques (eau-milieu de vie naturel)</li> <li>- navigation fluviale, lacustre</li> <li>- baignade, nautisme</li> <li>- usages visuels (décor d'eau statique naturel)</li> </ul>

**Tableau III-2 Usage et utilisation de l'eau**

La mesure monétaire des dommages est très complexe. Etant donné que les biens d'environnement ne s'échangent pas sur les marchés, il est nécessaire de recourir à des méthodes spécifiques. L'évaluation économique des bénéfices environnementaux suppose la valorisation de biens et de services environnementaux qui souvent ne sont pas pris en compte par les circuits économiques existants.

### 2.a) Les coûts directs de l'hydroélectricité

Ils regroupent les coûts qui sont à la charge du producteur de l'hydroélectricité et ils déterminent la rentabilité de l'aménagement. Ils peuvent être divisés en deux types de catégories : les dépenses d'investissement et les dépenses de fonctionnement.

#### Les dépenses d'investissement

Les dépenses d'investissement couvrent les coûts des études et demande d'autorisation<sup>15</sup>, de génie civil, l'achat du terrain, la construction du barrage et de l'aménagement, l'achat du matériel hydrogénérateur, c'est-à-dire les turbines, alternateurs, l'appareillage électrique (transformateur, armoire d'automatisme, armoire de puissance, coffret de protection et condensateur) et le

<sup>15</sup> Voir annexe 16 sur les pièces du dossier de demande d'autorisation.

Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

raccordement au réseau. Pour un dossier de demande d'autorisation, le prix des études préliminaires varie entre 10 000 € (demande simplifiée avec notice d'impacts) et 30 000 € (demande avec étude d'impacts). Pour les projets soumis au régime de la concession, d'une puissance supérieure à 4500 kW, le montant des études peut dépasser ce montant. Le coût des études comprend :

- les études techniques, (études hydrauliques et géotechniques).
- les études d'environnement, (les études hydrobiologiques et l'étude d'impacts environnementaux).
- les études économiques et financières.

A ces différents coûts d'investissement, peuvent s'ajouter ceux d'une éventuelle échelle à poissons, ou autres dispositifs de franchissement. Ces ouvrages visent à réduire l'impact lié à l'obstacle que constitue l'ouvrage de prise pour les poissons migrateurs. Il est indispensable de prévoir, dès la conception du projet, un système d'échelles ou de passes tenant compte des caractéristiques hydrauliques de la rivière et des caractéristiques biologiques des espèces migratrices présentes. Le coût approximatif<sup>16</sup> d'une échelle à poissons est de 15 000 € par mètre de dénivellation. Les dispositifs de franchissement, en dehors du débit qu'ils utilisent pour fonctionner, peuvent représenter un coût d'investissement important. Par conséquent, le coût d'un tel aménagement peut représenter de 5 à 20 % du coût global de l'aménagement hydroélectrique.

Les conditions d'installation de l'ouvrage, telles que la hauteur de chute ou le débit, les différences géologiques et hydrographiques des sites à équiper, influent grandement sur les coûts. C'est pourquoi, les coûts présentés sont des moyennes. Le coût d'installation<sup>17</sup> du kW hydraulique en France oscille pour une PCH entre 1 200 et 3 000 € ; le coût moyen est évalué très grossièrement à 2000 €.

Investissement en € par kW	Puissance en kW							
	Basse chute					Haute chute		
Taux d'actualisation	500 kW	800 kW	1100 kW	1200 kW	2780 kW	800 kW	2000 kW	3000 kW
3 %	2085	1975	1975	1755	1317	1207	1317	1262
5 %	2210	2094	2094	1861	1396	1280	1396	1338
8 %	2402	2276	2276	2023	1517	1391	1517	1454
11 %	2599	2462	2462	2189	1641	1505	1641	1573

**Tableau III-3 Coûts d'investissement total intérêts intercalaires compris des centrales hydrauliques (Source : MINEFI)**

On constate donc que suivant le taux d'actualisation retenu, ainsi qu'en fonction de la puissance de l'installation, le coût du kW est compris dans une fourchette allant de 1 207 € à 2 599 €. Le coût

<sup>16</sup> Etude de l'Ademe mars 2003.

<sup>17</sup> Etude de l'Ademe mars 2003.

d'investissement dépend fortement du site d'implantation et de ses caractéristiques. Selon le Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (MINEFI), le coût de l'investissement total en hydroélectricité est compris entre 1 500 € et 2 700 € par *kW*. Ainsi, le coût de production moyen s'étale entre 0,033 € et 0,053 € par *kWh*. Un coût élevé de l'investissement ne signifie cependant pas que le *kWh* hydroélectrique est plus coûteux que les autres puisque annuellement les dépenses de fonctionnement seront très réduites.

#### Les dépenses de fonctionnement

Les dépenses de fonctionnement comprennent les salaires du personnel, les frais de maintenance... Ce sont des dépenses qui se répètent pendant toute la durée de vie des installations. La durée de vie d'une installation est en moyenne de 30 ans. Cette durée correspond à la durée de vie des turbines. Les charges de fonctionnement ou coûts d'exploitation varient en fonction de la taille et des caractéristiques de la PCH, des méthodes d'exploitation et du montage juridique et financier. Les coûts directs d'exploitation comprennent :

- les frais de personnel, principalement du gardiennage et des petites interventions d'entretien des installations et bâtiments.
- les consommables : huiles, électricité, pièces d'usine...
- la maintenance.
- la taxe professionnelle et les redevances.
- les diverses assurances.

Ces coûts directs d'exploitation représentent, en moyenne, selon le type d'installation, entre 10 et 30 % des recettes brutes. Le coût du *kWh* hydroélectrique est constitué à 75% de charges d'investissement (capital initial et intérêts), ce qui en fait une filière de production électrique à base de coûts fixes. Afin de donner un exemple concret, j'ai interviewé le propriétaire<sup>18</sup> d'un seuil sur la commune de Prat Bonrepaux. C'est une installation de basse chute (3,40 m) avec une digue de 150 m. Cet aménagement a été exploité à nouveau dans les années 1960 et il est placé sous un régime fondé en titre. La production annuelle se situe en moyenne aux alentours de 1 800 000 *kWh*. La production horaire est de 370 *kW* maximum et de 150 *kW* en période d'étiage. En moyenne, la production est de 1 800 000 *kWh*, elle peut aller jusqu'à 2 200 000 *kWh* pour les très bonnes années, et être de 1 400 000 *kWh* les années de sécheresse. La première partie de l'installation a été rénovée et remise en route en 1961, pour une puissance de 250 *kW*, et la seconde partie date de 1979-1980 avec une puissance de 150 *kW*. Sur cet aménagement, le propriétaire a aménagé une passe à poissons en 1988, mais pas de passe à kayak, car les kayakistes sautent le seuil qui n'est que d'un mètre de hauteur. Un salarié à mi-temps est employé sur la centrale, et ce à l'année.

Quand l'installation a été mise en route, les coûts d'investissement étaient les suivants :

---

<sup>18</sup> Je remercie M. COUZINET François, propriétaire du Moulin de Bonrepaux, dans la commune de Prat Bonrepaux, pour ses renseignements et son implication.

Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

339 016,39 €<sup>19</sup> (229 865 francs 1960) pour la première partie de l'installation datant de 1960 (250 kW).

175 318,58 €<sup>20</sup> (452 225 francs 1980) pour seconde partie de l'installation datant de 1980 (150 kW).

En ce qui concerne les dépenses de fonctionnement annuelles :

DEPENSES	RECETTES
<p><b><u>Salarié (coût annuel):</u></b>                      Salaire net : 9 660 €                      URSAFF : 3 461 €                      ASSEDIC : 518 €                      Régime complémentaire CGIS : 716 €                      Formation professionnelle : 69 €                      Taxe d'apprentissage : 85 €                      Médecine du travail : 83,60 €  <b>Total : 14 592,60 €</b></p>	<p><b><u>Rachat d'électricité par EDF :</u></b>                      Recettes hors taxes : 120 367 €    <b>Total : 120 367 €</b></p>
<p><b><u>Taxes et redevances (coût annuel) :</u></b>                      Taxe professionnelle : 794 €                      Redevances à l'Agence de l'eau : 400 €  <b>Total : 1 194 €</b></p>	
<p><b><u>Cotisations diverses :</u></b>                      Assurances : 7 893 €                      Syndicat : 645 €  <b>Total : 8 538 €</b></p>	
<p><b><u>Frais comptables :</u></b>                      Frais comptables : 5 252 €  <b>Total : 5 252 €</b></p>	
<p><b><u>Frais de contrôle :</u></b>                      APAVE<sup>21</sup> : 352 €                      Contrôle thermographique : 179 €  <b>Total : 531 €</b></p>	
<p><b><u>Frais divers :</u></b>                      Entretien, pièces ... : 7 500 €  <b>Total : 7 500 €</b></p>	
<b>TOTAL : 37 607,60 €</b>	<b>TOTAL : 120 367 €</b>

Tableau III-4 : Dépense de fonctionnement annuel

<sup>19</sup> 1FF 1960 = 1,47485€2008. INSEE <http://www.insee.fr>

<sup>20</sup> 1FF 1980 = 0,38768€2008. INSEE <http://www.insee.fr>

<sup>21</sup> Organisme d'inspection, assistance et contrôle technique, qualité et formation.

Aux dires du propriétaire, les frais d'entretien divers se situent entre 5 000 et 10 000 €, donc en moyenne 7 500 €. Au regard de ce tableau, on constate que le chiffre d'affaires de l'aménagement est de 120 367 € et le bénéfice de 82 759 ,40 €. On peut donc conclure que la production d'électricité via un aménagement hydraulique génère un chiffre d'affaires intéressant. De plus, ce type d'installation ne paye pas d'impôt particulier, mise à part la taxe professionnelle. Elle est considérée comme une SARL (Société A Responsabilité Limitée) avec un régime fiscal en société collective, c'est-à-dire que chaque associé est directement imposé sur ses propres revenus. Après avoir énoncé les coûts directs liés à la production d'hydroélectricité, il convient de parler des coûts externes, du moins des méthodes de prise en compte de ces coûts.

## 2.b) L'analyse par observation des prix de marché

Dans ce paragraphe, nous allons traiter des coûts évités, ainsi que des coûts de remplacement. De plus, nous parlerons les coûts liés à la perte de production de l'hydroélectricité.

### Les coûts évités

La méthode des coûts évités évalue les bénéfices liés à une amélioration de la qualité de l'air par la comptabilisation des coûts qu'entraîne la pollution atmosphérique. C'est une approche purement comptable mais qui paraît être plutôt bien adaptée en ce qui concerne l'hydroélectricité, surtout dans le cas où elle se substitue à un autre mode de production. Elle est basée sur des évaluations reflétant les valeurs du marché. Cependant, les bénéfices non marchands ne sont pas pris en compte.

L'énergie hydraulique est un mode de production d'électricité très peu émetteur de CO<sub>2</sub>, ce qui lui permet de ne pas contribuer à l'aggravation de l'effet de serre à l'inverse des énergies fossiles. L'hydroélectricité a un rôle primordial à jouer dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et elle n'occasionne pas de pollution atmosphérique contrairement aux moyens de production fossiles, ni de déchets comme l'énergie nucléaire. Par conséquent, elle joue un rôle à l'échelle globale grâce à l'effet de serre évité, et à l'échelle régionale concernant les polluants atmosphériques. Les énergies fossiles sont caractérisées par de nombreuses externalités négatives d'ordre environnemental (émissions de GES, pollution) ; social (augmentation de la facture énergétique), géopolitique (dépendance énergétique, terrorisme, insécurité d'approvisionnement) et économique (déséquilibre de la balance des paiements, coûts de la prévention et de réparation des catastrophes naturelles).

Les centrales électriques génèrent des émissions de CO<sub>2</sub> différentes suivant le combustible utilisé. Pour l'électricité, l'établissement d'un facteur d'émission de CO<sub>2</sub> pose problème et ce à cause de l'impossibilité de connaître l'origine de l'électricité consommée (électricité d'origine nucléaire, hydraulique ou produite en centrales thermiques). En effet, un kWh consommé en période de base, lorsque les barrages hydroélectriques et les centrales fournissent la totalité du courant, n'a pas le même contenu en CO<sub>2</sub> qu'un kWh consommé en période de pointe durant laquelle les centrales

thermiques classiques sont sollicitées. Les niveaux d'émissions relatifs à chacun des modes de production possibles sont récapitulés dans les tableaux suivants.

	Emission de CO <sub>2</sub>
<b>Charbon</b>	915
<b>Fioul</b>	676
<b>Gaz/Cycle combiné</b>	404
<b>Cogénération gaz</b>	230 à 380 <sup>22</sup>
<b>Unité d'incinération des ordures ménagères</b>	860 à 1548
<b>Nucléaire</b>	0
<b>Eolien</b>	0
<b>Hydraulique</b>	0

Tableau III-5 *Émissions de CO<sub>2</sub> des centrales électriques (en gCO<sub>2</sub>/kWh) Source : Ademe*

	Pétrole	Charbon	Gaz naturel	Hydroélectricité
<b>Dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)</b>	4,50	4,50	0,02	0
<b>Oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>)</b>	3,7	0,6	2,2	0
<b>Gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)</b>	3000	3750	2250	0
<b>Déchets solides</b>	105	611	0	0

Tableau III-6 *Emissions comparées d'une PCH de 1000 kW fonctionnant 4500 heures par an et d'autres solutions de production d'électricité (en tonnes) Source : Données Systèmes Solaires n°119, 1997*

L'objectif de la taxe carbone est de corriger l'imperfection et la volatilité du marché des énergies fossiles, en instaurant un prix du carbone stable. Ce prix doit être suffisamment conséquent pour encourager le recours à des modes de production d'énergie moins émetteurs de CO<sub>2</sub>. Un centre d'analyse stratégique a été mis en place à la demande du premier ministre (Janvier 2008) d'une commission d'experts chargée d'arrêter une chronologie de valeurs de la tonne de CO<sub>2</sub> destinée à constituer la référence de la puissance publique. Ainsi, lors de la conférence des experts sur la contribution climat et énergie du 2 et 3 juillet 2009, le prix de la tonne de CO<sub>2</sub> a été fixé. Ce prix est une valeur tutélaire, c'est-à-dire que « les valeurs données au temps gagné ou perdu, au CO<sub>2</sub> émis ou évité sont dites tutélaires soit parce qu'elles ne sont pas fournies directement par un marché, soit parce que les valeurs de marché ne reflètent pas le coût social. Elles sont fixées par l'Etat et traduisent la valeur que celui-ci entend donner à ces effets non marchands. Ces valeurs ne sont pas arbitraires : elles sont fixées en fonction des attentes de la société telles qu'on peut les appréhender ; elles résultent d'un compromis élaboré dans une commission sur la base d'un dialogue entre économistes, partenaires économiques et sociaux, et représentants des organisations non gouvernementales» (Rapport Quinet, 2008).

<sup>22</sup> Les émissions de la cogénération gaz dépendent des techniques (turbines ou moteurs) et des rendements.

### Chapitre III : Synthèse bibliographique des impacts environnementaux et économiques des ouvrages hydroélectriques

Le rapport QUINET du Centre d'analyse stratégique, publié en 2008, a permis d'aboutir à un compromis entre les représentants de l'administration, des Organisations Non Gouvernementales (ONG) de protection de l'environnement, des syndicats et des entreprises autour d'une trajectoire de prix du CO<sub>2</sub> démarrant à 32 € en 2010 et augmentant de 5% par an jusqu'à 56 € en 2020 et 100 € en 2030, ceci en euros constants, c'est-à-dire déduction faite de l'inflation. Cette trajectoire augmente ensuite de 4% par an jusqu'à atteindre 200 € en 2050. Si l'on remplace une production de 1 MW issue d'une source d'énergie fossile par une PCH, cela permet d'éviter une consommation de 1350 tep ainsi que le rejet de nombreuses particules.

Source substituée (pour 1 MW, en tonnes)	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	Déchets solides
Charbon	6	8	5 000	815
Pétrole	6	5	4 000	140
Gaz naturel	0,03	3	3 000	0

**Tableau III-7 Rejets évités grâce à la production de 1 MW à partir d'une PCH (GERES - Ademe)**

La production hydroélectrique de 1000 kWh représente par rapport à la même quantité d'électricité produite par une centrale à fuel, une économie de 0,220 tep et évite l'émission de 690 kg de CO<sub>2</sub>. Cependant, selon Bernard ROUSSEAU<sup>23</sup>, « les émissions de CO<sub>2</sub> évitées par le développement de l'hydroélectricité sont minimes par rapport à la dégradation des milieux causée par un tel développement. Les coûts que la dégradation des cours d'eau engendre sur les autres usages (pêche, tourisme, eau potable...) ne sont pas compensés par la production d'électricité ».

#### Les coûts de la perte de production hydroélectrique

Les mesures techniques envisagées lors de la restauration des aménagements existant sont susceptibles de provoquer des pertes pour l'activité hydroélectrique. Cela peut se traduire soit sous la forme d'une perte nette de volume d'eau à turbiner (perte de productible), soit sous forme d'un déplacement de ce volume vers des périodes où la valorisation de la production est moindre par rapport au fonctionnement optimisé actuel de l'ouvrage. Le coût des contraintes techniques est évalué en se basant sur le principe de la méthode tarifaire. Selon cette méthode, on déterminera deux termes pour estimer l'impact des mesures sur l'usage hydro-électricité :

- d'une part le coût de la perte d'énergie. L'énergie perdue doit être fournie par d'autres moyens dont on suppose qu'ils sont disponibles. La nature de ces moyens dépend de la situation de l'équilibre entre offre et demande d'électricité au moment où la perte intervient : il peut s'agir de nucléaire, de thermique à flamme ou d'énergies renouvelables, voire d'un effacement partiel de la demande. Cette diversité est prise en compte dans la méthode tarifaire. Le coût de la perte d'énergie correspond alors aux coûts de fonctionnement (essentiellement coûts de combustibles pour les moyens thermiques) ou de mise en œuvre de ces moyens utilisés en substitution.

<sup>23</sup> Bernard ROUSSEAU, responsable du réseau eau de France Nature Environnement (FNE), [http://www.actu-environnement.com/ae/news/developpement\\_hydroelectricite\\_6317.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/news/developpement_hydroelectricite_6317.php4)

- d'autre part le coût de la perte de puissance. Elle correspond à la perte de capacité de production, qui nécessiterait un redimensionnement du parc de production d'électricité pour conserver globalement la puissance disponible nécessaire à l'équilibre entre offre et demande. Le coût de la perte de puissance renvoie à des coûts d'investissement. Il est d'autant plus important que les mesures ont un impact à des moments proches de la pointe de demande, là où tous les moyens de production disponibles sont déjà mobilisés.

L'utilisation de la méthode tarifaire nécessite de connaître les pertes de productible (énergie et puissance) induites par la mesure de restauration et d'estimer si des reports de cette production vers d'autres plages sont possibles. Dans le cas où la mesure de restauration induit une perte nette de volume turbinable pour l'hydroélectricité, sans qu'une partie au moins de ce productible puisse être déplacée vers une autre production, alors, la valorisation de l'énergie perdue peut être faite en fonction de la grille proposée au tableau ci-après, qui est fonction des types d'ouvrages.

	Valorisation de l'énergie et de la puissance perdues
Lacs	70 € / MWh
Eclusées	50 € / MWh
Fils de l'eau	35 € / MWh

**Tableau III-8 Coûts unitaires des pertes de production selon les différents types de production**  
**Source : Test sur la confirmation des MEFM**

Dans le cas où la mesure de restauration consiste en un relèvement du débit réservé et où il n'y a pas de transferts possibles entre postes horo-saisonniers, alors le relèvement du débit réservé pour un tronçon court-circuité conduit à une perte de production qui en première approximation est proportionnelle à l'augmentation du débit réservé par rapport au débit réservé initial ; elle est fonction du :

- productible moyen de l'installation (P).
- d'un coefficient A, B, ou C qui tient compte de la catégorie de l'usine.

On différencie alors trois situations :

- pour les usines de type lac (A) : la capacité du réservoir est telle, en regard des apports du cours d'eau, qu'à l'exception des débits réservés, l'intégralité des apports est turbinée.
- pour les usines de type éclusées (B) : en comparaison avec les usines de type lac, la capacité du réservoir est plus limitée, l'usine ne peut turbiner l'intégralité des apports.
- pour les usines de type fil de l'eau (C) : on fait l'hypothèse que seulement la moitié des apports est turbinée. Cette hypothèse est cohérente avec les principales grandeurs caractéristiques de l'hydrologie. Les usines au fil de l'eau ont un débit d'équipement comparable au module du cours d'eau et en moyenne, la moitié des débits observés sur un cours d'eau reste inférieure au module et peut donc être turbinée. Dans tous les cas, on considère ici, que le débit réservé supplémentaire n'est pas turbiné, ce qui peut conduire à surévaluer la perte énergétique.

Catégorie d'usine	Perte énergétique liée au relèvement du débit réservé			
	Valeur du débit réservé			
	Module/40	Module/20	Module/10	Module/5
Lac	0	$A \times P / 40$	$A \times P \times 3 / 40$	$A \times P \times 7 / 40$
Eclusées	0	$B \times P / 40$	$B \times P \times 3 / 40$	$B \times P \times 7 / 40$
Fil de l'eau	0	$C \times P / 40$	$C \times P \times 3 / 40$	$C \times P \times 7 / 40$

**Tableau III-9 Calcul de la perte énergétique due au relèvement du débit réservé (Source : Test sur la confirmation des MEFM)**

La monétarisation est réalisée par la multiplication du coût du kWh du tableau des coûts unitaires des pertes de production selon les différents types de production avec les pertes de production. Dans le cas où la mesure de restauration consiste en un relèvement du débit de base des éclusées, alors le relèvement du débit de base au niveau de l'usine, dès lors que ce débit peut être turbiné, ne génère pas une perte nette de production mais plutôt une perte d'énergie de pointe et modulable. En effet, les volumes supplémentaires utilisés pour relever le débit de base ne sont plus valorisés en période de pointe mais utilisés en production de base. Une augmentation du débit de base conduit à une baisse du coefficient d'amplitude de l'éclusee.

Le problème est qu'en cas de perte de productible hydroélectrique, la production d'électricité doit être assurée par d'autres moyens. Se pose alors la question des émissions de CO2 et du bilan carbone de chaque type de production.

## **IV Proposition d'outils et de méthodes pour l'analyse de projets hydroélectriques**

Face à la diversité des cas et à la complexité de certains projets et de leurs incidences sur le milieu, de même que dans le contexte d'une évolution de la réglementation des aménagements hydroélectriques, il convient d'abord de veiller au respect des procédures d'instruction et de s'assurer que les dossiers déposés soient les plus complets et les plus précis possible de façon à pouvoir juger de leur recevabilité. Dans cette optique, il est nécessaire de réaliser d'une part un inventaire des dispositifs en place, jugement des effets cumulés et d'autre part de hiérarchiser l'importance de différents aspects environnementaux pour lesquels l'implantation de nouveaux ouvrages serait potentiellement préjudiciable. Ainsi, à la fin de l'analyse une grille d'évaluation regroupant tout les critères importants hiérarchisés permettra de juger de la pertinence de l'implantation d'une nouvelle centrale au niveau d'un site donné.

Pour cela l'analyse menée ici se basera sur différents types de données : hydrologique, morphologique, et biologique (IBGN, IBD, IPR). En effet, il est aujourd'hui indispensable que l'évaluation de la qualité des cours d'eau repose à la fois sur l'analyse de la qualité biologique de ces écosystèmes, sur la morphologie et l'hydrologie des cours d'eau. Ces approches sont complémentaires.

### **IV.A Etat des lieux de l'existant**

#### **1. Aspects réglementaires**

Les aspects environnementaux sont aujourd'hui une donnée essentielle pour la réussite d'un projet. Dans un premier temps, il est indispensable de connaître les enjeux environnementaux forts existants sur un bassin, ce sera donc la première phase de la grille de lecture pour l'instruction d'un dossier.

Différents aspects sont à prendre en compte, par exemple:

- la situation du cours d'eau au regard de la loi *du 29 juin 1984* modifiée, dite «loi pêche» : rivière réservée, rivière classée,
- la présence de mesures de protection du milieu naturel fortes sur le cours d'eau : arrêté de protection de biotope, site Natura 2000, réserve naturelle, etc,
- la proximité de l'habitat avec les équipements de production (nuisances phoniques),
- l'insertion du projet dans un site et un paysage sensible : parc naturel régional, site inscrit ou classé, espace soumis à une directive paysagère, etc.

De plus, un certain nombre de directives et d'arrêtés fixent les espèces protégées et les habitats à protéger. -Par exemple, il existe un classement au titre des espèces protégées avec une protection intégrale de l'esturgeon européen (*par arrêté du 25/01/1982*) et des autres espèces migratrices à l'exception de l'anguille (*par arrêté du 8/12/1988*).

-La Directive Habitats-Faune-Flore (21/05/1992), elle protège toutes les espèces piscicoles (migratrices et non migratrices) pour lesquelles les habitats doivent être protégés.

-Le saumon et les aloses sont également des espèces d'intérêt communautaire dont le prélèvement dans la nature et l'exploitation sont susceptibles de faire l'objet de mesures de gestion.

-La convention de Berne (19/09/1979) porte sur la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel en Europe toutes les espèces pisciaires.

-La convention de Bonn (23/06/1979) a pour objectif la conservation à l'échelle mondiale des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage comme par exemple l'esturgeon (*Acipenser sturio*). Dans notre cas d'étude, **le bassin de la Garonne** accueille l'ensemble des espèces **migratrices** : l'anguille européenne, l'aloise feinte, la grande alose, la lamproie marine, la lamproie de rivière, le saumon atlantique, la truite de mer et l'esturgeon européen. Toutes les espèces migratrices sont classées vulnérables sur la liste rouge des espèces menacées (Keith et al., 1992) sauf l'esturgeon, considéré comme 'en danger' au niveau national ; ceci reflète la situation au vu de l'expertise scientifique. De plus, ce bassin bénéficie depuis 1984 d'un programme de restauration consacré aux poissons grands migrateurs. La loi 'pêche' (n°84-512 du 29/06/1984) relative à la pêche en eau douce et aux ressources piscicoles; codifiée dans le livre deuxième du Code de l'Environnement, a affirmé l'intérêt général de la préservation des milieux aquatiques et de la protection du patrimoine piscicole. La loi n°92-3 du 3/01/1992 - dite *Loi sur l'eau* - a introduit le principe d'une gestion équilibrée de la ressource en eau. L'Ariège et le Salat, cours d'eau majeur de la région d'étude, bénéficient de plusieurs réglementations favorables aux espèces migratrices :

1. a) Un exemple: l'Ariège :

Certains cours d'eau à forte valeur patrimoniale sont donc classés « réservés », ce qui signifie qu'ils sont alors protégés de toute nouvelle construction, et que les ouvrages préexistants ne peuvent augmenter la hauteur de chute du barrage (article 2 de la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydroélectrique). Dans le cas de l'Ariège, elle a été **notée** « Rivière réservée » en application de l'article 2 de la loi du 16/12/1919 modifiée et relative aux économies d'énergie, par les décrets du 28/07/87 sur la partie aval et du 25/04/89 sur la partie amont. La rivière est réservée de la confluence avec la Garonne jusqu'à l'aval du pont CD 820 (commune d'Ax-les-Thermes), à l'exception du secteur intermédiaire entre Foix (pont du chemin de fer reliant Toulouse à la Tour de Carol) et Le Vernet-Hameau de La Fargue (09). Sur les cours d'eau (ou sections de cours d'eau) réservés, aucune autorisation ou concession ne sera donnée pour de nouvelles entreprises hydrauliques. Pour les entreprises existantes, une concession ou une autorisation pourra être accordée sous réserve que la hauteur du barrage ne soit pas modifiée.

Toujours pour l'exemple du cas de l'Ariège, elle est classée en application de l'article L.432-6 du code de l'environnement qui fait obligation de réaliser des dispositifs de franchissement pour le poisson sur des cours d'eau dont les listes sont fixées par décret, qui peut être complété par la parution d'un arrêté ministériel fixant la liste des espèces migratrices. Par décret du 20/06/1989 et arrêté ministériel du 21/08/1989 fixant la liste des espèces migratrices, l'Ariège est classée :

- de la confluence avec la Garonne jusqu'à l'aval du barrage de Labarre (Foix), avec liste d'espèces (la truite fario, la truite de mer et le saumon atlantique).
- sur la Haute-Ariège (du barrage de Labarre à la confluence avec la Lauze), la liste d'espèces n'a pas encore été publiée.

Les arrêtés préfectoraux de protection de biotope sur la partie aval de l'Ariège jusqu'à Labarre (du 17/10/1989 dans le département de la Haute-Garonne) pour la grande alose, le saumon atlantique et la truite de mer ; du 30/10/1991 modifié le 02/03/94 et du 29/08/1988 modifié le 02/07/1990 dans le département de l'Ariège pour le saumon atlantique et la truite de mer. Il n'y a pas d'arrêtés de protection des biotopes en amont du barrage de Labarre. Le décret interministériel 94-157 du 16/02/1994 a défini les principes de base de la gestion des poissons migrateurs et a créé les **COGEPOMI** (**CO**mité de **GE**stion des **PO**issons **MI**grateurs). Ce décret fixe un cadre unique et cohérent de gestion des poissons migrateurs de part et d'autre de la salure des eaux jusqu'à la limite transversale de la mer « le plan de gestion des poissons migrateurs ». Ces plans, établis par période quinquennale, définissent les mesures utiles à la reproduction, au développement, à la conservation et à la circulation des poissons migrateurs.

De façon à permettre une meilleure visualisation régionale des enjeux environnementaux sur chaque bassin versant, il est réalisé une fiche par bassin localisant les tronçons soumis à la réglementation (l'ensemble des fiches est fourni dans un document annexe) (Figure IV-3 et Figure IV-4). On note que les drains principaux du Salat et de l'Ariège, sont les axes migrateurs amphihalins. De plus la plus part des cours d'eau et de leur affluents sur le territoire du PNR sont des cours d'eau remarquables en très bon état (Figure IV-1).

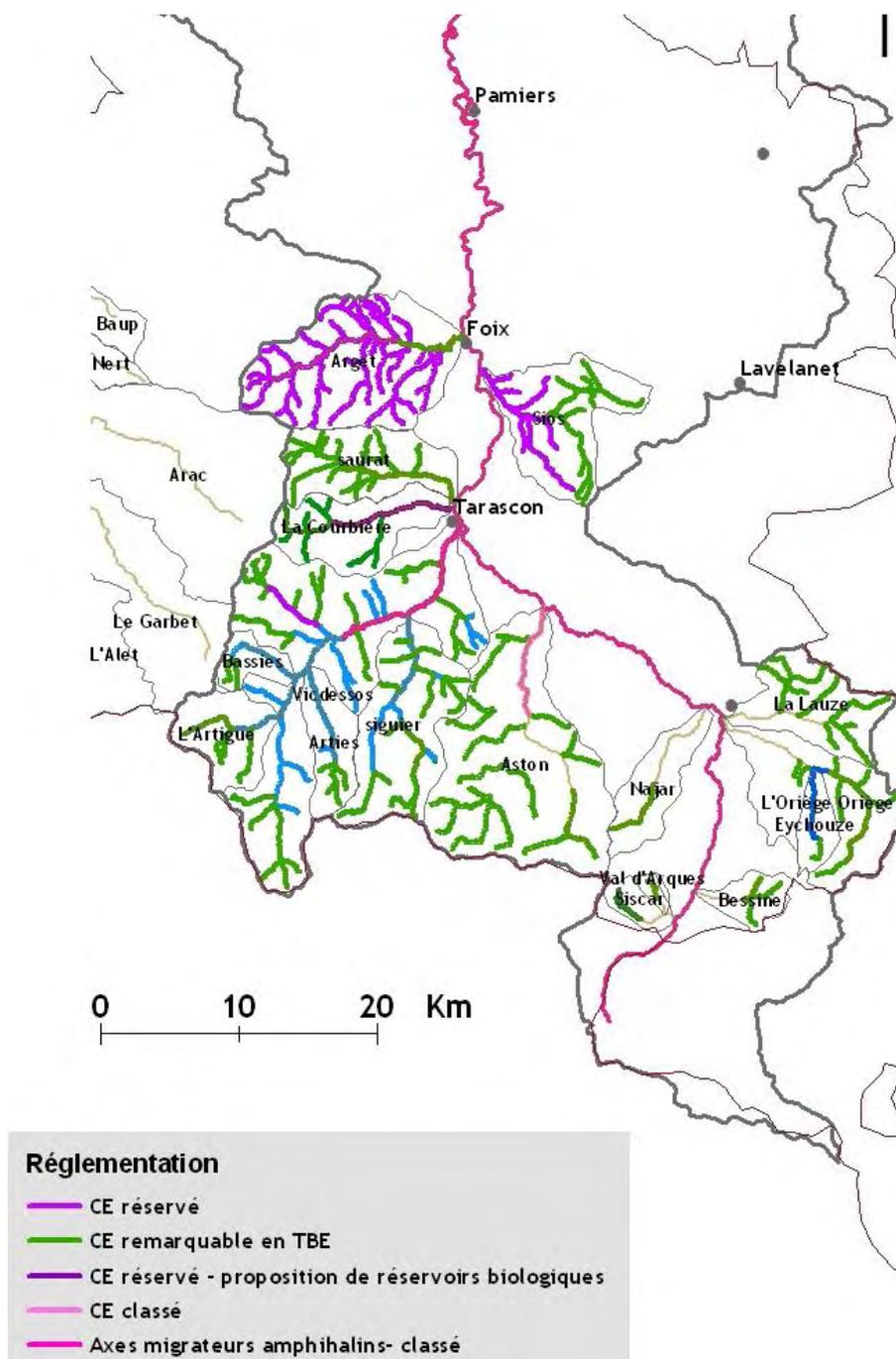


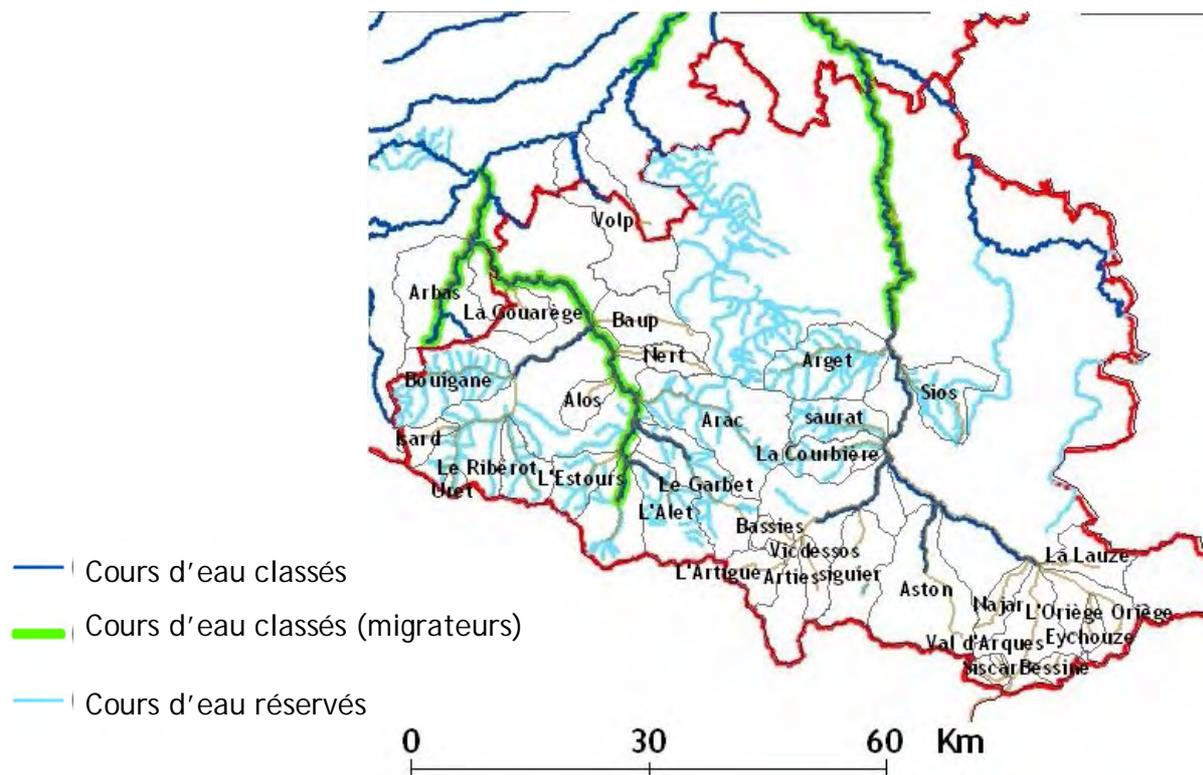
Figure IV-1 Carte synthétique de la réglementation en cours sur le bassin de l'Ariège.

1. b) Encadrement juridique par le SDAGE

Le 'SDAGE Adour-Garonne', approuvé le 06/08/1996, fixe notamment le cadre d'intervention prioritaire pour restaurer les populations de poissons migrateurs :

- en identifiant les axes prioritaires du bassin pour la restauration des grands migrateurs, les axes bleus.
- en recommandant la mise en cohérence des axes bleus et des classements réglementaires au titre des cours d'eau classés et réservés.
- en incitant la mise en oeuvre des programmes de restauration des grands migrateurs sur ces axes.

L'enjeu de préservation des secteurs encore relativement peu impactés est important pour le bassin Adour-Garonne. Une majorité d'entre eux est localisée dans des secteurs qui n'ont pas été mobilisés pour la production d'hydroélectricité. Dans le cadre de l'élaboration du SDAGE, des cours d'eau ou tronçons de cours d'eau remarquables ont été identifiés (cours d'eau en très bon état, réservoirs biologiques et cours d'eau à migrateurs amphihalins). Ces cours d'eau ou tronçons de cours d'eau, répartis en majorité sur les têtes de bassin, correspondent à un linéaire de 16 750 km. Ils sont en très bon état écologique et doivent être impérativement préservés de toute perturbation qui viendrait déstabiliser leur fonctionnement hydromorphologique et les écosystèmes rares qu'ils abritent.



**Figure IV-2 Cours d'eau réservés et classés en Ariège et localisation des sous bassins versants (du Salat et de l'Ariège)**

La Loi sur l'eau et les milieux aquatiques LEMA a introduit un article L214-17 dans le Code de l'environnement qui engage à la refonte complète des classements juridiques des cours d'eau en vue de préserver ou restaurer la continuité écologique. Ces classements devraient, selon les textes, intervenir au plus tard pour 2014 mais leur échéancier prévisionnel a été avancé à fin 2011 afin qu'ils puissent :

- contribuer à l'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique (trame verte et bleue) à élaborer d'ici fin 2012,
- permettre à la France de tenir ses engagements vis-à-vis de l'Europe au regard du plan national anguille

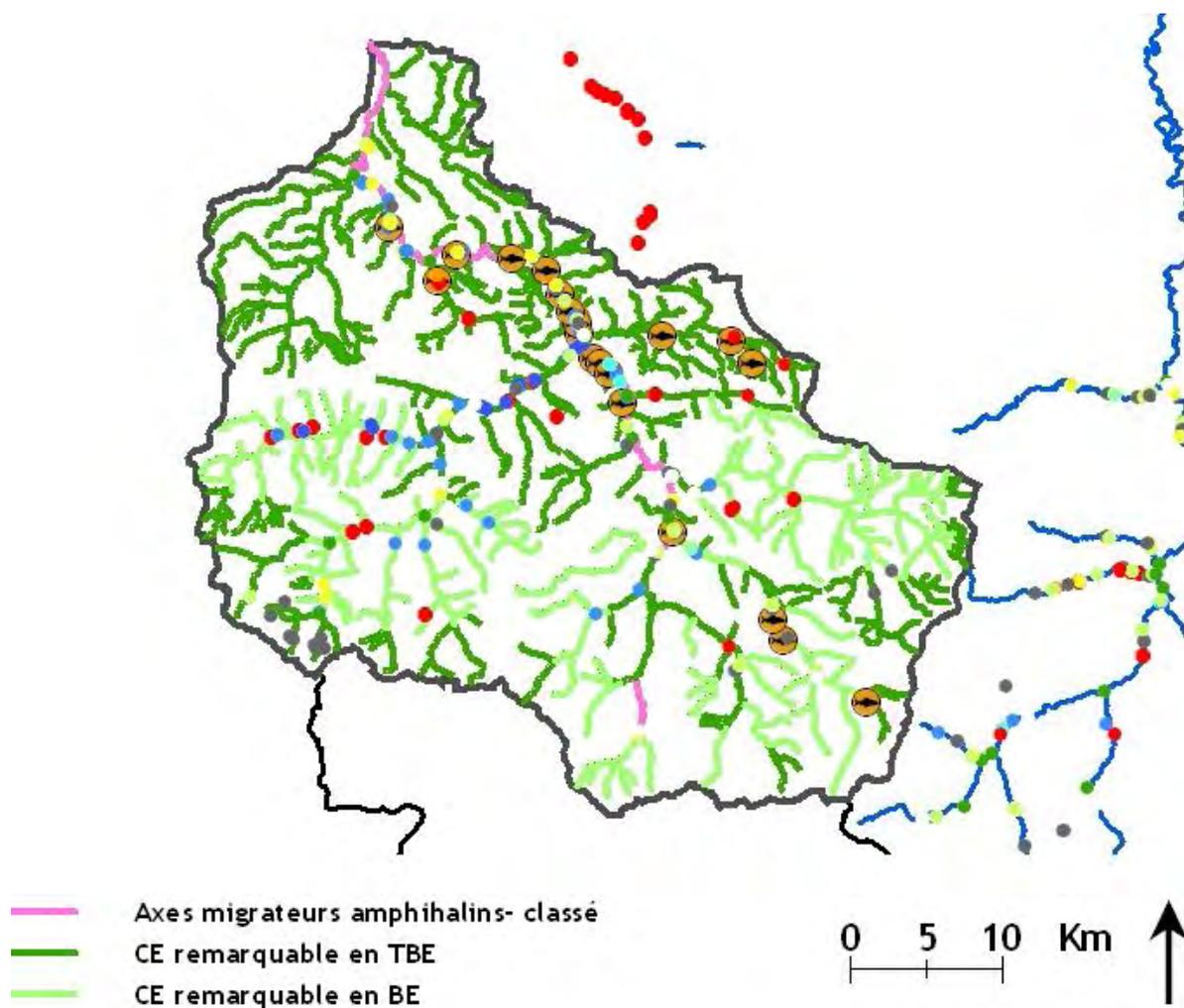


Figure IV-3 Exemple de carte représentant les tronçons de cours d'eau (CE) du Salat soumis à une réglementation.

Liste des aménagements:		
Moulins	●	2
Usines	●	10
Centrales hydroélectriques	●	3
Barrages	●	12
Forges	●	-
Pisciculture	●	-
Scierie	●	-
Seuils	●	-
Prises	●	-
Sorties	●	-
Passes à poissons	●	11 et 7 en prévision
Linéaire court_circuité		8.76 km

Figure IV-4 Liste des ouvrages déjà en place sur la rivière du Salat.

## 2. Analyse du régime du cours d'eau et du potentiel hydroélectrique

La conception des aménagements hydrauliques met en jeu un grand nombre de disciplines: hydrologie, géologie, géotechnique, environnement, social, hydraulique, génie civil, calcul de structures, mécanique, électricité, automatisme, économie de la construction, économie de l'électricité. Un site hydroélectrique favorable **est un compromis entre débit et dénivelée** puisque la puissance hydraulique d'un site est le produit du débit et de la chute exploitée. La partie amont des bassins versants présente généralement les meilleures dénivelées, par contre les débits y sont moindres que dans la partie aval (Figure IV-6). C'est pourquoi on trouvera généralement les aménagements haute chute turbinant de faibles débits en amont des bassins versants, les aménagements de moyenne chute turbinant des débits moyens dans la partie intermédiaire des bassins et les aménagements basse chute turbinant de forts débits dans les vallées.

De façon à implanter les bassins versants de l'étude dans un contexte morphologique bien défini, il est réalisé une carte des altitudes basées sur le modèle numérique de terrain (MNT) de la région (Figure IV-5).

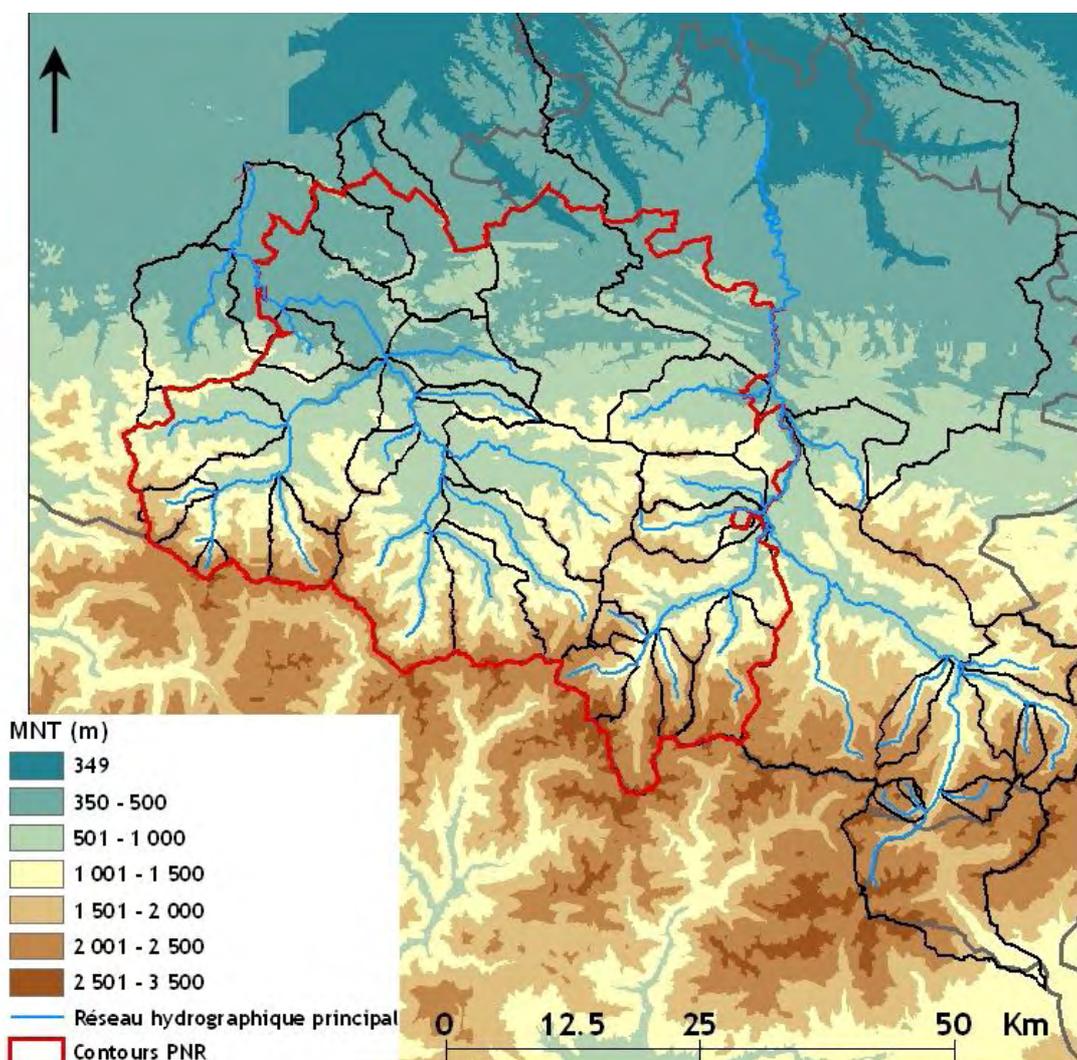


Figure IV-5 Carte du modèle numérique de terrain (MNT 100m) de la région Midi Pyrénées et spécifiquement du département de l'Ariège (09). Sur le MNT est positionné l'ensemble des 33 bassins versants de l'étude.

Dans le cadre de cette étude, 33 bassins sont étudiés et donc positionnés sur le MNT de la région. Les 33 bassins versants de l'étude peuvent se diviser en deux catégories

->les bassins versants intégrateurs (à l'échelle de notre étude), qui sont les bassins du Salat et de l'Ariège

->les sous bassins collecteurs d'eau pour ces grands bassins (correspond à l'ensemble des autres bassins qui sont affluents soit du Salat ou de l'Ariège).

A partir de la grille des points d'altitude (MNT 100m) il est envisageable d'associer une altitude en tout point du réseau hydrographique décrit dans la base de donnée BD Carthage. Cette option permet de calculer la pente du cours d'eau et donc d'en déduire une chute potentiellement exploitable (Figure IV-6). Il ressort que de nombreux bassins versants présentent des pentes fortes supérieures à 6% ou bien moyennes à faibles comprises entre 0.5 et 6%. Seul les deux grands bassins du Salat et de l'Ariège ont des pentes moyennes très faibles entre 0 et 0.5%. Les rivières torrentielles sont caractérisées par leur pente (Bernard, 1925 ; Degoutte, 2006), ainsi on distingue :

- pente inférieure à **1.5%** : rivière ;
- pente entre **1.5 et 6%** : rivière torrentielle ;
- pente supérieure à **6%** : torrent ;

Ainsi on peut dire que dans le cas du département de l'Ariège, la plupart des petits cours d'eau affluents des deux cours d'eau principaux sont des rivières torrentielles et torrents susceptibles de permettre l'aménagement d'une micro-centrale électrique. La pente est donc un caractère important à prendre en compte pour l'établissement d'une centrale hydroélectrique.

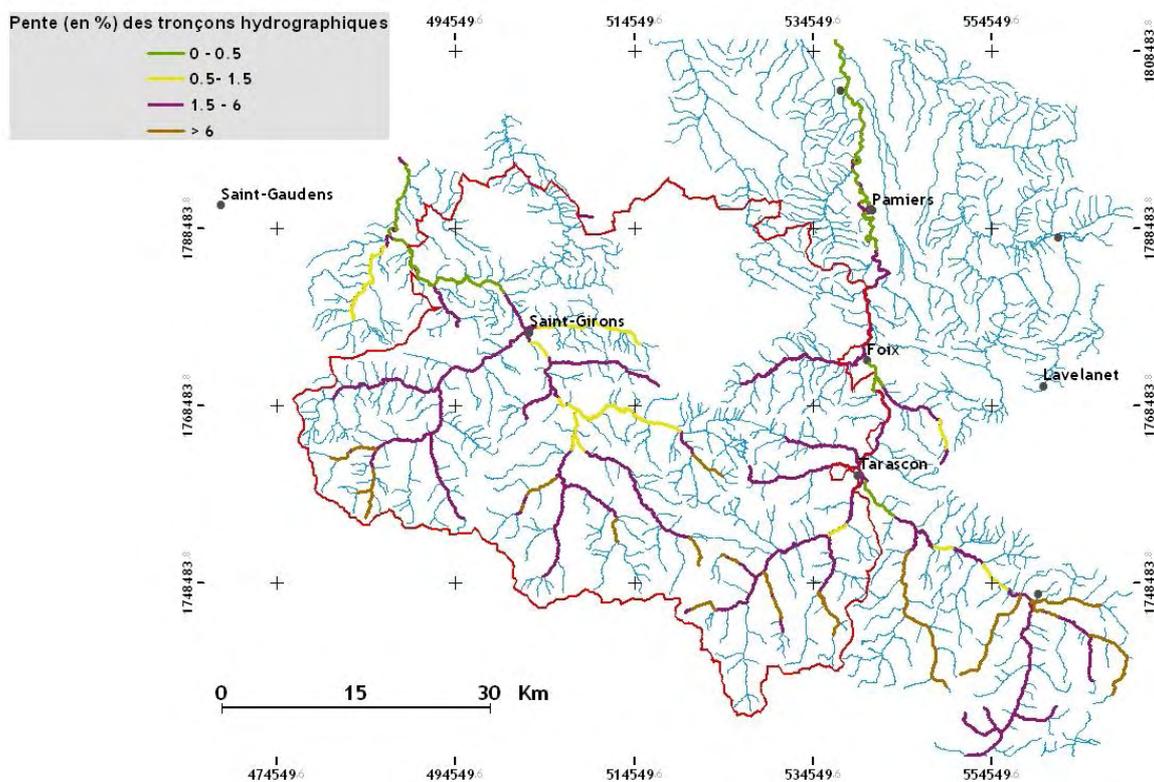


Figure IV-6 Carte présentant une évaluation des pentes de la BD Carthage avec les prises d'eau hydroélectriques superposées et proposées par Eaucea (2007).

Il est donc nécessaire de réaliser un inventaire du potentiel hydroélectrique pour l'équipement hydraulique d'une région. Les hydrologues jouent un rôle clé dans cette étape puisque leur revient la tâche d'évaluer la ressource en eau. Cette tâche est facilitée, comme nous l'avons dit précédemment, lorsqu'il existe un réseau de mesures dans les bassins versants d'intérêt (mesures des pluies et des débits). Malheureusement seules les mesures de pluies sont généralement disponibles dans les pays faiblement équipés en hydroélectricité. Les hydrologues devront alors recourir à des modèles de transformations pluie-débit. De plus, dans les pays froids il faut de plus tenir compte de la neige. Dans le cas de l'Ariège, les stations de mesure de débit sont peu nombreuses et souvent mises en marche assez tardivement, c'est-à-dire ne permettant pas toujours une analyse pré et post impact anthropique. Nous disposons cependant de quelques stations hydrométriques situées sur les rivières du Salat, l'Ariège, l'Arac, le Lez, l'Artigue, le Soulan (Figure IV-7).

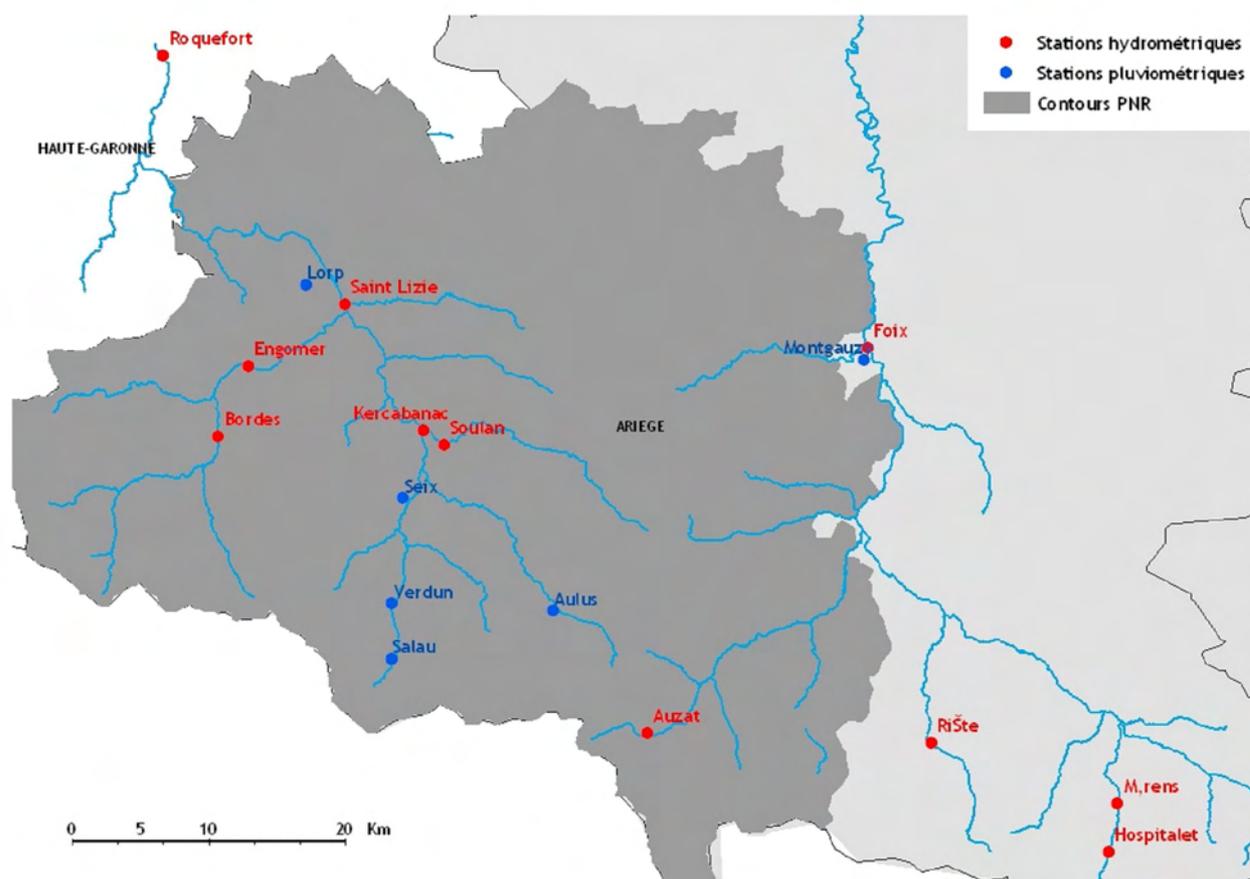


Figure IV-7 Carte de localisation des stations hydrométriques et pluviométriques.

En revanche, la localisation des sites favorables en terme de potentiel énergétique sera du ressort des aménagistes avec l'aide en particulier de géologues. Par exemple, pour un aménagement avec lac de retenue, il faudra rechercher un site de barrage favorable permettant de créer une large retenue. Un verrou étroit fermant une large vallée à faible pente est idéal puisqu'il conduira à une grande retenue et un barrage économique. Dès ce stade seront aussi associés les environnementalistes. En effet, les critères environnementaux doivent être pris en compte pour

qualifier la qualité des sites recherchés. Les sites favorables identifiés lors de l'inventaire du potentiel font ensuite l'objet d'études plus détaillées qui pourront déboucher sur la réalisation d'un projet. Le choix du volume de retenue et de la puissance de la centrale résulte d'analyses économiques prenant en compte les caractéristiques propres du site et les besoins du réseau à desservir. L'optimisation du projet prend aussi en compte les critères environnementaux tels que ceux dictés par les banques de développement comme la Banque Mondiale. Par exemple, il pourra être préférable de limiter la hauteur du barrage afin de restreindre l'impact de la retenue sur l'environnement et d'éviter des conséquences néfastes pour les populations.

Toujours dans le cas des barrages réservoirs on sera amené à étudier la qualité de l'eau dans la retenue. Si les études concluent à une stratification de la retenue on pourra être amené à proposer une prise d'eau à prises multiples étagées de façon à pouvoir contrôler la qualité de l'eau relâchée à l'aval. L'impact sur la vie piscicole est également un point majeur à considérer. Des ouvrages de franchissement pourront être proposés tels que passes ou ascenseurs à poissons, exutoires de dévalaison. Les aménagements hydroélectriques comprennent quatre types d'ouvrages:

- Barrages et évacuateurs de crues (grands barrages ou simple seuils) ;
- Prises d'eau (associés éventuellement à des décanteurs) ;
- Chemins d'eau (canaux, galeries, cheminées, conduites) ;
- Centrales (abritant les turbines et l'équipement de production) ;

Ces ouvrages seront forts différents selon que l'aménagement appartient à la catégorie des hautes chutes, des moyennes chutes ou des basses chutes. L'importance du barrage dépendra donc du type de centrale :

- Centrale au fil de l'eau : seuil de faible hauteur permettant l'entonnement dans la prise d'eau.
- Centrale d'éclusées: barrage modeste (temps de remplissage de la retenue inférieur à un mois).
- Centrale de retenue: grand barrage réservoir avec retenue saisonnière ou interannuelle.

Les grands barrages sont de différents types selon les conditions géologiques du site et les matériaux de construction disponibles à proximité. Ils peuvent être en terre, en enrochement ou en béton (béton conventionnel ou béton compacté au rouleau). La conception et les calculs sont basés sur des normes internationales telles que les Eurocodes et les recommandations du Comité International des Grands Barrages. Compte tenu des risques liés à une rupture, la conception des grands barrages inclut des systèmes d'auscultation permanents qui permettent d'alerter les exploitants en cas de dérives irréversibles de certains paramètres (mouvements, fuites, etc..) et de programmer les interventions de maintenance.

Dans le cas l'Ariège, l'essentiel des dossiers soumis à avis aujourd'hui sont de petites centrales hydroélectriques (micro voir pico centrales). L'étude va donc surtout essayer d'analyser les effets de ce type d'aménagement sur l'état hydro-écologique des rivières.

Dans le cas de petits aménagements, l'impact sur l'environnement est fortement en lien avec la perturbation du régime hydrologique du cours d'eau. La diminution du débit après ouvrage provoque: ennoisement de zone habituellement exondées, la modification du transport

sédimentaire, la modification de la circulation des poissons (IPR) et modification de l'état biologique des eaux (IBGN). Afin de limiter l'ensemble de ces impacts sur l'environnement lors de la construction de nouveaux ouvrages, il est essentiel de choisir de façon objective le meilleur emplacement pour sa construction.

Ainsi dans un premier temps le niveau d'équipement des bassins versants du PNR est évalué. Nous avons donc pour le département de l'Ariège et plus spécifiquement le territoire du Parc Naturel Régional réalisé un inventaire le plus exhaustif possible avec les informations provenant de l'IGN, de l'Agence de l'eau et de la DREAL. On dénombre donc 350 ouvrages ou aménagements sur le PNR (Figure IV-8), ces ouvrages sont : des barrages, des seuils, des prises et sorties d'eau, des moulins, des forges, des scieries, des usines etc...

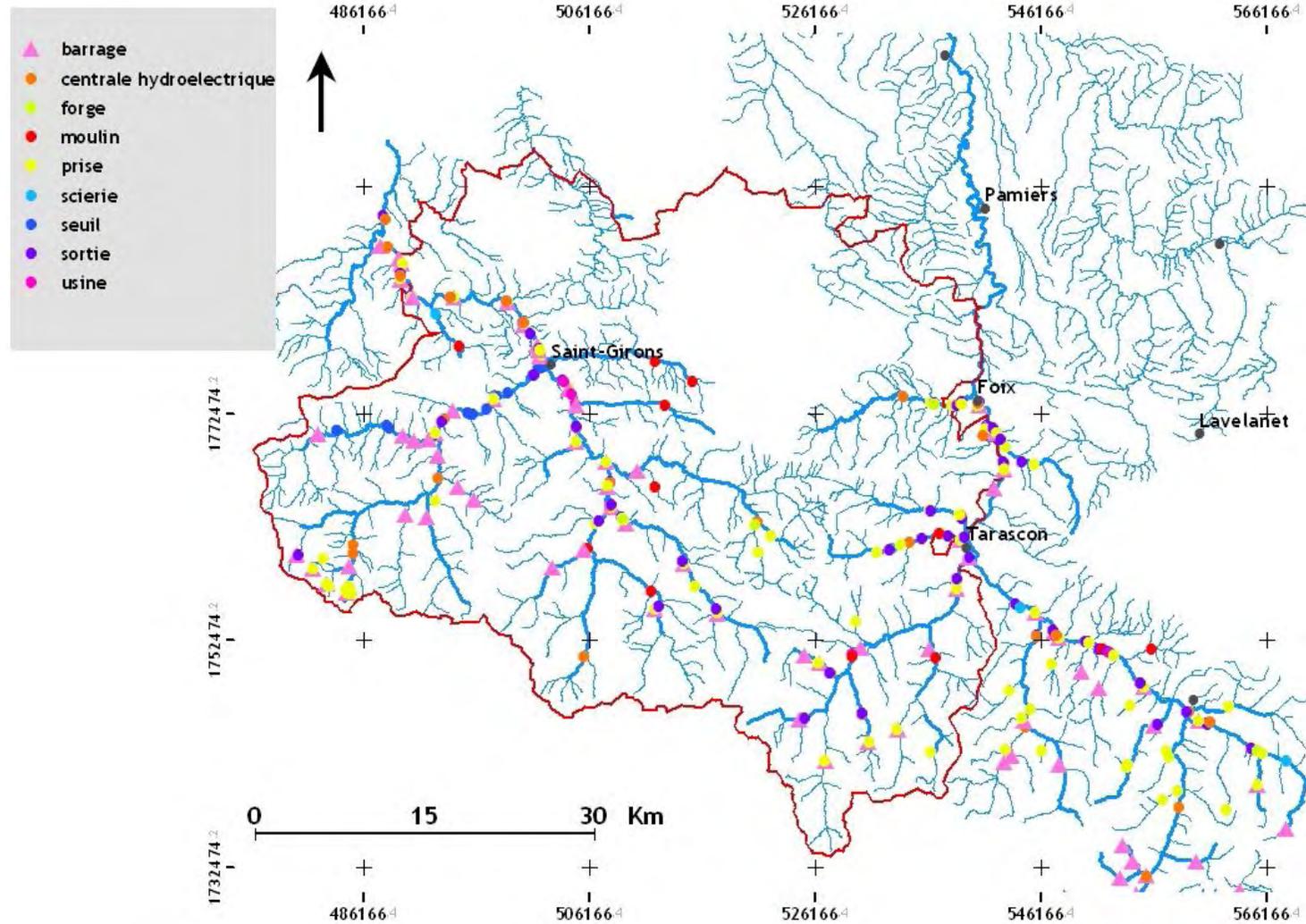
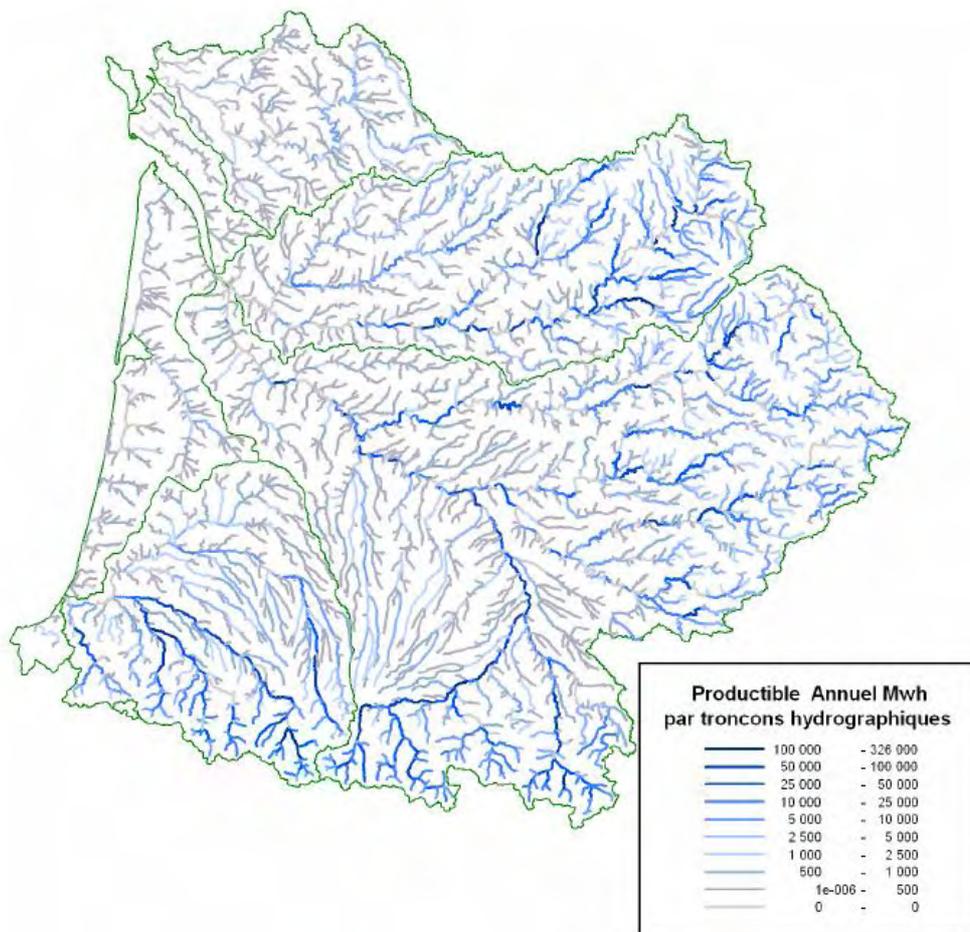


Figure IV-8 Inventaire et géoréférencement des ouvrages existants sur la zone d'étude

Des inventaires de l'état hydroélectrique des cours d'eau ont déjà été réalisés par le passé, notamment les rapports (Podeur, 2006 ; Eaucea, 2007) qui proposent des cartes localisant l'implantation des centrales, des enjeux environnementaux (Figure IV-10), ainsi que du productible hydroélectrique théorique du bassin Adour Garonne (Figure IV-9). A partir de ces cartes, la première information nécessaire pour juger de la pertinence de l'établissement d'un nouveau projet de centrale hydroélectrique est disponible, c'est le potentiel hydroélectrique. En effet, le nombre de stations de mesure de débit étant très limité, il est nécessaire de s'appuyer sur des études déjà réalisées pour avoir une information du potentiel hydroélectrique en différents points du bassin.



**Figure IV-9 Carte du productible annuel théorique (Mwh)**

On calcule selon la formule :

M = MODULE en l/s du point amont

Ht = élévation du point amont (Top) m

Hb = élévation du point aval (Base) m

H = Ht - Hb = Hauteur de chute en m

**P = PUISSANCE** du tronçon théorique MW =  $M/1000 \times 1,2 \times 8 \times H/1000$

**E = PRODUCTIBLE ANNUEL** MWh = P x 3500

L'établissement d'un diagnostic de l'état morphologique des cours d'eau est donc important de façon à identifier : d'une part les bassins les plus sensibles (car les plus aménagés) et d'autre part

leur caractéristiques géomorphologiques susceptibles d'aggraver les effets du positionnement d'un nouvel ouvrage.

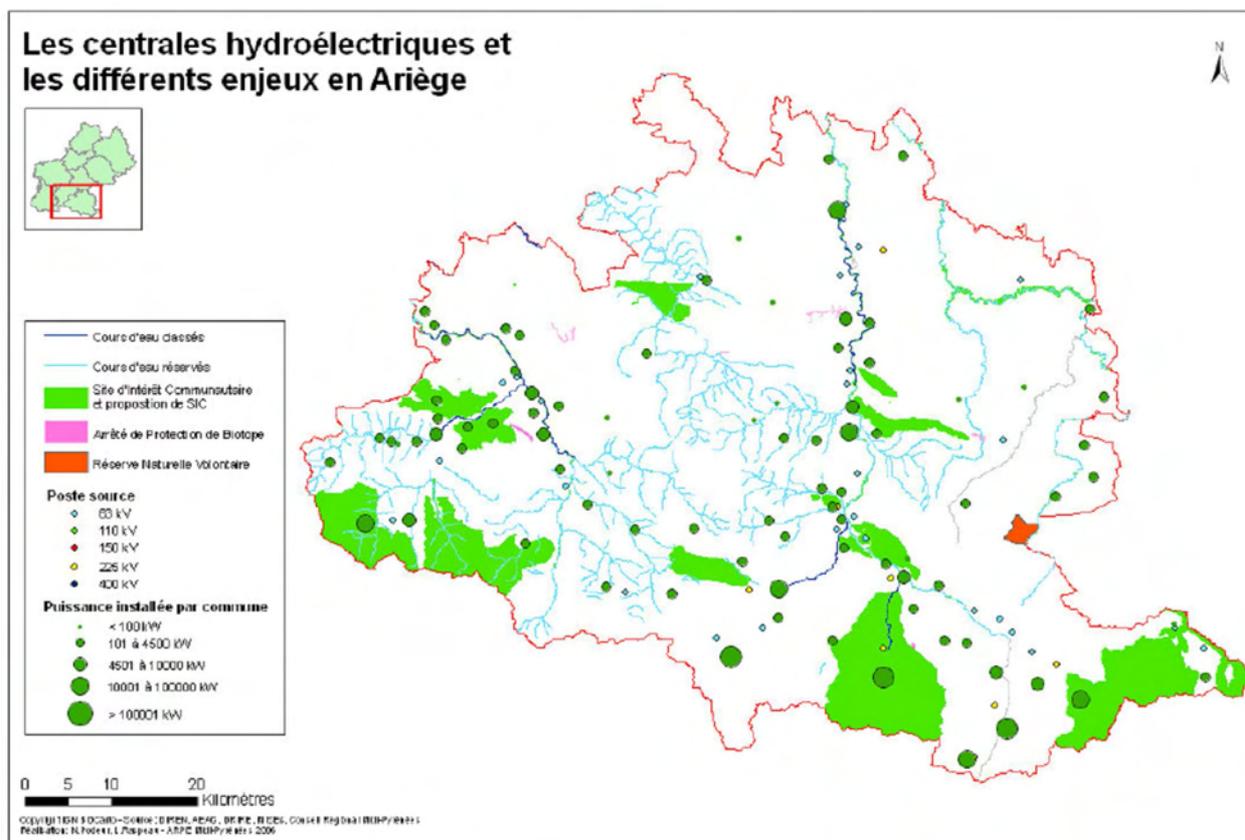


Figure IV-10 Les centrales hydroélectriques et les sites environnementaux spécifiques (Podeur, 2006) ;

### 3. Densité d'aménagements et de cours d'eau court-circuités

En mesurant la longueur de chaque cours d'eau, il est possible de calculer une densité d'aménagements soit le nombre d'aménagements par mètre linéaire de cours d'eau (Figure IV-12). Afin de permettre une meilleure visualisation des résultats, une carte de la densité (D\_AM) par bassin versants a été réalisée (Figure IV-12 et Figure IV-11). On note qu'aucun bassin n'est exempt d'aménagements. Les pressions anthropiques existantes sur les bassins versants de la région d'étude sont donc déjà très fortes.

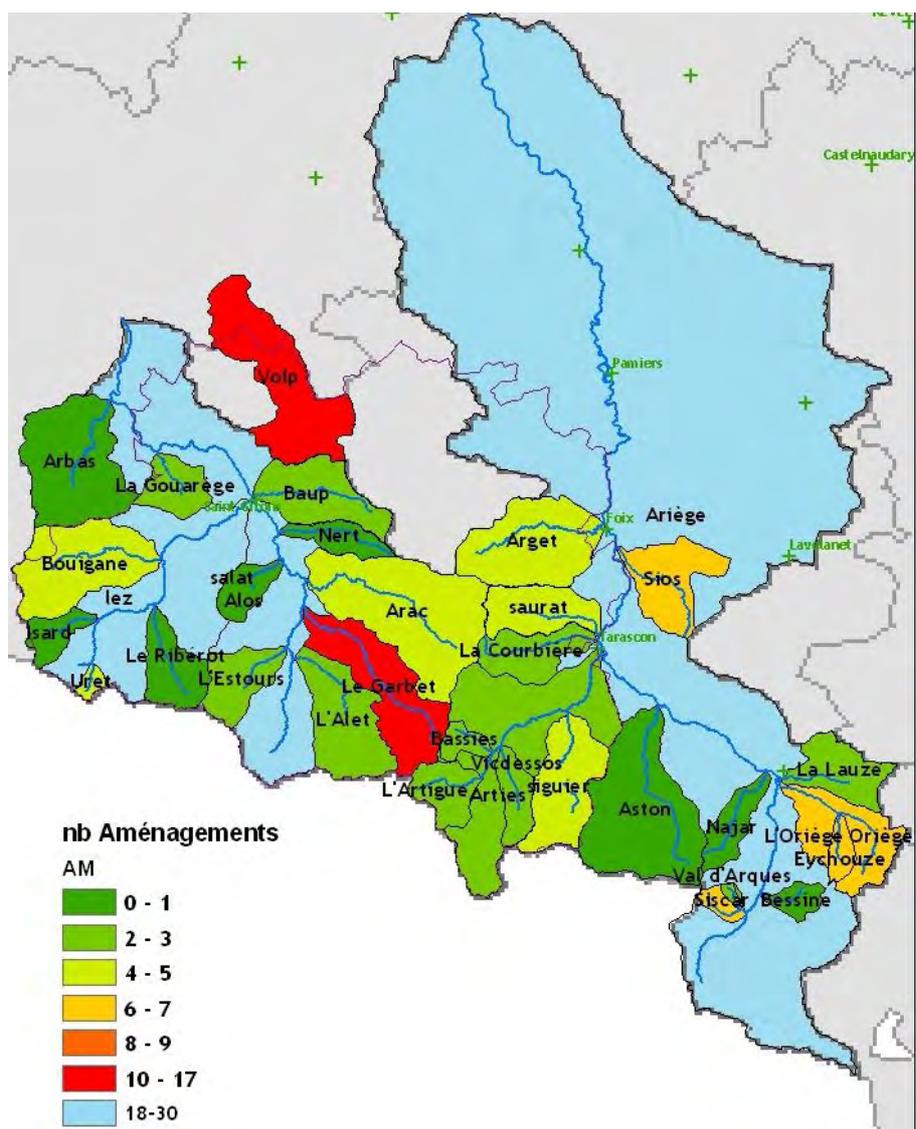


Figure IV-11 Carte du nombre d'ouvrage par bassin versant.



moins de 2 km court-circuité en moyenne. Pour les grands bassins (comme le Lez, le Salat, l'Ariège) la longueur court-circuitée est plus longue allant jusqu'à 15 km. Ces cartes sont un premier outil de diagnostic important à consulter lors de la mise en place d'un nouvel ouvrage.

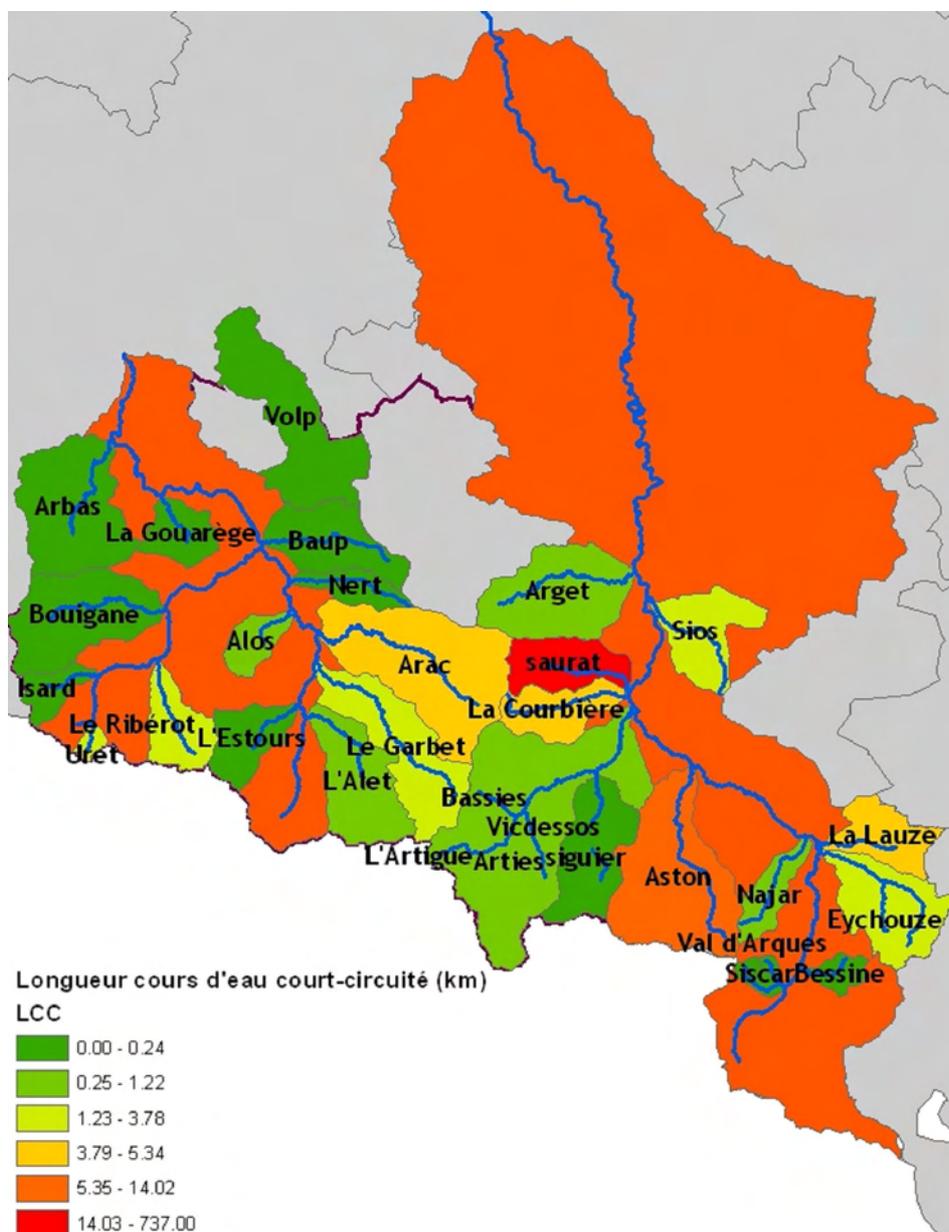


Figure IV-13 Carte de la longueur de cours d'eau court-circuitée (km).

#### 4. Influence du cumul des ouvrages

Les études d'impact commandées lors de tout projet hydroélectrique ne prennent en compte que les effets particuliers d'une implantation sans considérer celle-ci dans un continuum hydraulique avec des possibles effets cumulatifs. Ici, il est question d'aborder cet aspect uniquement du point de vue du profil d'équilibre.

La localisation d'un ouvrage hydroélectrique doit passer tout d'abord par la prospection sur le terrain ou sur carte topographique afin de repérer les endroits où se trouvent à la fois un

écoulement d'eau et une dénivellation du terrain. La mesure de la hauteur de chute est facile à déterminer pour un géomètre au moyen d'un théodolite. Dans notre cas, l'étude morphologique de chacun des 33 bassins versants est menée de façon à identifier les zones de fortes dénivelées et les zones de sensibilité du profil (Cf. Profil en long).

Une fois la pente estimée, il est important de prendre en compte le positionnement des ouvrages déjà construits.

Nous allons prendre l'exemple de la construction d'un nouvel avec une hauteur de retenue comprise entre 2 et 3 m, soit pour une microcentrale. Prenons l'exemple de la réalisation d'un nouvel ouvrage sur le bassin versant du Garbet. Lorsqu'on consulte la carte des pentes et la localisation des aménagements (consultation des fiches synthétiques fournies en annexe), on constate que ce bassin versant présente un drain principal caractérisé par des tronçons dont la pente moyenne varie de l'amont vers l'aval. De plus, c'est un bassin assez aménagé puisqu'il présente 4 barrages, 5 prises et sorties d'eau, 2 centrales et enfin 1 forge (Figure IV-15). On veut estimer la distance qu'il faut pour réajuster la ligne d'eau du fait de la hauteur du barrage ; caractérisant ainsi l'impact sur le niveau d'eau de la rivière. Nous prenons l'exemple d'une retenue moyenne de hauteur comprise entre 2-3m sur un cours d'eau comme le Garbet présentant des variations de sa pente moyenne.

Sur le drain principal du Garbet on trouve trois classes de pente :

-entre 0.5 et 1.5 %

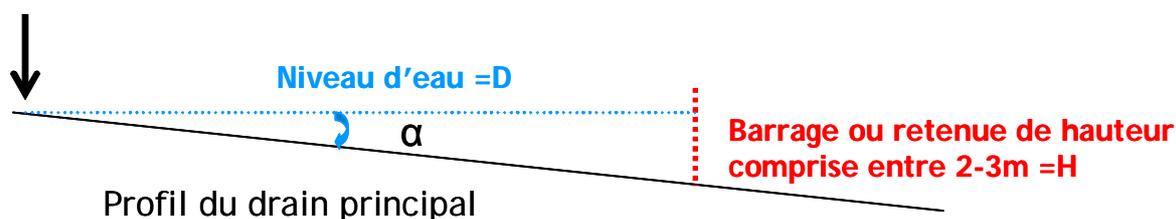
-entre 1.5 et 6 %

-> 6 %

Pour chacune de ces trois classes, on peut calculer un point limite amont d'impact de cet ouvrage d'après la relation simple suivante (Figure IV-14):

Ainsi pour une pente comprise entre 0.5 et 1.5 %, on trouve pour un barrage de 2 m une distance d'impact comprise entre 76 et 400 m. En revanche pour une retenue de 3 m, on obtient une distance d'impact comprise entre 114 et 600 m.

#### Limite d'impact de la construction de l'ouvrage

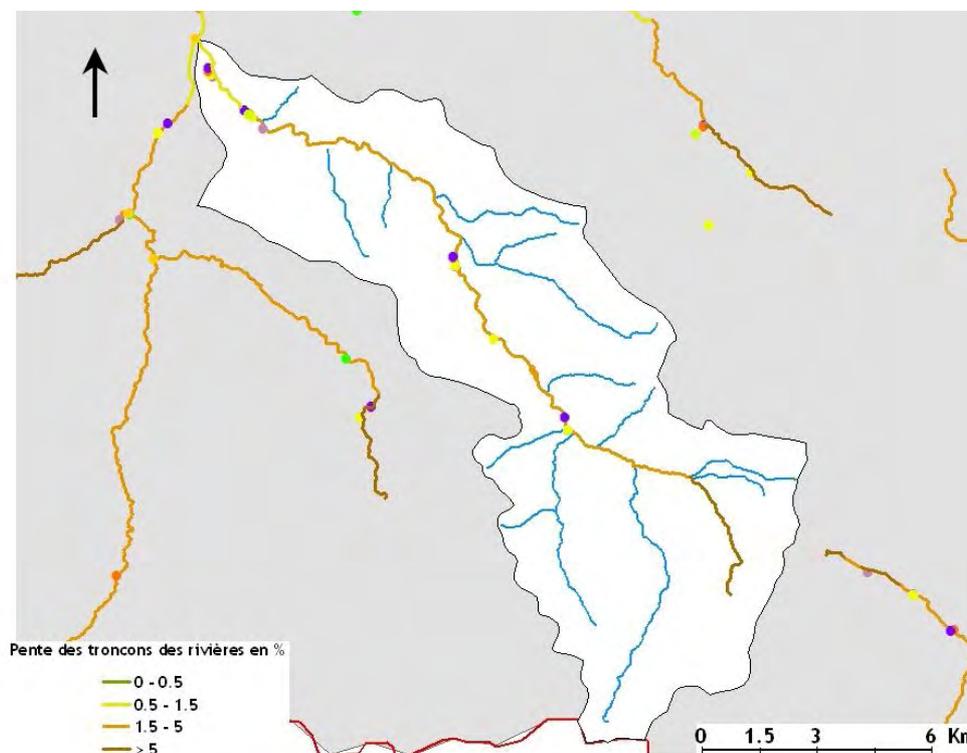


$$\text{Soit } \tan(\alpha) = \frac{H}{D}$$

Figure IV-14 Méthode utilisée pour le calcul du point limite d'impact de l'installation d'un nouvel ouvrage sur un tronçon hydrologique.

Comme nous l'avons vu, il est important de préserver la continuité écologique, il semble donc que la superposition de nombreux ouvrages sur un tronçon hydrographique est un facteur de perturbation majeur. Il semble donc judicieux avant toute construction d'ouvrage:

- 1) d'identifier le bassin versant d'intérêt ;
- 2) d'identifier le tronçon à aménager et évaluer sa pente moyenne ;
- 3) de localiser les aménagements déjà en place;



**Figure IV-15 Bassin versant du Garbet, localisation de ses aménagements et des pentes moyenne calculées sur le drain principal**

Nous conseillons donc de ne pas construire d'ouvrage si la zone d'impact va influencer sur un ouvrage existant. Le réseau de tronçons hydrographiques de la zone d'étude (BV du Salat et de l'Ariège en amont de Foix) correspond à un linéaire de cours d'eau de 674.84 km au total. Ces tronçons ont des pentes variables qui peuvent être classées en trois catégories (Tableau IV-1):

Catégories de pente	Linéaire de cours d'eau
Entre 0 et .0.5%	114.84 km
Entre 0.5 et 1.5 %	72.1 km
Entre 1.5 et 6 %	384.60 km
>6 %	103.29 km

**Tableau IV-1 Variation de la pente.**

Sur la zone d'étude, il existe 4 catégories de pente : 0 et 0.5 % ; 0.5 -1.5% ; 1.5 -6 % et > 6%. Pour chacune des catégories, il est possible de calculer la zone d'influence pour des ouvrages de 3m de retenue (Tableau IV-2).

Catégories de pente	Zone de sensibilité
Entre 0 et 0.5%	A partir de 600 m
Entre 0.5 et 1.5 %	Entre 114 et 600 m
Entre 1.5 et 6 %	Entre 114 et 50 m
>6 %	Moins de 50 m

Tableau IV-2 Taille de la zone de sensibilité des tronçons hydrographiques en fonction de leur pente pour des ouvrages de 3m de retenue.

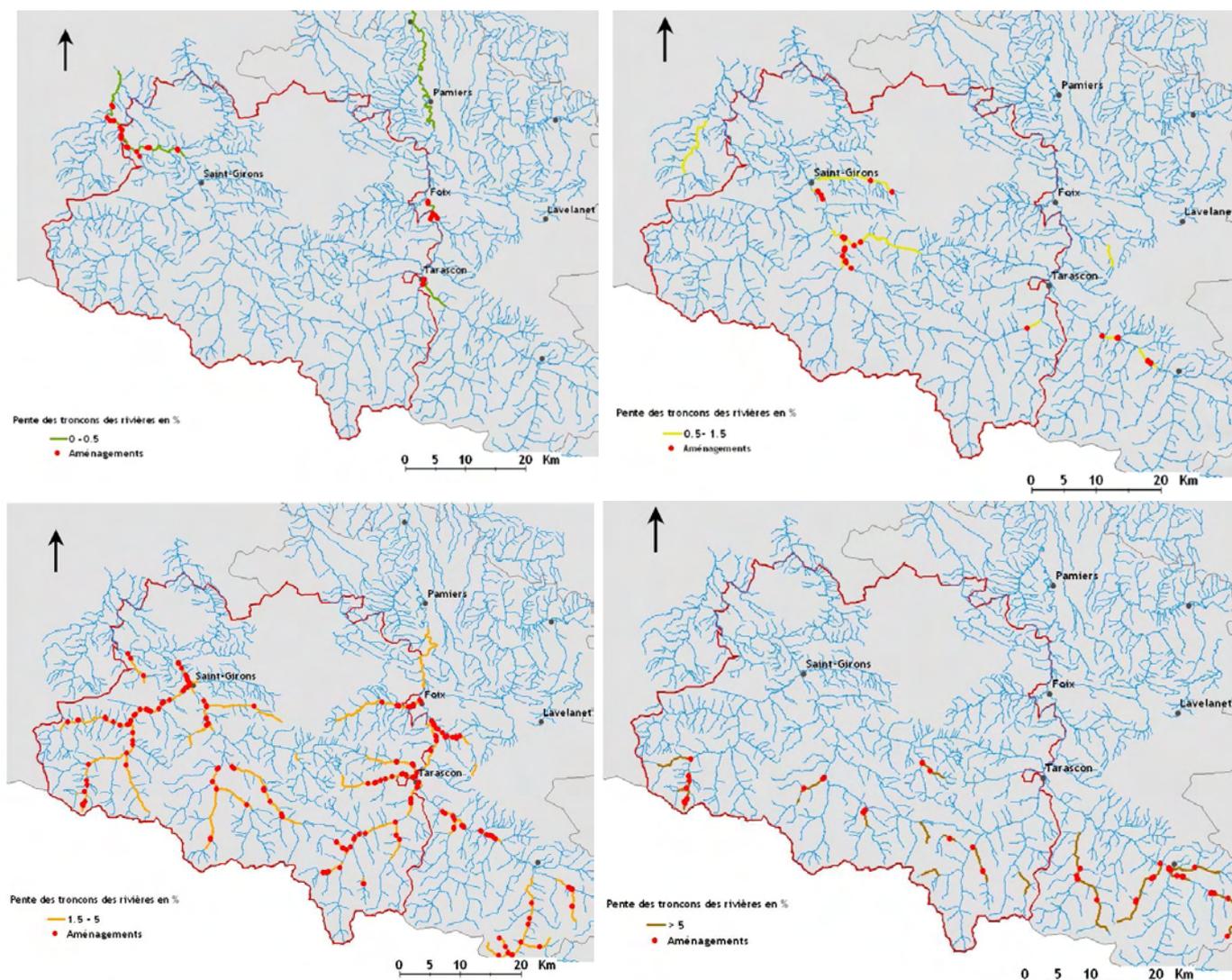


Figure IV-16 Cartographie des tronçons hydrographiques en fonction de leur pente et localisation des aménagements déjà en place situés sur ces tronçons.

Une fois la taille de la zone de sensibilité calculée, il est possible de réaliser des zones « tampons », ces zones sont définies par des anneaux autour des entités tracées à une distance spécifiée. Ici pour chaque ouvrage déjà construit nous réalisons le tracé de la zone tampon à une distance correspondant à la limite maximum de la zone de sensibilité calculée plus haut (Figure IV-17). Ainsi

il est donc recommandé de ne pas construire de nouveaux barrages dans cette zone de sensibilité déjà en place.

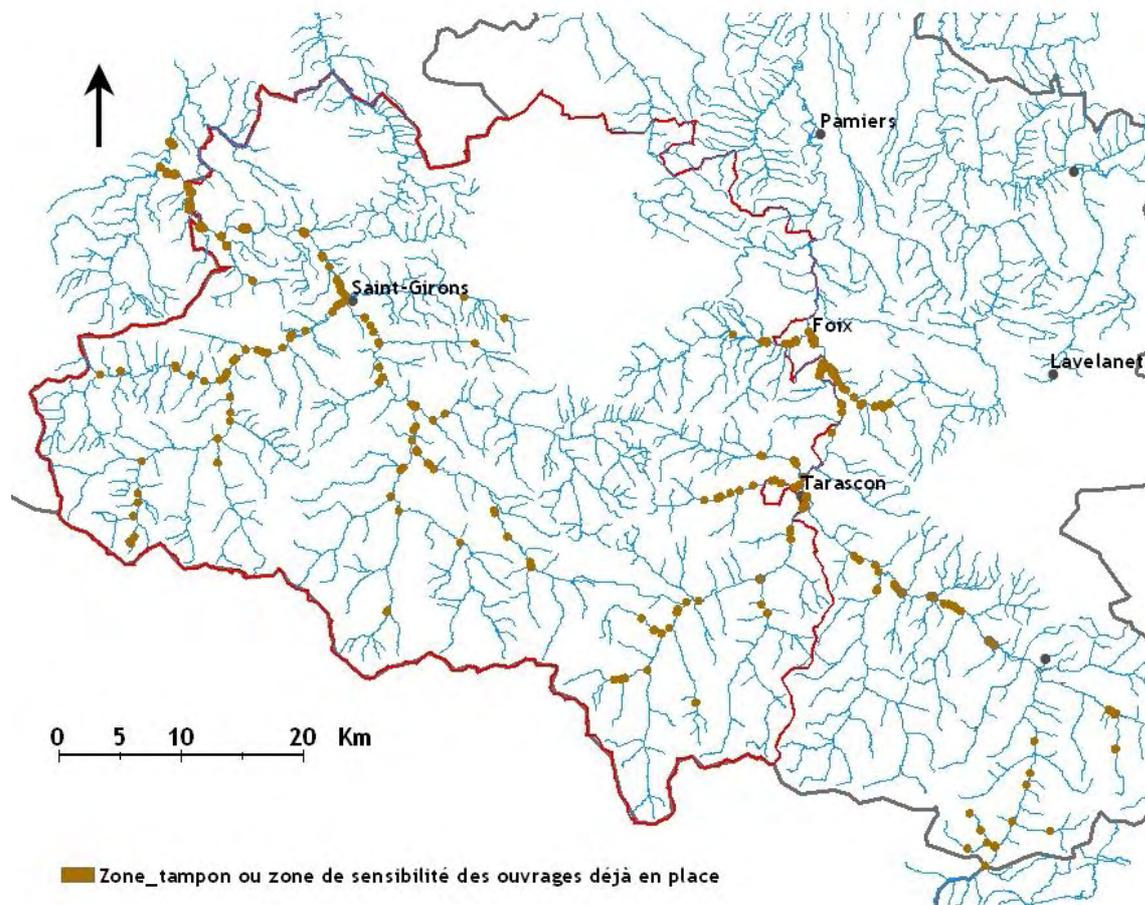
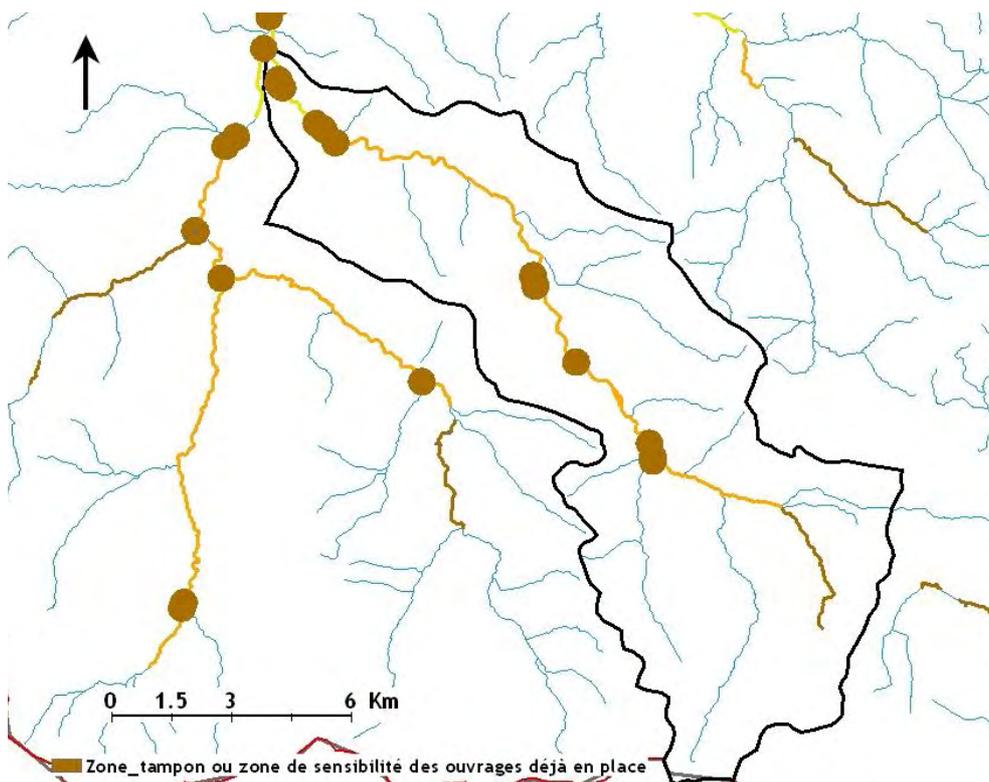


Figure IV-17 Calcul des zones de sensibilité en lien avec les ouvrages déjà en place.

S'il on reprend le cas du Garbet, on constate que ce bassin présente effectivement des zones non soumises à l'influence des autres ouvrages (Figure IV-18) ce qui permet de juger de la recevabilité de la demande de construction. L'implantation devra se situer en dehors de la zone d'influence des barrages et des retenues déjà en place.

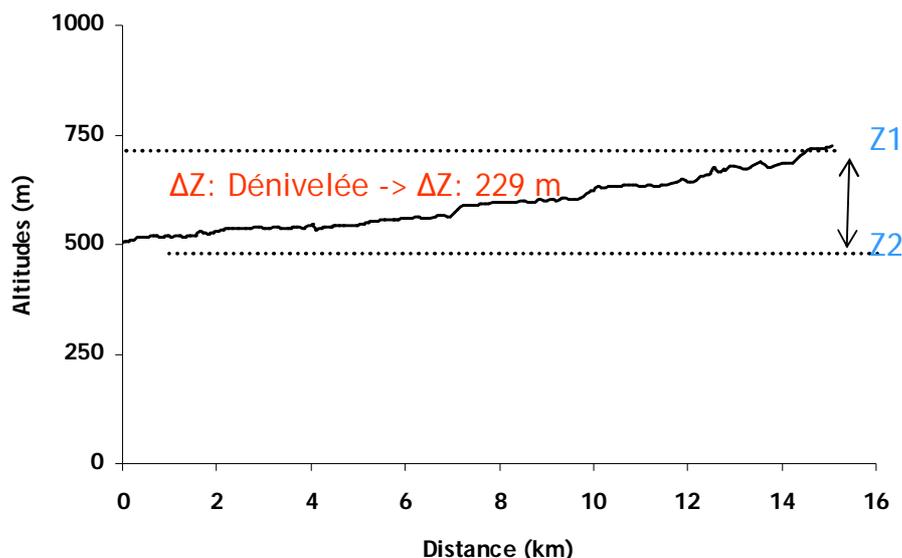


**Figure IV-18 Carte de sensibilité sur le bassin versant du Garbet.**

Autre impact du cumul des ouvrages visibles, dépend de la hauteur de chute cumulée sur l'ensemble du bassin versant. En effet, la hauteur de chute des aménagements est un paramètre à prendre en compte puisqu'un des impacts environnementaux majeur est la rupture provoquée par les aménagements de la continuité écologique. Ainsi une étude similaire menée en Loire-Bretagne met en évidence l'effet cumulé des ouvrages sur la mobilité des poissons. Il apparaît que la hauteur de chute cumulée par de nombreux ouvrages sur un même cours d'eau provoque un fractionnement de l'écosystème d'autant plus important que le rapport avec la dénivellation naturelle est élevé. En effet, ces hauteurs de chute cumulées représentent:

- Un obstacle pour toutes espèces : pente à franchir à la verticale;
- Une perte d'habitat et de diversité : ennoisement des radiers, uniformisation, colmatage des fonds;
- Une altération de la ressource en eau : temps de séjours en retenue, échauffement, évaporation, processus d'eutrophisation;

Pour notre étude, nous avons choisi l'exemple du bassin de la Bouigane pour le calcul des hauteurs de chute cumulées par les barrages par rapport à la dénivelée naturelle du cours d'eau (Figure IV-19).



**Figure IV-19** Calcul sur le profil en long de la Bouigane de la dénivelée naturelle du cours d'eau.

On constate que la dénivelée naturelle du cours d'eau est de 229 m, ce qui représente un pente global du bassin de 15.45 %.

Sur ce cours d'eau, il est réalisé un inventaire de l'ensemble des ouvrages mis en place :

- Les barrages : Puretin (1.75 m), Nortier (2.61 m), de Roques (2.22m), Valat (2.88 m), Bordes (2.76), Daffis (2.03 m), Conde (1.19 m), Appma (2.76 m) ;
- Les moulins: de Lane (1.70 m), de Saubens (1.51 m), d'Augistrou (1.19 m), Caussade (1.56 m), Buscarech (2.0 m) ;

Au total on mesure 13.99 % de chutes cumulées. Le rapport de ces chutes artificielles par rapport à la dénivelé naturelle est de 6.10 %. Ce rapport est un paramètre important à calculer lors de la mise en place d'un nouvel ouvrage, puisqu'il donne une idée de l'importance de la perturbation déjà enregistrée par le cours d'eau.

Du fait du contexte morphologique de l'Ariège (montagneux), des auteurs suisses ont estimé en contexte alpin qu'une hauteur de chute cumulée de 5 % sur un cours d'eau correspond à une forte pression déjà exercée sur le fonctionnement naturel du cours d'eau (Pfaundler et al, 2007).

## **IV.B Etude de la morphologie naturelle des cours d'eau : incidence des ouvrages**

D'après les directives définies dans le SDAGE, il est important d'évaluer un « état hydromorphologique » à l'image de ce qui est effectué pour l'état chimique et l'état écologique. En fait, l'hydromorphologie est un facteur permettant de maintenir l'état « écologique » des cours d'eau. Le milieu physique est porteur du biotope et forme avec lui la biocénose. Ne pas modifier la morphologie du paysage permet de maintenir le fonctionnement hydrologique naturel et donc permet le maintien du bon état écologique.

Afin de réaliser un diagnostic complet de l'état hydromorphologique des bassins versants, une étude géomorphologique est tout d'abord menée. L'étude géomorphologique permet de fournir des éléments pour caractériser et pour estimer les effets (positifs ou négatifs) des mesures ou des aménagements qui pourraient être effectués. L'objectif final est de lier cette notion à celle d'habitats qui, eux-mêmes, sont étroitement liés à la biologie.

La géomorphologie (= morphologie, morphométrie) appliquée à l'hydrologie a été initiée par Horton R.E et Strahler A.E et a ensuite été enrichie par de nombreux paramètres décrivant les formes des bassins et le réseau hydrographique. L'analyse de la géomorphologie d'un bassin passe par extraction de différents paramètres. D'un part, des valeurs quantitatives représentatives de l'ensemble du bassin et d'autre part des courbes qualitatives caractérisant l'état de maturité du bassin.

### **1. Le profil en long**

Le profil en long des cours d'eau sert à identifier les points ou zones de ruptures. Ces points sont susceptibles d'être sensibles à l'érosion ou à accréation des sédiments du fait de l'existence de la rupture qui peut être de différentes natures :

- Changement de la lithologie,
- Liée à la structure (présence de failles, de blocs soulevés...),
- Apport d'eau supplémentaire provenant d'un affluent secondaire,
- Variations glacioeustatiques,
- Modifications anthropiques du territoire.

Lorsque le profil est dit en équilibre, cela traduit un bilan érosion-dépôt considéré comme nul (Hack, 1973). Rechercher les perturbations ou ruptures sur ces profils permet de localiser les points de sensibilité et les profils pas encore en équilibre pouvant être plus sensibles à l'implantation de nombreux ouvrages.

Les profils longitudinaux des cours d'eau résultent de l'interaction entre l'incision fluviale, la tectonique et la lithologie (Brocard, 2003 ; Lague, 2001 ; Sklar et Dietrich, 1998 ; Snyder et al., 2000 ; Kirby et Whipple, 2001). Selon les modèles d'évolution des profils longitudinaux, plus une rivière est ancienne, plus son profil est **concave et proche de l'équilibre dynamique**, mais la concavité dépend aussi de l'évolution du débit, de la charge et de la taille des alluvions, de l'amont vers l'aval (Davis, 1899 ; Hack, 1957, 1973 ; Snow et Slingerland, 1987 ; Burbank et Pinter, 1999). Souvent sur un continuum amont-aval, le long du profil, alternent ruptures de pentes (knickpoints) (avec accélération des eaux) et zones de dépôt d'alluvions (avec rétention des eaux). Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce donne à l'eau le temps de s'infiltrer dans le sol.

En somme, le profil longitudinal des cours d'eau est fondamental dans la géomorphologie fluviale et l'hydrologie, reflétant et déterminant la pente, les gradients d'énergie et les changements d'élévation. Il est donc intéressant afin de contraindre les modalités d'écoulement de l'eau de surface de représenter les profils en long de chaque bassin.

Nous avons réalisé les profils en long des rivières situées sur le bassin versant du Salat et de l'Ariège en amont de Foix. Le but est l'identification de petites ruptures ou de knickzones sur le profil, puis la détermination de leurs causes. La forme du profil (concave, convexe ou rectiligne) nous renseigne également sur l'état d'évolution du bassin par rapport aux processus d'érosion. En effet, classiquement, un profil en équilibre est considéré comme étant un état stable juste capable de transporter des sédiments (sans aggradation ou sans dégradation) : le débit augmente en aval, le gradient nécessaire pour transporter les sédiments diminue. A l'inverse, un profil convexe, quant à lui, est interprété comme un état de déséquilibre, où la rivière est en cours d'incision (Goldrick and Bishop, 2007).

L'analyse des profils des 33 rivières situées sur l'ensemble de la zone montre 8 profils d'équilibre sur de petits affluents situés soit en plateau, soit en piémont (Figure IV-20). De plus pour chaque knickzone (point d'inflexion du relief) une cause a été proposée (géologie, structurale, confluence, anthropique) et schématisé avec un code couleur.

Le profil en long des cours d'eau présente sur la plupart des cours d'eau une grande stabilité naturelle à l'échelle humaine (siècle). Au-delà des fluctuations cycliques observées au gré des crues (mobilité des bancs, des seuils, des mouilles, « respiration du lit »), et en l'absence de perturbations d'origine humaine, on constate en général qu'il n'y a pas de variation mesurable des pentes d'un cours d'eau et de son profil en long à l'échelle du siècle. Cela ne signifie pas que tous les cours d'eau ont atteint leur équilibre. Mais les évolutions sont suffisamment lentes pour que l'on puisse admettre, en première approximation, qu'il y a continuité du transport solide comme hypothèse de travail lors du diagnostic morphologique. Il est pour cela important de ne pas localiser tout nouvel ouvrage sur un point de rupture, en effet cela est susceptible de l'aggraver et de

modifier le continuum du transport solide et liquide, ainsi, l'impact environnemental sur la continuité du cours d'eau en sera d'autant plus important.

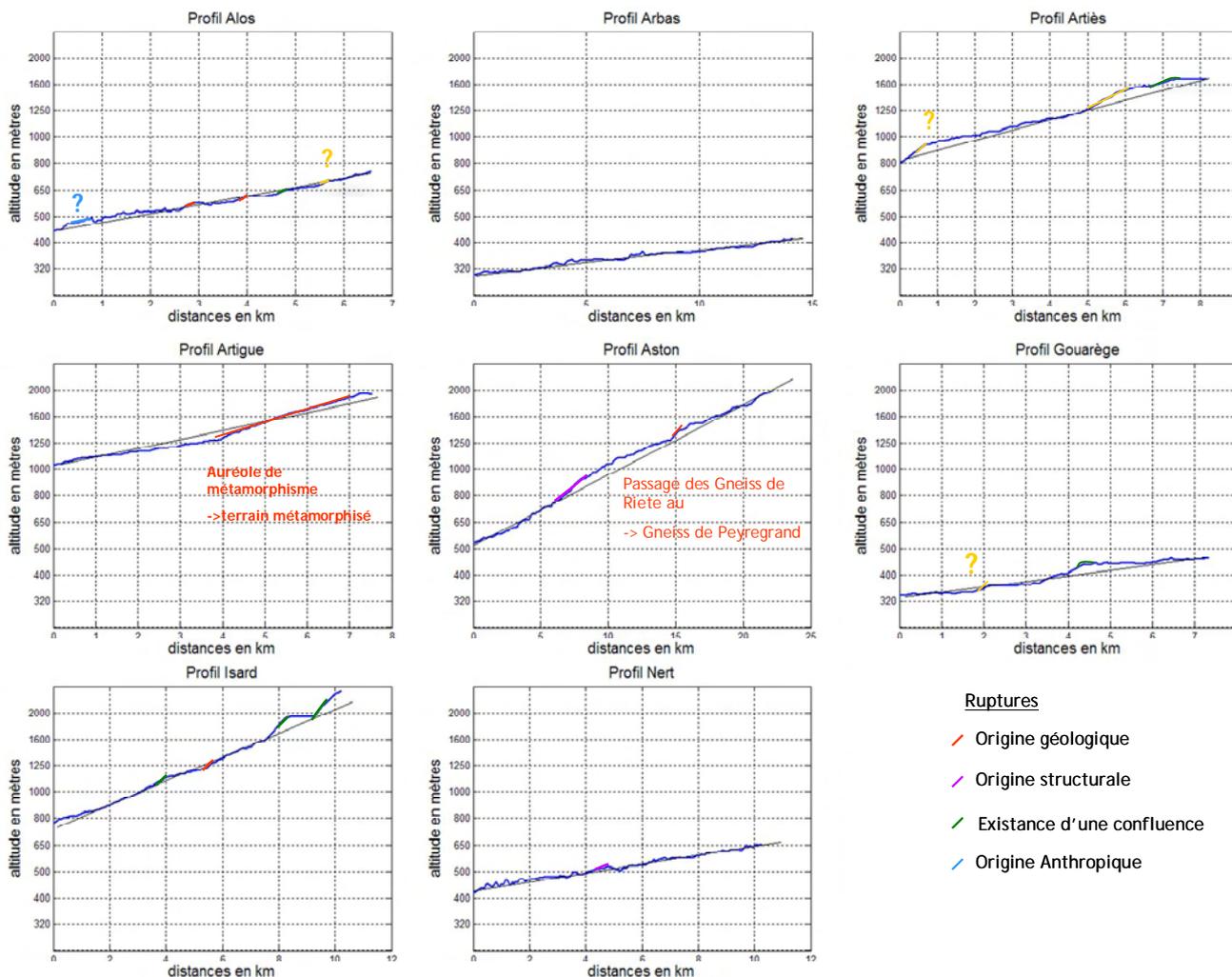
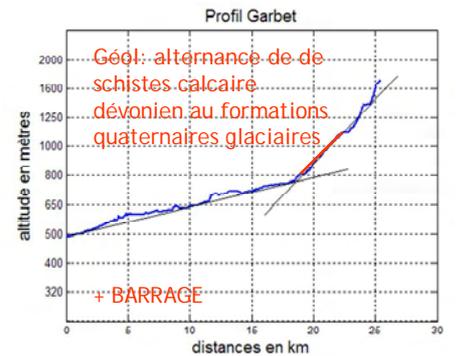
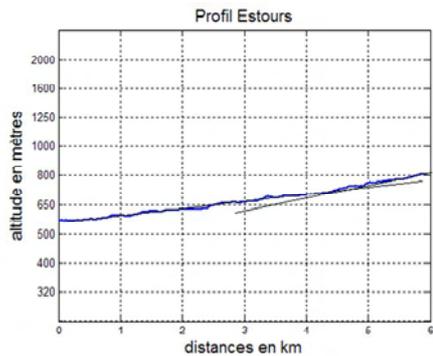
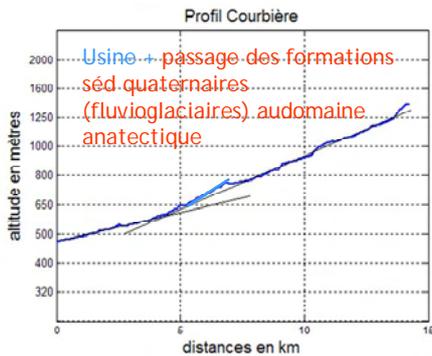
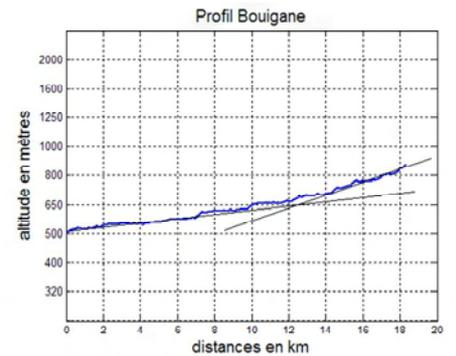
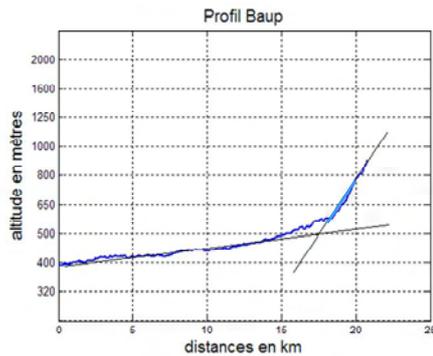
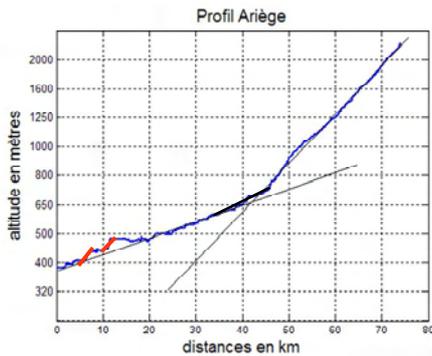
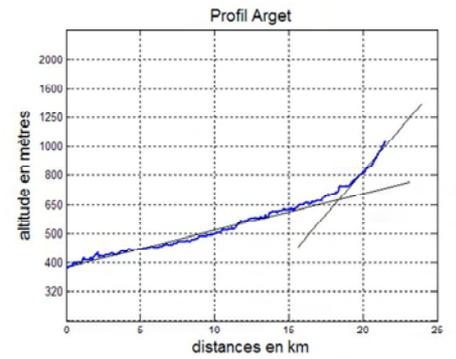
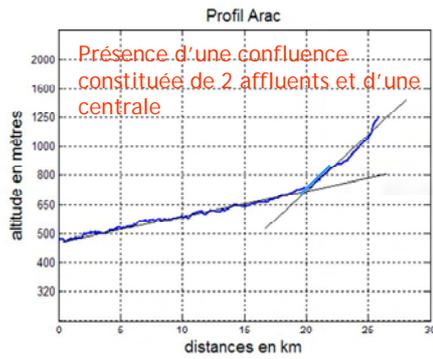
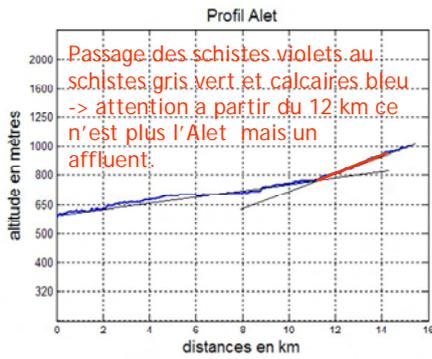


Figure IV-20 Profils en long équilibré.

Les profils présentent peu d'inflexions du relief. En moyenne on identifie une rupture majeure souvent d'origine lithologique (changement de structure géologique). (Figure IV-21, Figure IV-22 et Figure IV-23). Certains profils sont concaves témoignant notamment du fait que les Pyrénées se soulèvent par réajustement isostatique de 6 mm par an caractérisant un « réglage » des profils (d'après le Service Géologique de Catalogne).



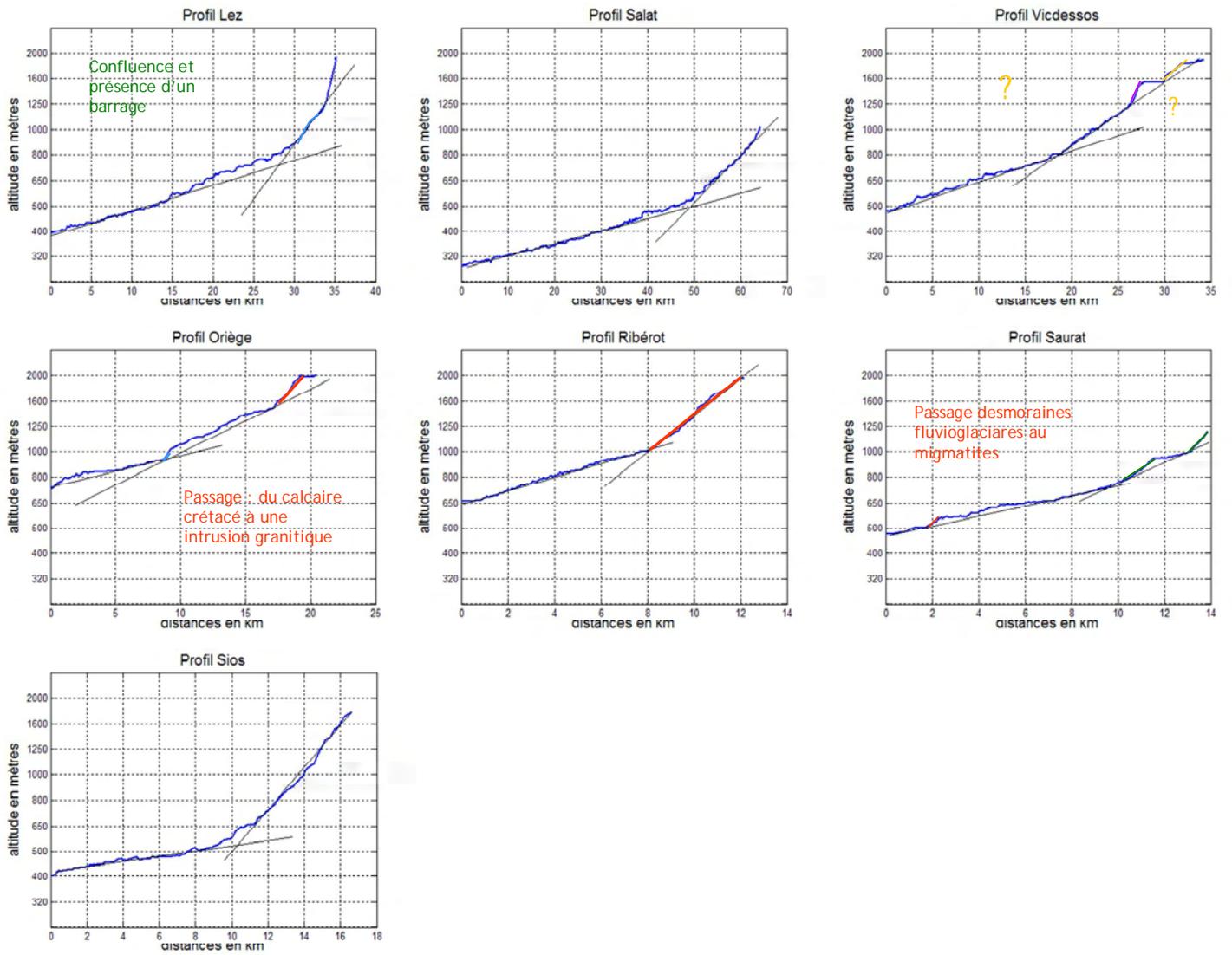


Figure IV-21 Profils en long concave

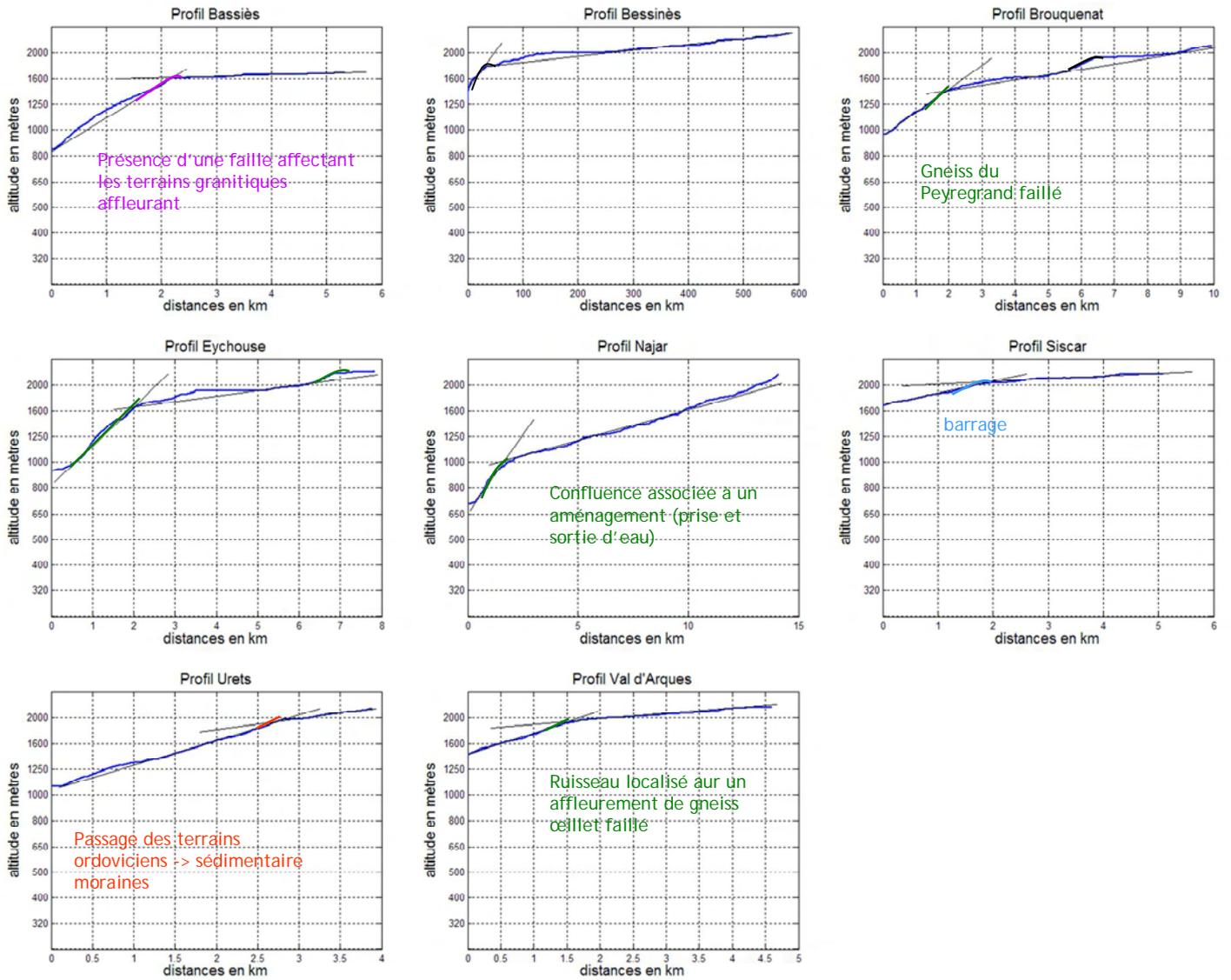


Figure IV-22 Profils en long convexe.

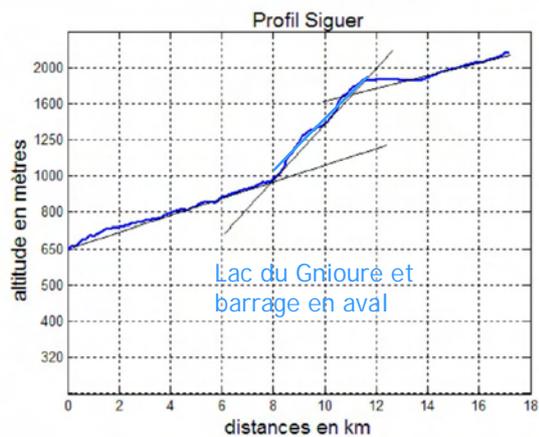


Figure IV-23 Profil en long mixte.

Afin d'associer un sens « pratique » aux profils en long, les différentes sections des profils en long sont ajustées par des droites. Ainsi, il a été calculé les pentes de chacun des segments de droite des différentes sections. En théorie, les pentes inférieures à 1.5% caractérisent les rivières (régime subcritique), pour les pentes comprises entre 1.5 et 6% ce sont des rivières torrentielles, et pour des pentes supérieures à 6% il s'agit de torrents.

Dans le cas de l'implantation d'un nouvel ouvrage, il sera donc nécessaire de consulter les fiches par bassin versant de façon à consulter le profil en long et donc à s'informer des ruptures existantes et de la forme du profil.

->profil concave : état instable, aggradation des sédiments au niveau des la rupture centrale (lorsqu'on ajuste des droites);

->profil convexe : état instable, dégradation en aval après la rupture centrale ;

->profil en équilibre : état stable juste capable de transporter des sédiments (sans aggradation ou sans dégradation)

On sait que le régime d'écoulement est nettement différent suivant ces catégories et par exemple avec des pentes comprises entre 6 et 10% la présence de la phase solide perturbe fortement l'écoulement liquide. Au delà de 10% on ne peut plus considérer que le fluide ait un comportement newtonien.

Selon la position des ruptures du profil en long et le gradient, il est possible de classer les cours d'eau en trois catégories :

-Altitude basse de la rupture et pente inférieure à 10%,

-Altitude moyenne de la rupture avec de fortes pentes,

-Altitude haute de la rupture où la pente est de nouveau beaucoup moins élevée.

Tous les profils vont se ranger dans l'une de ces trois catégories (Tableau IV-3). Les ruptures entre ces trois catégories sont variables. Pour la première, elle est située pour la plus basse à l'altitude de 561m (Sios) et pour la plus élevée à 1015m (Ribérot). La deuxième rupture est tout aussi variable allant de 988m (ruisseau de Najar) à 2001m (ruisseau de Siscar). En moyenne, la première rupture est vers 700m, la seconde vers 1650m. Aucune raison géologique et notamment lithologique ne peut être invoquée pour expliquer ces ruptures. En revanche, elle est morphologique et semble traduire l'effet de la dernière glaciation (Würm) responsable du modelé observé et qui donc n'a pas été encore réajusté. Les ruptures comme les pentes d'ailleurs sont différentes entre le bassin de l'Ariège, celui du Vicdessos ou celui du Salat. De même suivant que les cours d'eau ont un tracé en moyenne parallèle ou perpendiculaire au relief les valeurs sont différentes (Tableau IV-3).

Cours d'eau	profil	1 <sup>ère</sup> catégorie pente (%)	Alt. rupture (m)	2 <sup>ème</sup> catégorie pente (%)	Alt. rupture (m)	3 <sup>ème</sup> catégorie pente (%)
Alet	concave	2.3	765	13		-
Alos	équilibre	-		14		-
Arac	concave	1.9	668	16		
Arbas	équilibre	2.4		-		-
Arget	concave	2.9	678	36		-
Ariège	concave	1.6	651	3.6		-
Artiès	équilibre	-		21		-
Artigue	équilibre	-		15		-
Aston	équilibre	-		8		-
Bassiès	convexe	-		>100	1592	1.6
Baup	concave	1.8	557	>100		-
Bessines	convexe			1.2	1772	1
Bouigane	concave	2	637	4		-
Brouquenat	convexe	-		>100	1382	5
Courbière	concave	6.3	600	18		-
Estours	concave	6.7	686	27		-
Eychouse	convexe	-		>100	1714	3.7
Garbet	concave	2.4	770	34		-
Gouarège	équilibre	6.7		-		-
Isard	équilibre	-		26		-
Lez	concave	2.2	705	23		-
Salat	concave	1.5	510	3.9		-
Vicdessos	concave	2.5	791	7.7		-
Najar	convexe	-		>100	988	6.5
Nert	équilibre	4.2		-		-
Oriège	concave	2.5	942	6.3		-
Ribérot	concave	7.7	1015	>100		-
Saurat	concave	5	691	24		
Siguer	mixte	6	967	>100	1646	3.6
Sios	concave	2.6	561	>100		-
Siscar	convexe	-		25	2001	2.7
Urets	convexe	-		>100	1935	16
Val d'Arques	convexe	-		>100	1883	4

**Tableau IV-3 : Caractéristiques des profils en long des cours d'eau**

En résumé, la plupart des cours d'eau ne sont pas en équilibre, en raison de la surrection eustatique et la plupart des positions des ruptures sont en lien avec la morphologie glaciaire. Ils sont dans le domaine érosif et l'apport de sédiments est très important. Cependant le gradient montre des ruptures importantes passant de rivières torrentielles à torrents. Ceci a pour conséquence que toute rupture du profil, par un aménagement par exemple, vers une diminution de pente aura pour résultat l'apparition de dépôts, grossiers lorsque les pentes sont fortes, avec des sédiments fins lorsque les pentes seront plus faibles.

## 2. Intégrale hypsométrique

Les courbes et intégrales hypsométriques correspondent à la relation aire-altitude d'un bassin versant c'est-à-dire à la façon dont le relief est distribué sur le bassin. Elles représentent la quantité de surface située à une altitude donnée. La forme de la courbe et la valeur de son intégrale sont des éléments appréciables en géomorphologie car ils présentent des variations importantes selon la phase de développement du réseau hydrographique et la structure géologique. L'état de maturation du bassin versant dépend de la nature du substrat et du développement du réseau.

Dans notre cas la valeur de cette intégrale nous permet de caractériser la réactivité du bassin versant à un épisode pluvieux ou à un lâcher et donne une première information quant à la pertinence de l'implantation d'un ouvrage avec stockage sur un bassin. Dans le cadre d'un aménagement au fil de l'eau (cad sans stockage), l'intégrale hypsométrique reste un paramètre descriptif du comportement de la rivière et n'illustre pas les perturbations de l'ouvrage sans stockage.

Lorsqu'un bassin versant a une courbe hypsométrique d'allure convexe et une valeur d'intégrale hypsométrique forte, alors c'est un bassin fortement inertiel, le temps de concentration des eaux sera long et donc la réponse du bassin également. Pour ces bassins l'implantation d'un barrage de retenue avec des lâchers et des vidanges fréquentes va modifier le rythme « naturel » de fonctionnement de l'hydrosystème et donc aura des effets négatifs sur l'écosystème associé.

Enfin, dans le cas d'un bassin versant où la convexité de la courbe est la plus forte et la valeur de l'intégrale est la plus faible, le bassin est peu inertiel, il aura donc un temps de réponse plus rapide pour lequel l'implantation d'un barrage ne modifiera pas radicalement le fonctionnement naturel (Figure IV-24).

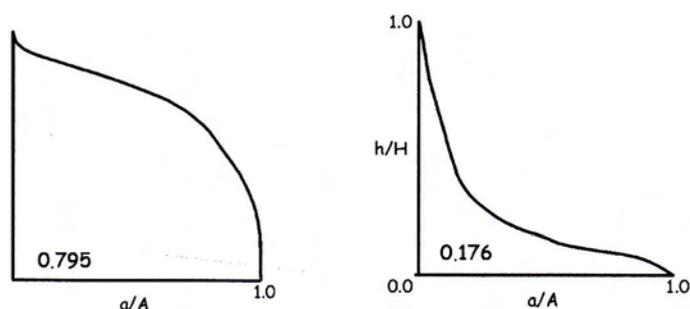


Figure IV-24 Analyse hypsométrique a) intégrale forte b) intégrale faible.

Afin de pouvoir là encore visualiser l'ensemble des résultats pour les 33 bassins de la zone étudiée, la cartographie de la valeur d'intégrale hypsométrique est réalisée (Figure IV-25).

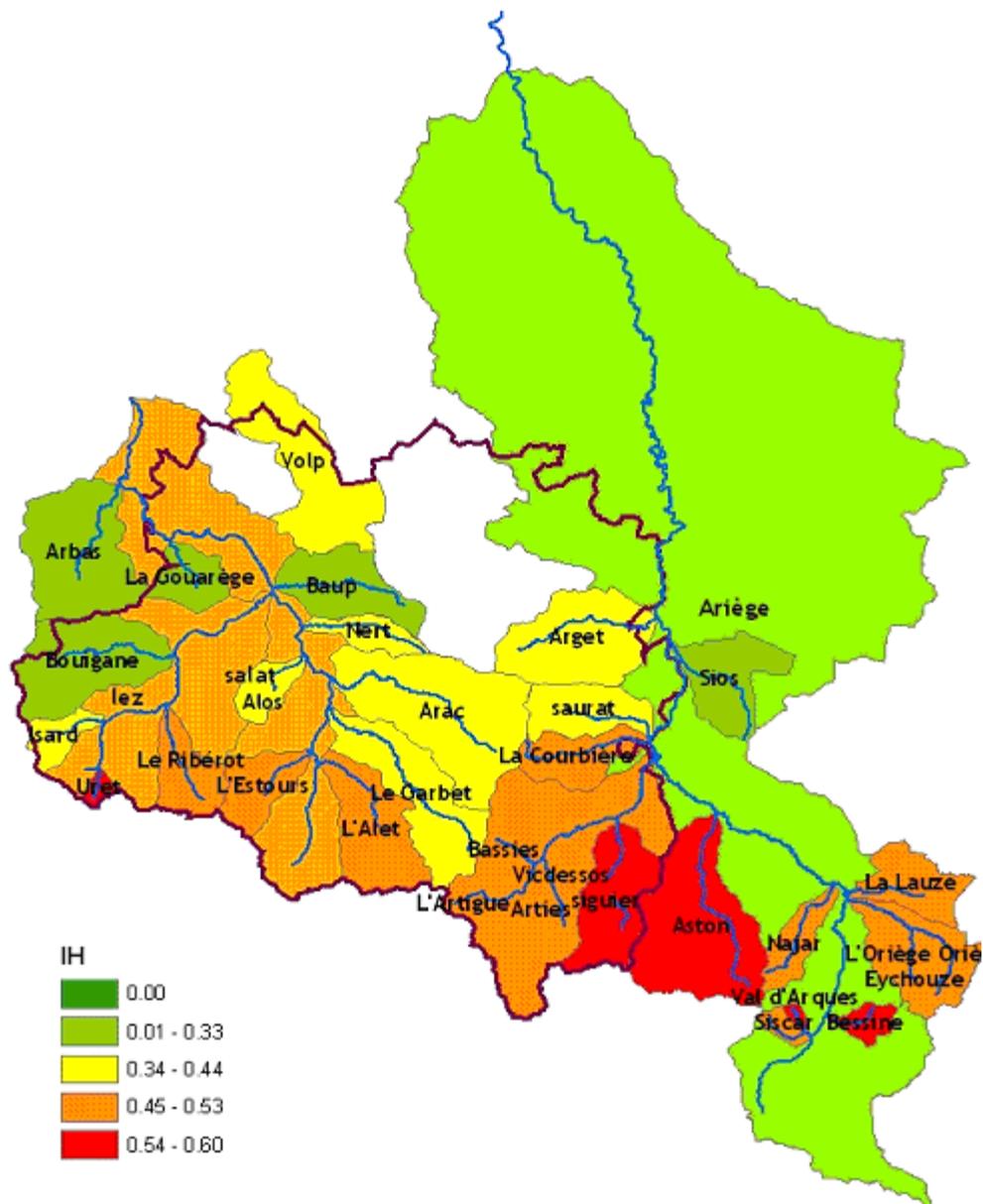


Figure IV-25 Carte de la valeur des valeurs d'intégrale hypsométrique.

L'intégrale hypsométrique ( $I_h$ ) traduit l'inertie du système. Les courbes hypsométriques et les intégrales hypsométriques des bassins de l'Aston, du Siguer, du Val d'arques, de l'Urets et de la Bessine, présentent les valeurs les plus fortes et sont situés au niveau des plus fortes altitudes et sur l'amont des grands bassins du Salat et de l'Ariège. Ce sont des bassins versants fortement inertiels et donc sensibles aux crues artificielles des barrages. La cartographie des intégrales hypsométriques sur l'ensemble des 33 bassins montre une dissection décroissante du sud au nord (Figure IV-25). En effet, les intégrales hypsométriques est de 0.6 % dans le bassin de l'Urets, là où le volume érodé est le plus important, à 0.25 % dans celui de l'Arbas, où l'érosion est plus limitée.

L'analyse des valeurs d'intégrales hypsométriques permet la localisation des bassins les plus inertiels et donc non appropriés à l'implantation de barrages de grande hydraulique. De plus, l'instabilité de ces profils et leur forte sensibilité à l'érosion sont des facteurs susceptibles d'être aggravés par l'implantation de nouveaux ouvrages.

### 3. La densité de drainage

**La densité de drainage** correspond à la distribution des drains sur le bassin, c'est-à-dire la densité du chevelu du réseau hydrographique. Ainsi la densité est égale à la longueur totale des drains divisée par l'aire drainée. Les facteurs qui contrôlent sa valeur sont le climat (les zones humides tendent à avoir des valeurs de densité de drainage plus faibles), l'occupation des sols, la lithologie (un sol meuble aura une forte densité car il a une plus faible résistance à l'érosion), le modelé du paysage (réseau sera fortement développé pour les reliefs matures et inversement pour les reliefs jeunes (Hauchard, 2001; Laignel, 2003; Rinaldo et al., 1993; Rodriguez-Iturbe, 1993).

La densité de drainage augmente avec l'énergie du relief (définie comme le rapport entre la dénivellation du bassin et la longueur du cours d'eau principal). Elle est également en relation avec la lithologie (les densités sont comprises entre 2 et 5 sur des roches imperméables et peuvent s'abaisser à des valeurs proches de 0 en milieu karstique). La ramification du réseau enregistre l'incision du bassin et conditionne « l'efficacité géomorphologique » et la réponse hydrologique des cours d'eau (une forte ramification s'accompagne de fortes valeurs de pointes de crues pour des durées relativement courtes).

Donc, les variations de la densité de drainage sont reliées à la pente, à la nature lithologique des bassins ainsi qu'à l'utilisation des sols par les hommes qui conditionne le ruissellement et la cohésion des sols.

Dans notre cas l'utilisation de l'indice de densité de drainage va servir à identifier les temps de concentration des eaux par les collecteurs secondaires (par opposition au drain principal). Ainsi un bassin présentant une forte densité de drainage présentera un chevelu important et donc un temps de concentration des eaux rapides. Dans ce cas l'implantation d'un ouvrage sur le bassin va provoquer des crues (vidanges, lachures, éclusées) correspondant au régime naturel du cours d'eau et ne va pas perturber son fonctionnement.



Figure IV-26 Cartographie de la densité de drainage par bassin versant sur l'ensemble de la région d'étude.

De la même façon que pour l'intégrale hypsométrique, la carte des densités de drainage permet d'avoir une vision régionale de cet indice. On constate que l'Ariège et le Salat ne sont pas les bassins les plus fortement drainés. En effet, le Siscar et Bessine présentent tous deux les plus fortes valeurs de densité de drainage soit entre 9.76 et 24.48. Ces très fortes valeurs ne sont pas liées à la nature géologique de la zone puisque l'ensemble des bassins versants de l'étude se trouvent sur des terrains éruptifs et plutoniques des Pyrénées ainsi que des terrains d'origine métamorphique. C'est seulement plus au Nord, au niveau de région de Foix, qu'apparaissent des bancs calcaires et marneux avant d'arriver aux grès et sable au niveau de Varilhes. Pour ces bassins le temps de concentration des eaux est le plus rapide, ils seront donc moins perturbés par la mise en place d'une centrale hydroélectrique de type barrage que les bassins de l'Arbas et du Baup pour lesquels les valeurs sont faibles ; leur chevelu étant donc peu dense et le temps de concentration des eaux

jusqu'au collecteur principal sera plus long. Pour ces derniers bassins, il sera donc plutôt conseillé d'utiliser des ouvrages de petite hydraulique ne perturbant que très peu l'hydrologie (sauf sur les tronçons court-circuités).

## **IV.C Etude de la variabilité hydrologique : influence des barrages sur les variables de contrôle**

La connaissance de la fluctuation des débits, sur une longue période, au moins cinq ou dix ans, permet de caractériser l'hydrologie du cours d'eau. De plus, il est important de connaître la régularité d'un cours d'eau et ses débits de crues. Enfin, l'ensemble des données hydrologiques permet de tracer différentes courbes caractéristiques du cours d'eau. Le débit est donc une donnée fondamentale d'un projet, il conditionne la puissance de la centrale et sa rentabilité.

### **1. Variabilité hydrologique des séries de débit**

#### 1. a) Données disponibles

Une des premières mesures à réaliser avant la construction d'un nouvel ouvrage est de connaître les stations de jaugeage à proximité du site envisagé. Ces stations sont répertoriées dans la base de données HYDRO; elles sont également connues des services administratifs compétents : DDAF, DDE, DIREN, etc.

Dans le cadre de cette étude, les données sont celles mises à disposition par les organismes d'Etat concernés par les différents axes de réflexion :

- DREAL Midi-Pyrénées pour les données hydrométriques,
- Météo France pour les données météorologiques,
- ONEMA pour les données piscicoles,
- SPEMA pour les ouvrages hydrauliques,
- Agence de l'Eau Adour-Garonne et Conseil Général de l'Ariège pour les ouvrages hydroélectriques.

En fonction de la zone d'étude et de la qualité des données disponibles (durée de la chronique, données manquantes), il n'a été possible d'utiliser que 11 stations hydrométriques (Tableau IV-4) et 7 stations pluviométriques (Tableau IV-5) (Figure IV-27). Pour quatre des stations hydrométriques les données de hauteurs d'eau sont également disponibles.

La durée du projet étant très courte, il n'a pas été demandé de procéder à l'acquisition de nouvelles données autres que les données météorologiques, les données à disposition et déjà acquises seront les seules utilisées pour cette étude.

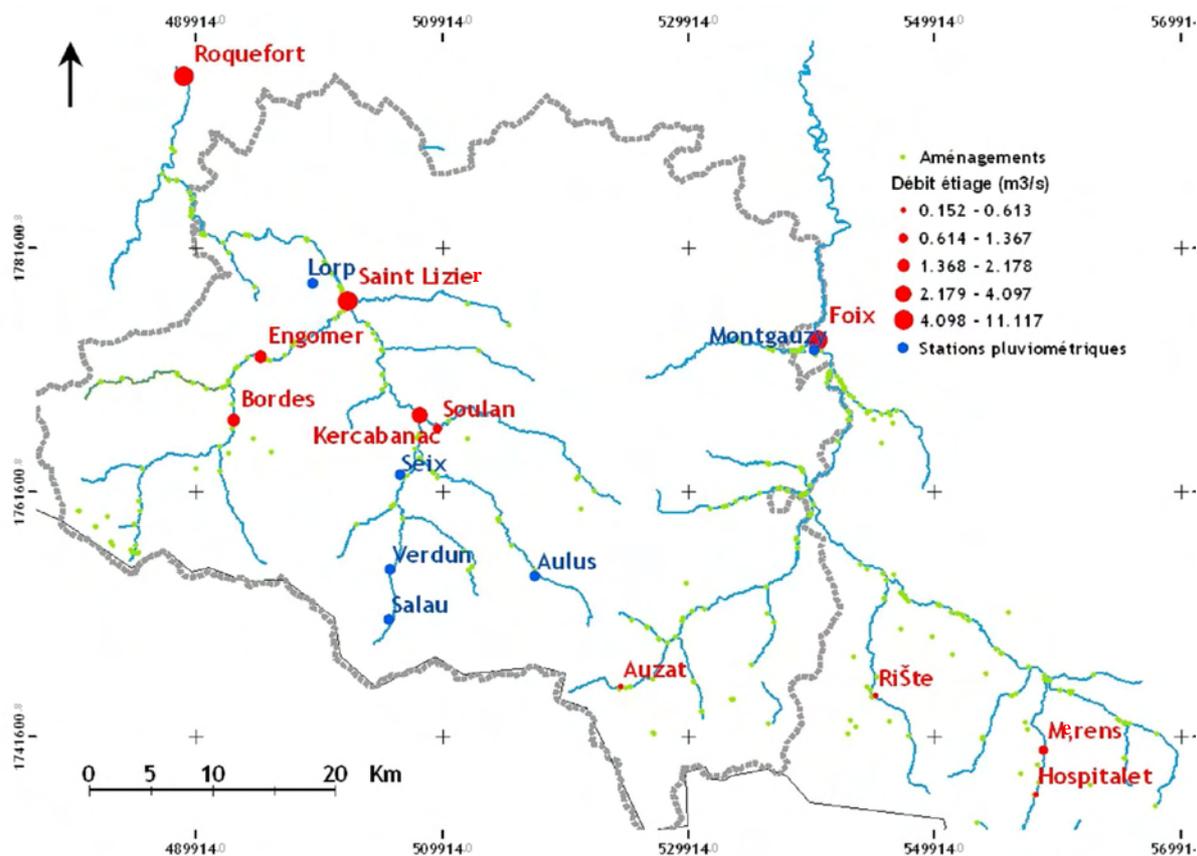


Figure IV-27 Carte de localisation des stations à disposition (9 stations pluviométriques et 11 stations hydrométriques)

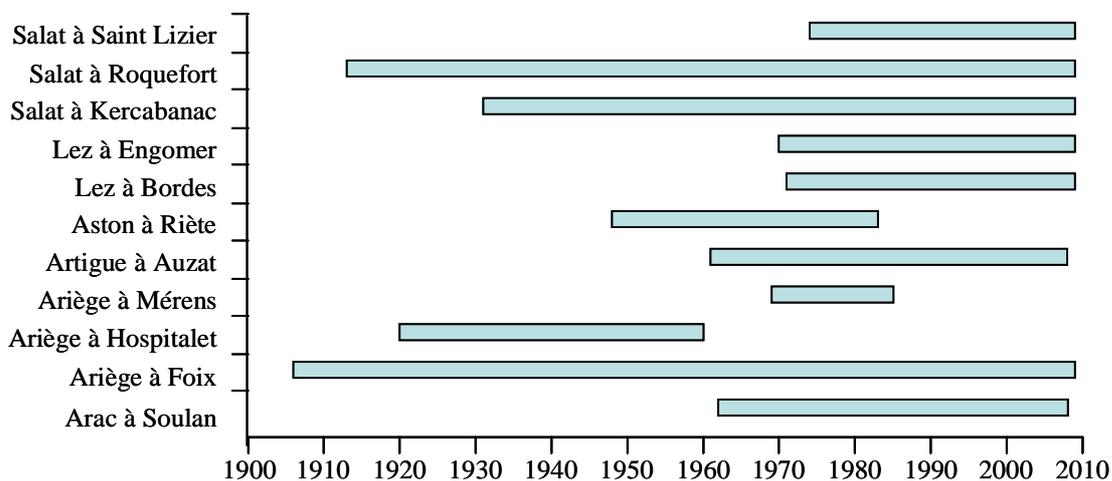


Figure IV-28 Périodes de mesure de débit pour chacune des 11 stations de jaugeage.

STATION	RIVIERE	X	Y	DEBUT	FIN	LACUNE	OBSERVATION
Soulan	Arac	509579	1766866	1962	2008	1971, mai 1974	débit naturel
Foix	Ariège	540501	1773983	1906	2009		débit influencé, débit obtenu par somme des débits
Hospitalet	Ariège	558156	1736855	1920	1960	[15/7/1928-7/10/1928] [1/1/1949-16/7/1950] [4/12/1950-31/12/1950]	débit naturel, avant construction centrale
Mérens	Ariège	558801	1740465	1969	1985		débit influencé, débit obtenu par la somme des débits dérivés par Aston et du débit mesuré à Mérens
Auzat	Artigue	524405	1745647	1961	2008		débit naturel reconstitué par EDF, amont de la centrale de Soulcem à Cibelle
Riète	Aston	545158	1744942	1948	1983	[1/1/1971-31/3/1971] [1/6/1983-31/7/1983]	débit naturel reconstitué par EDF, amont de Riète
Bordes	Lez	492996	1767504	1971	2009	[31/10/1988-30/11/1988]	débit influencé, aval centrale de Bordes
Engomer	Lez	495211	1772687	1970	2009	[31/10/1988-30/11/1988] [3/2/2004-12/5/2004]	débit influencé, aval centrale de Castillon et Arrout
Kercabanac	Salat	508071	1767945	1931	2009		débit naturel, amont barrage Ardichen et confluence avec l'Arac
Roquefort	Salat	488966	1795612	1913	2009		débit naturel
Saint Lizier	Salat	502293	1777255	1974	2009	[11/11/1996-30/11/1996]	débit naturel, amont Saint Lizier et aval confluence avec le Baup

**Tableau IV-4 : Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées**

STATION	N° INSEE	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	DEBUT	FIN	LACUNE
Aulus	09029001	42° 47'30" N	01° 19'54" E	733	1961	2008	
Hospitalet	09139001	42° 35'18" N	01° 47'42" E	1425	1961	2008	août 1988
Lorp	09289001	43° 00'18" N	01° 06'24" E	411	1961	2008	
Salau	09100001	42° 45'30" N	01° 11'18" E	855	1952	2008	
Verdun	09328001	42° 47'42" N	01° 41'12" E	570	1961	2008	
Montgauzy	09122002	42° 57'36" N	01° 36'24" E	425	1906	2008	[1915-1924] [1933-1962]
Seix	09285002	42° 51'54" N	01° 11'48" E	520	1961	2006	

**Tableau IV-5 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées**

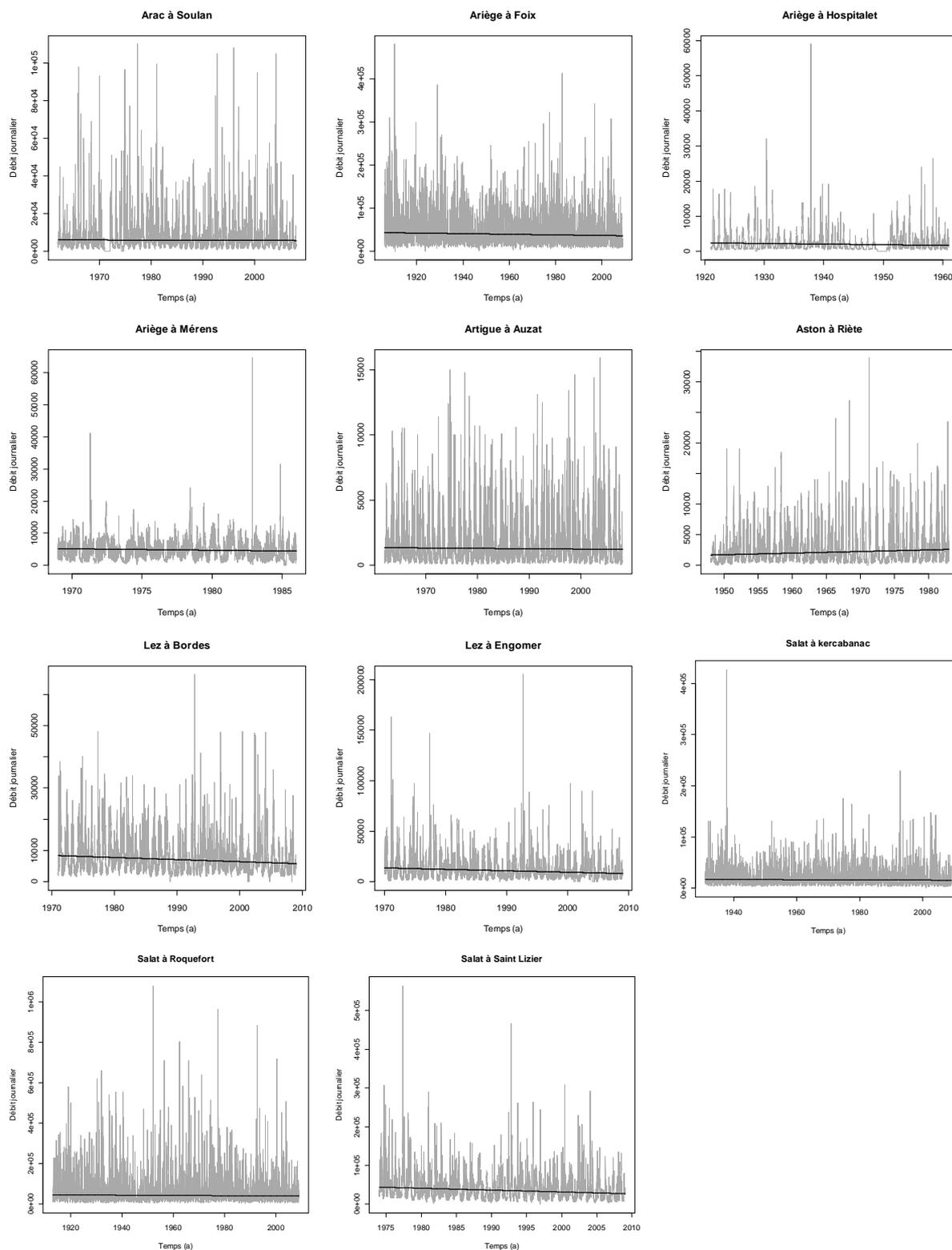


Figure IV-29 : Courbes des débits journaliers et débits moyens mensuels des stations hydrométriques de la DIREN utilisés dans cette étude.

### 1. b) Régime hydrologique et relation pluie-débit

Le terme de régime hydrologique désigne l'ensemble des variations de l'état et des caractéristiques d'une formation aquatique, qui se répètent régulièrement dans le temps et dans l'espace et passent par des variations cycliques, par exemple, saisonnières (définition du Glossaire International d'Hydrologie). Les régimes hydrologiques de base des cours d'eau sont le régime glaciaire, le régime nival et le régime pluvial, appelés ainsi d'après l'origine de l'eau : glace, neige ou pluie.

Les modifications du régime hydrologique affectent l'équilibre entre le mouvement de l'eau et celui des sédiments. L'établissement d'un nouvel équilibre dynamique du lit du cours d'eau et de sa plaine d'inondation est un processus lent, qui peut durer des dizaines voire des centaines d'années. Dans certains cas, il n'est même jamais atteint et l'écosystème reste dans un état de « convalescence » perpétuelle. Les exemples extrêmes de rivières ayant virtuellement perdu toutes leurs fonctions naturelles sont de plus en plus nombreux (Colorado, Ganges, Fleuve Jaune...).

Les altérations anthropiques directes du régime naturel sont essentiellement dues aux excès de pompage dans les rivières, pour l'agriculture ou l'adduction d'eau, au drainage des zones humides et à la construction de barrages destinés à la prévention des crues, à l'irrigation, à la production d'électricité, à la navigation et aux loisirs. Les conséquences de ces aménagements sont variables : si les effets sont négligeables en dessous d'un seuil de perturbation spécifique à chaque rivière, ils peuvent être dramatiques au-delà, notamment pour les poissons et invertébrés dont œufs et larves dépendent étroitement de la sédimentation. La perturbation due au barrage est à la fois une perturbation globale, qui affecte tout l'aval du cours d'eau, et locale : les variations de débit à court terme au niveau des centrales hydroélectriques sont sans équivalent dans la nature et représentent donc un stress particulièrement violent pour les écosystèmes. Les trois « paramètres » les plus importants à ne pas perturber sont : l'amplitude, la fréquence et les fluctuations saisonnières des débits (Lefebvre et al., 2008)). L'altération de ces paramètres provoque des perturbations importantes du fonctionnement de l'hydrosystème, ce qui engendre un stress important pour les écosystèmes associés.

Dans le cas de l'Ariège, la courbe des débits disposés par ordre chronologique apparaît souvent comme très irrégulière avec des périodes de hautes eaux et de basses eaux, véritable signature d'un cours d'eau sur un cycle annuel. Le régime hydrologique est de type pluvionivale (Figure IV-30), il se caractérise par des hautes eaux liées à la fonte de neige (en avril-mai) et des basses eaux en (juillet-août).

L'utilisation des régimes hydrologiques annuels a pour but de caractériser la régularité (ou stabilité) du cycle hydrologique au cours de la période d'étude. Nous cherchons donc à observer l'évolution pour chaque bassin de la forme du régime hydrologique au cours du temps, ceci permettant d'observer une modification du comportement du cours d'eau. Dans le cas de l'Ariège à Foix (Figure IV-30), on observe que les années hydrologiques du début du 20ème siècle présentent des étiages plus marqués et des pics de débit plus forts. En revanche, pour le début du 21ème siècle, on observe une diminution de l'amplitude des débits pour les hautes eaux et une augmentation des basses eaux. Cette modification visible du régime hydrologique observé sur l'ensemble des séries de débit peut être en lien avec deux phénomènes. D'une part le contrôle climatique peut être à l'origine de

ces fluctuations interannuelles du débit. Ou bien d'autre part, c'est l'impact du contrôle et de la régulation des débits par les ouvrages hydroélectriques (notamment par les barrages avec retenue).

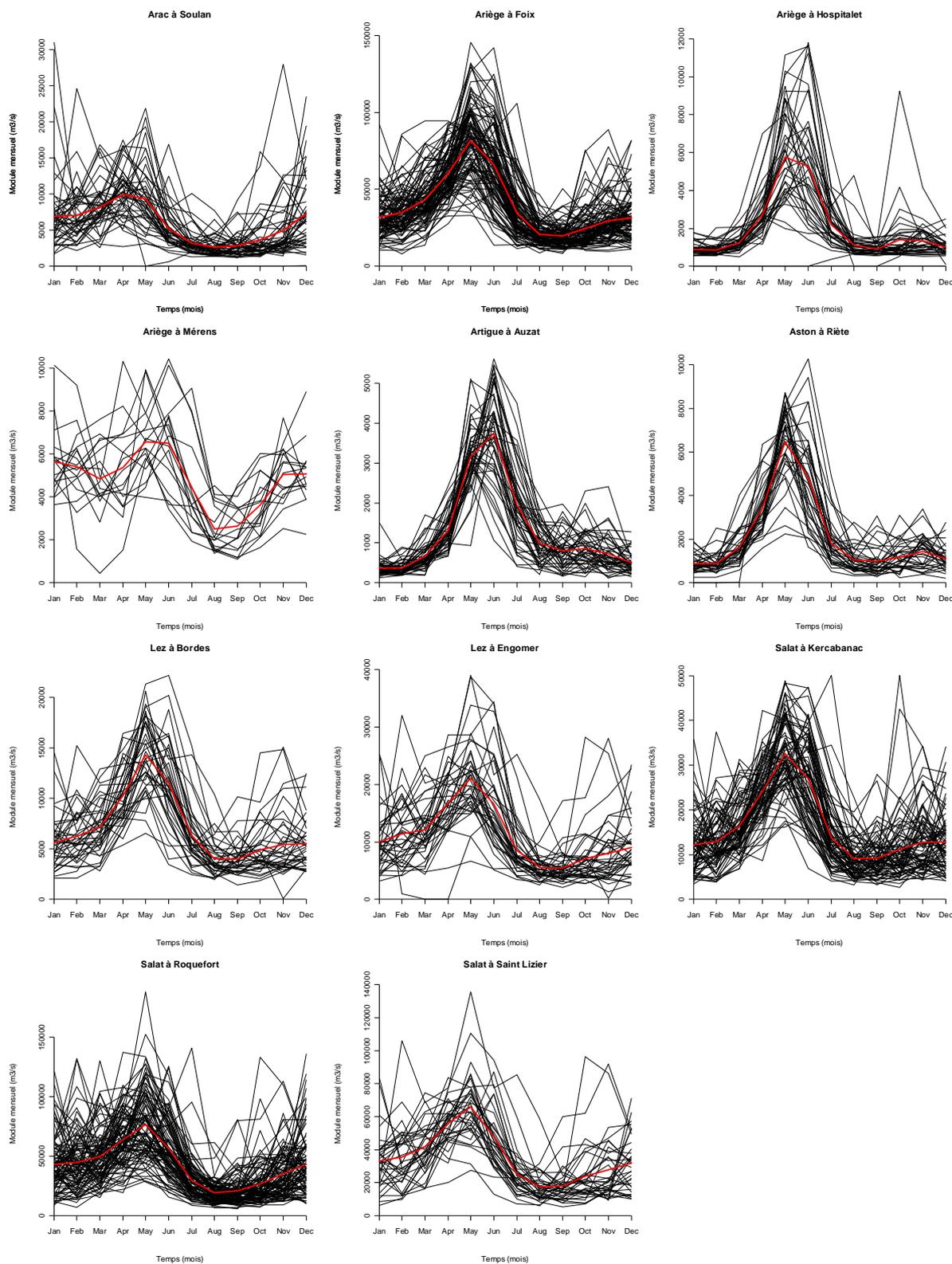
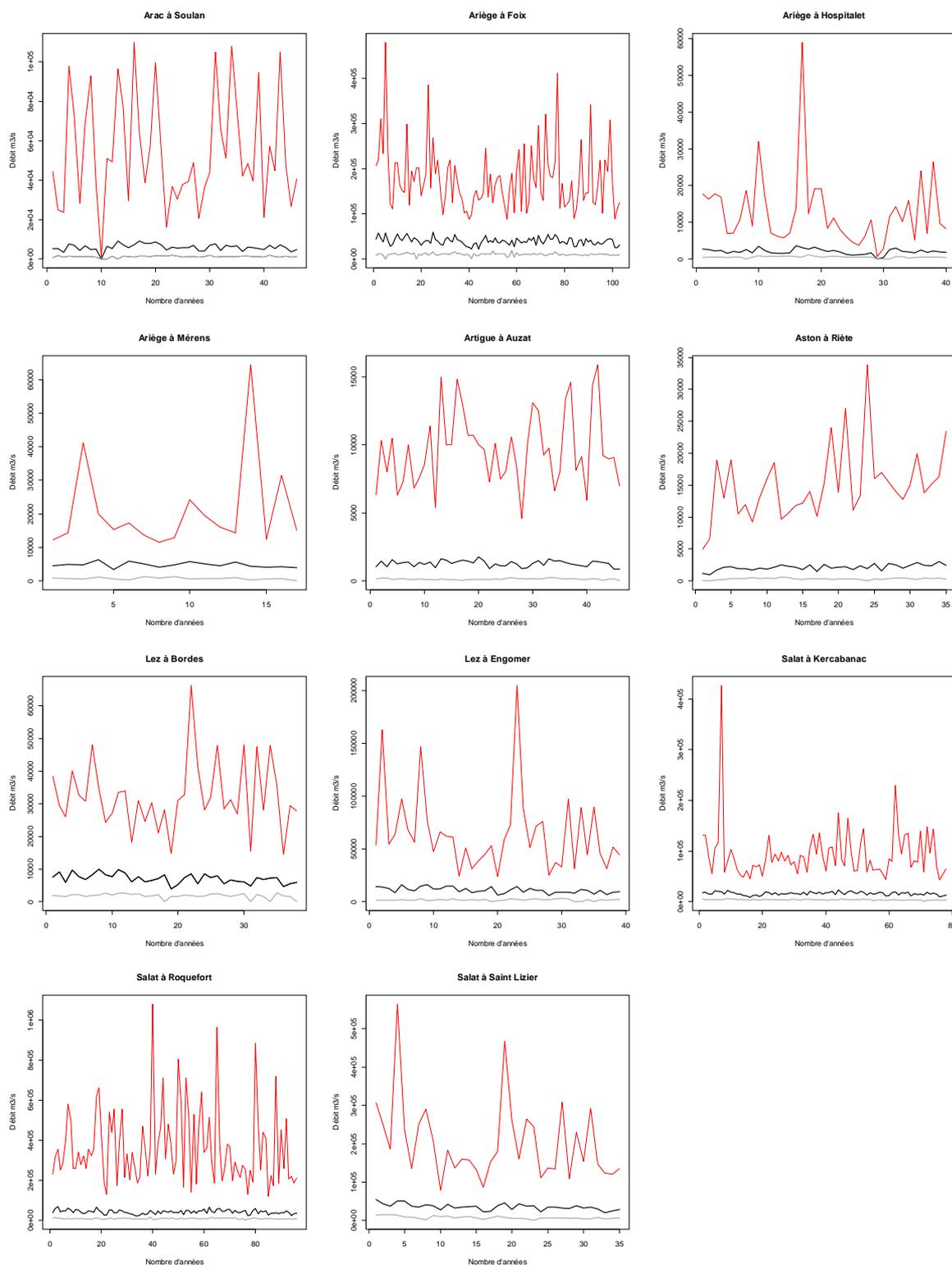


Figure IV-30 Module mensuel interannuel

Pour contraindre ces phénomènes de crues et d'étiage, la connaissance d'une variable représentant l'information crue ou étiage est nécessaire. Le débit maximal peut être utilisé pour représenter les crues puisque c'est une variable qui est liée à la forme de l'hydrogramme de crue. L'appréhension du phénomène d'étiage est beaucoup plus délicate. Les variations des maxima, minima et moyennes par année (Figure IV-31) sur l'ensemble des séries de débit montrent pour les longues séries en période une forte sécheresse en 1940, associée à une diminution forte des crues (débit maximum). De façon à obtenir une vision générale de l'ensemble de la région d'étude, l'étude des maxima et minima par année est réalisée sur l'ensemble des stations.

## Chapitre IV : Proposition d'outils et de méthodes pour l'analyse de projets hydroélectriques



**Figure IV-31 : Débit annuel maximum (rouge), moyen (noir) et minimum (gris)**

L'étude de la relation pluie-débit offre des informations importantes sur l'établissement des régimes hydrologiques. Les intercorrélations pluie-débit permettent une approximation de l'hydrogramme unitaire ou de la réponse impulsionnelle du système pour le pas de temps considéré,

permettant de caractériser la réponse hydrologique du bassin et donc sa réactivité aux précipitations.

Les formes et les paramètres quantitatifs (intensité de la corrélation, décalage) des réponses impulsionnelles réalisées sur tous les bassins et sur l'ensemble de la période d'étude sont très variables. Pour tous les bassins, les fonctions d'intercorrélation présentent des réponses rapides et des oscillations annuelles correspondant au cycle hydrologique (Figure IV-32). Un zoom sur le pic de corrélation pour chaque bassin permet une meilleure visualisation de la forme de l'hydrogramme unitaire et de l'intensité de la corrélation (Figure IV-33). De manière générale, la forme de la réponse impulsionnelle semble être composée d'une réponse rapide aux pluies avec un décalage de 1 à 3 jours, et d'une composante traduisant clairement une dynamique lente pouvant provenir de différentes causes : soutien de l'aquifère, stockage par le manteau neigeux, stockage anthropique via les barrages.

La réponse rapide atteint un maximum de corrélation compris entre 0.12 et 0.43. Ces valeurs faibles de corrélation sont liées au fait que les précipitations dans cette région ne produisent pas nécessairement de débit, d'autant plus que les précipitations utilisées sont des pluies brutes. Cependant, il est possible de distinguer deux familles fonctionnelles (Figure IV-33). D'une part, les stations situées en piémont (Soulan, Foix, Kercabanac, Saint Lizier, Bordes et Engomer) pour lesquelles, la réponse rapide est plus forte et d'autre part, les stations d'altitude (Mérens, Hospitalet, Auzat et Riète) pour lesquelles, la réponse rapide est plus faible. Ceci démontre l'importance du stockage par le manteau neigeux pour ces dernières stations, différant dans le temps la réponse hydrologique du cours d'eau aux sollicitations pluvieuses.

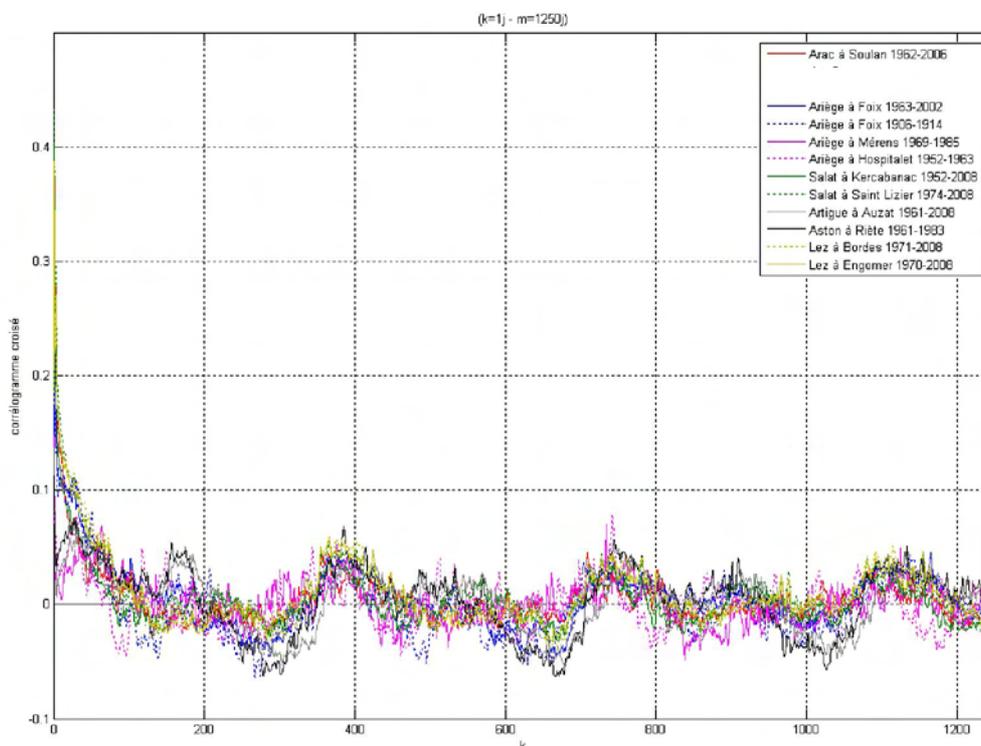


Figure IV-32 Intercorrélation pluie-débit (fenêtre pluriannuelle)

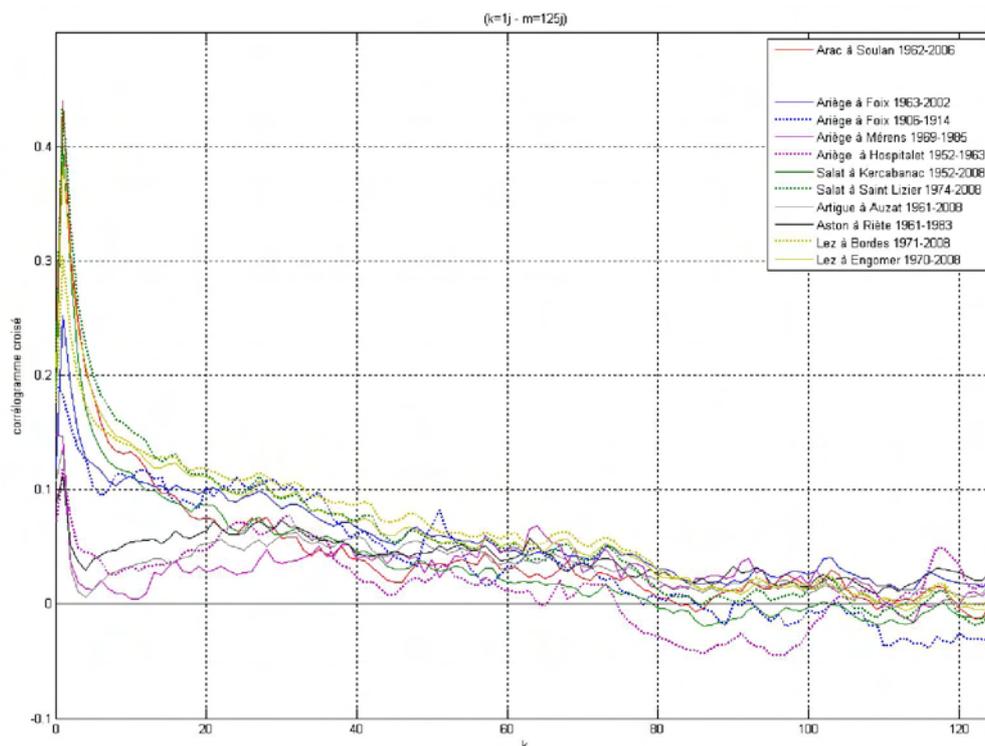


Figure IV-33 Intercorrélation pluie-débit (fenêtre annuelle)

### 1. c) Changements globaux : variabilité climatique

Pour ne pas attribuer certaines modifications de la variabilité hydrologique d'origine climatique des cours d'eau à une influence anthropique (implantation d'ouvrages), il est important de réaliser une analyse de la variabilité climatique.

Ainsi le signal d'entrée climatique peut être de deux types : soit les précipitations ou bien un indice climatique de référence connu pour régir les variations climatiques en Europe : l'Oscillation Nord Atlantique (NAO).

La NAO est une manifestation régionale de l'oscillation Australe (AO), c'est la différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Elle est en relation avec les courants marins présents dans cet océan (Dérive Nord Atlantique, Courant du Labrador, Gulf Stream,...) mais également en relation avec les courants-jet, courants atmosphériques d'altitude.

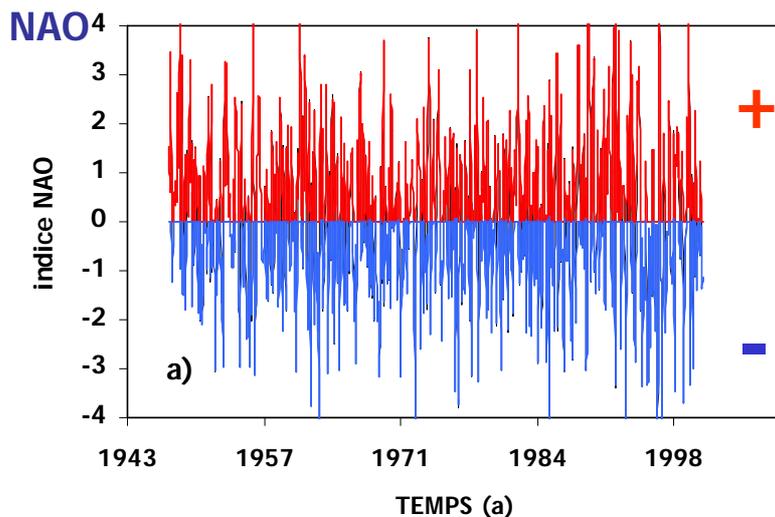


Figure IV-34 Variations mensuelles de l'indice NAO.

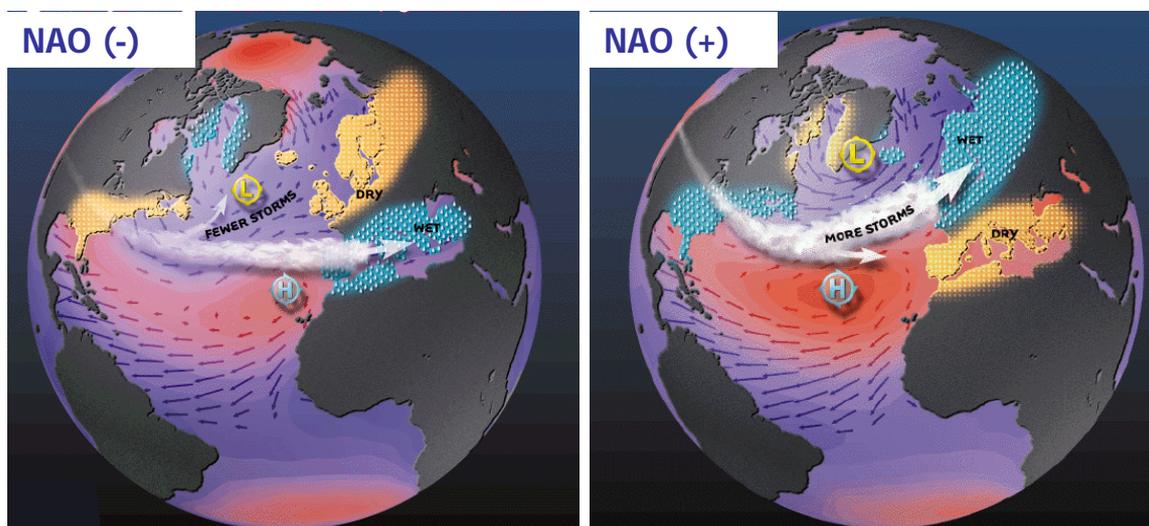


Figure IV-35 Description des deux phases de la NAO (ref).

L'indice Nao présente deux types de phases : positives et négatives. Lors des phases positives, on observe une anomalie de fortes pressions au niveau de l'anticyclone des Açores au centre de l'Europe et faibles pressions au niveau des hautes altitudes de la dépression d'Islande. Cela provoque un déplacement du rail de dépression vers le nord. La différence de pression accrue aboutit aux hivers chauds et humides (avec plus de précipitations) en Europe du nord, en Islande et en Scandinavie et des hivers secs et froid au Sud de la France, au nord du Canada et Groenland (Hurrell 1995, Higuchi et al. 1999, Labat et al. 2005, Labat 2006, Tong et al. 2006). Dans ce cas, les Etats-Unis orientaux éprouvent également des conditions d'hiver doux et humides. A l'inverse lors de phases négatives de la NAO, la dépression d'Islande est plus forte et l'anticyclone des Açores est plus faible, en conséquence la différence de pressions est moins importante. Le rail de dépression circule à de plus basses latitudes (au niveau de la méditerranée). Cela provoque des hivers plus secs en Europe du Nord et en Amérique du Nord mais des hivers humides et avec de la neige dans les régions méditerranéennes et Afrique du Nord (Perreault et al. 1999, Marshall et al. 2001).

Ainsi il est intéressant de comparer les fluctuations de cet indice climatique avec les variations de débits des stations hydrométriques à disposition. Dans le cas de l'Ariège, on constate que la simple comparaison de valeurs annuelles permet déjà d'identifier les liens existant entre fluctuations climatiques et variabilité hydrologique. En effet, par exemple dans les années 1940, on observe une forte diminution du débit (Figure IV-36), or cette forte diminution correspond à une phase de NAO positive traduisant une diminution des régimes de précipitation et donc consécutivement une diminution des débits des rivières sur les régions du Sud de la France. Cependant, dans les années 1940, presque aucun ouvrage n'était en place sur l'Ariège, cette forte diminution du débit n'est donc pas imputable aux effets anthropiques. Par contre, entre 1960 et 1980, on observe une forte augmentation des débits correspondant à une phase de NAO négative, là encore il existe un fort contrôle de la variabilité hydrologique par les fluctuations climatiques. De même, entre 1980 et 2009, on observe une forte diminution des débits en lien avec une phase de NAO positive. Ainsi, il est montré que les plus grandes modifications des régimes hydrologiques sont en lien avec les fluctuations climatiques. Il est donc important de prendre en compte cette forte variabilité climatique pour la mise en place de nouveaux aménagements (valeur du débit réservé, limite de prélèvements d'eau...).

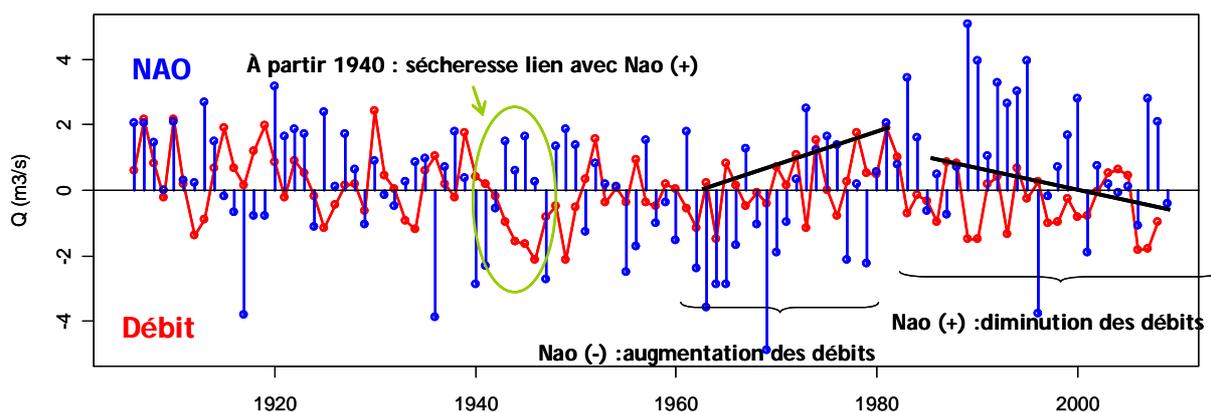


Figure IV-36 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Foix et des valeurs de l'indice NAO.

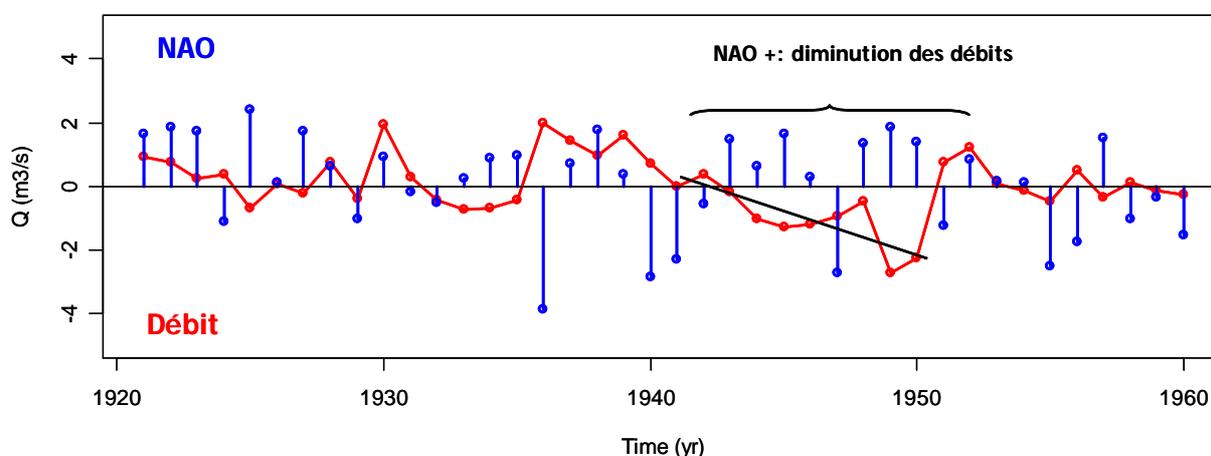
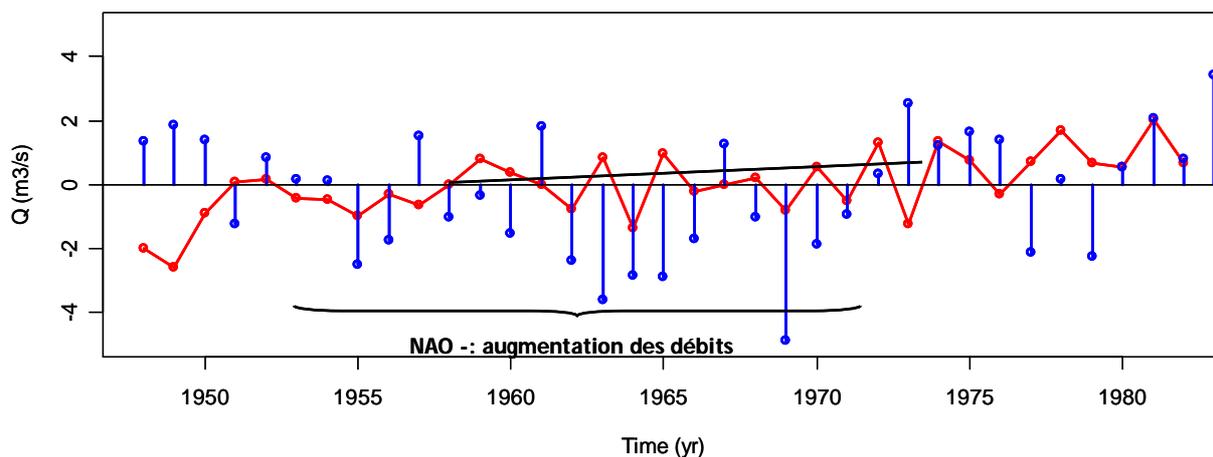


Figure IV-37 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Hospitalet (1920-1960) et des valeurs de l'indice NAO.



**Figure IV-38 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Hospitalet (1969-1985) et des valeurs de l'indice NAO.**

De la même façon l'analyse des courbes de débit segmentées permet de mettre en évidence certaines ruptures dans le fonctionnement hydrologique. On observe en particulier une rupture dans les années 1940 caractérisant la forte sécheresse visible à la fois sur les débits minimums et moyens. De la même façon, une rupture est observée dans les années 1980, sur les débits maximums, correspondant là encore à des fluctuations climatiques.

Afin de mieux contraindre l'évolution temporelle (du long au court terme) de la variabilité hydrologique, nous utilisons la transformée en ondelettes continues afin de pouvoir distinguer les éventuelles périodicités, ruptures et discontinuités temporelles susceptibles d'affecter dans les séries de débit et de précipitations, signaux probablement très instationnaires. Renard (2006) souligne l'importance de ces nouvelles méthodes déterministes (analyses en ondelettes et cohérence) pour caractériser l'instationnarité des signaux hydrométéorologiques. La réalisation des spectres en ondelettes continues des chroniques de précipitations et de débits permet de déterminer l'organisation et la structure des signaux (Labat 2006, Massei et al. 2007). Les spectres en ondelettes sont réalisés sur des signaux débarrassés de leur tendance, et montrent la distribution de la puissance du signal au cours de la période d'étude.

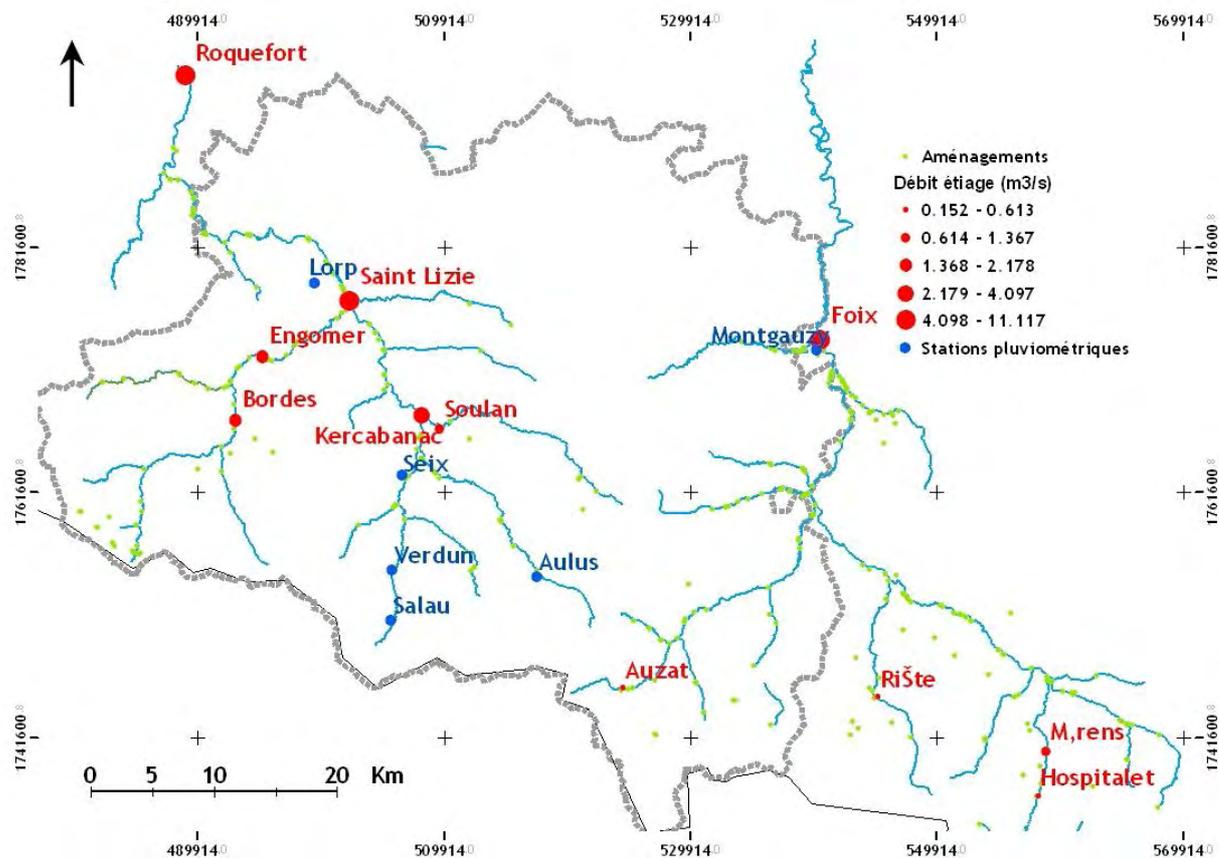


Figure IV-39 Carte de localisation des stations de débit et de précipitations

La comparaison avec les précipitations permet une première approche de la relation pluie-débit, essentiellement sur les échelles de temps longues (annuelle à pluriannuelle), pour vérifier la contribution du forçage externe, et par différence, d'un éventuel forçage interne aux bassins, de la variabilité hydrologique.

Les signaux de l'ensemble des séries de débit présentent dans l'ensemble une structure spectrale similaire. Nous retrouvons les bandes correspondant au cycle hydrologique (6 mois et 1 an), et deux bandes interannuelles: 2-3 ans et 5-7 ans. Les bandes interannuelles sont également présentes dans les précipitations et correspondent à des oscillations climatiques connues pour être présentes dans l'indice climatique NAO. La bande de fréquence correspondant au cycle hydrologique est très bien marquée notamment pour les stations de l'Aston à Riète et de l'Artigue à Auzat. Or ces stations sont des séries de débit reconstituées, il semble donc que ces séries n'expriment pas de fluctuations climatiques.

La bande de fréquence correspondant au cycle hydrologique est moins bien marquée pour les séries de débit correspondant à de petits bassins. Ces petits bassins sont donc moins affectés par l'alternance saisonnière, qui en outre s'exprime avec une intensité variable en fonction des bassins. Pour les bandes de fréquences interannuelles, on note des discontinuités remarquables comme celles observées pour l'Ariège à Foix et le Salat à Roquefort en 1940, 1970 et 1980.

Les spectres en ondelettes associés des précipitations (Figure IV-40 ,Figure IV-41 ,Figure IV-42) montrent tout d'abord logiquement une forte puissance pour les très hautes fréquences

correspondant aux évènements rapides, moins marquée dans les débits en raison d'un filtrage de ces évènements par les bassins versants (tous les évènements pluvieux ne produisant pas de crues). Les bandes de fréquence 1 an, 2-3 ans et 5-7 ans sont également observées. Le cycle hydrologique présente une alternance saisonnière très marquée dans les précipitations mais la bande 6 mois n'est pas visible puisqu'elle correspond à la composante nivale.

Les bassins semblent donc enregistrer parfaitement les variations climatiques basse-fréquence puisque les mêmes structures, discontinuées ou ruptures sont observées dans les deux types de signaux. Ces résultats sont en accord avec ce qui a déjà été montré précédemment, la comparaison avec les valeurs mensuelles de NAO montrait un fort contrôle de la variabilité climatique sur les débits des petits bassins.

Il semble donc qu'en plus d'une contrainte anthropique déjà présente, l'influence climatique et les changements climatiques s'enregistrent très bien dans les séries de débit des rivières. L'étude des perturbations enregistrées par les cours d'eau doit donc toujours passer par l'étude préalable de la modification de la variabilité climatique de façon à ne pas les confondre avec les effets liés à la construction d'ouvrages hydroélectriques.

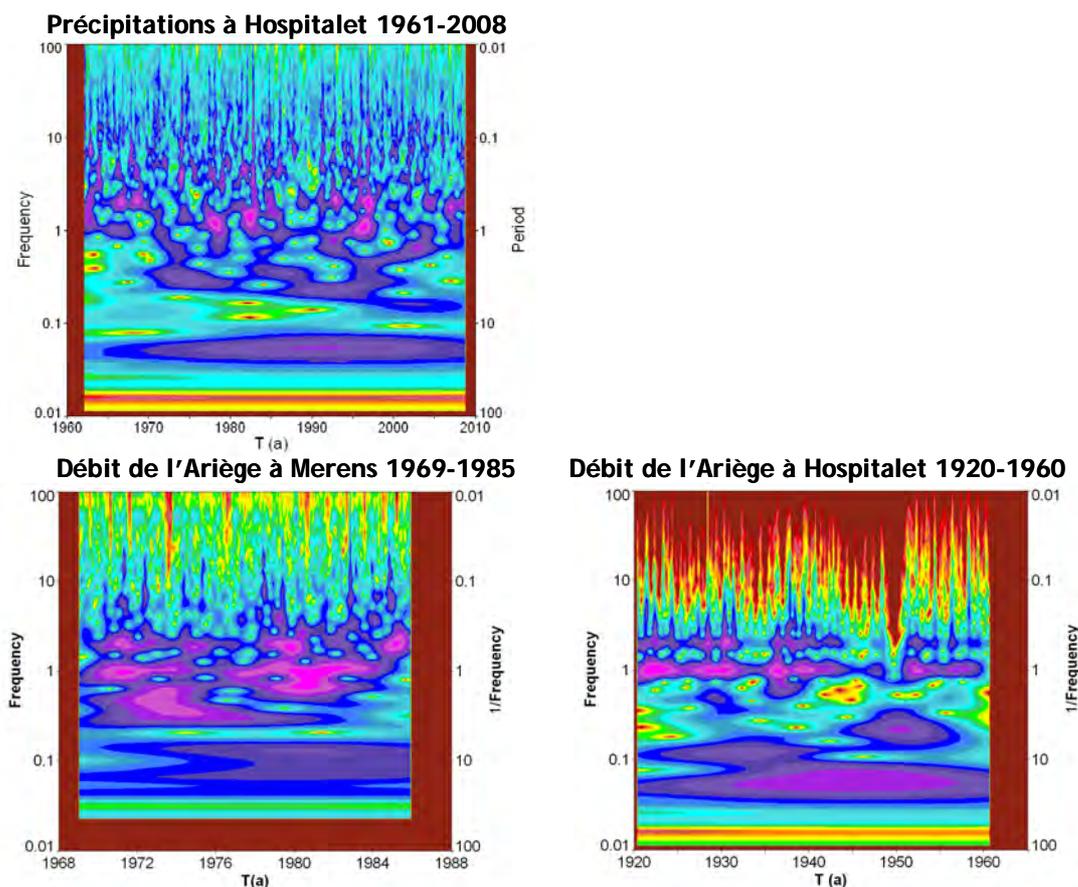


Figure IV-40 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations à Hospitalet et de débit de l'Ariège à Mérens et Hospitalet.

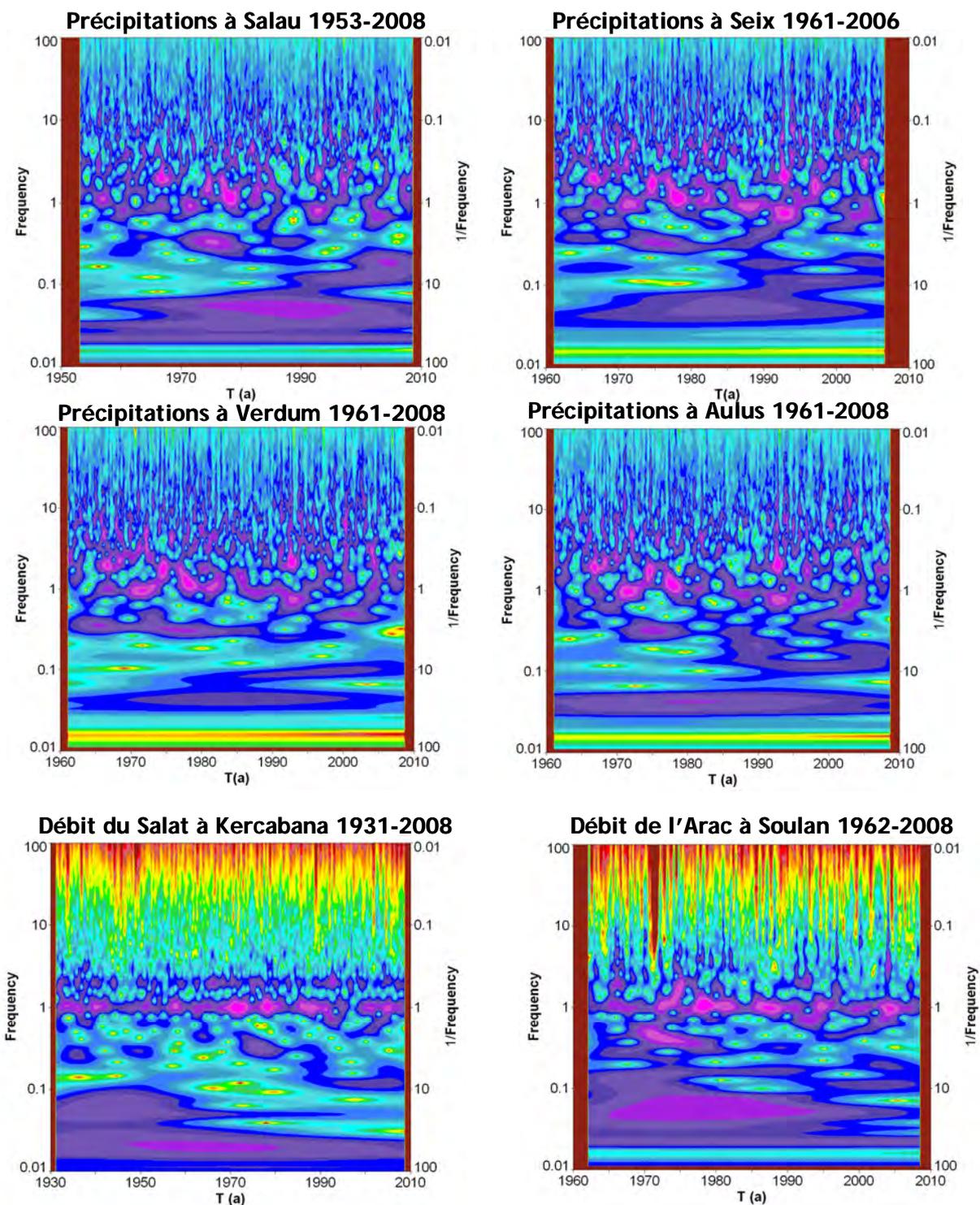
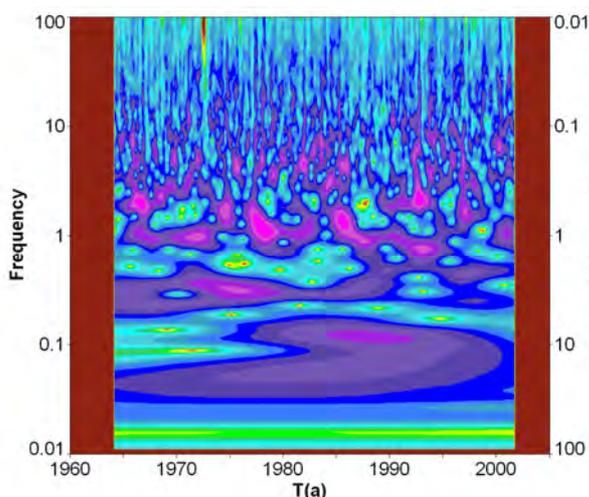


Figure IV-41 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations et de débit du Salat et de l'Arac.

### Précipitations Montgauzy 1964-2001



### Débit Ariège à Foix 1906-2009

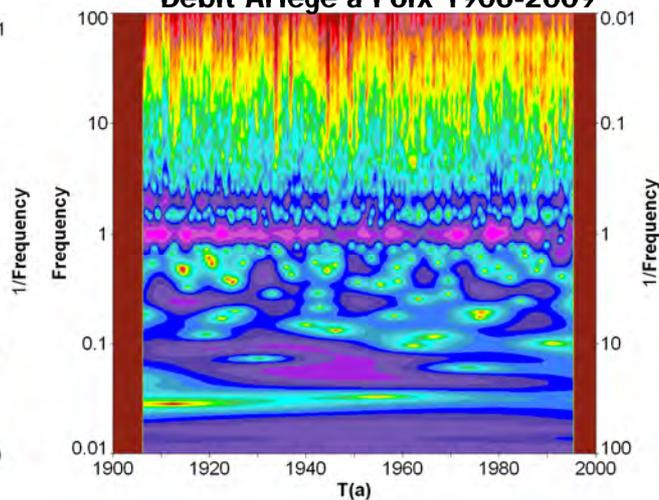


Figure IV-42 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations et de débit de l'Ariège à Foix.

## 2. Observations des perturbations du fonctionnement des hydrosystèmes

Dans ce chapitre, il est question d'utiliser des techniques d'analyse du signal permettant d'identifier des paramètres statistiques mettant en évidence selon leurs valeurs soit des processus hydrologiques naturels soit des perturbations.

### 2.a) Volume de régulation

Cette méthode a été introduite dans la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle par les ingénieurs hydrauliciens pour la régularisation des cours d'eau au moyen de réservoirs saisonniers. L'outil est la courbe dite des débits cumulés. Cette courbe fournit le volume d'eau écoulé  $W$  à une station en fonction du temps à partir d'une origine quelconque. Cela revient à intégrer la courbe de débits en fonction du temps. La dérivée de cette courbe n'est autre que le débit  $Q$  à un instant  $t$ . Ainsi, si on relie les deux points extrêmes de cette courbe, sa pente correspond au débit moyen de la période. On constate également que la courbe présente une oscillation correspondant à la variation saisonnière des débits. Cherchons la capacité d'un réservoir qui permettrait de réguler la variation du débit saisonnier, en le supposant vide bien sûr au départ. Ce volume est exprimé par la différence entre la tangente passant par le maximum de la courbe et la tangente passant par son minimum.

Ce volume appelé volume de régulation correspond en fait au volume d'eau écoulé au cours du cycle hydrologique et qui n'est pas retenu sur le bassin versant. Dans l'exemple d'un cours d'eau de surface, il représente l'écoulement libre. Son nom provient du fait que c'est le volume qu'il faudrait stocker dans un réservoir pour réguler le débit du cours d'eau qui aurait alors comme valeur constante le débit moyen. Pour la construction de barrages sa connaissance est très importante, en effet, le réservoir ne doit pas dépasser sa valeur. Si tel était le cas, son remplissage

rencontrerait au fil du temps quelques difficultés, mais surtout il abaisserait le débit moyen avec de nombreuses incidences écologiques en aval.

La régulation naturelle du bassin versant d'un cours d'eau est assurée par le volume retenu et différé au niveau des eaux souterraines et par la neige. Les eaux stockées en périodes hivernales et printanières vont alors assurer le débit d'étiage. Il faut y ajouter les réservoirs construits par l'homme qui remplissent exactement la même fonction.

L'établissement du volume de régulation, du volume stocké saisonnièrement sur le bassin versant et des pourcentages va permettre de comparer les différents cours d'eau et leur évolution d'amont en aval. Quel que soit le cours d'eau envisagé, les volumes de régulation sont bien supérieurs aux volumes des différents réservoirs, donc il n'y a aucune incidence sur le débit moyen (Tableau IV-6, Tableau IV-7). En revanche, l'existence de réservoirs aura un effet régulateur en atténuant les forts débits au profit des débits d'étiage comme l'a montré le travail d'Agosta (2007) (Figure IV-43).

Cours d'eau	Date de départ de la chronique	Volume écoulé en millions de m3	Volume de régulation millions de m3	Débits moyen en m3/s	%
Ariège à Foix	1/01/1906	1257	285	39.8	22
Ariège à Mérens	1/01/1969	151	22	4.8	14
Ariège à l'Hospitalet	1/04/1920	66	23	2	34
Artigue à Auzat	1/04/1961	40	14	1.3	36
Aston à Riète	1/01/1948	67	23	2.1	34
Salat à Roquefort	1/01/1913	1339	303	42.5	22
Salat à St Lizier	1/01/1974	1114	249	35.4	22
Salat à Kercabanac	1/01/1934	509	114	16.1	22
Lez à Engomer	1/01/1970	345	80	10.9	23
Lez à Bordes	1/01/1971	224	47	7.1	21
L'Arac à Soulan	1/01/1962	188	48	5.9	25

**Tableau IV-6 Comparaison entre volume écoulé et volume de régulation**

	Laparan	Soulcem	Naguilhes	Izourt	Gnioure	Système L'Hospitalet	Total
mise en service	1985	1984	1961	1940	1950	1962	
surface BV (km2)	34.8	44.3	11.8	14.9	18	14.9	138.7
surface BV / surface BV Foix	2.60%	3.30%	0.90%	1.10%	1.30%	1.10%	<b>10.20%</b>
volume retenue (Mm3)	15.7	29.3	43	7.9	28.4	70.7	195
volume retenue / volume Foix (moyenné par année)	1.30%	2.50%	3.60%	0.70%	2.40%	6%	<b>16.40%</b>
volume d'eau turbiné (Mm3/an)	94.8	57.2	46.2	20.6	41.1	55.7	315.7
volume eau apport naturel reconstitué (Mm3/an)	111.1	58.8	48.9	21.5	42.4	65.1	347.9
volume turbiné / volume Foix (moyenné par année)	9.40%	5%	4.10%	1.80%	3.60%	5.50%	<b>26.60%</b>

**Tableau IV-7 Part des volumes retenus par rapport aux volumes écoulés à Foix (d'après Agosta, 2007)**

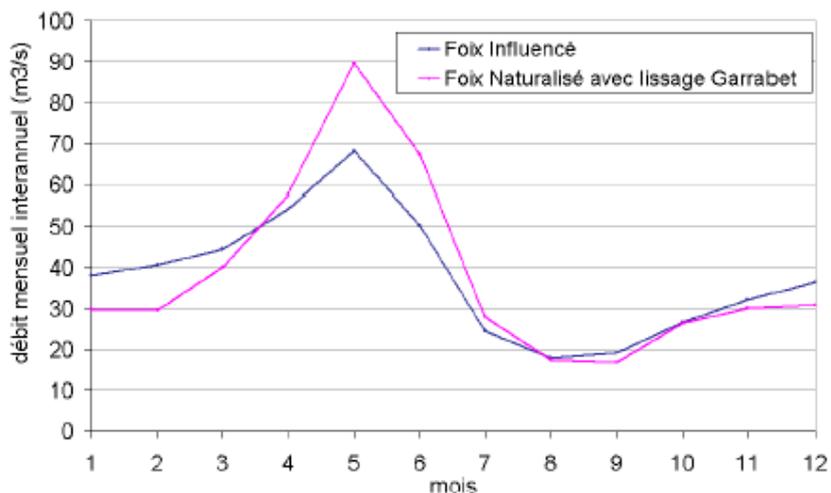


Figure IV-43 Débit à Foix naturalisé (Agosta, 2007)

#### 2.b) Identification du degré de perturbation par analyse du signal

La variable R (correspondant au volume de régulation), une fois rendue adimensionnelle par réduction (on la divise par son écart-type), et désigné R/S, est une variable statistique dont l'évolution en cumulée au cours du temps a été utilisée par plusieurs auteurs pour caractériser les cours d'eau et leur nature non stationnaire identifié par le coefficient de Hurst (méthode appelée « Rescaled Range Analysis » ou R/S).

Les cours peu ou pas aménagés qui présentent encore des caractéristiques de fonctionnement naturel forts ont une valeur du coefficient de Hurst comprise entre 0.6 et 0.7 (Figure IV-44). Ici tous les cours d'eau présentent un coefficient de Hurst compris dans cette fourchette excepté celui de l'Artigue et de l'Aston. Il faut revenir, aux caractéristiques des données des ces deux stations pour comprendre que ces données sont à prendre avec beaucoup de précautions. Ces données ont été fournies par EDF et sont issues de modèle prédictif et de station limnigraphique positionnée dans la zone d'influence de barrage, notamment pour l'Aston. Celles-ci ne sont donc pas à considérer au même titre que les autres stations de mesures gérées par la DIREN. Les autres stations présentent donc des caractéristiques hydrologiques encore proches d'un fonctionnement naturel et aucune perturbation majeure ne peut être décelée à ce niveau.

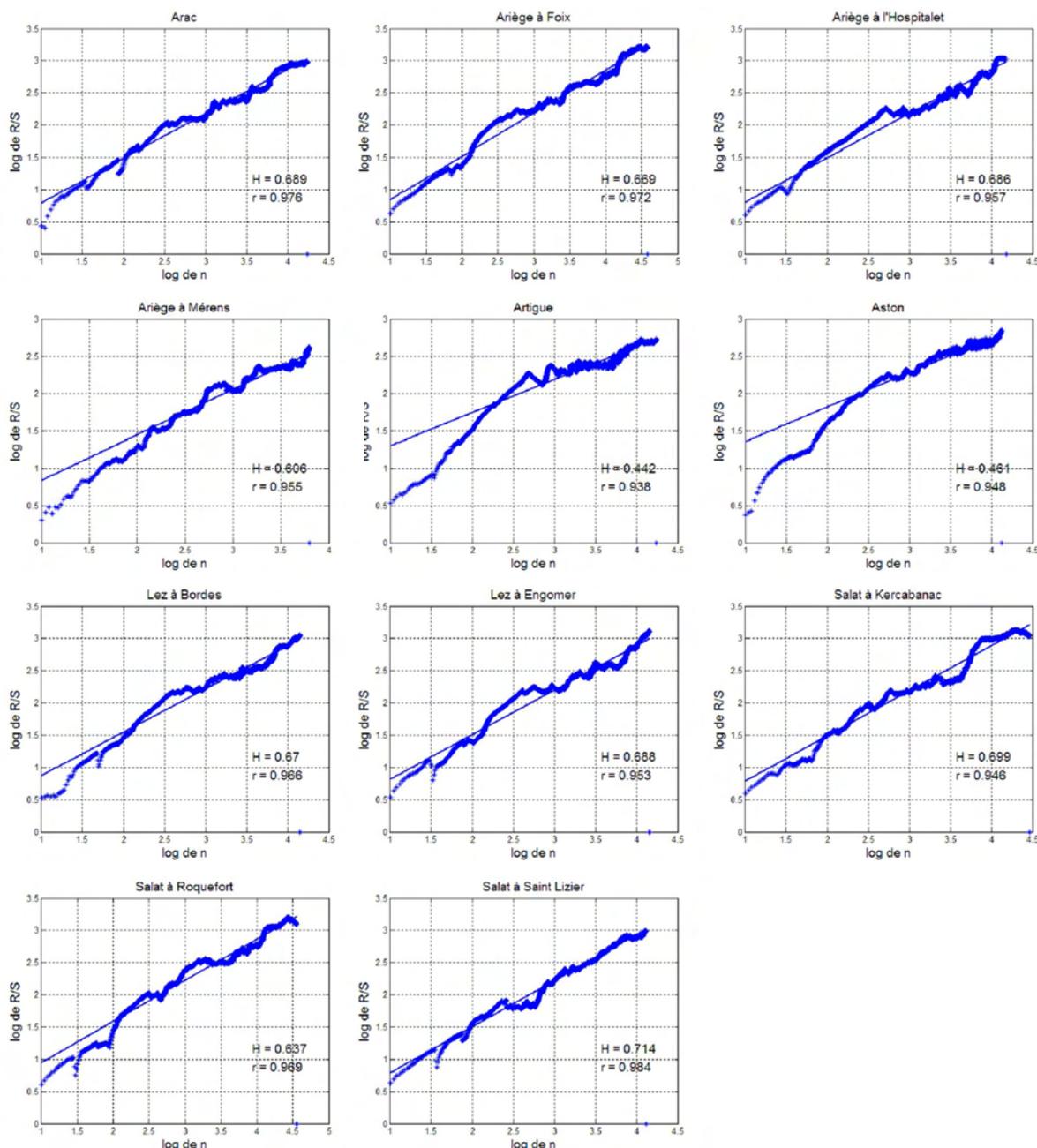


Figure IV-44 Analyse R/S des débits journaliers (H=coefficient de Hurst ; compris entre 0.6 et 0.7 pour des cours d'eau non ou peu perturbés)

L'analyse spectrale (Figure IV-45) permet de compléter cette approche afin de déceler des changements éventuels dans la répartition naturelle des débits. La représentation bi-logarithmique du spectre des débits journaliers permet d'observer la puissance du signal selon les différents niveaux d'échelles (fréquence). Là encore, pour des cours d'eau non-perturbés, la pente du spectre doit approcher  $-1.5$ . C'est le cas de la plupart des cours d'eau, notamment l'Arac reconnu pour sa grande préservation face aux ouvrages hydroélectriques. Cependant, c'est le cas également de l'Ariège à la station de Foix qui n'est pas un exemple de rivière non-aménagée. Ceci s'explique par l'aspect intégrateur de cette station qui concentre un grand nombre d'aménagements en amont. Il est notable d'observer également concernant l'aspect intégrateur des cours d'eau, la différence

entre le Lez à Bordes, qui présente un ajustement à  $-2.3$ , signifiant des conditions de débit s'approchant d'un bruit déterministe, c'est-à-dire fortement contrôlé par des activités hydroélectriques, et le Lez à Engomer, qui présentent un ajustement à  $-1.9$ , s'éloignant ainsi des conditions déterministes pour se rapprocher de conditions naturelles. Ceci illustre l'amortissement rapide des perturbations engendrées dans ce cas là.

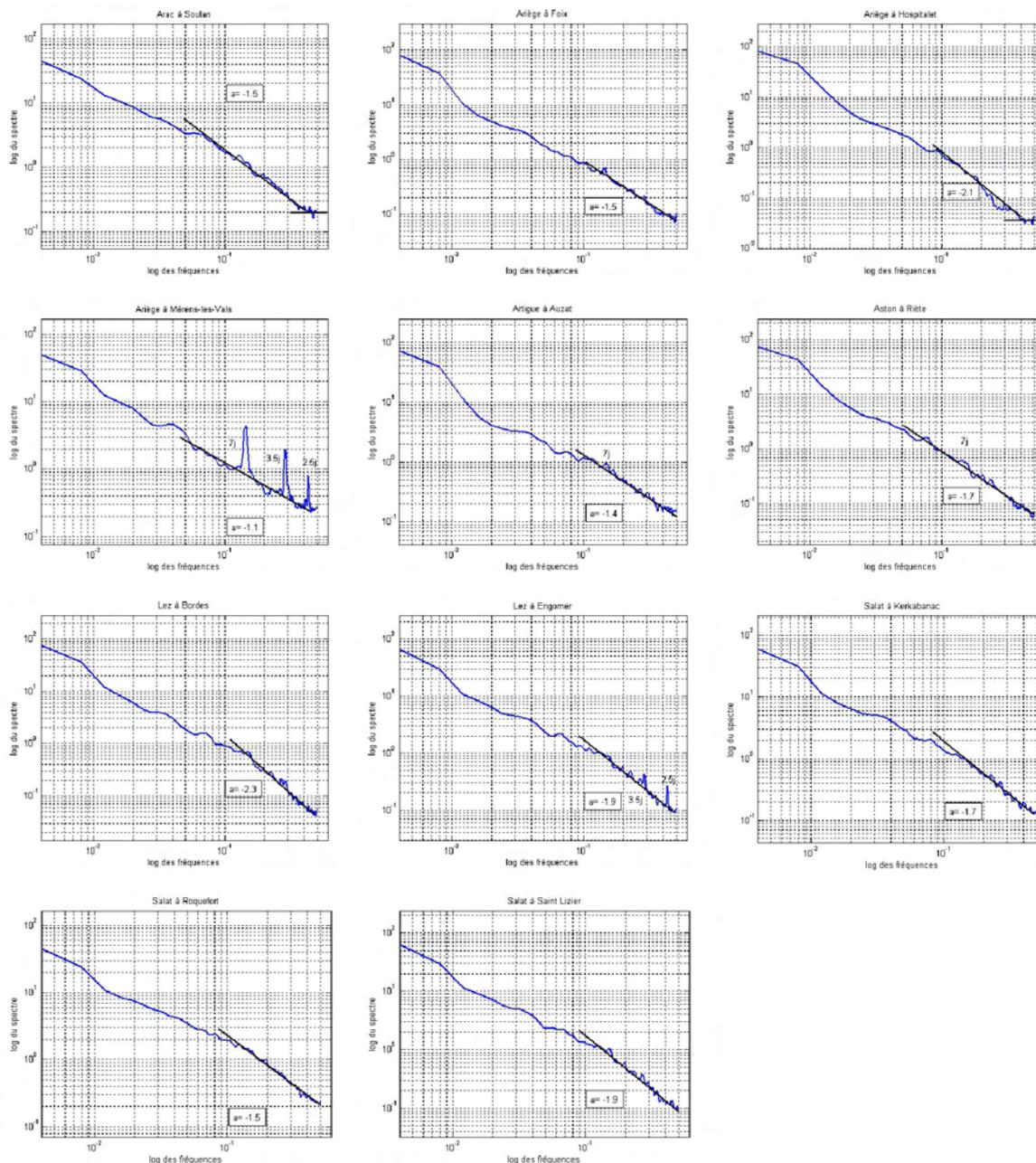


Figure IV-45 Représentation bi-logarithmique de l'analyse spectrale des débits journaliers

Sur le spectre de la station de Mérens, on aperçoit l'existence de hautes-fréquences exprimant une part importante de l'information contenu dans les débits. Ces fréquences sont caractéristiques de l'impact anthropique, ici les ouvrages hydroélectriques. Ces fréquences sont celles que l'on retrouve dans l'alimentation en électricité et témoignent de l'activité de la centrale hydroélectrique de Mérens. En effet, cette centrale turbine et récupère les eaux de l'Ariège pour

les envoyer sur la centrale d'Aston. De sorte que tout le cours d'eau de l'Ariège depuis la centrale de Mérens jusqu'à la confluence avec l'Aston se trouve en débit réservé avec de plus les apports de l'Oriège fortement contrôlée elle aussi par les activités hydroélectriques. Cette partie de la zone d'étude est la plus impactée par les activités hydroélectriques. Cependant, plus en aval, sur la station de Foix, cette perturbation ne semble plus apparaître. Nous allons donc employer une autre technique d'analyse du signal afin d'étudier le degré de complexité des phénomènes étudiés et l'hétérogénéité des chroniques de débit : c'est l'approche multifractale.

### 2.c) Evaluation du degré de complexité et d'hétérogénéité par l'analyse multifractale

Le terme de multifractalité peut être illustré par l'idée selon laquelle différents phénomènes agiraient sur le système à différentes échelles. L'approche multifractale permet de calculer deux coefficients  $c_1$  et  $\alpha$  qui renseignent respectivement sur le degré de complexité des phénomènes agissant sur le système et sur l'hétérogénéité ou l'erraticité des séries chronologiques traitées.

Cette méthode est basée sur l'étude des différents moments des séries de données. Les valeurs de  $c_1$  et de  $\alpha$  sont d'autant plus élevées que les phénomènes existant sont complexes, les séries hétérogènes et le système imprédictible.

Un premier graphique (Figure IV-46) met en relation les moments de la chronique étudiée et le temps. Chaque moment est en fait un « descripteur » de la forme de la série de données : par exemple, le moment d'ordre 1 est la moyenne, le moment d'ordre 2 est la variance ... Ce graphique permet de visualiser à partir de quel instant (marqué par la rupture de pente) la fractalité n'intervient plus.

Un second graphique (Figure IV-46) met en relation  $q$  et  $K(q)$ , fonction dépendante du moment  $q$ , de  $\alpha$  et de  $c_1$ . Les valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $c_1$  sont approchées à l'aide de courbes théoriques (abaques).

Le Tableau IV-8 résume les valeurs trouvées pour  $C_1$  et  $\alpha$  et montrent que les stations enregistrant les plus forts impacts d'ouvrages hydroélectriques (Ariège à Mérens et à Foix, Lez à Bordes) présentent i) un coefficient  $C_1$  faible traduisant les effets de la régulation du cours et donc la diminution de la complexité du fonctionnement et ii) un coefficient  $\alpha$  fort traduisant l'augmentation de l'hétérogénéité des chroniques. Il est à noter que la station d'Engomer sur le Lez située à une dizaine de kilomètre de celles de Bordes et après le barrage de Castillon présente des coefficients analogues à ceux des cours d'eau non-impactés. Ceci illustre encore l'amortissement rapide des perturbations engendrées dans ce cas là.

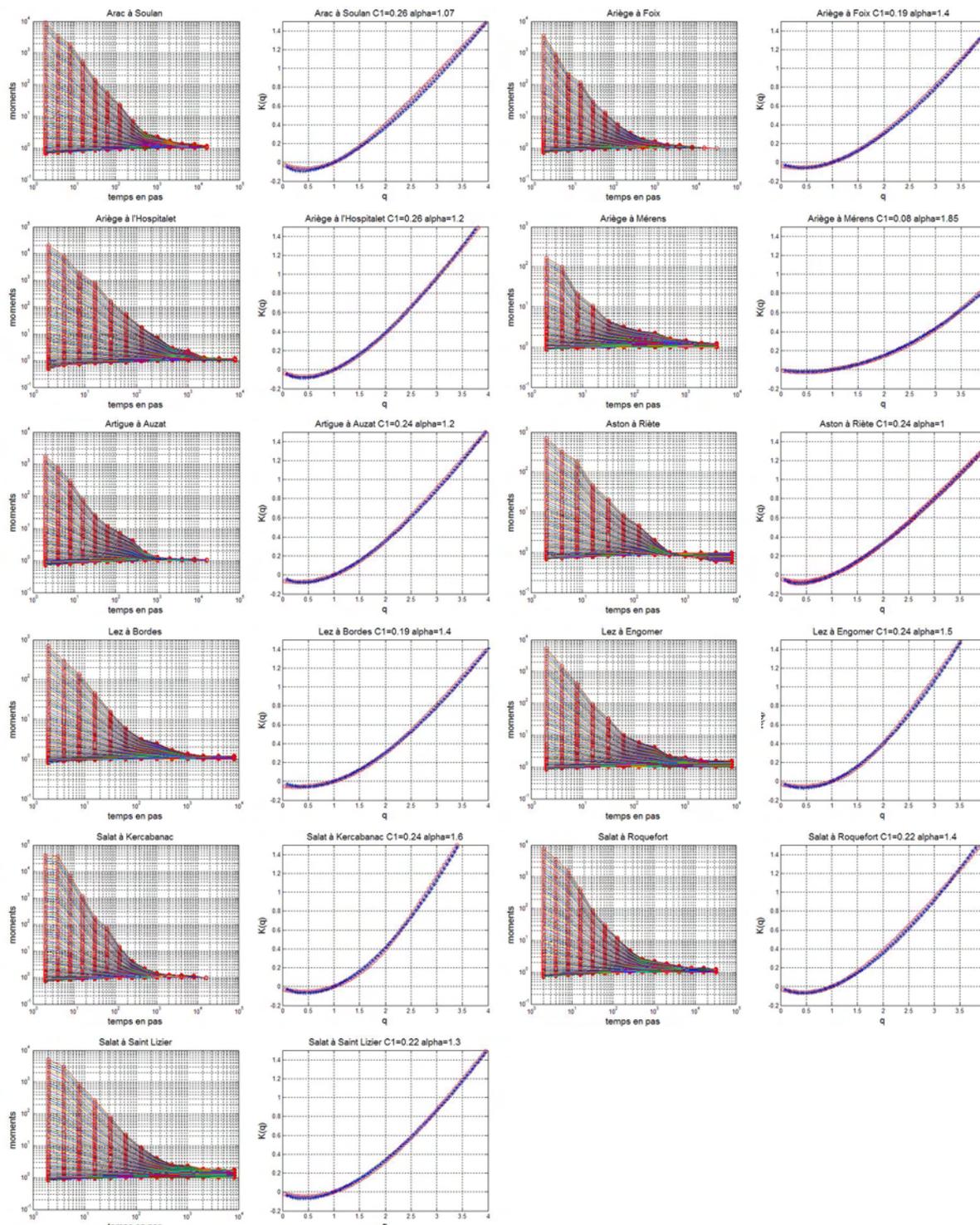
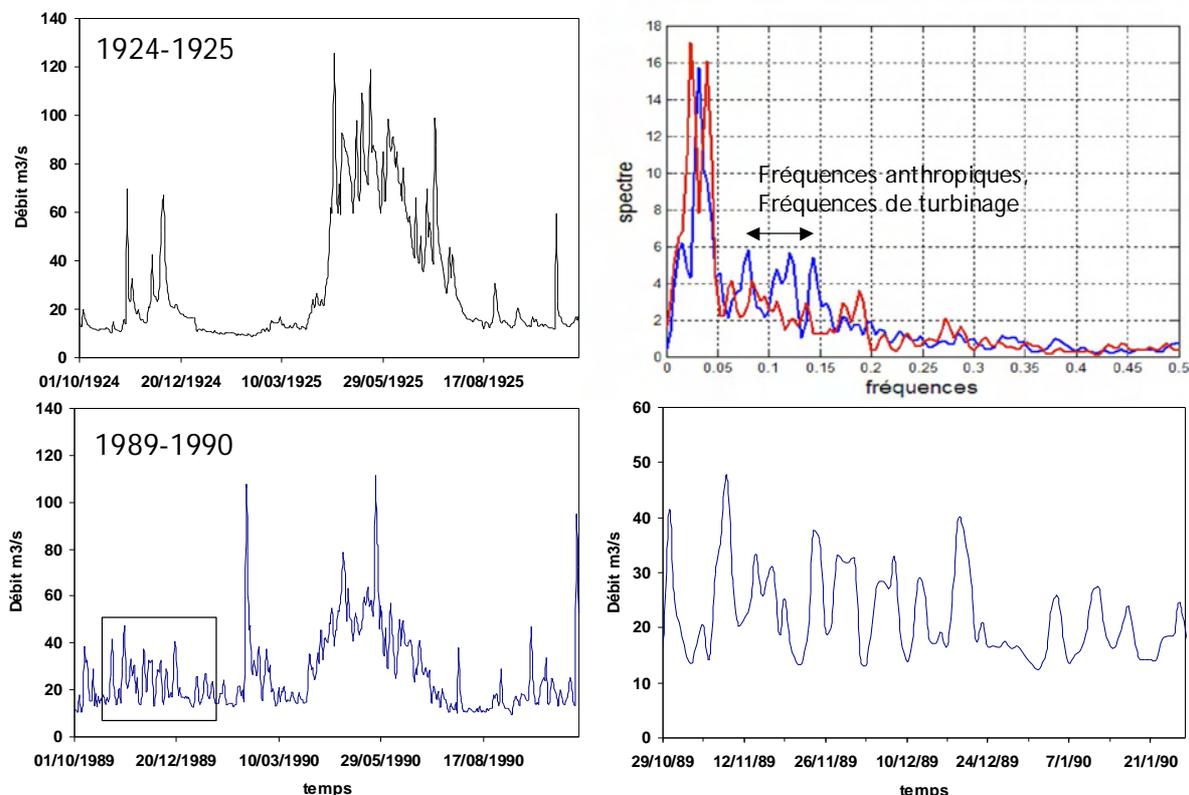


Figure IV-46 Analyse multifractale et ajustement des débits journaliers

Cours d'eau	début de la chronique	Durée de la chronique en années	C1	Alpha
Ariège à Foix	1/01/1906	103	0.19	1.4
Ariège à Mérens	1/01/1969	17	0.08	1.85
Ariège à l'Hospitalet	1/04/1920	40	0.26	1.2
Artigue à Auzat	1/04/1961	47	0.24	1.2
Aston à Riète	1/01/1948	35	0.24	1
Salat à Roquefort	1/01/1913	96	0.22	1.4
Salat à St Lizier	1/01/1974	35	0.22	1.3
Salat à Kercabanac	1/01/1934	78	0.24	1.6
Lez à Engomer	1/01/1970	39	0.24	1.5
Lez à Bordes	1/01/1971	38	0.19	1.4
Arac à Soulan	1/01/1962	46	0.26	1.07

**Tableau IV-8 Synthèse des résultats de l'analyse multifractale**

Pour observer ces modifications, nous avons comparé des hydrogrammes d'années pluvieuses similaires situées avant et après la période des aménagements. La comparaison des spectres montre l'apparition de fréquences anthropiques liées au turbinage et au schéma hebdomadaire de consommation de l'électricité (Figure IV-47). Cette perturbation est d'autant plus visible sur les faibles débits.



**Figure IV-47 Comparaison des hydrogrammes de débit journalier à Foix avant et après les aménagements et spectres associés (apparition de fréquences anthropiques dues au turbinage sur le spectre bleu par rapport au spectre rouge obtenu sur les données de 1924-1925)**

En effet, l'impact des lâchers, vidanges et autres transparences effectués par les barrages n'ont qu'un effet limité en terme quantitatif par rapport au débit naturel des cours d'eau. Les volumes lâchés ne représentent pas plus de 10% du débit moyen et sont compris dans la variabilité hydrologique naturelle de sorte que ces lâchers et vidanges n'engendrent pas de phénomènes extrêmes en termes de débit maximum. De plus, ces lâchers n'engendrent aucune modification dans la date de survenue des crues et étiages annuels. En effet les Figure IV-48 et Figure IV-49 ne montrent aucune rupture dans la répartition temporelle des évènements extrêmes annuels.

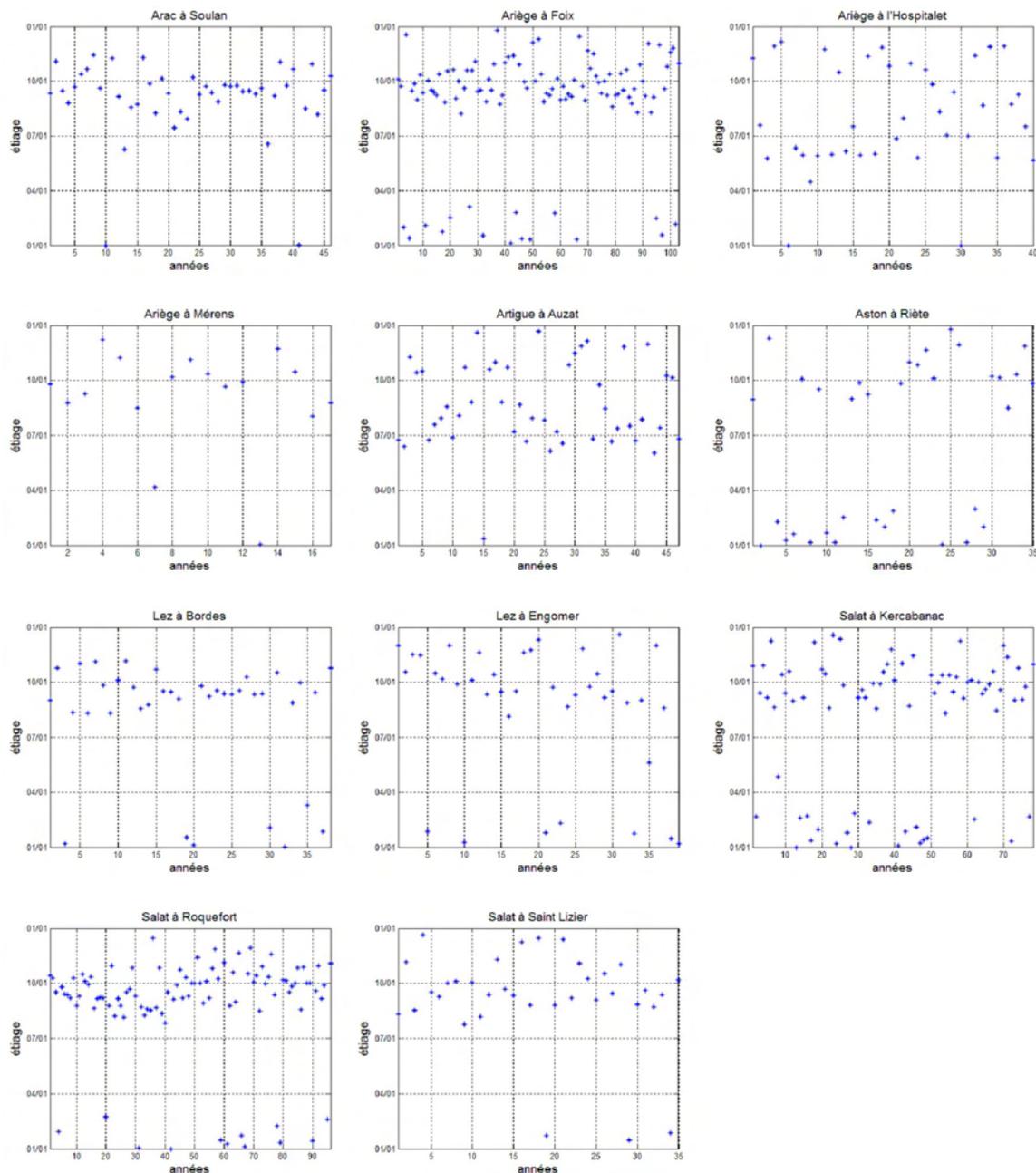
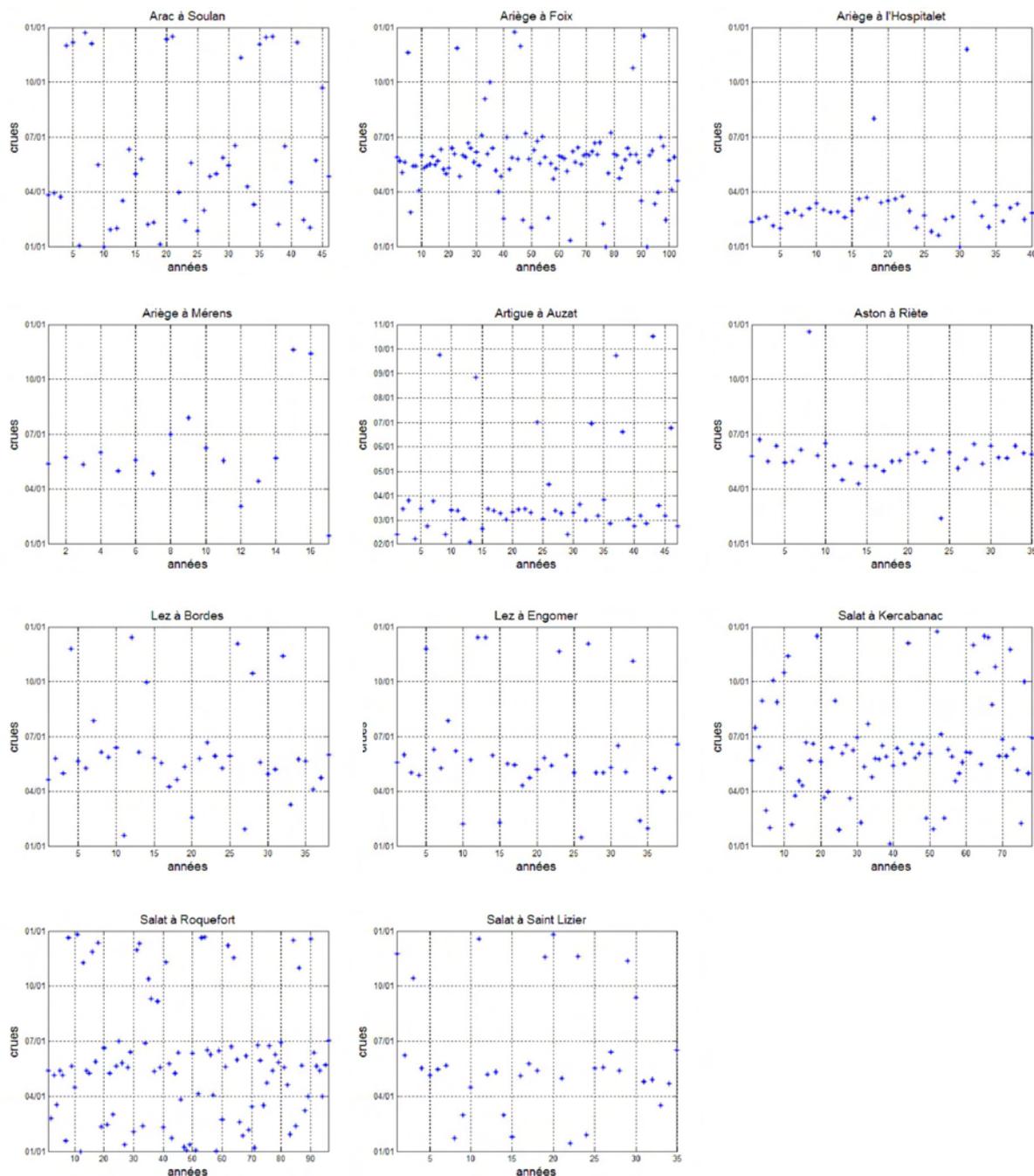


Figure IV-48 Evolution de la date de l'étiage annuel



**Figure IV-49 Evolution de la date de la crue annuelle**

Cependant, nous devons prendre en compte plus de paramètres hydrologiques que les seuls minimum et maximum annuels pour observer les modifications éventuelles engendrées par les ouvrages hydroélectriques. Pour ce faire, nous allons comparer les hydrogrammes avant et après les aménagements et associer aux éventuels changements les impacts écologiques attendus.

## 2.d) Synthèse sur la caractérisation de la variabilité hydrologique et l'identification des perturbations

A défaut de données quantitatives sur le mode de fonctionnement des barrages avec retenues, comme les éclusées journalières et saisonnières, nous avons cherché à caractériser les éventuels effets des ouvrages hydroélectriques sur le régime hydrologique des cours d'eau au moyen d'analyses statistiques permettant d'explorer la variabilité temporelle et la non-stationnarité des chroniques de débits. Au préalable, l'étude des perturbations enregistrées par les cours d'eau doit toujours passer par l'étude de la modification de la variabilité climatique de façon à ne pas les confondre avec les effets liés à la construction d'ouvrages hydroélectriques.

Les bassins enregistrent parfaitement les variations climatiques basse-fréquence montrant un fort contrôle de la variabilité climatique sur les débits des petits bassins. Il est possible de distinguer deux familles fonctionnelles. D'une part, les stations situées en piémont (Soulan, Foix, Kercabanac, Saint Lizier, Bordes et Engomer) pour lesquelles, la réponse rapide est plus forte et d'autre part, les stations d'altitude (Mérens, Hospitalet, Auzat et Riète) pour lesquelles, la réponse rapide est plus faible et l'apparition d'une bande spectrale à 6 mois (composante nivale) à cause de l'importance du stockage par le manteau neigeux.

Les signaux de l'ensemble des séries de débit présentent dans une structure spectrale similaire. Nous retrouvons les bandes correspondant au cycle hydrologique (6 mois et 1 an), et deux bandes interannuelles: 2-3 ans et 5-7 ans. Les bandes interannuelles sont également présentes dans les précipitations et correspondent à des oscillations climatiques connues pour être présentes dans l'indice climatique NAO. La relation pluie-débit et les analyses en ondelettes ont permis d'identifier les liens existant entre fluctuations climatiques et variabilité hydrologique : les fortes diminutions de débit des années 40, puis dans une moindre mesure entre 1980 et 2000, correspondent à des phases de NAO positive traduisant une diminution des régimes de précipitation, les fortes augmentations de débit entre 1960 et 1980 correspondent à une phase de NAO négative traduisant une augmentation des régimes de précipitation. Ainsi, les grandes fluctuations des régimes hydrologiques sont principalement contrôlées par des cyclicités climatiques, de sorte que l'impact des ouvrages se manifeste à des niveaux d'échelle moindres et a dû être décelé au moyen d'outils statistiques plus performants telle que l'analyse multifractale.

L'étude des variables statistiques illustrant la variabilité hydrologique des cours d'eau (débit minimum, moyen, maximum, période des crues et des étiages) n'a pas montré de modifications majeures de sorte qu'il est possible de dire que le régime hydrologique des cours d'eau aménagés ou non n'a pas été fortement modifié. Ceci est en parti dû au fait que les volumes de régulation sont bien supérieurs aux volumes des différents réservoirs disposés sur les cours d'eau ariégeois. En revanche, l'existence de ces réservoirs a un effet régulateur en atténuant les forts débits au profit des débits d'étiage. De plus, il est important de noter que la variabilité haute-fréquence de certaines stations (le Lez à Bordes, l'Ariège à Mérens et à Foix) a augmenté et ce vers un mode déterministe mettant en évidence un contrôle anthropique sur les débits. Ainsi ces stations montrent une diminution de la complexité de leur fonctionnement (diminution du coefficient C1) due à une régulation de leurs débits et une augmentation de l'hétérogénéité de leur variabilité

hydrologique (augmentation du coefficient  $\alpha$  traduisant l'augmentation de la part des hautes-fréquences dans les débits ; ceci générée par les éclusées.

### **3. Analyse de l'hydrogramme : paramètres hydrologiques affectés et lien avec les écosystèmes**

Pour déterminer quelles sont les caractéristiques hydrologiques principalement affectées à l'aval des barrages, les services de conservation de la nature américains ont établi une liste d'indicateurs de l'altération hydrologique affectés par la construction d'ouvrages. Cette liste est déterminée à partir d'études empiriques menées sur différents types de régimes hydrologiques et climatiques sur l'ensemble des Etats-Unis (Richter et al., 1996). Ce modèle utilise les débits journaliers et calcule 33 indices décrivant le régime hydrologique, groupés en 5 catégories : (i) amplitude, (ii) amplitude et durée des conditions extrêmes annuelles, (iii) périodicité de ces conditions extrêmes annuelles, (iv) fréquence et durée des pulsations fortes et faibles, (v) taux et fréquences des variations de débits. Tous ces indices ont été définis pour prendre en compte la plupart des perturbations hydrologiques correspondant à des impacts écologiques. L'office fédéral suisse de l'environnement, des forêts et des paysages (OFEFP) a commandé des études équivalentes et mis en place un système d'évaluation similaire pour les cours d'eau suisses avec le module HYDMOD (Pfaundler M. et al. 2007).

Afin de réaliser un diagnostic exact de l'état hydrologique des cours d'eau sur la zone d'étude, nous réalisons le calcul de ces 33 paramètres sur toutes stations, pour celles pour lesquelles nous disposons de suffisamment de recul (c'est-à-dire un enregistrement antérieur à la construction d'ouvrages hydroélectrique sur le cours d'eau) nous réalisons une analyse près et post impacts. On utilise donc les stations de l'Ariège à Foix, Salat à Roquefort et les stations de Merens et Hospitalet (caractérisant respectivement l'effet pré et post impacts des ouvrages) pour l'analyse de l'hydrogramme et des paramètres hydrologique altérés. (L'ensemble des résultats pour toutes les séries de débit sont intégrés à la grille de lecture, ici seul trois exemples sont développés).

Pour la série du Salat à Roquefort (Figure IV-50), on constate les évènements extrêmes (étiages et crues) sont les principaux paramètres affectés, à la fois quantitativement (amplitude) et qualitativement (variabilité temporelle). L'analyse des paramètres de l'hydrogramme avant et après 1940 (date de mise en place des premiers ouvrages donne les résultats suivants :

- diminution du nombre de crues importantes
- légère augmentation du nombre de petites crues
- Pas de modification de la durée des crues importantes
- Pas de modification de la durée de petites crues
- Diminution du taux d'accroissement du débit
- Pas de modification du débit moyen
- Augmentation du débit de base

Si l'on observe le graphique montrant l'altération de 33 paramètres (Figure IV-51), on constate que les paramètres les plus altérés sont les paramètres de taux, fréquence, durée.

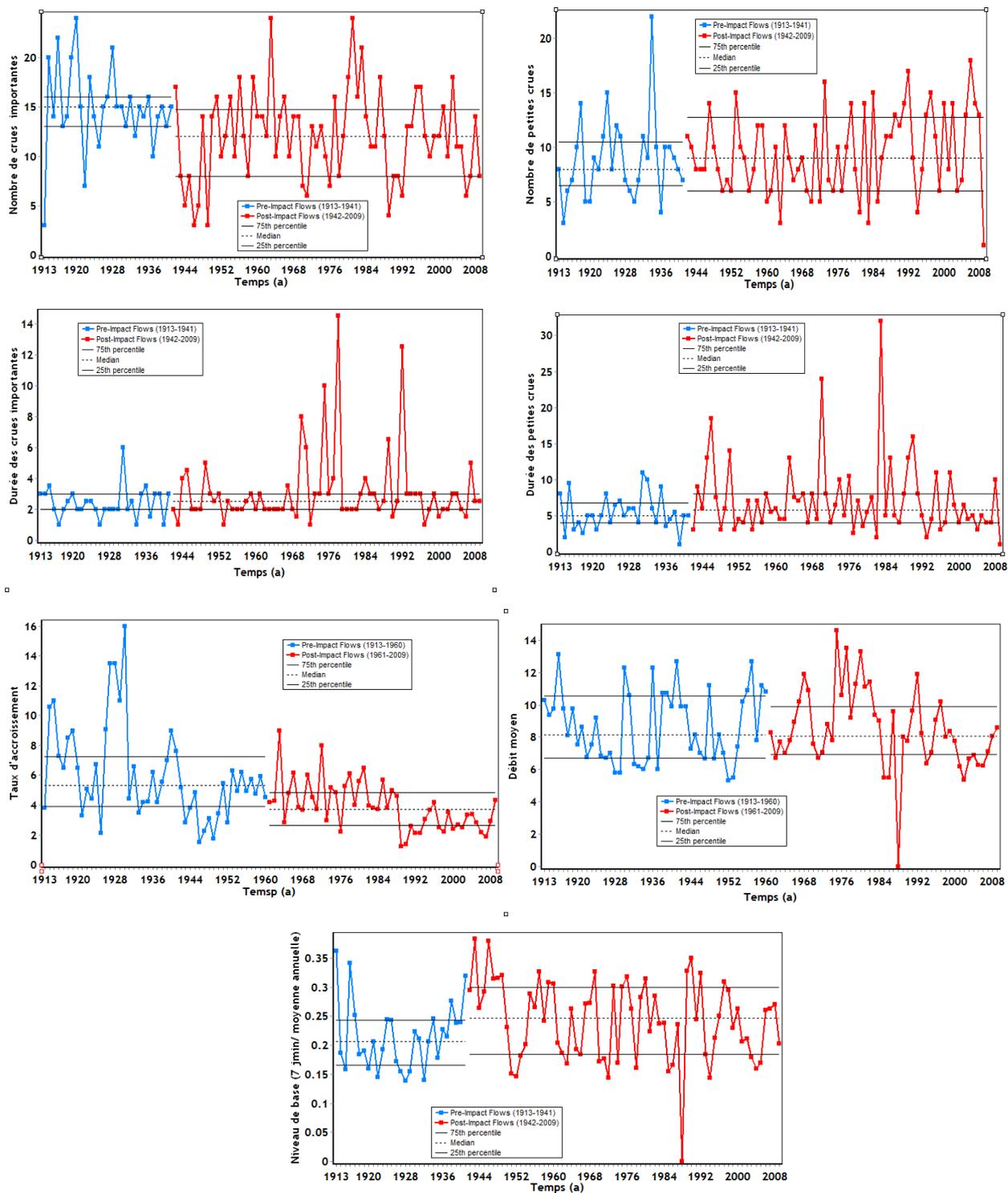


Figure IV-50 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit du Salat à Roquefort a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) débit moyen, g) débit de base (Richter et al., 1996).

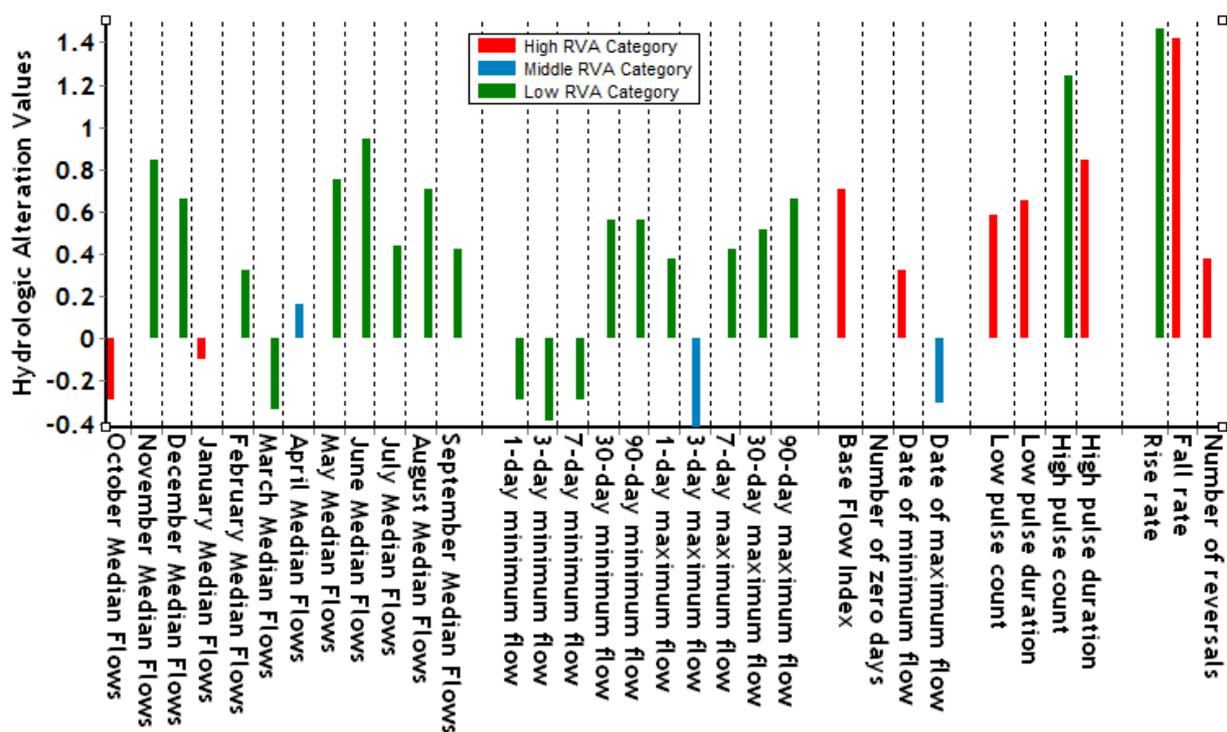


Figure IV-51 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit du Salat à Roquefort.

Dans la majorité des cas étudiés, les débits minimums de 1 à 90 jours augmentent significativement après la construction d'ouvrages hydroélectriques, alors que les débits maximums de 1 à 7 sont considérablement réduits (diminution de 50 % du débit journalier maximum annuel).

Pour le cas du Salat à Roquefort, les débits minimum et maximum ne sont pas affectés, cependant on observe une réduction de la fréquence des crues de grande amplitude après régulation, de même qu'une légère augmentation de la fréquence des petites crues (Figure IV-51). De plus on observe également la réduction du débit moyen journalier. Si les débits extrêmes sont affectés quantitativement, ils le sont aussi qualitativement particulièrement dans le cas de fonctionnement par écluses, ou les ouvrages électriques s'adaptent à une demande énergétique réglée sur différents pas de temps (Bravard et Petts, 1993). En effet, il a été observé une augmentation de la variabilité des hydrogrammes sur l'ensemble des USA, notamment significative pour les débits moyens journaliers. A l'échelle quotidienne, les besoins hydroélectriques entraînent une variabilité importante des débits diurnes et nocturnes. Par exemple, il est observé pour certains grands barrages des variations de hauteurs d'eau d'environ 0.6 m au moment des pics de consommation (Sear, 1995). Dans certains cas l'ampleur de ces variations peut être atténuée par des ouvrages de compensation comme sur le Haut Rhône, en aval du barrage de Génissiat, qui commande le fonctionnement d'une chaîne d'écluses (Bravard et Petts, 1993).

Nous avons réalisé le même travail sur les séries de l'Ariège à Foix et à Hospitalet. Dans le cas de l'Ariège à Foix (Figure IV-52), on constate une augmentation du nombre et de la fréquence des grandes crues ainsi que du nombre de petites crues. En revanche, la durée des petites crues est en baisse ainsi que le taux d'accroissement des débits.

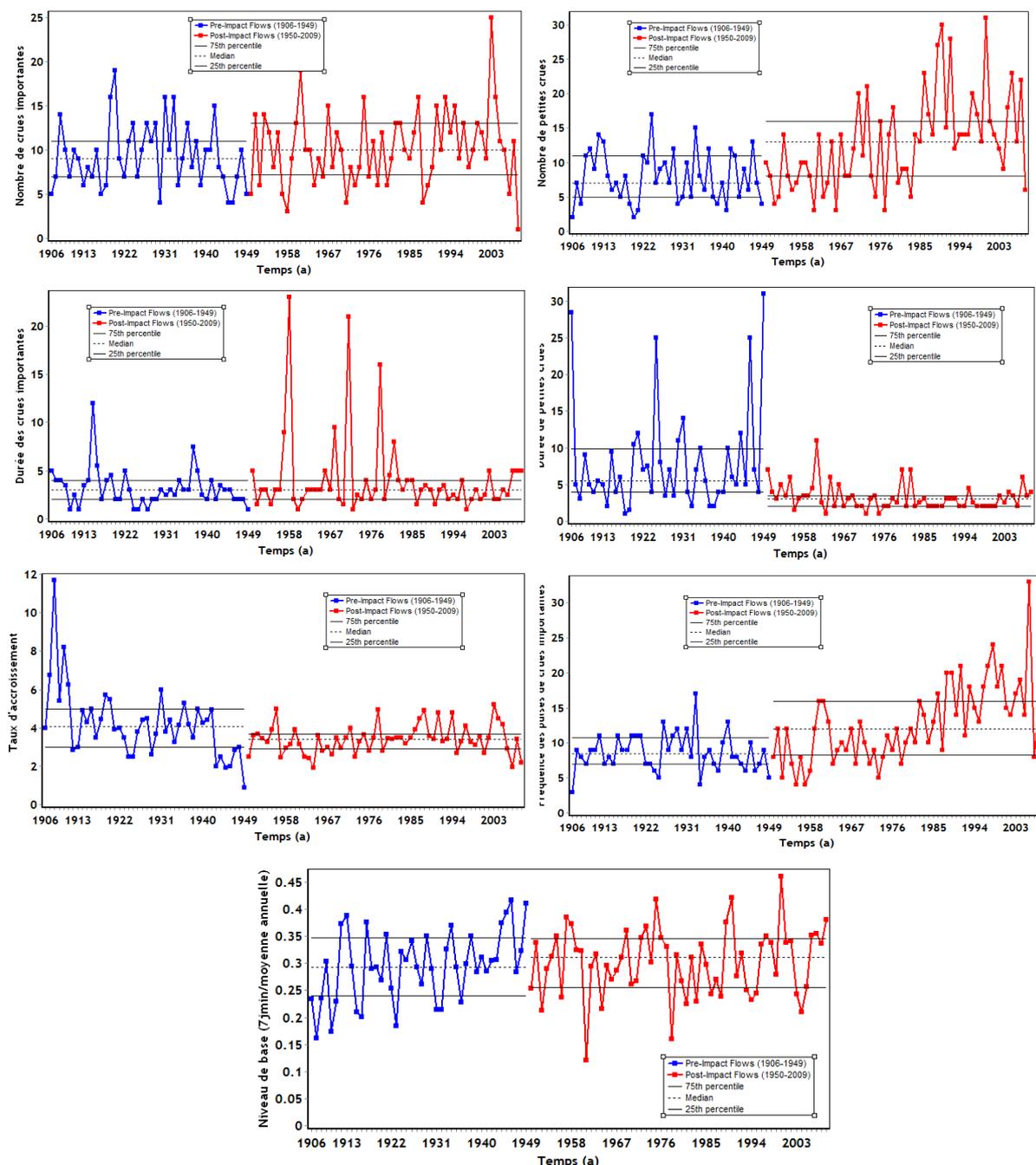


Figure IV-52 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit de l'Ariège à Foix a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) Fréquences des crues importantes, g) Niveau de base.

Lorsqu'on généralise le calcul des 33 paramètres, on observe que les paramètres les plus altérés sont tous d'abord les paramètres en lien avec la durée et la fréquence des pulsations de crues ainsi que le paramètre d'amplitude des crues (caractérisé par les moyennes mensuelles) (Figure IV-53). Or dans le cas du Salat à Roquefort, il est apparu que les paramètres les plus altérés sont les paramètres de durée et de fréquence des crues mais également les paramètres relatif à la périodicité des crues. Or ces paramètres de périodicité ne sont pas altérés dans le cas de l'Ariège à Foix. Or, la station de Foix est très globalisante puisqu'elle correspond à une aire drainée très importante et est donc intégratrice des fluctuations hydrologiques naturelles ou anthropiques existantes sur le bassin. Afin de comparer ces résultats avec une station correspond à un plus petit bassin versant, nous choisissons de réaliser le même travail sur la station de l'Ariège à Merens et Hospitalet. La série de d'Hospitalet représentant la partie pré-impact et la série de Merens la série post-impact.

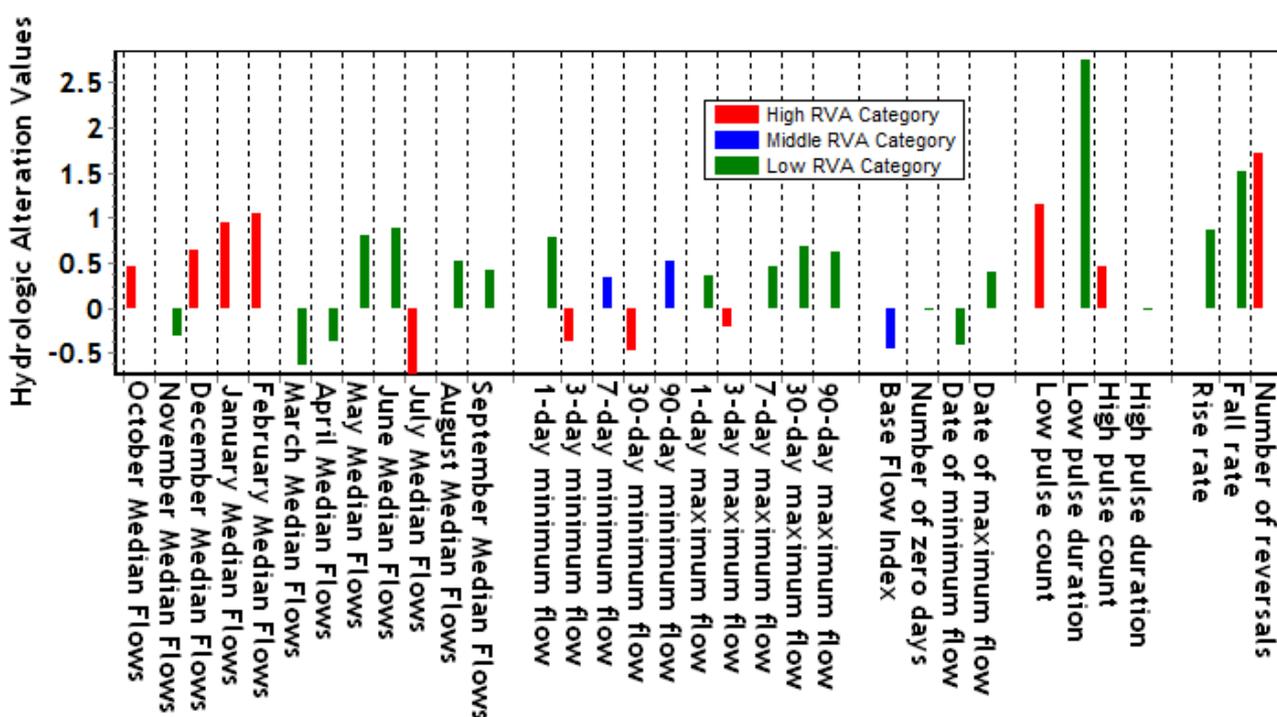


Figure IV-53 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit de l'Ariège à Foix.

Dans le cas de l'Ariège à Merens et Hospitalet, on constate que la durée des crues est en diminution, ainsi que le nombre de petites crues. Le nombre de crues importantes et le taux d'accroissement des débits sont quant à eux en augmentation (Figure IV-54). En ce qui concerne les fréquences de crues et le niveau de base, on constate qu'ils restent stables. En représentant le bilan d'altération de tous les paramètres, on constate que de nombreux paramètres sont très fortement altérés (Figure IV-55). On peut attribuer cette forte altération des paramètres de l'hydrogramme à la mise en place d'un grand barrage sur ce bassin. Tous les indicateurs ne varient pas de la même façon traduisant une modification remarquable de la variabilité hydrologique en

lien avec l'installation d'une centrale hydroélectrique et deux prises d'eau en aval de la station d'Hospitalet.

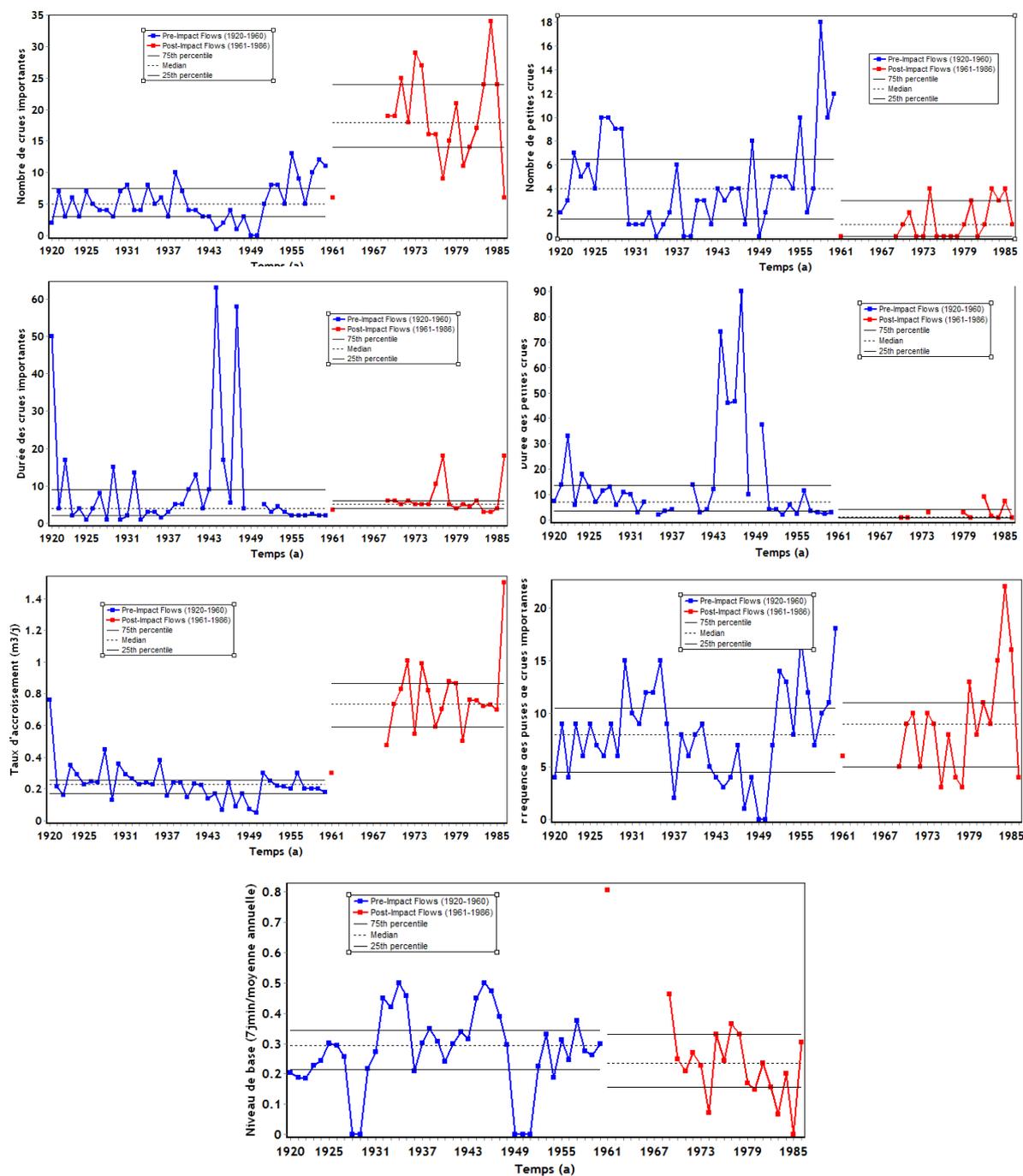


Figure IV-54 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit de l'Ariège à Merens-Hospitalet a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) Fréquences des crues importantes, g) Niveau de base.

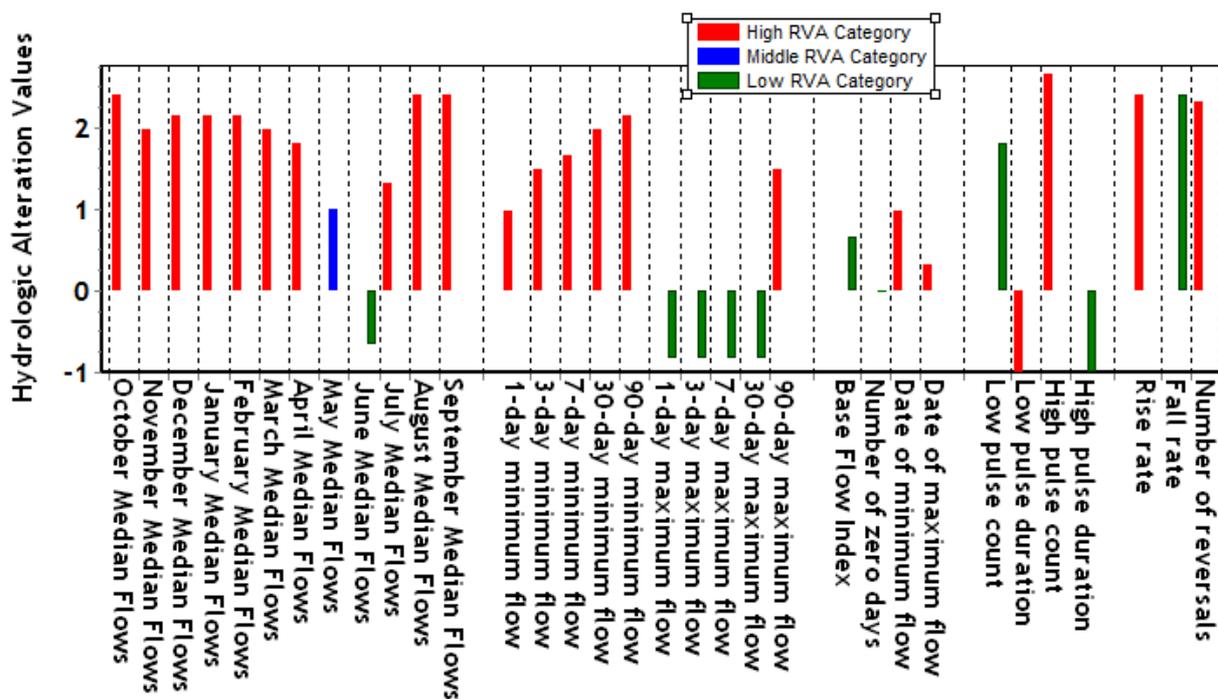


Figure IV-55 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit de l'Ariège Merens et Hospitalet.

Pour faire le lien avec l'écosystème associé au bassin versant, Richter et al., (1996) ont donc associé un certain nombre de modifications environnementales à l'évolution ou l'altération des paramètres hydrologiques extraits précédemment par des études réalisées sur différents bassins et dans différents contextes (Figure IV-56). On peut donc en fonction des caractéristiques modifiées de l'hydrogramme, estimer les impacts de la construction d'un ouvrage. Par exemple, la construction d'un ouvrage modifiant considérablement les maxima et minima de débit pourront avoir de forts effets sur la circulation des poissons et par exemple lors des migrations. Il conviendra donc de fortement contraindre la construction d'ouvrages sur les axes migrateurs amphihalins par rapport à ces variables.

Paramètres hydrologiques altérés		Influences sur l'écosystème
Amplitude	Moyenne mensuelle (pour chaque mois)	Renseigne sur: Disponibilité de l'habitat pour les organismes aquatiques; Disponibilité de l'humidité du sol pour les plantes; Disponibilité de l'eau: approvisionnement en eau pour les animaux; Modifications de la température de l'eau et des teneurs en oxygène dissous;
Amplitude et durée des conditions extrêmes annuelles	-1 jour minimum annuel, 3 jours minimum annuel, 7 jours minimum annuel, 30 jours minimum annuel, 90 jours minimum annuel -1 jour maximum annuel, 3 jours maximum annuel, 7 jours maximum annuel, 30 jours maximum annuel, 90 jours maximum annuel -nombre de jours ou Q=0 -moyenne des 7 jours de plus bas débit	-Balance entre les espèces compétitives et tolérantes au stress ; -Création de nouveaux sites pour le développement des plantes; -Structure et morphologie des chenaux vont être modifiés et vont conditionner le développement de la faune et flore; -Humidité des sols est un stress supplémentaire pour la végétation riveraine; ->la forte altération de ces paramètres caractérise une longue période de stress pour les espèces présentes.
Périodicité	Maximum annuel Minimum annuel	-indices caractérisant une forte modification de la migration des poissons;
Fréquence et durée des pulsations fortes et faibles	Nombre et durée des petites crues Nombre et durée des crues exceptionnelles	Fréquence et amplitude du stress hydrique modifiées et modification du transport sédimentaire-> modification de l'écosystème, avec réduction de la surface mouillée, les paramètres " hauteur vitesse " qui conditionnent l'habitat et le fonctionnement des frayères;
Taux et fréquences des variations de débit	Moyenne de toutes les différences positives pour plusieurs jours consécutifs Moyenne de toutes les différences négatives pour plusieurs jours consécutifs Nombre d'inversion	Difficultés de maintien de la ripisylve, des abris de berge, le transport solide, la circulation des poissons...

Figure IV-56 Récapitulatif des 33 paramètres extraits de l'hydrogramme et les influences visibles de leurs modifications sur l'écosystème (Richter et al., 1996) .

Nous disposons également pour quelques stations des variations des hauteurs d'eau. Notamment nous disposons des variations de hauteur pour le Salat à Roquefort sur une période allant de 1988 à 2008 (Figure IV-57).

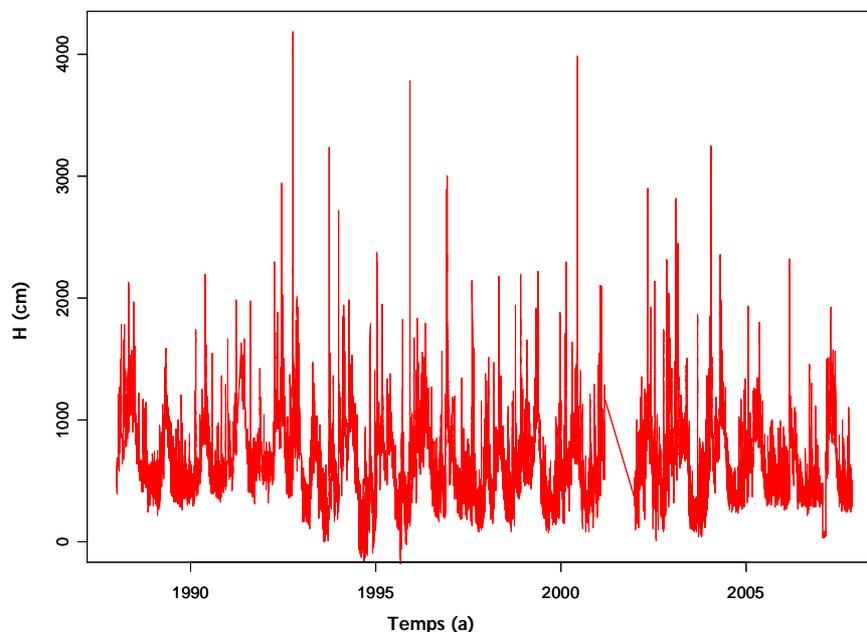


Figure IV-57 Variation des hauteurs d'eau Sur le Salat à Roquefort.

Lorsqu'on analyse les statistiques de cette chronique de façon à quantifier l'amplitude des variations des hauteurs d'eau, on constate que la hauteur minimale annuelle est de 210 cm (ce qui est très peu et tend à diminuer, d'autre part, la hauteur maximum est de 4180 cm qui lui aussi tend à diminuer au cours des années. Soit en moyenne la hauteur d'eau au niveau de Roquefort pour le Salat est de 677 cm.

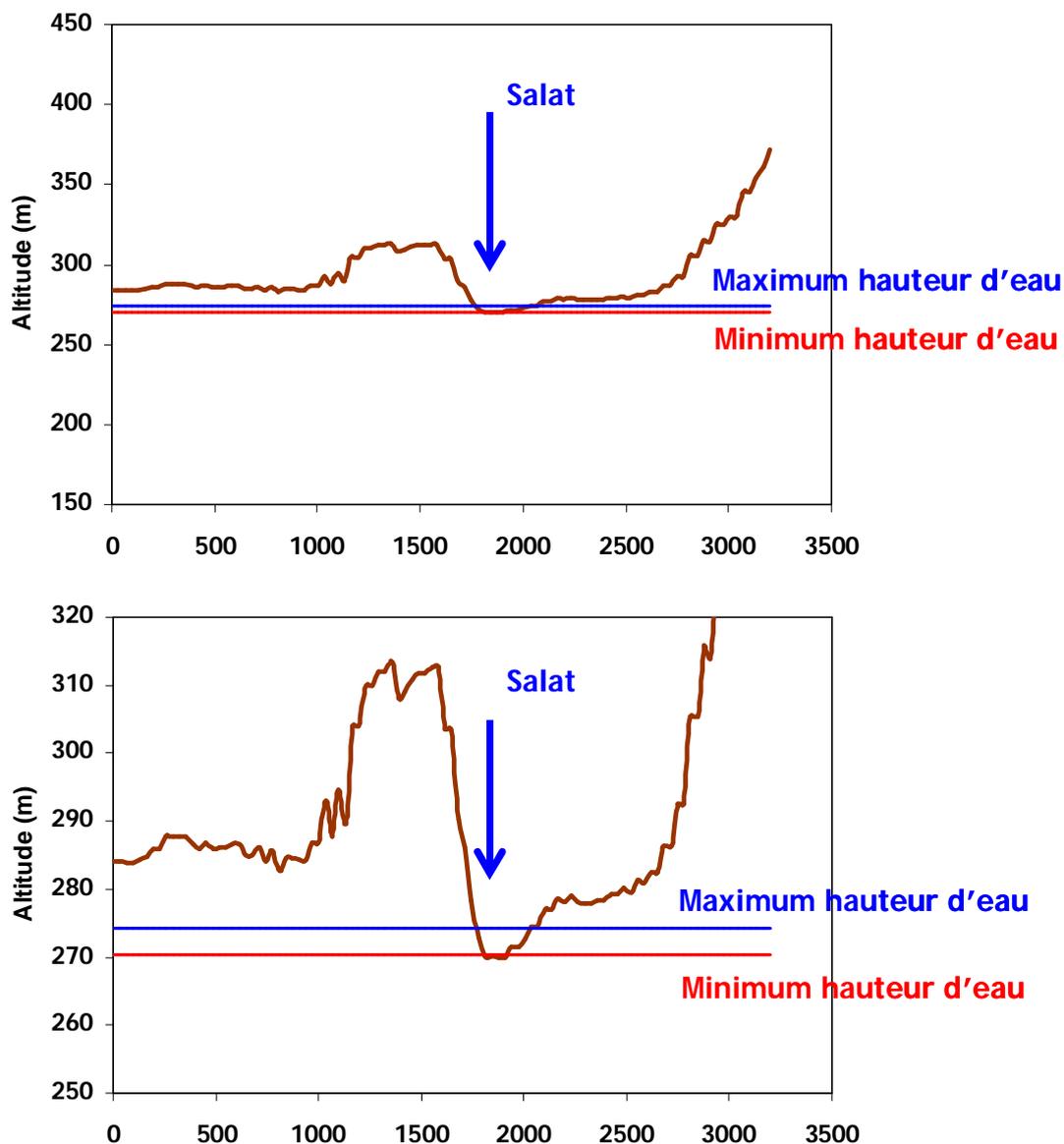
L'impact de la diminution du débit jusqu'à des valeurs de débit réservé a de forts impacts sur le biotope et porte principalement sur:

-la réduction de la surface mouillée visible ici sur la coupe transversale, en effet les paramètres " hauteur/vitesse " conditionnent l'habitat et le fonctionnement des frayères.

-le régime thermique, le maintien de la ripisylve, des abris de berge, le transport solide, la circulation des poissons...

L'altération du fonctionnement des frayères peut être consécutive à des phénomènes de colmatage du substrat, à la discontinuité du transit de transport solide mais également à des hauteurs d'eau inadaptées à la fraie et à des vitesses de courant trop faibles pour assurer un écoulement interstitiel suffisant du substrat. Cependant, il semble que la qualité de l'eau est rarement altérée par l'usage hydroélectrique excepté dans le cas de retenues modifiant les processus d'autoépuration.

En somme, les variations du niveau d'eau pour le Salat, par exemple, présentent de fortes amplitudes, or de part la morphologie locale (zone où les versants sont très incisés) (Figure IV-57), il est important de prendre en compte l'effet des modifications des hauteurs d'eau et des périodes de ces variations artificielles sur la réduction de la surface mouillée et les effets sur les berges.



**Figure IV-58 Profil transversale du Salat avec les variations d'amplitude des hauteurs d'eau.**

L'analyse des variations des hauteurs d'eau permet, si l'on prend le cas du bassin du Salat, de constater l'apparition de fluctuations contrôlées par l'homme (variations périodiques mensuelles des hauteurs d'eau) caractérisant probablement les effets des lâchures des barrages. Par contre les crues importantes et non contrôlées par l'homme restent fortement marquées et facilement identifiables (Figure IV-59). Ainsi, il semble que la modulation des variations des hauteurs d'eau en fonction de la demande en hydroélectricité est un facteur de risque de perturbation de l'état écologique. En effet, comme nous l'avons vu, la variation des hauteurs d'eau qui ne sont pas naturelles engendrent des modifications des cycles hydro-écologiques susceptibles de perturber l'écosystème.

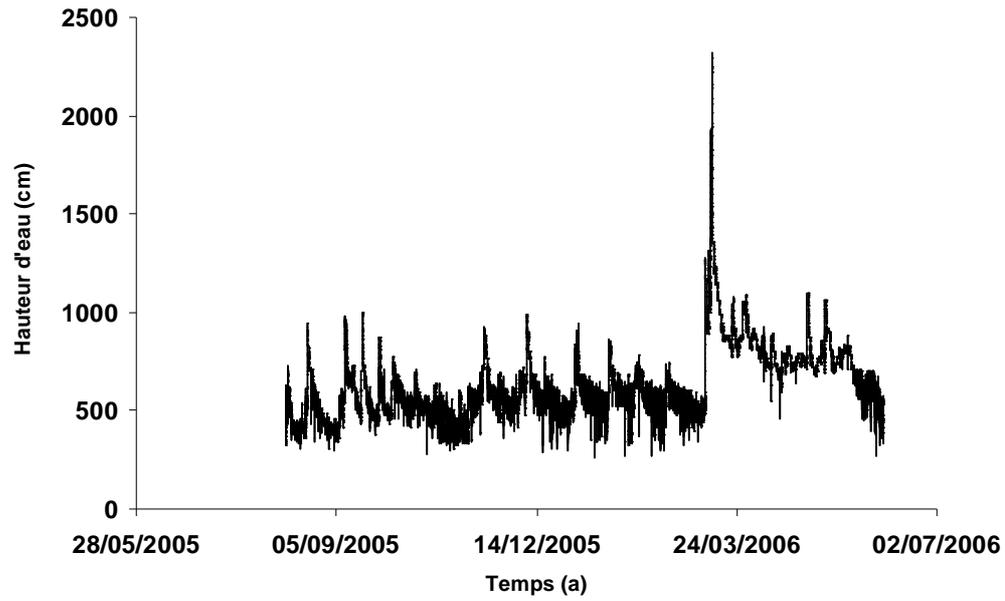


Figure IV-59 Zoom sur les variations de la hauteur d'eau du Salat à Roquefort.

## V Etat écologique des cours d'eau (Indice IBGN et IP)

Les ouvrages hydroélectriques peuvent modifier ou perturber le fonctionnement des écosystèmes associés aux cours d'eau. Une fois l'étude de la variabilité hydrologique réalisée, il est réalisé une étude de ces communautés biologiques. En effet, les méthodes biologiques de détermination de la qualité des cours d'eau, sont basées sur l'étude des êtres vivants, c'est-à-dire sur des organismes principalement aquatiques ou inféodés aux milieux aquatiques. L'étude de ces peuplements aquatiques (invertébrés, diatomées, oligochètes, poissons ...), appelés descripteurs biologiques ou bio-indicateurs, permet de déterminer des indices de qualité biologique, qui renseigneront sur la qualité globale des cours d'eau par rapport à ces peuplements aquatiques.

### V.A Indice Biologique Global Normalisé :IBGN

La mise en place d'une méthode standard basée sur les invertébrés débute en France en 1967 (Indice Biotique). Au cours du temps, cette méthode a été modifiée pour être définitivement homologuée en 1992, sous l'appellation "Indice Biologique Global Normalisé " ou IBGN, constituant la forme officialisée de l'IBG (NF T90-350). Sur près de 1500 sites de prélèvements issus du Réseau National de Bassin (RNB/RCB), 890 sites participent au programme de suivi hydrobiologique portant sur les invertébrés.

L'IBGN est l'indice biologique global normalisé (AFNOR, 1992). Cet indice évalue la capacité globale d'un cours d'eau à héberger les communautés d'invertébrés aquatiques compte tenu de la qualité de l'eau et des habitats (Figure V-1 et Figure V-2). L'IBGN est fondé sur une liste de 138 taxons dont 38 sont des bioindicateurs et il donne à l'endroit du prélèvement une note sur 20.

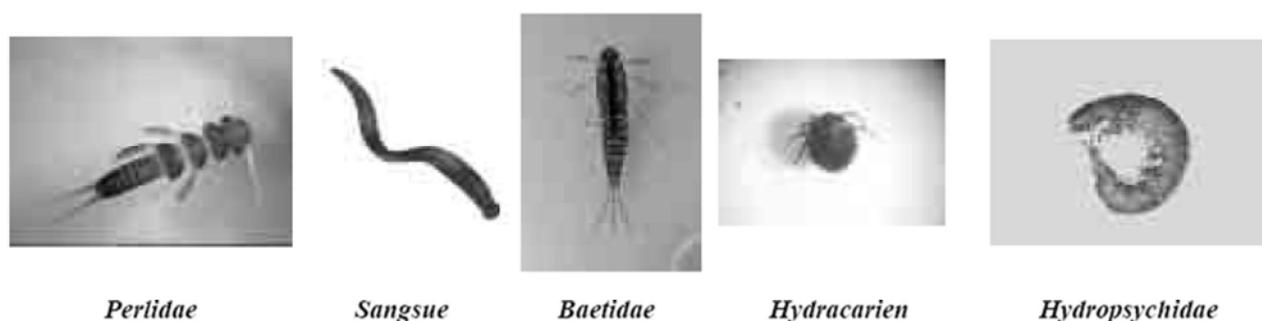


Figure V-1 Représentation de quelques macro-invertébrés benthiques (Natura, 2000)

	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
IBGN	20 à 17	16 à 13	12 à 9	8 à 5	<5

Figure V-2 Qualité hydrologique en fonction de l'IBGN.

De façon générale, à l'échelle du bassin Adour- Garonne, la qualité biologique des rivières est généralement mauvaise, mis à part quelques secteurs tels que la Charente, la Dordogne, les Pyrénées, les secteurs amont du Lot et du Tarn. Cette mauvaise qualité est due en partie à des rejets

polluants : industrie du cuir à Grauhlet, Castres, papeteries sur l'Adour (Midouze, Retjon) et le Salat, industrie textile à Lavelanet ..., et en partie à la dégradation physique du milieu : colmatage des fonds par érosion (rivières de Gascogne), conséquences de l'extraction ancienne des granulats (Garonne aval et Ariège), réduction excessive des débits d'étiage (Aveyron, Adour).

Cinq stations ont pu être utilisées pour cartographier l'état des rivières sur le territoire du PNR depuis 1999 (Figure V-3 et Tableau II-1) :

<b>NOM</b>	<b>COMMUNES</b>	<b>Coordonnées</b>	
		<b>X</b>	<b>Y</b>
Pont du Diable	Mercus-Garrabet	543026.00	1767189
Taurignan	Caumont	498410.00	1782510
Saint-Girons	Saint-Girons	502140.00	1776544
Palùtps	Saint-Girons	503688.00	1775500
Roquefort	Roquefort-sur-Garonne	488469.00	1796078
Labarthe-Inard	Montespan	478072.00	1789131

Tableau V-1 Liste des stations IBGN situées sur les rivières du PNR.

Numéro de station IBGN :

- Pont du Diable - 05 172900 - L'Ariège à l'amont de Foix
- Roquefort - 05 178000 - Le Salat à Roquefort sur Garonne (pont D13E)
- Taurignan - 05 179000 - Le Salat à Taurignan-Castet (aval St-Lizier)
- Saint-Girons - 05 179500 - Le Lez à l'aval de la papeterie LEDAR (pont D618)
- Palétès - 05 180290 - Le Salat à l'amont de St-Girons (aval papeterie LANA)
- Labarthe-Inard - 05 181000 - La Garonne à l'aval de St-Gaudens (pont D88)

On constate que depuis 1999, l'IBGN est globalement fort, traduisant un bon état écologique « global » des cours d'eau ariégeois, allant sur le Salat entre 13 et 17 et seulement de 10 sur l'Ariège. L'IBGN sur l'Ariège va augmenter avec le temps pour atteindre 15 en 2005. On constate également que la station IBGN située à l'embouchure du Lez dans le Salat, présente des valeurs d'IBGN qui diminuent entre 2000 et 2003. C'est la seule station située sur le Salat dont la valeur d'IBGN diminue pour cette période. Ce sont donc les apports d'eaux du Lez, dont l'état écologique est moins bon qui diminue les valeurs d'indice que le Salat. On constate également qu'entre 1999 à 2001, les valeurs de l'indice IBGN de la station de l'Ariège à Foix diminuent, or on sait que durant cette période a eu lieu les transparences du barrage de Garrabet. La diminution de la valeur de ces indices est peut être provoquée par ces transparences provoquant une dégradation considérable des valeurs d'IBGN notamment lors du passage du culot de sédiments. De plus ces transparences sont également à l'origine de contamination des sédiments par dégradation des conditions du milieu aqueux et accumulation de contaminants.

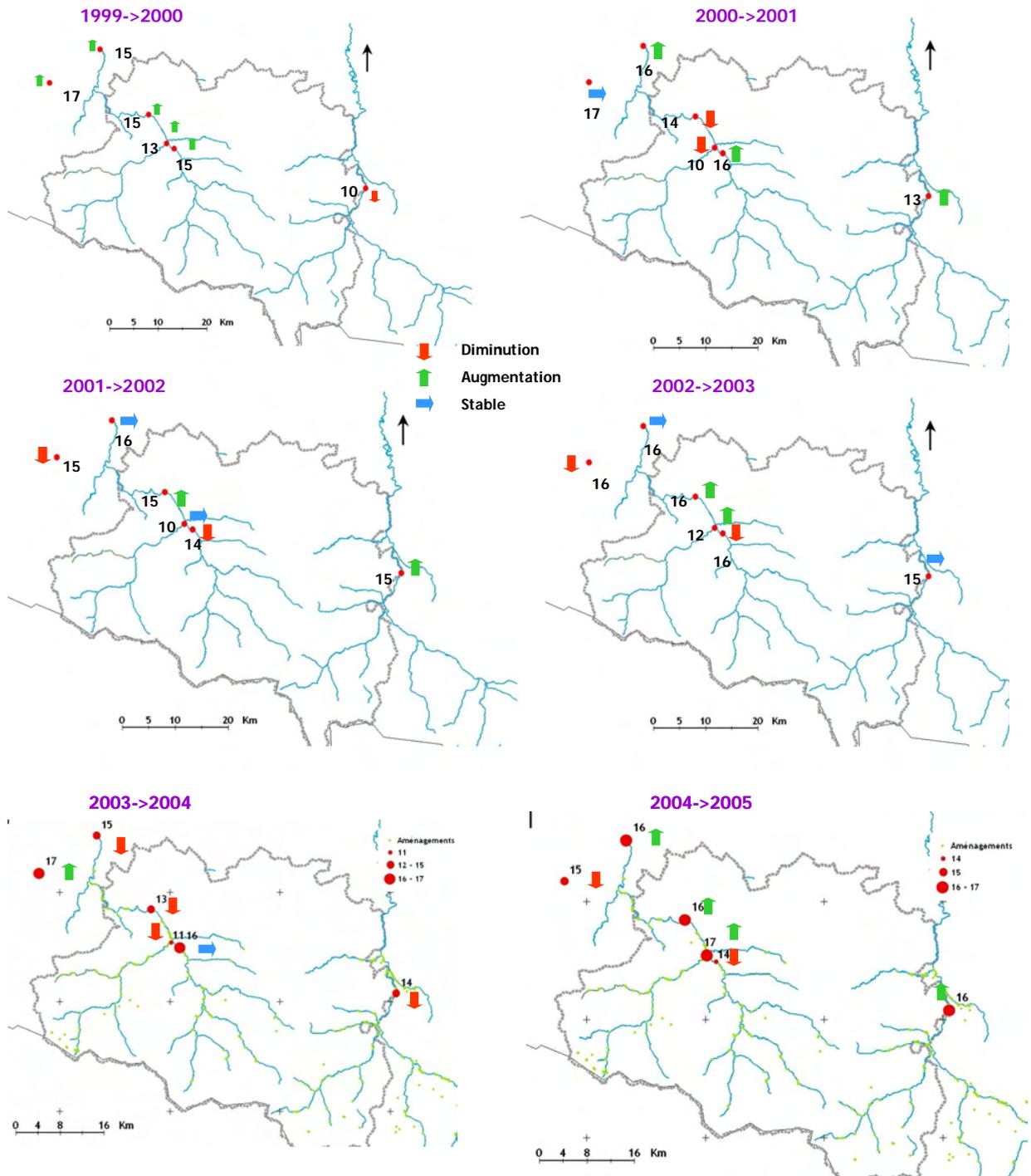
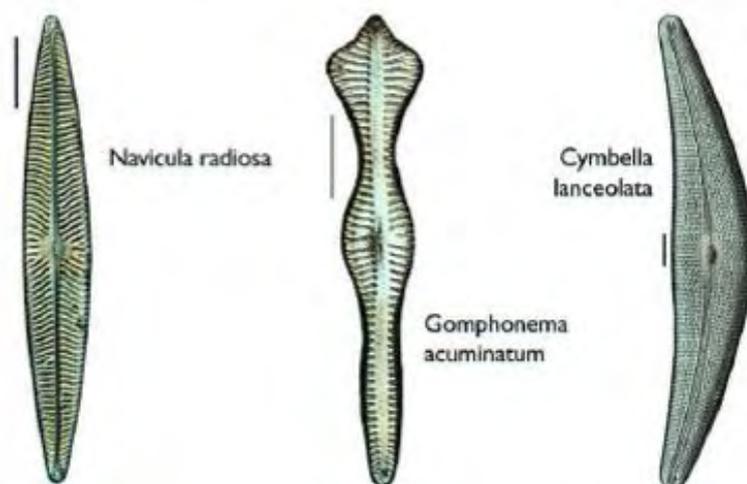


Figure V-3 Cartographie de l'évolution des IBGN de 1999 à 2004 sur les 5 stations disponibles localisées sur le PNR.

## V.B Indice biologique diatomées : IBD

Les diatomées sont des algues microscopiques brunes unicellulaires constituées d'un squelette siliceux. Elles sont une composante majeure du peuplement algal des cours d'eau et des plans d'eau.

Les diatomées sont considérées comme les algues les plus sensibles aux conditions environnementales. Elles sont connues pour réagir aux pollutions organiques, nutritives (azote, phosphore), salines, acides et thermiques, et peuvent aussi apporter des informations sur l'importance du marnage. Elles sont donc un complément intéressant aux macroinvertébrés qui renseignent essentiellement sur la qualité du milieu (qualité et diversité des habitats) et la qualité de l'eau (matières organiques en particulier) (Figure V-4 et Figure V-5).



**Figure V-4 Exemples de Diatomées des eaux de bonne qualité. (Le trait présent à côté de chaque Diatomée représente 1 µm).**

L'Indice Biologique Diatomées ou IBD est calculé sur la base de la détermination des Diatomées (algues brunes unicellulaires microscopiques fixées, Illustration 3). Cet indice reflète la qualité générale de l'eau d'une rivière plus particulièrement vis-à-vis des matières organiques et des nutriments (azote et phosphore).

	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
IBD	20 à 17	16.9 à 13	12.9 à 9	8.9 à 5	<4.9

**Figure V-5 Qualité hydrobiologique en fonction de la note IBD.**

L'Indice Biologique Diatomées ou IBD est applicable à la partie continentale d'un cours d'eau naturel ou aménagé, à l'exception des zones naturellement salées. Il est établi par point de mesures. L'échantillonnage est réalisé en fonction des conditions hydrologiques et de la nature des substrats. La mise en évidence des altérations chimiques est facilitée dans les situations extrêmes, au moment des basses eaux (débit minimal, température maximale) ou en période critique (rejets, activités humaines saisonnières ...).

A l'échelle du bassin Adour-Garonne, la majorité des points de mesures sont de qualité médiocre. Les secteurs présentant les meilleures qualités pour les diatomées restent les secteurs amont des bassins hydrographiques, notamment ceux de la Corrèze et de la Vézère ou de la Garonne. A l'opposé, les secteurs les plus dégradés se limitent aux cours d'eau recevant une pollution importante, généralement d'origine industrielle comme l'Adour en aval de Dax. Dans le cas, du département de l'Ariège, il y a peu de points de mesure actuellement réalisés. Dans ce cas, le diagnostic de l'état des cours d'eau doit être pris avec prudence. Pour notre étude une seule station IBD est disponible sur le territoire du PNR, c'est la station au Pont du Diable sur l'Ariège. Deux notes sont disponibles en 1994 et 2003 (Figure V-6).

Année	IBD
1994	15
2003	19

**Figure V-6 Notes IBD au Pont du Diable sur l'Ariège.**

Le résultat de 2003 indique une très bonne qualité de l'eau vis-à-vis des populations algales sur la station du Pont du Diable. Cependant la quantité des données à disposition étant très réduite, on peut proposer lors de la mise en place de nouveaux dispositifs hydroélectriques de demander la mesure de l'IBD afin d'une part de contrôler l'état hydrobiologique du cours d'eau en ce point, et d'autre part de demander le suivi de cet indice après construction de façon à maintenir le bon état.

## **V.C Indice Poisson Rivière: IPR**

L'indice poisson rivière (IPR) a été élaboré dans le cadre d'un programme scientifique national, achevé en 2001, qui a réuni scientifiques et experts techniques. L'objectif était de mettre au point un outil d'évaluation de la qualité des cours d'eau basé sur les peuplements de poissons, qui réponde à la directive cadre sur l'eau et soit applicable sur l'ensemble du territoire. Au niveau français, l'IPR a été identifié comme l'un des éléments intervenant dans la définition provisoire du bon état écologique DCE (seuil du bon état correspondant à la limite définie dans le cadre de la norme AFNOR). L'IPR consiste globalement à mesurer l'écart entre le peuplement observé sur une station donnée à partir d'un échantillonnage par pêche électrique, et le peuplement attendu en situation de référence, c'est-à-dire dans des conditions pas ou très peu modifiées par l'homme. L'évaluation du niveau d'altération des peuplements de poissons se base sur différentes caractéristiques des peuplements (ou métriques) sensibles à l'intensité des perturbations anthropiques et qui rendent compte notamment de la composition taxonomique, de la structure trophique et de l'abondance des espèces

Le principe de cet indice est d'évaluer la différence entre la structure du peuplement de poissons échantillonnés et celle d'un peuplement de référence, attendu en absence de toute perturbation. Le calcul de l'indice poisson fournit une note à partir de laquelle une grille de

classification à 5 niveaux est développée. Il permet d'évaluer la qualité écologique des cours d'eau d'après l'étude de leur peuplement piscicole. La valeur de l'IPR correspond à la somme des scores obtenus par les 7 métriques. Sa valeur est de 0 lorsque le peuplement évalué est en tous points conforme au peuplement attendu en situation de référence. Elle devient d'autant plus élevée que les caractéristiques du peuplement échantillonné s'éloignent de celles du peuplement de référence (Ferreira et al. 2007 ; Pont et al., 2007 ; Roset et al., 2007).

La démarche adoptée pour l'établissement de l'indice a été la suivante :

- Elaboration, en utilisant un jeu de données de 650 points de mesures "témoins", d'un référentiel permettant de décrire la structure du peuplement "théorique" d'un site pour une situation environnementale donnée ;
- Découpage du peuplement "théorique" en "métriques fonctionnelles" prenant en compte la présence et l'abondance des espèces. On entend par "métriques fonctionnelles" un ensemble d'informations chiffrées sur les caractéristiques des différentes espèces en présence et relatives à leur diversité, leur habitat préférentiel, leur sensibilité aux perturbations, leur régime alimentaire et leur abondance dans le milieu ;
- Validation des différentes métriques sélectionnées sur un jeu de données indépendant de points de mesures "témoins" ;
- Test de la réponse de chacun des paramètres aux perturbations à l'aide d'un jeu de points de mesures "perturbés", pour finalement élaborer l'indice poissons. L'écart observé entre l'échantillon attendu et l'échantillon réellement prélevé exprime l'état de dégradation du peuplement (Reyjolet al., 2007 ; Schmutz et al., 2007).

	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
IPR	<7	7 à 16	16 à 25	25 à 26	>36

**Figure V-7 Tableau de la qualité hydrobiologique en fonction de l'indice poisson**

L'indice obtenu à partir de l'analyse des peuplements de poissons, fondé sur des critères écologiques vérifiés, semble répondre efficacement à un large spectre de perturbations, tant de la qualité de l'eau que de la qualité de l'habitat. Le système de notation est basé sur les caractéristiques représentatives du peuplement observé : sa diversité (nombre d'espèces présentes), sa densité et les caractéristiques écologiques des différentes espèces qui le composent (régime alimentaire, sensibilité, etc.).

Du peuplement intact au peuplement fortement perturbé, voire à l'absence totale de poisson, on distingue (Figure V-7):

**-La très bonne qualité**, comparable à la meilleure situation attendue sur un site n'ayant subi aucune perturbation. Toutes les espèces typiques du milieu sont représentées y compris les espèces les plus intolérantes. La répartition des régimes alimentaires au sein des différentes espèces est équilibrée.

-**La bonne qualité**, pour laquelle le nombre d'espèces est généralement légèrement inférieur à celui attendu, du fait de la disparition des formes les plus intolérantes. Quelques espèces ont une abondance réduite. La répartition des régimes alimentaires montre des signes de déséquilibre.

-**La qualité passable**, avec un peuplement qui a perdu ses espèces intolérantes et qui montre des signes d'instabilité : abondance excessive d'espèces généralistes, répartition des régimes alimentaires déséquilibrée.

-**La mauvaise qualité**, avec un peuplement dominé par les espèces tolérantes et/ou omnivores. Peu d'espèces consommatrices de poissons et/ou d'invertébrés. Richesse spécifique du peuplement faible. Abondance généralement réduite.

-**La très mauvaise qualité**, avec peu d'espèces présentes, pour la plupart tolérantes. Abondance réduite (moins de 5 individus pour 100m<sup>2</sup>) ou échantillonnage sans capture de poisson, stade de dégradation ultime.

A l'échelle du bassin Adour-Garonne, dans l'ensemble les peuplements en zone de montagne sont bons, en dépit de certaines perturbations dues aux aménagements hydroélectriques. Plus à l'aval, les qualités, souvent passables ou mauvaises, résultent des médiocres conditions de milieu, liées le plus souvent aux activités humaines : réduction des débits consécutifs surtout aux prélèvements agricoles, qualité de l'eau dégradée par un réchauffement exagéré, des matières en suspension excessives et les rejets, milieu perturbé par des successions de barrages et de biefs aménagés. Sur la carte du bassin (Figure V-8 et Figure V-9 ), on observe que les stations classées comme « excellentes » se trouvent majoritairement dans les têtes de bassin, essentiellement dans les Pyrénées. La dégradation des peuplements se manifeste de façon importante dans les Coteaux Aquitains et les Tables Calcaires, deux hydro-écorégions où se concentre l'activité agricole intensive du bassin.

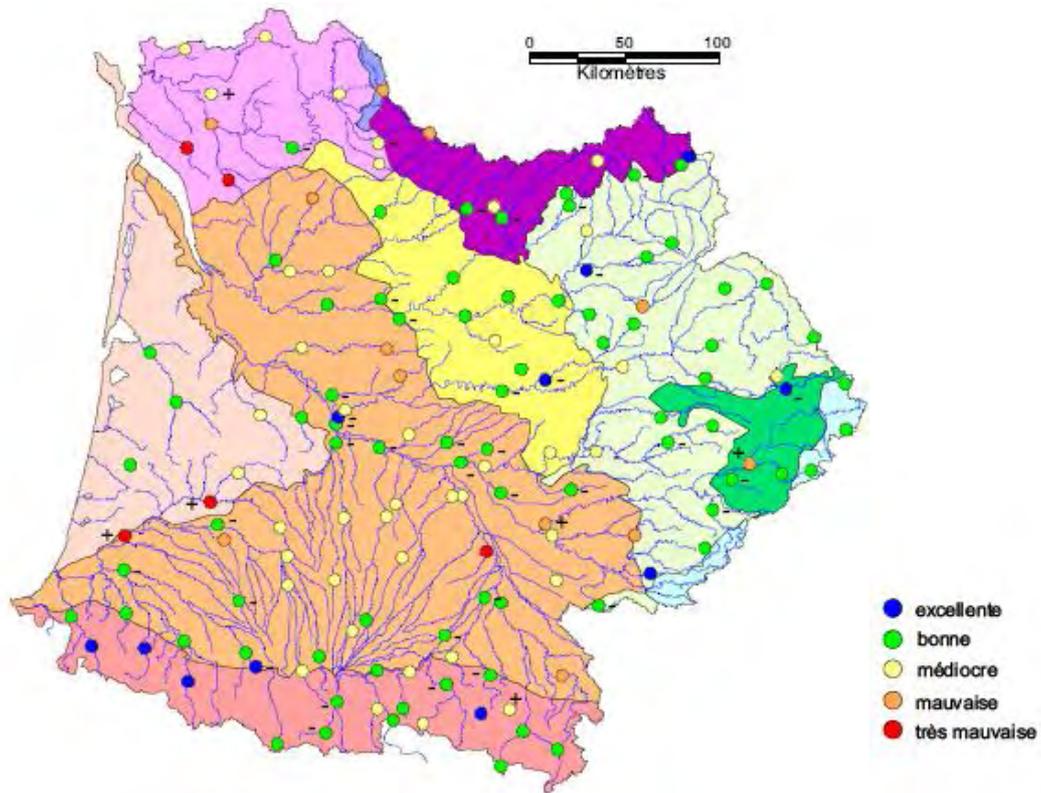


Figure V-8 Qualité des peuplements piscicoles sur les stations RHP du bassin Adour-Garonne en 2004.

(+) : l'état fonctionnel du peuplement piscicole est, par expertise, meilleur que celui annoncé par l'IPR, (-) : l'état fonctionnel du peuplement piscicole est, par expertise, moins bon que celui annoncé par l'IPR.

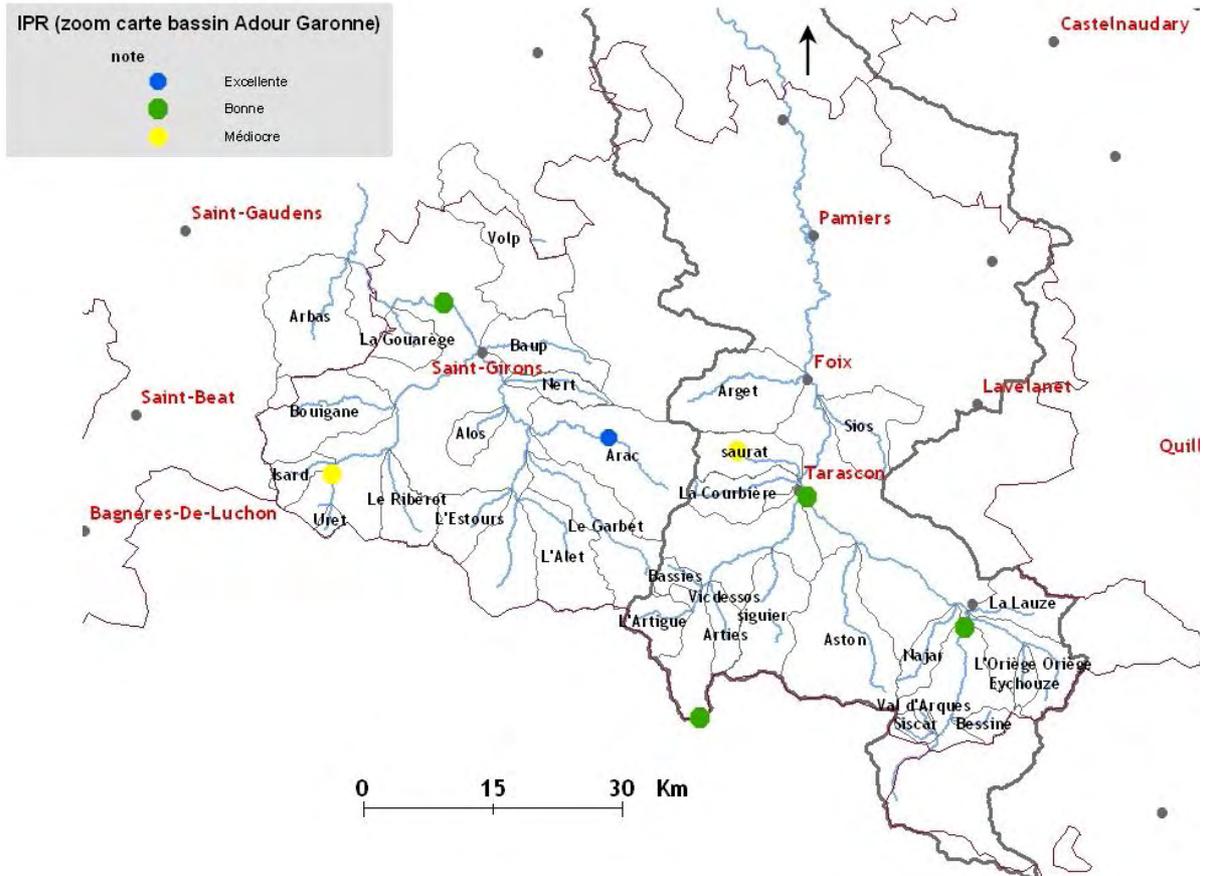
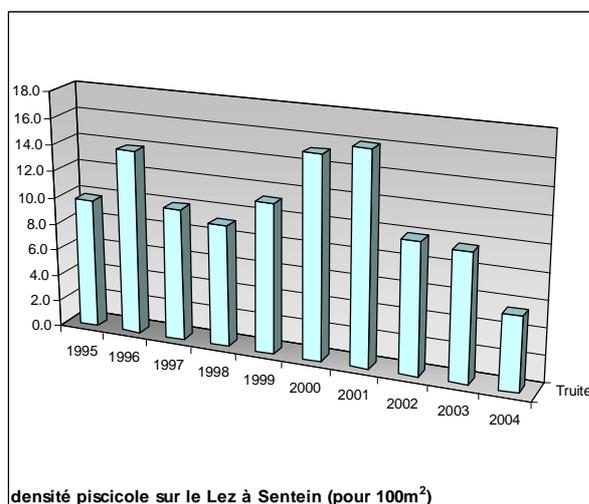
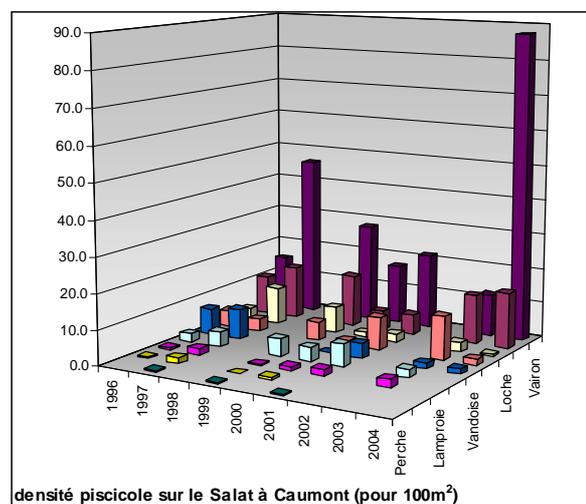
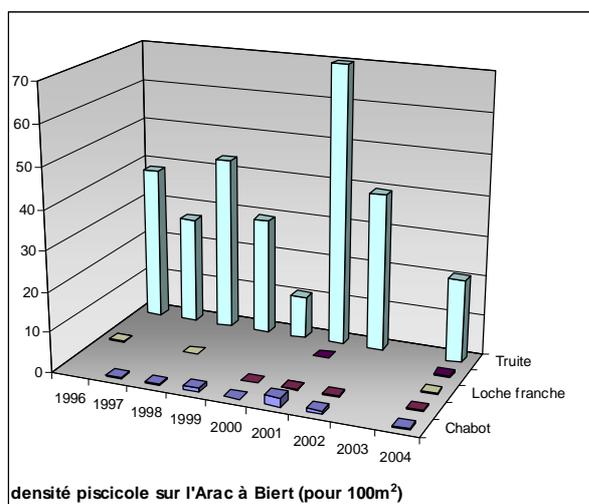
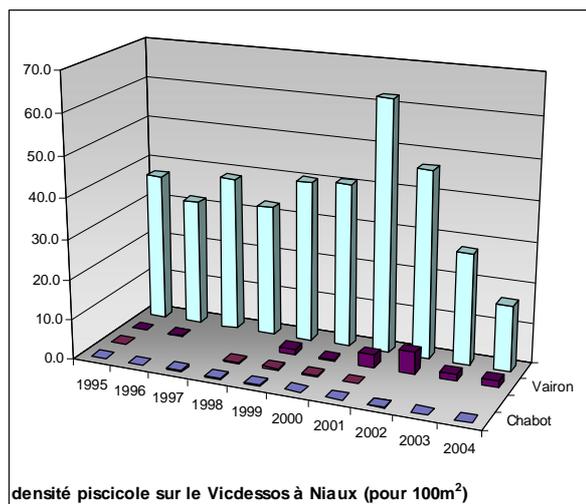
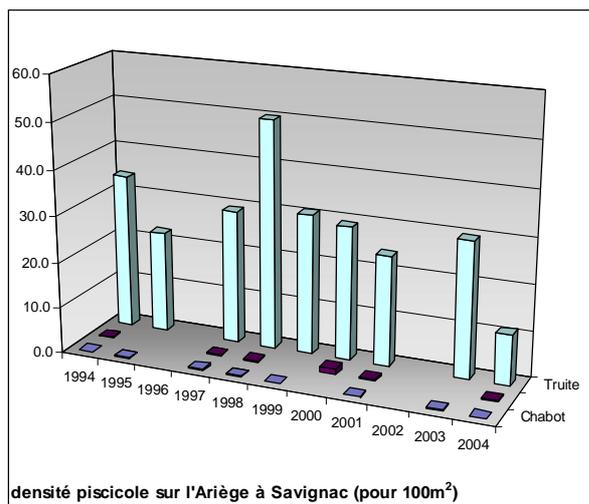


Figure V-9 Zoom sur la carte de qualité des peuplements piscicoles sur les stations situées en Ariège et sur le territoire du PNR.

A l'échelle des bassins versants de la zone d'étude, il existe des données permettant le calcul des IPR et des informations concernant le peuplement piscicole des rivières de l'étude. Les données de peuplement sont disponibles pour les stations suivantes : l'Arac à Biert, l'Ariège à Savignac, le Lez à Sentein, le Salat à Caumont et le Vicdessos à Auzat et Niaux.



**Figure V-10 Données de synthèse des peuplements piscicoles pour 5 cours d'eau de l'étude pour le période de (1994-2004).**

Pour les cours d'eau du Vicdessos, de l'Arac, du Lez et de l'Ariège on note une forte densité de truites. Seul le Salat présente une biodiversité plus importante avec la présence de perche,

lamproie, vandoise, loche, vairon. Dans le cas du Lez, on note la présence d'une forte densité de truites uniquement.

Depuis les années 2000 les IPR sont globalement en hausse avec des IPR de bonne qualité, voire même de qualité excellente pour l'Arac et le Garbet. On peut donc dire qu'aucun des bassins versants semble « préservé » des modifications anthropiques et climatiques. On constate également que les stations du lez à Sentein et Vicdessos à Niaux ont des IPR de qualité médiocre. Cependant il serait également intéressant de comparer également les valeurs des IPR avec la carte de localisation des stations d'épuration (STEP) pouvant également être à l'origine d'une chute de la valeur de cet indice.

Pour toutes les stations on observe un maintien des espèces sensibles comme la truite, le chabot. Cependant, on constate que certaines stations présentent une faible biodiversité, c'est l'exemple du Lez à Sentein et de l'Ariège à Savignac. Seul la station du Salat à Caumont présente l'apparition d'espèces plus tolérante au détriment des espèces sensibles comme la truite. Il existe également une contrainte liée à la température puisque la plupart de salmonidés sont sensibles aux températures supérieures à 12°C.

On constate également que malgré la forte présence de tronçons court-circuités, la station de l'Ariège à Savignac présente une forte densité de truites, on peut alors se poser la question de la nature de ces peuplements (artificiel ?) ou ces espèces n'ont pas subies l'influence de l'implantation de barrages hydroélectriques. Cette question soulève un autre point qui est la limite d'utilisation des indices IPR. En effet, comme les IBGN et IBD, les IPR ne caractérisent pas la structure des peuplements mais vont juste fournir une information sur la présence/absence, ce qui ne permet pas de savoir s'il existe un impact des barrages sur les tailles, types des poissons (jeune, adultes...). La bibliographie nous a permis de constater que l'indice IPR est en cours d'amélioration avec la mise en place d'un indice IPR+. Cet indice est mis au point par le cemagref et l'Onema, son intercalibration européenne est en cours et intégrera :

- optimisation des techniques statistiques,
- choix de variables non anthropisées pour définir le modèle de référence,
- métriques fonctionnelles reliées aux pressions,
- métriques basées sur les classes de taille
- métriques évaluant les altérations de connectivité à l'échelle des bassins

Enfin, ce travail se réalise également en collaboration avec le Centre de Recherche de la Nature, des Forêts et du Bois (CRNFB) de Wallonie (Belgique) et les services de l'Environnement du Luxembourg, intéressés au développement du nouvel indice. Une collaboration est également établie avec le Service Etudes et Recherches d'EDF qui met à disposition les séries de données dont ils disposent.

Cependant, les Pyrénées et la région ariégeoise présentent une grande variété de paysages et de milieux naturels, liée à son hétérogénéité climatique. La mosaïque d'habitats naturels qu'elles renferment (pelouses sèches, prairies humides, lacs et cours d'eau, milieux forestiers (chênaie à l'étage collinaire, hêtraie sapinière à l'étage montagnard, pins à crochets à l'étage subalpin...),

milieux rupestres, grottes...) est une immense source de biodiversité. Quelques espèces sont endémiques aux Pyrénées, comme le desman et l'euprocte des Pyrénées. Ces espèces ne sont pas prises en compte dans le calcul des indices que l'on vient de citer. Des études en cours (plan d'action desman) seraient donc à intégrer à la grille de lecture pour estimer l'impact des aménagements hydroélectriques sur cette faune et cette flore locales caractéristiques (Figure V-11).



Photo P. Cadiran

**Figure V-11 Espèces endémiques des Pyrénées (Desman et Euprocte)**

Déjà potentiellement menacée par un développement et un aménagement du territoire non réfléchi ou non contenu et par l'abandon de pratiques traditionnelles qui entretiennent les milieux, notamment l'abandon du pastoralisme qui engendre la fermeture des milieux et la réduction de la biodiversité, la préservation de cette grande réserve pyrénéenne de biodiversité est fortement compromise dans le contexte du changement climatique, qui ne laisse présager que des phénomènes aggravants.

## Chapitre V : Etat écologique des cours d'eau

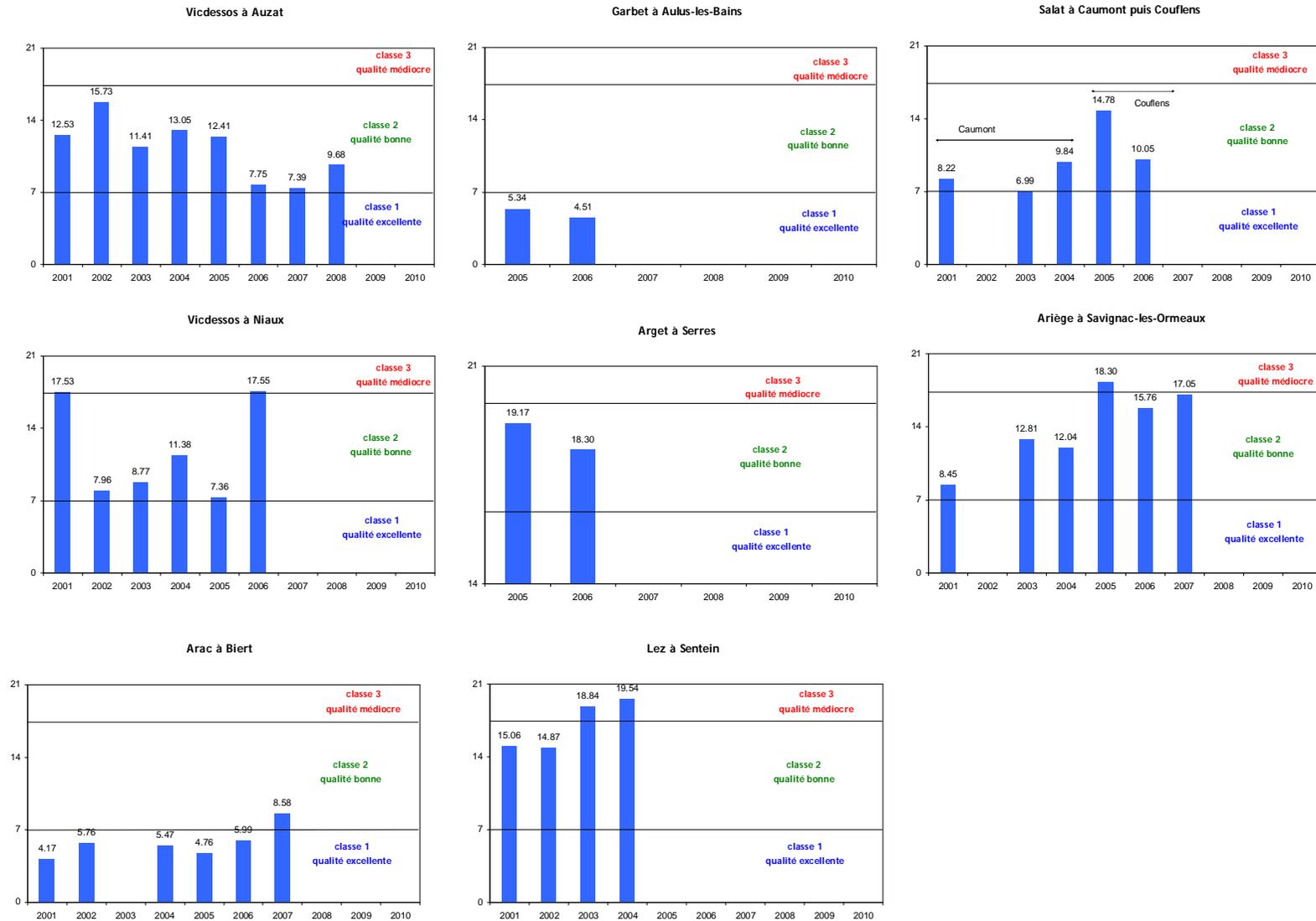


Figure V-12 Evolution temporelle des IPR pour chaque station de mesure.

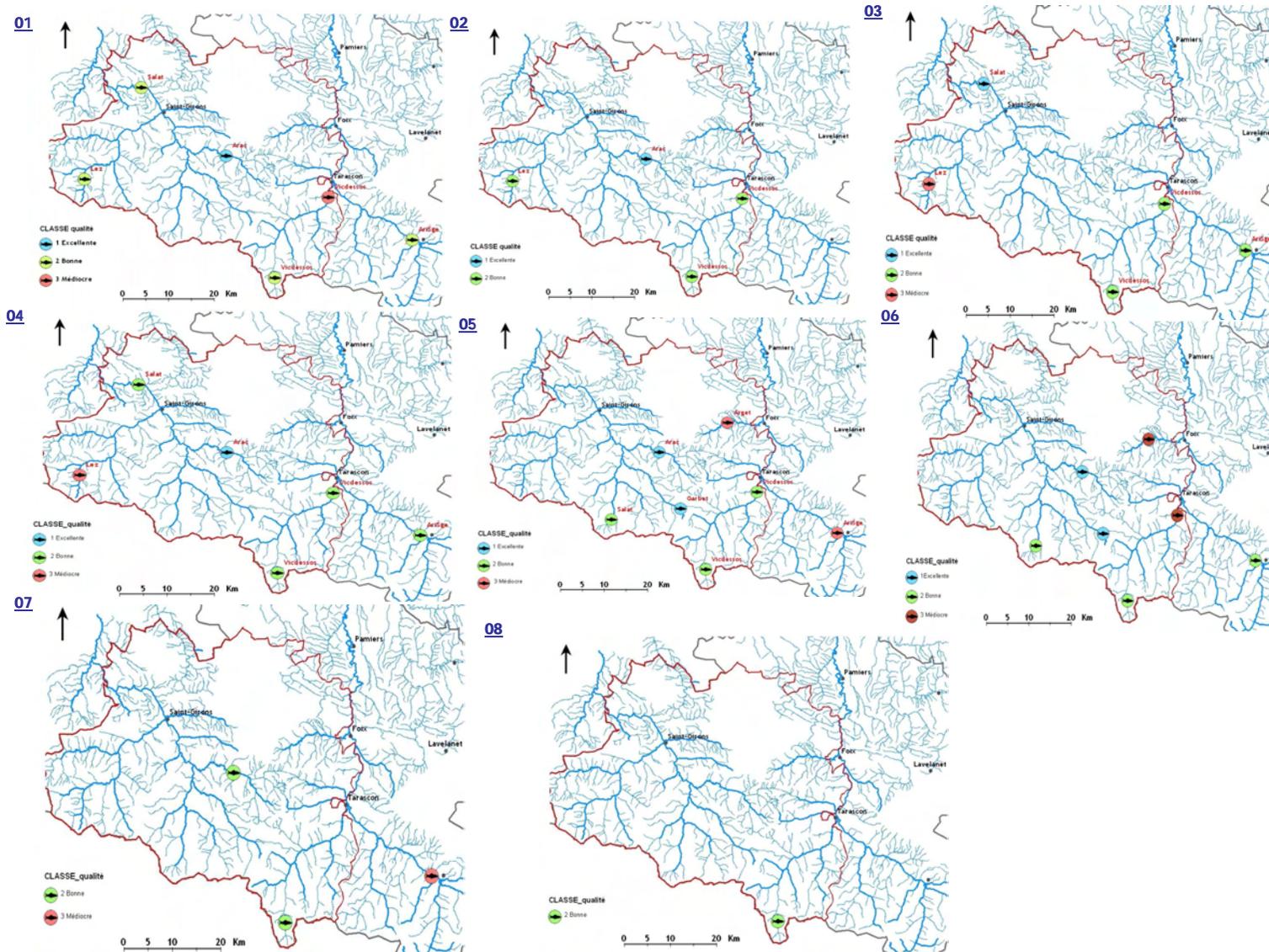


Figure V-13 Localisation spatiale et temporelle de l'évolution des indices qualité poissons (IPR)

## **V.D Débit réservé**

Si l'on reprend la définition officielle «le débit réservé a été conçu dès la loi de 1919 pour préserver le milieu aquatique : c'est le débit minimal restant dans le lit naturel de la rivière entre la prise d'eau et la restitution des eaux en aval de la centrale, garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces vivant dans ces eaux. La LEMA a réformé les dispositions relatives au débit réservé fixé auparavant au L.432-5 en instaurant l'article L.214-18. Elle s'appuie sur les mêmes dispositions générales. Le débit minimal ne doit pas être inférieur au 10ème du module (ou au débit amont si celui-ci est inférieur) en règle générale. La LEMA facilite la procédure d'abaissement au 20ème du module pour les cours d'eau dont le débit est supérieur à 80m<sup>3</sup>/s et pour les ouvrages qui contribuent à la production électrique en période de « pointe » fixés par décret. D'autres valeurs sont toutefois possibles pour des cours d'eau dont le fonctionnement est atypique et pour lesquels les conditions de fixation des débits réservés précédemment citées ne sont pas pertinentes. Le « régime réservé » permet une modulation à l'année des débits en respectant en moyenne le débit minimal, sans jamais passer en dessous de la moitié de ce débit. Cette réforme s'applique à l'existant dès renouvellement du titre d'exploitation et au plus tard au 1er janvier 2014.

Telle que formulée cette définition du débit réservé, sauf pour les quotas, reste extrêmement imprécise, aucun critère objectif du point de vue écologique n'est mentionné. De plus les études et les modèles auxquels il est fait appel dans la littérature pour en constater les effets, font référence essentiellement à la population piscicole. Même du point de vue hydraulique, il est fait appel au module interannuel, sans que soit précisé sur combien d'années il doit être calculé, aucune mention n'est faite de la variabilité des modules. En outre, cette définition suppose que, à long terme, le régime des cours d'eau soit stationnaire, c'est à dire que toutes les propriétés statistiques (moment de 1<sup>er</sup> ordre : moyenne, moment de 2<sup>ième</sup> ordre : variance), soient constantes dans le temps, sans qu'aucun test ne soit préconisé pour le vérifier. Or, toutes les analyses montrent que cette stationnarité est loin d'être respectée.

Pour déterminer le débit minimal à laisser dans le cours d'eau pour garantir, selon la loi, " en permanence, la vie, la circulation et la reproduction des espèces qui peuplent les eaux au moment de l'installation de l'ouvrage ", trois types de méthodes existent :

- les approches hydrologiques s'appuient sur les valeurs qualifiant l'étiage, sans grande mobilisation des connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes ; dans la " méthode de Tennant ", les débits sont calculés en pourcentage du module moyen interannuel ; 1/10ème du module est considéré comme un minimum minimorum, 30 % comme une valeur acceptable ;
- les approches de géométrie hydraulique tiennent compte de la morphologie des cours d'eau ; le principe consiste soit à préserver une partie du lit mouillé, soit à ménager une certaine hauteur minimum dans le lit du cours d'eau ;
- les méthodes des microhabitats, développées initialement aux Etats-Unis " Instream Flow Incremental Methodology ", associent un modèle hydraulique et un modèle biologique.

L'approche retenue varie d'un pays à l'autre, les méthodes hydrologiques apparaissant plutôt comme les premières développées historiquement et permettant, aujourd'hui, une première évaluation. Les méthodes " microhabitat " sont adoptées ou en cours d'adaptation dans de nombreux pays. Des éléments de comparaison internationale rassemblés, il ressort que le 1/10<sup>ème</sup> du module apparaît souvent comme un seuil de référence, qualifié souvent de strict minimum, assurant plutôt la survie que l'équilibre écologique.

L'objectif est d'évaluer la sensibilité de l'impact du manque d'eau sur le milieu à la valeur du débit réservé. Cet impact doit évidemment s'apprécier sur l'ensemble des compartiments du milieu, et en particulier sur la température, sur l'oxygène dissous, sur la qualité physico-chimique de l'eau, sur les aspects biologiques (eutrophisation, invertébrés, populations piscicoles), sédimentaires et morphodynamiques. Les méthodes existantes pour analyser ces différents compartiments - modèles thermiques, modèles d'oxygène et de biomasse, etc...- ont leurs limites et ne peuvent répondre à toutes les questions. Elles peuvent conduire à demander un approfondissement scientifique sur certains aspects jugés importants au cas par cas. Cependant, sur un nombre important d'aménagements se situant plutôt à l'amont des cours d'eau (zones de piémont, petit cours d'eau de pente moyenne), l'abondance d'habitats piscicoles est apparu comme le paramètre le plus sensible au débit. La méthode dite des microhabitats est souvent la plus utile pour ce type de site, mais elle ne peut remplacer les analyses précédentes : elle ne fait que les compléter lorsque le cas d'étude s'y prête.

Le débit d'étiage reste l'élément objectif et indiscutable qui peut permettre d'évaluer l'évolution naturelle d'un cours d'eau en basses eaux et qui, en théorie et en l'absence d'étude d'impact précise, peut servir de base pour avoir un avis sur son comportement écologique. Ce débit devrait être sur le plan hydraulique la référence. Pour le calculer on prendra la définition des hydrologues pour lequel la valeur du débit est minimum sur au moins 5 jours consécutifs.

Nous avons souhaité comparer la valeur du débit d'étiage annuel, à laquelle l'écosystème aquatique est soumis naturellement et s'est adapté, à celle du débit réservé fixé par la loi (1/10 du module interannuel). Sur le même graphique est porté également le débit d'étiage interannuel et le débit réservé calculé année par année (1/10 du module annuel). Le Tableau V-2 fournit les débits d'étiage interannuel (il correspond à la valeur moyenne, calculée sur toute la chronique, du débit minimal annuel pendant 5 jours consécutifs) le débit réservé (correspondant au 1/10<sup>ème</sup> du module) et le rapport débit d'étiage sur module interannuel.

Cours d'eau	Date de départ de la chronique	Durée de la chronique en années	Débits d'étiage en m <sup>3</sup> /s	Débits réservés en m <sup>3</sup> /s (1/10 module)	Rapport étiage /module
Ariège à Foix	1/01/1906	103	11.117	3.987	2/7
Ariège à Mérens	1/01/1969	17	0.891	0.480	3/16
Ariège à l'Hospitalet	1/04/1920	40	0.613	0.210	2/7
Artigue à Auzat	1/04/1961	47	0.152	0.129	2/17
Aston à Riète	1/01/1948	35	0.366	0.214	5/29
Salat à Roquefort	1/01/1913	96	9.502	4.246	2/9
Salat à St Lizier	1/01/1974	35	8.177	3.535	3/13
Salat à Kercabanac	1/01/1934	78	4.097	1.616	1/4
Lez à Engomer	1/01/1970	39	2.178	1.100	1/5
Lez à Bordes	1/01/1971	38	2.115	0.711	3/10
L'Arac à Soulan	1/01/1962	46	1.367	0.597	3/13

Tableau V-2 : Débit d'étiage et débit réservé.

débit d'étiage moyen, débit d'étiage annuel, débit réservé, 1/10ème débit moyen annuel

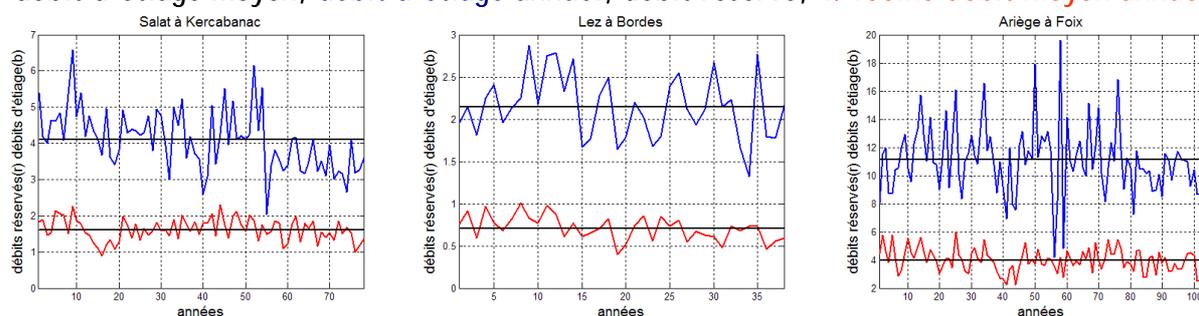


Figure V-14 Part du débit réservé (rouge) par rapport au débit d'étiage naturel (bleu).

On constate que de façon générale, la part du débit réservé est toujours bien inférieure au débit d'étiage, ce qui représente une forte perturbation pour les écosystèmes. Ainsi l'adaptation de ces écosystèmes à ces conditions non naturelles engendre de fortes vulnérabilités des zones soumises aux débits réservés soit les tronçons court-circuités et les zones soumises aux éclusées.

En règle générale le débit d'étiage est toujours supérieur au débit réservé théorique (sauf pour certaines sources karstiques). Même en prenant en compte la non stationnarité, il apparaît que du point de vue hydraulique la valeur du débit réservé préconisé est mal adaptée au régime naturel du cours d'eau. Si on veut garder des conditions naturelles, le 1/5 du module serait nettement plus correct, ce qui représente le double du débit actuellement retenu. On constate également que si,

parfois, l'étiage est exceptionnel, en règle général, ce n'est jamais plusieurs années successives, alors que la faiblesse du débit réservé par rapport au débit d'étiage moyen est permanente.

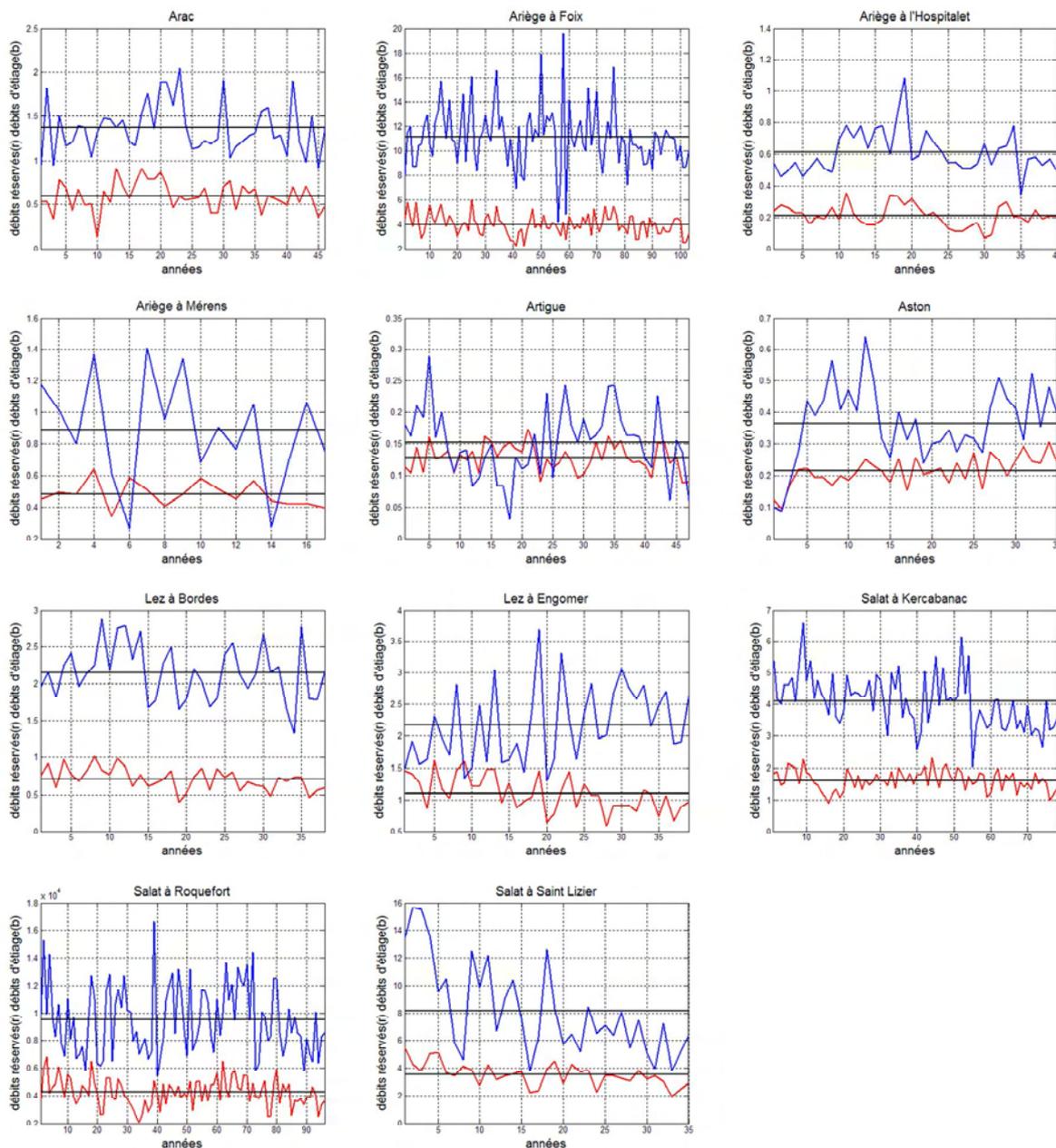


Figure V-15 : Evolution annuelle du débit d'étiage (Qmin5j en bleu) et du débit réservé (rouge). Les traits noirs représentent l'étiage moyen et le débit réservé réglementaire (1/10<sup>ème</sup> du module interannuel), respectivement en haut et en bas.



### **VI Conclusion**

Dans un premier temps, le principal travail fut de réaliser un diagnostic de l'état des pressions déjà en place dans le milieu : calcul des densités d'aménagements, longueur de tronçons court-circuités par bassin versant. On constate qu'aucun bassin n'est préservé, les aménagements sont nombreux et les longueurs des cours d'eau court-circuités peuvent atteindre jusqu'à 13 km sur l'Ariège.

Une fois l'étude de la réglementation réalisée pour chaque bassin versant, l'étude a visé à identifier des indices pertinents permettant l'instruction des dossiers de demande d'implantation de nouveaux ouvrages hydroélectriques. La finalité de l'étude permettant la construction d'une grille de lecture visant à simplifier, automatiser, l'instruction objective des dossiers de demande d'implantation d'ouvrages. Tout d'abord la distinction entre les effets liés à la mise en place d'ouvrages de grande et de petite hydraulique est soulignée. En effet, une différence majeure est à prendre en compte : le fait que les centrales dites au fil de l'eau ne vont pas avoir d'effets sur le débit des rivières, seul les tronçons court-circuités seront soumis à des débits réservés. Pour ces petites centrales d'autres effets et impacts ont été relevés et utilisés pour la construction de la grille de lecture.

Dans cette étude, le postulat de départ était l'utilisation des données hydrologiques et morphologiques pour déterminer l'état du cours d'eau. En effet, le milieu physique étant porteur de l'écosystème associé, sa modification va provoquer des perturbations des cycles naturels qui ont lieu dans ce milieu. Il a été montré que trois paramètres importants du fonctionnement hydrologique ne doivent pas être brutalement modifiés si l'on implante un ouvrage de façon à ne pas perturber l'écosystème. Ces paramètres sont : l'amplitude, la fréquence et les fluctuations saisonnières. En effet ces trois éléments conditionnent le développement et la croissance de tout l'écosystème. L'écosystème va lui supporter les fluctuations naturelles des valeurs extrêmes mais ne supportera pas des périodes de stress plus importantes. Une étude menée aux Etats-Unis a montré par différentes expériences (dans différents contextes et climats) que chaque altération des paramètres hydrologiques avait un impact sur l'écologie. Ces impacts sont synthétisés dans un tableau faisant le lien entre altération d'un paramètre spécifique et influence sur l'écologie.

De la même façon, la caractérisation de la forme du bassin et de sa morphologie permet également de connaître « les limites » concernant les contraintes à appliquer à un bassin versant. Par exemple, il est montré que l'estimation des temps de réponse et temps de concentration des eaux au sein d'un bassin est fonction de la morphologie du paysage c'est-à-dire de l'organisation du réseau hydrographique dans le relief. Là encore des indices intéressants sont à prendre en compte s'il on ne veut pas modifier le fonctionnement naturel de l'hydrosystème (et donc par retro-contrôle l'écosystème associé).

Enfin pour les petites centrales hydroélectriques, les effets de cumuls sur le bassin sont pris en compte. La fragmentation des écosystèmes est l'un des plus importants effets réalisés par le cumul d'obstacles. Par exemple, les poissons pourront plus difficilement passer successivement plusieurs

## Conclusion

barrages. Dans ce cas, deux indices sont à calculer, c'est la hauteur de chûtes cumulées et les zones d'influence de chaque ouvrage.

En ce qui concerne les effets sur les communautés biologiques, les données et les indices à disposition sont limités en nombre mais également en terme d'interprétation. En effet, la lecture des études récente met en avant les limites de l'utilisation des indices actuels (IBGN, IBD, IPR) puisqu'ils ne permettent pas la caractérisation de la structure de peuplements. Cependant, le Cemagref, l'Onema, agence de l'eau, DREAL et d'autres organismes sont actuellement à la recherche d'améliorations à donner à ces indices.

La grille de lecture construite durant cette étude est bien évidemment modulable et modifiable, soit a ajoutant des informations non encore à disposition (plan d'action Desman, nouveaux IBGN et IPR).

Aucune statistique classique ne donne de réponse claire quant à l'implantation de nouvelles centrales hydroélectriques et des impacts de ces centrales sur l'état écologique des bassins versants. Il est donc important de trouver de nouvelles approches visant à coupler différents types d'information basées sur des concepts différents pour juger de la pertinence de l'implantation d'un nouvel ouvrage.

## **Bibliographie**

- Agosta C, 2007. Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère. Rapport Master 2, Université Pierre et Marie Curie, 51p.
- Alastair J. H. Clement, M.S.B., 2008. Tilting of active folds and drainage asymmetry on the Manawatu anticlines, New Zealand: a preliminary investigation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(11): 1787-1795.
- Assani A.A et Petit F. 2004. Impact of hydroelectric power releases on the morphology and sedimentology of the bed of Warche River (Belgium). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 133-143.
- Barriere, A. 2009. Impact du développement de l'hydroélectricité : évaluation économique des aménagements hydroélectriques dans le territoire du PNR Pyrénées Ariégeoises. Rapport de Master 2 Bordeaux Montaigne. 120pp.
- Belliard, J., Boet, P., Allardi, J. 1995. Evolution à long terme du peuplement piscicole du bassin de la Seine. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 337-338-339 : 83-91
- Bouchard J.P., Cardinal H., Eon J., 1986, Influence des retenues sur le milieu aquatique : les vidanges de retenues, SHF, XIXème journées de l'hydraulique, Paris, septembre 1986
- Brandt S.A. 2000a. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40:375-401.
- Brandt S.A. 2000b. Prediction of downstream geomorphological changes after dam construction: a stream power approach. *Water Resources Development*, 16 (3): 343-367.
- Bravard J.P et G.E. Petts. 1993. Interférences avec les interventions humaines. In : Amoros C. et G.E. Petts (eds), *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris, Masson, Coll. Ecologie, 24 : 233-253.
- Cardinal H., 1988, Bilan des recherches et recommandations en matière de vidange des retenues. Guide, Rapport EDF DER HE-31/88-20.
- Carlos R., 1998. Rhythmic ammonium regeneration and flushing in intertidal sediments of the Sado estuary. *Limnol. Oceanogr.* 43(5).823-831.
- Church M. et Hassan M.A. 1992. Size and distance of travel of unconstrained clasts on a streambed. *Water Resources Research*. 28: 299-303.
- Costanza R; D'Arge R ; De Groot R ; Farber S ; Grasso M ; Hannon B ; Limburg K ; Naeem S; O'Neill R.V; Paruelo J; Raskin R. G; Sutton P; Van Den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*
- Cox, R.T., 1994. Analysis of drainage basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 106: 571-581.
- Cravero J.M. et Guichon P., 1989, Exploitation des retenues et transport des sédiments, *La Houille Blanche*, 3-4, 292-295.
- Degoutte G., 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières, hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Ed. TEC&DOC, Lavoisier, Paris, 395p.
- Duband D., 1995. L'hydrométéorologie Opérationnelle à Electricité de France. *La Houille Blanche*, N°4 :17-23. (DOI: 10.1051/lhb/1995028).

- Eaucea, 2007. Etude d'évaluation du potentiel hydroélectrique du bassin Adour-Garonne. Rapport Agence de l'eau /Ademe. 64pp.
- Ferreira T, J. Oliveira, N. Caiola, A. De Sostoa, F. Casals, R. Cortes, A. Economou, S. Zogaris, D. Garcia-Jalon, M. Ilheu, F. Martinez-Capel, D. Pont, C. Rogers & J. Prenda (2007). Ecological traits of fish assemblages from Mediterranean Europe and their responses to human disturbance. *Fisheries Management and Ecology* 14: 473-481.
- Gaeuman D., Schmidt J.C., Wilcock P.R. 2005. Complex channel response to changes in stream flow and sediment supply on the lower Duchesne River, Utah. *Géomorphology*, 64 :185-206.
- Galay V.J. 1983. Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19 (5): 1057-1090.
- Gurnell A.M. et Petts G.E., 2006. Trees as riparian engineers: the Tagliamento River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1558-1574.
- Goldrick, G. and Bishop, P., 2007. Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation of an alternative (the DS form). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 649-671.
- Gosse P., 1991. Prévision et reconstitution par modélisation numérique des concentrations de matières en suspension et d'oxygène dissous dans le Blavet à la fin de la vidange décennale du lac de Guerlédan, Septembre 1985. *Hydroécol. Appl.* 3, 257-300.
- Guarnieri, P. and Pirrotta, C., 2008. The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3-4): 260-273.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal. Res. U.S. Geol. Surv.*, 1: 421-429.
- Hare, P.W. and Gardner, T.W., 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica, . Morisawa, M., and Hack, J.T., eds., *Tectonic geomorphology: Proceedings of the 15th Geomorphology Symposia Series*, Binghamton, p. 76-104.
- Hauchard, E., 2001. De la dynamique non lineaire a la dynamique du relief en geomorphologie: Application aux bassins versants de la marge nord occidentales du Bassin de Paris. Pour l'obtention du titre de docteur de l'université de Rouen Thesis, Université de Rouen, Rouen.
- Lefebvre J.F., Marty J., Moreau N., Perrachon M., Poch V. 2008. Projet du complexe hydroélectrique de la romaine. Bureau d'Audiences Publiques sur l'environnement (BAPE). 145 pp.
- Lemarchand F., 2005. L'impact des barrages sur l'environnement planétaire. *La Recherche*, juin 2005, p.12.
- Magalligan F.J. et Nislow K.H. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Géomorphology*, 71:61-78.
- Pfaundler M. et al. 2007. Méthodes d'analyse et d'appréciations des cours d'eau. Hydrologie - régime d'écoulement. L'environnement pratique. Projet d'octobre 2007. Office fédéral de l'environnement, Berne, 104 p.
- Philips J.D., Slaterry M.C., Musselman Z.A., 2005. Channel adjustments of the lower trinity river texas, downstream of Livingston dam. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 1419-1439.

## Bibliographie

- Poff L.N., Allan J.D., Bain M.B., Prestegard J.R., Richey B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. 1997a. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 47 (11):769-784.
- Poirel A., Soyer G., Vindimian E., 1993, Préparation d'une vidange et suivi de la qualité de l'eau, Journées nationales d'études sur les petits barrages, 2 et 3 février 1993, Bordeaux, Cemagref éditions, 2-85362-356-4
- Poirel A., Vindimian E., Garric J., 1994. Gestion des vidanges de réservoirs, mesures prises pour préserver l'environnement et retour d'expérience sur une soixantaine de vidanges. 18<sup>ème</sup> congrès des grands Barrages, Commission Internationale des Grands Barrages, Q -ç-R.9. Durban 1994, 321-349.
- Pont D., B. Hugueny, U. Beier, D. Goffaux, A. Melcher, R. Noble, C. Rogers, N. Roset and S. Schmutz (2006). Assessing river biotic condition at the continental scale: a European approach using functional metrics and fish assemblages. *Journal of Applied Ecology*. 43: 70-80.
- Pont D. & N. Jepsen (editors) (2007). Intercalibration of methods to evaluate river EQ using fish. Rapport au Comité ECOSTAT. JRC Scientific and technical Reports. EUR 22878EN-2007. 192 pp.
- Pont D., B. Hugueny & C. Rogers (2007). Development of a fish-based index for the assessment of "river health" in Europe: the European Fish Index (EFI). *Fisheries Management and Ecology*, 14:427-439.
- Pont D., R. B. Hughes, T.R. Whittier & S. Schmutz (2009). A Predictive Index of Biotic Integrity Model for Aquatic-Vertebrate Assemblages of Western U.S. Streams. *Transaction American Fisheries Society*. 138: 292:305.
- Power M.D. 1998. Patterns and processes of sediment sifting in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, 22 (1):1-32.
- Rapport Ministère de l'économie et du développement durable RET, 2006. DIRECTION DES ETUDES ECONOMIQUES ET DE L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE. Petite Hydroélectricité et environnement. Rapport du groupe de travail. 93pp.
- Rapport Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. 2005. Les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France. Rapport DAMBRINE. 150pp.
- Rapport QUINET. 2008. La valeur tutélaire du carbone. Centre d'analyse stratégique, [http://www.strategie.gouv.fr/IMG/pdf/Valeur\\_tutelaire\\_du\\_carbone-rapport\\_final-juin2008.pdf](http://www.strategie.gouv.fr/IMG/pdf/Valeur_tutelaire_du_carbone-rapport_final-juin2008.pdf)
- Remini B., J.M. Avenard et A. Kettab (1997). Évolution dans le temps de l'envasement dans une retenue de barrage dans laquelle est pratiquée la technique du soutirage. *Houil. Blanc.*, 6, 54-57.
- Reyjol Y., B. Hugueny, D. Pont, P.G. Bianco, U. Beier, N. Caiola, F. Casals, I. Cowx, A. Economou, T. Ferreira, G. Haidvogel, R. Noble, A. de Sostoa, T. Vigneron & T. Virbickas (2007). Patterns in species richness and endemism of European freshwater fish. *Global Ecology and Biogeography*. 16: 65-75.
- Richter B.D., Baumgarthnee J., Powell J., Braun D.P. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10 (4): 1163-1174.
- Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I., Rigon, R., Ijjasz-Vasquez, E. and Bras, R.L., 1993. For earlier studies linking optimization principles to drainage networks. *Phys. Rev. Lett.*: 70-822.

## Bibliographie

- Rodriguez-Iturbe, I., 1993. The Geomorphological Unit Hydrograph. Chapter 3, Channel Network Hydrology.
- Rofes G., Trocherie F., Garat O., Vallon M., Cardinal H. 1991. Caractérisation des sédiments des retenues pour la prévision des risques écotoxicologiques liés aux vidanges. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 4-1 : 65-82.
- Roset N., G. Grenouillet, D. Goffaux, D. Pont & P. Kestemont (2007). A review of existing fish assemblage indicators and metrics. *Fisheries Management and Ecology*, 14:393-405.
- Schmutz S., I. Cowx, G. Haidvogel & D. Pont (2007). Fish-based methods for assessing European running waters: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, 14:369-380.
- Sherard J.J. et Erskine W.D. 1991. Complex response of a sand-bed stream to upstream impoundment. *Regulated Rivers: research and management*, 6: 53-70.
- Syndicat des énergies renouvelables. 2009. L'hydroélectricité : les chiffres en France et dans le monde. 10pp.
- Vericat D. et Batalla R.J. 2006. Sediment transport in large impounded river : the lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 79: 72-92.
- Vôrôsmarty C.J., Meybeck B., Sharma K., Green P., Syvitski J.P.M. 2003. Anthropogenic sediment retention : major global impact from registered river impoundments. *Global Planetary Change*, 39:169-190.
- Webb B. et Walling D., 1992. Long term water temperature behaviour and trends in a Devon, UK, river system. *Hydrological sciences journal* 37 (6) : 567-580.
- Williams G.P et Wolman G.P. 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circular 781, 48p.
- Wolman M.G. 1967. Two problems involving river channels and their background observations. *Northwest. Univ. Stud. Geogr.*, 14: 67-107.
- Wootton J.T., Parker M.S., Power M.E. 1996. Effects of disturbance on river food webs. *Science*, 273:1558-1561.

## Liste des figures

<i>Figure I-1 Pays producteurs d'énergie hydroélectrique (représenté selon la part de la production).</i> .....	7
<i>Figure II-1 Exemple de la production d'électricité durant une semaine en automne 2003.</i> .....	12
<i>Figure II-2 Tableau des catégories de petites centrales, (Ministère de l'économie et des finances et de l'industrie, RET, 2006).</i> .....	15
<i>Figure II-3 Selon l'ADEME, la petite hydraulique devrait produire 4 à 5 TWh supplémentaires pour respecter la directive européenne sur l'électricité renouvelable. L'objectif, à l'horizon 2010, est d'installer 1 000 MW de PCH, dont 200 à 300 MW en rénovant et optimisant les ouvrages existants.</i> .....	17
<i>Figure II-4 Schéma de l'évolution du contexte législatif et réglementaire</i> .....	21
<i>Figure II-5 Carte de positionnement du parc naturel régional (PNR) et du réseau hydrographique étudié.</i> ....	23
<i>Figure III-1 Evolution du lit d'un cours d'eau après la construction d'un barrage (d'après Petts et Gurnell, 2005).</i> .....	27
<i>Figure III-2 Trajectoire de la métamorphose fluviale en lien avec la colonisation et la croissance végétale (d'après Gurnelle et Petts, 2002).</i> .....	28
<i>Figure III-3 Répartition de la ripisylve sur les berges d'un cours d'eau (extraite du DOCOB Ariège et modifiée)</i> .....	30
<i>Figure III-4 Fragmentation et modifications du ruissellement en lien avec implantation d'ouvrages hydroélectriques dans le monde (CBD (Global Biodiversity Outlook ), 2006).</i> .....	31
<i>Figure III-5 Relation entre le déficit en oxygène dissous et le taux de MES à la station 1 et 2 (Rofes et al., 1991).</i> .....	36
<i>Figure III-6 Coût des externalités (Barrière, 2009).</i> .....	47
<i>Figure III-7 Les services écosystémiques (Barrière, 2009).</i> .....	48
<i>Figure III-8 Valeur économique totale d'un bien naturel (Barrière, 2009)</i> .....	50
<i>Figure IV-1 Carte synthétique de la réglementation en cours sur le bassin de l'Ariège.</i> .....	63
<i>Figure IV-2 Cours d'eau réservés et classés en Ariège et localisation des sous bassins versants (du Salat et de l'Ariège).</i> .....	64
<i>Figure IV-3 Exemple de carte représentant les tronçons de cours d'eau (CE) du Salat soumis à une réglementation.</i> .....	65
<i>Figure IV-4 Liste des ouvrages déjà en place sur la rivière du Salat.</i> .....	65
<i>Figure IV-5 Carte du modèle numérique de terrain (MNT 100m) de la région Midi Pyrénées et spécifiquement du département de l'Ariège (09). Sur le MNT est positionné l'ensemble des 33 bassins versants de l'étude. .</i> ..	66
<i>Figure IV-6 Carte présentant une évaluation des pentes de la BD Carthage avec les prises d'eau hydroélectriques superposées et proposées par Eaucea (2007).</i> .....	67
<i>Figure IV-7 Carte de localisation des stations hydrométriques et pluviométriques.</i> .....	68
<i>Figure IV-8 Inventaire et géoréférencement des ouvrages existants sur la zone d'étude.</i> .....	71
<i>Figure IV-9 Carte du productible annuel théorique (Mwh)</i> .....	72
<i>Figure IV-10 Les centrales hydroélectriques et les sites environnementaux spécifiques (Podeur, 2006) ;</i> .....	73
<i>Figure IV-11 Carte du nombre d'ouvrage par bassin versant.</i> .....	74
<i>Figure IV-12 Carte de la densité d'aménagements représentés par bassin versant sur le PNR.</i> .....	75
<i>Figure IV-13 Carte de la longueur de cours d'eau court-circuitée (km).</i> .....	76
<i>Figure IV-14 Méthode utilisée pour le calcul du point limite d'impact de l'installation d'un nouvel ouvrage sur un tronçon hydrologique.</i> .....	77

## Liste des figures et tableaux

Figure IV-15 Bassin versant du Garbet, localisation de ses aménagements et des pentes moyenne calculées sur le drain principal.....	78
Figure IV-16 Cartographie des tronçons hydrographiques en fonction de leur pente et localisation des aménagements déjà en place situés sur ces tronçons. ....	79
Figure IV-17 Calcul des zones de sensibilité en lien avec les ouvrages déjà en place. ....	80
Figure IV-18 Carte de sensibilité sur le bassin versant du Garbet. ....	81
Figure IV-19 Calcul sur le profil en long de la Bouigane de la dénivelée naturelle du cours d'eau. ....	82
Figure IV-20 Profils en long équilibré. ....	85
Figure IV-21 Profils en long concave ....	87
Figure IV-22 Profils en long convexe. ....	88
Figure IV-23 Profil en long mixte. ....	88
Figure IV-24 Analyse hypsométrique a) intégrale forte b) intégrale faible. ....	91
Figure IV-25 Carte de la valeur des valeurs d'intégrale hypsométrique.....	92
Figure IV-26 Cartographie de la densité de drainage par bassin versant sur l'ensemble de la région d'étude. ....	94
Figure IV-27 Carte de localisation des stations à disposition (9 stations pluviométriques et 11 stations hydrométriques) .....	96
Figure IV-28 Périodes de mesure de débit pour chacune des 11 stations de jaugeage. ....	96
Figure IV-29 : Courbes des débits journaliers et débits moyens mensuels des stations hydrométriques de la DIREN utilisés dans cette étude.....	98
Figure IV-30 Module mensuel interannuel.....	100
Figure IV-31 : Débit annuel maximum (rouge), moyen (noir) et minimum (gris).....	102
Figure IV-32 Intercorrélation pluie-débit (fenêtre pluriannuelle).....	103
Figure IV-33 Intercorrélation pluie-débit (fenêtre annuelle) .....	104
Figure IV-34 Variations mensuelles de l'indice NAO. ....	105
Figure IV-35 Description des deux phases de la NAO (ref). ....	105
Figure IV-36 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Foix et des valeurs de l'indice NAO. ....	106
Figure IV-37 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Hospitalet (1920-1960) et des valeurs de l'indice NAO. ....	106
Figure IV-38 Variation des valeurs de débit centrées réduites de l'Ariège à Hospitalet (1969-1985) et des valeurs de l'indice NAO. ....	107
Figure IV-39 Carte de localisation des stations de débit et de précipitations .....	108
Figure IV-40 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations à Hospitalet et de débit de l'Ariège à Mérens et Hospitalet. ....	109
Figure IV-41 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations et de débit du Salat et de l'Arac. ....	110
Figure IV-42 L'analyse par des spectres en ondelettes continues des stations de précipitations et de débit de l'Ariège à Foix.....	111
Figure IV-43 Débit à Foix naturalisé (Agosta, 2007) .....	114
Figure IV-44 Analyse R/S des débits journaliers (H=coefficient de Hurst ; compris entre 0.6 et 0.7 pour des cours d'eau non ou peu perturbés).....	115
Figure IV-45 Représentation bi-logarithmique de l'analyse spectrale des débits journaliers.....	116
Figure IV-46 Analyse multifractale et ajustement des débits journaliers.....	118

<i>Figure IV-47 Comparaison des hydrogrammes de débit journalier à Foix avant et après les aménagements et spectres associés (apparition de fréquences anthropiques dues au turbinage sur le spectre bleu par rapport au spectre rouge obtenu sur les données de 1924-1925).....</i>	<i>119</i>
<i>Figure IV-48 Evolution de la date de l'étiage annuel.....</i>	<i>120</i>
<i>Figure IV-49 Evolution de la date de la crue annuelle.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure IV-50 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit du Salat à Roquefort a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) débit moyen, g) débit de base (Richter et al., 1996).....</i>	<i>124</i>
<i>Figure IV-51 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit du Salat à Roquefort. ....</i>	<i>125</i>
<i>Figure IV-52 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit de l'Ariège à Foix a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) Fréquences des crues importantes, g) Niveau de base.....</i>	<i>126</i>
<i>Figure IV-53 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit de l'Ariège à Foix. ....</i>	<i>127</i>
<i>Figure IV-54 Evolution des paramètres de l'hydrogramme pré-impacts (bleu) et post-impacts (rouge) pour la série de débit de l'Ariège à Merens-Hospitalet a) Nombre de crues importantes, b) Nombre de petites crues, c) Durée des crues importantes, d) Durée de petites crues, e) Taux d'accroissement du débit, f) Fréquences des crues importantes, g) Niveau de base.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure IV-55 Ensemble des 33 paramètres potentiellement altérés et extraits de l'analyse de la série de débit de l'Ariège Merens et Hospitalet. ....</i>	<i>129</i>
<i>Figure IV-56 Récapitulatif des 33 paramètres extraits de l'hydrogramme et les influences visibles de leurs modifications sur l'écosystème (Richter et al., 1996) ....</i>	<i>130</i>
<i>Figure IV-57 Variation des hauteurs d'eau Sur le Salat à Roquefort. ....</i>	<i>130</i>
<i>Figure IV-58 Profil transversale du Salat avec les variations d'amplitude des hauteurs d'eau. ....</i>	<i>132</i>
<i>Figure IV-59 Zoom sur les variations de la hauteur d'eau du Salat à Roquefort. ....</i>	<i>133</i>
<i>Figure V-1 Représentation de quelques macro-invertébrés benthiques (Natura, 2000).....</i>	<i>134</i>
<i>Figure V-2 Qualité hydrologique en fonction de l'IBGN. ....</i>	<i>134</i>
<i>Figure V-3 Cartographie de l'évolution des IBGN de 1999 à 2004 sur les 5 stations disponibles localisées sur le PNR.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure V-4 Exemples de Diatomées des eaux de bonne qualité. (Le trait présent à côté de chaque Diatomée représente 1 µm).....</i>	<i>137</i>
<i>Figure V-5 Qualité hydrobiologique en fonction de la note IBD.....</i>	<i>137</i>
<i>Figure V-6 Notes IBD au Pont du Diable sur l'Ariège.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure V-7 Tableau de la qualité hydrobiologique en fonction de l'indice poisson ....</i>	<i>139</i>
<i>Figure V-8 Qualité des peuplements piscicoles sur les stations RHP du bassin Adour-Garonne en 2004. ....</i>	<i>141</i>
<i>Figure V-9 Zoom sur la carte de qualité des peuplements piscicoles sur les stations situées en Ariège et sur le territoire du PNR.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure V-10 Données de synthèse des peuplements piscicoles pour 5 cours d'eau de l'étude pour la période de (1994-2004). ....</i>	<i>143</i>
<i>Figure V-11 Espèces endémiques des Pyrénées (Desman et Euprocte) ....</i>	<i>145</i>
<i>Figure V-12 Evolution temporelle des IPR pour chaque station de mesure.....</i>	<i>146</i>

Figure V-13 Localisation spatiale et temporelle de l'évolution des indices qualité poissons (IPR) .....	147
Figure V-14 Part du débit réservé (rouge) par rapport au débit d'étiage naturel (bleu). .....	150
Figure V-15 : Evolution annuelle du débit d'étiage (Qmin5j en bleu) et du débit réservé (rouge). Les traits noirs représentent l'étiage moyen et le débit réservé réglementaire (1/10 <sup>ème</sup> du module interannuel), respectivement en haut et en bas. ....	151

## **Liste des tableaux**

Tableau II-1 Différents types de centrales hydroélectriques. ....	12
Tableau II-2 Impact potentiel des contraintes environnementales (Rapport DAMBRINE) .....	17
Tableau III-1/ Tarif de rachat de l'hydroélectricité par EDF Source : Meeddat .....	45
Tableau III-2 Usage et utilisation de l'eau .....	51
Tableau III-3 Coûts d'investissement total intérêts intercalaires compris des centrales hydrauliques (Source : MINEFI) .....	52
Tableau III-4 : Dépense de fonctionnement annuel .....	54
Tableau III-5 Émissions de CO2 des centrales électriques (en gCO2/kWh) Source : Ademe.....	56
Tableau III-6 Emissions comparées d'une PCH de 1000 kW fonctionnant 4500 heures par an et d'autres solutions de production d'électricité (en tonnes) Source : Données Systèmes Solaires n°119, 1997 .....	56
Tableau III-7 Rejets évités grâce à la production de 1 MW à partir d'une PCH (GERES - Ademe).....	57
Tableau III-8 Coûts unitaires des pertes de production selon les différents types de production Source : Test sur la confirmation des MEFM.....	58
Tableau III-9 Calcul de la perte énergétique due au relèvement du débit réservé (Source : Test sur la confirmation des MEFM) .....	59
Tableau IV-1 Variation de la pente.....	78
Tableau IV-2 Taille de la zone de sensibilité des tronçons hydrographiques en fonction de leur pente pour des ouvrages de 3m de retenue.....	79
Tableau IV-3 : Caractéristiques des profils en long des cours d'eau .....	90
Tableau IV-4 : Caractéristiques des stations hydrométriques utilisées.....	97
Tableau IV-5 : Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées .....	97
Tableau IV-6 Comparaison entre volume écoulé et volume de régulation .....	112
Tableau IV-7 Part des volumes retenus par rapport aux volumes écoulés à Foix (d'après Agosta, 2007).....	113
Tableau IV-8 Synthèse des résultats de l'analyse multifractale .....	119
Tableau V-1 Liste des stations IBGN situées sur les rivières du PNR. ....	135
Tableau V-2 : Débit d'étiage et débit réservé. ....	150

## **Glossaire**

**ADEME** : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

**CSP** : conseil supérieur de la pêche, devenu Onema\*

**DCE** : directive cadre sur l'eau

**EPIDOR** : établissement public interdépartemental Dordogne

**Géomorphologie** : est une discipline de la géographie physique et des géosciences. Mais son approche de plus en plus quantitative tend à la classer aujourd'hui dans les sciences physiques de la Terre. Elle décrit les formes de la surface de la Terre (relief) et explique leur formation et leur évolution, sous l'effet de la tectonique et de l'érosion.

**GW** : gigawatt = 1 million de kilowatts

**Hydrométrie** : est la branche de la métrologie qui concerne les mesures d'écoulement de l'eau.

**Hydrosystème** : Système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. Le concept d'hydrosystème insiste sur la notion de système et sur son fonctionnement hydraulique et biologique qui peuvent être modifiés par les actions de l'homme ensemble des éléments d'eau courante, d'eau stagnante, semi-aquatiques, terrestres, tant superficiels que souterrains et leurs interactions. Un hydrosystème peut comprendre un ou plusieurs écosystèmes. Voir aussi écosystème et fonctionnement des hydrosystèmes.

**LEMA** : loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006

**Morphométrie** : La morphométrie permet de décrire quantitativement un concept a priori vague : celui de formes générales dans un objet.

**Multifractale** : L'analyse multifractale a pour but l'étude de fonctions dont la régularité ponctuelle peut varier d'un point à un autre. Ces fonctions possèdent un ensemble de singularités que l'on appelle spectre. Réaliser l'analyse multifractale d'une fonction, c'est déterminer son spectre de singularités.

**MW** : mégawatt = 1 000 kilowatts (KW)

**Onema** : office national de l'eau et des milieux aquatiques

**SDAGE** : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

**STEP** : station de transfert d'énergie par pompage

**TWh** : térawatt-heure, 1 TWh = 1 milliard de kWh = 1 000 milliards de Wh