

# ETUDE THERMIQUE GLOBALE DU RHONE

## PHASE III

### Lot 4 : Synthèse et conclusions



*Ecologie des Eaux Douces*

Domaine Scientifique de la Doua, Bât. CEI-66, Bd Niels Bohr, BP 2132  
69603 VILLEURBANNE Cedex



**Cemagref** Aix-en-Provence, Unité de Recherche Hydrobiologie  
3275 Route de Cézanne, CS 40061  
13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5

**Cemagref** Lyon, Unité de Recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques  
3 bis, quai Chauveau CP 220  
69336 Lyon Cedex 09



**Université Lyon1, UMR CNRS 5023, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes  
Fluviaux**  
43 Boulevard du 11 Novembre 1918  
69622 Villeurbanne Cedex



**EDF - Recherche et Développement**  
Laboratoire National Hydraulique et  
Environnement  
6, Quai Watier - BP 49  
78401 CHATOU Cedex

**EDF - Division Technique Générale**  
Département Surveillance  
Service Environnement Aquatique  
B.P. 41 - 21 Av de l'Europe  
38040 GRENOBLE Cedex 9

**Avril 2006**

# Etude thermique globale du Rhône - Phase III

## Synthèse et conclusions

**Carrel Georges (1), Desaint Benoît (5), Fruget Jean-François (2), Khalanski Michel (6), Olivier Jean-Michel (3), Poirel Alain (5), Souchon Yves (4).**

**(1) Cemagref Aix-en-Provence, (2) ARALEP, (3) Université Lyon1, (4) Cemagref Lyon, (5) EDF DTG, (6) EDF R&D.**

### Résumé

L'étude thermique globale du Rhône, lancée en 2000 à l'initiative de la DRIRE Rhône-Alpes en partenariat avec la DIREN, l'Agence de l'Eau RM&C, le Service de la Navigation et EDF a pour objectif de déterminer l'incidence des rejets de chaleur cumulés sur le régime thermique du fleuve et les effets hydrobiologiques qu'ils engendrent. Après une description du régime thermique du Rhône (phase 1), et une évaluation de l'échauffement apporté par les CNPE (Centres Nucléaires de Production d'Electricité) en phase 2, la phase 3 concerne l'impact hydrobiologique de ces échauffements cumulés de l'amont vers l'aval.

Dans sa partie française, le Rhône est équipé d'aménagements hydroélectriques et de navigation qui engendrent des conditions hydro-morphologiques très différentes entre des écoulements semi-naturels rapides, des retenues à écoulements plus lents, des canaux, des tronçons court-circuités à débit régulé qu'empruntait le lit original du fleuve. A ces facteurs hydro-morphologiques qui structurent les habitats, se superposent depuis la fin des années 70 des changements dans la qualité chimique de l'eau (réduction de la pollution organique et de certaines pollutions toxiques), et le développement d'espèces exogènes qui influent sur la structure biologique et le fonctionnement de l'écosystème rhodanien.

Par ailleurs, au cours des trois dernières décennies, le régime thermique du Rhône a été principalement affecté par le changement climatique qui s'est traduit par un échauffement moyen d'environ 1,5°C sur le Haut-Rhône et 3,0°C sur le Bas-Rhône. Dans cette dérive générale des températures, la part des échauffements cumulés causés par les rejets thermiques des CNPE est estimée à environ 0,5°C sur le Haut-Rhône et 1,0°C à Aramon sur le Bas-Rhône (valeurs médianes sur les quinze dernières années).

Des traitements statistiques effectués sur les données de la surveillance hydro-écologique à long terme des CNPE indiquent que les modifications constatées sur les peuplements de macro-invertébrés et de poissons s'expliquent en premier lieu par les effets du changement climatique. En réponse à l'élévation de température, une modification générale dans la structure des peuplements de macro-invertébrés et de poissons est observée sur le Haut-Rhône au cours des 25 dernières années et particulièrement au cours de la dernière décennie : les espèces thermophiles et léniophiles sont favorisées alors que les espèces sténothermes d'eau froide et rhéophiles montrent une tendance à la régression. Ces évolutions sont plus nettement visibles aux stations à l'aval proche du CNPE de Bugey qui sont exposées en permanence à des échauffements plus élevés (environ + 5°C et + 9°C) que ceux réalisés après mélange du rejet du CNPE. Sur le Bas-Rhône, où les peuplements étaient déjà dominés par des taxons thermophiles et léniophiles, cette dérive est également observée mais elle est moins marquée.

Dans les tronçons court-circuités et les annexes hydrauliques, le régime thermique est en grande partie indépendant de la température du Rhône en période estivale ; dans les conditions actuelles ces milieux à haute valeur écologique ne sont pas affectés par les rejets thermiques des CNPE.

Enfin, quelques recommandations sont formulées. Elles portent sur des ajustements des programmes de surveillance hydro-écologique des CNPE et du programme de surveillance renforcé en cas de crise climatique ainsi que sur des actions de recherche. Dans ce domaine, il est préconisé de développer des modèles hydrodynamiques d'habitat sur les secteurs à fort enjeu écologique couplant les conditions hydrologiques et thermiques.

## SOMMAIRE

<b>1- Contexte et objectifs de l'étude .....</b>	<b>4</b>
<b>2- Les principaux facteurs de changement des peuplements du Rhône.....</b>	<b>7</b>
2.1. Facteurs hydro-morphologiques.....	7
2.2. Le régime thermique .....	10
2.2.1. Variations spatiales de température.....	10
2.2.2. Changements à long terme .....	11
2.2.3. Les variations thermiques à moyen terme (de la semaine au mois).....	14
2.2.4. Les variations thermiques à court terme (de l'heure à la journée).....	15
2.3. La qualité de l'eau. ....	18
<b>3- Evolutions de la faune et de la flore aquatique du Rhône en relation avec le régime thermique.....</b>	<b>20</b>
3.1. Macro-Invertébrés .....	20
3.1.1. Structure spatiale et aménagements .....	20
3.1.2. Evolutions temporelles.....	21
3.1.4. Les espèces introduites.....	26
3.1.5. Effets des rejets thermiques.....	29
3.1.6. Conclusions .....	33
3.2. Macrophytes.....	34
3.3. Poissons.....	36
3.3.1. Structure spatiale du peuplement de poissons et aménagements du Rhône.....	36
3.3.2. Evolution du peuplement et changement climatique .....	38
3.3.3. Effet des rejets thermiques du CNPE du Bugey. ....	40
3.3.4. Effet des facteurs hydrologique et thermique sur la reproduction des Cyprinidés dans le Bas-Rhône.....	43
<b>4- Quelques conclusions et recommandations .....</b>	<b>46</b>
<b>Références .....</b>	<b>53</b>
<b>Annexe : Stations du programme de surveillance hydro-écologiques des CNPE du Rhône.....</b>	<b>56</b>

## 1- Contexte et objectifs de l'étude

Le Rhône est le fleuve européen le plus équipé pour la production énergétique ; il occupe une place majeure dans le système électrique français. Avec leurs 14 réacteurs à eau légère, les quatre centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) actuellement en service produisent 22 % de l'électricité nucléaire française tandis que les centrales hydrauliques contribuent pour 26 % à la production d'électricité hydroélectrique nationale [1]. En 2004, les CNPE installés sur le Rhône ont produit environ 93,5 TWh et les centrales hydrauliques de la CNR ont produit 13,7 TWh.

En dehors de leur intérêt économique, ces sources d'énergie offrent, deux avantages majeurs : l'énergie nucléaire contribue à réduire les émissions industrielles de gaz à effet de serre tandis que l'hydroélectricité représente la plus grande part des énergies renouvelables dont la croissance dans la consommation nationale est imposée par la directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (SER).

Comme tous les cours d'eau de l'Union Européenne, le Rhône est par ailleurs engagé dans un processus d'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques en vue d'atteindre un « bon état écologique » ou un « bon potentiel écologique » d'ici à 2015 au titre de la directive cadre sur l'eau (DCE) du 22 décembre 2000, transcrite en droit français par la loi du 21 avril 2004. La mise en œuvre de la directive se fait par paliers selon la programmation suivante : état des lieux du district Rhône et côtiers méditerranéens, réalisé en 2005, programme de surveillance d'ici fin 2006, plan de gestion pour la fin 2009 (qui constituera une révision du SDAGE établi au titre de la loi sur l'eau de 1992), programme de mesures à définir d'ici 2009. Parmi les points marquants de la démarche définie par la DCE figurent une obligation de résultats basée sur des indicateurs biologiques et chimiques, la prise en compte des contextes sociaux et économiques et la participation des acteurs de l'eau et du public.

Une des « onze questions importantes » identifiée dans la première consultation officielle relative à l'état des lieux concerne l'hydroélectricité [2] : comment rendre compatible le développement d'une énergie renouvelable et la protection des milieux aquatiques ? Le même questionnement s'applique aux centrales nucléaires de grande puissance installées sur le Rhône (**Tableau 1**) ; il concerne en particulier l'incidence des rejets de chaleur cumulés sur le régime thermique du fleuve et les effets hydrobiologiques qu'ils engendrent.

C'est dans cette perspective que s'inscrit l'étude thermique du Rhône, lancée en 2000 à l'initiative de la DRIRE Rhône-Alpes en partenariat avec la DIREN, l'Agence de l'Eau RM&C, le Service de la Navigation et EDF. L'étude, définie par un Comité Technique et suivie par un Comité de pilotage, a comporté trois étapes enchaînées selon un ordre chronologique fondé sur les besoins de connaissances nécessaires pour réaliser l'étape suivante.

- Phase 1, en 2000 et 2001 : description du régime thermique du Rhône à partir de données collectées en 15 stations de mesures sur la période 1977-1999.

Phase 2, achevée en 2004 [3] : évaluation de l'échauffement cumulé de l'amont vers l'aval apporté par les CNPE, accompagnée d'une mise à jour de la Phase 1 jusqu'en 2003.

Phase 3, achevée en 2006 : impact hydrobiologique de ces échauffements cumulés.

Pendant la durée de l'étude, l'épisode caniculaire intervenu en 2003 a été l'occasion de renforcer le recueil des données et de procéder à une première synthèse des connaissances disponibles en qualité d'eau et en hydrobiologie sous l'égide de la DIREN [4]. Les équipes de chercheurs ayant répondu à la consultation pour réaliser la phase 3 (Cemagref Lyon et Aix-En-Provence, Université Lyon 1, ARALEP) ont procédé à une analyse plus approfondie des données en recourant à des traitements statistiques portant sur :

- les descripteurs du régime thermique du fleuve ayant une pertinence biologique [5],
- la qualité physico-chimique de l'eau [6],
- les peuplements d'invertébrés et de plantes aquatiques [7], [8],
- les peuplements de poissons [10], [11], [12].

Ce travail a été réalisé dans le but de décrire les évolutions spatiales et temporelles sur 25 à 30 ans en relation avec la composante naturelle de la température du fleuve et avec l'échauffement cumulé induit par les rejets thermiques des CNPE.

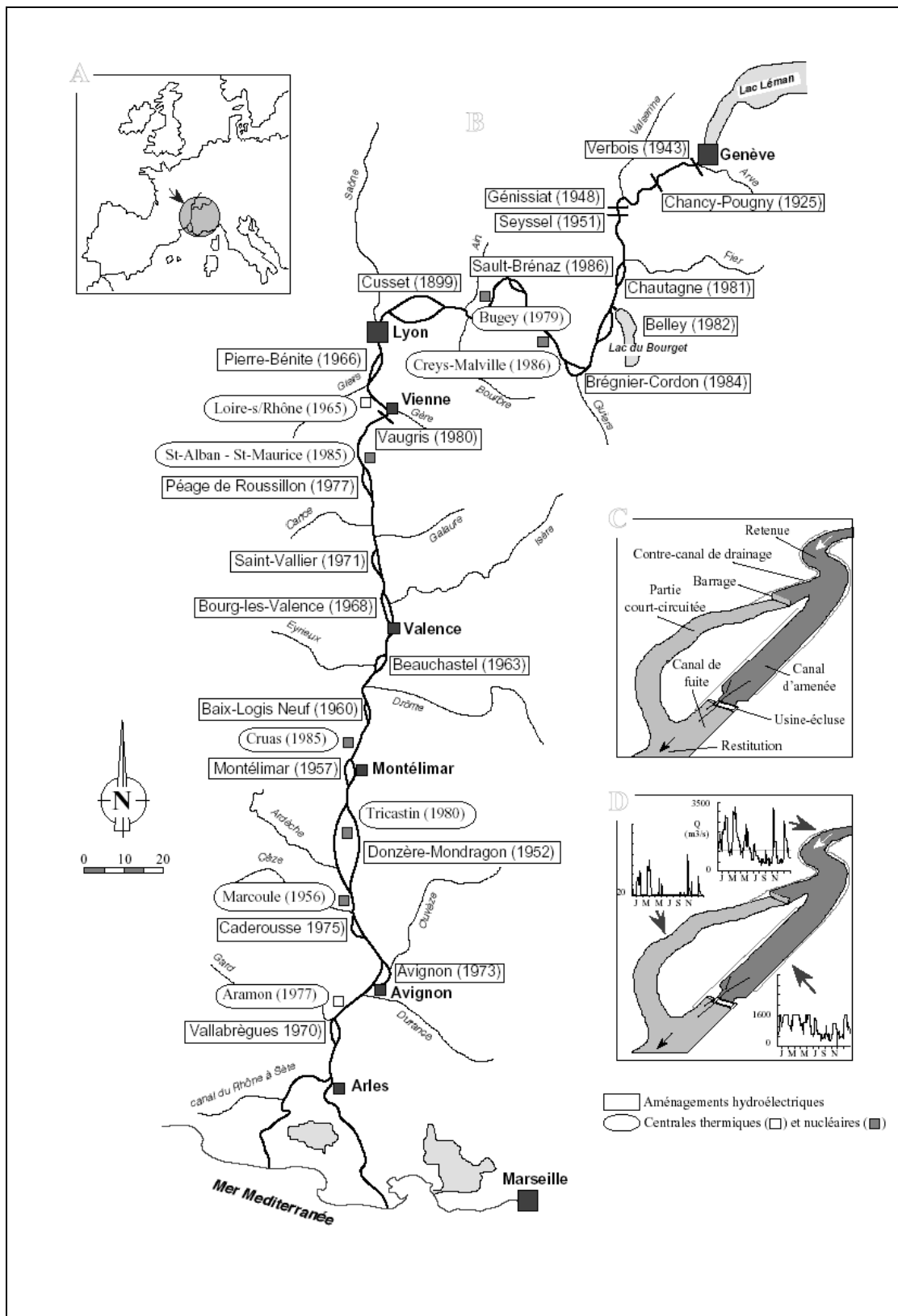
Le présent rapport de synthèse de la phase 3 reprend les principaux éléments figurant dans ces rapports en les complétant sur certains points par des informations permettant au lecteur de les mettre en perspective par rapport aux grands objectifs d'amélioration de la qualité écologique du fleuve.

**Tableau I:** L'équipement thermique du Rhône depuis 1970. En 2006, les principaux rejets thermiques sont produits par trois centres nucléaires de production d'électricité en circuit ouvert : Bugey, Saint-Alban et Tricastin.

RCG : réacteur graphite-gaz, REP : réacteur à eau pressurisée, RNR : réacteur à neutrons rapides, THF : chaudière thermique à flamme.

Site de centrales thermiques	Tranches et Puissance électrique	Année de mise en service	Année d'arrêt	Circuit de refroidissement		
				Type de circuit	Débit (m3/s)	Echauffement condenseur à P max.
Creys-Malville (RNR)	1200 MWe	1986	1997	ouvert	-	-
Bugey 1 (RGC)	540	1972	1994	ouvert	-	-
CNPE Bugey (REP) 2 & 3 4 & 5	2 x 900 MWe	1979		ouvert	2 x 46	10,1°C
	2 x 900 MWe	1979-1980		Fermé*	2x2,2*	12,5°C
Loire-sur-Rhône (THF)			2005	ouvert	-	-
CNPE Saint-Alban (REP)	2 x 1300 MWe	1986-1987		ouvert	2 x 64	12,6°C
CNPE Cruas (REP)	4 x 900 MWe	1984-1985		Fermé*	4x 4 *	11°C
CNPE Tricastin (REP)	4 x 900 MWe	1980-1981		ouvert	4 x 47	11°C
Marcoule (RNR)	233 Mwe	1973				
Aramon (THF)	700 Mwe			ouvert	36	11,5 °C

\* débits de purge des aéroréfrigérants



**Figure 1 :** Localisation des aménagements hydroélectriques et des centrales thermiques sur le Rhône français (Fruget [13]).

## 2- Les principaux facteurs de changement des peuplements du Rhône

### 2.1. Facteurs hydro-morphologiques

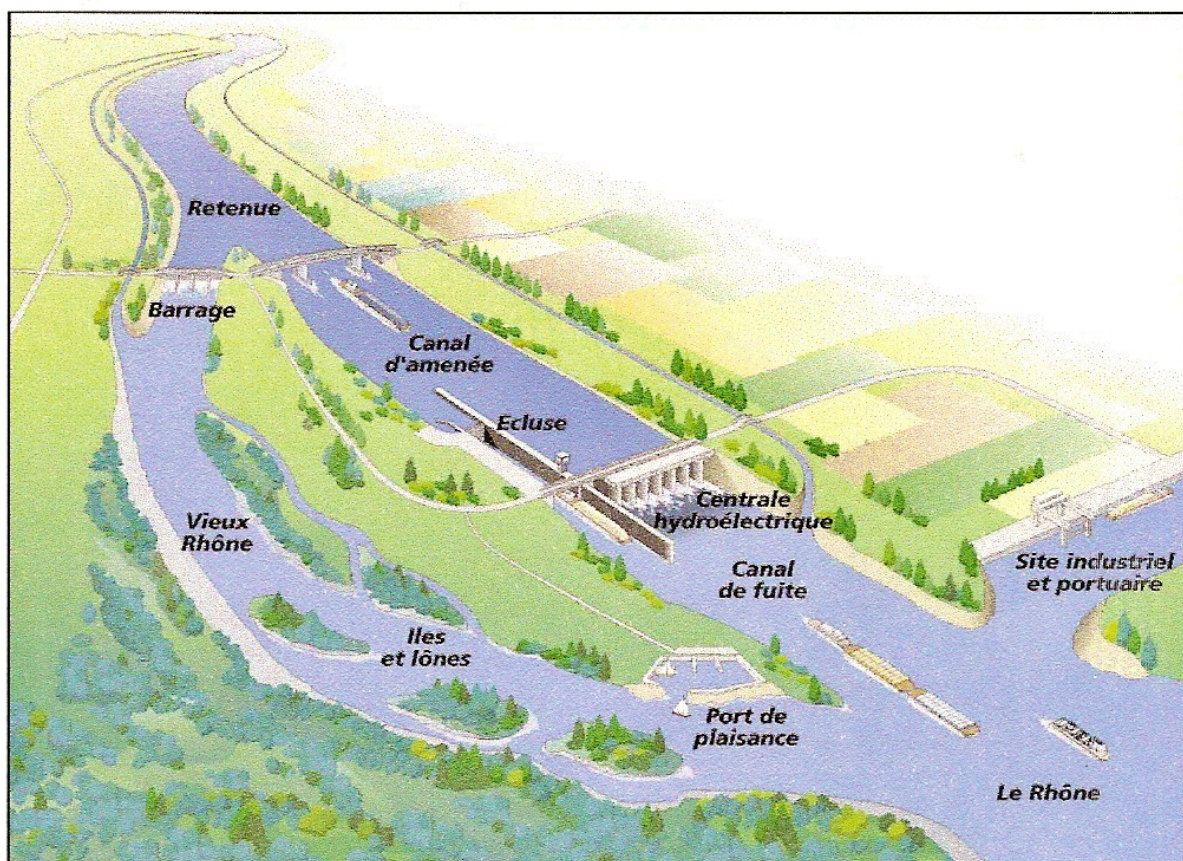
Dans sa partie française, le Rhône est équipé d'aménagements hydroélectriques et de navigation structurants qui engendrent des conditions hydro-morphologiques très différentes : une partie à écoulement semi-naturel rapide, des retenues à écoulement plus lent, des canaux, des tronçons court-circuités à débit régulé (lit original du fleuve).

Au début du 19<sup>ème</sup> siècle le Rhône, comme le Rhin, était un fleuve en grande partie à lit en tresses qui s'écoulait dans sa plaine alluviale en formant des bras secondaires (lônes) générateurs d'une mosaïque d'habitats aquatiques et de milieux humides très diversifiés. Dans la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, des digues longitudinales ont concentré les eaux dans un chenal principal et des bras secondaires aux berges stabilisées, le Rhône a été compartimenté en « casiers » [13]. A partir de 1950, les aménagements de la CNR ont créé des retenues hydroélectriques avec des canaux de dérivation et rendu le fleuve navigable sur 310 km.

Entre 1951 et 1986, la CNR, créée en 1933, construit 17 aménagements sur le Rhône. Douze d'entre eux sont des aménagements au fil de l'eau conçus selon le même schéma (**Figure 2**) : un barrage de dérivation constitue une retenue en amont, l'eau est dérivée dans un canal d'amenée vers une usine hydroélectrique équipée d'une écluse, après turbinage elle est évacuée dans le canal de fuite. En aval du barrage subsiste un tronçon court-circuité (le vieux Rhône) qui reçoit, en dehors des périodes de fortes crues, un débit réservé variable selon les aménagements (de 10 m<sup>3</sup>/s à 150 m<sup>3</sup>/s à Brégnier-Cordon en été) et parfois modulé selon la saison.

A Bugey, le Haut-Rhône est considéré comme semi-naturel, le courant reste fort sur toute la largeur du lit. A l'amont du site, la présence de lônes et d'îles délimitant des bras accentue la variété des faciès d'écoulement. Le régime hydraulique est toutefois sous la dépendance de grandes retenues situées en amont.

A l'aval de Lyon, les CNPE sont installés sur les retenues (Saint-Alban/Saint-Maurice-l'Exil sur la retenue de Péage-de-Roussillon et Cruas-Meysse sur la retenue de Montélimar) ou sur le canal de dérivation (Tricastin sur le canal de Donzère-Mondragon).



**Figure 2:** Schéma de l'aménagement type du Rhône (six aménagements sur le Haut-Rhône et 12 sur le Bas-Rhône). Document CNR.

La vallée est ainsi cloisonnée longitudinalement par une succession de barrages, de seuils sur certains tronçons court-circuités. Les échanges latéraux sont souvent supprimés, l'enfoncement du lit conduit à abaisser le niveau de la nappe alluviale [13]. Ces aménagements ont profondément modifié les peuplements de l'axe fluvial (voir 3.1.1, 3.3.1).

En regard de ces modifications hydro-morphologiques majeures de l'espace fluvial rhodanien, les seuils, les dispositifs de prise d'eau et de rejet créés pour les besoins des CNPE ont un impact physique réduit par leur faible emprise spatiale.

En aval de Lyon, sur le chenal principal du Rhône, en dehors des tronçons court-circuités, toutes les masses d'eau délimitées au titre de la DCE ont été pré-identifiées<sup>1</sup> dans la catégorie des masses d'eau fortement modifiées en raison des impacts hydro-morphologiques identifiés dans l'état des lieux dressé par l'Agence de l'Eau RM&C [1], [15]. En revanche, la masse d'eau du secteur de Bugey (de Sault-Brenaz au Pont de Jons), sur un secteur non

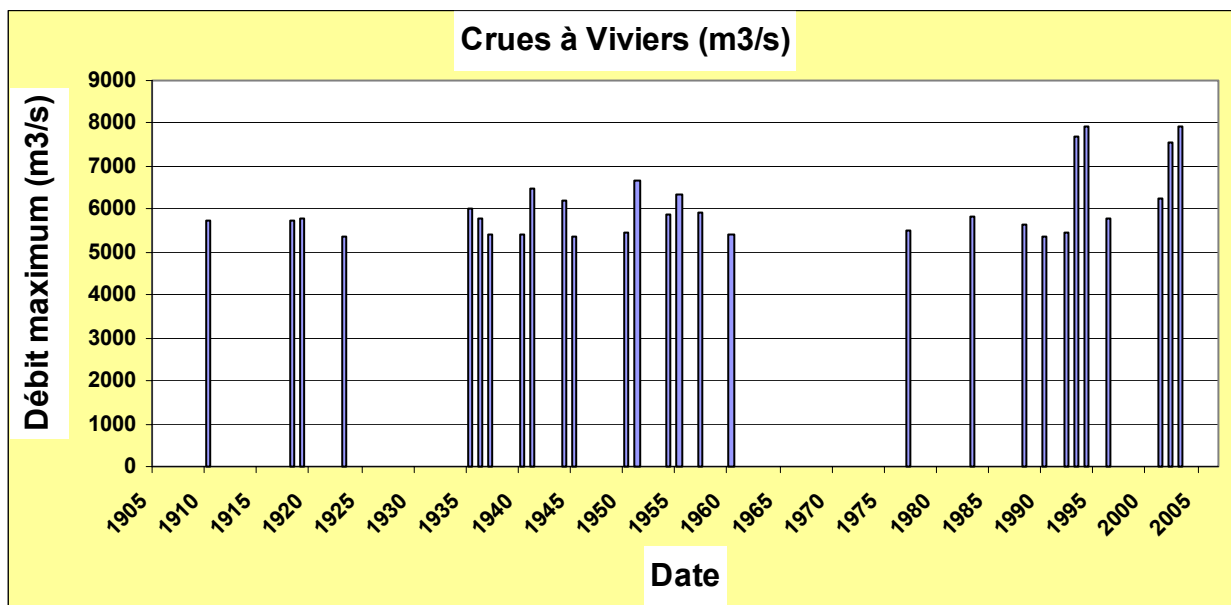
<sup>1</sup> Le processus comprend trois étapes : cette première **identification** des MEFM élaborée en parallèle par des groupes locaux et par les acteurs socio-professionnels, proposée au comité de bassin, suivie d'un travail sur l'état des lieux devant aboutir à une proposition de **désignation** (2006), complétée ensuite par un travail technique et économique pour une autre présentation en comité de bassin et une inclusion dans l'avant projet de SDAGE, fin 2006.

canalisé, n’est pas classée fortement modifiée ; les impacts hydro-morphologiques y sont considérés comme faibles (**Tableau II**).

**Tableau II:** Impacts hydro-morphologiques décrits dans l’état des lieux du Bassin RMC [15]. ME : masse d’eau. MEFM : Masse d’eau fortement modifiée. PMRH: Prélèvements et modifications du régime hydrologique. OT: Ouvrages transversaux affectant la continuité amont-aval. Amgt: Aménagements (fonctionnement des milieux connexes)

Limites amont-aval	Type de masse d’eau	CNPE/CPT	PMRH	OT	Amgt
Sault-Brenaz - Jons	ME	Bugey	Faible	Faible	Faible
Jons - Saône	MEFM		Moyen	Fort	Fort
Saône - Isère	MEFM	Saint-Alban	Moyen	Fort	Fort
Isère - Avignon	MEFM	Cruas-Tricastin	Faible	Moyen	Fort
Avignon - Beaucaire	MEFM	Aramon	Faible	Moyen	Fort

La régulation du débit en sortie du Léman, les apports des affluents et de la gestion de l’eau à court terme dans les retenues fonctionnant partiellement par éclusées déterminent le régime hydrologique du fleuve. Il est marqué par une grande variabilité de l’hydraulicité annuelle, avec des années sèches telles que 1989, 2003 et 2004 et des crues exceptionnelles (**Figure 3**) dont les effets biologiques se font sentir sur le Bas-Rhône (voir 3.3.4).



**Figure 3 :** Les grandes crues du Rhône depuis le début du XXème siècle. CNR [16].

**Des variations de débit sont observées à court terme** (quelques heures à quelques jours), sous l'effet de variations imposées à la frontière suisse et/ou du régime d'éclusées dans les retenues gérées par la CNR. La fréquence accrue des très bas débits, voisins de 200 m<sup>3</sup>/s, pourraient avoir des effets négatifs sur les stocks de poissons en «tirant vers le bas» le volume d'habitat disponible pour toute la faune aquatique [11].

Dans la perspective du plan de gestion du district qui sera établi pour atteindre les objectifs de la DCE, il est envisagé de « modifier la gestion des ouvrages existants afin de tirer bénéfice de leur disponibilité en eau tout en réduisant les impacts sur les milieux aquatiques » [2]. L'augmentation des débits réservés dans les tronçons court-circuités, dont la valeur écologique est reconnue et soulignée dans l'état des lieux du bassin, constitue un des éléments de la restauration de ces milieux, dans le cadre du programme décennal de restauration écologique et hydraulique du fleuve (« Programme décennal de restauration hydraulique et écologique du fleuve Rhône », DIREN Délégation de bassin RMC – 3 janvier 2000) et dans le nouveau plan Rhône approuvé en CIACT (Comité Inter-Ministériel d'Aménagement et de Compétitivité des Territoires) du 6 mars 2006.

## 2.2. Le régime thermique

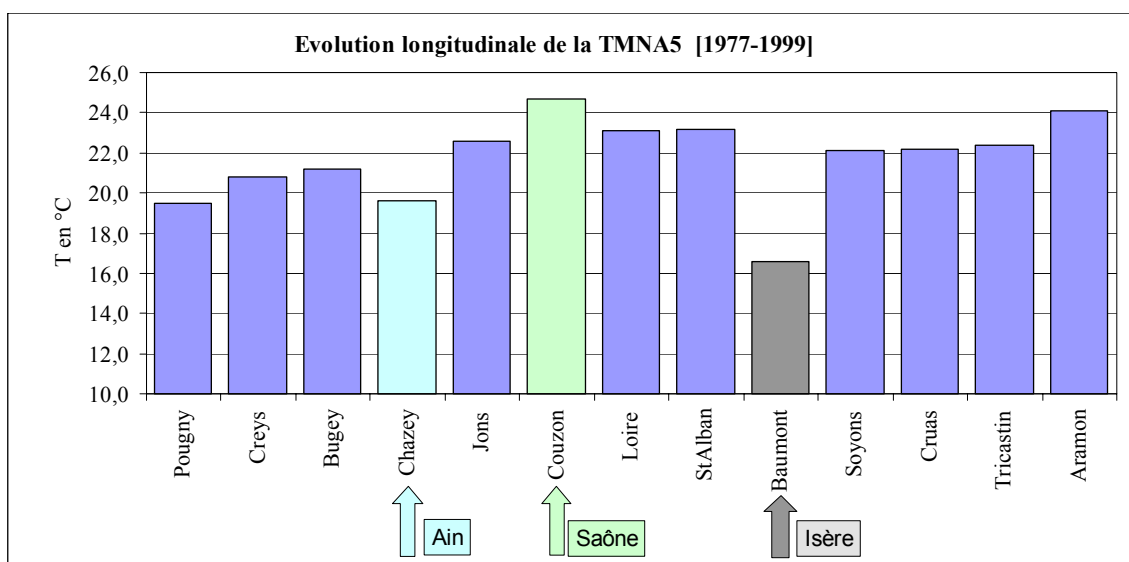
Grâce aux mesures en continu de la température de l'eau, intégrées sur une heure à l'amont et à l'aval des centrales thermiques exploitées par EDF, divers traitements statistiques ont été réalisés avec deux objectifs :

- caractériser l'évolution du régime thermique sur le long terme en utilisant quelques variables (métriques thermiques) analysées lors de périodes de l'année regroupées en fonction des cycles biologiques des espèces de poissons,
- mettre en évidence les variations de température intervenant à moyen terme et à court terme.

### 2.2.1. Variations spatiales de température

#### Evolution longitudinale de la température du Rhône

Pour ce qui concerne l'écoulement principal du fleuve, le régime thermique du Rhône est principalement déterminé par la température de l'eau sortant du lac Léman et par la température des principaux affluents. Ces affluents produisent en été une discontinuité thermique plus ou moins importante en échauffant le fleuve dans le cas de la Saône ou en le refroidissant dans le cas de l'Ain et surtout de l'Isère (**Figure 4**).



**Figure 4:** Evolution longitudinale de la température du mois le plus chaud de période de retour 5 ans (TMNA5). Cette variable met en évidence les contrastes thermiques entre le Rhône et ses principaux affluents (Ain, Saône, Isère) et leur influence respective. Période 1977 à 1999. In Poirel *et al.* [17].

### Hétérogénéité spatiale.

Dans les rivières, des échanges d'eau permanents se font entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. Les échanges avec la nappe alluviale dépendent des différences de niveau d'eau entre la rivière et la nappe. Une augmentation significative du débit faisant monter le niveau d'eau dans la rivière recharge la nappe. Inversement, une réduction du débit s'accompagne d'une chute de niveau et induit des apports d'eau en rivière par la nappe. Ces apports de nappe, plus froids en été que l'eau de la rivière créent une mosaïque thermique près du fond. Les zones les plus froides qui peuvent abriter momentanément des organismes et leur permettre de passer sans dommage les périodes critiques de maximum thermique. Ces « refuges thermiques » peuvent également fonctionner l'hiver avec des apports de nappe plus chauds que le cours d'eau.

Les affluents dont l'eau est plus fraîche en été que l'eau du fleuve peuvent aussi constituer des zones refuges pour les poissons.

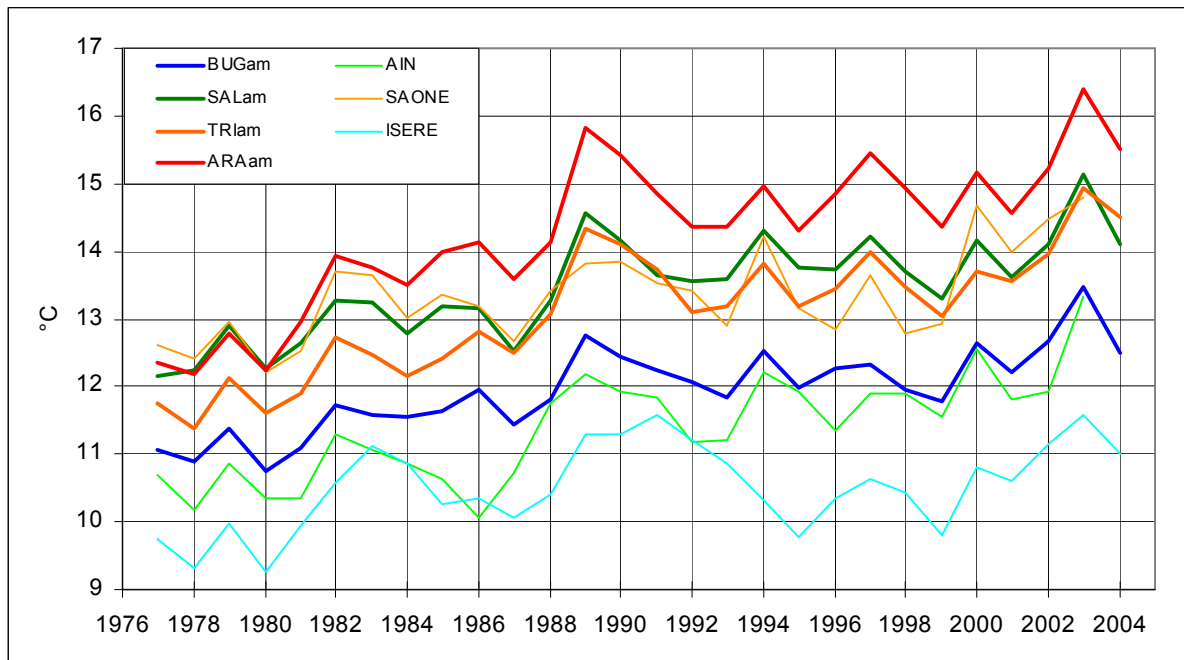
### 2.2.2. Changements à long terme

Au cours des 25 dernières années, le changement le plus évident est une augmentation très significative de la température moyenne annuelle (**Figure 5** et **Tableau III** [3]). Une même tendance est observée sur la même période pour les affluents du Rhône [6] et de la Loire [33].

La tendance à l'augmentation de la température de l'eau est plus marquée dans le Bas-Rhône qu'en amont de Lyon. A l'amont immédiat des sites de production, de 1977 à 2004, l'écart sur la température moyenne annuelle varie entre + 1,6°C à Bugey et + 3,0°C à

Aramon ; la chronique disponible, marquée par des années plutôt froides en début de période et par le record de 2003 en fin de période, peut toutefois légèrement accentuer la tendance.

Les écarts maximums sur les moyennes annuelles atteignent 2,8°C à Bugey et 4,2°C à Aramon (Figure 5), [5].



**Figure 5:** Evolution de la température moyenne annuelle entre 1977 et 2004 des quatre stations du Rhône (amont des CNPE) et des trois principaux affluents : Ain, Saône et Isère.

**Tableau III:** Evolution de la température moyenne sur des périodes de cinq ans entre 1977 et 2004 des quatre stations du Rhône (amont des CNPE) et des trois principaux affluents : Ain, Saône et Isère.

Période	1977-79	1980-84	1985-89	1990-94	1995-99	2000-04
BUGam	11.1	11.3	11.9	12.2	12.1	12.7
SALam	12.4	12.8	13.3	13.9	13.7	14.2
TRlam	11.8	12.2	13.0	13.6	13.4	14.1
ARAam	12.4	13.3	14.3	14.8	14.8	15.4
AIN*	10.6	10.8	11.1	11.7	11.7	12.4
SAONE*	12.7	13.0	13.3	13.6	13.1	14.5
ISERE	9.7	10.3	10.5	11.1	10.2	11.0

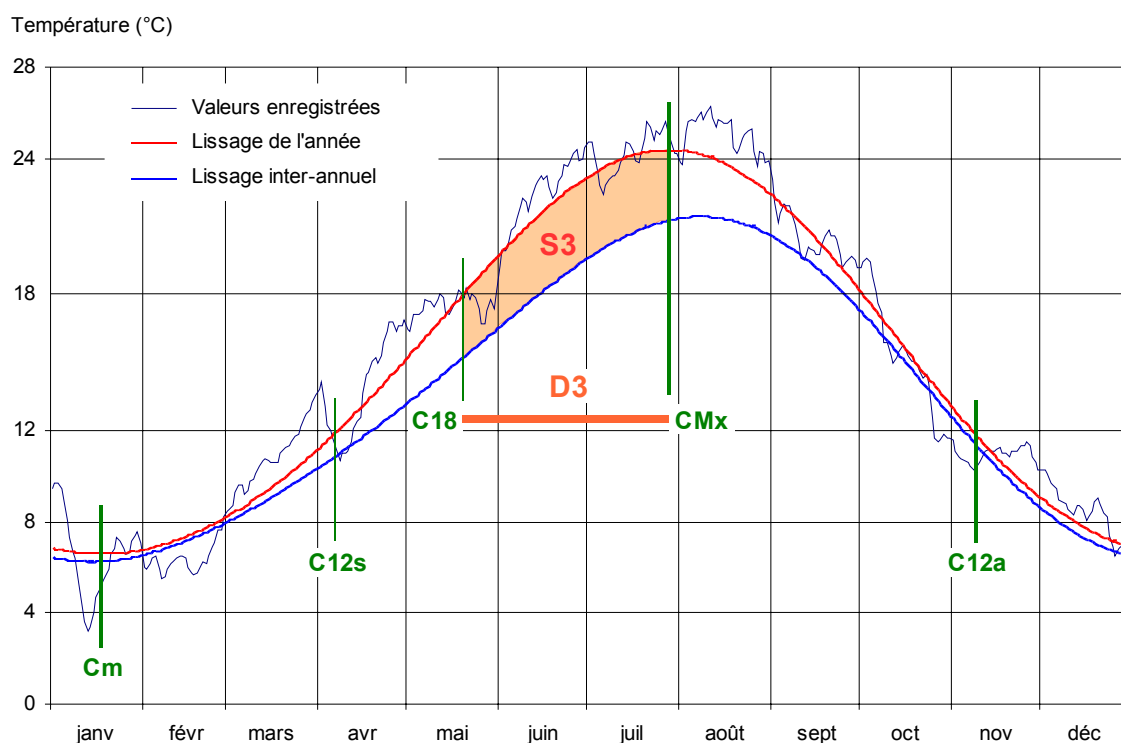
\* : sans 2004

Le régime thermique du fleuve a été analysé [5] en découpant l'année en 5 périodes successives sur la base de seuils thermiques ayant une signification biologique. Le découpage est réalisé à partir d'un lissage annuel par séries de Fourier de la courbe des températures journalières. Les périodes ont ainsi été définies :

- du minimum thermique annuel de l'année (n) au seuil printanier 12°C, soit de mi-janvier à début avril,
- du seuil printanier 12°C au seuil 18°C, soit de début avril à mi-mai,
- du seuil estival 18°C au maximum thermique, soit de mi-mai à fin juillet,
- du maximum thermique au seuil automnal 12°C, soit de fin juillet à début novembre,
- du seuil automnal 12°C au minimum thermique de l'année (n+1), soit de début novembre à mi-janvier.

Pour chaque période, trois variables ont été définies (**Figure 6**) :

- C : le jour de l'année de début de la période,
- D : la durée de chaque période,
- S : somme des écarts thermiques entre les courbes lissées inter-annuelle et annuelle pour chaque période, équivalente à un cumul de degrés-jours référencés par la courbe lissée inter-annuelle.



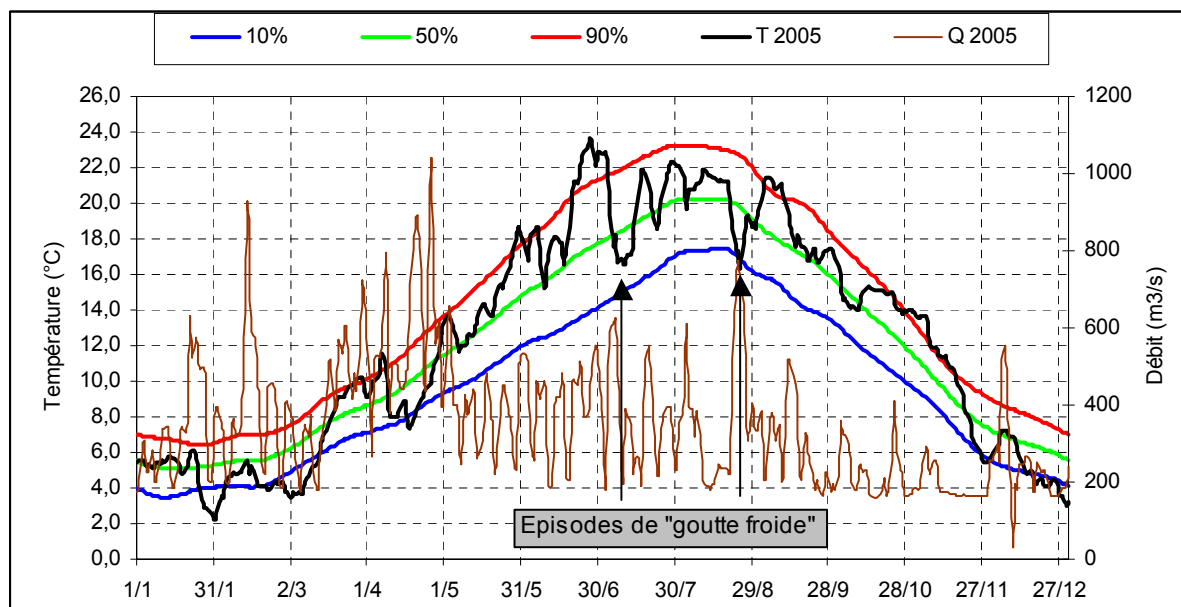
**Figure 6:** Variables thermiques à Tricastin amont pour l'année 2003. La courbe supérieure est la température lissée autour des valeurs moyennes journalières, la courbe inférieure est obtenue par lissage sur toute la série de valeurs de 1977 à 2004. Les valeurs de C sont indiquées pour 2003, S3 (somme en degrés-jours) est l'aire comprise entre les deux courbes, limitée par C18 (seuil 18°C) et par Cmx (maximum thermique annuel).

L'analyse des données indique quatre tendances caractérisant le changement climatique dans les dernières décennies.

- 1) Une augmentation de la somme des écarts thermiques  $S$  est observée sur toutes les périodes, avec un maximum pour deux variables : la somme des écarts thermiques entre le seuil  $18^{\circ}\text{C}$  et le maximum annuel ( $S3$ ) et la somme des écarts thermiques entre le maximum et le seuil automnal  $12^{\circ}\text{C}$  ( $S4$ ).
- 2) Une précocité des seuils thermiques  $12^{\circ}\text{C}$  et surtout  $18^{\circ}\text{C}$ .
- 3) Une diminution de la durée des périodes  $D1$  et  $D2$  jusqu'au seuil  $18^{\circ}\text{C}$ , et une augmentation de la durée des périodes  $D3$  et  $D4$ .
- 4) Une diminution de la période  $D5$ , la plus froide

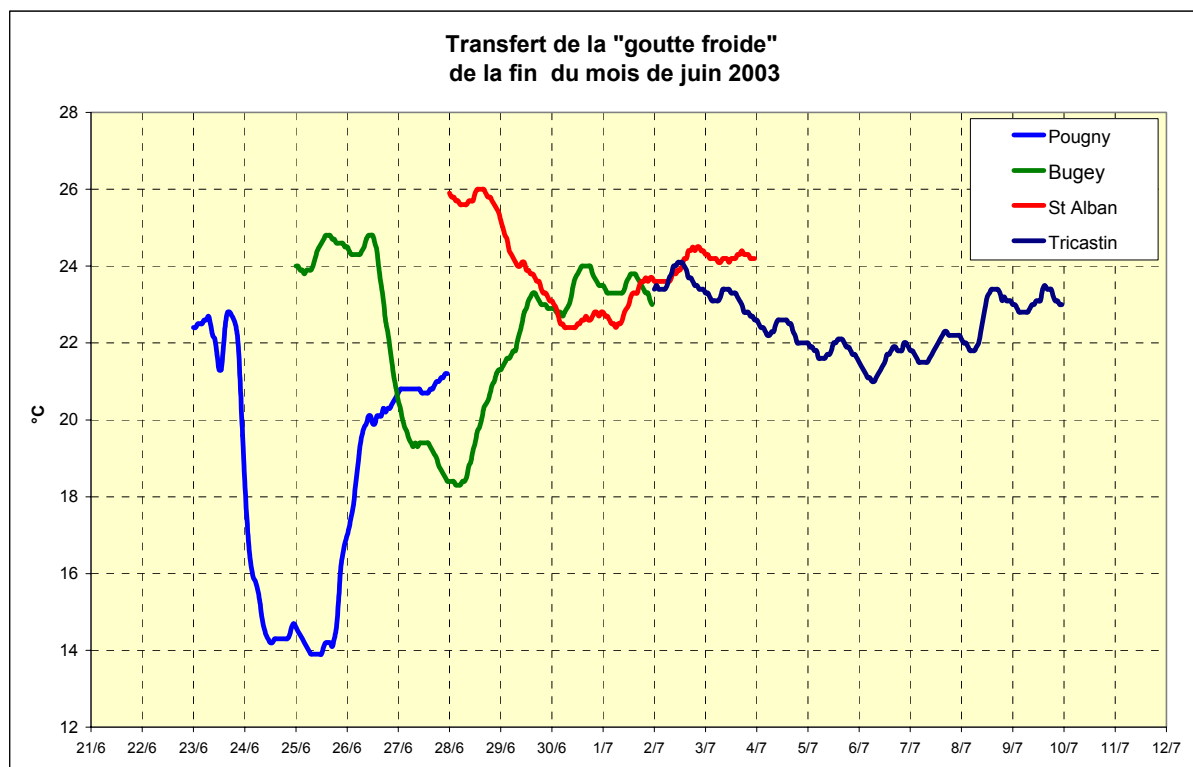
### 2.2.3. Les variations thermiques à moyen terme (de la semaine au mois)

Les fluctuations conjuguées des débits respectifs du Rhône et de ses affluents et des facteurs météorologiques induisent des variations de température sensibles à l'échelle de la semaine et du mois. Une des caractéristiques les plus remarquables du régime thermique du Rhône réside dans les épisodes de chute brutale de la température qui durent de quelques jours à plusieurs semaines. Ils trouvent leur explication dans la remontée d'eau profonde et plus froide dans le Léman. Ces épisodes, appelés « gouttes froides », sont particulièrement visibles en saison chaude (**Figure 7**). Sur la chronique thermique du Rhône à l'amont du site de Bugey en 2005, ils forment de profondes échancrures autour de la courbe thermique moyenne.



**Figure 7:** Chronique des températures et des débits moyens journaliers en 2005 en amont du CNPE de Bugey. Evolution des quantiles de température (10%, 50%, 90%) sur la période 1977-2004 [28].

Sur le Haut-Rhône, la chute de température peut atteindre 9°C en 24 heures. Les gouttes froides balayent ensuite le Rhône en se déplaçant vers l'aval avec une vitesse de propagation nettement plus lente que la propagation des variations de débit. Sur les données relatives à la goutte froide de fin juin 2003 représentées sur la **Figure 8**, deux traits majeurs de sa propagation apparaissent clairement : une atténuation progressive de l'amplitude thermique et une augmentation de la durée de l'épisode vers l'aval.



**Figure 8:** Evolution de la température du Rhône depuis Pougny jusqu'à Tricastin lors d'un épisode de goutte froide en juin-juillet 2003 [3].

#### 2.2.4. Les variations thermiques à court terme (de l'heure à la journée)

De par leurs conditions morpho-dynamiques spécifiques, les tronçons court-circuités (TCC) et les annexes hydrauliques peu profondes et à faible écoulement présentent en période estivale un régime thermique différent de celui du chenal. Cette différence se manifeste dans ces milieux par une élévation plus ou moins marquée de la température moyenne et surtout par l'accentuation de l'amplitude thermique journalière. Ces phénomènes sont renforcés par la présence d'un seuil dans le TCC.

Sous l'effet de l'apport d'énergie par le rayonnement solaire la masse d'eau s'échauffe pendant la journée tandis qu'elle se refroidit pendant la nuit. Il s'ensuit des variations nyctémérales de température de faible amplitude dans les cours d'eau profonds mais qui peuvent être beaucoup plus importantes dans les rivières peu profondes.

Sur le Rhône, les variations nyctémérales de température restent de faible amplitude. D'après les résultats de l'étude Rhône phase I, sur la période 1977-1999, l'amplitude

moyenne est de 0,7°C à Bugey et de 0,6°C à l'amont de Saint-Alban dans la retenue. Au cours de la même période, pendant les mois chauds, de juin à septembre, l'amplitude moyenne est de 1,1°C à Bugey et seulement de 0,7°C à St Alban amont.

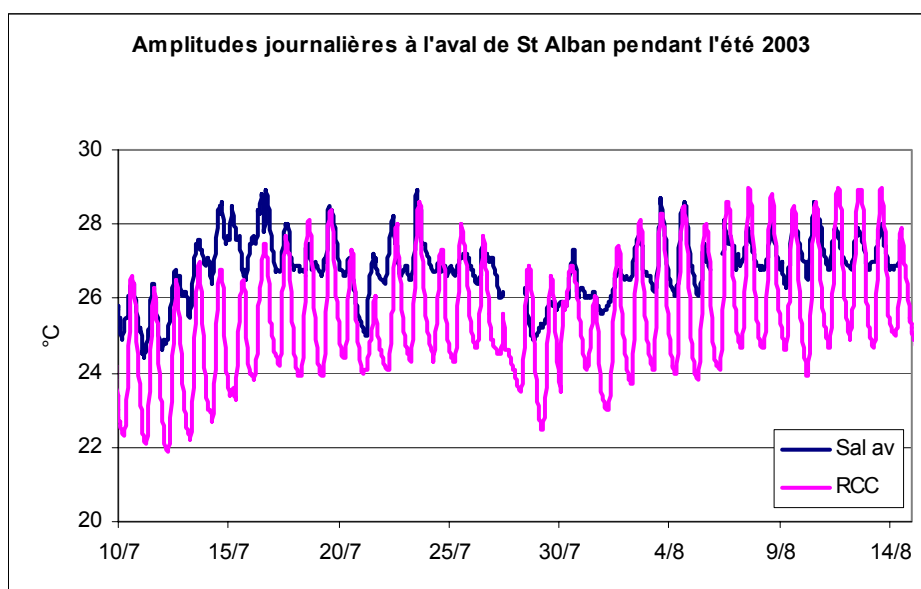
Il n'en est pas de même dans les tronçons court-circuités où des débits réduits et un étalement de la lame d'eau sur un lit large favorisent les échanges thermiques air-eau. Les variations nyctémérales dans ces tronçons peu profonds peuvent dépasser 4°C. En 2003, l'amplitude journalière dans le tronçon court-circuité de l'aménagement de Péage-de-Roussillon en aval de Saint-Alban atteint 2,7°C en moyenne avec un maximum de 5,0°C ; par comparaison, l'amplitude journalière à l'entrée du canal de dérivation, à la station « SAL aval », était de 1,0°C en moyenne et de 2,5°C au maximum (Tableau IV, Figure 9).

**Tableau IV:** Températures moyennes et amplitudes thermiques dans le Rhône et dans le tronçon court-circuité de Péage de Roussillon en aval du CNPE de Saint-Alban en 2003.

Station	Température moyenne		Amplitude journalière		Amplitude maximum journalière
	annuelle	De juin à septembre	Moyenne annuelle	De juin à septembre	
Saint-Alban aval *	16,5	25,1	1,0	1,3	2,5
RCC	16,5	23,8	2,7	3,4	5,0

\* station mi-rejet.

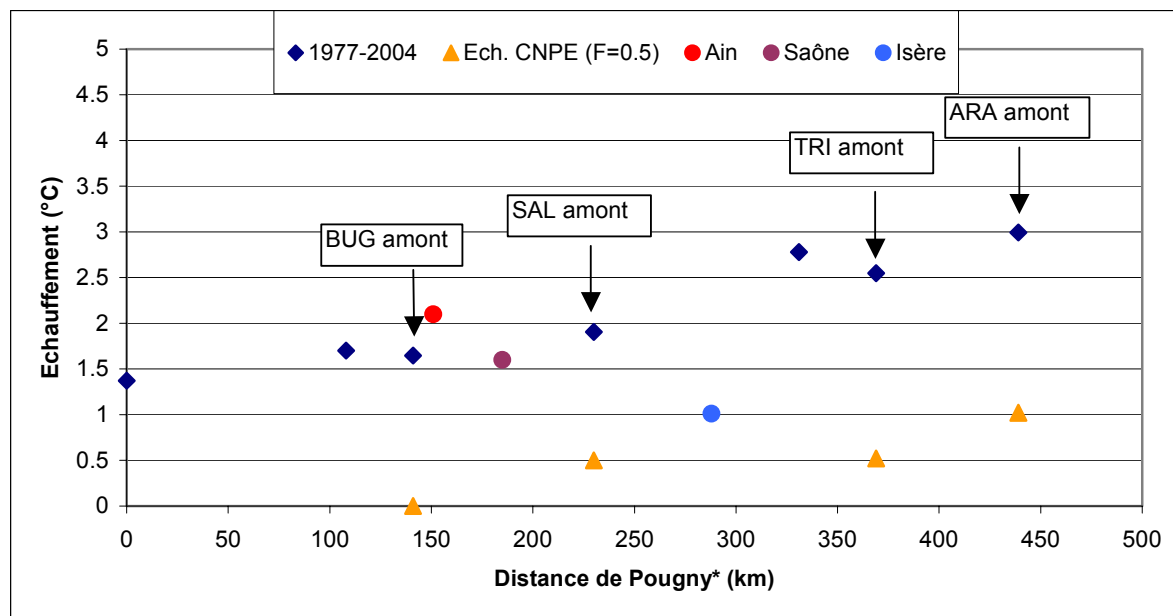
A Péage-de-Roussillon, seule section du Rhône où un rejet thermique est susceptible de modifier le régime thermique d'un ancien chenal du fleuve par un apport direct, la température des eaux est essentiellement dépendante des conditions climatiques externes et le contexte hydraulique local est nettement moins influencé par l'échauffement résiduel du CNPE que le chenal, les canaux d'amenée et de fuite des usines hydro-électriques.



**Figure 9:** Chronique des températures mesurées à la station aval de Saint-Alban (Sal mi-rejet) et dans le Rhône court-circuité (RCC) en juillet et août 2003. La position des stations est donnée sur la carte en annexe.

### 2.2.5. Modifications induites par les rejets des CNPE

Afin de comparer les échauffements résiduels induits par les rejets thermiques à la dérive climatique, des données de l'étude thermique phase II [3] ont été synthétisées sur la **Figure 10**. Le site de Cruas n'a pas été pris en compte sur la figure en raison des apports thermiques négligeables par ce CNPE dont toutes les tranches sont en circuit fermé.



\* : Entrée du Rhône en France

**Figure 10:** Échauffements résiduels produits par les rejets des CNPE de Bugey, Saint-Alban, Tricastin (médiane sur la période 1991-2003) et échauffement moyen sur la période 1977-2004 en 7 stations du Rhône de Pouigny à Aramon et sur les principaux affluents.

Ce graphique permet de comparer l'évolution des températures moyennes observées en amont des 4 centrales thermiques de Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Aramon (tendance linéaire calculée sur 1977-2004) et les médianes des résiduels des échauffements des CNPE aux mêmes points. Il montre que l'échauffement résiduel médian à l'amont des sites de Saint-Alban, Tricastin et Aramon engendré par les rejets thermiques des CNPE (+ 0,5°C à + 1°C) est nettement inférieur à l'élévation de température constatée de l'amont de Bugey (+ 1,5°C) à l'amont d'Aramon (+ 3,0°C).

De manière à éviter toute interprétation abusive de ces courbes, il faut attirer l'attention sur deux points :

- d'une part, il s'agit d'échauffements résiduels médians, ce qui implique que des valeurs d'échauffement plus élevées sont observées avec une moindre fréquence,
- d'autre part, l'effet climatique ne se cumule pas directement aux échauffements induits par les rejets thermiques ; en absence de tout rejet, la courbe d'évolution thermique due aux facteurs climatiques ne serait pas rigoureusement égale à la soustraction des deux courbes présentées sur la figure.

Dans l'hypothèse d'une poursuite de la tendance climatique sans modification significative de l'hydrologie, la part des apports thermiques par les centrales devrait diminuer dans l'avenir.

## 2.3. La qualité de l'eau.

### 2.3.1. Paramètres classiques

Une analyse multifactorielle (Analyse en Composantes Principales Normées) réalisée sur les 13 stations du bassin rhodanien faisant l'objet d'un suivi permanent [6], met en évidence une différence entre le Haut-Rhône et son affluent l'Ain d'une part et le Bas-Rhône en aval de Lyon et la Saône d'autre part. Le Bas-Rhône et la Saône sont plus minéralisés, plus riches en nitrates et en phosphates que le Haut-Rhône. L'Ain présente les caractéristiques du Haut-Rhône, avec toutefois des épisodes de sursaturation plus forte en oxygène dissous.

L'analyse de la variabilité inter-annuelle indique une tendance à la baisse du phosphate et de l'azote ammoniacal et de la DBO, indicateurs de pollutions d'origine urbaine. On note en revanche une tendance à l'augmentation de la teneur en nitrates, principalement d'origine agricole, et de la conductivité sur le Haut-Rhône qui pourrait être liée au salage hivernal du réseau routier.

Selon la Circulaire DCE 20512 [18], les limites de bonne qualité pour l'oxygène dissous se situent dans l'intervalle de 6 à 8 mg/L au centile 90. Sur tout le Rhône, l'oxygénation de l'eau reste satisfaisante, même lors de l'épisode caniculaire de 2003 (**Tableau V**). A cette occasion, il a été observé des variations nyctémérales très importantes d'oxygène dissous dans le tronçon court-circuité à Péage-de-Roussillon : la végétation fixée est responsable de ces variations dans ce tronçon où l'eau s'écoule sur une faible profondeur.

**Tableau V** : Concentration en oxygène dissous (mg/L) de juin à septembre 2003.

CNPE	Sites	Percentile 25	Percentile 75
Bugey	Amont CNPE	7,0	8,1
	Aval CNPE	7,1	8,5
Saint-Alban	Amont CNPE	6,6	7,7
	Aval CNPE	6,5	7,9
Rhône	RCC Péage	4,6	8,6
Cruas	Amont CNPE	6,0	7,2
	Aval CNPE	6,3	7,8
Tricastin	Amont CNPE	6,3	8,4
	Aval CNPE	5,9	7,1

L'état des lieux réalisé au titre de l'application de la DCE [31], prévoit l'atteinte du bon état physico-chimique en 2015 (**Tableau VI**).

**Tableau VI:** Qualité physico-chimique prévue en 2015 d'après l'état des lieux du Bassin RM&C [15].

MOOX : Matières Organiques Oxydables AZOT : Matières Azotées NITR : Nitrates PHOS : Matières Phosphorées. Bon : bon état

Limites amont-aval	Type de masse d'eau	CNPE/CPT	MOOX	AZOT	NITR	PHOS
Sault-Brenaz - Jons	ME	Bugey	Bon	Bon	Bon	Bon
Jons - Saône	MEFM		Bon	Bon	Bon	Bon
Saône - Isère	MEFM	Saint-Alban	Bon	Bon	Bon	Bon
Isère - Avignon	MEFM	Cruas-Tricastin	Bon	Bon	Bon	Bon
Avignon - Beaucaire	MEFM	Aramon	Bon	Bon	Bon	Bon

### 2.3.1. Polluants potentiellement toxiques

Malgré une réduction des rejets de substances potentiellement toxiques sur les sites industriels du « corridor de la chimie » en aval de Lyon, l'état des lieux de la DCE considère que la qualité chimique restera moyenne pour les métaux et sur une partie du fleuve pour les pesticides et les micro-polluants organiques

**Tableau VII:** Qualité chimique prévue en 2015 d'après l'état des lieux du Bassin RMC [15].

MTx : Métaux PEST : pesticides MPOr : Micropolluants organiques Bon : bon état, Moyen : état moyen.

Limites amont-aval	Type de masse d'eau	CNPE/CPT	MTx	PEST	MPOr
Sault-Brenaz - Jons	ME	Bugey	Moyen	Bon	Moyen
Jons - Saône	MEFM		Moyen	Bon	Moyen
Saône - Isère	MEFM	Saint-Alban	Moyen	Moyen	Moyen
Isère - Avignon	MEFM	Cruas-Tricastin	Moyen	Moyen	Moyen
Avignon - Beaucaire	MEFM	Aramon	Moyen	Bon	Bon

### 3- Evolutions de la faune et de la flore aquatique du Rhône en relation avec le régime thermique.

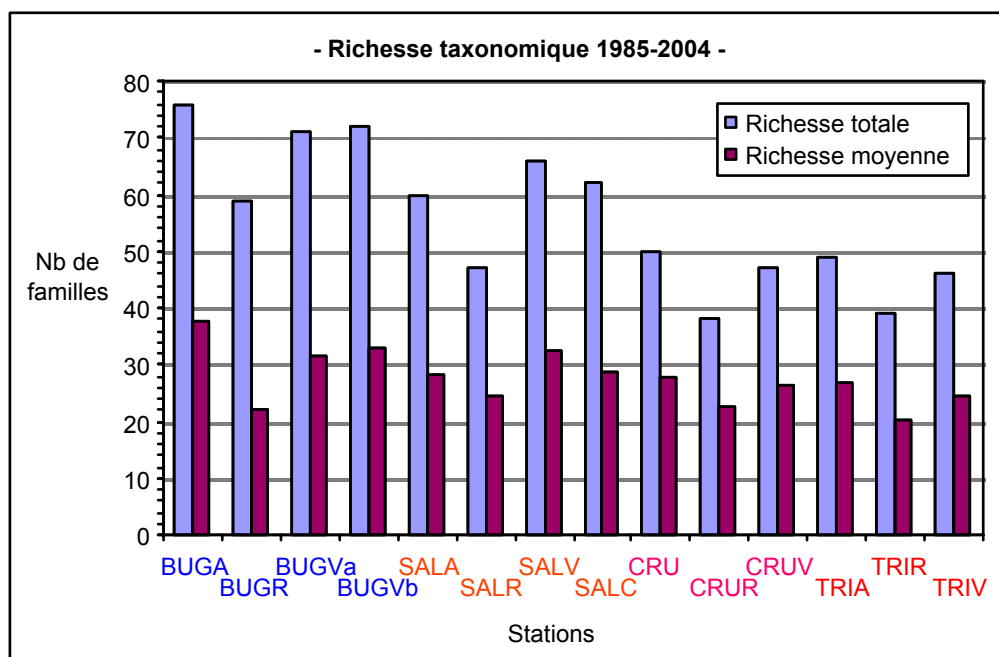
#### 3.1. Macro-Invertébrés

##### 3.1.1. Structure spatiale et aménagements

Sur le Haut-Rhône, le peuplement de macro-invertébrés est affecté par les aménagements comme l'indiquent les évolutions notées par Dessaix *et al*, 1995 [19] : régression ou disparition de larves d'insectes rhéophiles (Plécoptères, différentes espèces d'Ephémères Heptageniidae et Trichoptères filtreurs) et développement concomitant de taxons à affinité lénitique tels que *Potamanthus luteus* (Ephéméroptère), *Polycentropus flavomaculatus* et *Hydroptila sp.* (Trichoptère), *Asellus aquaticus* (Crustacés) et plusieurs espèces de Mollusques Gastéropodes et de Planaires.

Dans le Rhône à Lyon, une forte réduction du nombre d'espèces de Trichoptères (47 %) et d'Ephéméroptères (42 %) a été observée après la mise en service du barrage de Pierre-Bénite en 1966 (Usseglio-Poletera, 1985, cité in [23]).

Une tendance à la diminution de l'amont vers l'aval est observée sur la richesse taxonomique totale (tous les taxons observés pendant les vingt ans de mesures) comme sur la richesse taxonomique moyenne annuelle (**Figure 11**).



**Figure 11:** Richesse taxonomique totale et moyenne annuelle des familles de macro-invertébrés, calculée sur la chronique des données collectées de 1985 à 2004 en amont et en aval des CNPE [6]. BUG : Bugey, SAL : Saint-Alban, CRU : Cruas, TRI : Tricastin. A: amont, R: rejet, V: aval, C : tronçon court-circuité.

Localisation des stations sur les cartes en annexe : BUGVa : I3, BUGVb : I4, SALV : 3.

Par rapport à l'amont de Bugey, la richesse taxonomique moyenne annuelle à l'amont de Saint-Alban, Cruas et Tricastin est plus basse d'environ 25 % (**Tableau VIII**). Cette baisse par rapport au milieu semi-naturel de Bugey s'explique par un appauvrissement des taxons d'insectes aux stations échantillonnées du Bas-Rhône situées dans des retenues ; la charge polluante organique et en substances potentiellement toxiques peut aussi contribuer à cet écart.

**Tableau VIII:** Ecart de richesse taxonomique entre l'amont des CNPE de Saint-Alban, Cruas et Tricastin et l'amont du CNPE de Bugey.

	Totale	Moyenne
SAL amont - BUG amont	-21%	-24%
CRU amont - BUG amont	-34%	-24%
TRI amont -BUG amont	-36%	-27%

### 3.1.2. Evolutions temporelles

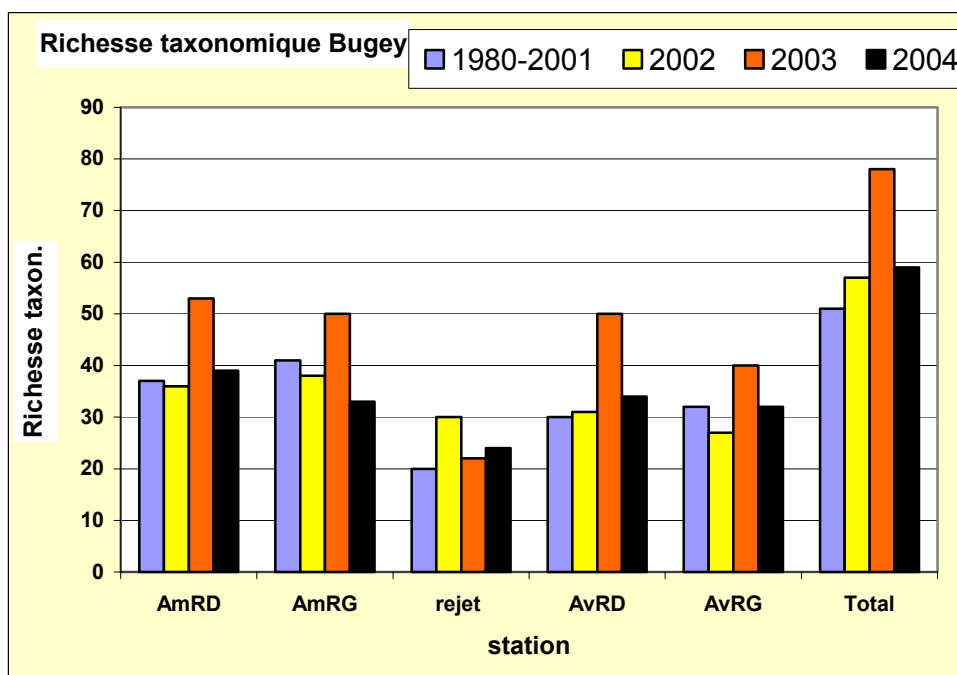
#### Evolution de la diversité et de l'abondance des macro-invertébrés

Sur le site de Bugey, entre 1975 et 1988, une perte de richesse taxonomique est intervenue sur les stations en amont et en aval du CNPE [20]. Cet appauvrissement est principalement causé par une perte de taxons d'insectes.

**Tableau IX:** Richesse taxonomique des macro-invertébrés sur le site de Bugey en 1975 et en 1988. Roger *et al.* [20].

Station	Année	PLE	TRI	EPH	COL	DIP	SAPLA	Moll	Div	Total	Total insectes
1 amont RD	1975	4	27	10	7	6	6	8	5	73	54
	1988	3	16	6	5	7	6	4	5	52	37
3, aval RD	1975	4	27	10	7	6	6	8	5	73	54
	1988	4	17	5	6	5	6	4	4	51	37
4, aval RG	1975	4	27	10	7	6	6	8	5	73	54
	1988	1	15	9	13	7	6	7	5	63	45

Une tendance à l'augmentation de la richesse taxonomique est cependant visible au cours des dernières années sur le site de Bugey (**Figure 12**).

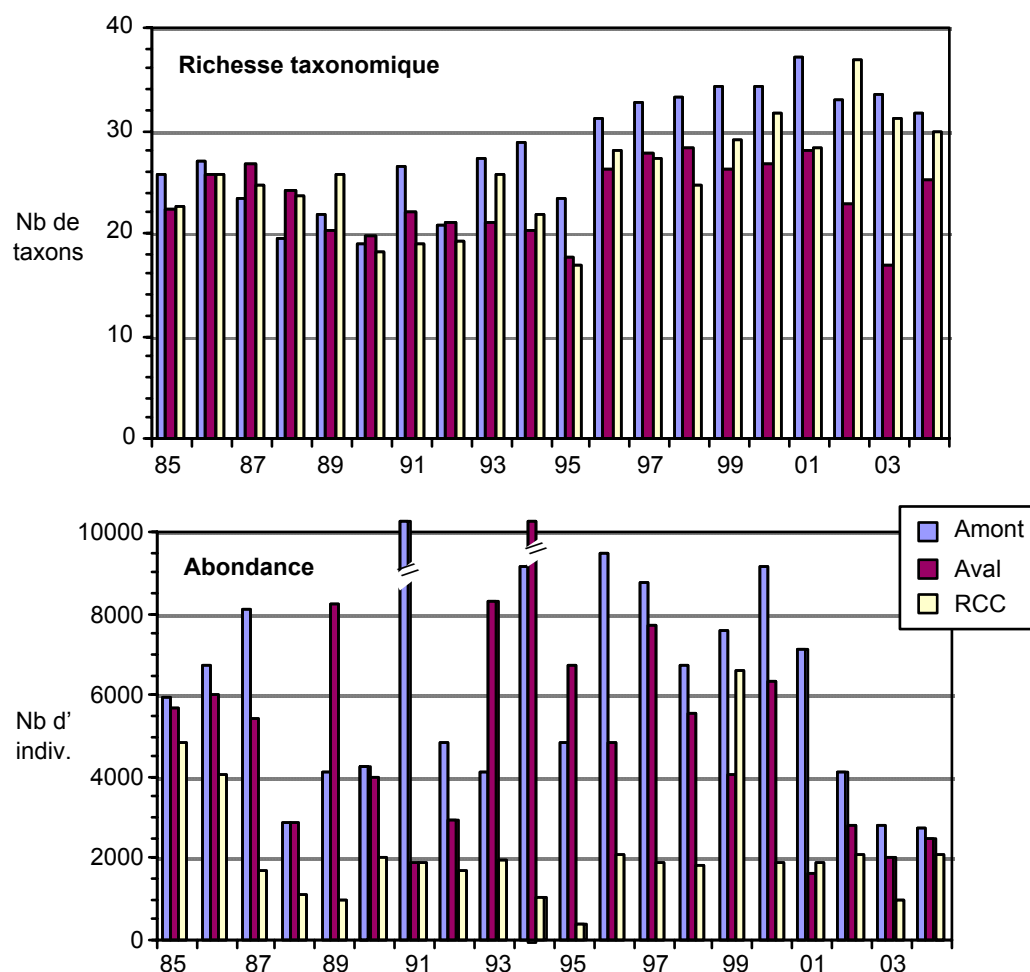


**Figure 12:** Richesse taxonomique des macro-invertébrés échantillonnés sur des substrats artificiels en amont et en aval du CNPE de Bugey.

A Saint-Alban, une augmentation de la richesse taxonomique se manifeste également depuis 1996 (**Figure 13, Tableau X**). Sur ce site, une diminution des effectifs est observée depuis 2000 en raison de la chute d’abondance des crustacés Isopodes Asellidae qui est concomitante du développement de l’Amphipode envahissant *Dikerogammarus villosus* ; il faut toutefois remarquer que les effectifs varient fortement d’une année à l’autre.

**Tableau X:** Comparaison de la richesse taxonomique moyenne sur deux périodes de temps en trois stations du site de Saint-Alban [8]. Localisation des stations sur la carte en annexe : SAL amont : 1, SAL aval proche : 2, Rhône court-circuité : 4

Période	SAL Amont	SAL aval proche	Rhône Court-Circuité
1985-1995	24	20	22
1996-2004	34	25	30



**Figure 13:** Evolution de la richesse taxonomique et de l'abondance moyenne par substrat artificiel en trois sites à l'amont et à l'aval du CNPE de Saint-Alban et dans le tronçon court-circuité (RCC). Localisation des stations sur la carte en annexe : SAL amont : 1, SAL aval proche : 2 , Rhône court-circuité : 4

#### Etude statistique sur l'ensemble des données d'invertébrés

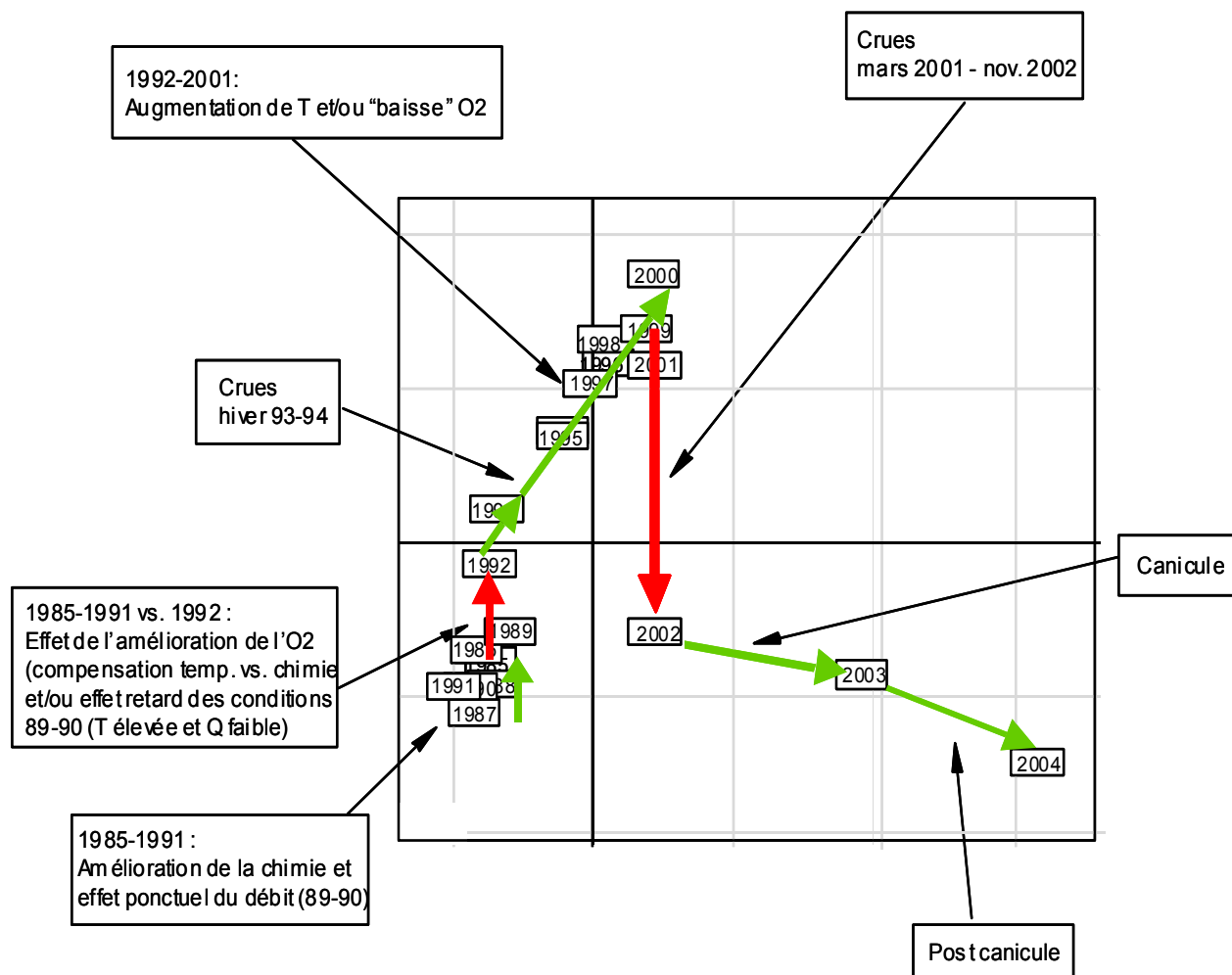
Au cours de la période étudiée par Bady et Fruget [7], de 1985 à 2004, les données collectées sur les invertébrés échantillonnés en amont et en aval des quatre CNPE (9 stations) ont été traitées par analyses statistiques multi-tableaux, (co-inertie multiple : ACOM), le niveau taxonomique étant la famille.

La méthode appliquée définit une structure de compromis représentative de l'ensemble des vingt années (**Figure 14**) ; cette référence se retrouve sur tous les tableaux correspondant aux stations.

Le site de Bugey, et spécialement Bugey amont, se distingue cependant de l'ensemble des autres stations, on retrouve ici la particularité de ce site plus riche en taxons d'insectes que les autres sites du Bas-Rhône .

La **Figure 14** montre plusieurs ensembles d'années distincts qui sont regroupés en trois périodes principales dans le **Tableau XI** .

Parmi les facteurs susceptibles d’expliquer les évolutions constatées, il semble que la qualité de l’eau doit être considérée au même titre que les facteurs thermique et hydrologique ; la température et l’hydrologie influencent d’ailleurs la qualité d’eau par exemple via des processus de dilution/concentration (débit), de déplacement des équilibres chimiques ou de modification de l’activité biologique (température) affectant le pH et l’oxygène dissous notamment.



**Figure 14:** Représentation de la structure temporelle de référence : les 20 années sur le premier plan factoriel du compromis [7].

**Tableau XI:** Les grands traits des évolutions de la faune macro-invertébrée et les évènements caractéristiques [7].

Périodes	Evènements caractéristiques et taxons structurant le peuplement
1985-1991	Fortes concentrations en phosphate, azote ammoniacal et DBO5. Présence de Mollusques Bithyniidae, Physidae et Valvatidae (de St-Alban à Tricastin). Trichoptères Hydropsychidae à Tricastin. Trichoptères Rhyacophilidae et Plécoptères Chloroperlidae à Bugey.
	Fort étiage en 1989-1990. Achètes Piscicolidae et Mollusques Lymnaeidae(essentiellement à Cruas et Tricastin).
1992-2001	1990-1991 : Extension des Trichoptères Ecnomidae sur le Bas-Rhône
	1992-1993 : Crue de l'hiver 93-94. Installation du Bivalve <i>Corbicula fluminea</i> .
	1994-2001 : Amélioration de la qualité de l'eau (phosphate, azote ammoniacal et DBO5) et augmentation progressive de la température. Trichoptère Ecnomidae <i>Ecnomus tenellus</i> , Mollusques <i>Corbicula fluminea</i> et Sphaeriidae, Crustacés Asellidae (Bas-Rhône essentiellement) et des Ephémères Baetidae à Bugey.
2002-2004	Minéralisation de l'eau et température plus élevée. Crues de mars 2001 et novembre 2002. Installation et extension de nouvelles espèces sur le Bas-Rhône (certaines envahissantes) : crevette <i>Atyaephyra desmarestii</i> , Amphipode Gammaridae <i>Dikerogammarus villosus</i> , Polychète <i>Hypania invalida</i> . Augmentation générale des Ephémères Heptageniidae (excepté St-Alban) et Caenidae, des Diptères Cerapogonidae (excepté Cruas) et des Trichoptères Hydroptilidae.

En résumé, la première période **1985-1991** apparaît marquée par une variabilité chimique et hydrologique, tandis que la structure des peuplements est parallèlement peu marquée. Puis, au cours de la période **1992-2002**, on assiste à une dérive temporelle des conditions environnementales qui semble plus liée à la thermie. C'est à partir de cette période que les peuplements évoluent le plus. Enfin, à partir de **2003**, la canicule - post-canicule est à l'origine d'une évolution marquée.

L'étude de Daufresne et al. [9], sur le site de Bugey précise les évolutions du peuplement d'invertébrés sur le Haut-Rhône de 1980 à 1999:

- une disparition progressive des taxons d'eau froide et rhéophiles (préférant les forts courants) est observée, tels que les Plécoptères (Chloroperla, Nemura, Protonemura, Amphinemura, Brachyptera), Trichoptères (Rhyacophila, Athripodes), Ephéméroptères (Ecdyonurus, Caenis), Diptères Stratyomiidae,
- un développement de taxons thermophiles et lénitophiles (préférant les courants faibles) est enregistré, tels que les Hétéroptères (*Corixa*), Trichoptères (*Oecetis*), Diptères (*Athricops*, *Lepidostoma*), Odonates (*Coenagrion*, *Platycnemis*), Mollusques Gastéropodes (*Potamopyrgus Theodoxus*) et bivalves (*Corbicula*), Planaires (*Dendrocoelum*).

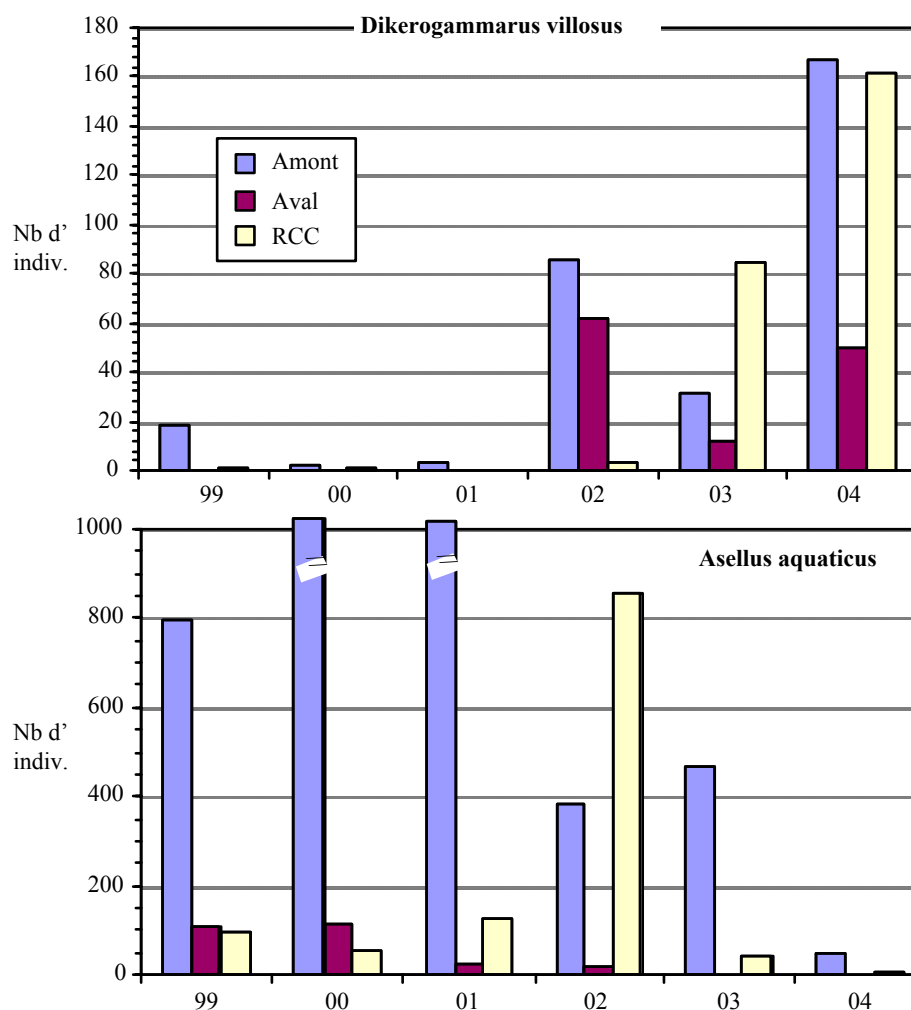
### 3.1.4. Les espèces introduites

La faune de macro-invertébrés exotiques du Rhône comporte 25 espèces dont 11 ont été introduites au cours de la dernière décennie. Dans la liste fournie par Bady & Fruget [7] (**Tableau XII**), plusieurs espèces sont connues comme envahissantes.

**Tableau XII** : Liste des espèces exotiques d'invertébrés nouvelles dans le Rhône, les espèces apparues depuis 1993 sont notées en caractères gras [7].

Groupe zoologique	Tout le Rhône	Aval de Lyon	Amont de Lyon
Cnidaires	<i>Craspedacusta sowerbyi</i>	<i>Cordylophora caspia</i>	
Bryozoaires	<i>Pectinatella magnifica</i>	<b><i>Urnatella gracilis</i></b>	
Turbellariés	<i>Dugesia tigrina</i>		
Polychètes		<b><i>Hypania invalida</i></b>	
Oligochètes	<i>Branchiura sowerbyi</i>		
Gastéropodes	<i>Menetus dilatatus</i>	<b><i>Gyraulus parvus</i></b>	
	<i>Physa acuta</i>	<b><i>Lithoglyphus naticoïdes</i></b>	
	<i>Potamopyrgus antipodarum</i>		
Bivalves	<i>Dreissena polymorpha</i>		
	<b><i>Corbicula fluminea</i></b>		
Crustacés	<b><i>Atyaephyra desmarestii</i></b>	<b><i>Corophium curvispinum</i></b>	<b><i>Pacifastacus leniusculus</i></b>
	<i>Gammarus roeseli</i>	<b><i>Crangonyx pseudogracilis</i></b>	
	<i>Orchestia cavimana</i>	<b><i>Dikerogammarus villosus</i></b>	
	<i>Orconectes limosus</i>	<b><i>Gammarus tigrinus</i></b>	
		<b><i>Hemimysis anomala</i></b>	
		<i>Procambarus clarkii</i>	

Ces espèces sont des compétiteurs d'espèces indigènes, c'est le cas notamment chez les Amphipodes (**Figure 15**). Elles peuvent modifier les réseaux trophiques en éliminant le plancton végétal et influencer la qualité de l'eau par filtrage des particules nutritives en suspension (*Corbicula*).



**Figure 15:** Evolution comparée des effectifs de l'espèce d'Isopode indigène *Asellus aquaticus* et de l'espèce d'Amphipode envahissante *Dikerogammarus villosus* à Saint-Alban de 1999 à 2004 [8]. Localisation des stations sur la carte en annexe : SAL amont : 1, SAL aval proche : 2, Rhône court-circuité : 4.

#### Contrôle de la biomasse du phytoplancton par le bivalve *Corbicula*.

La chlorophylle a est l'indicateur le plus couramment utilisé pour quantifier la biomasse des algues planctoniques dans les eaux douces et marines. Sur la chronique des concentrations en chlorophylle a dans le Rhône à Bugey (**Figure 16 a**), trois périodes distinctes sont visibles :

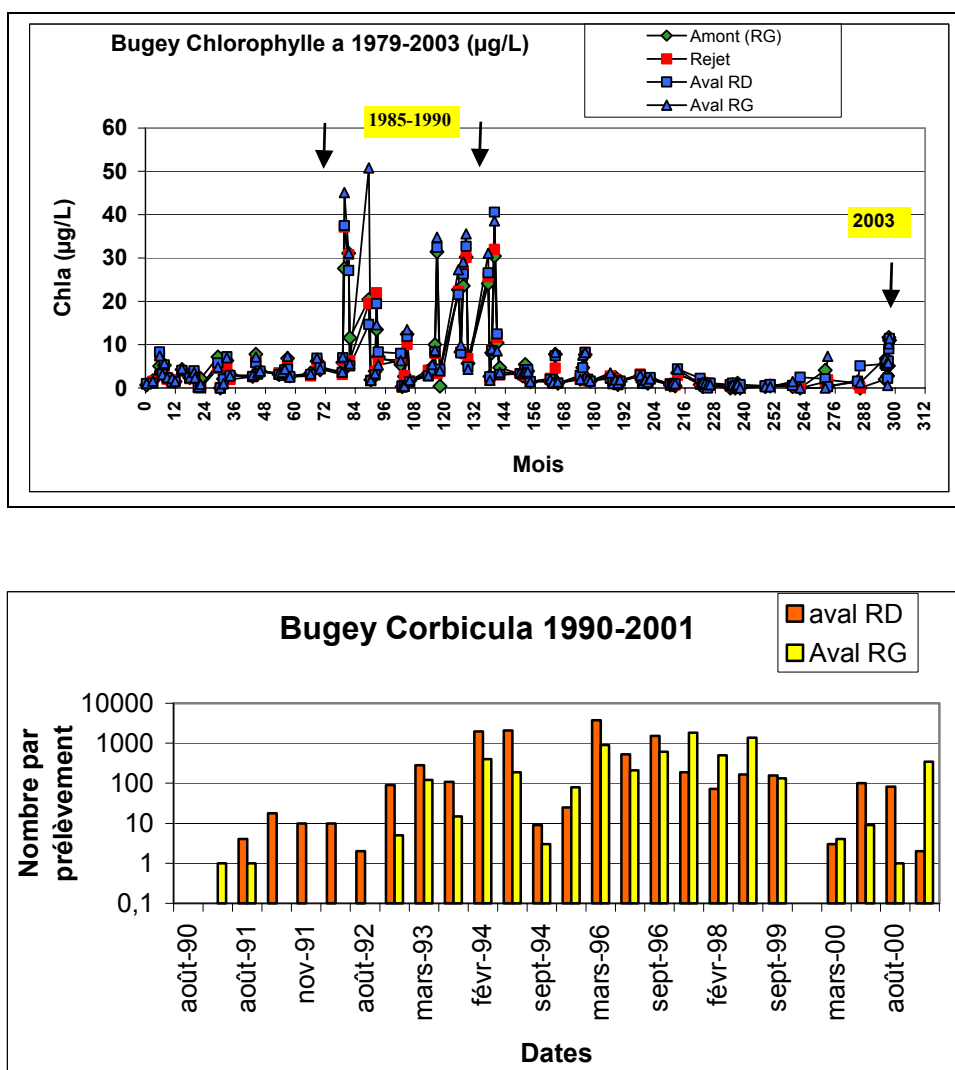
- de faibles biomasses entre 1979 et 1984 (maximum annuel < 10 µg/L),
- des biomasses plus élevées entre 1985 et 1990 (maximum annuel de 10 to 50 µg/L),
- le retour aux faibles biomasses de la première période de 1991 à 2003.

De telles modifications de la teneur en chlorophylle planctonique sont généralement considérées comme traduisant un changement fonctionnel significatif, l'augmentation de biomasse étant un signe d'eutrophisation.

Pour expliquer l'augmentation très nette de la biomasse, deux causes peuvent être évoquées. D'une part, l'aménagement de Sault-Brenaz mis en service en 1986, qui a entraîné un ralentissement de l'eau susceptible de favoriser la croissance du plancton. D'autre part, la

mise en eau du réservoir de Sault-Brenaz a probablement augmenté les apports en sels nutritifs issus du lessivage du sol inondé.

Pour expliquer la chute brutale de la biomasse phytoplanctonique à partir de 1991, deux causes interviennent conjointement : la réduction des apports en phosphates mais aussi le développement important du bivalve *Corbicula fluminea*, espèce exotique qui est apparue dans le Haut-Rhône en 1990 (Figure 16b). Cette espèce envahissante est capable de consommer la plus grande partie du phytoplancton dans les grandes rivières et dans les lacs.



**Figure 16:** Chronique de la biomasse du phytoplancton (chlorophylle a) et abondance du bivalve *Corbicula* depuis l’introduction de l’espèce en 1990 dans le Rhône sur le site de Bugey.

### 3.1.5. Effets des rejets thermiques

#### Etude sur le site de Bugey

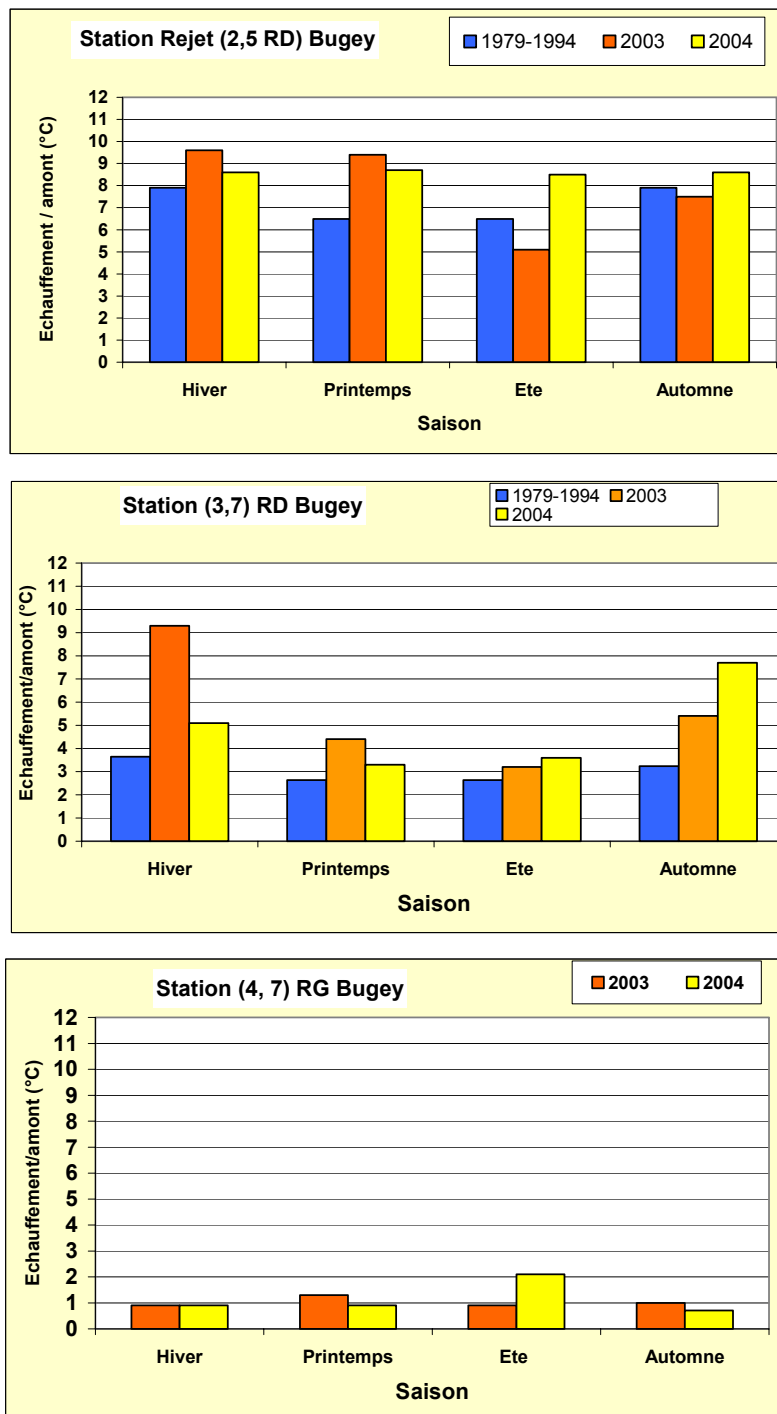
Sur ce site, le panache d'eau échauffée des tranches en circuit ouvert du CNPE suit la rive droite jusqu'au confluent avec l'Ain. Nous disposons de ce fait d'observations sur les macro-invertébrés qui colonisent des substrats artificiels placés dans une veine d'eau plus échauffée que le Rhône en aval après mélange du rejet thermique. Une carte des stations d'échantillonnage est présentée en annexe.

Par rapport à l'amont, les échauffements décroissent aux trois stations en aval (**Figure 16, Tableau XIII**). Une variation saisonnière est particulièrement marquée à la station 3 en rive droite : l'échauffement estival est moins fort en raison du niveau élevé du débit pendant cette période. La station 4, située en rive gauche, est moins échauffée que le Rhône en aval de la zone de mélange.

**Tableau XIII** : Echauffements moyens mesurés aux stations aval du CNPE de Bugey

Période	Echauffement moyen mesuré			Echauffement après mélange	
	Station Rejet RD	Station 3 RD	Station 4 RG	Fréquence 50 %	Fréquence 90 %
1979-1994	7,2	3,0	0,6 *		
2003	7,3	3,9	1,0		
2004	8,6	4,9	1,2		
1991-2003				1,5	3,2

\* moyenne de 16 mesures entre 1978 et 1989 [20].

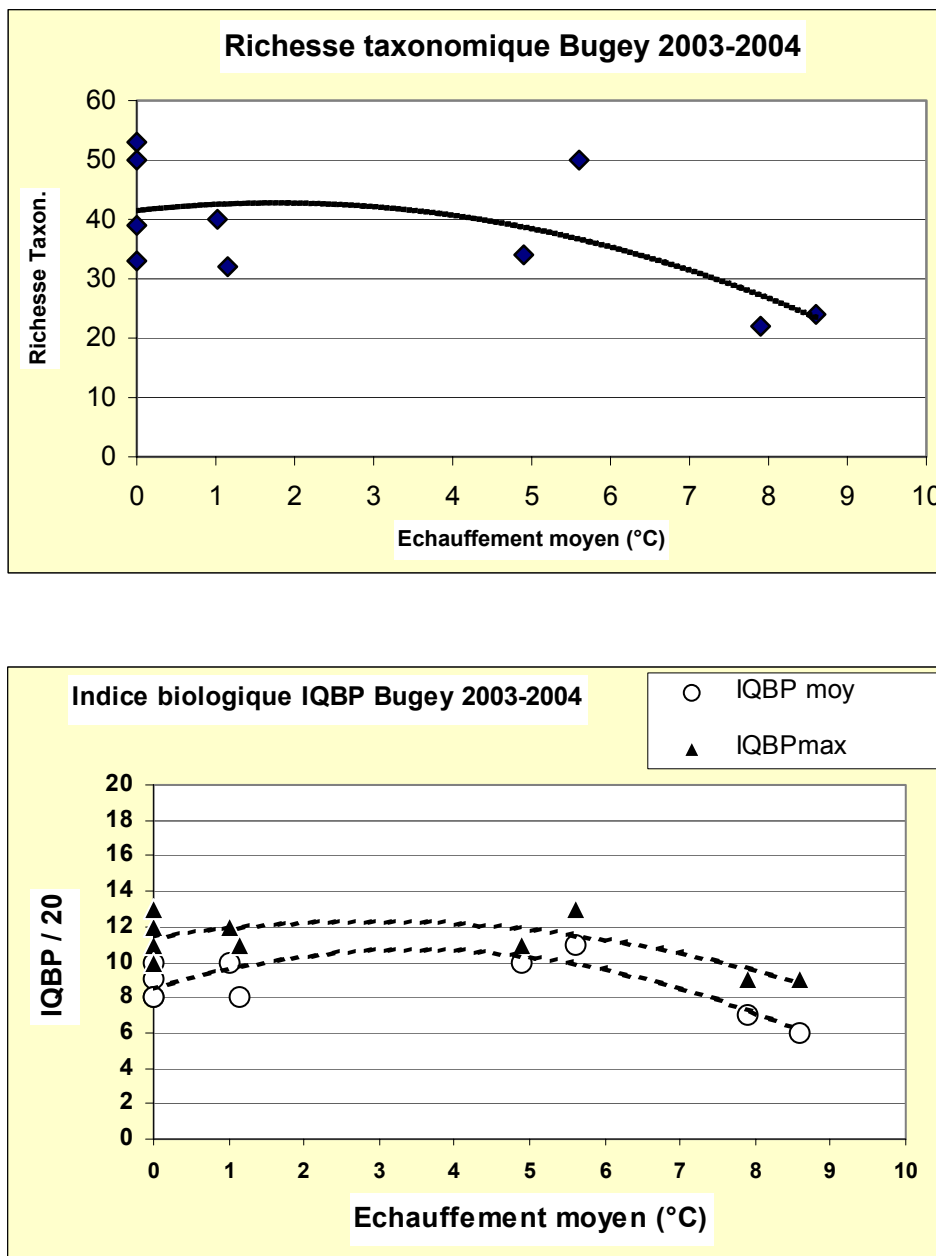


**Figure 16:** Echauffement entre amont et aval aux trois stations échantillonnées en aval du CNPE de Bugey. Données de Ginot *et al.* [21] pour la période 1979-1994. Données Cemagref Lyon pour les années 2003 et 2004.

Les données biologiques recueillies en 2003 et 2004 [22], [23], présentent un intérêt particulier dans la mesure où il s’agit d’années caractérisées par des conditions climatiques (fortes températures et faibles débits) qui se rapprochent de la situation moyenne prévue vers la fin du siècle.

Sur les données de 2003 et 2004 (**Figure 17**), la richesse taxonomique et l’indice de qualité biologique sont stables dans la gamme des échauffements de + 1°C à + 6°C (stations 4

en rive gauche et 3 en rive droite) ; en revanche, une chute de ces deux caractéristiques du peuplement est observée à la station « rejet » où l'échauffement moyen est de l'ordre de + 8°C à + 9°C.



**Figure 17 :** Richesse taxonomique et indice de qualité biologique potentielle (IQBP) représentés en fonction de l'échauffement moyen aux stations amont et aval du CNPE de Bugey en 2003 et 2004.

Trois taxons dominent très largement le peuplement de macro-invertébrés à toutes les stations : les Crustacés Amphipodes Gammaridés, les larves de Diptères Chironomidés et les Annélides Oligochètes. Les Gammaridés présentent des biomasses très élevées mais aussi très variables, probablement en raison de la sensibilité thermique de ce groupe chez lequel les abondances diminuent lorsque la température excède 20°C [22].

D'autres taxons plus thermophiles, comme le ver Planaire *Dugesia tigrina*, sont plus abondants au moment du maximum thermique. Enfin, des espèces préférant les écoulements lents sont apparues en 2003 dans le Rhône au Bugey : il s'agit des Trichoptères Ecnomidae (*Ecnomus tenellus*), Polycentropodidae (*Cyrnus trimaculatus*), Leptoceridae (*Oecetis*). En 2004, seul *Oecetis* a été retrouvé sur le site.

Sur les sites du Bas-Rhône [7], [8], une chute de richesse spécifique est observée dans les stations proches des rejets par rapport à l'amont (Figure 13). A Saint-Alban, où l'échauffement moyen est d'environ 5°C entre la station de référence amont (pk 47) et la station en aval proche (pk 49), la baisse de richesse entre les prélèvements unitaires (substrats artificiels) de chaque station passe de 5% pour la période 1985-1995 à 24% pour la période 1996-2004.

Conjointement à l'échauffement de l'eau aux stations en aval des CNPE, d'autres facteurs concourent probablement à l'explication de ces écarts. A Bugey par exemple, la variété des conditions d'habitat, plus grande à l'amont qu'à l'aval du CNPE, peut expliquer en partie l'écart négatif constaté entre aval et amont.

### 3.1.6. Conclusions

L'étude réalisée à partir des données biologiques sur les macro-invertébrés collectés sur une période 20 à 25 ans, de 1980 à 2004, en différentes stations distribuées autour des quatre CNPE du Rhône fait ressortir quelques points marquants.

Il existe un gradient longitudinal de richesse taxonomique depuis Bugey, site le plus riche notamment en familles d'insectes, jusqu'à Tricastin, site appauvri d'environ 25 % par rapport à Bugey.

Sur le Haut-Rhône, les relevés effectués entre 1975 et 1988 révèlent une baisse de la richesse taxonomique des insectes. L'étude statistique réalisée sur les données de 1980 à 1999 montre la disparition progressive des taxons d'eau froide préférant les forts courants et leur remplacement par des taxons thermophiles préférant les courants faibles. Ce changement dans la structure du peuplement, qui concerne aussi bien les stations situées en amont qu'en aval du CNPE, peut être mis en relation d'une part avec le changement climatique et d'autre part avec l'aménagement hydraulique du fleuve.

Sur le Bas-Rhône, une évolution temporelle assez comparable du peuplement de macro-invertébrés se manifeste sur l'ensemble des sites, avec un décalage dans le temps. La dernière période (2000-2004) semble marquée par l'influence des espèces exotiques et invasives introduites dans les années 1990, avec un impact sur les crustacés autochtones qui pourrait être important.

#### Effet des rejets thermiques des CNPE.

Dans les canaux de rejets des CNPE ou à proximité immédiate des rejets d'eau échauffée, la richesse taxonomique chute systématiquement par rapport à l'amont. A Bugey, cela correspond à un échauffement permanent de 8°C à 9°C. Aux stations en aval de Bugey en 2003 et 2004 où l'échauffement atteint 1°C à 6°C, la richesse taxonomique et l'indice de qualité biologique restent stables par rapport à l'amont. A Saint-Alban, la richesse unitaire de la station aval proche, échauffée d'environ 5°C, est en moyenne de 15% inférieure à celle de la station amont. Une baisse modérée de la richesse taxonomique est observée à Cruas et Tricastin par rapport à l'amont. D'autres causes que la température, comme les différences d'habitat des stations, peuvent également en partie expliquer ces écarts.

Depuis 1991, et l'installation du bivalve *Corbicula*, le peuplement de macro-invertébrés est de plus en plus influencé par des espèces exotiques introduites.

### 3.2. Macrophytes

Les observations réalisées depuis 1985 dans la retenue de Péage-de-Roussillon sur les phanérogames aquatiques en amont et en aval du CNPE de Saint-Alban permettent de suivre la richesse spécifique de ce peuplement et fournissent des données semi-quantitatives sur l'abondance des macrophytes aquatiques [8].

Ces relevés sont effectués sur une bande parallèle à la rive en trois sites : en amont du CNPE en rive gauche, en aval du CNPE en rive droite et en rive gauche. Le rejet du CNPE est effectué sur la rive gauche, il a tendance à s'écarter de la rive puis à s'en rapprocher sous l'effet du courant dirigé vers l'entrée du canal de dérivation de l'usine-écluse. Il est ainsi possible de comparer les caractéristiques quantitatives et qualitatives du peuplement en quatre sites.

- l'amont du CNPE en rive droite (pk 46-47), sans échauffement provenant du CNPE,
- l'aval du CNPE en rive droite (pk 49-50), à échauffement faible et intermittent (environ 1,5°C),
- l'aval proche du CNPE en rive gauche (pk 49-50), à échauffement permanent de 5°C,
- l'aval éloigné du CNPE en rive gauche (pk 50-51), à échauffement permanent de 2,3°C en moyenne.

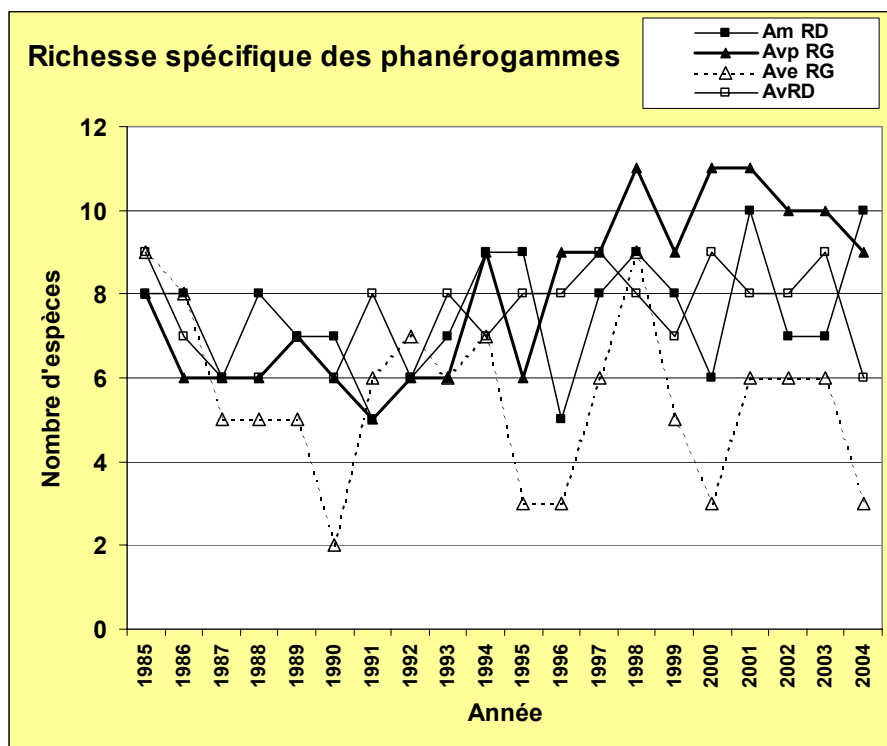
Tous sites confondus, la richesse spécifique des phanérogames diminue entre 1985 et 1990 (13 espèces à 7 espèces) puis augmente pour atteindre 15 espèces en 2003 et 11 espèces en 2004.

La chronique de la richesse spécifique annuelle (**Figure 18**) montre deux particularités :

- le site aval éloigné en rive gauche est le plus souvent moins riche que les trois autres,
- le site aval proche en rive gauche se distingue depuis 1998 par une richesse supérieure à celle des trois autres (**Tableau XIV**).

Ainsi, de manière récurrente depuis plusieurs années, et ce, en dépit d'un mélange plus effectif du rejet, la richesse floristique et l'abondance sont nettement moindres à la station aval éloignée en rive gauche. L'écart de richesse floristique par rapport à la zone aval proche en rive gauche a même été multiplié par 5 entre les périodes 1985-1994 et 1995-2004 (cf. Tableau XIV).

En raison de la grande homogénéité de la structure rivulaire le long de la retenue (enrochements des berges et banquettes limoneuses), le facteur thermique semble prendre une part essentielle dans l'explication de ces évolutions.



**Figure 18:** Richesse spécifique moyenne du peuplement de phanérogames aquatiques échantillonnées en quatre stations de suivi du CNPE de Saint-Alban [8]. Les codes sont donnés dans le tableau XV.

**Tableau XIV:** Richesse spécifique moyenne du peuplement de phanérogames aquatiques échantillonnées pendant deux périodes en quatre sites à l’amont et à l’aval du CNPE de Saint-Alban [8].

Am : amont, Avp : aval proche, Ave : aval éloigné, RD : Rive droite, RG : Rive gauche.

	Am RD	Avp RG	Ave RG	AvRD
1985-1994	7	7	6	7
1995-2004	8	10	5	8

En conclusion, dans l’hypothèse où seul le facteur thermique intervient dans la structure du peuplement, ces données indiquent que la diversité des macrophytes est peu affectée par un échauffement permanent de 5°C, même si une réduction de la variété et de l’abondance des peuplements est observée localement à l’aval du CNPE.

### 3.3. Poissons

#### 3.3.1. Structure spatiale du peuplement de poissons et aménagements du Rhône

Au milieu du XXème siècle, la rupture de la continuité engendrée par la construction des barrages sur le Haut-Rhône, la création de nouveaux milieux (retenues et canaux) et la vidange périodique des retenues ont entraîné un déclin des Salmonidés et des Cyprinidés d'eau vive ainsi que la disparition de l'apron. Les Cyprinidés euryèces (gardon, goujon, chevaine) dominent dans les secteurs aménagés ; des espèces rhéophiles se maintiennent toutefois dans les tronçons court-circuités (barbeau fluviatile, vandoise, spirilin et Salmonidés) et sont présentes dans le secteur du Bugey [13].

Sur le Bas-Rhône, le peuplement originel composé de Salmonidés, de Cyprinidés d'eau vive et comportant des migrateurs amphihalins (lamproie marine, alose et anguille) a évolué après les aménagements vers un peuplement dominé par les Cyprinidés d'eau calme (gardon, ablette) et la quasi-disparition des espèces migratrices. Actuellement, une nette différence oppose ainsi le secteur du Haut-Rhône à Bugey qui conserve certains caractères originels sur le plan morpho-dynamique (vitesse rapide, persistance de substrat grossier) au Bas-Rhône transformé en chenal dimensionné pour la navigation à grand gabarit, différence apparente dans la structure des peuplements de poissons.

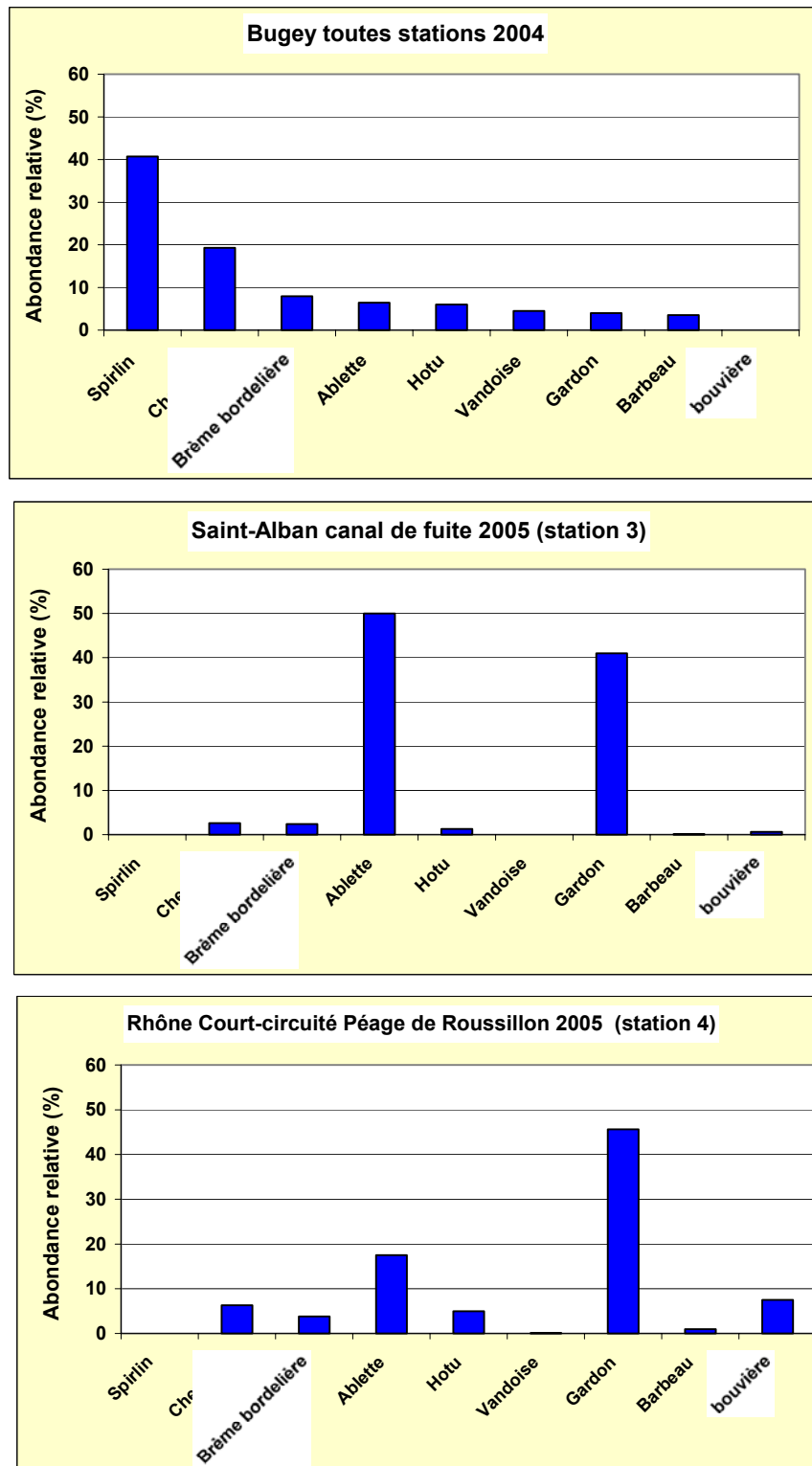
La **Figure 19** illustre les différences relevées en 2004 et 2005 entre le peuplement de poissons du Haut-Rhône à Bugey et celui du Bas-Rhône :

Le peuplement du site de Bugey est caractérisé par cinq espèces dont les abondances et les occurrences sont nettement plus importantes que dans les autres sites : le spirilin, la vandoise, le barbeau fluviatile, le vairon et le blageon.

Les espèces thermophiles et lénitophiles apparaissent comme représentatives des sites du Bas-Rhône (gardon, ablette, brème bordelière, perche-soleil, poisson-chat, brème commune, rotengle et tanche). L'anguille est également beaucoup plus largement échantillonnée dans le Bas-Rhône que dans le Haut-Rhône.

Dans ce contexte aménagé, les sections court-circuitées jouent un rôle prépondérant dans le maintien de nombreuses populations, en particulier pour les espèces se reproduisant sur des substrats grossiers (graviers, galets) ou des seuils naturels. Les espèces les plus lenticules, utilisant souvent un support végétal pour déposer leur ponte, trouvent dans les sections aménagées des conditions propices à leur reproduction.

Il faut enfin signaler le rôle des annexes hydrauliques latérales artificielles, telles que les caissons délimités par les digues submersibles dans le bas Rhône, qui par leur richesse en juvéniles de poissons jouent un rôle important dans le recrutement de plusieurs espèces sur ce secteur [25].



**Figure 19:** Effectif des principales espèces de poissons échantillonnées à Bugey, à Saint-Alban à l’extrémité du canal de fuite et dans le tronçon court-circuité de l’aménagement de Péage de Roussillon.

Les espèces introduites.

Les causes des introductions d'espèces listées dans le tableau XV sont l'aquaculture, les introductions volontaires, la colonisation à partir des réseaux de canaux.

**Tableau XV** : Liste des espèces de poissons introduites dans le bassin du Rhône [26].

Période d'introduction	Famille	Nom français	Nom latin
1880's	Salmonidae	Truite arc en ciel	<i>Onchorhynchus mykiss</i>
Fin du XIXeme siècle et début du XXeme siècle	Salmonidae	Saumon de fontaine	<i>Salvelinus fontinalis</i>
1860's	Percidae	Grémille	<i>Gymnocephalus cernua</i>
1880's	Cyprinidae	Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>
1920's	Centrarchidae	Perche soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>
1920's	Ictaluridae	Poisson-chat	<i>Ameirus melas</i>
1930's	Percidae	Sandre	<i>Stizostedion lucioperca</i>
1930's	Poeciliidae	Gambusie	<i>Gambusia affinis</i>
1940's	Centrarchidae	Black bass	<i>Micropterus salmoides</i>
Depuis 1956 ?	Cyprinidae	Able de Heckel	<i>Leucaspisus delineatus</i>
1987	Siluridae	Silure	<i>Silurus glanis</i>
1989	Cyprinidae	Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i>
1989	Cyprinidae	Carassin doré	<i>Carassius auratus gibelio</i>

Depuis la fin des années 1980, trois espèces exotiques sont apparues sur l'axe rhodanien :

- le pseudorasbora, *Pseudorasbora parva* (Cyprinidé), sur les sites du Bas-Rhône (à partir de 1989) et de Bugey (à partir de 1993),
- le carassin argenté, *Carassius auratus gibelio* (Cyprinidé), sur les sites du Bas-Rhône en 1989,
- le silure en 1987 sur le Bas-Rhône et en 1997 sur le site de Bugey.

Le succès de ces introductions pourrait être lié au changement climatique. Celui-ci pourrait notamment favoriser l'expansion du silure [10]. Les conséquences de l'expansion du silure restent à établir. Il peut en effet exercer une forte pression de prédation et agir en tant que compétiteur sur les espèces carnassières.

### 3.3.2. Evolution du peuplement et changement climatique

#### Traitement des données recueillies sur les sites de CNPE du Rhône.

Il est largement admis par la communauté scientifique que la température moyenne planétaire a augmenté d'environ 0,6°C sur les 140 dernières années [27]. Toute recherche sur le régime thermique des cours d'eau doit aujourd'hui prendre en compte la dérive climatique observée au cours des dernières décennies. C'est en ce sens qu'une première étude a été réalisée par le Cemagref, groupement de Lyon, à partir des données collectées dans le cadre de la surveillance hydro-écologique du CNPE de Bugey depuis 1979 [9]. Dans le cadre du groupe de travail « Thermie et Hydrobiologie », constitué à l'initiative d'EDF et du Cemagref, puis de la Phase III de l'étude thermique du Rhône, ce travail a été repris, étendu

aux autres CNPE du Rhône et actualisé en utilisant les observations faites jusqu'en 2003 [28] et 2004 [10].

Pour étudier statistiquement les effets de l'échauffement par les CNPE en prenant en compte l'augmentation de la température attribuable au changement climatique, Daufresne et Boët [10] ont affecté aux principales espèces de poissons un indice de thermophilie qui caractérise leur préférence thermique. L'indice varie entre 0 et 1 ; il est maximum pour les « poissons d'eau chaude » et minimum pour les espèces d'eau plus froide (**tableau XVI**).

**Tableau XVI** : Classement des principales espèces de poissons présentes dans le Rhône selon un indice de thermophilie défini par Daufresne et Boët [28].

Espèce	Indice de thermophilie	Espèce	Indice de thermophilie	Espèce	Indice de thermophilie
Brème bordelière	1	Ablette	0,75	Brochet	0,25
Brème	1	Barbeau	0,75	Chevaine	0,25
Poisson-chat	1	Bouvière	0,75	Goujon	0,25
Rotengle	1	Gardon	0,75	Perche	0,25
Silure	1	Spirilin	0,75	Perche soleil	0,25
Tanche	1			Hotu	0
				Vandoise	0

Parallèlement à l'élévation des températures moyennes annuelles, le traitement statistique (Analyse Factorielle des Correspondances) met en évidence une évolution de la structure des peuplements de poissons sur les quatre sites de CNPE du Rhône (**Figure 20**). Cette évolution se caractérise par la régression des « espèces d'eau froide » au profit des espèces plus thermophiles. Elle est plus marquée sur le Haut-Rhône qu'à l'aval de Lyon.

Sur le Haut-Rhône, à Bugey, le peuplement a réagi le plus nettement à l'élévation tendancielle de la température par une dérive vers les espèces thermophiles : le spirilin, le chevaine et le barbeau remplacent progressivement la vandoise parmi les espèces dominantes. L'ombre commun n'est plus capturé depuis 2001. Chez les espèces marginales de ce peuplement, on note aussi des changements : la brème bordelière, la loche franche et le silure sont en expansion alors que le brochet régresse.

Dans la mesure où les communautés pisciaires en aval de Lyon sont constituées d'espèces plus thermophiles, les modifications liées au changement climatique sont moins marquées que sur le Haut-Rhône, elles sont cependant visibles. Ce sont des événements d'ordre hydrologique : étiages sévères et crues remarquables, comme les deux grandes crues d'octobre 1993 et de janvier 1994 qui participent à la modification du peuplement.

Il est intéressant de remarquer que l'année 2003, caractérisée par une longue période de canicule, s'inscrit dans la tendance établie sur tous les sites.

Un autre enseignement de cette étude, également visible sur la **Figure 20**, réside dans le fait que les mêmes dérives temporelles sont observées en amont et en aval des CNPE. La modification du peuplement de poissons s'explique par l'effet prépondérant du changement climatique qui tend à masquer l'influence des rejets thermiques. La même étude réalisée sur les données des CNPE de Nogent-sur-Seine, de Belleville et de Chinon sur la Loire, aboutit aux mêmes conclusions [28].

Pour mettre en évidence l'influence des rejets thermiques des CNPE, plusieurs études ont été réalisées sur le site de Bugey.

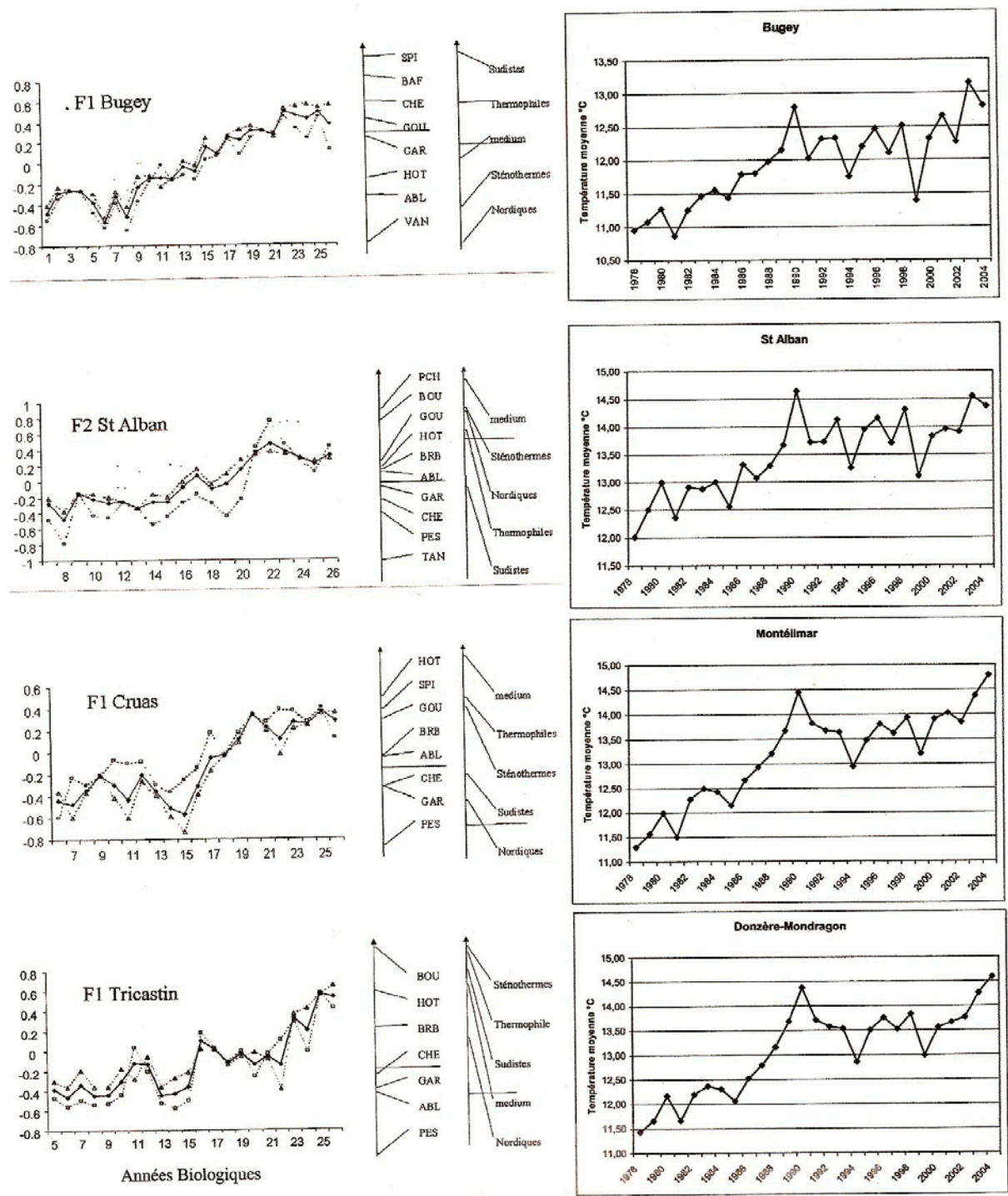
### 3.3.3. Effet des rejets thermiques du CNPE du Bugey.

Le site de Bugey présente plusieurs particularités intéressantes pour mettre en évidence l'effet des rejets thermiques :

- il est situé sur le Haut-Rhône dans la partie la plus naturelle du fleuve,
- le CNPE comporte deux tranches en circuit ouvert qui produisent des rejets thermiques importants, les échauffements aux stations situées en aval en rive droite étant en permanence compris en moyenne entre + 5°C et + 8°C (**Tableau XVII**),
- l'échantillonnage des poissons se fait selon une procédure standardisée inchangée depuis 1979, en des stations situées à l'aval immédiat du rejet en rive droite soumises à un échauffement permanent significatif plus élevé que l'échauffement à l'aval éloigné du site.

**Tableau XVII** : Echauffement aux stations de pêches en aval du CNPE de Bugey par rapport aux températures relevées aux stations en amont. Intervalle des moyennes saisonnières sur la période 1979-1994 [14], intervalle des mesures effectuées en 2001 [29]. La station 4 a été prospectée jusqu'en 1988

Stations	Echauffement		
	1979-1994	2003 -2004	
	intervalle	intervalle	Moyenne
4 (rejet)	9,2 à 11,4		
5 (rejet)	6,5 à 8,2	7,5 – 9,4	8,0
6D	3,7 à 5,9	1,4 – 7,7	5,4
7	2,6 à 3,6		
8	0,9 à 1,8		
6G	0,5	0,4 – 2,1	1,1

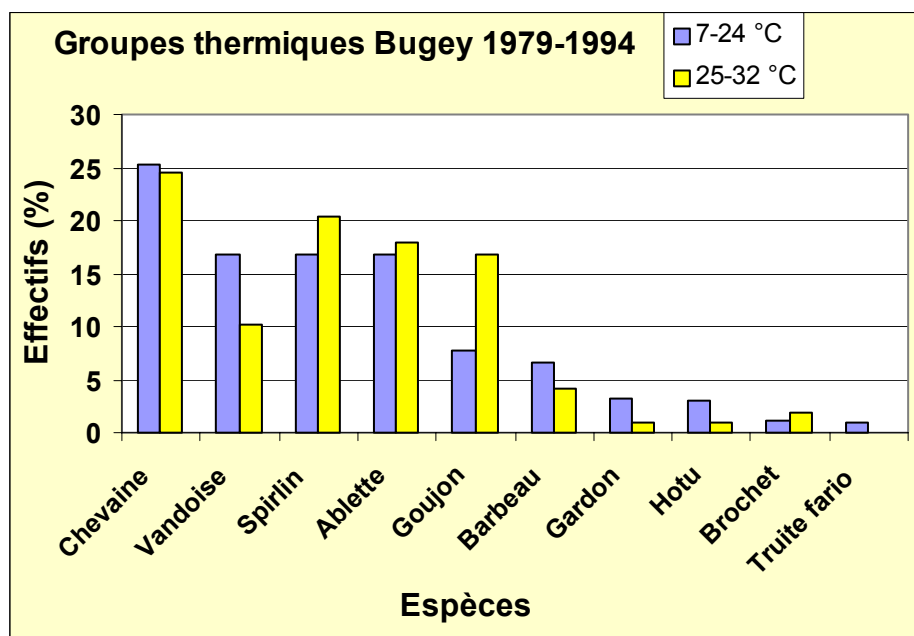


**Figure 20** : Colonne de gauche. Chronique des coordonnées factorielles de l'AFC des pêches sur les quatre sites de CNPE sur le Rhône [10], la première année est 1979. La contribution des principales espèces et les traits écologiques vis à vis de la thermie sont représentés à droite des diagrammes. Les valeurs correspondant aux données moyennées sur toutes les stations de pêches d'un site sont en trait plein, celles relatives aux stations en amont des CNPE sont représentées par des carrés ouverts, celles relatives aux stations en aval des CNPE sont représentées par des triangles ouverts.

Colonne de droite : Chronique des températures moyennes annuelles relevées en amont des quatre sites de CNPE.

Une première étude a porté sur les données collectées entre 1979 et 1994, [21]. En fonction de la température relevée au moment des pêches, trois « groupes thermiques » ont été distingués :

- 1- Groupe des températures de 7°C à 24°C. Ce groupe central comporte huit espèces dominantes qui constituent 96 % de l'effectif total : chevaine, vandoise, spirilin, ablette, goujon, barbeau, gardon, hotu. La vandoise est mieux représentée que le spirilin. La truite fario y est très peu représentée (**Figure 21**).
- 2- Groupe des températures de 25°C à 32°C, identifié dans les pêches d'été aux stations échauffées, le cortège des huit espèces dominantes représente 96 % de l'effectif total. La vandoise est moins représentée que le spirilin et la truite fario est absente (**Figure 21**).
- 3- Groupe des températures < 7°C, il rassemble les pêches hivernales et comporte les même espèces dominantes avec une meilleure représentation de la vandoise (45 %) et de la truite fario (4 %).



**Figure 21:** Effectifs des espèces de poissons pêchés sur le site de Bugey dans deux groupes thermiques (température relevée au moment de la pêche) [21].

Une étude statistique par AFC a été effectuée sur les données relatives au CNPE de Bugey de 1979 à 2004 pour rechercher l'impact local des rejets thermiques [10]. La variance inter-stationnelle est trois fois plus basse que la variance inter-annuelle. L'analyse est de ce fait entachée d'incertitude mais elle permet toutefois de discriminer les deux groupes de stations : échauffées et non échauffées. Parmi les stations non échauffées se trouve la station 6, en aval du CNPE mais en rive gauche ; l'échauffement y est faible (entre 0,6°C et 1,1°C selon les mesures disponibles) et intermittent selon le débit du fleuve et le fonctionnement des tranches en circuit ouvert.

Sur l'ensemble des données, le même noyau des huit espèces dominantes que celui identifié sur les données de 1979 à 1994 est retrouvé.

Par rapport aux stations non échauffées, les stations échauffées en permanence de 5,4°C à 8°C en moyenne (**Tableau XVIII**) se caractérisent par :

- une proportion plus élevée de spirilins et d'ablettes dans les espèces dominantes,
- une proportion plus élevée de blageons, brèmes bordelières, silures dans les espèces marginales.

Les stations non échauffées conservent plus de truites, d'épinoches, et de loches franches parmi les espèces marginales.

Cette étude permet de conclure que les écarts entre stations échauffées et non échauffées vont globalement dans le même sens que les effets du changement climatique.

### 3.3.4. Effet des facteurs hydrologique et thermique sur la reproduction des Cyprinidés dans le Bas-Rhône.

Oliver et Carrel [12] ont procédé à un traitement statistique des données biologiques sur les Cyprinidés juvéniles collectées de 1982 à 2004 sur les trois sites de CNPE en aval de Lyon : Saint-Alban, Cruas, Tricastin, et depuis 1987 sur la retenue de Caderousse, en vue de dégager des tendances dans les séries chronologiques et de rechercher des liens avec les variables hydrologiques et thermiques.

Les données biologiques portent sur l'abondance des alevins des vingt espèces de cyprinidés dans les pêches effectuées en fin d'été, appartenant à la classe d'âge 0+ c'est à dire issus de la reproduction de l'année en cours. Cette classe constitue le « recrutement » de la population, elle formera une cohorte dont on pourra suivre la « force » au cours des années suivantes. Chez les poissons, une cohorte issue d'un fort recrutement annuel se distingue souvent par des effectifs plus élevés, bien identifiables pendant plusieurs années ; à l'inverse, un faible recrutement peut être suivi par la faiblesse des effectifs de cette cohorte. Ce schéma n'est toutefois pas une loi générale et les données qui font l'objet de cette étude ne donnent aucune indication sur l'abondance de la population globale de chaque espèce. Le recrutement, s'il est connu sur une période suffisamment longue, permet cependant de caractériser l'ensemble du processus de reproduction et fournit de ce fait des informations sur les géniteurs, le succès de la reproduction et la survie larvaire.

Le régime thermique est représenté dans ces analyses par les variables définies sur cinq périodes de l'année dans l'étude de Carrel [5] (voir 2.2.1). Le régime hydrologique est décrit par trois variables sans dimension :

$Q_{mi}$  : débit moyen de la période thermique  $i$  / débit moyen inter-annuel,

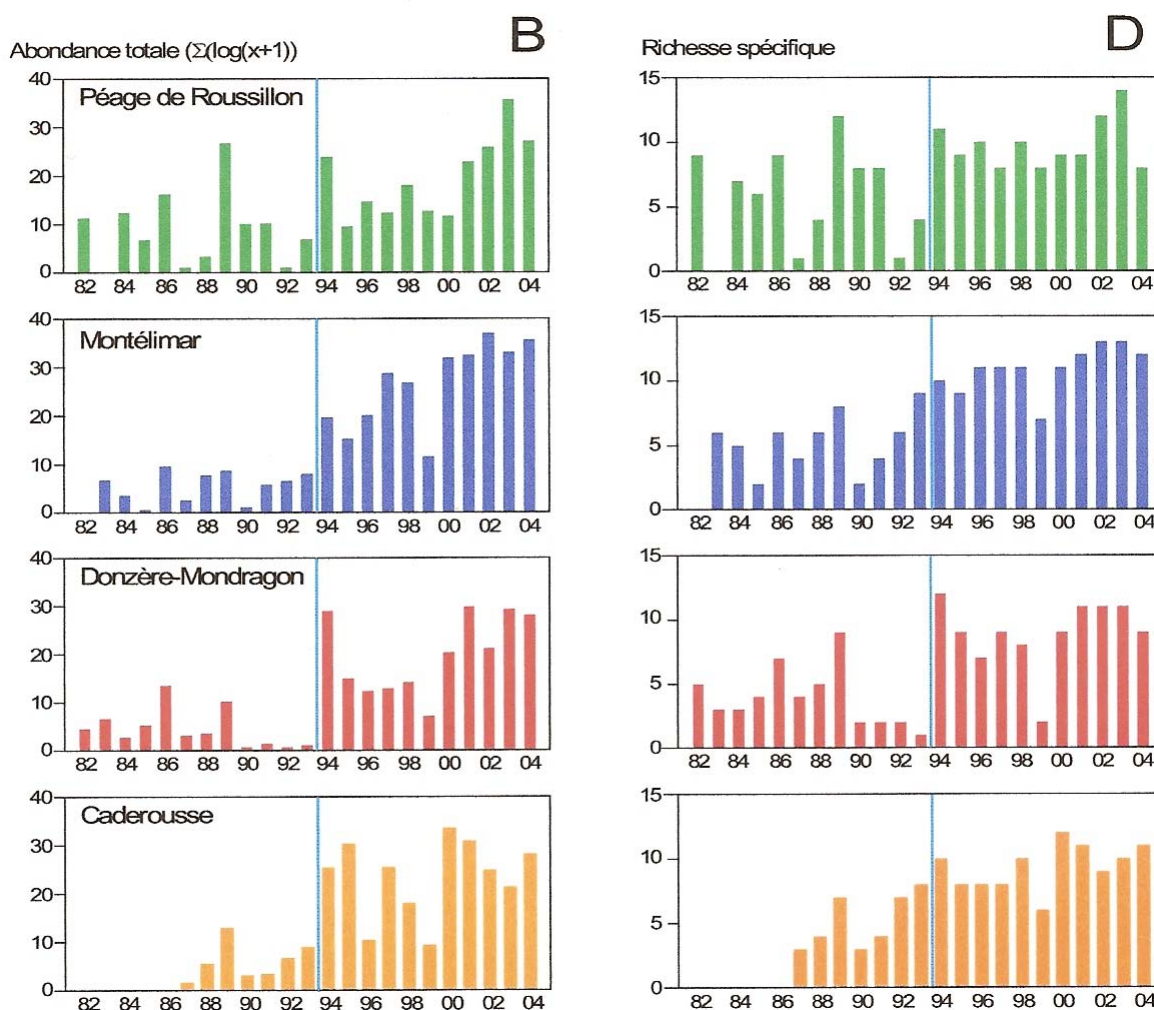
$Q_{jxi}$  : débit moyen journalier maximum de la période thermique  $i$  / débit moyen inter-annuel,

$D_{mi}$  : rapport  $Q_{jxi}$  / médiane historique à 90 jours

L'ACP sur les données hydrologiques et thermiques montre d'une part le synchronisme de variation de ces facteurs sur les différents sites et d'autre part le lien étroit

entre hydrologie et thermie, en particulier l’effet des débits élevés (moyens ou de crues) qui se traduisent par un retard dans l’échauffement de l’eau au printemps ou même par un écart à la courbe de référence inter-annuelle.

L’analyse des données biologiques met en évidence huit espèces principales : gardon, ablette, chevaine, hotu, goujon, brème bordelière, bouvière et barbeau fluviatile. Par rapport à la liste de Bugey, il est à noter la moindre représentation du spiralin et surtout de la vandoise qui fait partie sur ces sites du groupe des espèces à abondance faible. L’ACP sur les données biologiques confirme les conclusions de l’étude globale [10] : la variabilité inter-site n’est pas significative devant la variabilité temporelle des abondances. Sur les vingt années d’observations, les années 1986 et 1989 puis toute la période de 1994 à 2004 se distinguent par un fort recrutement ; de même, la richesse spécifique augmente après 1993 (Figure 22).



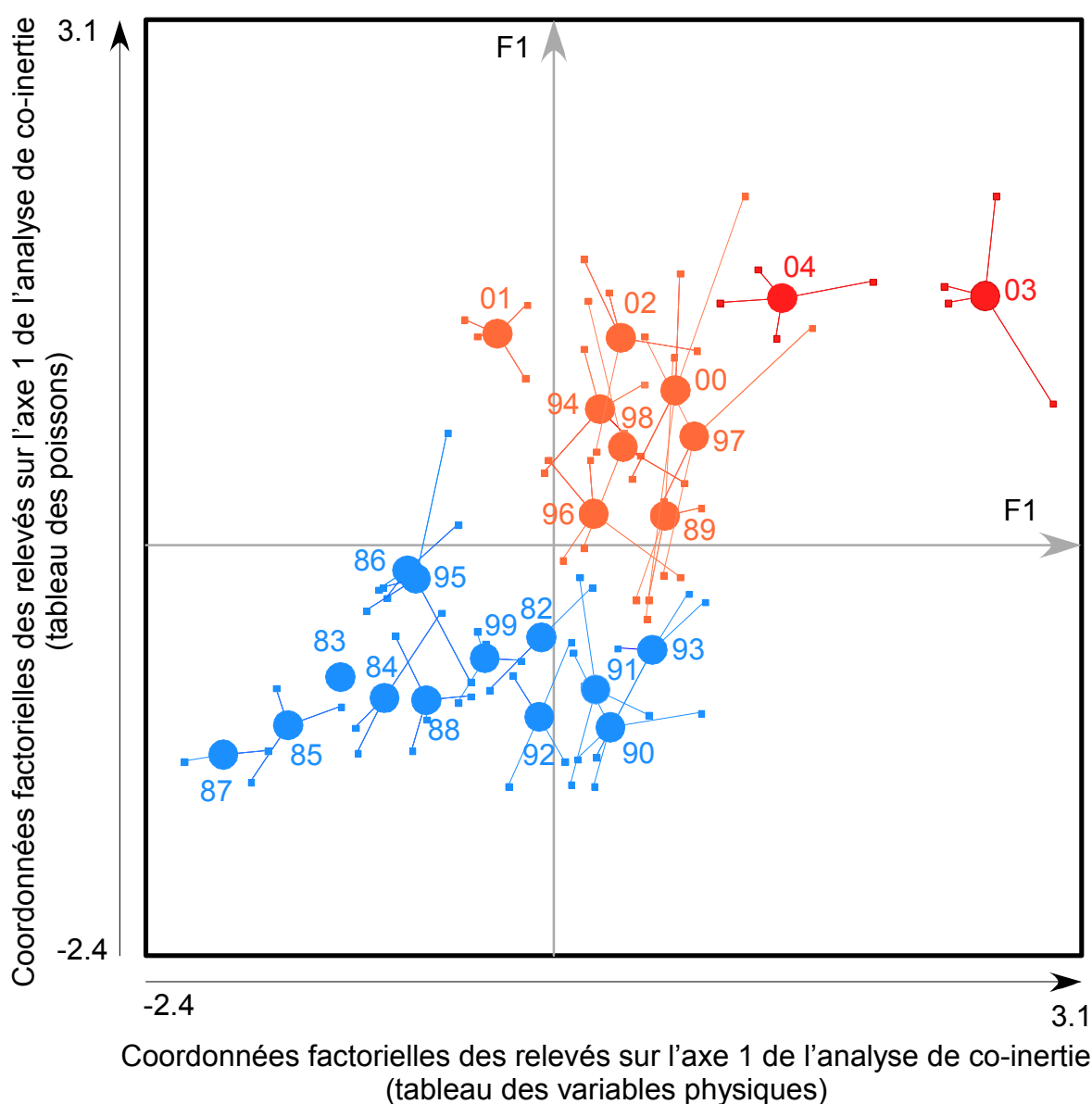
**Figure 22** : Chroniques de l’abondance totale des Cyprinidés 0+ (B) et de la richesse spécifique de la famille des Cyprinidés (D) sur les quatre sites du Bas-Rhône [12].

Une analyse conjointe par co-inertie de la variabilité thermique, hydrologique et biologique montre un bon accord entre l’évolution climatique représentée par les métriques thermiques C12, C18, CM, D1, S1, S2, S3, D3 (voir 2.2.1), qui traduisent la tendance à

l'augmentation de la température printanière et estivale, et l'augmentation du recrutement de la majorité des espèces de Cyprinidés présents sur ces sites.

L'analyse de co-inertie met en évidence une structure temporelle comportant trois ensembles d'années (**Figure 22**).

- les années « froides », en bleu, qui regroupent la période 1982-1988 et les années 1992, 1995, 1999 et 2001,
- les années plus chaudes, en orange, dont les seuils thermiques C12 et C18 (12°C et 18°C) sont plus précoces, avec des écarts de doses thermiques S1, S2, S3 qui augmentent,
- les années 2003 et 2004, en rouge, marquées par des températures estivales particulièrement élevées.



**Figure 22:** Analyse de co-inertie. Projection des centres de gravité des années sur le plan construit par les axes F1 (ordonnées) résultant des variables biologiques (description de

l'assemblage cyprinicole) et l'axe F1 (abscisses) produit par les variables physiques (hydrologie et thermie saisonnalisées)[12].

Au cours de la période 1994-2004, on observe une tendance à l'augmentation de la proportion des espèces rhéophiles (hotu, blageon, spirlin, barbeau) par rapport au cortège des espèces lénitophiles comme le gardon. Avec des débits moyens journaliers de l'ordre de 7000 m<sup>3</sup>/s, les deux crues majeures de l'hiver 1993-1994 ont mobilisé les dépôts sédimentaires sur l'ensemble du Bas-Rhône. Cet épisode de décolmatage des fonds a dégagé des substrats durs favorables aux espèces lithophiles, il a aussi éliminé des sédiments riches en polluants organiques et métalliques ; il est en partie responsable de la rupture constatée après 1994.

Des débits relativement faibles et stables pendant le printemps et l'été sont favorables à la reproduction des Cyprinidés, des crues survenant pendant la fraie, l'éclosion et les premiers jours suivant l'apparition des larves, peuvent en revanche avoir un effet négatif sur le recrutement. L'ablette s'accommode mieux que d'autres espèces de fluctuations importantes de débits en raison de sa capacité à fractionner sa ponte sur plusieurs mois.

### 3.3.5 Conclusions

De l'analyse globale effectuée sur les peuplements de poissons des quatre sites de CNPE pendant la période de 25 ans entre 1979 et 2004, quelques conclusions ressortent.

1- Une évolution similaire est observée sur tous les sites : les espèces d'eau froide régressent au profit des espèces thermophiles, elle est particulièrement nette à Bugey et est interprétée comme une réponse au changement climatique manifesté par l'augmentation de la température de l'eau.

2- Le peuplement de poissons du Rhône évolue aussi sous l'effet de l'introduction de nouvelles espèces qui peuvent être favorisées par la dérive climatique.

3- L'effet du changement climatique est prépondérant sur l'effet des rejets thermiques des CNPE dans la mesure où la même tendance est observée sur les stations en amont et en aval des CNPE. L'effet des rejets thermiques intervient en second ordre mais il est toutefois décelable localement sur le site de Bugey aux stations qui subissent un échauffement permanent et supérieur à l'échauffement après mélange (3°C à 9°C). Il se manifeste par une plus forte représentation des espèces thermophiles en ces stations.

4- Sur le Bas Rhône, le réchauffement précoce de l'eau au printemps et les températures printanières et estivales élevées favorisent la reproduction des Cyprinidés présents lorsque le débit reste relativement faible et stable.

5- L'hydrologie influe dans le Bas-Rhône sur la variabilité du régime thermique, mais ce sont surtout les grandes crues intervenues pendant l'hiver 1993-1994 qui ont marqué l'évolution ultérieure du recrutement et ont favorisé des espèces plus rhéophiles et lithophiles, entraînant une élévation de la richesse spécifique du peuplement de poissons.

6- La réintroduction des grands migrateurs dans le Rhône est un des objectifs de gestion prioritaires ; la migration peut être perturbée au printemps par des variations thermiques de grande amplitude.

## **4- Quelques conclusions et recommandations**

De par ses aménagements hydroélectriques et ses centrales thermiques nucléaires, le Rhône est aujourd'hui un des grands fleuves européens équipés pour la production d'énergie. Les quatre CNPE actuellement en service sur le fleuve produisent près du quart de l'électricité nucléaire française. Cette capacité de production doit rester compatible avec les objectifs d'atteinte du bon état ou du bon potentiel écologique fixé par la DCE à l'horizon 2015. Il était donc indiqué de donner une vision d'ensemble sur les rejets thermiques de ces installations non seulement sous l'aspect des échauffements cumulés mais aussi sur leur impact hydrobiologique.

### **1- Les invariants : l'aménagement énergétique du fleuve Rhône.**

De profondes modifications morphologiques, hydrologiques, sédimentologiques sont intervenues dans le fleuve au cours du siècle dernier, elles jouent un rôle déterminant dans la structuration des peuplements aquatiques. Les composantes biologiques sont très liées aux conditions d'habitat originelles du fleuve, plus ou moins modifiées par les aménagements. Ainsi, parmi les secteurs étudiés ici, celui de Bugey a été peu transformé morphologiquement, alors que celui de St Alban l'a été assez radicalement. Il faut aussi mentionner que la résistance du peuplement résiduel tient beaucoup au maintien et parfois à la réhabilitation des tronçons court-circuités (TCC), qui sont constitués par l'ancien lit du fleuve (près de 150 km cumulés) : ces TCC servent de zones de refuge, de reproduction et de vie à la plupart des espèces du Rhône.

Il existe par ailleurs, comme dans tout cours d'eau, un gradient longitudinal naturel des conditions hydrologiques, morphologiques et de température, qui influence fortement la répartition des communautés de macro-invertébrés et de poissons; ce gradient est très spécifique sur le Rhône avec plusieurs ruptures très nettes marquées par des affluents : influence lacustre du Léman, influence glacio-nivale de l'Arve, influence de deux rivières pluviales (l'Ain et la Saône) puis influence nivale de l'Isère et enfin influence de l'Ardèche et de la Durance ; il est nécessaire de garder à l'esprit cette succession pour bien interpréter toute tendance observée.

Les apports thermiques provenant des CNPE, qui ont été évalués dans le cadre des phases 1 et 2, induisent des échauffements résiduels médians qui atteignent 0,5 °C à 1,0 °C de l'amont de Saint-Alban à l'amont d'Aramon. A l'aval immédiat des rejets thermiques, avant mélange du rejet d'eau de refroidissement, l'échauffement est beaucoup plus élevé : il atteint par exemple parfois 9°C en rive droite en aval du CNPE de Bugey, la rive gauche n'étant pas échauffée.

### **2- Les changements intervenus au cours des 25 dernières années**

Depuis la fin des années 1970, l'hydrosystème rhodanien évolue sous l'action conjuguée de plusieurs facteurs dont les effets sont appréhendés grâce notamment aux programmes de surveillance hydro-écologique des CNPE.

Une liste des principales causes d'évolution identifiées sur les vingt-cinq dernières années a été dressée :

- la dérive de la température de l'eau sous l'effet du changement climatique en cours conduit à un échauffement moyen d'environ 1,5 °C sur le Haut-Rhône et 3,0 °C sur le Bas-Rhône,
- des événements hydrologiques tels que les crues exceptionnelles de l'hiver 1993-1994 ou des étiages prolongés,
- la réduction de la pollution organique qui a permis le maintien d'un niveau d'oxygène dissous satisfaisant même pendant l'épisode de canicule en 2003,
- la réduction de certaines pollutions potentiellement toxiques,
- le développement d'espèces exogènes, particulièrement depuis 1990,
- les nouveaux aménagements tels que la retenue de Sault-Brenaz (1986) en amont du CNPE de Bugey.

### **3- Les réponses biologiques aux changements**

Confrontées à ces changements, les composantes biologiques évoluent par des modifications structurelles ou disparaissent des secteurs; les tendances ont été caractérisées dans cette étude par plusieurs traitements statistiques. Pour les facteurs thermiques, les analyses statistiques sont fondées sur des données :

- acquises au pas de temps horaire,
- moyennées à la journée pour les études statistiques, notamment des phases 1 et 2,
- agrégées à des pas de temps supérieurs (hebdomadaire à pluri-mensuel) pour l'évaluation de leur impact écologique.

En effet, les données collectées dans le cadre des suivis hydrobiologiques et piscicoles des CNPE sont acquises dans le but de mettre en évidence des modifications structurales au sein des peuplements et de les suivre sur le moyen ou le long terme, les peuplements étant considérés comme des intégrateurs des modifications à ces échelles de temps.

En réponse à l'élévation de la température sous l'effet du changement climatique, une modification générale dans la structure des peuplements de macro-invertébrés et de poissons est observée sur le Haut-Rhône au cours des 25 dernières années et particulièrement au cours de la dernière décennie : les espèces thermophiles et lénotophiles sont favorisées alors que les espèces sténothermes d'eau froide et rhéophiles montrent une tendance à la régression [9], [10]. Une précocité de la maturation sexuelle et de la reproduction et l'arrêt de croissance estivale lorsque le seuil thermique supérieur est dépassé peuvent expliquer la régression des espèces sténothermes d'eau froide [12]. Ces évolutions sont observées localement, plus nettement aux stations en aval du site de Bugey qui sont exposées en permanence à des échauffements plus élevés (environ + 5°C et + 9°C) que ceux résultant du mélange du rejet du CNPE avec le Rhône.

Sur le Bas-Rhône, où les peuplements étaient déjà dominés par des taxons thermophiles et lénotophiles, cette dérive est moins marquée [7], [28]. Certaines espèces de Cyprinidés euryèces, comme le gardon, bénéficient des printemps et des étés plus chauds qui favorisent leur reproduction [12] et leur survie [11] dans les schémas thermiques observés. L'extension de la période chaude favorise les espèces de poissons dont la ponte est étalée ou peut être fractionnée. Peu de données existent sur les macrophytes en dehors de la surveillance effectuée à Saint-Alban ; sur ce site la diversité des macrophytes semble peu

affectée par un échauffement permanent voisin de 5°C. Une réduction de leur variété et de leur abondance est toutefois observée sur une partie de la zone en aval du CNPE.

Ces résultats sont en accord avec les évolutions potentielles des peuplements des cours d'eau français prévues par les modélisations réalisées dans le programme GICC-Aquabio [32]. Sous l'effet de l'élévation de la température, cette étude prévoit pour les poissons une raréfaction des espèces actuellement caractéristiques des zones amont des réseaux et un repli des espèces de Cyprinidés les plus rhéophiles vers ces zones amont.

Parmi les autres causes d'évolution, la qualité de l'eau qui s'est améliorée pour ce qui concerne les indicateurs de pollution organique, le décolmatage des fonds et/ou l'amélioration de la qualité physico-chimique du sédiment dans le Bas-Rhône lors des grandes crues de 1993-1994, constituent des facteurs favorables pour les macro-invertébrés et les poissons.

Des espèces exotiques de macro-invertébrés et de poissons se sont installées dans le Rhône au cours du XXème siècle, ces introductions semblent plus nombreuses depuis 1990. Certaines de ces espèces présentent un caractère envahissant et sont susceptibles de modifier la structure des peuplements et d'avoir des impacts d'ordre fonctionnel.

Quoiqu'il en soit, il persiste un « gradient longitudinal » qui se manifeste par une meilleure qualité biologique en amont de Lyon qu'en aval.

En dehors du chenal et des canaux d'aménée et de fuite des usines hydroélectriques, les **tronçons court-circuités et les annexes hydrauliques** offrent des conditions d'habitat diversifiés propices à des espèces de plantes, d'invertébrés, de poissons. Ils constituent notamment des milieux privilégiés pour la reproduction des poissons. Ce sont aussi des refuges où subsistent des espèces protégées.

#### **4- Quelle est la part des rejets thermiques des CNPE dans ce contexte changeant?**

Dans les changements biologiques, les rejets thermiques interviennent en second ordre par rapport à l'évolution climatique et ils ont été observés surtout dans le chenal.

Le choix, au moment de la construction des CNPE, de ne pas mélanger immédiatement le rejet aux eaux du Rhône était motivé par la volonté d'éviter de créer une discontinuité thermique sur toute la largeur du fleuve qui aurait risqué de perturber le déplacement des poissons. De fait, les effets biologiques des rejets thermiques sont bien identifiés localement, à l'aval immédiat des CNPE, en des stations où l'échauffement est plus élevé (rive exposée au rejet) mais il subsiste en contrepartie des zones non échauffées sur la rive opposée.

La charge thermique appliquée au Rhône depuis une quinzaine d'année n'a pas eu d'effet majeur comparée aux autres pressions anthropiques ou naturelle (climatique). Par ailleurs, les tronçons court-circuités sont moins influencés par les rejets thermiques des CNPE que l'axe fluvial lui-même. Dans l'avenir, en absence de toute nouvelle installation de centrale thermique en circuit ouvert, la charge thermique restera constante et la part des rejets des CNPE par rapport à l'évolution naturelle prévue sous l'effet du changement climatique devrait même diminuer.

S'agissant des limites réglementaires de température et d'échauffement, jusqu'alors respectées en valeur instantanée, elles pourraient être établies selon d'autres modalités : le

lissage journalier, sous réserve que les variations autour des seuils restent dans la gamme des amplitudes journalières observées sur le fleuve, pourrait ainsi être envisageable.

Il faut enfin noter que, non comptés les effets sur la morphodynamique et l'habitat, le facteur hydrologique interagit avec les facteurs thermiques et physico-chimiques : les périodes de bas débits sont caractérisées par une moindre dilution des rejets thermiques, une plus forte amplitude journalière en température de l'eau (les échanges avec l'air étant facilités) et une plus forte amplitude des cycles liés à la photosynthèse sur l'oxygène dissous et le pH. A contrario, les périodes de hauts débits se traduisent par un lissage des cycles et une dilution plus importante des rejets thermiques.

## 5- Comment concilier les rejets thermiques avec l'atteinte des objectifs de qualité écologique du fleuve Rhône ?

Il s'agit de maintenir les rejets thermiques dans un domaine compatible avec les objectifs de la DCE du bon état écologique ou du bon potentiel écologique en tenant compte du changement climatique dans la mesure où le référentiel du bon état et du bon potentiel écologique intégrera dans l'avenir les effets du changement climatique.

**Dans le chenal et les canaux** où s'effectue l'écoulement principal du fleuve, les échauffements résiduels médians induits par les rejets thermiques des CNPE (+ 0,5°C à +1°C) sont nettement inférieurs aux élévations moyennes de température mesurées sur 25 ans (+1,5°C à + 3,0°C). Le régime thermique du Rhône est donc principalement affecté par le changement climatique en cours, d'autant que la charge thermique rejetée est de plus en plus fréquemment contrainte par la température amont et les bas débits : les deux effets ne sont ni additifs, ni indépendants, mais ils se conjuguent (résultats de l'étude Rhône phase 2 sur les échauffements en période de température élevée du fleuve).

La surveillance hydrobiologique à long terme indique que les modifications constatées sur les peuplements de macro-invertébrés et de poissons s'expliquent en premier lieu par les effets du changement climatique.

Le régime thermique des **tronçons court-circuités et des annexes hydrauliques** est en grande partie indépendant de la température du Rhône en période estivale; dans les conditions actuelles, ces milieux à haute valeur écologique ne sont pas affectés par les rejets thermiques des CNPE.

Les rejets thermiques doivent également être compatibles avec **la migration des poissons amphihalins** dans le Bas-Rhône [18]; pour cela des connaissances sur les conditions thermiques compatibles avec les migrations de l'aloise feinte et des autres espèces prises en compte dans le plan d'action 2004-2008 [30] doivent être acquises par des études *in situ* lorsque cela est possible. Le succès enregistré au cours des dernières années dans la montée de l'Alose jusqu'en Ardèche<sup>2</sup> par les écluses de navigation de la CNR indique que les températures du printemps et du début de l'été permettent actuellement la migration de cette espèce. Il faut toutefois préciser les seuils thermiques maximum de migration, mais aussi connaître l'effet de variations de température en quelques jours pour toutes les espèces figurant dans le plan d'action.

---

<sup>2</sup> A l'heure actuelle, suite à la capture de jeunes individus dans la retenue de Montélimar en 2005, l'aloise serait susceptible de franchir les 5 premiers ouvrages du Rhône : Vallabrègues, Avignon, Caderousse, Donzère-Mondragon et Montélimar.

Le programme actuel de surveillance hydro-écologique doit être poursuivi, il doit être adapté à la détection des changements thermiques, hydrologiques, chimiques et biologiques.

Enfin, les fortes réductions de débit résultant de la gestion hydraulique de la chaîne des aménagements du Rhône ont un impact direct sur les composantes biologiques [12]. Elles interfèrent en outre avec les rejets thermiques en augmentant transitoirement l'échauffement. Elles diminuent également le volume des zones refuges. Une action sur l'hydrologie du fleuve dans le cadre d'une gestion de la production intégrée a été proposée par la DIREN de Bassin RM&C [4].

## **6- Poursuivre et améliorer la surveillance hydro-écologique des CNPE et acquérir des connaissances.**

Le recueil systématique de données physico-chimiques et biologiques au titre des **programmes de surveillance hydro-écologique** des CNPE a permis de constituer des séries chronologiques qui ont été largement exploitées dans le cadre de cette étude et dans plusieurs publications scientifiques. Il est nécessaire de poursuivre ces mesures, en premier lieu pour contrôler l'impact des CNPE dans un contexte changeant, mais aussi pour mettre les données collectées à la disposition des chercheurs. Un point mérite cependant d'être examiné à l'occasion de la révision de ces programmes : améliorer le niveau de détermination des macro-invertébrés (à l'espèce) afin de permettre une meilleure exploitation des données collectées dans le cadre de ces programmes.

En période de crise climatique, la persistance de conditions hydrologiques et/ou thermiques exceptionnelles conduit à déclencher un **programme de surveillance renforcé** tel que celui mis en place par la DIREN de Bassin RM&C lors de la canicule de 2003. Le retour d'expérience de ce programme a mis en évidence le rôle important tenu par les mesures en continu de température, oxygène dissous, pH et conductivité électrique aux stations automatiques installées et gérées par EDF à l'amont et à l'aval des CNPE. Il convient de souligner la nécessité d'assurer la qualité de ces mesures malgré les difficultés rencontrées pendant ces périodes critiques.

Les observations in situ des mortalités de poissons pratiquées par les gardes-pêche constituent un précieux instrument d'alerte qui pourrait être complété par la conservation des poissons en vue d'une expertise vétérinaire pour identifier, si possible, la cause de mortalité.

Par ailleurs, l'observation et la collecte sur les filtres des organismes entraînés dans les prises d'eau des centrales thermiques du Rhône peuvent fournir des données qualitatives et semi-quantitatives sur les mortalités de poissons, de certains macro-invertébrés (cas des bivalves récoltés à Tricastin en 2003), d'algues et de macrophytes dérivants.

**En matière de recherches**, l'analyse des séries de données existantes a mis en évidence des modalités de fonctionnement des populations, en particulier chez les poissons. Néanmoins, ces hypothèses, concernant notamment le rôle de l'hydrologie et de la thermique dans le déroulement et le succès de la reproduction des cyprinidés, pourraient être testées par des protocoles de recueil de données ciblés pendant la période printanière sur les premiers stades de développement. Chez les invertébrés, la modélisation de traits biologiques particulièrement reliés à la thermie et à l'hydraulique s'avérerait intéressante en fonction de différents scénarios d'évolution climatique et/ou de rejet des CNPE.

D'autre part, la gestion des situations « de crise » telle que celle rencontrée au cours de l'été 2003, nécessiterait de compléter les observations par l'acquisition de résultats de type

écophysiologique afin de préciser les réponses biologiques aux différentes variations du régime thermique du Rhône et en particulier dans les tronçons court-circuités. L'objectif est de prendre en compte les facteurs hydrologique et thermique dont tout indique qu'ils ne peuvent être considérés séparément en tant que facteurs écologiques.

Dans cette perspective, une action de recherche visant à intégrer les connaissances acquises dans un modèle de dynamique des peuplements couplé à des modèles hydrodynamiques et thermiques (étude spatiale à maille de quelques m<sup>2</sup> de l'évolution conjointe de la disponibilité en habitats et en température pour les espèces électives du secteur en fonction de scénarios de gestion thermique et hydraulique) serait utile sur les secteurs à enjeux et permettrait de tester de nouveaux scénarios de changements [11].

## Références

- [1] Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, 2005. Etat des lieux, Bassin du Rhône et de cours d'eau méditerranéens, caractérisation du district et registre des zones protégées. Version adoptée par le Comité de Bassin du 4 mars 2005, 330 p.
- [2] Comité de bassin Rhône Méditerranée & Corse, 2004. Etat des lieux/ Document de première consultation officielle adopté par le Comité de Bassin le 2 juillet 2004, 22 p.
- [3] Desaint B., 2004. Etude thermique du Rhône - Phase 2. Rapport EDF DTG, 54 p.
- [4] DIREN de Bassin RMC, 2003. Rejets thermiques exceptionnels des centrales de production d'électricité du Rhône. Rapport de suivi des impacts et orientations, 33 p.
- [5] Carrel G., 2005. Le régime thermique du fleuve. Variabilité temporelle 1977-2004. Rapport Cemagref Aix en Provence, Etude Thermique du Rhône, Phase III, 13 p.
- [6] Carrel G., 2005. Physico-chimie des eaux du Rhône 1985-2004. Evolution des paramètres classiques. Rapport Cemagref Aix en Provence, Etude Thermique du Rhône, Phase III, 18 p.
- [7] Bady P. & Fruget J-F., 2006. Etude thermique du Rhône. Synthèse des données sur les invertébrés. Rapport intermédiaire. Rapport Etude Thermique du Rhône, Phase III, 28 p.
- [8] Fruget J-F, 2006. Etude thermique du Rhône. Etude locale des effets des rejets : exemple amont-aval de Saint-Alban. Rapport Etude Thermique du Rhône, Phase III, 8 p.
- [9] Daufresne M., Roger M.C., Capra H., Lamouroux N., 2004. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhone River : effects of climatic factors. *Global Change Biology* 10, 124-140.
- [10] Daufresne M., Souchon Y., Villeneuve B. & Capra H., 2005. Influence du rejet thermique de la centrale nucléaire de Bugey dans un contexte de réchauffement climatique. Rapport Cemagref Lyon, EDF R&D, Etude Thermique du Rhône, Phase III, 21 p.
- [11] Souchon Y., Villeneuve B. Daufresne M., Capra H., 2005. Principaux effets des rejets thermiques décelés sur les peuplements de poissons du fleuve Rhône. Rapport Cemagref Lyon, EDF DTG, Etude Thermique du Rhône, Phase III, 14 p.
- [12] Olivier J-M. & Carrel G., 2006. La variabilité hydro-climatique et son rôle sur la reproduction des poissons Cyprinidés, 1982-2004. Rapport Cemagref Aix en Provence, UMR CNRS 5023. Etude Thermique du Rhône, Phase III, 20 p.
- [13] Fruget J-F., 2003. Changements environnementaux ; dérives écologiques et perspectives de restauration du Rhône français : bilan de 200 ans d'influences anthropiques. *VertigO*, Vol. 4, N° 3, décembre 2003, 1- 40.

- [14] Cattaneo F., Carrel G., Lamouroux N., Breil P., 2001. Relationship between hydrology and Cyprinid reproductive success in the Lower Rhone at Montélimar, France. *Archiv Für Hydrobiologie*. 151, 427-450.
- [15] Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, 2004. Annexes géographiques de l'état des lieux, Version du 2 juillet 2004, 107 p.
- [16] CNR, 2004. La crue du Rhône de décembre 2003. Synthèse hydrologique. Rapport N° I218- DIT-HY 04-149. Septembre 2004.
- [17] Poirel A., Carrel G. & Olivier J-M., 2001. Illustration de la complémentarité des chroniques environnementales dans l'étude d'un hydrosystème fluvial : régime thermique et peuplements piscicoles du Rhône. Actes du colloque « Gestion des Grands Fleuves » juin 2001, Lyon.
- [18] Combe P-M., Le Corre M., Menella J-Y & Perrin J-F., 2001. La restauration des grands migrateurs rhodaniens et méditerranéens : contribution des sciences biologiques et sociales. Colloque International Lyon-Fleuves. 7 p.
- [19] Dessaix J., Fruget J.F., Olivier J.M. & Befly J.L., 1995. Changes of the macroinvertebrate communities in the damned and by-passed sections of the French Upper Rhône after its regulation. *Regulated Rivers* 10 (2-4), 245-279.
- [20] Roger M-C., Faessel B. & Lafont M., 1990. Réactualisation des données hydrobiologiques du Rhône sur le site du Bugey. Rapport Cemagref Lyon, novembre 1990, 67 p.
- [21] Ginot V., Souchon Y. et Roger P. 1996. Impact de l'élévation artificielle de température induite par le fonctionnement du CNPE du Bugey (fleuve Rhône) sur les communautés de poissons. *Hydroécol. Appl.* Tome 8 , vol. 1-2, 127-142.
- [22] Roger M-C., Souchon Y., Capra H., Chandesris A. & Roger P., 2004. Surveillance hydrobiologique du site du Bugey en 2003. Rapport Cemagref. Groupement de Lyon.
- [23] Roger M-C., Souchon Y., Capra H., Chandesris A., Roger P. & Villeneuve B., 2005. Surveillance hydrobiologique du site du Bugey en 2004. Rapport Cemagref. Groupement de Lyon.
- [24] Carrel G., Pont D. & Rivier B., 1995. Variabilité temporelle des peuplements piscicoles dans la section médiane du Bas-Rhône. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 337/338/339, 101-111.
- [25] Nicolas Y. & Pont D., 1995. Importance d'annexes latérales artificielles pour le recrutement en juvéniles de poissons dans un fleuve aménagé, le Bas-Rhône. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 337/338/339, 249-257.
- [26] Carrel G., 2002. Prospecting for historical fish data from the Rhone River basin: a contribution to the assessment of reference condition. *Arch. Hydrobiol.* 155 (2), 273-290.
- [27] IPCC, 2001. Climate change 2001 : the scientific basis. Cambridge University Press.

[28] Daufresne M. & Boët P., 2005. Evolution temporelle de la structure des peuplements piscicoles de grands fleuves français. Rapport EDF, Cemagref, 19 p.

[29] Roger M-C. et Capra H., 2002. Surveillance hydrobiologique du site du Bugey en 2001. Rapport Cemagref. Groupement de Lyon, 25 p. + annexes.

[30] Comité de Gestion des Poissons Migrateurs du bassin RMC. Plan de gestion des poissons migrateurs du Bassin Rhône-Méditerranée et Corse. 2004-2008, 142 p.

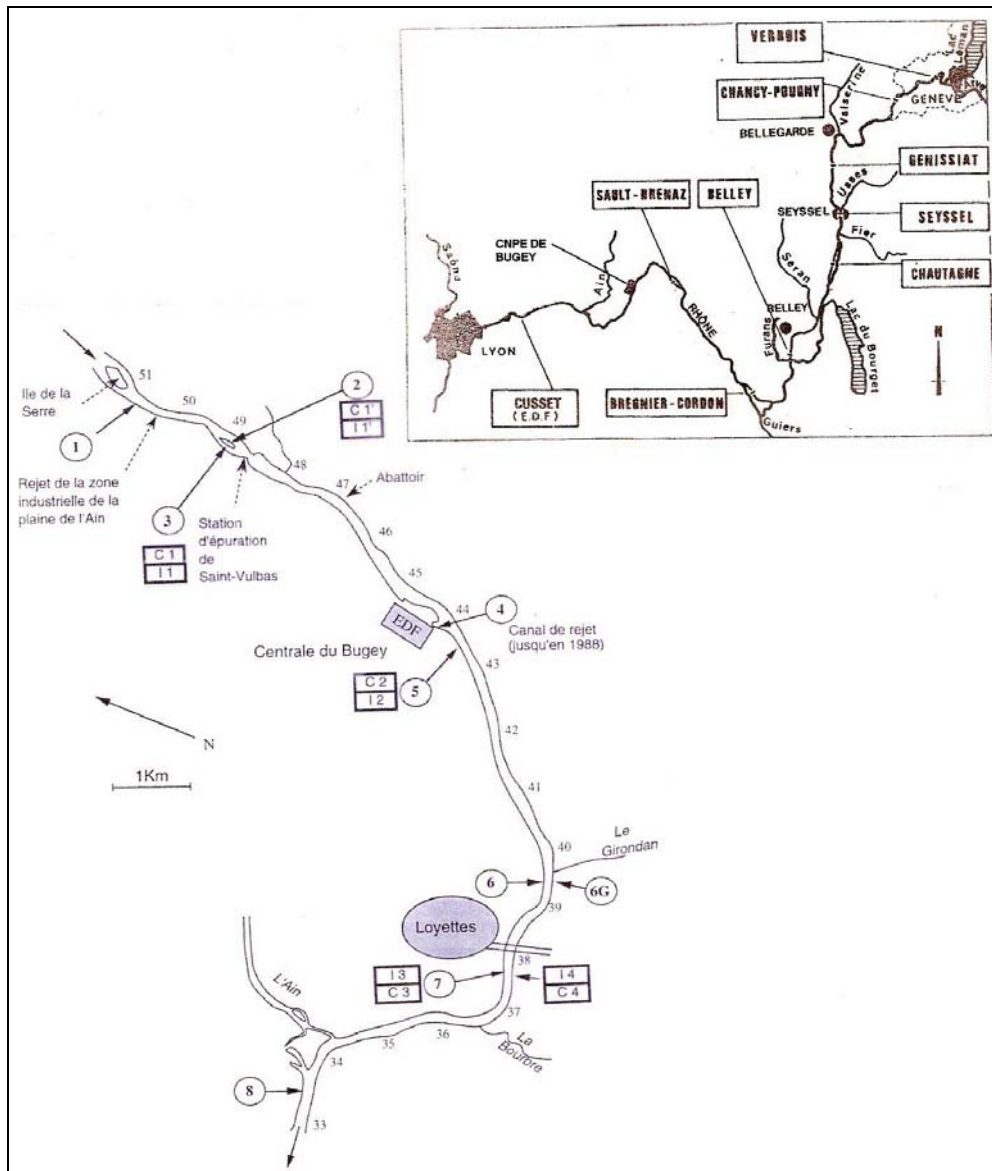
[31] Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2005. Circulaire DCE 2005/12, 17 p.

[32] Pont D. (coordinateur), 2003. Programme GICC-AQUABIO. Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises. Rapport Final. Novembre 2003, 382 p.

[33] Moatar F. et Gailhard J., 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. Comptes-rendus Geoscience.

### Annexe : Localisation des stations du programme de surveillance hydro-écologique des CNPE du Rhône

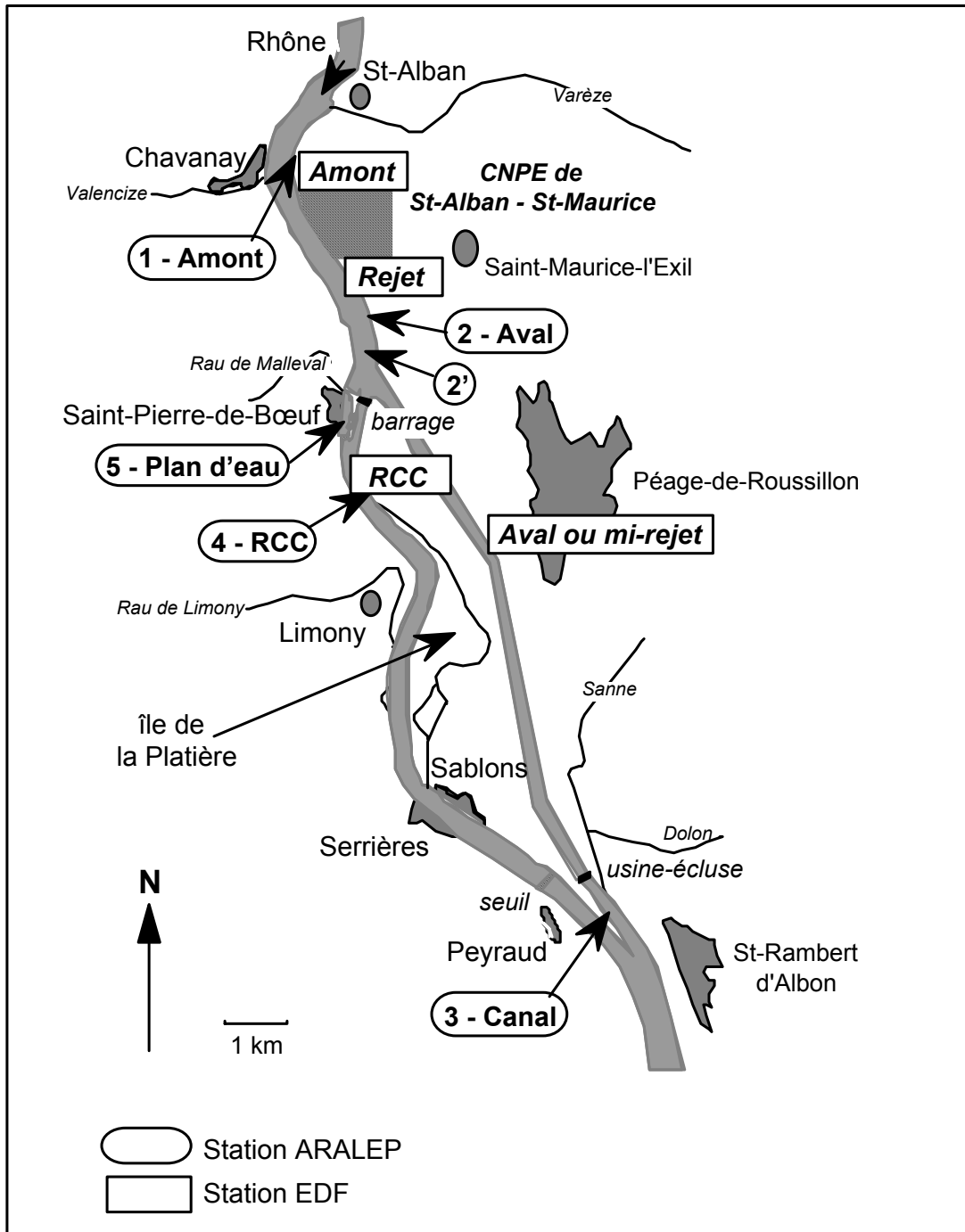
#### CNPE de BUGEY. Localisation des stations de mesure du programme de surveillance hydro-écologique



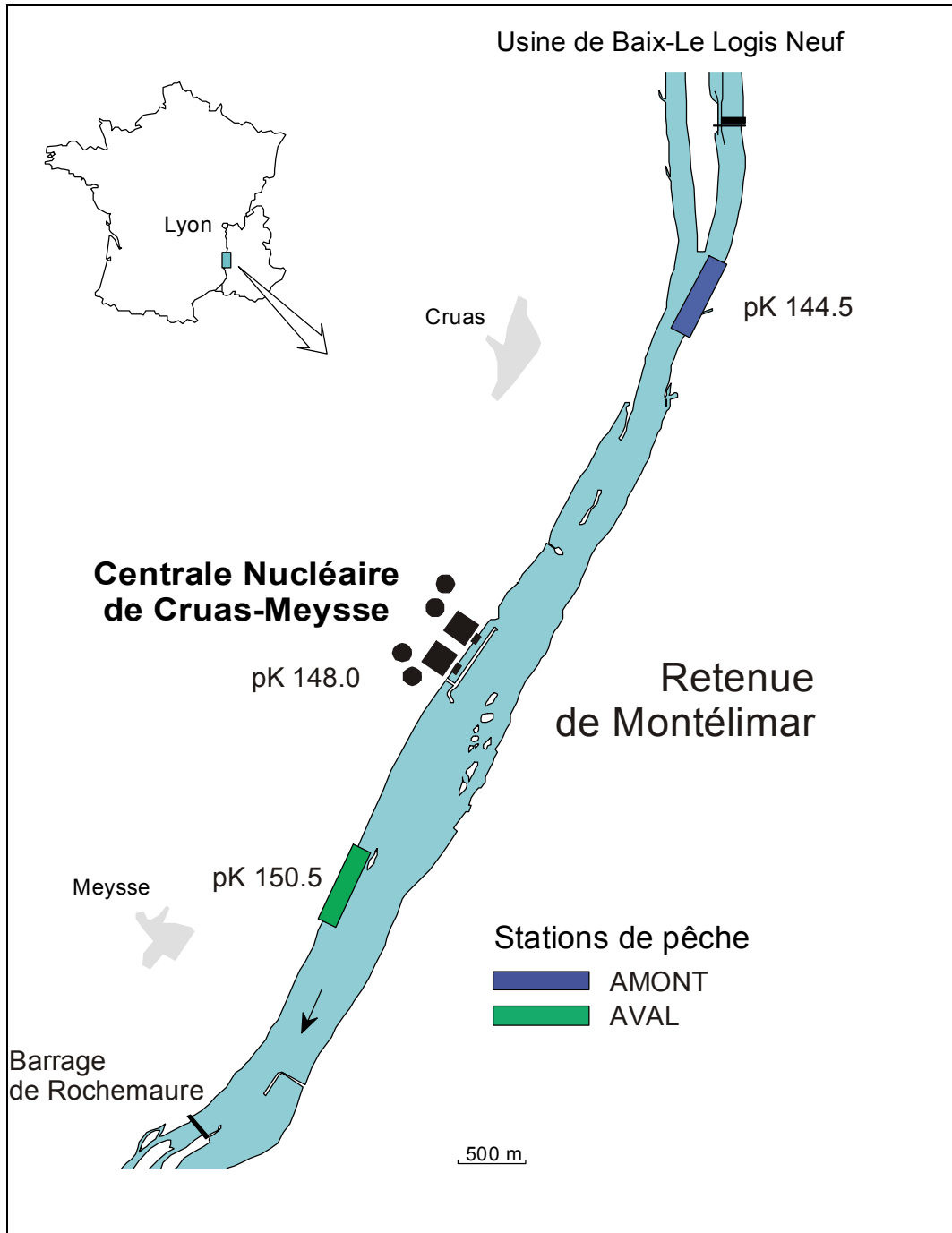
○ Pêches électriques

□ I Invertébrés

**CNPE de Saint-Alban. Localisation des stations de mesure du programme de surveillance hydro-écologique**



**CNPE de Cruas. Localisation des stations de pêche du programme de surveillance hydro-écologique**



**CNPE de Tricastin. Localisation des stations de pêche du programme de surveillance hydro-écologique**

