

ETUDE THERMIQUE GLOBALE DU RHONE

PHASE III

Lot 1 : Synthèse des informations disponibles



ARALEP

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

Avril 2006

SOMMAIRE

LOT 1.1 : SYNTHÈSE DES DONNÉES D'ÉTUDE..... 3

I.	INTRODUCTION	3
II.	LES TABLEAUX FAUNISTIQUES	4
1.	<i>Description des données invertébrées</i>	4
2.	<i>Description des données piscicoles</i>	5
III.	LISTE DES TABLEAUX	13
IV.	BIBLIOGRAPHIE	13

LOT 1.2 : PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DU RHONE 14

I.	INTRODUCTION	14
II.	DONNÉES & MÉTHODES	14
III.	RÉSULTATS & DISCUSSION	17
1.	<i>Analyse générale</i>	17
2.	<i>Variabilité spatiale</i>	17
3.	<i>Variabilité inter-annuelle</i>	20
4.	<i>Variabilité saisonnière</i>	24
IV.	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	28
V.	BIBLIOGRAPHIE	30
VI.	LISTE DES TABLEAUX	30
VII.	LISTE DES FIGURES	30

LOT 1.3 : LE RÉGIME THERMIQUE DU FLEUVE 32

I.	DONNÉES DISPONIBLES	32
II.	TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE	32
III.	ÉTUDE TEMPORELLE DU CONTEXTE THERMIQUE RHODANIEN	33
1.	<i>Calcul des variables</i>	33
2.	<i>Analyses et résultats</i>	36
IV.	BIBLIOGRAPHIE	43
V.	LISTE DES TABLEAUX	43
VI.	LISTE DES FIGURES	43

Lot 1.1 : Synthèse des données d'étude

I. Introduction

Cette section présente l'ensemble des données utilisées dans le cadre de ce travail. Le suivi hydrobiologique du fleuve au droit des sites nucléaires est assuré par plusieurs équipes (Tableau 1). La réalisation et l'interprétation des données biologiques passent par l'obtention de données complémentaires provenant de diverses sources (Tableau 2). Elles peuvent être envoyées dans un cadre contractuel par les responsables des études de chaque site (données physico-chimiques des enregistreurs en continu, relevés hydrologiques, ...); communiquées par les services centralisateurs d'EDF; provenir de banques de données accessibles en ligne (physico-chimie, débits) ou des services Minitel 3617 pour de la donnée non actualisée dans les bases de données nationales (débits).

La synthèse a exigé le regroupement et le remaniement des données stockées dans des bases propres aux divers intervenants. Une présentation et description rapide des tableaux utilisés sera fournie dans cette section, sachant que le détail pourra être trouvé dans les sections utilisant directement la donnée.

Tableau 1– Liste des organismes assurant les suivis hydrobiologiques des 4 sites nucléaires du Rhône.

<p>ARALEP Ecologie des Eaux Douces</p> <p>Domaine Scientifique de la Doua, Bât. CEI-66, Bd Niels Bohr, BP 2132 69603 VILLEURBANNE Cedex</p>	<p>CNPE Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil</p>
<p>Cemagref Aix-en-Provence, Unité de Recherche Hydrobiologie</p> <p>3275 Route de Cézanne, CS 40061 13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5</p>	<p>CNPE Cruas-Meyssse, CNPE Tricastin</p>
<p>Cemagref Lyon, Unité de Recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques</p> <p>3 bis, quai Chauveau CP 220 69336 Lyon Cedex 09</p>	<p>CNPE Bugey</p>
<p>Université de Lyon, UMR CNRS 5023, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux</p> <p>43 Boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex</p>	<p>CNPE Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil</p>

Tableau 2– Liste des fournisseurs de données complémentaires utilisées dans le cadre des suivis rhodaniens.

<p>EDF – CNPE Bugey</p> <p>EDF – CNPE Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil</p> <p>EDF – CNPE Cruas-Meyssse</p> <p>EDF – CNPE Tricastin</p>
--

EDF - DTG

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

EDF – Recherche et Développement

Laboratoire National Hydraulique et Environnement
6, Quai Watier - BP 49
78401 CHATOU Cedex

BASES DE DONNEES**Service d'Information sur l'Eau du Bassin Rhône-Méditerranée**

Etat qualitatif des Eaux Superficielles

<http://sierm.eaurmc.fr/eaux-superficielles/index.php>

Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie

<http://hydro.rnde.tm.fr/>

Débits du Rhône, Compagnie Nationale du Rhône

Minitel 3617 INFORHONE

Office fédéral de l'environnement, Suisse

<http://www.bwg.admin.ch/f/index.htm>

II. Les tableaux faunistiques

1. Description des données invertébrées

En fonction de la mise en service progressive des différents CNPE considérés (de 1979 pour Bugey à 1985 pour Cruas et Saint-Alban), la longueur des chroniques de données disponibles est variable. Afin d'homogénéiser l'analyse temporelle, celle-ci a été calée sur le début du suivi des deux derniers sites mis en service, à savoir 1985. Trois à quatre stations sont échantillonnées selon les sites, ce qui aboutit à un total de 14 chroniques temporelles potentiellement disponibles entre 1985 et 2004.

L'ensemble de ces données est centralisé dans une base de données développée sous le logiciel ACCESS. Celle-ci s'organise autour de quatre tables (Site, Sample, Invertebrates, Taxonomy) permettant de décrire les sites de prélèvement, les prélèvements, le nombre et le type des taxa prélevés. Elle est accessible sur le serveur Rhône à l'adresse <http://rhone.univ-lyon1.fr/~pbady/> après obtention du mot de passe auprès des auteurs.

L'échantillonnage est réalisé par substrat artificiel mais celui-ci diffère selon les sites : type multiplaques pour Bugey, Cruas et Tricastin, type IBGA pour Saint-Alban. Le temps de colonisation des substrats peut également varier légèrement : 3 semaines sur les stations de Cruas et Tricastin, 4 semaines sur les stations de Saint-Alban, 3 à 4 semaines à Bugey.

Les limites de détermination varient également entre les sites : niveau taxonomique fixé à la famille à Cruas et Tricastin, genre, voire très souvent espèce, à Bugey et Saint-Alban.

Une homogénéisation et une transformation des données lors des analyses permettront d'atténuer l'effet de ces disparités d'échantillonnage et de protocole. L'information disponible de chaque station est résumée dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Description des données concernant les peuplements de macroinvertébrés benthiques échantillonnés entre 1985 et 2004 par filet Surber (S) et/ou substrat artificiel (AS). Les producteurs de données des 4 sites sont indiqués dans le Tableau 1. Code = code attribué à la station dans les diverses citations et représentation, Nb = nombre de prélèvements, Ech = méthode d'échantillonnage, Rt = richesse taxonomique totale, Rtm = richesse taxonomique moyenne par an, pK = point kilométrique de la station sur le Rhône, Identification = niveau d'identification.

Station	Code	Nb	Ech	Rt	Rtm	pK	Identification
Bugey amont	BUGA	299	AS + S	76	37.45	-48.3	Espèce-Genre
Bugey rejet	BUGR	190	AS + S	59	22.15	-44	Espèce-Genre
Bugey aval 1	BUGVa	268	AS + S	71	31.75	-38	Espèce-Genre
Bugey aval 2	BUGVb	280	AS + S	72	32.90	-38	Espèce-Genre
St-Alban amont	SALA	88	AS	60	28.10	47	Espèce-Genre
St-Alban aval 1	SALR	90	AS	47	24.60	49	Espèce-Genre
St-Alban aval 2	SALV	90	AS	66	32.40	62	Espèce-Genre
St-Alban RCC	SALC	88	AS	62	28.60	54	Espèce-Genre
Cruas amont	CRUA	82	AS + S	50	27.55	146.8	Famille
Cruas rejet	CRUR	75	AS + S	38	22.74	148	Famille
Cruas aval	CRUV	82	AS + S	47	26.40	150.3	Famille
Tricastin amont	TRIA	53	AS	49	26.85	183.8	Famille
Tricastin rejet	TRIR	53	AS	39	20.15	184.5	Famille
Tricastin aval	TRIV	53	AS	46	24.40	192.5	Famille

Par rapport aux objectifs propres à cette étude, seules les stations amont et aval éloigné des différents CNPE ont été conservées, ce qui aboutit à l'analyse de 9 chroniques temporelles (codes station indiqués en rouge dans le Tableau 3).

Les stations "aval éloigné" sont situées à une dizaine de kilomètres en moyenne des points de rejet. La présence de deux stations aval à Bugey correspond à une différenciation des deux rives.

2. Description des données piscicoles

Les données piscicoles traitées dans cette étude ont été obtenues par pêche électrique depuis une embarcation.

Dans le cadre du Cemagref, la pêche est effectuée en continu le long des berges de la station (ALLARDI et al., 1975; GINOT et al., 1996). La durée est enregistrée afin de permettre une comparaison des pêches. Les effectifs (ou biomasses) sont donc exprimés en regard d'un effort de pêche (Capture Par Unité d'Effort ou CPUE).

Les équipes universitaires et de l'ARALEP utilisent l'échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA) (NELVA et al., 1979; PERSAT & OLIVIER, 1991). L'EPA consiste en un prélèvement spatialement limité au point fixe d'immersion de l'anode. Celle-ci n'est pas déplacée pendant le ramassage des poissons électro-narcosés. Chaque point est accompagné d'une fiche descriptive. Une station regroupe un nombre défini d'EPA fonction de la taille de la station. Dans le cadre du suivi du CNPE de Saint-Alban, 20 points sont réalisés par station à chaque date de pêche.

Afin de standardiser les échantillons en regard des deux protocoles, une équivalence est attribuée entre 20 EPA et une pêche en continu de 20 minutes, sur la base d'une comparaison réalisée lors du schéma de vocation piscicole du Rhône (PONT et al., 1992). Dans les analyses multivariées, afin de normaliser les données, les effectifs de 20 EPA (ou CPUE 20 mn) sont transformés en $\ln(x+1)$.

Sur le Rhône, les peuplements piscicoles sont dominés par les cyprinidés (20 espèces sur l'axe rhodanien). Ces espèces se reproduisent essentiellement au printemps et en été. Lors d'une campagne de pêche printanière, les jeunes de l'année ne sont pas encore présents ou non capturables par les techniques mises en œuvre. A la fin de l'été, les juvéniles sont largement représentés et capturables. Afin de prendre en compte cet effet saisonnier marqué, l'année biologique distincte de l'année calendaire est définie en considérant un décalage temporel de l'ordre de 6 mois. L'année biologique commence au début de l'été de l'année n et se termine à la fin du printemps de l'année n+1.

a. Etude piscicole du Rhône à Bugey

Le suivi piscicole du site de Bugey a débuté en mars 1979. Les données utilisées dans ce rapport sont centralisées par le Cemagref de Lyon, UR Biologie des Ecosystèmes Aquatiques, Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative. Huit stations sont régulièrement prospectées (Tableau 4) depuis le début de cette chronique, la plus longue disponible sur le Rhône (Tableau 5).

Tableau 4 – Liste des stations de pêche du suivi piscicole de Bugey. En rouge, les stations soumises au réchauffement par le panache thermique.

Stations	pK	Informations
1	-51	Aval île de la Serre
2	-49	Rive d'une île (côté chenal)
3	-49	Bras entre l'île et la rive droite
4	-43.5	Rejet thermique
5	-39.5	Confluence du Girondan, RD
6	-39.5	Confluence du Girondan, RG
7	-37.5	Aval de Lovettes
8	-33.5	Aval confluence de l'Ain

Tableau 5 – Nombre de pêches électriques par année et par station à Bugey.

Année	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1979	4	4	3	4	4	2	4	1	26
1980	4	4	4	4	4	4	4		28
1981	3	3	3	3	3	3	3		21
1982	6	6	6	6	6	6	6	5	47
1983	5	4	5	5	5	5	5	5	39
1984	4	4	4	3	4	4	4	4	31
1985	4	2	3	3	3	3	2	2	22
1986	4	4	3	4	4	4	3	3	29
1987	4	3	3	3	3	3	3	3	25
1988	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1989	4	4	3	4	4	4	4	4	31

1990	4	4	4	4	4	4	4	4	32
1991	4	4	4	4	4	4	4	4	32
1992	3	3	3	3	3	3	3	3	24
1993	4	4	3	4	4	4	4	4	31
1994	4	4	3	4	4	3	4	4	30
1995	2	2	2	2	2	2	2	2	16
1996	4	4	3	4	4	4	4	4	31
1997	4	3	3	2	3	3	3	2	23
1998	4	4	4	4	4	4	4	3	31
1999	4	4	4	4	4	4	4	4	32
2000	4	4	4	4	4	4	4	3	31
2001	3	3	3	3	3	3	3	3	24
2002	3	3	3	3	3	3	3	3	24
2003	4	4	4	4	4	4	4	3	31
2004	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Total	97	92	88	92	94	91	92	77	723

b. Etude piscicole du Rhône à Saint-Alban – Saint-Maurice-l'Exil

Le suivi piscicole du site de Saint-Alban a débuté en juin 1982. Les données utilisées dans ce rapport sont centralisées par l'université de Lyon, UMR CNRS 5023, Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux. Cinq stations sont régulièrement prospectées (Tableau 6) depuis le début de cette chronique (Tableau 7).

Tableau 6 – Liste des stations du suivi piscicole de Saint-Alban

Stations	pK	Informations
PeaqA	47.0	Retenue de Péage-de-Roussillon, Amont CNPE
PeaqB	49.5	Retenue de Péage-de-Roussillon, Aval CNPE
PeaqC	62.0	Canal de fuite
PeaqD	53.5	Rhône court-circuité (RCC)
PeaqE	51.0	Plan d'eau de Saint-Pierre-de-Bœuf

Tableau 7 - Nombre de pêches électriques par année et par station à Saint-Alban

Année	A	B	C	D	E	Total
1982	3	3	3	3	0	12
1983	1	1	1	1	0	4
1984	1	1	1	1	0	4
1985	4	4	4	3	4	19
1986	4	4	4	4	4	20
1987	4	4	4	4	4	20

1989	4	4	4	3	4	19
1990	4	4	4	4	3	19
1991	4	4	4	4	4	20
1992	4	4	4	4	4	20
1993	4	4	4	4	4	20
1994	4	4	4	4	4	20
1995	4	4	4	3	4	19
1996	4	4	4	3	3	18
1997	4	4	4	4	4	20
1998	4	4	4	4	4	20
1999	4	4	4	3	4	19
2000	3	3	3	3	3	15
2001	5	5	5	5	5	25
2002	4	4	4	4	4	20
2003	4	4	4	4	4	20
2004	4	4	4	4	4	20
Total	85	85	85	80	77	412

c. Etude piscicole du Rhône à Cruas-Meysse

Le suivi piscicole du site de Cruas-Meysse a débuté en février 1983. Les données utilisées dans ce rapport sont centralisées par l'U.R. Hydrobiologie du Cemagref d'Aix-en-Provence. Deux stations ont été régulièrement prospectées depuis le début du suivi. A partir de 2003, la station Rejet n'a plus été pêchée (Tableau 8, Tableau 9).

Tableau 8 – Liste des stations du suivi piscicole de Cruas-Meysse.

Stations	pK	Informations
CAMT	144	Retenue de Montélimar, Amont du CNPE, RG
CREJ	148	Retenue de Montélimar, Rejet du CNPE, RD
CAVL	150	Retenue de Montélimar, Aval du CNPE, RD

Tableau 9 – Nombre de pêches électriques par année et par station à Cruas-Meysse.

Année	CAMT	CREJ	CAVL	Total
1983	3		2	5
1984	2	2	2	6
1985	2	1	2	5
1986	2	2	2	6
1987	3	3	3	9
1988	4	4	4	12
1989	4	4	4	12

1991	5	5	5	15
1992	3	3	3	9
1993	5	4	4	13
1994	5	5	5	15
1995	4	4	4	12
1996	4	4	4	12
1997	3	3	3	9
1998	4	4	4	12
1999	3	3	3	9
2000	5	5	5	15
2001	4	4	4	12
2002	4	4	4	12
2003	4	1	4	9
2004	4		4	8
Total	80	68	79	227

d. Etude piscicole du Rhône à Tricastin

Le suivi piscicole du site de Tricastin a débuté en juin 1980. Les données utilisées dans ce rapport sont centralisées par l'U.R. Hydrobiologie du Cemagref d'Aix-en-Provence. Trois stations ont été régulièrement prospectées depuis le début du suivi : l'amont, le rejet et l'aval immédiat du CNPE. A partir de 1995, plus que deux campagnes sont faites chaque année et trois autres stations s'ajoutent au suivi piscicole de ce grand secteur (Tableau 10, Tableau 11).

Tableau 10 – Liste des stations du suivi de Tricastin.

Stations	pK	Informations
VIVI	166.5	Viviers, Pont D86, RG
TAMT	183	Canal de Donzère-Mondragon, Amont CNPE, RD
TREJ	184.5	Canal de Donzère-Mondragon, Rejet CNPE, RD
TAVL	185	Canal de Donzère-Mondragon, Aval CNPE, RD
PSEV	193	Vieux-Rhône, Aval Pont-Saint-Esprit
CADA	202	Retenue de Caderousse, RG

Tableau 11 - Nombre de pêches électriques par année et par station à Tricastin.

Année	VIVI	TAMT	TREJ	TAVL	PSEV	CADA	Total
1980		1	1	1			3
1981		1	1	1			3
1982		3	3	3			9
1983		4	4	4			12
1984		3	3	2		2	10
1985		2	2	2			6

1986		1	1	1			3
1987		3	3	3		2	11
1988		4	4	4		2	14
1989		4	4	4		4	16
1990		3	3	3		3	12
1991		5	5	5		5	20
1992		3	3	3		3	12
1993	1	4	4	4		4	17
1994	3	5	5	5		2	20
1995	2	2	2	2		2	10
1996	2	2	2	2	2	2	12
1997	2	2	2	2	2	2	12
1998	2	2	2	2	2	2	12
1999	2	2	2	2	2	2	12
2000	2	2	2	2	2	2	12
2001	2	2	2	2	2	2	12
2002	2	2	2	2	1	2	11
2003	2	2	2	2	2	2	12
2004	2	2	2	2	2	2	12
Total	24	66	66	65	17	47	285

e. Représentativité des espèces sur l'axe rhodanien

Les chroniques piscicoles réalisées sur l'axe rhodanien ont permis de capturer 41 espèces appartenant à 14 familles (Tableau 12, Tableau 13).

Tableau 12 – Abondances relatives des espèces capturées sur le Rhône au droit des 4 secteurs étudiés. Valeurs calculées à partir de la totalité des données obtenues sur chaque secteur. En jaune : $N < 0.01\%$ - en blanc : $0.01\% < N < 1\%$ - en saumon : $1\% < N < 5\%$ - en orange : $N > 5\%$.

Tableau 13 – Occurrences relatives des espèces capturées sur le Rhône au droit des 4 secteurs étudiés. Valeurs calculées à partir de l'ensemble des pêches réalisées sur chaque secteur. En vert pâle : $Occ < 1\%$ - en blanc : $1\% < Occ < 10\%$ - en vert foncé : $10\% < Occ < 50\%$ - en vert kaki : $Occ > 50\%$.

Famille - <i>nom latin</i>	nom commun	Code	Abondances relatives			
			Bugey	St-Alban	Cruas	Tricastin
Petromyzontidae <i>Lampetra planeri</i>	Lamproie de Planer	LPP	0.00	0.00		
Anguillidae <i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	0.02	0.58	1.65	2.32
Clupeidae <i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Alose du Rhône	ALR			0.00	0.01
Cyprinidae						
<i>Leuciscus cephalus</i>	Chevaine	CHE	23.86	11.64	17.62	26.30
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	VAN	12.84	0.06	0.01	
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirin	SPI	23.33	0.01	0.94	0.82
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	6.79	0.49	0.70	1.60
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	9.36	17.15	31.92	33.13
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	4.26	3.01	3.74	3.12
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	5.32	41.96	31.43	18.60
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	5.16	3.44	2.69	4.28
<i>Leuciscus (Telestes) souffia</i>	Blageon	BLN	1.67	0.00	0.14	0.06
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Vairon	VAI	3.11	0.02	0.06	0.02
<i>Abramis bjoerkna</i>	Brème bordelière	BRB	0.66	6.01	3.47	3.45
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	0.14	0.83	0.15	0.07
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	0.14	0.72	0.55	0.13
<i>Rhodeus sericeus</i>	Bouvière	BOU	0.07	1.19	0.68	2.65
<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	0.05	0.46	0.39	0.57
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	0.02	0.12	0.25	0.18
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	0.01	0.78	0.36	0.23
<i>Chondrostoma toxostoma</i>	Toxostome	TOX	0.01		0.02	0.02
<i>Carassius carassius</i>	Carassin commun	CAS	0.00	0.01		
<i>Leucaspis delineatus</i>	Able de Heckel	ABH	0.00			0.00
<i>Carassius gibelio</i>	Carassin argenté	CAG			0.14	0.37
<i>Carassius auratus</i>	Carassin doré	CAA		0.11		
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe miroir	CMI			0.01	0.01
Balitoridae <i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	LOF	0.14	0.43	0.90	0.44
Siluridae <i>Silurus glanis</i>	Silure	SIL	0.18	0.05	0.03	0.10
Ictaluridae <i>Ameiurus melas</i>	Poisson chat	PCH	0.08	4.36	0.01	0.03
Esocidae <i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	0.61	0.07	0.09	0.02
Salmonidae						
<i>Salmo trutta</i>	Truite commune	TRF	0.63	0.00	0.05	0.02
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truite arc en ciel	TAC	0.05	0.00	0.00	0.01
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	OBR	0.09			
Lotidae <i>Lota lota</i>	Lote de rivière	LOT	0.02	0.00	0.00	
Gasterosteidae <i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	EPI	0.13	0.07	0.07	0.01
Percidae						
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche commune	PER	0.72	0.86	0.49	0.32
<i>Stizostedion lucioperca</i>	Sandre	SAN	0.02	0.12	0.11	0.05
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	GRE	0.02	0.07	0.06	0.03
Centrarchidae						
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	0.34	5.34	1.20	0.98
<i>Micropterus salmoides</i>	Achigan à grande bouche	BBG		0.03	0.01	0.04
Blenniidae <i>Salaria fluviatilis</i>	Blennie fluviatile	BLE		0.01	0.00	0.00
Cottidae <i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	0.12	0.01	0.07	0.02

Famille - <i>nom latin</i>	nom commun	Code	Occurrences relatives			
			Bugey	St-Alban	Cruas	Tricastin
Petromyzontidae <i>Lampetra planeri</i>	Lamproie de Planer	LPP	0.1	0.2		
Anguillidae <i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	ANG	2.1	51.2	84.7	80.5
Clupeidae <i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Alose du Rhône	ALR			0.9	1.9
Cyprinidae						
<i>Leuciscus cephalus</i>	Chevaine	CHE	92.1	97.3	99.1	94.6
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	VAN	74.7	8.3	1.3	
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Spirin	SPI	73.0	2.2	35.3	23.3
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	BAF	71.6	27.2	39.6	55.0
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	ABL	59.6	59.7	83.8	87.2
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	GOU	58.4	58.5	63.8	55.3
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	GAR	57.4	89.3	95.7	88.5
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	HOT	45.8	51.7	46.0	46.3
<i>Leuciscus (Telestes) souffia</i>	Blageon	BLN	18.1	0.7	21.7	9.6
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Vairon	VAI	17.7	2.9	11.1	3.5
<i>Abramis bjoerkna</i>	Brème bordelière	BRB	11.2	60.4	71.1	63.9
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	TAN	10.9	46.1	23.4	11.2
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	ROT	6.2	40.0	43.8	18.8
<i>Rhodeus sericeus</i>	Bouvière	BOU	4.3	24.5	33.2	37.4
<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora	PSR	3.7	17.5	22.6	20.8
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	CCO	1.7	15.5	21.3	17.6
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	BRE	1.0	29.4	25.1	24.3
<i>Chondrostoma toxostoma</i>	Toxostome	TOX	0.8		4.3	3.5
<i>Carassius carassius</i>	Carassin commun	CAS	0.4	0.7		
<i>Leucaspis delineatus</i>	Able de Heckel	ABH	0.1			0.3
<i>Carassius gibelio</i>	Carassin argenté	CAG			12.3	23.3
<i>Carassius auratus</i>	Carassin doré	CAA		4.4		
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe miroir	CMI			1.7	1.0
Balitoridae <i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	LOF	7.6	28.4	41.7	17.6
Siluridae <i>Silurus glanis</i>	Silure	SIL	5.8	6.1	8.9	9.9
Ictaluridae <i>Ameiurus melas</i>	Poisson chat	PCH	5.9	51.2	3.0	6.1
Esocidae <i>Esox lucius</i>	Brochet	BRO	31.7	11.2	20.9	4.5
Salmonidae						
<i>Salmo trutta</i>	Truite commune	TRF	31.0	0.7	11.9	4.5
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truite arc en ciel	TAC	3.6	0.5	0.4	1.3
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	OBR	2.5			
Lotidae <i>Lota lota</i>	Lote de rivière	LOT	1.1	0.2	0.4	
Gasterosteidae <i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	EPI	6.6	8.0	11.9	2.6
Percidae						
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche commune	PER	30.7	57.5	53.2	31.6
<i>Stizostedion lucioperca</i>	Sandre	SAN	1.4	15.3	20.9	9.6
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	GRE	1.5	4.9	8.5	6.4
Centrarchidae						
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	PES	15.5	86.4	68.5	57.2
<i>Micropterus salmoides</i>	Achigan à grande bouche	BBG		3.9	2.1	3.2
Blenniidae <i>Salaria fluviatilis</i>	Blennie fluviatile	BLE		1.7	0.9	0.3
Cottidae <i>Cottus gobio</i>	Chabot	CHA	3.3	1.2	11.9	3.2

III. Liste des tableaux

Tableau 1– Liste des organismes assurant les suivis hydrobiologiques des 4 sites nucléaires du Rhône.....	3
Tableau 2– Liste des fournisseurs de données complémentaires utilisées dans le cadre des suivis rhodaniens.....	3
Tableau 3 - Description des données concernant les peuplements de macroinvertébrés benthiques échantillonnés entre 1985 et 2004 par filet Surber (S) et/ou substrat artificiel (AS). Les producteurs de données des 4 sites sont indiqués dans le Tableau 1. Code = code attribué à la station dans les diverses citations et représentation, Nb = nombre de prélèvements, Ech = méthode d'échantillonnage, Rt = richesse taxonomique totale, Rtm = richesse taxonomique moyenne par an, pK = point kilométrique de la station sur le Rhône, Identification = niveau d'identification.....	5
Tableau 4 – Liste des stations de pêche du suivi piscicole de Bugey. En rouge, les stations soumises au réchauffement par le panache thermique.....	6
Tableau 5 – Nombre de pêches électriques par année et par station à Bugey.....	6
Tableau 6 – Liste des stations du suivi piscicole de Saint-Alban.....	7
Tableau 7 - Nombre de pêches électriques par année et par station à Saint-Alban.....	7
Tableau 8 – Liste des stations du suivi piscicole de Cruas-Meysses.....	8
Tableau 9 – Nombre de pêches électriques par année et par station à Cruas-Meysses.....	8
Tableau 10 – Liste des stations du suivi de Tricastin.....	9
Tableau 11 - Nombre de pêches électriques par année et par station à Tricastin.....	9
Tableau 12 – Abondances relatives des espèces capturées sur le Rhône au droit des 4 secteurs étudiés. Valeurs calculées à partir de la totalité des données obtenues sur chaque secteur. En jaune : N < 0.01% - en blanc : 0.01% < N < 1% - en saumon : 1% < N < 5% - en orange : N > 5%.....	10
Tableau 13 – Occurrences relatives des espèces capturées sur le Rhône au droit des 4 secteurs étudiés. Valeurs calculées à partir de l'ensemble des pêches réalisées sur chaque secteur. En vert pâle : Occ < 1% - en blanc : 1% < Occ < 10% - en vert foncé : 10% < Occ < 50% - en vert kaki : Occ > 50%.....	10

IV. Bibliographie

- ALLARDI, J., DUGUET, C. & LEYNAUD, G. (1975): Etude du peuplement ichthyologique d'un milieu fluvial réchauffé artificiellement. - In: WELCOMME, R.L. (Ed.), Symposium on the methodology for the survey, monitoring and appraisal of fishery resources in lakes and large rivers. EIFAC Technical Paper, FAO, Rome, pp. 209-227.
- GINOT, V., SOUCHON, Y. & ROGER, P. (1996): Impact de l'élévation artificielle de température induite par le fonctionnement du Centre Nucléaire de Bugey (fleuve Rhône) sur les communautés de poissons. - *Hydroécol. Appl.* **8**: 1-33.
- NELVA, A., PERSAT, H. & CHESSEL, D. (1979): Une nouvelle méthode d'étude des peuplements ichthyologiques dans les grands cours d'eau par échantillonnage ponctuel d'abondance. - *C. R. Acad. Sci. Paris* **289**: 1295-1298.
- PERSAT, H. & OLIVIER, J.M. (1991): The point abundance sampling, a fishing strategy for large rivers: short presentation of the concept, its appliance, and some results. - In: PENAZ, M. (Ed.), Biological monitoring of large rivers. Czech Academy of Sciences, Brno & Gabcikovo, Czechoslovakia, pp. 104-113.
- PONT, D., TORRE, F. & POIZAT, G. (1992): Etablissement d'une méthodologie pour un suivi piscicole du Rhône. Etude Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Université Lyon 1, Laboratoire d'Ecologie des Systèmes Fluviaux, Arles, 57 p.

Lot 1.2 : Physico-chimie des eaux du Rhône

Evolution des paramètres classiques

1985 - 2004

I. Introduction

La température est une donnée essentielle de l'évaluation de la qualité des eaux en raison de son rôle dans de nombreux processus physiques et biochimiques. Que ce soit par le jeu de relations explicites avec d'autres caractéristiques physiques telles que la densité de l'eau, la solubilité des gaz, ou par des interactions beaucoup plus complexes telles que celles relevant de la thermobiologie des invertébrés et des poissons, le fonctionnement des écosystèmes aquatiques est sous l'étroite dépendance de la rythmicité thermique.

Dans l'étude du régime thermique rhodanien et de son rôle sur la variabilité spatio-temporelle des communautés vivantes de l'axe fluvial, il est également nécessaire d'appréhender le contexte physico-chimique du Rhône au cours de ces deux décennies. Des modifications de la qualité des eaux pourraient également être à l'origine de changements biologiques non directement imputables au changement des conditions climatiques.

Ce travail a pour objectif :

- de fournir une synthèse des principales caractéristiques physico-chimiques mesurées sur l'axe fluvial, à la fois spatiale (de la frontière franco-suisse à Arles) et temporelle (chronique de 1985 à 2004),
- de montrer les relations existantes entre certains paramètres étudiés et la température.

II. Données & Méthodes

Les données proviennent de la banque du Réseau de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse accessibles par le web <http://rdb.eaurmc.fr/>¹. Le choix préférentiel de ces données est lié au nombre d'échantillons, en général un prélèvement mensuel sur les dix stations rhodaniennes du suivi permanent. Par ailleurs, des mesures similaires réalisées sur trois grands affluents du Rhône (Ain, Saône et Isère) ont été intégrées dans cette analyse (Figure 1). Malgré le nombre considérable d'informations mises à disposition, les chroniques incomplètes sur certains paramètres ont amené un compromis à la fois spatial et temporel, construit en regard des chroniques de relevés hydrobiologiques. Il limite cette étude aux seuls paramètres physiques et géochimiques de base et aux descripteurs de la pollution classique : pH, température, oxygène dissous, les matières organiques (DBO5 et carbone organique), la minéralisation (conductivité), les composés de l'azote (nitrates, nitrites, ammonium) et du phosphore (phosphates). Les problèmes évoqués avaient déjà restreint l'exploitation temporelle des données dans une synthèse de l'Agence (POUSSARD & MADRID, 1999).

Les nombres de prélèvements annuels sont indiqués dans le Tableau 14. La liste des paramètres est donnée dans le Tableau 15. Les variables retenues dans l'analyse multivariée sont les suivantes : le pH, l'oxygène dissous et le pourcentage de saturation, la conductivité, la Demande Biologique en Oxygène, les trois composants azotés et les phosphates, soit 9 variables. Le carbone organique dissous a été exclu en l'absence de mesures au cours des deux premières années sur l'ensemble des stations. Le tableau général, comptant 2845 échantillons (13 stations x 20 années x n mois) et 9 variables, a été traité par une Analyse en Composantes Principales Normée (ACPn). Une analyse

¹ Des données complémentaires ont été empruntées à l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) en Suisse et aux services EDF-DTG.

ACPn inter-stationnelle a été réalisée pour caractériser les différences entre stations. La variabilité inter-annuelle de chaque station a été explorée par une ACPn inter-station/année. La variabilité saisonnière a été étudiée par une ACPn inter-station/mois. Ces analyses ont été réalisées à partir du logiciel ADE4 (THIOULOUSE et al., 1997).

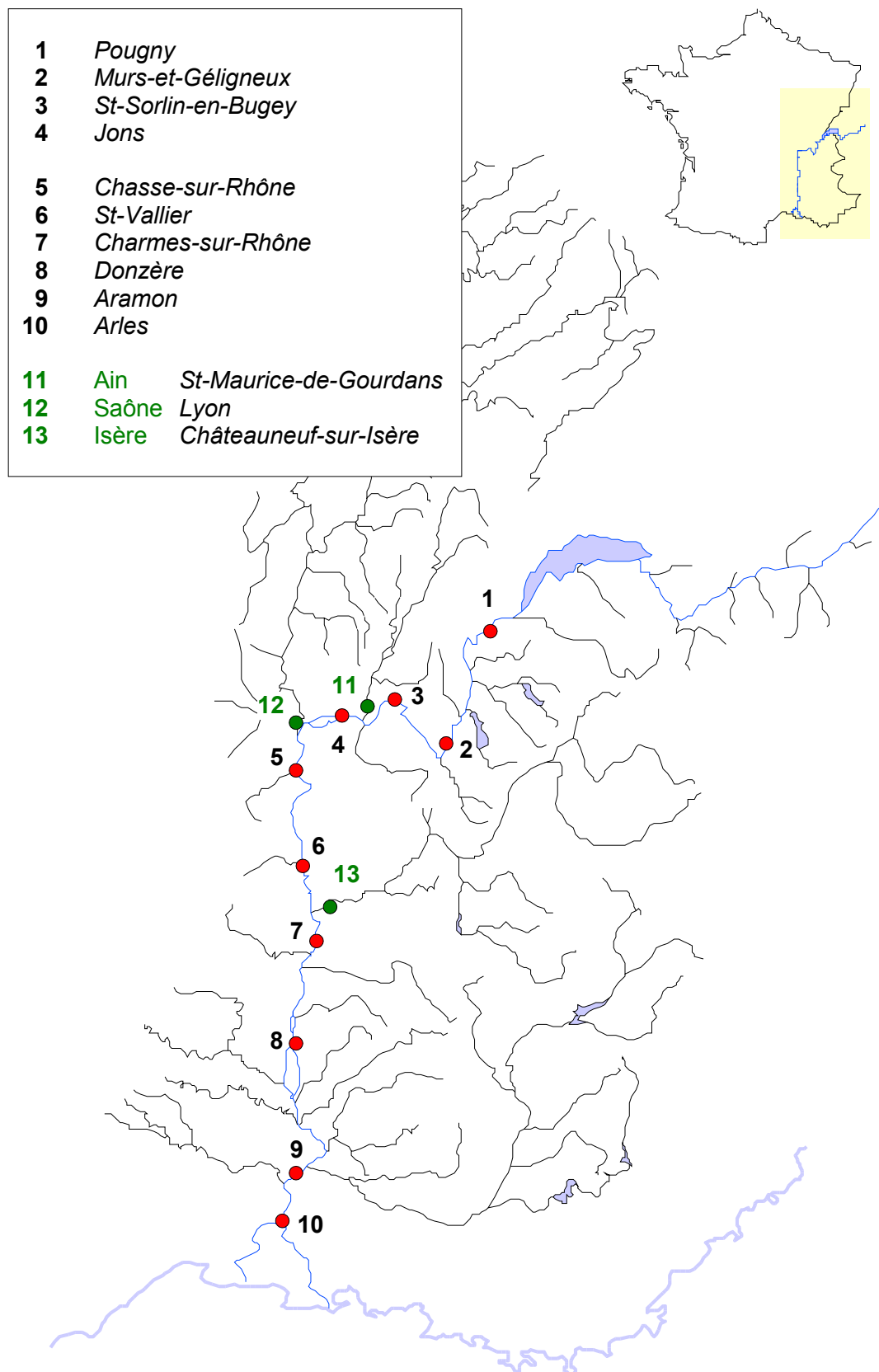


Figure 1 - Liste et localisation des stations du réseau de surveillance de l'Agence Rhône-Méditerranée et Corse.

Tableau 14 - Liste des stations et nombre de prélèvements annuels réalisés au cours de la période 1985-2004. En jaune, un nombre de relevés inférieur à 12. En orange, un suivi plus conséquent au cours des premières années sur un nombre moindre de stations. En vert, les stations ne faisant pas encore l'objet d'un suivi permanent.

Station	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Total
Pougny	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	234
Murs	8	8	10	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	225
St-Sorlin			6	6	6	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	182
Jons	16	16	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	242
Chasse	16	16	10	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	241
St-Vallier	16	16	10	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	241
Charmes	16	16	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	241
Donzere			9	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	10	10	12	10	11	204
Aramon			7	8	8	8	8	12	12	12	12	10	12	12	12	10	10	12	10	11	186
Arles	16	16	10	12	12	11	12	12	12	12	12	10	11	12	12	10	10	12	10	11	235
Ain			6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	6	6	10	6	6	6	7	12	139
Saone	16	16	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	242
Isere	12	12	10	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	10	12	233
	128	128	117	140	140	139	140	154	154	150	154	148	149	150	154	126	144	150	127	153	2845

Tableau 15 - Stations de mesure et paramètres physico-chimiques retenus après l'extraction générale des données du réseau de Bassin. Codage des variables et valeurs moyennes des paramètres sur la période 1985-2004. Débit (**Q**), température des eaux (**t°C**), **pH**, oxygène dissous en mg/l (**O2**), oxygène exprimé en pourcentage de saturation (**O%**), conductivité à 25 °C (**µS**), Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (**DBO**), carbone organique dissous en mg/l (**COD**), les trois formes azotées en mg/l (ammonium, nitrites et nitrates : **NH4**, **NO2**, **NO3**), phosphates en mg/l (**PO4**). *Remarque : Le carbone organique dissous a été exclu des analyses multivariées en l'absence de mesure de ce paramètre au cours des deux premières années.*

Station	Q	t°C	pH	O2	O%	µS	DBO	COD	NH4	NO2	NO3	PO4
Pougny	412	11.6	8.10	10.3	96.8	301.8	1.70	1.58	0.21	0.04	2.29	0.11
Murs	462	12.4	8.07	10.1	96.6	318.1	1.39	1.71	0.17	0.06	2.80	0.13
St-Sorlin	513	13.3	8.09	10.2	99.1	325.3	1.45	1.83	0.12	0.06	3.16	0.10
Jons	608	13.6	8.09	10.1	98.9	337.3	1.27	1.80	0.11	0.06	3.92	0.12
Chasse	1022	14.2	8.03	10.0	98.5	400.2	1.76	2.43	0.25	0.08	6.11	0.21
St-Vallier	1058	14.6	7.98	9.7	96.4	414.9	1.57	2.38	0.31	0.11	6.88	0.39
Charmes	1377	14.0	7.98	9.9	97.0	428.1	1.45	2.06	0.25	0.10	6.41	0.31
Donzere	1478	13.5	7.99	9.9	96.6	421.8	1.38	2.22	0.18	0.10	6.60	0.24
Aramon	1627	14.8	8.03	10.0	100.1	417.8	1.56	2.28	0.15	0.10	6.45	0.24
Arles	1530	15.1	7.93	9.7	97.6	425.6	2.00	2.25	0.15	0.13	6.57	0.29
Ain	112	13.5	8.13	10.8	106.6	386.7	1.41	2.00	0.03	0.02	3.99	0.05
Saone	412	13.6	7.96	9.6	92.8	514.7	1.57	3.15	0.24	0.09	9.43	0.28
Isere	342	11.1	7.96	10.3	95.6	468.1	1.30	1.12	0.21	0.07	3.83	0.16
Total	856	13.5	8.02	10.0	97.6	398.5	1.53	2.06	0.19	0.08	5.34	0.21

III. Résultats & discussion

1. Analyse générale

L'analyse générale intègre une importante variabilité, à la fois spatiale, et temporelle : inter-annuelle et saisonnière (Figure 2). Les deux premiers axes prennent en compte 51% de l'inertie du tableau. L'axe F1 sépare le Haut-Rhône et l'Ain (valeurs négatives) du Bas-Rhône, de la Saône et de l'Isère (valeurs positives) sur la base d'une charge minérale et d'une pollution organique croissante de l'amont vers l'aval. Les deux affluents : l'Ain et la Saône constituent les deux points opposés. Le pH est plus élevé sur le Haut-Rhône et l'Ain. L'axe F2 distingue les 4 stations du Haut-Rhône en raison de teneurs en nitrates nettement plus faibles à l'amont de Lyon. L'Ain se distingue des autres stations par des concentrations en oxygène dissous et des pourcentages de saturations plus élevés. La Saône est caractérisée par une charge minérale et des teneurs en nitrates plus élevées.

2. Variabilité spatiale

Afin d'identifier les caractéristiques stationnelles, l'ACPn inter-stations maximise les contrastes spatiaux sur le bassin du Rhône (Figure 3). Cette distinction est essentiellement le fait des nitrates et de la conductivité sur le premier axe factoriel, de la conductivité, des autres formes azotées et des phosphates sur le deuxième axe. Les gradients de pollution sur les sections amont et aval du fleuve sont bien identifiables. Les 3 affluents se distinguent des stations rhodaniennes, notamment au niveau de la conductivité, plus élevées que le Rhône au droit de leur confluence.

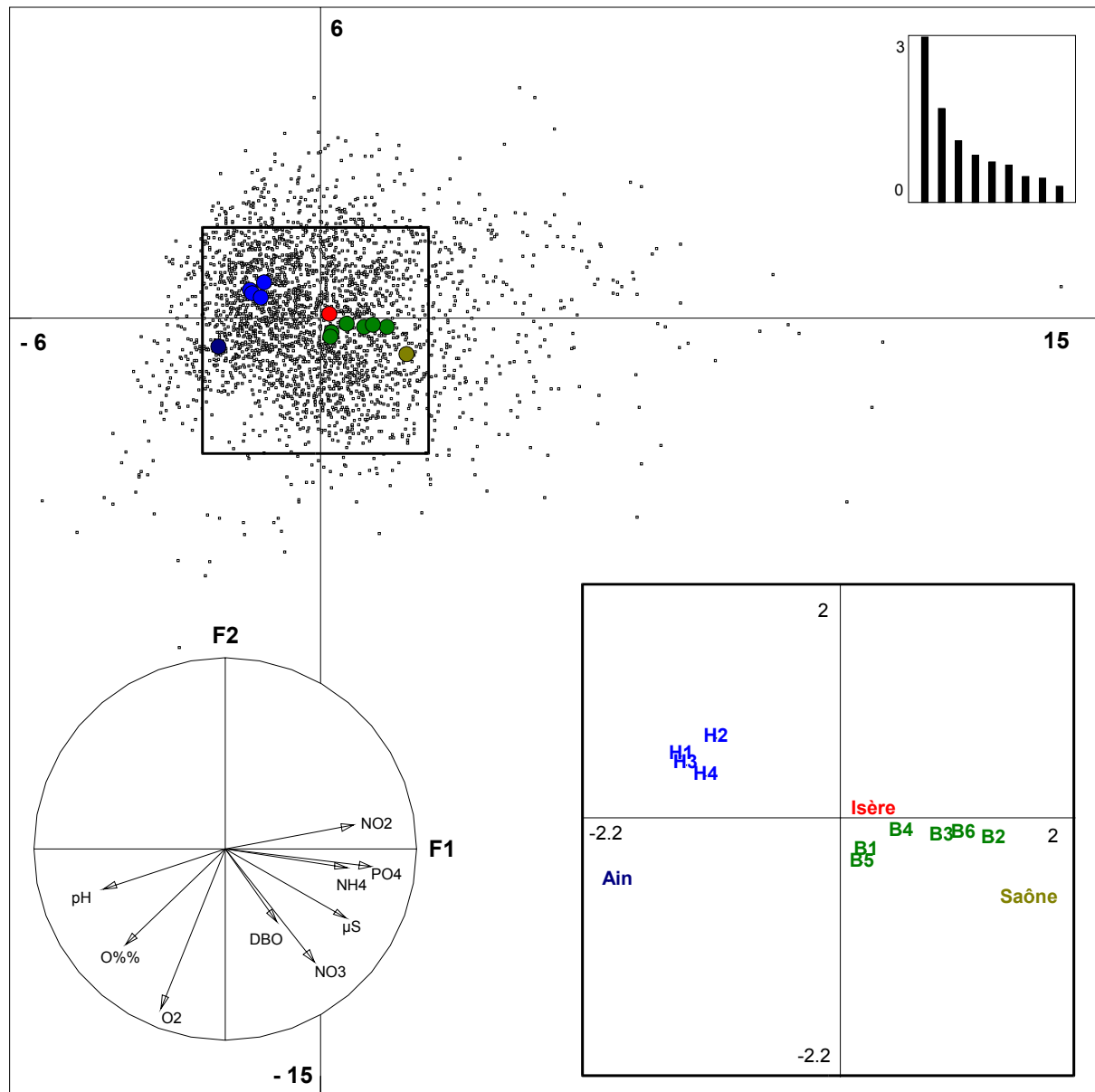


Figure 2 - Plans factoriels F1-F2 de l'Analyse en Composantes Principales Normée du tableau initial (1845 échantillons : 20 années x n mois x 13 stations). Coordonnées factorielles des prélèvements et localisation sous forme de points colorés des centres de gravité des nuages de points de chaque station. Agrandissement de la partie centrale du plan et position des centres de gravité (H1 à H4 : stations du Haut-Rhône, B1 à B6 : stations du Bas-Rhône). Cercle de corrélation des variables physico-chimiques. Distribution des valeurs propres.

La Figure 4 regroupe les paramètres caractéristiques des différences entre stations et renseigne également sur la variabilité intra-stationnelle de chaque paramètre.

La conductivité et la teneur en nitrates sont des paramètres croissants sur l'axe rhodanien, en forte augmentation dès la confluence de la Saône. Cette rivière présente les valeurs les plus élevées et la plus grande variabilité vis-à-vis de ces deux variables.

Le pH est sensiblement plus élevé sur le Haut-Rhône et l'Ain.

Les ions descripteurs des rejets anthropiques (PO4, NH4) montrent une pollution plus accentuée sur le Bas-Rhône, en particulier à Saint-Vallier. L'ammonium révèle un niveau de pollution organique plus élevé à l'amont de chaque entité fluviale, puis progressivement décroissant sur le linéaire aval. Il montre l'impact des grandes agglomérations, Genève sur le Haut-Rhône, Lyon et le couloir de la chimie sur le Bas-Rhône.

Le pourcentage de saturation en oxygène peut avoir une forte variabilité locale mais reste globalement proche de la saturation sur toutes les stations. Seule l'Ain présente des phénomènes de sursaturation, vraisemblablement entretenues par les caractéristiques morpho-hydrauliques de cette rivière alluviale et son régime hydrologique régulé.

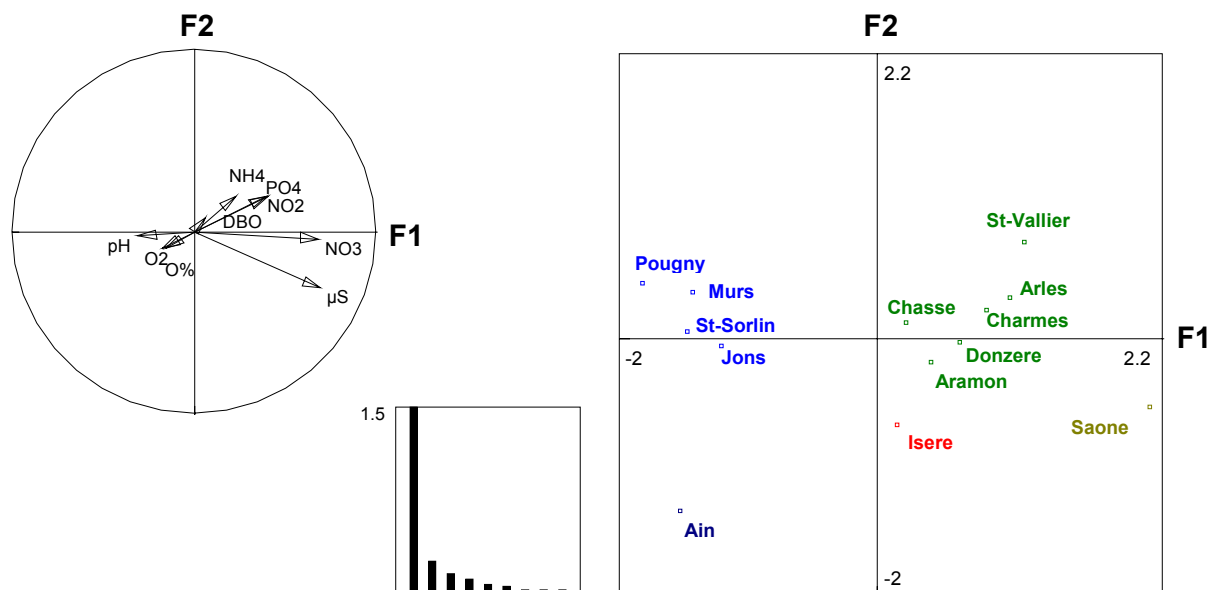


Figure 3 - Plans factoriels F1-F2 de l'Analyse en Composantes Principales Normée inter-stations. Projections des variables physico-chimiques et des 13 stations.

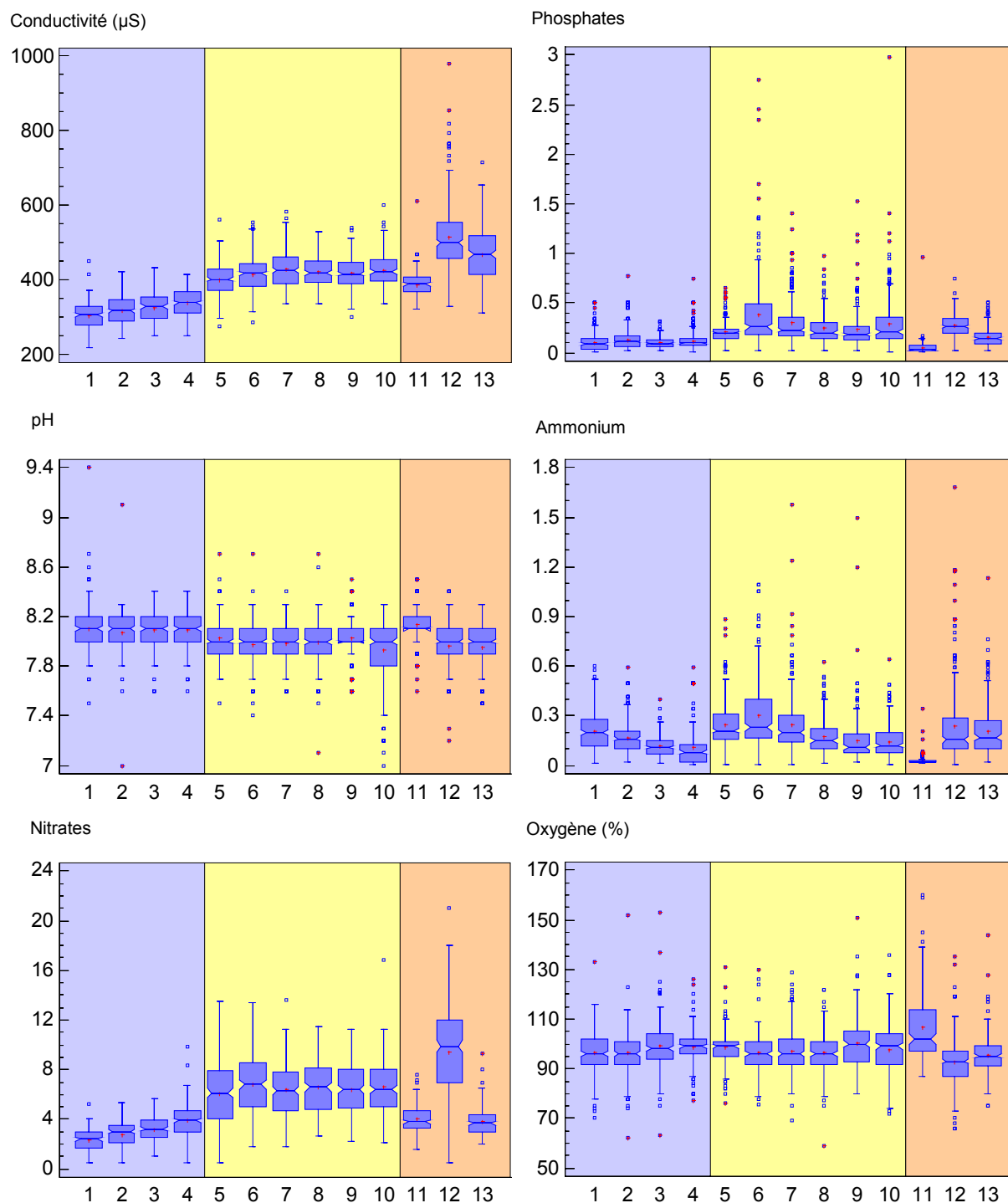


Figure 4 - Représentation synthétique des variables physico-chimiques vues sous l'angle spatial. Les variables représentées sont celles qui différencient le mieux les stations. La numérotation des stations peut être retrouvée sur la carte de localisation. Les cadres colorés de l'arrière-plan correspondent respectivement au Haut-Rhône, au Bas-Rhône et aux affluents.

3. Variabilité inter-annuelle

Une ACPn inter-stations/années ajoute la composante inter-annuelle aux aspects spatiaux (Figure 5). Résumée à partir des deux premiers axes factoriels, elle permet de retrouver les différences entre systèmes (Haut-Rhône, Bas-Rhône et affluents) et de visualiser les changements importants observés au cours des vingt années, à savoir la baisse des phosphates et des paramètres descripteurs de la

pollution organique. Cette diminution de la charge polluante est particulièrement nette sur le Bas-Rhône.

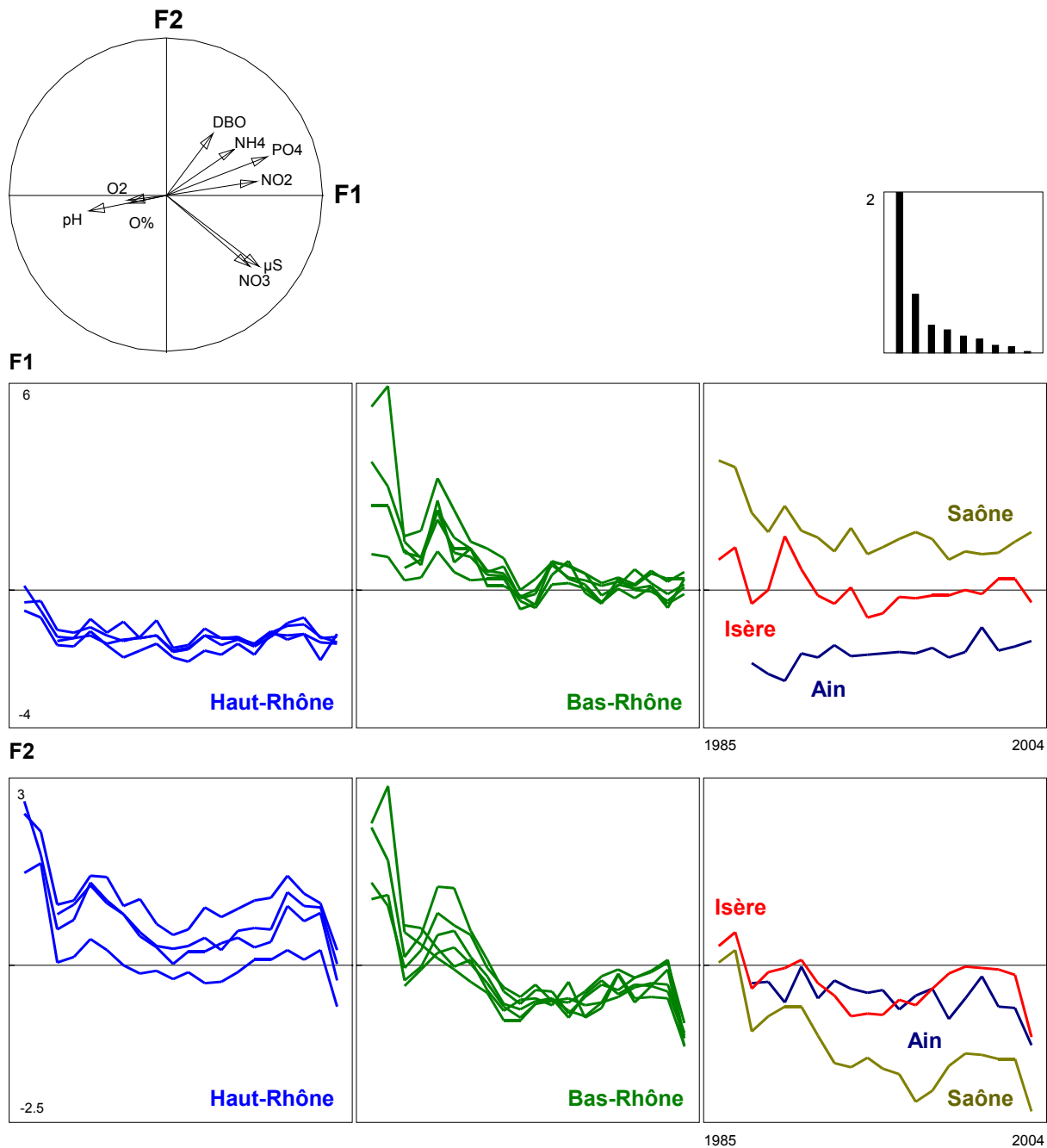


Figure 5 - ACPn inter-années/stations. Plan F1-F2 des variables. Distribution des valeurs propres. Représentation fonctionnelle des coordonnées par années. Les stations ont été regroupées par entités ou localisations géographiques.

La Figure 6 et la Figure 7 regroupent, pour l'axe fluvial, les paramètres présentant la plus grande variabilité inter-annuelle. Les descripteurs de la pollution urbaine montrent de réels changements au cours des vingt dernières années, reflète d'une augmentation permanente de la capacité de traitement des eaux usées.

Pour les phosphates, les changements de la composition des lessives ont favorisé la baisse sensible des rejets urbains phosphatés. Par ailleurs, la suppression en 1992 d'un important rejet industriel à l'amont immédiat de Saint-Vallier a largement contribué à cette baisse sur l'axe du Bas-Rhône (POUSSARD & MADRID, 1999).

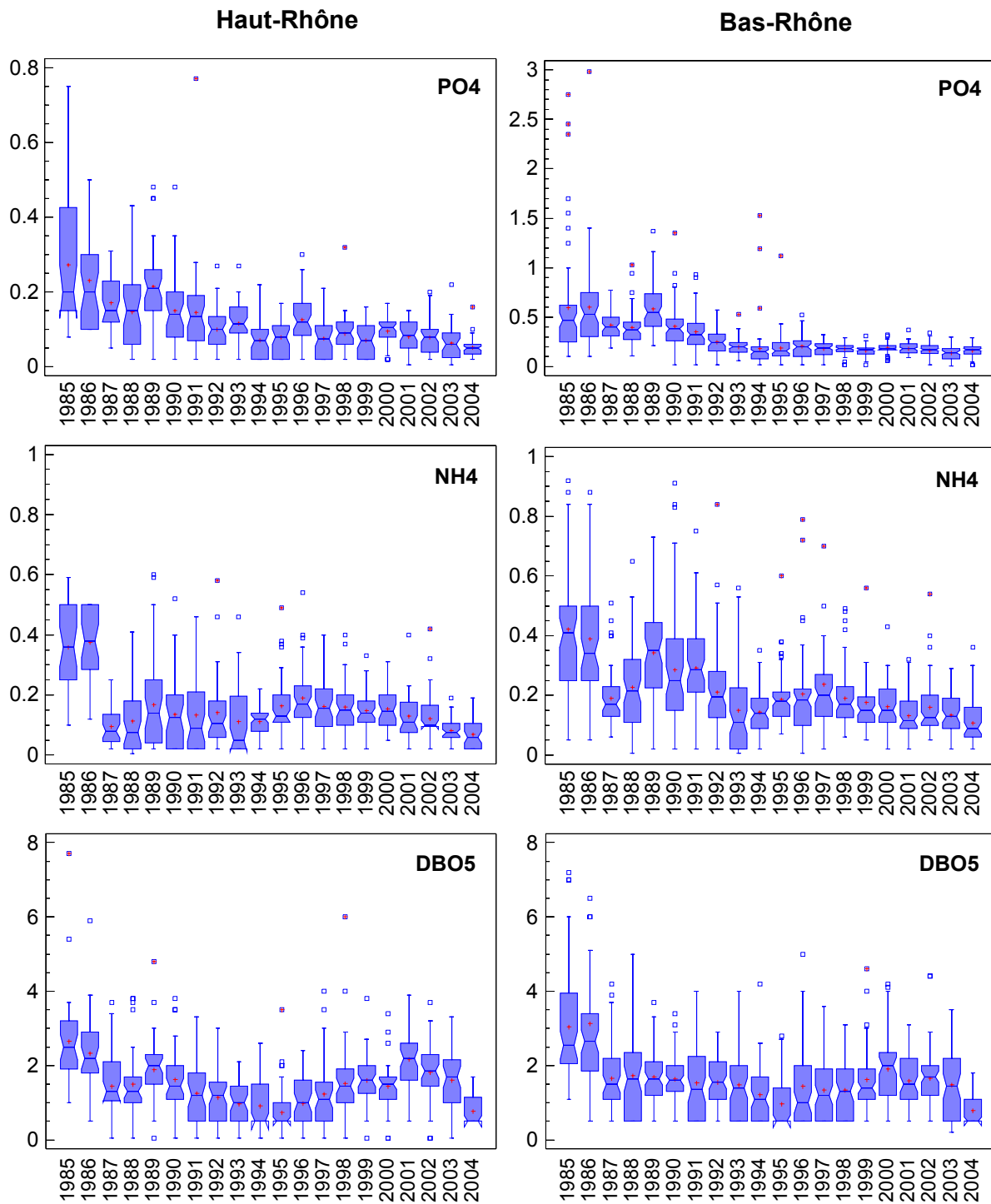


Figure 6 - Evolution inter-annuelle des phosphates, de l'ammonium et de la Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours. Les valeurs ont été regroupées par entités géographiques (Haut-Rhône et Bas-Rhône). Les ordonnées adoptées pour les phosphates sont différentes.

Si la conductivité et les nitrates sont des paramètres susceptibles de varier essentiellement selon la saison et les conditions hydrologiques, une tendance à la hausse existe cependant sur la chronique. L'augmentation de la conductivité est plus sensible sur le Haut-Rhône.

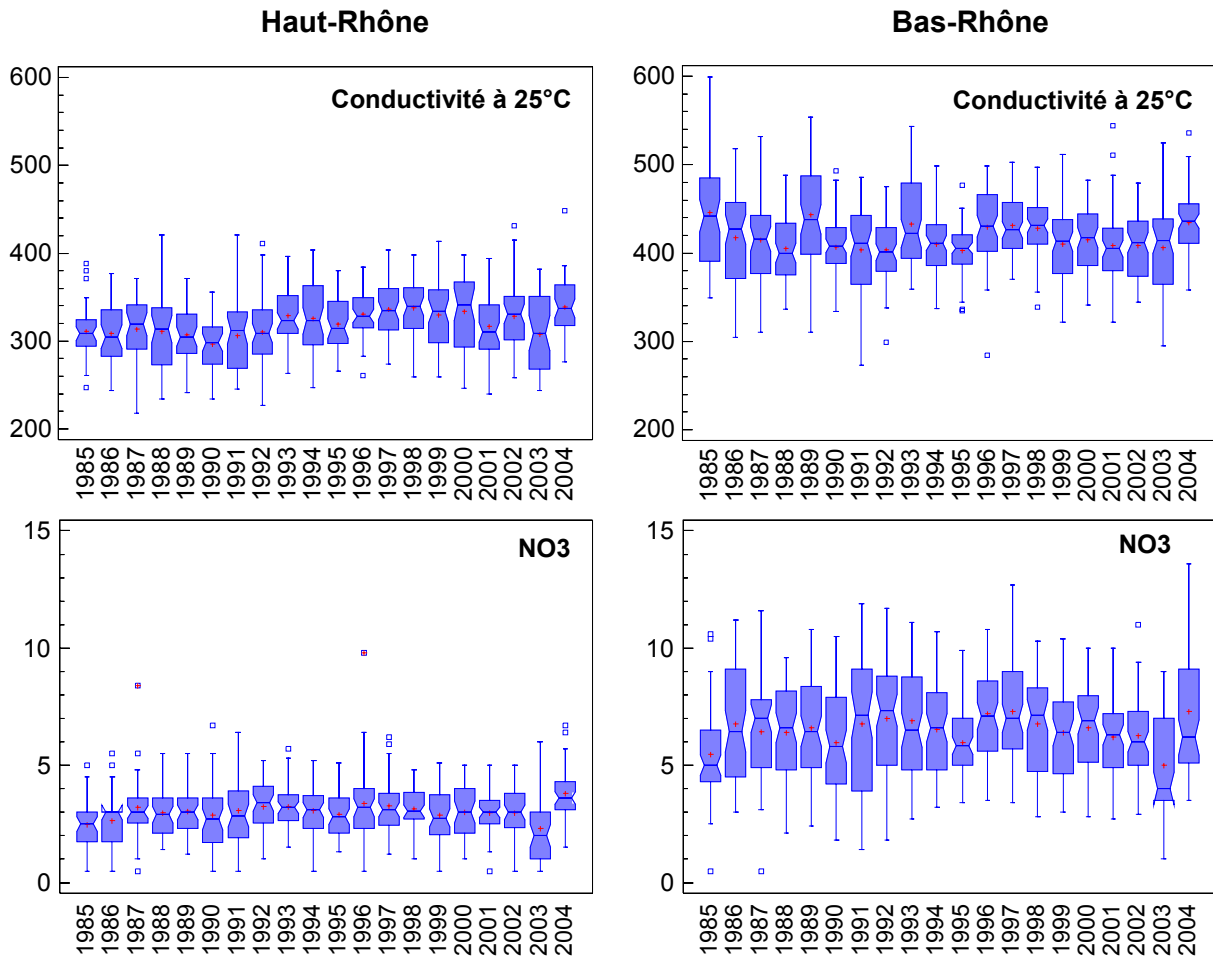


Figure 7 - Evolution inter-annuelle de la conductivité et des nitrates. Les valeurs ont été regroupées par entités géographiques (Haut-Rhône et Bas-Rhône).

Chlorures (mg/l)

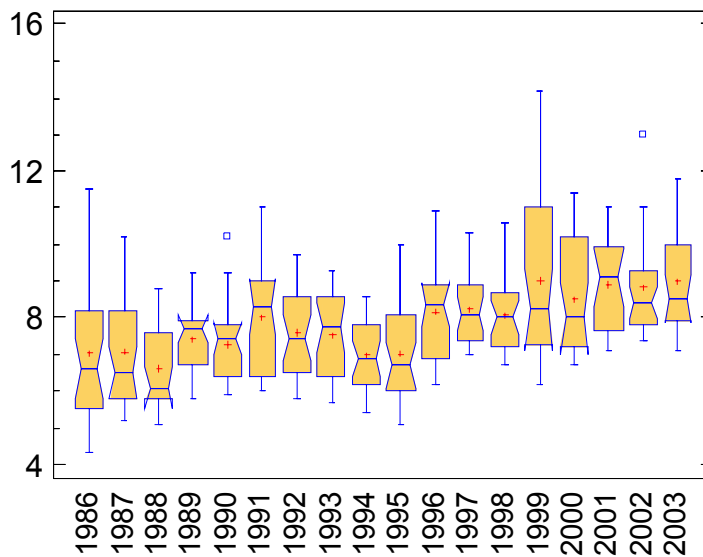


Figure 8 - Evolution inter-annuelle de la charge en chlorures sur le Rhône à Chancy-Pougny (données du réseau de surveillance suisse, accessibles sur le site www.naduf.ch).

Des apports ioniques autres que ceux présentés dans cette étude peuvent contribuer à cette hausse. C'est le cas des chlorures (Figure 8) en raison d'une consommation croissante de chlorures de sodium et de calcium pour l'entretien hivernal du réseau routier ; un impact anthropique non négligeable dans les secteurs à fort enneigement (LÖFGREN, 2001 ; GODWIN et al., 2003).

4. Variabilité saisonnière

L'ACPn inter-stations/mois caractérise les évolutions saisonnières des paramètres physico-chimiques (Figure 9). Parmi les 9 variables, trois d'entre elles ont une variabilité saisonnière marquée, traduites par les deux premiers axes factoriels : la conductivité et la teneur en nitrates pour l'axe F1, l'oxygène dissous décrit par l'axe F2.

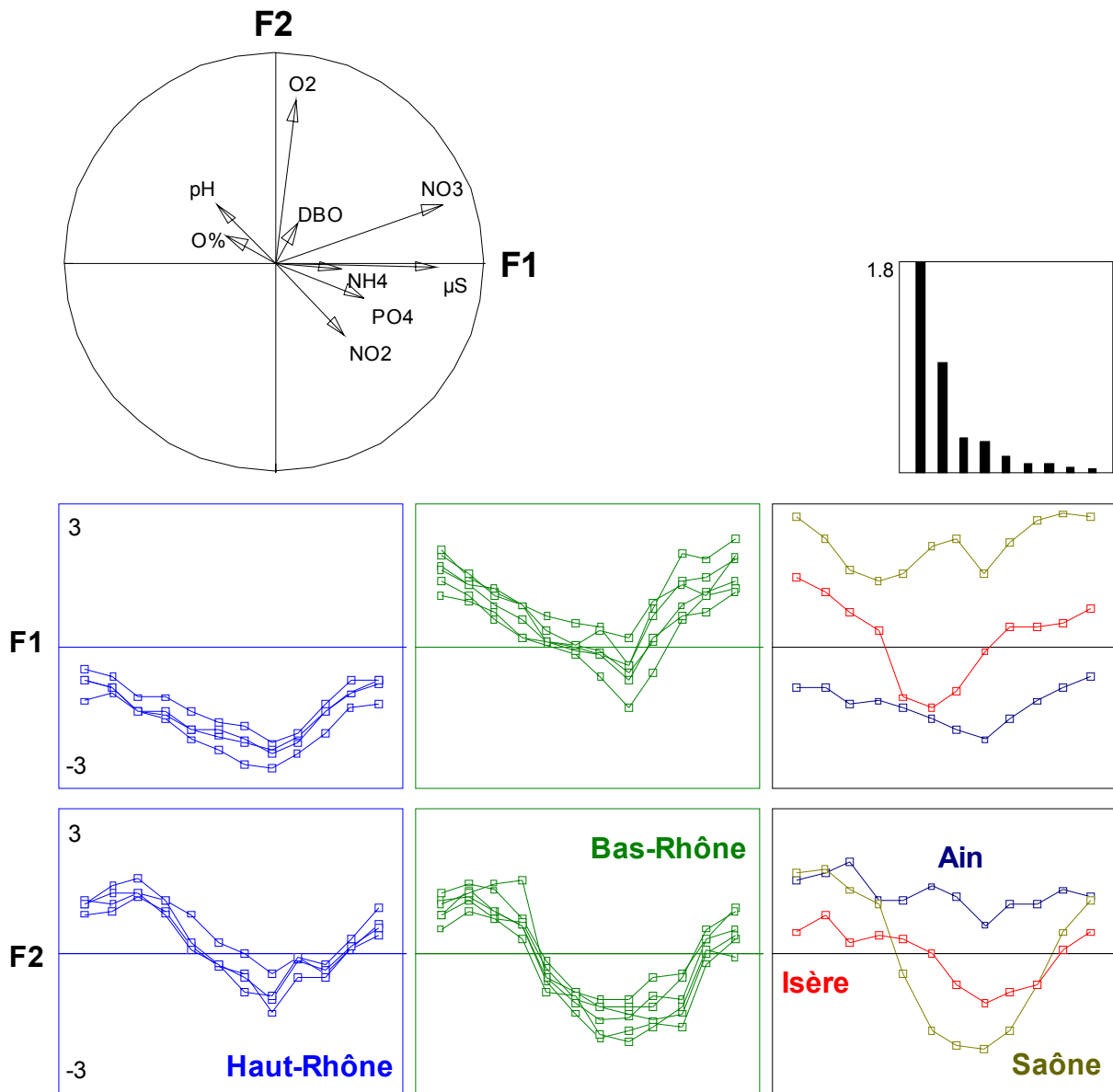


Figure 9 - ACPn inter-stations/mois. Plan F1-F2 des variables. Distribution des valeurs propres. Représentation mensuelle des coordonnées factorielles F1 et F2.

a. Teneurs en oxygène dissous et saturation

Exprimé sur l'axe F2, le cycle annuel de l'oxygène dissous est régulier sur la Saône et le Bas-Rhône, légèrement décalé lorsque les régimes thermiques sont plus froids tels que sur le Haut-Rhône et l'Isère. Il revêt un caractère singulier sur l'Ain, un cours d'eau dont les régimes hydrologique et thermique modifiés par le fonctionnement par éclusées des barrages-réservoirs semblent maintenir un niveau d'oxygénation globalement plus élevé en période estivale.

La teneur en oxygène dissous est sous l'influence directe de la température de l'eau et de la pression atmosphérique. En l'absence de perturbations, lorsque la température augmente, la teneur en oxygène dissous diminue selon une relation non linéaire (Figure 10). A l'équilibre, cette loi physique garantit des teneurs en oxygène suffisantes pour la survie des organismes lorsque la température des eaux est élevée.

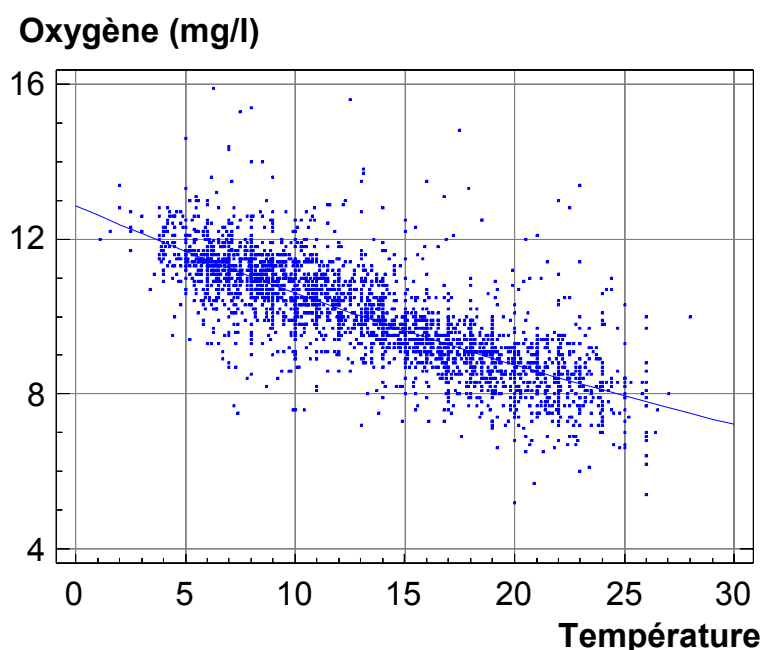


Figure 10 - Relation entre la température des eaux et les teneurs en oxygène dissous. Relation calculée à partir de l'ensemble des mesures disponibles sur les 13 stations. $O_2(\text{mg/l}) = \exp(2.555 - 0.0193t^{\circ}\text{C})$, $r = -.78$

Toutefois, la teneur en oxygène dissous peut être sensiblement modifiée en regard du modèle physique par des apports organiques consommateurs d'oxygène, ou par un important développement végétal (phytoplancton, algues, macrophytes). Les activités métaboliques entraînent alors des oscillations journalières parfois importantes liées à la production diurne et la consommation nocturne de l'oxygène. Sachant que les teneurs les plus basses sont souvent observées en fin de nuit, seul les enregistrements continus de l'oxygène sont réellement pertinents pour analyser les situations extrêmes.

Quelques données provenant d'enregistreurs multi-paramétriques implantés au droit des CNPE illustrent cette variabilité journalière des teneurs en oxygène dissous (Figure 11). Suivant la localisation sur l'axe fluvial, les fluctuations journalières sont différentes ; peu marquées sur un chenal courant (amont de Cruas) ou modérées dans une retenue (Saint-Alban), elles peuvent être très importantes dans une section de fleuve court-circuitée (aménagement de Péage-de-Roussillon).

Elles montrent que ce paramètre est également sous l'étroite dépendance des caractéristiques hydrauliques du tronçon et de l'activité photosynthétique.

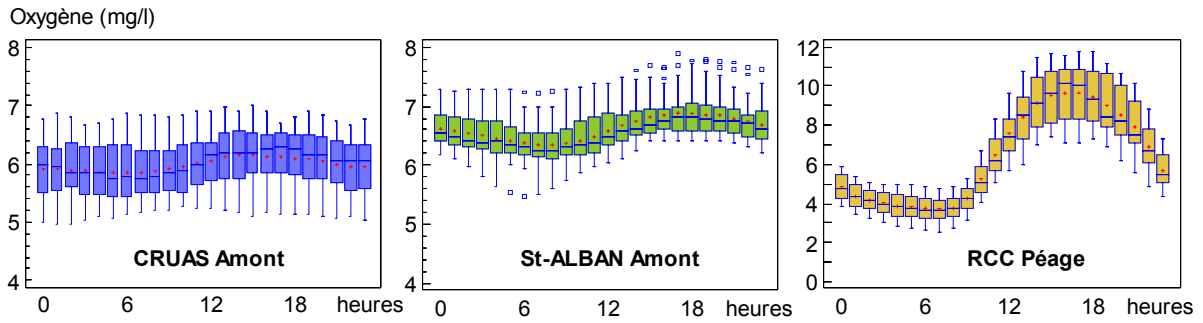


Figure 11 – Evolution des teneurs en oxygène dissous. Synthèse horaire pour le mois de juin 2003. Données EDF-DTG.

Le pourcentage de saturation, paramètre indépendant de la température, est mieux à même de traduire les fluctuations indicatrices de l'activité biologique du système. Des informations d'ordre général sur la variabilité mensuelle peuvent être données à partir des données de l'Agence (Figure 12).

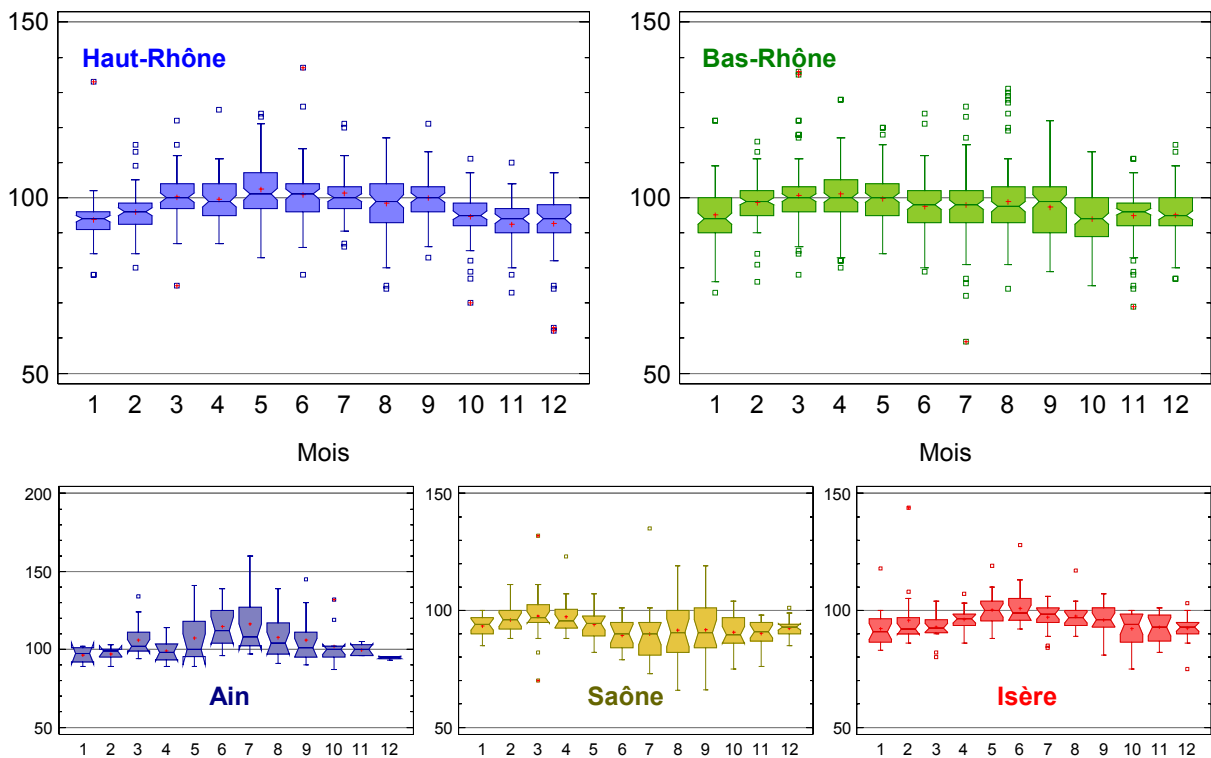


Figure 12 - Evolution saisonnière (moyenne sur 20 années) du pourcentage de saturation en oxygène.

Sur le fleuve, les valeurs interquartiles restent proches de la saturation, et le plus souvent au dessus de 90%. La sous-saturation est essentiellement associée à la saison froide.

Sur deux affluents : l'Ain et la Saône, les évolutions saisonnières sont plus contrastées. L'Ain présente des sursaturations printanières et estivales, révélatrices de la production végétale périlithique sous des eaux à la fois peu profondes et peu turbides. Ces phénomènes sont observés sur les sections court-circuitées du Rhône (Figure 11).

A l'opposé, la Saône montre une tendance à la sous-saturation, reflet de réactions biochimiques largement consommatrices d'oxygène. Ces processus seront d'autant plus marqués dans un cours d'eau à faible vitesse d'écoulement.

Les données provenant des chroniques de l'Agence et des enregistrements horaires EDF-DTG montrent que l'oxygénation du fleuve ne constitue pas un paramètre déclassant. Il n'en demeure pas

moins que pendant la saison chaude, en situation de faible débit, ainsi que dans les secteurs en débit réservé, l'activité biologique induit alors des fluctuations nycthémérales non négligeables. Cependant, pendant les mois anormalement chauds de l'été 2003 (Tableau 16), l'oxygénation est restée satisfaisante sur l'axe rhodanien et aucune situation d'anoxie n'a été enregistrée sur les stations de mesure en continu.

Tableau 16 – Centiles des valeurs horaires en oxygène dissous (mg/l) enregistrées au cours des mois de juin, juillet, août et septembre 2003 (données EDF-DTG).

Site	Station	Min	1.00%	25.00%	Médiane	75.00%	99.00%	Max
Bugey	Amont	5.7	6.3	7.0	7.6	8.1	9.5	10.0
	Aval	5.3	5.4	7.1	7.9	8.5	10.7	11.0
St-Alban	Amont	5.2	5.8	6.6	7.0	7.7	10.7	13.9
	Aval	5.2	5.5	6.5	7.1	7.9	11.3	13.6
	RCC	1.7	2.4	4.6	6.6	8.6	12.5	16.9
Cruas	Amont	4.3	4.7	6.0	6.7	7.2	9.5	10.6
	Aval	4.2	5.0	6.3	6.9	7.8	12.4	13.1
Tricastin	Amont	5.1	5.5	6.3	7.3	8.4	9.7	10.7
	Aval	4.9	5.0	5.9	6.4	7.1	11.7	15.3

b. Conductivité et teneurs en nitrates

Dans l'analyse inter-stations/mois, le premier axe factoriel décrit les changements saisonniers de la conductivité et de la teneur en nitrates (Figure 9). Ces alternances saisonnières avec minima estivaux sont cohérentes sur l'ensemble des stations rhodaniennes et sur l'Ain, mais se déroulent à des niveaux de base différents (Figure 13). La température agit sur les équilibres calco-carboniques et modifie sensiblement la teneur en ions majeurs (calcium, bicarbonates) d'où la baisse de conductivité lorsque la température augmente. Elle agit également sur les processus biologiques, notamment la production primaire consommatrice de nutriments. La baisse estivale des nitrates résulte de processus biologiques sous le contrôle de la lumière et de la thermique (Figure 13).

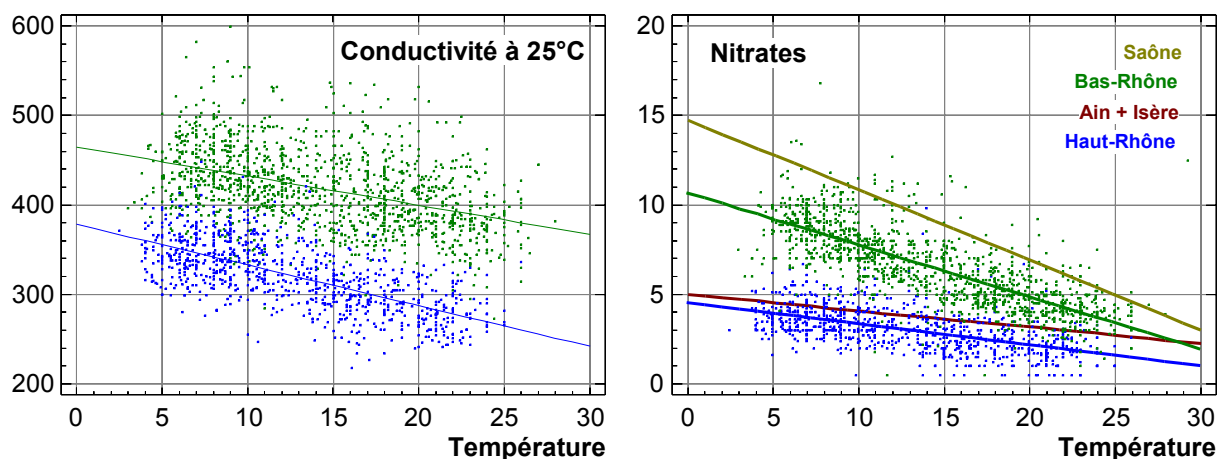


Figure 13 - Relation associant la conductivité et les concentrations en nitrates en fonction de la température des eaux. En bleu, les données du Haut-Rhône, en vert celles du Bas-Rhône. Seules les droites de régression des affluents ont été figurées pour les nitrates.

L'Isère et la Saône présentent des évolutions annuelles distinctes, calquées à la fois sur le régime thermique et sur le régime hydrologique de chaque cours d'eau : régime nivo-pluvial de l'Isère (hautes eaux printanières) et régime pluvial de la Saône (basses eaux estivales).

Selon l'origine des eaux, le débit est un acteur important en augmentant ou en diminuant les apports minéraux. Mais, cette influence sur la concentration des éléments dissous est parfois réduite. C'est le cas du Rhône en sortie du lac Léman, réservoir naturel qui homogénéise la masse d'eau par un long temps de séjour. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux sont alors directement sous le contrôle des conditions climatiques et de l'activité biologique de l'épilimnion et de l'hypolimnion. La double influence de la thermique et de l'hydrologie est bien mise en évidence par les relations entre la conductivité, l'hydrologie et la température, observées sur deux stations réellement distinctes : le Rhône à Chancy-Pougny et la Saône à Lyon (Figure 14).

Dans la plupart des cours d'eau, il existe une relation simple de type puissance entre la teneur d'un élément dissous et le débit telle que $C = a Q^b$ (C concentration de l'élément, Q débit, a constante de la relation et b exposant de la fonction). Le plus souvent, une décroissance de la charge totale dissoute est observée lorsque le débit augmente. En considérant la conductivité comme intégrateur de la charge minérale dissoute, une relation de ce type peut être attendue avec ces données. C'est le cas pour la Saône avec la relation suivante :

$$\mu\text{S (Saône)} = 1046 Q^{-0.13} \text{ avec } r = -0.73$$

Cette relation n'a pas de sens pour la station de Chancy-Pougny.

Par contre, une relation linéaire inverse largement significative entre la conductivité et la température des eaux est observée à Chancy-Pougny. Celle-ci a pour origine les phénomènes physiques discutés précédemment, l'activité biologique de l'épilimnion du Léman, et en partie les apports estivaux d'origine glaciaire de l'Arve. La relation est la suivante :

$$\mu\text{S (Chancy-Pougny)} = 356 - 4.76 t^{\circ}\text{C} \text{ avec } r = -0.81$$

Pour la Saône, la réponse linéaire positive vis-à-vis de la thermique n'est que la résultante d'une forte décroissance estivale des débits ayant pour conséquence une augmentation des concentrations des rejets et baisse de la dilution d'ions peu sensibles vis-à-vis du contexte biotique tels que les chlorures.

IV. Conclusions générales

Sur la base d'une chronique de vingt années avec des relevés mensuels, et de paramètres physico-chimiques classiques, il est possible d'identifier une importante variabilité spatiale et temporelle liée à la succession des apports naturels des affluents de l'amont vers l'aval et aux différents régimes hydrologiques fonctionnant sur le bassin versant, mais également à des apports conséquents d'origine anthropique.

L'amélioration des niveaux d'épuration et les efforts réalisés pour traiter la majorité des rejets urbains se sont traduits par une baisse sensible de la pollution classique. Toutefois, des éléments d'origine anthropique exclus de cette synthèse (tels que les chlorures) n'évoluent pas dans le même sens.

En ne considérant que les paramètres retenus dans cette analyse, l'oxygène dissous est le paramètre le plus directement sous dépendance de la thermique. Une réponse physique domine sur l'axe rhodanien. Le rôle de l'activité photosynthétique dans les fluctuations journalières de l'oxygène dissous est variable selon les conditions hydrauliques des différents tronçons du fleuve aménagé. De faibles débits renforcent « l'effet retenue » des ouvrages, exacerbent l'amplitude des variations journalières de l'oxygène, également du pH, induites par la photosynthèse.

Les paramètres saisonniers (durée du jour, éclaircissement et température) conditionnent la consommation des nutriments tels que les nitrates par les organismes végétaux. La conductivité, intégrateur de la charge ionique, traduit le fonctionnement global de l'hydrosystème : modification des équilibres calco-carboniques, consommation des nutriments, ... Bien que les variations de ces paramètres soient également dépendantes du débit, elles apparaissent plus directement associées aux fluctuations saisonnières de la température.

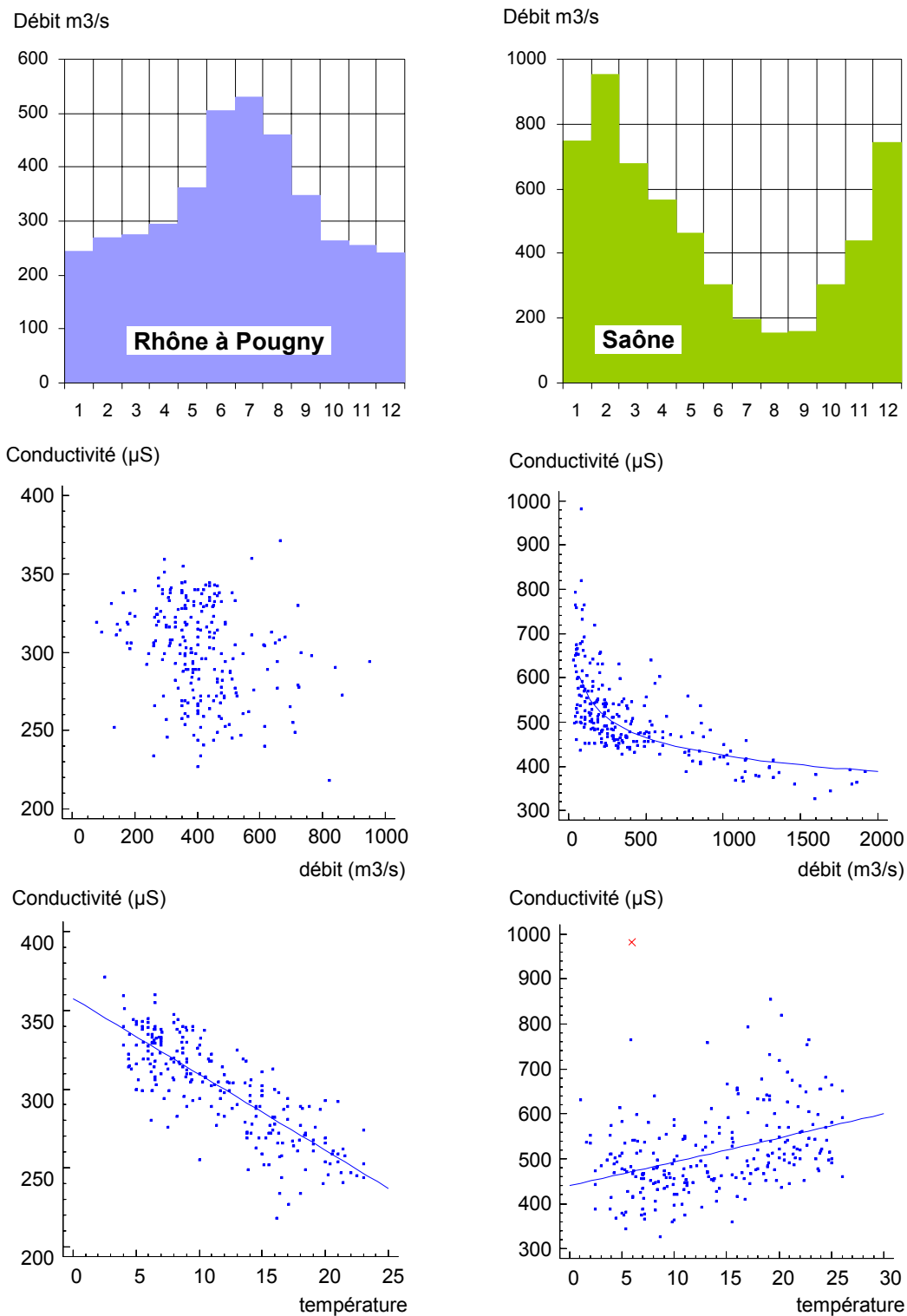


Figure 14 - Relations entre la conductivité, la température des eaux et le débit moyen du jour de prélèvement. Exemples pris sur le Rhône à Chancy-Pougny et la Saône à Lyon. En haut, le régime hydrologique mensuel des deux cours d'eau. Relations entre la conductivité, le débit et la température.

V. Bibliographie

GODWIN, K.S., HAFNER, S.D. & BUFF, M.F. (2003): Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application. - *Environmental Pollution* 124: 273-281.

LÖFGREN, S. (2001): The chemical effects of deicing salt on soil and stream water of five catchments in southeast Sweden. - *Water Air and Soil Pollution* 130: 863-868.

POUSSARD, G. & MADRID, N. (1999): Qualité des eaux du Rhône. Evolution 1969-1995. Agence de l'Eau - Rhône-Méditerranée-Corse, Lyon, 106 p.

THIOULOUSE, J., DOLEDEC, S., CHESSEL, D. & OLIVIER, J.M. (1997): ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. - *Statistics and Computing* 7: 75-83.

VI. Liste des tableaux

Tableau 14 - Liste des stations et nombre de prélèvements annuels réalisés au cours de la période 1985-2004. En jaune, un nombre de relevés inférieur à 12. En orange, un suivi plus conséquent au cours des premières années sur un nombre moindre de stations. En vert, les stations ne faisant pas encore l'objet d'un suivi permanent..... 16

Tableau 15 - Stations de mesure et paramètres physico-chimiques retenus après l'extraction générale des données du réseau de Bassin. Codage des variables et valeurs moyennes des paramètres sur la période 1985-2004. Débit (**Q**), température des eaux (**t°C**), **pH**, oxygène dissous en mg/l (**O2**), oxygène exprimé en pourcentage de saturation (**O%**), conductivité à 25 °C (**µS**), Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (**DBO**), carbone organique dissous en mg/l (**COD**), les trois formes azotées en mg/l (ammonium, nitrites et nitrates : **NH4**, **NO2**, **NO3**), phosphates en mg/l (**PO4**). *Remarque : Le carbone organique dissous a été exclu des analyses multivariées en l'absence de mesure de ce paramètre au cours des deux premières années.*..... 17

Tableau 16 – Centiles des valeurs horaires en oxygène dissous (mg/l) enregistrées au cours des mois de juin, juillet, août et septembre 2003 (données EDF-DTG). 27

VII. Liste des figures

Figure 1 - Liste et localisation des stations du réseau de surveillance de l'Agence Rhône-Méditerranée-Corse..... 15

Figure 2 - Plans factoriels F1-F2 de l'Analyse en Composantes Principales Normée du tableau initial (1845 échantillons : 20 années x n mois x 13 stations). Coordonnées factorielles des prélèvements et localisation sous forme de points colorés des centres de gravité des nuages de points de chaque station. Agrandissement de la partie centrale du plan et position des centres de gravité (H1 à H4 : stations du Haut-Rhône, B1 à B6 : stations du Bas-Rhône. Cercle de corrélation des variables physico-chimiques. Distribution des valeurs propres..... 18

Figure 3 - Plans factoriels F1-F2 de l'Analyse en Composantes Principales Normée inter-stations. Projections des variables physico-chimiques et des 13 stations. 19

Figure 4 - Représentation synthétique des variables physico-chimiques vues sous l'angle spatial. Les variables représentées sont celles qui différencient le mieux les stations. La numérotation des stations peut être retrouvée sur la carte de localisation. Les cadres colorés de l'arrière-plan correspondent respectivement au Haut-Rhône, au Bas-Rhône et aux affluents..... 20

Figure 5 - ACPn inter-années/stations. Plan F1-F2 des variables. Distribution des valeurs propres. Représentation fonctionnelle des coordonnées par années. Les stations ont été regroupées par entités ou localisations géographiques. 21

Figure 6 - Evolution inter-annuelle des phosphates, de l'ammonium et de la Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours. Les valeurs ont été regroupées par entités géographiques (Haut-Rhône et Bas-Rhône). Les ordonnées adoptées pour les phosphates sont différentes..... 22

Figure 7 - Evolution inter-annuelle de la conductivité et des nitrates. Les valeurs ont été regroupées par entités géographiques (Haut-Rhône et Bas-Rhône).....	23
Figure 8 - Evolution inter-annuelle de la charge en chlorures sur le Rhône à Chancy-Pougny (données du réseau de surveillance suisse, accessibles sur le site www.naduf.ch).	23
Figure 9 - ACPn inter-stations/mois. Plan F1-F2 des variables. Distribution des valeurs propres. Représentation mensuelle des coordonnées factorielles F1 et F2.	24
Figure 10 - Relation entre la température des eaux et les teneurs en oxygène dissous. Relation calculée à partir de l'ensemble des mesures disponibles sur les 13 stations. $O_2(\text{mg/l}) = \exp(2.555 - 0.0193t^\circ\text{C})$, $r = -.78$	25
Figure 11 – Evolution des teneurs en oxygène dissous. Synthèse horaire pour le mois de juin 2003. Données EDF-DTG.	26
Figure 12 - Evolution saisonnière (moyenne sur 20 années) du pourcentage de saturation en oxygène.	26
Figure 13 - Relation associant la conductivité et les concentrations en nitrates en fonction de la température des eaux. En bleu, les données du Haut-Rhône, en vert celles du Bas-Rhône. Seules les droites de régression des affluents ont été figurées pour les nitrates.....	27
Figure 14 - Relations entre la conductivité, la température des eaux et le débit moyen du jour de prélèvement. Exemples pris sur le Rhône à Chancy-Pougny et la Saône à Lyon. En haut, le régime hydrologique mensuel des deux cours d'eau. Relations entre la conductivité, le débit et la température.	29

Lot 1.3 : Le régime thermique du fleuve

Variabilité temporelle

1977-2004

I. Données disponibles

Les stations de mesure de la température de l'eau, installées par EDF en regard du fonctionnement des centrales thermiques de la vallée du Rhône, couvrent pratiquement l'axe rhodanien de la frontière suisse à la Méditerranée. Elles fonctionnent en continu avec des relevés horaires depuis 1977. Ces chroniques, validées et traitées par les gestionnaires de la base de données EDF-DTG à Grenoble ont déjà fait l'objet de documents de synthèse (LAUTERS & POIREL, 2001a, b; DESAINT & POIREL, 2004; POIREL, 2004).

Huit chroniques de relevés (1977-2004) sont utilisées dans le cadre de cette étude et encadrent les 4 Centres Nucléaires de Production Electrique de la vallée du Rhône : **Bugey, Saint-Alban/Saint-Maurice-l'Exil, Cruas-Meysse et Tricastin**.

Les stations sont les suivantes : amont et aval de la centrale de Bugey (nommées respectivement **BUGA** et **BUGV**), amont et aval du CNPE de Saint-Alban-Saint-Maurice-l'Exil (**SALA** et **SALV**), amont du site de Cruas-Meysse (**CRUAS**), amont et aval du CNPE du Tricastin (**TRIA** et **TRIV**) et amont de la centrale thermique d'Aramon (**ARAA**).

II. Température moyenne annuelle

Une étude préliminaire des chroniques a montré une hausse sensible de la température à la fin de la décennie 80, au cours des années 1987-1988. Les moyennes obtenues sur deux périodes (avant et après 1988) ont révélé un fort contraste temporel. Le réchauffement a accentué les écarts thermiques entre l'amont et l'aval du fleuve et les températures actuellement observées sur le Haut-Rhône correspondent à celles enregistrées sur le Bas-Rhône au cours de la première décennie.

L'évolution de la température moyenne annuelle sur les 8 stations (Figure 15) montre ces changements temporels et permet d'identifier de l'amont vers l'aval 3 groupes de station(s) :

- (1) la station BUGA qui n'est pas sous influence de rejets thermiques,
- (2) les stations BUGV, SALA, CRUAS, TRIA,
- (3) les stations SALV, TRIV et ARAA.

Depuis la mise en service de l'ensemble des sites industriels, la température relevée à l'aval d'un CNPE en circuit ouvert déplace cette station dans le groupe suivant ; ainsi l'aval de Bugey (BUGV) se retrouve parmi les stations du Bas-Rhône supérieur et médian tandis que Saint-Alban aval (SALV) et Tricastin aval (TRIV) rejoignent la station d'Aramon sur le Bas-Rhône méridional.

Globalement, les écarts de température moyenne annuelle dans chaque station, entre l'année la plus froide et la plus chaude sont considérables (Tableau 17), même dans la station BUGA non influencée par des apports industriels.

Une telle modification de la température sur un fleuve « froid » comme le Rhône suppose des changements importants du fonctionnement de l'hydrosystème dans sa globalité. Les processus biologiques étant directement dépendants de variables environnementales périodiques telles que la durée du jour et la température, il importe de mieux définir ce contexte thermique par des descripteurs pertinents en regard du cycle de vie des organismes aquatiques ectothermes. Ces choix reposent sur un ensemble de travaux déjà réalisés sur le Rhône (GRENOUILLET et al., 2001; POIREL et al., 2001; CARREL et al., 2003).

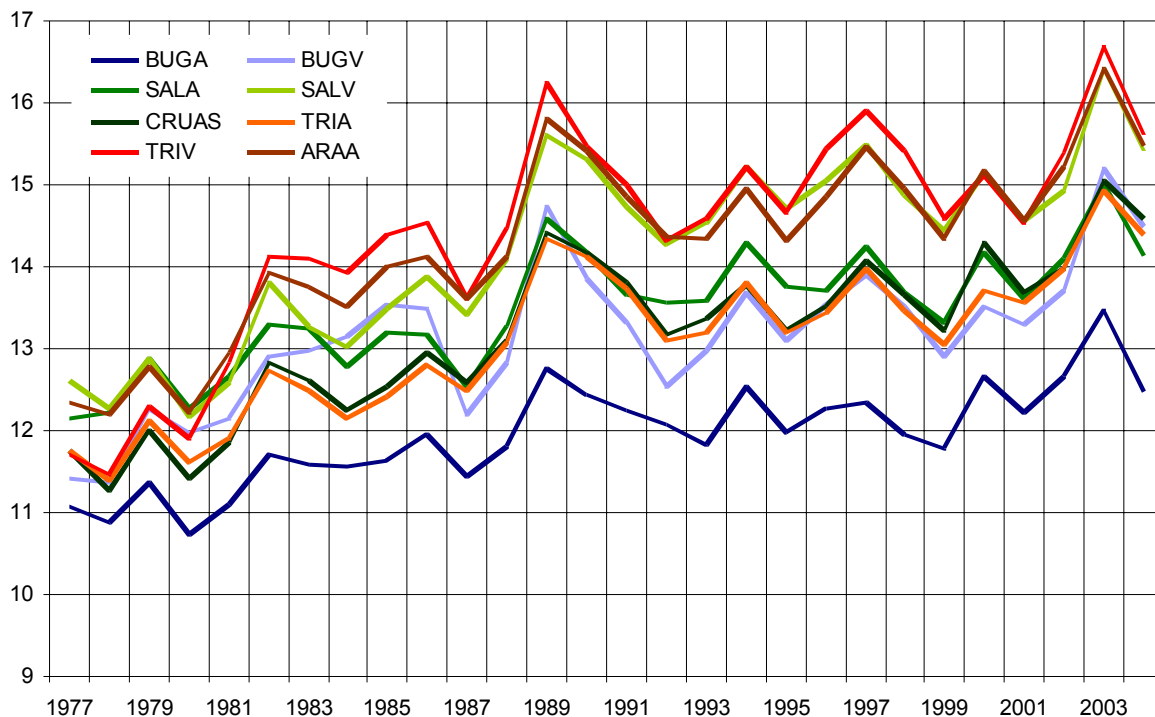


Figure 15- Evolution de la température moyenne annuelle entre 1977 et 2004 sur les huit stations rhodaniennes.

Tableau 17 - Températures moyennes annuelles minimales et maximales enregistrées sur la période 1977-2004 et écart entre ces deux valeurs.

Station	Min	Année	Max	Année	Ecart
BUGA	10.74	1980	13.47	2003	2.73
BUGV	11.37	1978	15.20	2003	3.82
SALA	12.15	1977	14.99	2003	2.84
SALV	12.16	1980	16.42	2003	4.26
CRUAS	11.27	1978	15.04	2003	3.77
TRIA	11.39	1978	14.93	2003	3.54
TRIV	11.47	1978	16.69	2003	5.23
ARAA	12.18	1978	16.41	2003	4.22

III. Etude temporelle du contexte thermique rhodanien

1. Calcul des variables

Pour cette étude, les données originelles ont fait l'objet d'une compilation sous la forme de variables synthétiques descriptives du cycle thermique annuel.

Ces descripteurs ont été calculés pour chaque station après lissage annuel et inter-annuel des températures moyennes journalières. Le lissage est une reconstitution partielle du cycle saisonnier par les séries de Fourier.

Quatre groupes de variables ont été constitués à partir d'un calendrier défini sur la courbe de lissage annuel par les dates de franchissement de seuils thermiques successifs (Figure 16) :

1) nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier jusqu'au passage du seuil thermique, les variables sont indicatives de la précocité ou du retard du seuil fixé, elles correspondent à 5 dates ;

- Cm** Jour de l'année pour le minimum
- C12s** Jour de l'année pour le seuil printanier 12°C
- C18** Jour de l'année pour le seuil 18°C
- CMx** Jour de l'année pour le maximum annuel
- C12a** Jour de l'année pour le retour automnal 12°C

2) durée en jours entre deux seuils successifs, soit 5 périodes ;

- D1** Durée en jours entre le minimum et le seuil printanier 12°C
- D2** Durée en jours entre le seuil printanier 12°C et le seuil 18°C
- D3** Durée en jours entre le seuil 18°C et le seuil du maximum annuel
- D4** Durée en jours entre le maximum et le seuil automnal 12°C
- D5** Durée en jours entre le seuil automnal 12°C et minimum de l'année n+1

3) somme des écarts thermiques entre les courbes lissées interannuelle et annuelle pour chaque période, équivalente à un cumul de degrés-jours référencés par la courbe lissée interannuelle, soit 5 variables ;

- S1** Somme des écarts thermiques pour D1
- S2** Somme des écarts thermiques pour D2
- S3** Somme des écarts thermiques pour D3
- S4** Somme des écarts thermiques pour D4
- S5** Somme des écarts thermiques pour D5

4) coefficients de corrélations entre les valeurs brutes et les valeurs lissées permettant de caractériser l'hétérogénéité thermique au cours de chaque période, soit 5 valeurs [**r1**, **r2**, **r3**, **r4** et **r5**].

Les valeurs moyennes par années de ces variables sont données dans le Tableau 18.

Tableau 18 – Moyennes annuelles des variables utilisées dans l'analyse multivariée du tableau général.

Annee	Nbre	Cm	C12s	C18	CMx	C12a	r1	r2	r3	r4	r5	S1	S2	S3	S4	S5	D1	D2	D3	D4	D5
1977	8	10	127	208	226	300	0.87	0.83	0.29	0.80	0.89	-130	-176	-45	-122	-130	116	80	19	74	84
1978	8	19	133	213	229	305	0.94	0.76	0.38	0.93	0.88	-220	-196	-44	-95	-98	113	79	17	75	77
1979	8	16	123	181	222	303	0.89	0.86	0.59	0.85	0.87	-170	-66	-28	-43	-100	107	57	41	82	68
1980	8	6	129	210	233	301	0.93	0.52	0.42	0.92	0.88	-137	-225	-57	-71	-158	123	81	25	69	78
1981	8	13	112	180	220	301	0.96	0.86	0.08	0.97	0.90	-138	-31	-41	-84	-132	99	68	40	81	78
1982	8	14	112	165	214	303	0.92	0.82	0.74	0.90	0.93	-55	8	29	-31	-67	97	53	49	89	83
1983	8	22	126	171	221	307	0.89	0.83	0.84	0.89	0.87	-164	-41	41	54	-63	105	45	50	86	97
1984	8	39	126	172	216	309	0.93	0.72	0.81	0.90	0.96	-168	-41	4	-28	-42	87	46	43	93	82
1985	8	25	118	180	236	320	0.87	0.76	0.25	0.91	0.65	-156	-55	-10	157	-51	93	62	56	84	85
1986	8	40	124	168	222	320	0.87	0.74	0.66	0.85	0.91	-192	-25	51	141	-2	84	43	54	98	67
1987	8	22	121	188	232	314	0.92	0.59	0.31	0.87	0.81	-137	-93	-42	49	-15	100	66	44	82	74
1988	8	23	118	168	217	309	0.89	0.77	0.69	0.91	0.88	-61	-18	24	11	8	95	50	49	92	75
1989	8	18	102	150	216	317	0.86	0.86	0.82	0.94	0.74	24	58	184	200	19	84	48	65	101	55
1990	8	7	91	156	223	311	0.84	0.79	0.81	0.92	0.90	34	98	109	135	-38	85	65	67	88	56
1991	8	2	104	164	225	306	0.83	0.74	0.77	0.97	0.94	-1	16	104	134	-95	102	60	60	82	72
1992	8	13	108	162	216	306	0.88	0.81	0.71	0.94	0.79	-43	24	54	14	-52	95	54	54	90	70
1993	8	9	97	152	202	299	0.71	0.85	0.29	0.93	0.83	28	85	78	-92	-42	87	56	50	96	85
1994	8	18	111	157	213	309	0.66	0.66	0.95	0.89	0.94	19	18	114	75	25	93	46	55	96	76
1995	8	20	116	170	222	314	0.88	0.73	0.91	0.75	0.79	-37	-23	24	74	8	96	54	52	92	71
1996	8	20	100	154	213	314	0.71	0.78	0.30	0.93	0.80	-10	76	78	47	-4	80	54	59	101	62
1997	8	9	87	161	233	316	0.98	0.79	0.71	0.93	0.84	22	124	73	172	-26	77	74	72	83	51
1998	8	2	103	152	210	298	0.77	0.86	0.81	0.91	0.81	18	51	155	52	-113	102	49	58	88	83
1999	8	16	115	163	218	307	0.88	0.82	0.87	0.90	0.91	-90	1	78	72	-50	99	48	55	89	76
2000	8	18	101	154	215	314	0.93	0.88	0.32	0.94	0.78	3	66	109	97	8	83	53	62	99	68
2001	8	15	109	166	220	311	0.87	0.87	0.52	0.78	0.87	1	8	39	57	1	94	57	54	92	65
2002	8	11	93	156	217	312	0.85	0.67	0.52	0.93	0.71	54	91	77	66	-1	82	63	61	95	70
2003	8	17	93	133	205	312	0.94	0.77	0.85	0.97	0.90	17	103	359	243	-12	76	40	72	106	75
2004	8	22	101	149	216	318	0.89	0.89	0.87	0.90	0.84	-18	71	168	180	17	79	48	67	102	64
Moyenne	224	17	111	168	220	309	0.87	0.78	0.61	0.90	0.85	-61	-3	60	52	-43	94	57	52	90	73
Maximum		40	133	213	236	320	0.98	0.89	0.95	0.97	0.96	54	124	359	243	25	123	81	72	106	97
Minimum		2	87	133	202	298	0.66	0.52	0.08	0.75	0.65	-220	-225	-57	-122	-158	76	40	17	69	51
Ecart		38	46	80	34	22						274	349	416	365	183	47	41	56	38	46

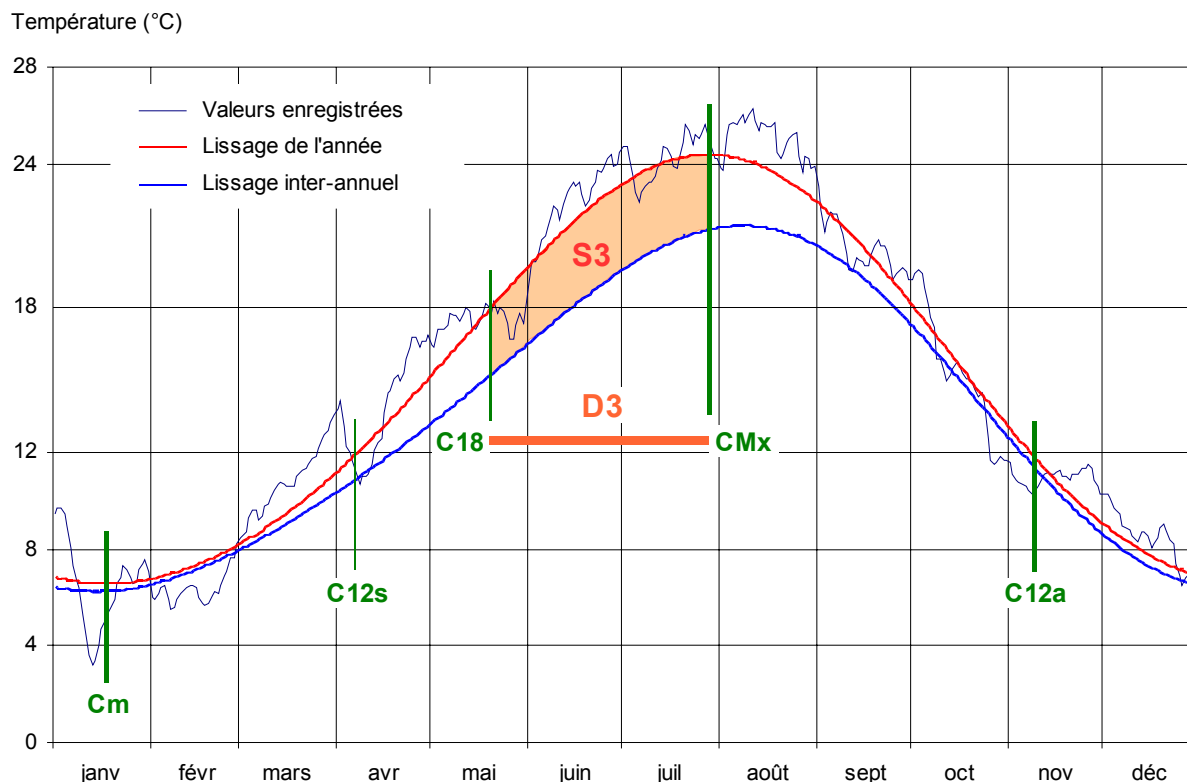


Figure 16 – Méthode de calcul des variables thermiques à partir des courbes de températures moyennes journalières lissées par séries de Fourier. Enregistrement de la température à l'amont de Tricastin en 2003 avec superposition du lissage annuel (en rouge) et inter-annuel (en bleu). Les 5 seuils thermiques sont indiqués (minimum, 12°C printanier, 18°C, maximum et 12°C automnal). A titre d'exemple, la période D3 comprise entre les dates du seuil 18°C et du maximum et le cumul S3 des écarts thermiques entre les deux courbes pour la période considérée ont été représentés en orangé. A ces variables s'ajoutent les coefficients de corrélation entre les valeurs brutes et les valeurs théoriques pour chaque période, soit 5 valeurs.

Le tableau général compte 224 lignes (28 années x 8 stations) x 20 variables. Il a été traité par Analyse en Composantes Principales Normée à partir du logiciel ADE4 (THIOULOUSE et al., 1997).

2. Analyses et résultats

Dans l'ACPn du tableau général, l'essentiel de l'information est résumé par le premier axe factoriel (42% de l'inertie du tableau). Les trois axes suivants ne représentent plus que 12%, 11.8% et 6.4% de l'inertie totale. Cette variabilité est principalement d'ordre temporel ; l'inertie intra-stationnelle représentant 86.3% de l'inertie totale. Les caractéristiques thermiques évoluent donc de manière sensiblement identiques sur toutes les stations, avec un niveau de base distinct lié au positionnement de la station sur le gradient géographique amont-aval, et/ou à l'existence des rejets.

Parmi les variables exprimant des différences spatiales (les dates de passage des seuils thermiques et les durées entre deux seuils), les seuils 12°C printaniers et automnaux sont les plus représentatifs de l'analyse inter-stationnelle (Figure 17, Figure 18, Figure 19).

Sur le Haut-Rhône, à l'amont de Bugey, le seuil printanier 12°C est le plus tardif avec une moyenne inter-annuelle de 129 jours ; tandis que le seuil automnal 12°C, le plus précoce, est passé au 300^{ème} jour. A Aramon, sur le Rhône méridional, ces mêmes seuils sont atteints au 102^{ème} jour et 314^{ème} jour respectivement. Les stations s'étagent ainsi de l'amont vers l'aval sous l'influence des apports thermiques des rejets et des affluents. Ainsi, l'arrivée de la Saône accentue le caractère « aval » de la station SALA, alors que l'Isère, avec des apports d'eaux froides, rapproche les stations de Cruas et de Tricastin Amont d'une situation plus « amont ». Les conditions thermiques observées à l'aval de Tricastin et à Aramon sont très proches. Il en est de même pour les stations de Cruas et de Tricastin

amont. Il n’y a pas de différences significatives entre ces couples de stations pour les variables définies.

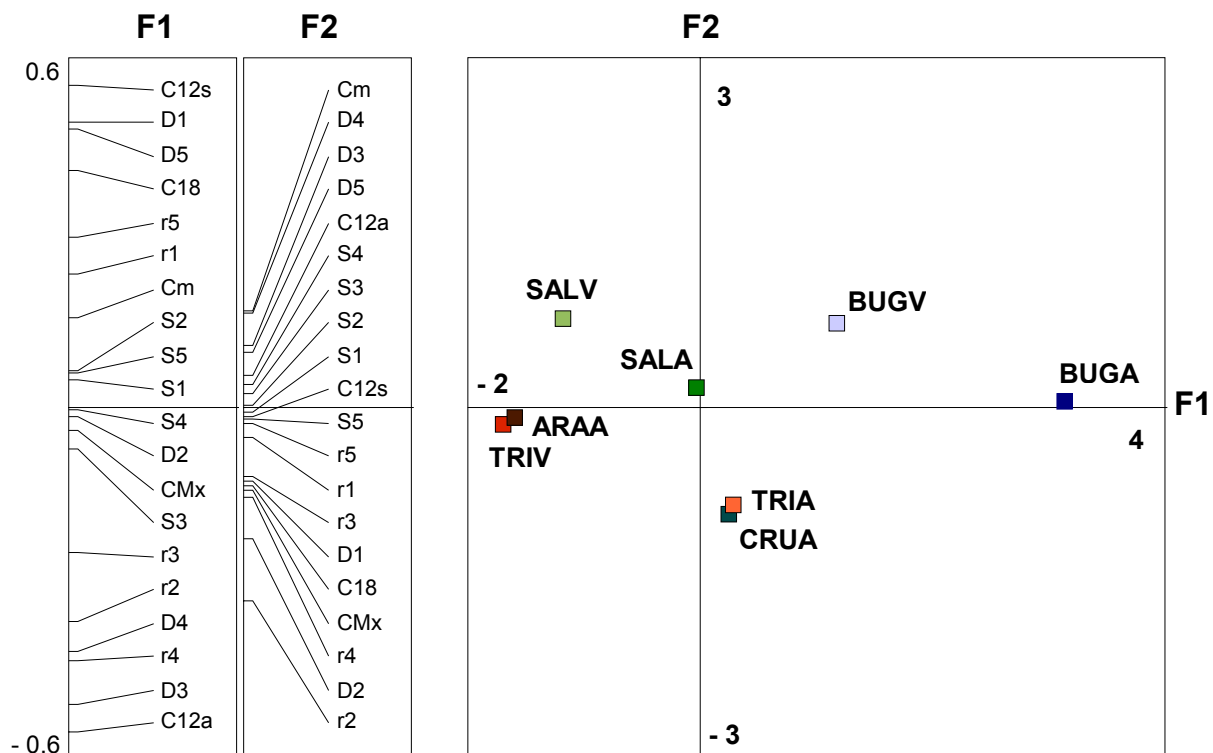


Figure 17 - Analyse en Composantes Principales Normée inter-stations. A droite, les coordonnées factorielles des variables sur les deux premiers axes. A gauche, la plan F1F2 des stations.

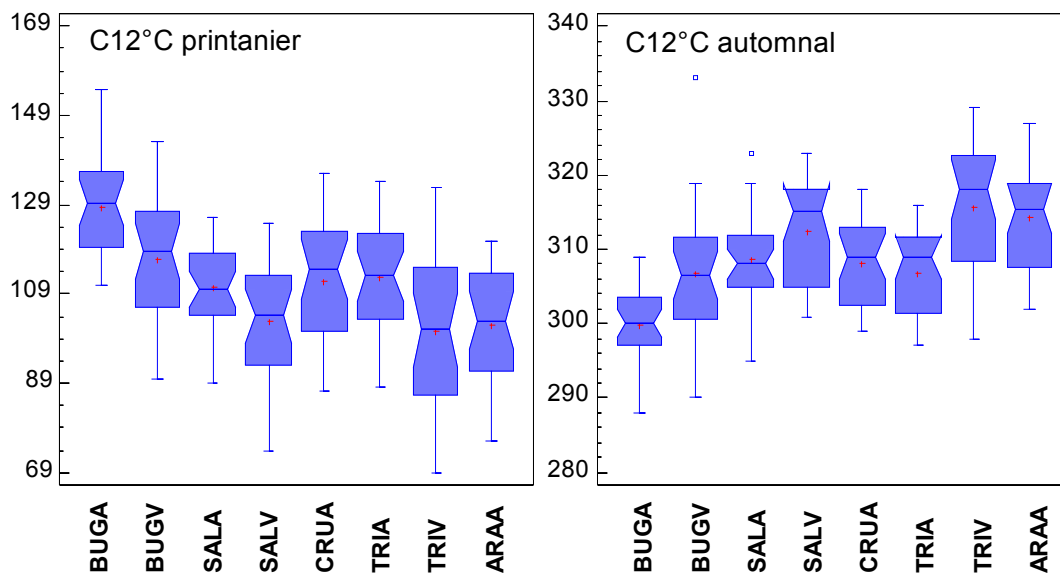


Figure 18 - Représentation statistique des seuils 12°C printaniers et automnaux pour les huit stations.

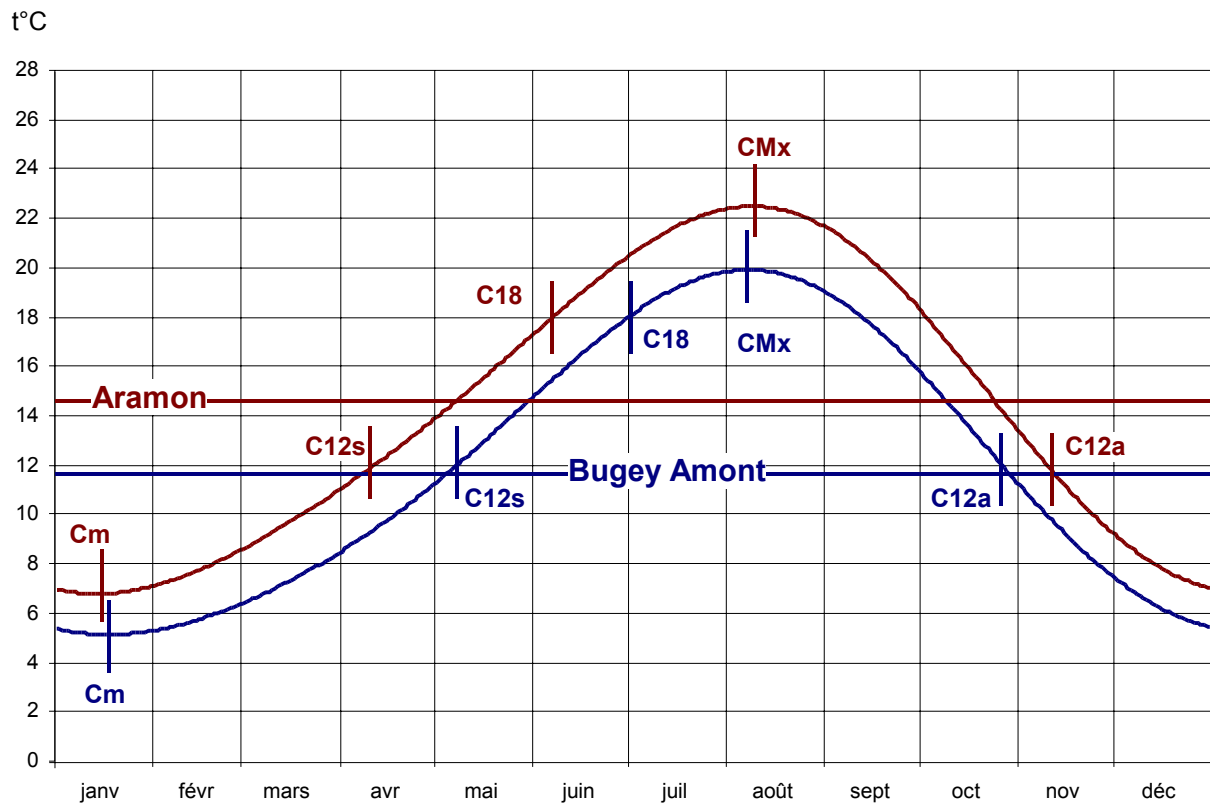


Figure 19 – Représentation des courbes lissées inter-annuelles des stations BUGA (bleu) et ARAA (marron). Position des différents seuils thermiques pour chaque station. Les traits horizontaux donnent les températures interannuelles moyennes des stations.

Par une élimination des différences spatiales, l'ACPn intra-stationnelle (Figure 20) accentue la similarité des profils interannuels dans les 8 stations.

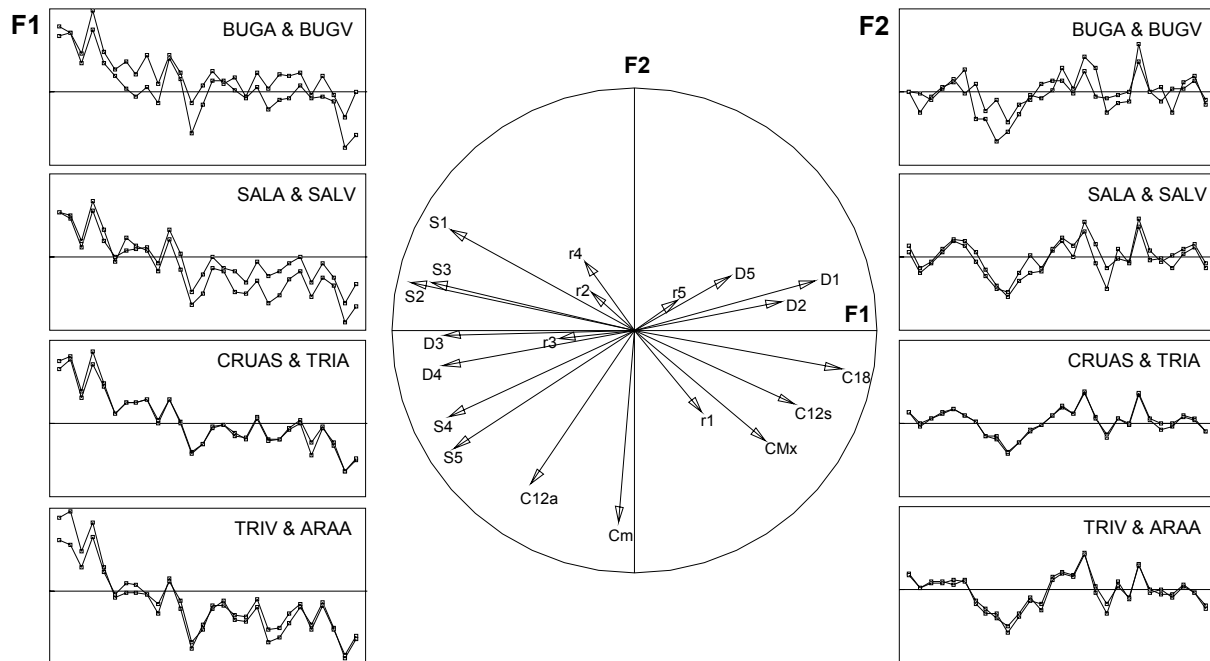


Figure 20 – Analyse en Composantes Principales Normée Intra-stations. Au centre, le cercle F1F2 de corrélation des variables. A gauche, la représentation fonctionnelle des coordonnées factorielles des années sur l'axe F1 (lignes supplémentaires de l'analyse). A droite, les coordonnées factorielles des années sur l'axe F2.

Le changement climatique des dernières décennies a entraîné :

- 1) une augmentation des écarts thermiques (Figure 21) sur toutes les périodes (S1 à S5) ;
- 2) des seuils thermiques (12°C, 18°C) de plus en plus précoces (Figure 22), une précocité très sensible sur le seuil 18°C (Figure 23) ;
- 3) d'où une diminution de la durée des périodes D1 et D2, et une augmentation de la durée des périodes D3 et D4 (Figure 24) ;
- 4) la durée de la période froide D5 a également diminué en raison d'une prolongation automnale des températures élevées.

La date du minimum (Cm) est une caractéristique indépendante des autres car elle intègre des fluctuations pluriannuelles distinctes de la tendance générale donnée par l'axe F1. Elle témoigne d'alternances et successions d'hivers plus ou moins prolongés.

Tableau 19 – Quelques variables sur le site de Bugey Amont, calculées pour deux années extrêmes de la chronique (1978 et 2003).

Année	t° _{moy}	C _m	C _{12s}	C ₁₈	C _{Mx}	C _{12a}
1978	10.89	17	146	221	227	297
2003	13.47	17	111	148	205	298
Ecart (en jours)		0	-35	-73	-22	1

Année	t° _{moy}	D1	D2	D3	D4	D5
1978	10.89	129	75	6	70	90
2003	13.47	94	37	57	93	89
Ecart (en jours)		-35	-38	51	23	-1

Année	t° _{moy}	S1	S2	S3	S4	S5
1978	10.89	-151	-128	-7	-33	-54
2003	13.47	23	109	280	200	-38
Ecart (degrés-jours)		174	236	287	234	16

Globalement, l'information peut être résumée sur la base d'un exemple graphique (Figure 26) pris à Bugey (amont de la centrale). L'évolution climatique s'est traduite par une hausse remarquable des températures printanières, estivales et automnales. Les seuils thermiques relevés dans la partie ascendante de la courbe annuelle sont de plus en plus précoces (Tableau 19). Dans cet exemple, le seuil 18°C a plus de 70 jours d'avance en 2003. La durée de l'intervalle compris entre les seuils 12°C printanier et automnal passe de 151 jours à 187 jours, avec un écart thermique journalier moyen de 4°C. Par contre, les dates des seuils du minimum (C_m) et du 12° automnal sont identiques. La modification du profil thermique annuel intéresse essentiellement la première partie de l'année. Pendant la phase de décroissance, les courbes sont très proches. Il est possible que ce profil change avec la prolongation automnale des fortes températures telle qu'observée en 2005.

La simplification par lissage de Fourier ne doit pas éluder la forte variabilité de la température moyenne journalière dont les chutes brutales sur quelques jours peuvent avoir des conséquences non négligeables sur la faune piscicole ; par exemple, l'arrêt immédiat de la reproduction chez le barbeau (BARAS & PHILIPPART, 1999) ou l'instauration de conditions peu favorables pour la croissance des plus jeunes individus (KECKEIS et al., 2001).

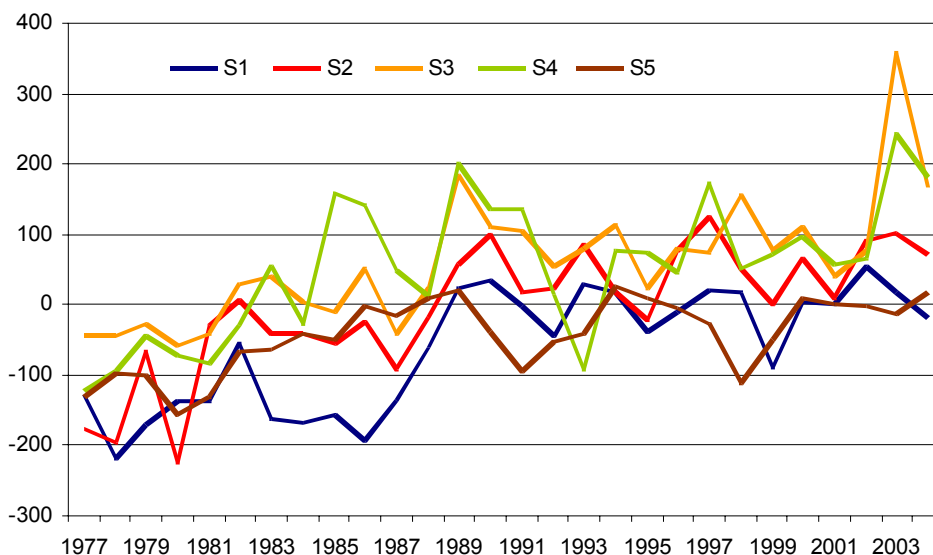


Figure 21 – Evolution moyenne sur l'axe rhodanien des écarts thermiques exprimés par une somme de degrés-jours par période (différence entre la courbe de lissage annuel de la température et la courbe de lissage inter-annuel).

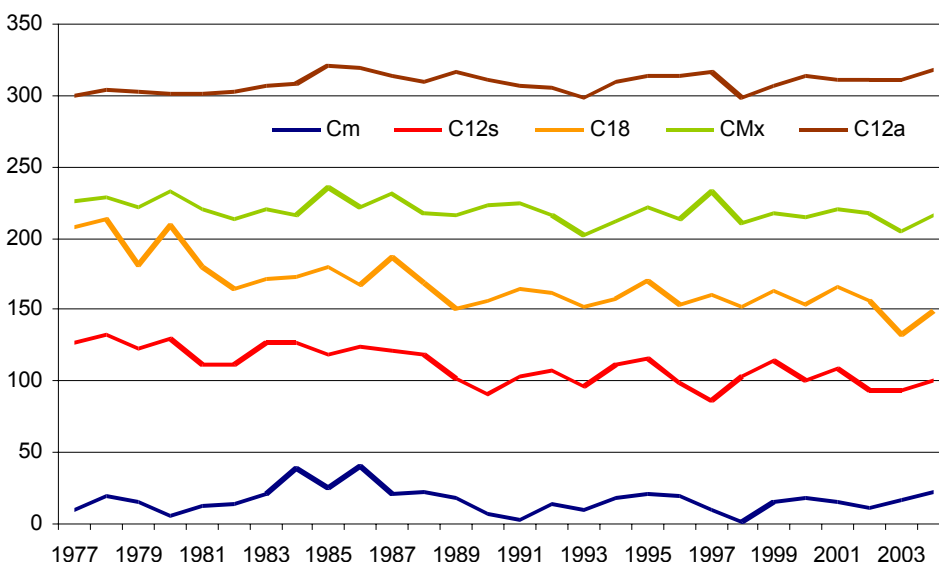


Figure 22 – Evolution moyenne sur l'axe rhodanien du calendrier (nombre de jours comptés à partir du 1^{er} janvier) des seuils thermiques (minimum, 12°C printanier, 18°C, maximum et 12°C automnal).

Calendrier du seuil 18°C

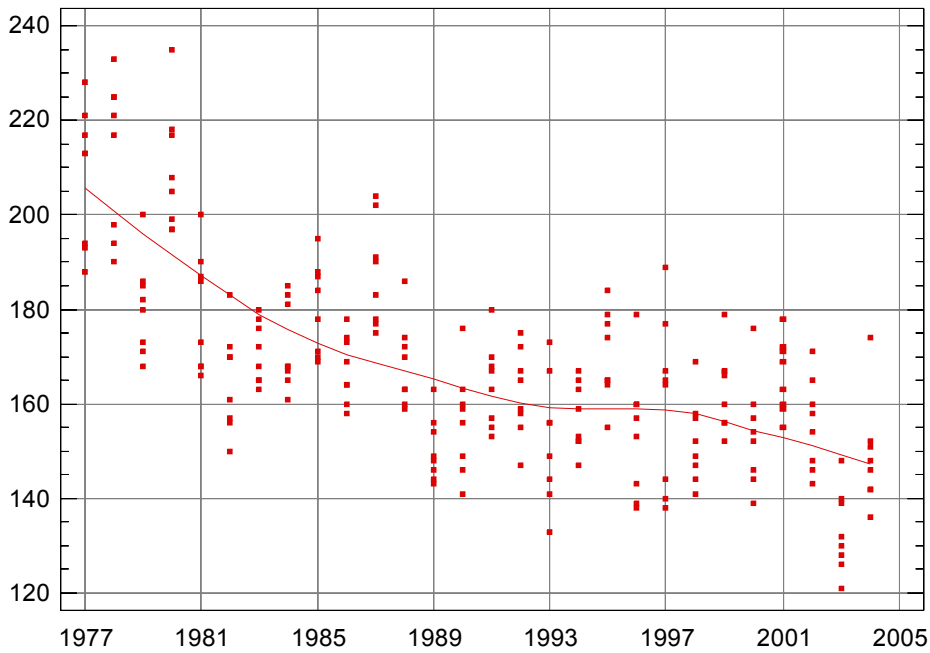


Figure 23 – Evolution du calendrier du seuil thermique 18°C sur le Rhône. Chaque année compte les dates calculées pour les 8 stations. La tendance est exprimée par lissage selon une régression locale pondérée (logiciel Statgraphics Plus).

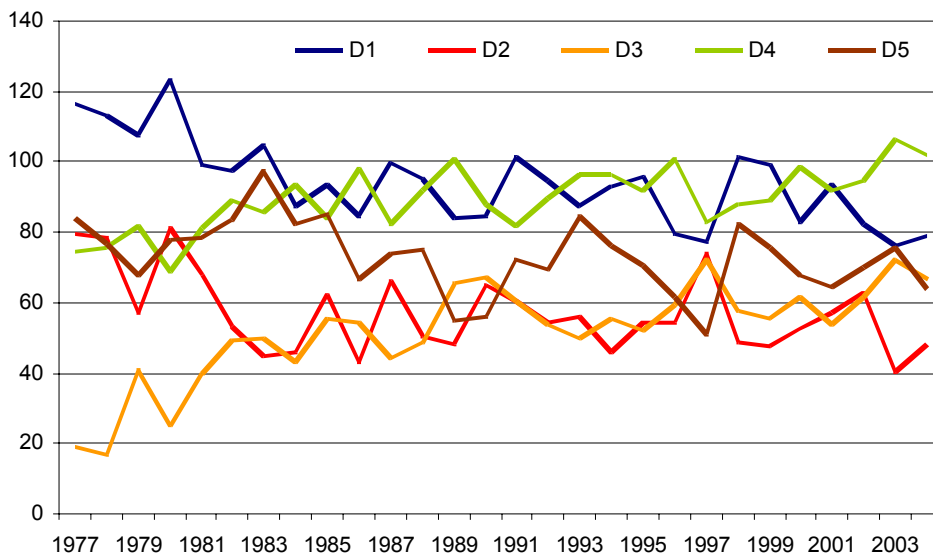


Figure 24 - Evolution moyenne sur l'axe rhodanien de la durée en jours de chaque période définie par le calendrier des seuils thermiques.

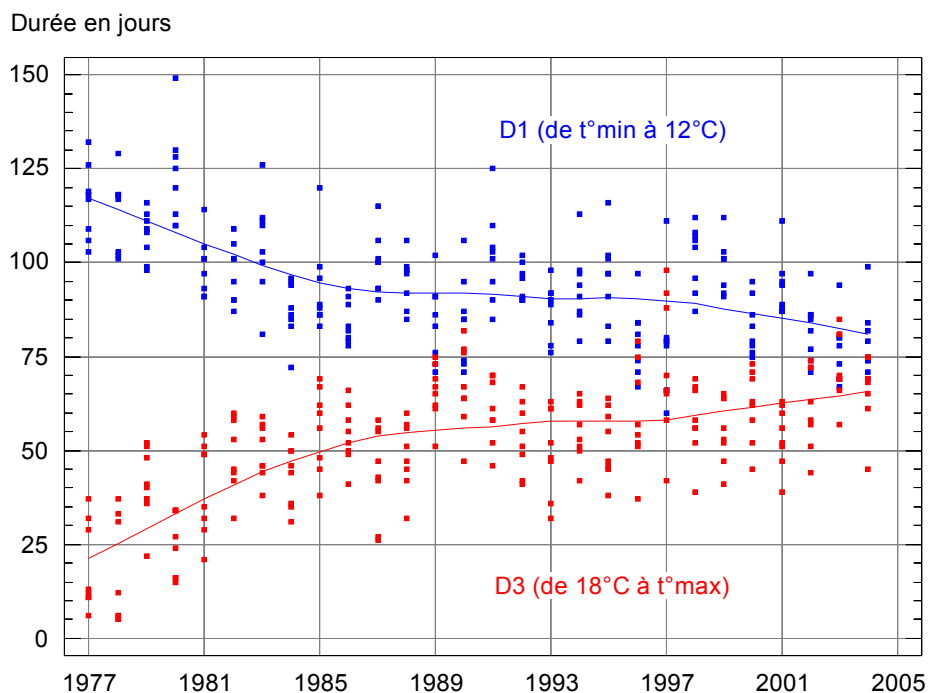


Figure 25 - Evolution de la durée des périodes D1 et D3 sur le Rhône. Chaque année compte les durées calculées pour les 8 stations. Les tendances sont exprimées par lissage selon une régression locale pondérée (logiciel Statgraphics Plus).

température

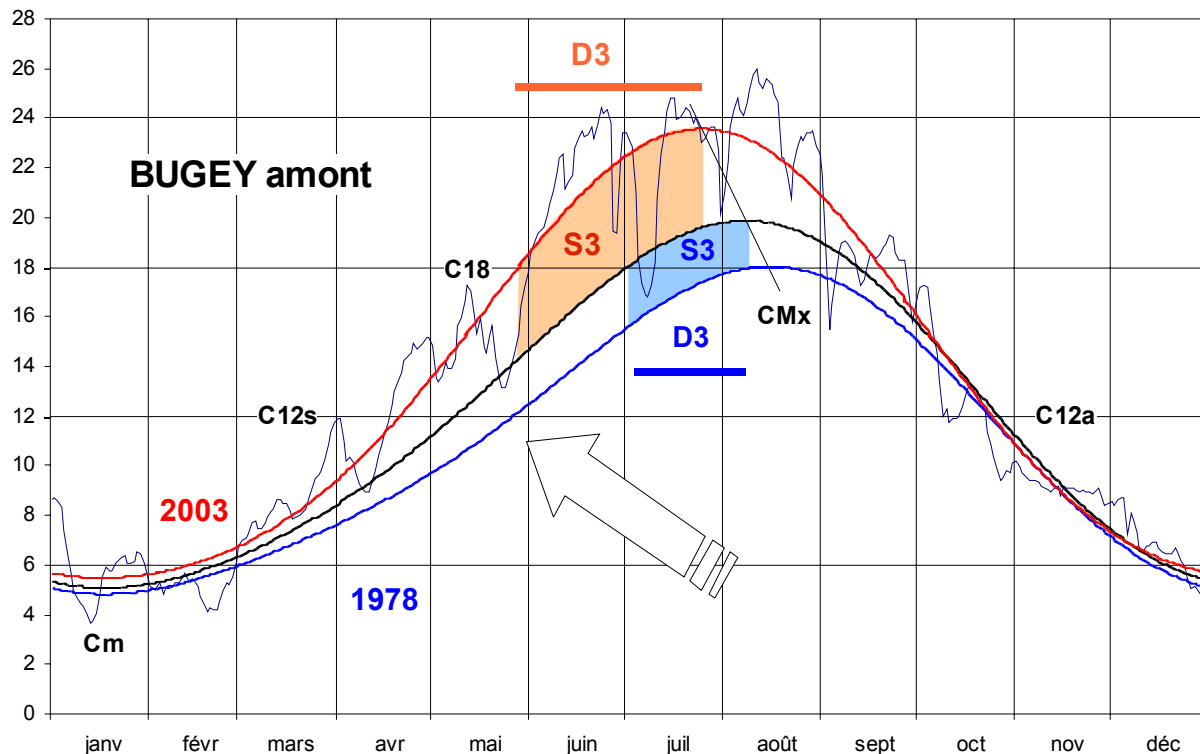


Figure 26 – Températures moyennes journalières enregistrées en amont du site de Bugey. Présentation de 3 courbes : en noir, la courbe interannuelle moyenne, en bleu, une année froide (1978) mise en opposition avec l'année la plus chaude de la chronique (2003) en rouge. La somme des écarts thermiques (S3) entre la courbe moyenne et la courbe annuelle est présentée pour la période D3 (C18 à CMx) de ces deux années. Les données utilisées pour le lissage de 2003 sont également représentées.

IV. Bibliographie

BARAS, E. & PHILIPPART, J.C. (1999): Adaptive and evolutionary significance of a reproductive thermal threshold in *Barbus barbus*. - J. Fish Biol. **55**: 354-375.

CARREL, G., OLIVIER, J.M., POIREL, A. & BREIL, P. (2003): Variabilité inter-annuelle de la reproduction des poissons Cyprinidae dans le Rhône à l'aval de Lyon : rôle de la température. - In: PONT, D. (Ed.), Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises. Rapport Final programme GICC-Aquabio, MEDD, Paris, pp. 94-108.

DESAINT, B. & POIREL, A. (2004): Etude thermique du Rhône - Phase 2 - Rapport final. - D4161/RAP/2004-00314-A. EDF - DTG - Dpt Surveillance - Branche Environnement aquatique, Grenoble, 88 p.

GRENOUILLET, G., HUGUENY, B., CARREL, G., OLIVIER, J.M. & PONT, D. (2001): Large-scale synchrony and inter-annual variability in roach recruitment in the Rhône River: the relative role of climatic factors and density-dependent processes. - Freshwat. Biol. **46**: 11-26.

KECKEIS, H., KAMLER, E., BAUER-NEMESCHKAL, E. & SCHNEEWEISS, K. (2001): Survival, development and food energy partitioning of nase larvae and early juveniles at different temperatures. - J. Fish Biol. **59**: 45-61.

LAUTERS, F. & POIREL, A. (2001a): Description statistique des longues séries de mesure de température de l'eau sur le Rhône et ses grands affluents (période 1977-1999). EDF - Département Surveillance Eau & Ouvrages - Branche Environnement, Grenoble, 28 p.

LAUTERS, F. & POIREL, A. (2001b): Description statistique des longues séries de mesure de température de l'eau sur le Rhône et ses grands affluents (période 1977-1999) - Annexes. EDF - Département Surveillance Eau & Ouvrages - Branche Environnement, Grenoble, 150 p.

POIREL, A. (2004): Etude thermique du Rhône - Phase 1 - Complément d'étude. Extension des résultats à la période 2000-2003. - D4161/RAP/2004-00135-A. EDF - DTG - Dpt Surveillance - Branche Environnement aquatique, Grenoble, 60 p.

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., Scientifiques & décideurs. Agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Lyon, France - Web: http://www.eaurmc.fr/lyon-fleuves-2001/page_html/p_somme_alelier4.html.

THIOULOUSE, J., DOLEDEC, S., CHESSEL, D. & OLIVIER, J.M. (1997): ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. - Statistics and Computing **7**: 75-83.

V. Liste des tableaux

Tableau 17 - Températures moyennes annuelles minimales et maximales enregistrées sur la période 1977-2004 et écart entre ces deux valeurs. 33

Tableau 18 – Moyennes annuelles des variables utilisées dans l'analyse multivariée du tableau général. 35

Tableau 19 – Quelques variables sur le site de Bugey Amont, calculées pour deux années extrêmes de la chronique (1978 et 2003). 39

VI. Liste des figures

Figure 15- Evolution de la température moyenne annuelle entre 1977 et 2004 sur les huit stations rhodaniennes. 33

Figure 16 – Méthode de calcul des variables thermiques à partir des courbes de températures moyennes journalières lissées par séries de Fourier. Enregistrement de la température à l'amont de Tricastin en 2003 avec superposition du lissage annuel (en rouge) et inter-annuel (en bleu). Les 5 seuils thermiques sont indiqués (minimum, 12°C printanier, 18°C, maximum et 12°C automnal). A titre d'exemple, la période D3 comprise entre les dates du seuil 18°C et du maximum et le cumul S3 des

écarts thermiques entre les deux courbes pour la période considérée ont été représentés en orangé. A ces variables s'ajoutent les coefficients de corrélation entre les valeurs brutes et les valeurs théoriques pour chaque période, soit 5 valeurs. 36

Figure 17 - Analyse en Composantes Principales Normée inter-stations. A droite, les coordonnées factorielles des variables sur les deux premiers axes. A gauche, la plan F1F2 des stations. 37

Figure 18 - Représentation statistique des seuils 12°C printaniers et automnaux pour les huit stations. 37

Figure 19 – Représentation des courbes lissées inter-annuelles des stations BUGA (bleu) et ARAA (marron). Position des différents seuils thermiques pour chaque station. Les traits horizontaux donnent les températures interannuelles moyennes des stations. 38

Figure 20 – Analyse en Composantes Principales Normée Intra-stations. Au centre, le cercle F1F2 de corrélation des variables. A gauche, la représentation fonctionnelle des coordonnées factorielles des années sur l'axe F1 (lignes supplémentaires de l'analyse). A droite, les coordonnées factorielles des années sur l'axe F2. 38

Figure 21 – Evolution moyenne sur l'axe rhodanien des écarts thermiques exprimés par une somme de degrés-jours par période (différence entre la courbe de lissage annuel de la température et la courbe de lissage inter-annuel). 40

Figure 22 – Evolution moyenne sur l'axe rhodanien du calendrier (nombre de jours comptés à partir du 1^{er} janvier) des seuils thermiques (minimum, 12°C printanier, 18°C, maximum et 12°C automnal). 40

Figure 23 – Evolution du calendrier du seuil thermique 18°C sur le Rhône. Chaque année compte les dates calculées pour les 8 stations. La tendance est exprimée par lissage selon une régression locale pondérée (logiciel Statgraphics Plus). 41

Figure 24 - Evolution moyenne sur l'axe rhodanien de la durée en jours de chaque période définie par le calendrier des seuils thermiques. 41

Figure 25 - Evolution de la durée des périodes D1 et D3 sur le Rhône. Chaque année compte les durées calculées pour les 8 stations. Les tendances sont exprimées par lissage selon une régression locale pondérée (logiciel Statgraphics Plus). 42

Figure 26 – Températures moyennes journalières enregistrées en amont du site de Bugey. Présentation de 3 courbes : en noir, la courbe interannuelle moyenne, en bleu, une année froide (1978) mise en opposition avec l'année la plus chaude de la chronique (2003) en rouge. La somme des écarts thermiques (S3) entre la courbe moyenne et la courbe annuelle est présentée pour la période D3 (C18 à CMx) de ces deux années. Les données utilisées pour le lissage de 2003 sont également représentées. 42