



ENV / LANGLAIS Sébastien

Date 03/02/2014

## Etude Thermique du Rhône - Phase IV

### Lot 5 - Relations entre hydrologie et thermie du Rhône

D4161/RAP/2012-0009-B

Indice : B.01

Pages

5 annexe(s)

1 pièce(s) jointe(s)

Entité émettrice :

Documents associés :

Rapport EDF sur l'hydrologie du Rhône : D4165/RAP/2012-0018A

Résumé :

Cette étude de la thermie du Rhône s'inscrit dans le lot 5 de l'Étude Thermique du Rhône phase 4. Cette étude comporte également des volets biologiques qui ont été traités dans les autres lots du projet.

Les températures mesurées dans le Rhône depuis les années 1970 sont replacées dans un contexte séculaire d'évolution des températures rhodaniennes, déterminées à l'aide de modèles de type Réseau de Neurones.

Les analyses caractérisent la part des différents facteurs qui influencent l'évolution des températures de l'eau le long du Rhône. Il a notamment été évalué la contribution des rejets thermiques des CNPE et celle liée à l'évolution climatique. Une évaluation de la sensibilité de la température du Rhône aux différents leviers hydrauliques (Léman, affluents) a également été réalisée.

Un résumé plus complet est présenté au début de ce document.

Intérêt documentaire : Non

Documentation de référence : Non

Accessibilité :

Restreinte



Mail

Ind.	Auteur(s)			Vérificateur(s)			Approbateur		
	Nom	Visa	Date	Nom	Visa	Date	Nom	Visa	Date
B.01	DUVERT Clément			POIREL Alain			BARBIERO Céline		
	LANGLAIS Sébastien								
	ORIOLE Eric								
	POIREL Alain								
	PERRET Christian								

Historique des modifications

Indice	Date	Paragraphes modifiés / Objet
A	29/08/2012	Version 1
B	03/02/2014	Version 2 – Intégration des remarques présentées dans les avis de l'AERMC et de la Délégation de Bassin, et dans les avis du Conseil Scientifique du Comité de Bassin RM (de Juin et Octobre 2013).

Diffusion

Destinataire(s) pour application	Nb	Destinataire(s) pour information	Nb
Membres du COPIL		FEUILLADE Gilles EDF-DTG	
DELATTRE Cécile EDF- R&D		PEROTIN Laurent EDF-DTG	
TOURON-BODILIS Aurélie EDF- R&D		CHRETIEN Vincent EDF-DPN/UNIE	
MERIGOUX-LHOPITAL Sylvie EDF-CIDEN		THEVENET Régis EDF – R&D	
BESLIN Sébastien EDF-DPN/UNIE		PERCHE Karine EDF-CIDEN	
TOURASSE Patrick EDF/Coordination Eau		BRASSEUR Anne-Lise EDF-CIDEN	
PERU Nicolas EDF-R&D/CIDEN		BEIGNON Fabrice EDF-Coordination de l'eau	
PUTAVY Claude EDF-CIDEN		GOURAUD Véronique EDF- R&D	
		OLIVIER Jean-Michel CNRS / Univ. C. Bernard de Lyon	
		CARREL Georges - IRSTEA	
		CAPRA Hervé - IRSTEA	
		FRUGET Jean-François - ARALEP	
		PESCE Stéphane - IRSTEA	
		MONTUELLE Bernard - INRA	

## SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>8</b>
<b>1. RÉSUMÉ</b> .....	<b>9</b>
1.1. MÉTHODOLOGIE .....	9
1.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS .....	9
<b>2. INTRODUCTION ET OBJET DE L'ÉTUDE</b> .....	<b>13</b>
2.1. CONTEXTE .....	13
2.2. OBJECTIFS DU LOT 5 .....	13
2.3. ZONE D'ÉTUDE ET PRINCIPALES STATIONS DE RÉFÉRENCE .....	13
<b>3. PRINCIPAUX RÉSULTATS</b> .....	<b>15</b>
3.1. RECONSTITUTION DES DONNÉES HISTORIQUES DU RHÔNE .....	15
3.1.1. Lac Léman .....	15
3.1.2. Principales caractéristiques hydrologiques du Rhône .....	16
3.1.3. Chroniques de températures de l'eau du Rhône .....	22
3.2. ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU RHÔNE ET DE SES AFFLUENTS SUR LA PÉRIODE 1920-2010 .....	23
3.2.1. Stations sur le linéaire du Rhône .....	24
3.2.2. Stations sur les affluents .....	25
3.2.3. Évolution longitudinale sur toute la période d'étude .....	26
3.2.4. Évolution longitudinale des variations inter-décennies .....	27
3.2.5. Évaluation de l'évolution des indicateurs thermiques utilisés en écologie .....	30
3.2.6. Synthèse sur les analyses de tendance .....	32
3.3. ÉVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES REJETS THERMIQUES DES CNPE A L'ÉLEVATION DES TEMPÉRATURES DU RHÔNE .....	33
3.3.1. Préambule .....	33
3.3.2. Définition des périodes temporelles étudiées .....	33
3.3.3. Effets des rejets thermiques des CNPE sur les températures du Rhône .....	33
3.3.4. Cohérence avec les résultats de l'ETRP2 .....	39
3.4. ÉVALUATION DE L'EFFET DES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES SUR LA THERMIE .....	40
3.4.1. A partir des mesures de température, sur le Haut-Rhône .....	40
3.4.2. A partir des données de simulation de température .....	42
3.4.3. Synthèse sur les effets des aménagements hydrauliques .....	44
3.5. ÉVALUATION DES EFFETS MARGINAUX SUR LES MODÈLES .....	44
3.5.1. Réponse des modèles à une modification minimale .....	44
3.5.2. Hiérarchisation des variables explicatives .....	45
3.5.3. Propagation amont-aval d'une perturbation .....	47
3.5.4. Synthèse des analyses marginalistes et de la conservation des perturbations .....	47
3.6. RELATIONS ENTRE TEMPÉRATURE DE L'EAU ET TEMPÉRATURE DE L'AIR .....	48
3.6.1. Évolution historique .....	48
3.6.2. Équilibre dynamique air-eau .....	49
3.7. ÉTUDE DE LA PROPAGATION AMONT-AVAL DU DÉBIT ET DE LA TEMPÉRATURE .....	51
3.7.1. Vitesse de transfert thermique .....	51
3.7.2. Célérité de l'onde de débit .....	52

3.7.3.	Synthèse des vitesses de transfert hydraulique et thermique.....	54
<b>3.8.</b>	<b>AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE DÉBIT ET DE TEMPÉRATURE.....</b>	<b>55</b>
3.8.1.	Amplitude journalière relative du débit.....	55
3.8.2.	Amplitude journalière de température.....	57
3.8.3.	Synthèse sur les amplitudes journalières.....	60
<b>3.9.</b>	<b>SENSIBILITÉ DES LEVIERS HYDRAULIQUES SUR LA THERMIE DU RHÔNE.....</b>	<b>61</b>
3.9.1.	Modification de la gestion hebdomadaire du Léman.....	61
3.9.2.	Fonctionnement thermique d'un tronçon court-circuité du Rhône et effets de la modification des débits réservés sur la température du Rhône.....	63
3.9.3.	Effets de la modification des débits de l'Arve.....	68
3.9.4.	Effets de la modification des débits de l'Ain.....	69
3.9.5.	Effets de la modification des débits de l'Isère.....	70
3.9.6.	Effets sur le Rhône de la modification des débits de la Durance aval.....	71
3.9.7.	Synthèse des effets directs et indirects des différents leviers hydrauliques.....	72
<b>4.</b>	<b>MÉTHODES &amp; ANALYSES.....</b>	<b>74</b>
<b>4.1.</b>	<b>RECENSEMENT &amp; COLLECTE DES DONNÉES.....</b>	<b>74</b>
4.1.1.	Température de l'eau.....	74
4.1.2.	Débit.....	75
4.1.3.	Puissance des CNPE.....	77
4.1.4.	Température de l'air.....	77
4.1.5.	Champs de pression.....	77
4.1.6.	Volumes des retenues.....	77
<b>4.2.</b>	<b>VALIDATION &amp; CRITIQUE DES SÉRIES.....</b>	<b>77</b>
<b>4.3.</b>	<b>MODÉLISATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU À L'AIDE DES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS.....</b>	<b>79</b>
4.3.1.	Grandes lignes de la modélisation de type réseau de neurones artificiels.....	79
4.3.2.	Démarche retenue.....	79
4.3.3.	Description des modèles réalisés.....	80
4.3.4.	Performances et limites d'utilisation des modèles RN.....	87
<b>4.4.</b>	<b>QU'EST-CE QU'UNE ANALYSE MARGINALISTE ?.....</b>	<b>88</b>
<b>4.5.</b>	<b>ANALYSES STATISTIQUES.....</b>	<b>88</b>
4.5.1.	Débit.....	88
4.5.2.	Gestion hebdomadaire des débits.....	88
4.5.3.	Température.....	91
<b>4.6.</b>	<b>APPORTS DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU DU XIX<sup>ÈME</sup> SIÈCLE.....</b>	<b>93</b>
4.6.1.	Origine des données disponibles.....	93
4.6.2.	Validation des données.....	93
4.6.3.	Reconstitution des données de débit.....	95
4.6.4.	Établissement des modèles de température de l'eau.....	96
4.6.5.	Résultats globaux et interprétations.....	99
<b>ANNEXES.....</b>	<b>103</b>	
<b>1.</b>	<b>ANNEXE 1 - FICHES DE SYNTHÈSE DES STATIONS DE SUIVI DES TEMPÉRATURES POUR LES 9 STATIONS ÉTUDIÉES.....</b>	<b>104</b>
<b>2.</b>	<b>ANNEXE 2 - ARBRES DE HIÉRARCHISATION CONDITIONNELLE POUR LES MODÈLES RN.....</b>	<b>105</b>
2.1.	POUGNY.....	105
2.2.	BUGEY.....	106
2.3.	SAINT-ALBAN.....	107
2.4.	TRICASTIN.....	107
2.5.	ARAMON.....	108
<b>3.</b>	<b>ANNEXE 3- RÉGIMES THERMIQUES LISSÉS ET COMPARAISONS AIR-EAU.....</b>	<b>110</b>

3.1.	POUGNY / GENEVE .....	110
3.2.	BUGEY / LYON.....	111
3.3.	SAINT-ALBAN / LYON .....	111
3.4.	TRICASTIN / MONTELIMAR .....	112
3.5.	ARAMON / NIMES.....	113
4.	<b>ANNEXE 4 - MODÈLE DE T°EAU DU RHÔNE SUR LA BASE DES DONNÉES ANCIENNES.....</b>	<b>115</b>
4.1.	Modèle de T°Eau du Rhône à Genève.....	115
4.2.	Modèle de T°Eau du Rhône à LYON.....	116
4.3.	MODÈLE DE T°EAU De la saône à Lyon .....	117
5.	<b>ANNEXE 5 – FICHES DE SYNTHÈSE DES STATIONS HYDROLOGIQUES .....</b>	<b>117</b>

### LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 - BASSIN DU RHÔNE ET LOCALISATION DES PRINCIPALES STATIONS DE MESURE DE TEMPÉRATURE DE L'EAU (À GAUCHE) ET DE DÉBIT (À DROITE) .....	14
FIGURE 2 - CARTE SCHÉMATIQUE DU LAC LÉMAN (SOURCE DREAL RA) .....	15
FIGURE 3 - HISTORIQUE DE LA COTE DU LAC LÉMAN DE 1920 À 2011.....	16
FIGURE 4 - ÉVOLUTION DE LA COTE DU LAC LÉMAN DE 1993 À 2011 SANS LES ANNÉES BISSEXTILES .....	16
FIGURE 5 - HISTORIQUE DES RÉSERVES HYDRAULIQUES EN AMONT DU LAC LÉMAN ET SUR LE LINÉAIRE DU RHÔNE FRANÇAIS.....	17
FIGURE 6 - DÉBITS MOYENS ANNUELS DE 1920 À 2011 AU DROIT DE SEPT STATIONS SUR LE LINÉAIRE DU RHÔNE .....	17
FIGURE 7 - RÉGIME HYDROLOGIQUE JOURNALIER MOYEN DU RHÔNE À PORTE DU SCEX DE 1920 À 2011 .....	18
FIGURE 8 - RÉGIME HYDROLOGIQUE JOURNALIER MOYEN DU RHÔNE À LA SORTIE DU LAC LÉMAN DE 1920 À 2011 .....	19
FIGURE 9 - RÉGIME HYDROLOGIQUE JOURNALIER MOYEN DU RHÔNE À TERNAY DE 1920 À 2011 .....	19
FIGURE 10 - TEST DE TENDANCE SUR LES DÉBITS MOYENS SAISONNIERS EN SORTIE DU LAC LÉMAN DE 1920 À 2011.....	20
FIGURE 11 - TEST DE TENDANCE SUR LES DÉBITS MOYENS SAISONNIERS EN SORTIE DU LAC LÉMAN DE 1920 À 1958 (GAUCHE) ET DE 1974 À 2011 (DROITE). .....	20
FIGURE 12 - JOUR DE LA SEMAINE OÙ SURVIENT LE MINIMUM HEBDOMADAIRE, DÉBITS EN SORTIE DU LAC LÉMAN ENTRE 1920 À 2011.....	21
FIGURE 13 - JOUR DE LA SEMAINE OÙ SURVIENT LE MINIMUM HEBDOMADAIRE - STATION DE BEAUCAIRE DE 1920 À 2011	21
FIGURE 14. SÉRIES RECONSTITUÉES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DU RHÔNE ENTRE 1920 ET 2010 (MOYENNE ANNUELLES) .....	23
FIGURE 15. SÉRIES RECONSTITUÉES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DU RHÔNE ENTRE 1920 ET 2010 (MOYENNE ANNUELLES) .....	23
FIGURE 16 - ÉVOLUTION ENTRE 1920 ET 2010 DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES EN 5 STATIONS DU RHÔNE (A), DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES ATMOSPHÉRIQUES EN 4 STATIONS DU BASSIN (B), ET DES MODULES SPÉCIFIQUES .....	24
FIGURE 17 - ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES DES AFFLUENTS DU RHÔNE ENTRE 1920 (OU 1923) ET 2010.....	25
FIGURE 18 - ÉVOLUTION LONGITUDINALE DE QUELQUES GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES POUR LA PÉRIODE 1920-2010	26
FIGURE 19 - RÉGIMES MÉDIANS DES CINQ STATIONS RHODANIENNES (A) ET DES QUATRE AFFLUENTS (B) (LISSAGE SUR LA PÉRIODE 1920-2010 OU 1923-2010 SELON LES SITES) .....	27
FIGURE 20 - ÉVOLUTION LONGITUDINALE DES VARIATIONS DÉCENNALES PAR RAPPORT À LA MÉDIANE INTERANNUELLE POUR LES STATIONS DU RHÔNE (A) ET DE SES AFFLUENTS (B) .....	28
FIGURE 21 - ÉVOLUTION DES ÉCARTS ENTRE MÉDIANES PAR DÉCENNIE (A) ET ENTRE Q99% PAR DÉCENNIE (B) POUR LES QUATRE TRONÇONS DU RHÔNE .....	29
FIGURE 22 - ÉVOLUTION INTER-DÉCENNIE DES ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ENTRE Q99% ANNUELS POUR DEUX TRONÇONS DU RHÔNE ET POUR LES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES CORRESPONDANTES. LES BOÎTES REPRÉSENTENT LES ÉCARTS INTERQUARTILES (Q25% ET Q75%) ALORS QUE LES EXTRÊMES CORRESPONDENT AUX Q10% ET Q90%. .....	30
FIGURE 23 - ÉVOLUTION DE LA SOMME DES DEGRÉ.JOURS AU DESSUS DES SEUILS 10,12 ET 16°C.....	31
FIGURE 24 - ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES ANNUELLES MOYENNES, AVEC ET SANS CNPE.....	34
FIGURE 25 - ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES LES PLUS ÉLEVÉES DE L'ANNÉE (Q95%), AVEC ET SANS CNPE.....	36
FIGURE 26. ÉVOLUTION DE LA DATE DE DÉPASSEMENT DU SEUIL DE TEMPÉRATURE DE 12°C, AVEC ET SANS CNPE .....	37
FIGURE 27 - ÉCHAUFFEMENTS RÉSIDUELS DES CNPE À SAINT-ALBAN, TRICASTIN ET ARAMON.....	39
FIGURE 28 - ENTRE VALEURS DE TEMPÉRATURE À POUUGNY ET À BUGEY POUR LES DEUX PÉRIODES IDENTIFIÉES.....	40

FIGURE 29 - COURBES DES TEMPÉRATURES CLASSÉES À POUIGNY ET DES DELTAT CUMULÉS CORRESPONDANTS SUR LE TRONÇON POUIGNY-BUGEY POUR 3 PÉRIODES DISTINCTES .....	41
FIGURE 30 - ÉCARTS CUMULÉS MOYENS ANNUELS DES 3 MODÈLES (SIMULATIONS RÉALISÉES SUR LA PÉRIODE 1920-1970) .....	42
FIGURE 31 - ÉCARTS ENTRE M ET MV À BUGEY POUR LES PÉRIODES 1920-1947 (A) ET 1948-1971 (B) .....	42
FIGURE 32 - ÉCARTS ENTRE M1 ET M1V (A) ET ENTRE M2 ET M2V (B) À SAINT-ALBAN .....	43
FIGURE 33 - ÉCARTS ENTRE M1 ET M1V (A) ET ENTRE M2 ET M2V (B) À TRICASTIN .....	43
FIGURE 34 - ILLUSTRATION DE LA SYMÉTRIE DES DTE POUR UNE VARIATION MARGINALE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ...	45
FIGURE 35 - COMPARAISON ENTRE LES DTE ISSUS DE LA SOMME DES EFFETS D'UN DTAIR ET D'UN DQ ET LES DTE ISSUS DES EFFETS CONJUGUÉS D'UN DTAIR ET D'UN DQ (EXEMPLE À SAINT-ALBAN, DTA = +0.1°C ET DQ = -10 M3/S) .....	45
FIGURE 36 - ARBRE DE HIÉRARCHISATION CONDITIONNELLE DE DTE À SAINT-ALBAN POUR UN DTE AMONT DE -0.1°C. LES BOÎTES À MOUSTACHE REPRÉSENTENT LE PROFIL DES DTE POUR CHAQUE BRANCHE DE L'ARBRE .....	46
FIGURE 37 - ARBRE DE HIÉRARCHISATION CONDITIONNELLE DE DTE À TRICASTIN POUR UN DTE AMONT DE +0.1°C .....	46
FIGURE 38 - ÉCARTS ENTRE TEMPÉRATURE DE L'EAU MOYENNE ANNUELLE ET TEMPÉRATURE DE L'AIR MOYENNE ANNUELLE POUR LES CINQ STATIONS RHODANIENNES ÉTUDIÉES .....	48
FIGURE 39 - ÉVOLUTION PAR DÉCENNIE DES MOYENNES, MÉDIANES, Q90% ET Q99% DES ÉCARTS AIR-EAU .....	49
FIGURE 40 - COMPARAISON DES RÉGIMES THERMIQUES MÉDIANS "AIR" ET "EAU" SUR LA PÉRIODE 1920-2010 POUR LE HAUT-RHÔNE (A) ET LE BAS-RHÔNE (B) .....	50
FIGURE 41 - DISTRIBUTION DES ÉCARTS ENTRE RÉGIMES LISSÉS "EAU" (ARAMON) ET RÉGIMES LISSÉS "AIR" (NÎMES) PAR DÉCENNIE .....	51
FIGURE 42 - TEMPS DE TRANSFERT DU SIGNAL THERMIQUE DEPUIS LA SORTIE DU LÉMAN ET JUSQU'À QUATRE POINTS DU RHÔNE .....	52
FIGURE 43 - EXEMPLE D'ÉPISODE DE CRUE GÉNÉRALISÉE DU 06/04/1993 AU 10/04/1993 .....	53
FIGURE 44 - SYNOPTIQUE DES TEMPS DE PROPAGATION MOYEN ENTRE LES CINQ STATIONS DE DÉBIT ÉTUDIÉES .....	54
FIGURE 45. AMPLITUDE JOURNALIÈRE RELATIVE À VIVIERS SUR TOUTE LA PÉRIODE EN FONCTION DU DÉBIT MOYEN JOURNALIER PAR SAISON. ....	55
FIGURE 46. BOITES À MOUSTACHES DES AMPLITUDES JOURNALIÈRES RELATIVES D'AMONT EN AVAL DE 1992 À 2011. ....	55
FIGURE 47. QUANTILE 50% DES AMPLITUDES JOURNALIÈRES RELATIVES D'AMONT EN AVAL EN FONCTION DU DÉBIT MOYEN JOURNALIER. ....	56
FIGURE 48. ÉVOLUTION DES AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE TEMPÉRATURE ENTRE 1991 ET 2010 SUR LES CINQ STATIONS ÉTUDIÉES .....	57
FIGURE 49. MOYENNES DES AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU DU RHÔNE .....	57
FIGURE 50. RÉGIME SAISONNIER DES AMPLITUDES THERMIQUES À POUIGNY (À GAUCHE) ET À TRICASTIN (À DROITE) .....	58
FIGURE 51. ÉVOLUTION DES TENDANCES MENSUELLES DE L'AMPLITUDE JOURNALIÈRE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU À POUIGNY (À GAUCHE) ET À TRICASTIN (À DROITE) .....	58
FIGURE 52. DISTRIBUTION DES AMPLITUDES THERMIQUES JOURNALIÈRES ET LE DÉBIT DU RHÔNE .....	59
FIGURE 53. DISTRIBUTION DES AMPLITUDES THERMIQUES JOURNALIÈRES À POUIGNY, EN FONCTION DES DÉBITS .....	59
FIGURE 54. DISTRIBUTION DES AMPLITUDES THERMIQUES JOURNALIÈRES À BUGEY (EN HAUT) ET TRICASTIN (EN BAS), EN FONCTION DES DÉBITS .....	60
FIGURE 55. ÉVOLUTION DE LA COTE DU LÉMAN EN 2011 (À GAUCHE) ET CHEVELU DES DÉBITS EN SORTIE LÉMAN .....	61
FIGURE 56 - RAPPORT ENTRE ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ET DE DÉBIT À POUIGNY SELON LES SCÉNARIOS Q85 (GAUCHE) ET Q120 (DROITE) .....	61
FIGURE 57 - RAPPORT ENTRE ÉCARTS DE TEMPÉRATURE ET DE DÉBIT À BUGEY SELON LES SCÉNARIOS Q85 (GAUCHE) ET Q120 (DROITE) .....	62
FIGURE 58. DÉBITS MENSUELS STATISTIQUES EN AMONT DU RCC SUR LA PÉRIODE [1984-2010] .....	63
FIGURE 59. ÉVOLUTION DE L'ÉCART DE TEMPÉRATURE DES EAUX ENTRE L'AMONT DU RCC ET L'AMONT DU CNPE, EN FONCTION DES DÉBITS DU RHÔNE .....	64
FIGURE 60. ÉVOLUTION DES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE AU SEIN DU RCC, EN FONCTION DES DÉBITS DU RCC .....	64
FIGURE 61. ÉVOLUTION DE L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE L'AMONT DU CNPE ET L'AVAL DU RCC, EN FONCTION DES DÉBITS DU RCC .....	65
FIGURE 62. RELATION ENTRE ÉCARTS DES TEMPÉRATURES AIR-EAU ET ÉCHAUFFEMENT AU SEIN DU RCC .....	65
FIGURE 63. RÉGIME ANNUEL DES ÉCARTS DE TEMPÉRATURES AIR-EAU, EN ENTRÉE DU RCC .....	66
FIGURE 64. TEMPÉRATURE DE L'EAU (SIMULÉE – MODÉLISÉE) À RCK POUR LES DÉBITS FAIBLES/RÉSERVÉS (QRCC<50M3/S) .....	66
FIGURE 65. TEMPÉRATURE DE L'EAU (SIMULÉE – MODÉLISÉE) À SEUIL DE PEYRAUD POUR LES DÉBITS RÉSERVÉS (QRCC<50M3/S) .....	67
FIGURE 66. EFFET GLOBAL DE L'AUGMENTATION DU DÉBIT RÉSERVÉ DU RCC DE PÉAGE SUR LA TEMPÉRATURE DE MÉLANGE DU RHÔNE, À L'AVAL ÉLOIGNÉ DE LA CONFLUENCE RCC/CANAL DE FUITE DU RHÔNE. ....	67
FIGURE 67. DÉBIT MOYEN MENSUEL [1976-2010] DE L'ARVE À ARTHAZ : LE DÉBIT RÉEL ET NON INFLUENCÉ (AXE DE GAUCHE) ET LA VALEUR DE L'INFLUENCE (AXE DE DROITE) .....	68

FIGURE 68. INCIDENCE D'UNE AUGMENTATION UNIFORME ET UNITAIRE (1 M3/S) DES DÉBITS DE L'ARVE SUR LA TEMPÉRATURE DE L'EAU DU RHÔNE À POUIGNY (LES INCIDENCES POSITIVES INDIQUENT UN REFOUILLISSEMENT DES EAUX DU RHÔNE).....	69
FIGURE 69 – RÉGIMES THERMIQUES MÉDIANS À VOUGLANS, ALLEMENT ET PONT DE CHAZEY [1933-2008].....	69
FIGURE 70 - INCIDENCE D'UNE AUGMENTATION UNIFORME ET UNITAIRE (1 M3/S) DES DÉBITS DE L'ARVE SUR LA TEMPÉRATURE DE L'EAU DU RHÔNE À POUIGNY (LES INCIDENCES POSITIVES INDIQUENT UN REFOUILLISSEMENT DES EAUX DU RHÔNE).....	70
FIGURE 71. DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LE RHÔNE À ARAMON ET LA DURANCE À CHEVAL BLANC (LES VALEURS NÉGATIVES DE L'ÉCART INDIQUENT QUE LA DURANCE EST PLUS FROIDE QUE LE RHÔNE).....	71
FIGURE 72. ÉVALUATION DES EFFETS THERMIQUES DE DIFFÉRENTS DÉBITS DE LA DURANCE SUR LE RHÔNE.....	71
FIGURE 73 - SYNTHÈSE DES EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS DES DIFFÉRENTS LEVIERS HYDRAULIQUES SUR LA TEMPÉRATURE ESTIVALE DU RHÔNE.....	73
FIGURE 74 - HISTORIQUE D'AMÉNAGEMENT DU FLEUVE PAR TRONÇON ET SÉRIES DE VOLUMES CUMULÉS.....	77
FIGURE 75 - SCHÉMA GÉNÉRAL DU PROCESSUS DE VALIDATION DES SÉRIES DE MESURE.....	78
FIGURE 76 - EXEMPLE DE TRAITEMENT D'UNE LACUNE À SOYONS PAR RÉGRESSION MULTIPLE.....	78
FIGURE 77 - REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DE LA PROCÉDURE SUIVIE POUR LA RECONSTITUTION DES SÉRIES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU EN CAS DE CONTRAINTES EN ENTRÉE.....	80
FIGURE 78 - RÉSULTATS DE CALAGE/TEST EN ÉTÉ À POUIGNY (EXEMPLE DE L'ANNÉE 1984). LES ELLIPSES GRISSES POINTENT LES ÉPISODES DE GOUTTE FROIDE MAL RETRANSCRITS PAR LE MODÈLE.....	81
FIGURE 79 - DISTRIBUTION FRÉQUENTIELLE (A) ET TEMPORELLE (B) DES ÉCARTS ENTRE LA TEMPÉRATURE À POUIGNY MODÉLISÉE (M1) ET LA TEMPÉRATURE À CHANCY MESURÉE ENTRE 1970 ET 1974. LES BOÎTES À MOUSTACHE CORRESPONDENT À Q10, Q25, Q50, Q75 ET Q90.....	82
FIGURE 80 - VARIATIONS DE TEMPÉRATURE À BUGEY PENDANT LA VIDANGE DE GÉNISSAT DE JUIN 1978.....	83
FIGURE 81 - COMPARAISON ENTRE LES TEMPÉRATURES MESURÉE ET MODÉLISÉE À BUGEY ENTRE 1969 ET 1971.....	83
FIGURE 82 - DISTRIBUTION FRÉQUENTIELLE (A) ET TEMPORELLE (B) DES ÉCARTS ENTRE LA TEMPÉRATURE MODÉLISÉE À SAINT-ALBAN (M1) ET LA TEMPÉRATURE MESURÉE À SERRIÈRES ENTRE 1969 ET 1976. LES BOÎTES À MOUSTACHE CORRESPONDENT AUX QUANTILES 10, 25, 50 (MÉDIANE), 75 ET 90.....	85
FIGURE 83 - VALIDATION DES DONNÉES DE DÉBIT DE L'ISÈRE À BEAUMONT-MONTEUX. EXEMPLE DES ANNÉES 1960 ET 1961.....	85
FIGURE 84 - ILLUSTRATION DE LA DISPERSION PLUS ÉLEVÉE SUR LES CINQ PREMIÈRES ANNÉES DE CALAGE/VALIDATION.....	86
FIGURE 85 - DISTRIBUTION FRÉQUENTIELLE (A) ET TEMPORELLE (B) DES ÉCARTS ENTRE LA TEMPÉRATURE MODÉLISÉE À ARAMON ET LA TEMPÉRATURE MESURÉE À ARLES ENTRE 1969 ET 1971. LES BOÎTES À MOUSTACHE CORRESPONDENT AUX Q10, 25, 50, 75 ET 90.....	87
FIGURE 86 - TEST D'AUTO-CORRÉLATION DES DÉBITS AVANT ET APRÈS AMÉNAGEMENTS - PORTE DU SCEX (À GAUCHE) ET SORTIE LÉMAN (À DROITE).....	89
FIGURE 87 - TEST D'AUTO-CORRÉLATION DES DÉBITS AVANT ET APRÈS AMÉNAGEMENTS : À LAGNIEU (À GAUCHE) ET À BEUCAIRE (À DROITE).....	89
FIGURE 88 - JOUR DE LA SEMAINE OÙ SURVIENT LE MINIMUM HEBDOMADAIRE, DÉBITS EN SORTIE DU LAC LÉMAN ENTRE 1920 À 2011.....	90
FIGURE 89 - JOUR DE LA SEMAINE OÙ SURVIENT LE MINIMUM HEBDOMADAIRE - STATION DE BEUCAIRE DE 1990 À 2011.....	91
FIGURE 90 - AJUSTEMENT DE LOIS DE PROBABILITÉ SUR LES VALEURS EMPIRIQUES DE TMXA À POUIGNY.....	92
FIGURE 91 - LISSAGE DU RÉGIME THERMIQUE 1920-1929 PAR SÉRIES DE FOURIER (STATION DU TRICASTIN).....	92
FIGURE 92. RÉPARTITION ANNUELLE DES DIFFÉRENCES ENTRE LA T°AIR À GENÈVE ET À LYON.....	93
FIGURE 93. T°AIR À GENÈVE ET DES T°EAU À GENÈVE ET LYON (SAÔNE ET RHÔNE).....	94
FIGURE 94. COMPARAISON ENTRE LES 2 SÉRIES DE MESURES DE T°EAU DU RHÔNE À LYON EN AVRIL 1870.....	94
FIGURE 95 - EXEMPLE DU TABLEAU ANALOGUE DES MOIS DE L'ANNÉE 1870 (À GAUCHE) ET PES PSEUDO-COURBES DE TARAGE ÉTABLIES (À DROITE).....	95
FIGURE 96. SÉRIES DE DÉBITS RECONSTITUÉES SUR LA PÉRIODE 1870-1877 À LYON ET GENÈVE.....	96
FIGURE 97. COMPARAISON POUR QUELQUES ANNÉES DU MODÈLE ET DE LA MESURE DE T°EAU À GENÈVE ET ÉCARTS ASSOCIÉS.....	97
FIGURE 98 - COMPARAISON POUR QUELQUES ANNÉES DU MODÈLE ET DE LA MESURE DE T°EAU DU RHÔNE À LYON ET ÉCARTS ASSOCIÉS.....	98
FIGURE 99. COMPARAISON POUR QUELQUES ANNÉES DU MODÈLE ET DE LA MESURE DE T°EAU DE LA SAÔNE À LYON ET ÉCARTS ASSOCIÉS.....	99
FIGURE 100. MOYENNES PAR DÉCENNIES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU ET DE L'AIR À GENÈVE ET POUIGNY (ISSUES SOIT DES MESURES SOIT DES MODÈLES).....	100
FIGURE 101 - COMPARAISON DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DU RHÔNE ET DE LA SAÔNE EN MOYENNE ANNUELLE ET EN QUANTILE 90% SUR LES DONNÉES MESURÉES (1870-1877 ET 1974-2010) ET SUR LES MODÈLES CALÉS UNIQUEMENT SUR LES DONNÉES ANCIENNES (1870-1877).....	101

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DÉTAILS DU BASSIN VERSANT DU RHÔNE À L'EXUTOIRE DU LAC LÉMAN .....	15
TABLEAU 2. SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES ANNUELLES MOYENNES ET « CHAUDES » (Q95%) AVEC ET SANS CNPE, ET ÉVALUATION DE LA PART CONTRIBUTIVE DES CNPE AU RÉCHAUFFEMENT GLOBAL DU RHÔNE .....	35
TABLEAU 3. ÉCHAUFFEMENT RELATIF DE L'EAU ET SA PROPAGATION AMONT-AVAL EN CONSIDÉRANT UNE HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR DE 1°C .....	47
TABLEAU 4. BAISSSES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU À L'AVAL ISSUES D'UNE BAISSSE DES TEMPÉRATURES DE L'EAU À LA STATION AMONT DE 0.1°C.....	47
TABLEAU 5. NOMBRE D'ÉPISODES DE DÉBIT SÉLECTIONNÉS PAR TRONÇON (STATION AMONT – AVAL) .....	52
TABLEAU 6. DÉBIT D'ÉQUIPEMENT DES USINES EN AMONT DE CHAQUE STATION ÉTUDIÉE .....	53
TABLEAU 7. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LES TEMPS DE PROPAGATIONS DES HAUTS DÉBITS DU RHÔNE .....	54
TABLEAU 8. BILAN DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU DISPONIBLES .....	75
TABLEAU 9. DONNÉES DE DÉBIT COLLECTÉES SUR LE RHÔNE ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.....	76
TABLEAU 10. DONNÉES DE DÉBIT COLLECTÉES SUR LE RHÔNE AU PAS DE TEMPS HORAIRE. ....	76
TABLEAU 11. RÉCAPITULATIF DES VARIABLES UTILISÉES POUR LE CALAGE DES RN .....	81

## LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Fiches de synthèse des stations de suivi des températures pour les 9 stations étudiées
- Annexe 2 : Arbres de hiérarchisation conditionnelle pour les modèles RN
- Annexe 3 : Régimes thermiques lissés et comparaisons air-eau
- Annexe 4 - Modèle de T°Eau du Rhône sur la base des données anciennes
- Annexe 5 – Fiches de synthèse des stations hydrologiques

Nota : le texte fait plusieurs fois des emprunts à un rapport EDF complémentaire traitant de l'hydrologie du Rhône dont voici la référence D4165/RAP/2012-0018A

## 1. RÉSUMÉ

### 1.1. MÉTHODOLOGIE

#### ***Des mesures pour caler des modèles***

Depuis *au moins* 1977, EDF dispose, sur le bassin du Rhône, d'un réseau de mesures de la température de l'eau, de grande qualité. Un premier travail a donc consisté à analyser et critiquer ces données (jusqu'en 2010) en les complétant par d'autres sources d'informations comme celles du SNRS ou de l'OFEV (Suisse). L'absence et/ou la qualité variable des mesures antérieures aux années 1970 de température de l'eau du Rhône, ont nécessité de reconstituer ces séries, au pas de temps journalier, par calcul.

#### ***Les modèles de type Réseau de Neurones***

Des modèles numériques de type « Réseaux de Neurones Artificiels » (RN) ont été construits au niveau de stations d'intérêt du Rhône et de ses principaux affluents afin de disposer d'une vision représentative de l'évolution longitudinale et temporelle de la température du Rhône. Le principe de ces modélisations statistiques consiste à « apprendre » aux modèles les relations entre la température de l'eau et certains paramètres explicatifs pertinents - par rapport au fonctionnement physique du système, comme les rejets thermiques des CNPE, les paramètres hydro-climatiques, les caractéristiques des aménagements hydrauliques, .... Les séries mesurées sont exploitées pour réaliser cet apprentissage ainsi que pour tester et valider le modèle ainsi construit.

Un modèle a été élaboré pour chaque station où l'on souhaitait reconstituer les chroniques ; le modèle amont « alimentant » le modèle aval en données de température de l'eau. Il a donc été réalisé des modèles en cascade. Pour le modèle amont initial (Pougny), la température de l'eau a été reconstituée indirectement en reproduisant les « gouttes froides » sur la base des variations du champ de pressions. Ces modèles, calés et testés sur la période de mesures, constituent ainsi un outil validé pour mener à bien différentes analyses, destinées notamment à :

- mieux comprendre le fonctionnement thermique du Rhône sur la période passée,
- tester, de façon prospective, la sensibilité et la pertinence des différents leviers hydrauliques possibles pour « maîtriser » les températures du Rhône.

#### ***Précisions et limites d'interprétation des simulations***

Les modèles RN peuvent être considérés comme performants, par rapports aux objectifs de l'étude, depuis la fin des années 1970, avec des erreurs moyennes comprises entre 0.5 et 1.0°C suivant les stations. On rappellera que la précision des mesures de températures sur cette même période est estimée à 0.3°C. Sur la période ancienne, entre 1920 et le début des années 1970, les erreurs sur les températures modélisées sont plus élevées sans qu'il soit possible de les caractériser. Dans les résultats présentés ci-après, il importe donc de rester prudent sur l'interprétation de faibles variations (< 0.5°C) excepté pour les analyses marginalistes (dans lesquelles on teste l'influence d'une faible modification d'un des paramètres explicatifs, tous les autres étant inchangés par ailleurs).

### 1.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

#### ***Constitution de données patrimoniales, à l'échelle séculaire***

Les chroniques de températures ont été reconstituées en 5 points du Rhône (Pougny, amont CNPE Bugey, amont CNPE Saint-Alban, amont CNPE Tricastin, amont CNPE Aramon) et sur 4 stations des principaux affluents du fleuve (Arve, Ain, Saône, Isère), à partir notamment d'anciennes données climatologiques et hydrologiques.

Ces données, au pas de temps journalier, concernent la période [1920-2010] et permettent aujourd'hui de disposer de données patrimoniales de température de l'eau sur l'ensemble du profil longitudinal du Rhône français.

### ***Des températures du Rhône qui augmentent...***

À l'exception de l'Arve, toutes les séries de températures analysées (mesurées à partir des années 1970 et reconstituées par modélisation avant cette période) témoignent d'une hausse des températures moyennes annuelles sur la période [1920-2010] de 0.4°C à Pougny à 2.1°C à Tricastin, avec un maximum sur le Bas-Rhône et sur la Saône (2.0°C). Cette augmentation est nettement plus importante à l'échelle des mois d'été qu'à l'échelle annuelle, avec un maximum de 3.5°C en août à Aramon (et 3.0°C en août sur la Saône).

La forte variabilité interannuelle des températures annuelles se traduit par des alternances de périodes chaudes et de période froides ; la décennie [1940-1949] a été comparable en température de l'eau aux 2 dernières décennies [1990-2010].

L'année 1987, identifiée dans la littérature comme date de rupture dans les séries de températures de l'air en France, correspond également à une période charnière dans les températures du Rhône. Avant 1987, aucune tendance évolutive ne peut être mise en évidence, alors que depuis cette date, les températures de l'eau sont nettement plus élevées. **L'évolution séculaire** (sur la période [1920-2010]) de la température de l'eau **n'a donc pas été linéaire mais portée quasi-intégralement par la hausse des températures sur la période [1987-2010]**.

Cette hausse des températures se traduit également par une évolution des indicateurs utilisés en écologie comme le cumul des degrés.jours (> 12°C), qui ont pu augmenter sensiblement ces 30 dernières années, principalement sur le Rhône aval (e.g. + 30 % à Aramon). Il peut également être observé une relative précocité de dépassement des seuils de températures étudiés.

### ***La contribution des rejets thermiques des CNPE à l'évolution des températures du Rhône***

L'examen des différences entre les simulations, avec et sans CNPE, sur la période [1987-2010] (*i.e.* post-rupture climatique et avec des rejets thermiques des CNPE « stationnaires ») met en évidence, un échauffement résiduel du Rhône lié aux rejets des CNPE, en moyennes annuelles, de 0.5°C à Saint-Alban, 0.6°C à Tricastin et 1.2°C à Aramon. Cette moyenne cache une grande diversité de situations qui n'ont pas la même incidence sur l'écologie rhodanienne ; c'est pourquoi les températures « chaudes » (q95%, représentant les 18 jours les plus chauds de chaque année) ont également été étudiées plus spécifiquement.

Les rejets des CNPE participent à l'augmentation des températures « chaudes », à hauteur de 0.7°C à Saint-Alban, 0.8°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon. Par ailleurs, les rejets thermiques des CNPE sont à l'origine d'une précocité des cycles annuels de température (date de dépassement du seuil à 12°C) de 3 jours pour Saint-Alban à 8 jours pour Aramon ; la variabilité interannuelle « naturelle » étant d'environ 1 mois.

La part contributive des rejets thermiques des CNPE à l'élévation des températures du Rhône dépend étroitement du choix de la période de référence ancienne pour la comparaison des températures récentes [1988-2010]. Avec comme référence la période « pré-CNPE » [1920-1977], sans rejets thermiques significatifs et antérieure à l'année climatique charnière de 1987, la contribution des rejets thermiques CNPE peut être évaluée à 44% de l'augmentation séculaire des températures « chaudes » à Saint-Alban, 38% à Tricastin et 61% à Aramon. Avec comme référence la période [1977-1987], correspondant au début des mesures (utilisées dans l'étude ETRP2), ces chiffres baissent respectivement à 30, 31 et 45%.

## ***Le rôle de l'hydrologie sur la thermie et l'effet des aménagements hydrauliques sur les températures***

Les analyses hydrologiques montrent que les apports en eau annuels du bassin versant du Rhône n'ont pas évolué depuis les années 1920. Par contre, à l'échelle saisonnière, on note des évolutions importantes des débits du Rhône en sortie Léman, avec une augmentation des débits en hiver (+ 30%) et une diminution des débits estivaux (- 30%), avant et après une période charnière située autour des années 1960. Ces effets sur le régime hydrologique du Rhône sont visibles jusqu'à Beaucaire mais sont d'autant moins marqués que l'on s'éloigne du Lac Léman. Ces modifications des régimes hydrologiques du Rhône sont concomitantes à la période d'intense aménagement hydraulique du Rhône, entre les années 1950 et les années 1970. A l'échelle hebdomadaire, les chroniques montrent une gestion hydraulique plus dynamique du Lac Léman depuis les années 1990, marquée par des débits nettement plus faibles le week-end que le reste de la semaine.

L'analyse statistique des longues séries de débit a permis également de préciser le fonctionnement thermique du fleuve au regard de son hydrologie et de sa gestion associée. Le transfert de débit (célérité) s'effectue en une journée environ entre le Léman et le delta alors que le transfert thermique (de masse) est beaucoup plus lent et très dépendant du débit : entre 5 jours (en crue) et 15 jours (à l'étiage). Par ailleurs, les amplitudes journalières de la température du Rhône sont en moyenne de 0.3°C avec une variabilité longitudinale et saisonnière de 0.2°C. Les écarts de température air-eau expliquent la majeure partie de ces amplitudes. Sur le Haut-Rhône, les «gouttes froides» viennent amplifier ce signal saisonnier ; ce phénomène se rencontre plus fréquemment en été et de façon plus intense. L'amplitude journalière de la température est relativement bien corrélée avec les débits du fleuve : les amplitudes maximum sont mesurées en période d'étiage et les *minima* en hautes eaux (excepté à Pougny).

A l'échelle du Rhône français et sur la période [1920-2010], l'ensemble des aménagements hydrauliques ont un effet sur le régime thermique du fleuve, qui ne dépasse qu'exceptionnellement 0,5°C. Les retenues jouent un rôle tampon (lissage) caractérisé par une baisse de la variabilité des températures et par un réchauffement des températures hivernales qui peut atteindre 0.4°C en médiane mensuelle. En été, l'incidence des retenues sur la température du Rhône est différente suivant les stations ; l'effet de refroidissement étant le plus marqué, à Saint-Alban avec une incidence de 0.6°C (médiane des mois d'été). Par ailleurs, l'analyse des quelques chroniques très anciennes de températures (années 1870) disponibles montre que les processus d'échange entre l'air et l'eau ont été modifiés par des effets anthropiques multiples parfois antagonistes. A Lyon, la variabilité intra-annuelle des températures du Rhône a été nettement réduite par l'augmentation de l'inertie du fleuve. L'anthropisation du fleuve (changement de section, diminution des frottements, ...) a contribué à conserver la température moyenne du fleuve et à refroidir les températures élevées. Ainsi, la température du Rhône, dans sa configuration des années 1870 (*i.e.* sans aménagement hydraulique notoire), aurait été environ 1°C plus chaud avec les conditions hydro-climatiques rencontrées lors de la canicule de 2003.

### ***Des leviers hydrauliques pour limiter les températures élevées du Rhône ?***

L'augmentation du débit du Rhône en sortie du Léman ou par l'intermédiaire des principaux affluents a un double effet sur la température de l'eau du Rhône à l'aval :

- Un effet « direct », ressenti dès l'amont des principaux rejets thermiques localisés (CNPE, ..), qui conduit notamment à diminuer la température de l'eau par apport complémentaire d'eau plus froide que le Rhône,
- Un effet « indirect », visible à l'aval des rejets thermiques, qui limite l'augmentation de la température après mélange par augmentation du potentiel de dilution du rejet dans un débit plus important du Rhône.

Pour évaluer l'effet « direct », différents leviers hydrauliques potentiels ont été testés. Les modèles de type RN développés pour reconstituer ces longues séries ont également servi d'outil de prédiction en simulant les effets marginaux de modification du débit. Afin que les sensibilités des différents leviers hydrauliques soient comparables, les effets ont été caractérisés pour un incrément de débit unitaire (1 m<sup>3</sup>/s) qui ne présage en rien de ce que pourrait être le débit réellement disponible. La définition de ces débits fait appel à des considérations techniques (e.g. hydrologiques) mais également à des aspects socio-économiques, et dépasse donc le cadre de cette étude.

Les effets « directs » des différents leviers hydrauliques (gestion du Léman et des affluents) sur le Rhône (à l'aval immédiat de la zone de mélange avec le Rhône si ce n'est pas précisé) en période estivale sont les suivants :

- Léman : baisse de 0.002°C à Pougny par m<sup>3</sup>/s supplémentaire,
- Arve : baisse de 0.015°C à Pougny par m<sup>3</sup>/s supplémentaire,
- Ain : baisse de 0.002°C par m<sup>3</sup>/s supplémentaire,
- Isère : baisse de 0.0025°C à Tricastin par m<sup>3</sup>/s supplémentaire,
- Durance : baisse de 0.002°C à Aramon par m<sup>3</sup>/s supplémentaire.

L'Arve est le levier le plus sensible pour faire baisser la température de l'eau du Rhône. A Bugey, une augmentation temporaire des débits de l'Arve (sur la base d'une suppression temporaire des dérivations d'eau vers l'extérieur du bassin) permettrait de baisser les températures de l'eau à Bugey d'environ 0.3°C alors qu'une gestion optimisée (en respectant le Règlement d'eau actuel) du Léman permettrait de faire baisser d'environ 0.1°C la température du Rhône à Bugey. L'Ain, l'Isère et la Durance sont des leviers moins efficaces pour diminuer la température de l'eau du Rhône, et pour la Durance l'effet ne concerne que l'extrême cours aval du fleuve.

L'évaluation des effets « indirects » ou « induits », par augmentation du débit de dilution à l'aval des rejets thermiques montre que ces effets sont du même ordre de grandeur que les effets « directs » sauf pour le Léman où il serait 4 fois plus important.

Les leviers hydrauliques étudiés ont un effet maximum à l'aval immédiat de la zone de mélange. Vers l'aval, le gain va se dissiper et s'amortir. En moyenne deux tiers des variations de température de l'eau de la station amont étudiée se conserve à la station immédiatement à l'aval, sur les tronçons entre Pougny->Bugey et Bugey-> Saint-Alban. Au global, entre Pougny et Aramon, 18% d'une baisse éventuelle à Pougny se conserverait à Aramon.

En conclusion, le débit influence la température de l'eau en modifiant notamment le temps de transfert des masses d'eau d'amont en aval. À haut débit, le transfert rapide de l'eau limite le temps d'échange entre les masses d'air et les masses d'eau et dilue les rejets des CNPE. Les analyses de sensibilité (ou marginalistes) conduites sur les relations entre débits et température de l'eau du Rhône et de ses affluents froids quantifient la force des leviers utilisables : schématiquement, les incidences (somme des effets directs et indirects) sur les conditions thermiques sont comprises entre 0.005 (Isère) et 0,025°C (Arve) par m<sup>3</sup>/s supplémentaire (différents suivant les affluents). En situation « chaude », seule l'activation synchrone de plusieurs leviers à des niveaux importants (plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/s supplémentaires chacun) permettrait d'arriver à un effet thermique de l'ordre du degré Celsius.

## 2. INTRODUCTION ET OBJET DE L'ÉTUDE

### 2.1. CONTEXTE

En 1999, l'Étude Thermique du Rhône, pilotée par la DRIRE Rhône-Alpes, a été lancée pour répondre à la question des impacts cumulés des rejets thermiques des CNPE sur le Rhône en intégrant le changement climatique. Ces questions se sont posées de manière forte avec les renouvellements des Arrêtés de Prises et Rejets des CNPE du Rhône – notamment ceux en circuit ouvert – et celui du CPT d'Aramon, à l'amont de Beaucaire.

Cette étude a tout d'abord été découpée en 3 phases :

- Phase 1 : descriptive des états thermiques du Rhône à partir des longues séries de données réactualisées jusqu'en 2003.
- Phase 2 : explicative des températures observées à partir des informations précédentes et des facteurs explicatifs (débits, températures de l'air, rejets des CNPE...). Cette phase a permis de préciser notamment la part résiduelle d'échauffement lié à un CNPE observé aux différents points de mesure en aval de ce CNPE et donc de quantifier cette notion d'impacts conjugués des rejets des différents CNPE.
- Phase 3 : explicative des conséquences de ces échauffements sur les écosystèmes.
- Dans la conclusion de cette Étude Thermique Globale du Rhône, outre la réponse à un certain nombre de questions, quelques pistes de réflexion sont ouvertes pour mieux appréhender les relations de la biologie aquatique avec deux facteurs écologiques fondamentaux : le débit (composante hydraulique et hydrologique) et la thermie (composante moyenne journalière). L'étude a également mis en évidence l'impossibilité d'analyser ces deux facteurs indépendamment l'un de l'autre.

L'Étude Rhône Phase 4 s'inscrit dans le sens de l'avis du 25 juillet 2007 du Conseil Scientifique du Comité de Bassin Rhône-Méditerranée rendu sur « la demande d'EDF de relèvement de la température de l'eau à l'aval du canal de rejet du CNPE de Tricastin » qui concluait que « (...) des études [étaient] à lancer sur plusieurs sujets [notamment] l'incidence de la température et des rejets thermiques sur le comportement et l'écophysiologie des communautés aquatiques du fleuve (...) ».

Elle s'inscrit aussi dans le prolongement et en cohérence avec le Programme national de recherche en Thermie et Hydrobiologie lancé en commun par EDF et l'IRSTEA (ex-Cemagref) à la demande de l'Administration (MEEDDAT, ASN) pour répondre aux questions qui se posent sur l'impact des rejets thermiques des centrales électriques sur l'état écologique des rivières en période de canicule. Ce programme national de recherches a été lancé en 2008 sur 5 ans (2008-2012). Il fait l'objet d'un encadrement par le Conseil Scientifique de l'ONEMA et d'un suivi par le Conseil National de l'Eau (CNE).

Le lot 5 est le lot de la phase 4 de l'Étude Thermique Rhône qui traite spécifiquement des aspects physiques en lien avec les débits et les températures.

### 2.2. OBJECTIFS DU LOT 5

Les phases précédentes de l'Étude Thermique Rhône, qui a débuté en 1999, avaient notamment permis de caractériser la thermie du fleuve Rhône sur les 4 dernières décennies, à partir des séries de mesure. La phase 4 de l'Étude Thermique Rhône (ETRP4) doit permettre de préciser certaines tendances mises en évidence dans les phases précédentes.

Dans un premier temps, les analyses menées dans le cadre de ce lot 5 ont pour objectif de reconstituer par modélisation des longues séries de température [1920-2010] afin de déterminer quelle a été l'évolution des températures du Rhône au cours du dernier siècle, et ainsi replacer l'évolution récente des températures dans une perspective à plus grande échelle de temps.

Par ailleurs, la phase 3 de l'Étude Thermique Rhône avait mis en évidence un lien marqué entre l'hydrologie du fleuve et sa thermie. Le second objectif est donc de préciser les relations entre le débit et la température du fleuve, au regard des autres paramètres influençant la thermie du Rhône.

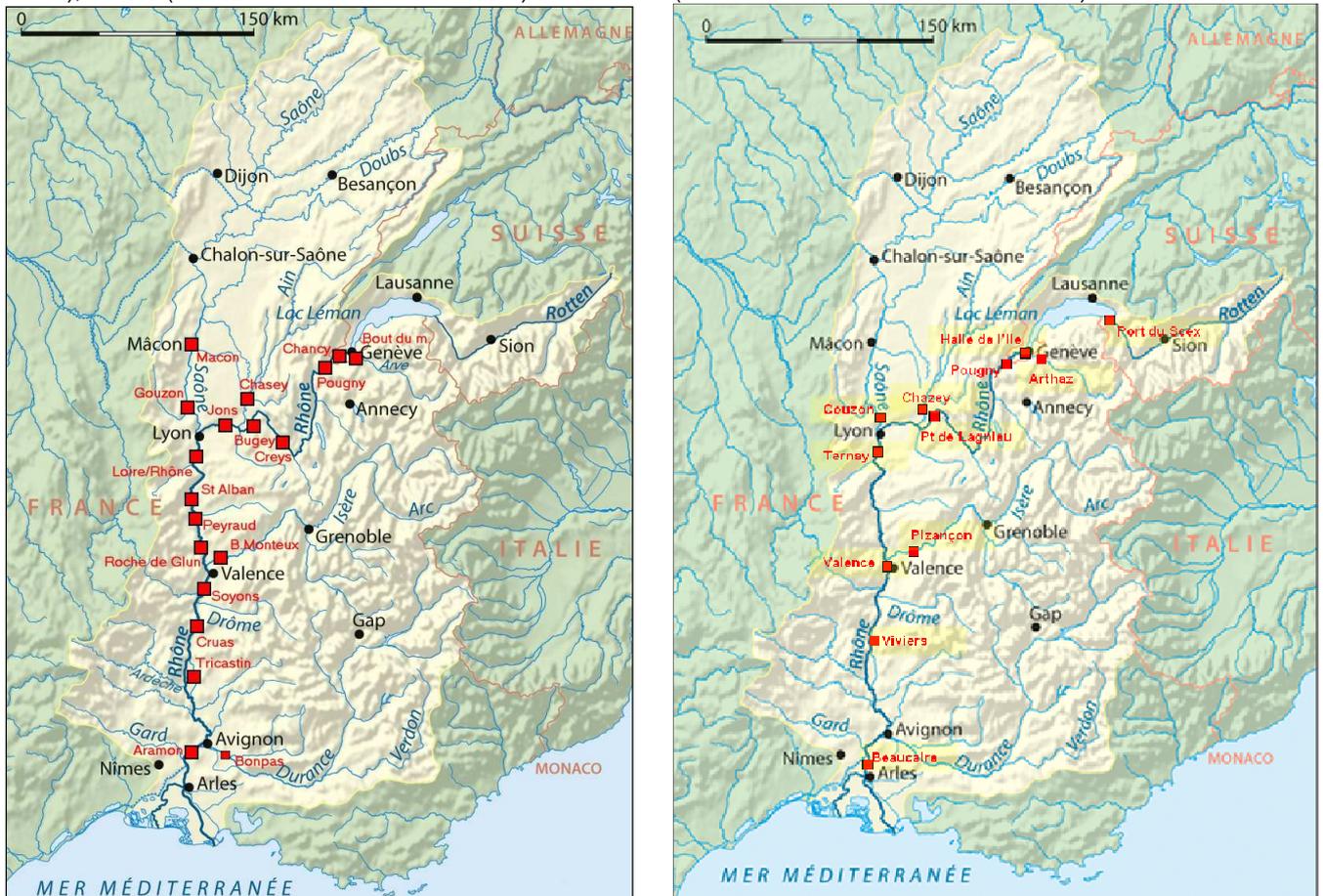
Dans le cadre d'une recherche prospective de nouvelles pistes de gestion « thermique » de la ressource en eau à l'échelle du bassin, cette étude avait enfin pour but de définir la sensibilité thermique des différents leviers hydrauliques envisageables pour limiter l'incidence des événements caniculaires sur la température de l'eau du Rhône.

### 2.3. ZONE D'ÉTUDE ET PRINCIPALES STATIONS DE RÉFÉRENCE

Le périmètre d'étude du lot 5 correspond principalement au bassin versant du Rhône français, depuis l'aval du lac Léman jusqu'à la Méditerranée. De plus, pour des raisons de continuité hydraulique, le Rhône suisse (Rhône valaisan et lac Léman) a également été intégré dans les analyses de débit.

L'ensemble du linéaire du Rhône a été caractérisé à partir d'une sélection de stations de référence, supposées être caractéristiques du tronçon dans lequel elles sont localisées.

Pour l'analyse thermique, la zone d'étude couvre ainsi tout le linéaire du Rhône mais également la partie aval de ses affluents principaux, à savoir d'amont en aval, l'Arve, l'Ain, la Saône et l'Isère (Figure 1). Une vingtaine de stations de mesure de température de l'eau gérées par EDF-DTG fonctionnent en routine sur le fleuve et ses affluents. Cinq stations faisant l'objet d'un suivi thermique depuis les années 1970 ont été sélectionnées pour la reconstitution des séries historiques de température de l'eau. Il s'agit des sites de Pougny (aval de la confluence avec l'Arve), Bugey (amont du CNPE du même nom), Saint-Alban (amont du CNPE du même nom), Tricastin (amont du CNPE de Tricastin) et Aramon (aval de la confluence avec la Durance). D'un point de vue hydrologique, l'analyse a porté principalement sur 1 station sur le Rhône suisse (Porte de Scex) et 6 stations débitmétriques sur le Rhône français, avec d'amont en aval : Porte de Scex (entrée Léman), l'exutoire du Lac Léman, Pougny (aval de la confluence avec l'Arve), Lagnieu (amont de la confluence avec l'Ain), Ternay (aval de la confluence avec la Saône), Viviers (aval de la confluence avec l'Isère) et Beaucaire (aval de la confluence avec la Durance).



**Figure 1 - Bassin du Rhône et localisation des principales stations de mesure de température de l'eau (à gauche) et de débit (à droite)**

### 3. PRINCIPAUX RÉSULTATS

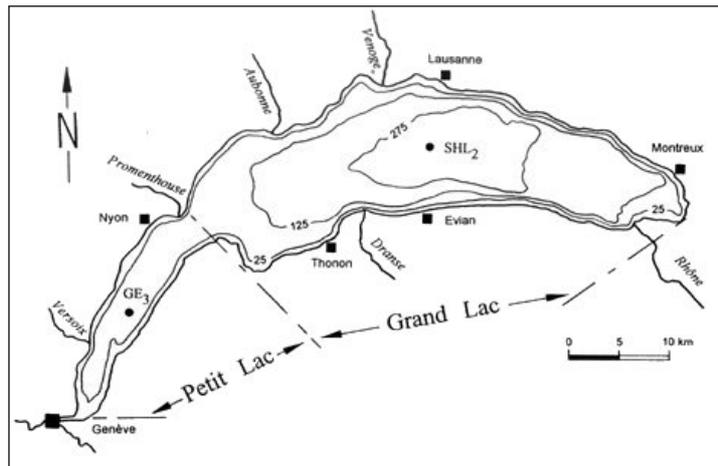
#### 3.1. RECONSTITUTION DES DONNÉES HISTORIQUES DU RHÔNE

##### 3.1.1. Lac Léman

###### 3.1.1.1. Principales caractéristiques physiques du Lac

**Nota :**

Même si cette partie n'est pas en lien direct avec la reconstitution des données historiques de température et de débit du Rhône, il est néanmoins apparu important d'apporter quelques éléments de contexte pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu sur le Rhône, à l'aval du Léman.



**Figure 2 - Carte schématique du lac Léman (source DREAL RA)**

- Longueur maximale: 72 km ;
- Largeur maximale: 13.8 km ;
- Altitude moyenne du plan d'eau : 372,05 m ;
- Profondeur maximale : 309,7 m ;
- Profondeur moyenne : 152,7 m ;
- Volume : 89 000 millions de m<sup>3</sup> ;
- Temps de renouvellement ~ 11 ans en moyenne (module Sortie Léman : 249 m3/s) ;
- Marnage maximum 0,5 m (0,8 m en année bissextile) ;
- Origine du marnage : Avant le XX<sup>ème</sup> siècle, il existait un marnage naturel, pouvant dépasser 1 m. Depuis 1992, ce marnage est contrôlé. La régulation se fait par le barrage de la Machine à Genève remplacé par le barrage du Seujet depuis 1995.

Surface (km <sup>2</sup> )	France	Suisse	Total	% France
Bassin versant drainé hors surface du lac	890	6505	7395	12,0
Surface du lac	235	345	580	40,5
Total	1125	6850	7975	14,1

**Tableau 1. Détails du bassin versant du Rhône à l'exutoire du lac Léman**

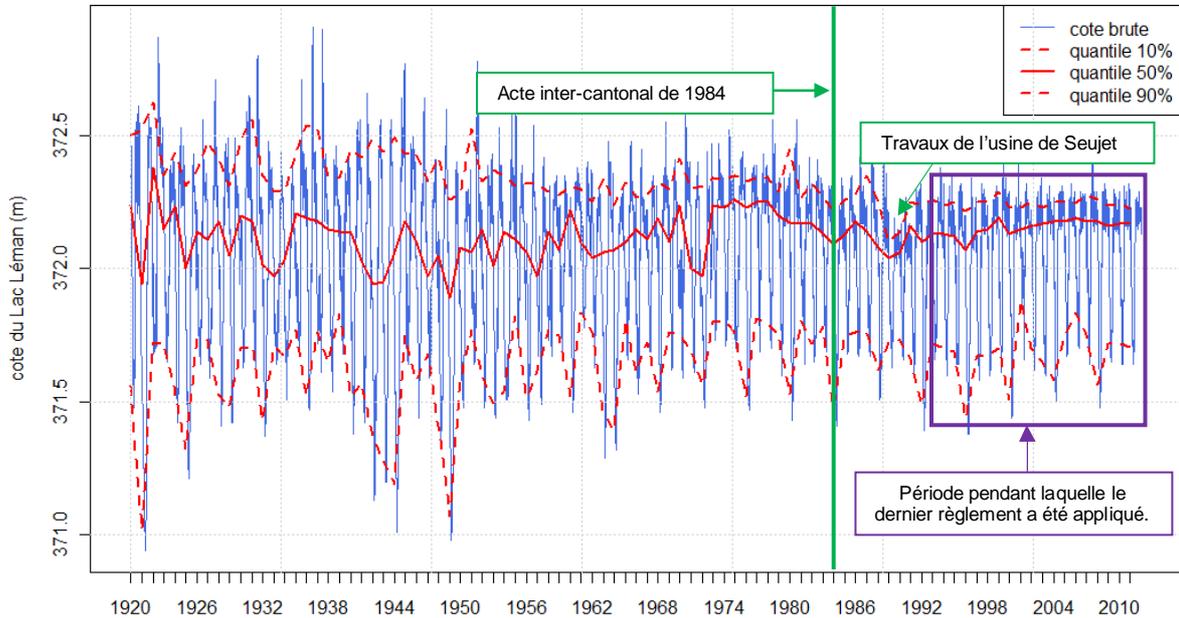
###### 3.1.1.2. Règlement actuel du lac Léman

Les débits et volumes sortant du lac Léman, lac international, sont gérés par les services et autorités suisses en application de deux conventions :

- une convention suisse inter-cantonale, dont la France n'est pas signataire, qui définit le réglage de la cote du plan d'eau du Léman, et qui fixe le débit minimum sortant du lac (100 m3/s du 1er mai au 30 septembre, 50 m3/s du 1er octobre au 30 avril), avec une forte modulation journalière et hebdomadaire ;
- la convention internationale dite « d'Emosson » du 23 août 1963, qui prévoit que le débit provenant du bassin versant français de l'Arve et qui a été détourné lors de l'aménagement suisse d'Emosson vers le lac Léman doit être restitué par la Suisse à la France à concurrence d'un volume annuel de 87 millions de m<sup>3</sup>. Stockées dans le lac Léman, ces « eaux d'Emosson » disponibles pour la France sont fournies par le Seujet pour maintenir la navigation et surtout le refroidissement normal des centrales nucléaires françaises lors des étiages sévères.

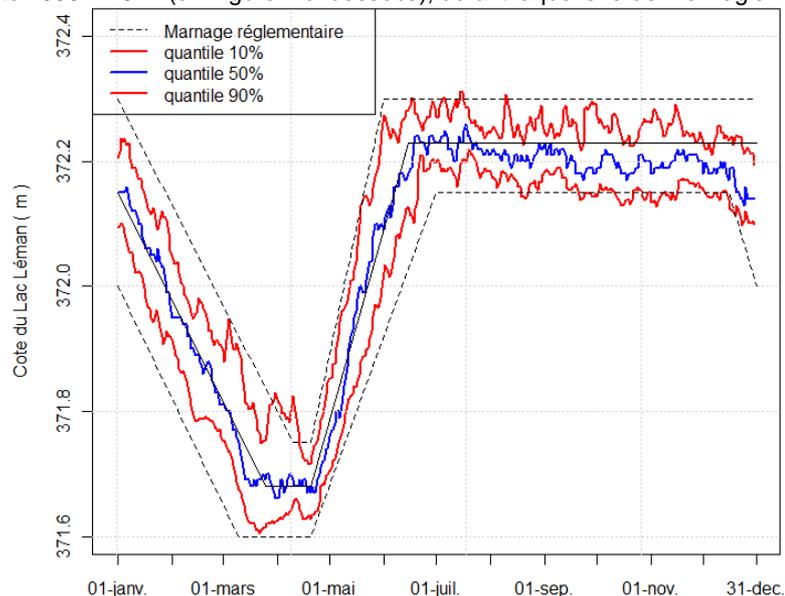
### 3.1.1.3. Évolution de la cote du plan d'eau

Pour évaluer les variations de cote du lac Léman au cours du XX<sup>ème</sup>, les données de la station de Secheron, issue de la banque de données de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) (code station : 2028) ont été analysées. L'évolution de la cote est présentée dans la Figure 3.



**Figure 3 - Historique de la cote du lac Léman de 1920 à 2011**

Compte tenu des variations du mode de gestion durant le XX<sup>ème</sup> siècle, on propose d'établir le graphique de régime des cotes du lac sur la période récente 1993 – 2011 (cf. Figure 4 ci-dessous), durant laquelle le dernier règlement a été appliqué.



**Figure 4 - Évolution de la cote du Lac Léman de 1993 à 2011 sans les années bissextiles**

Le graphique précédent met en évidence que pendant la période estivale, le marnage réglementaire a été respecté plus de 90 % du temps mais que les dépassements sous le seuil autorisé ont été relativement fréquents (entre 5 et 10 % du temps en moyenne sur la période [1993-2011]).

## 3.1.2. Principales caractéristiques hydrologiques du Rhône

### 3.1.2.1. Préambule

Les aspects hydrologiques du Rhône ont été traités dans le cadre d'une étude spécifique, qui figure intégralement en annexe. Ici, ne sont présentés que les traits saillants des principaux résultats issus de cette étude.

On notera par ailleurs que les outils statistiques et notamment les tests pour détecter des ruptures (Test de Pettit) ou des tendances évolutives (Test de Mann-Kendall) sont également décrits, de façon synthétique, dans la partie « Méthodes et analyses » du présent rapport.

### 3.1.2.2. Bref historique des aménagements hydroélectriques et de l'évolution des volumes stockables

La figure suivante permet d'évaluer les réserves d'eau mobilisées par les ouvrages hydroélectriques en amont du lac Léman et sur le linéaire du Rhône depuis 1925 et jusqu'en 1986. On observe que la période allant du début des années 1950 au début des années 1970 (zone en bleu sur le graphique ci-après), est marquée par un essor considérable : plus d'un milliard de mètres cubes d'eau mis en service.

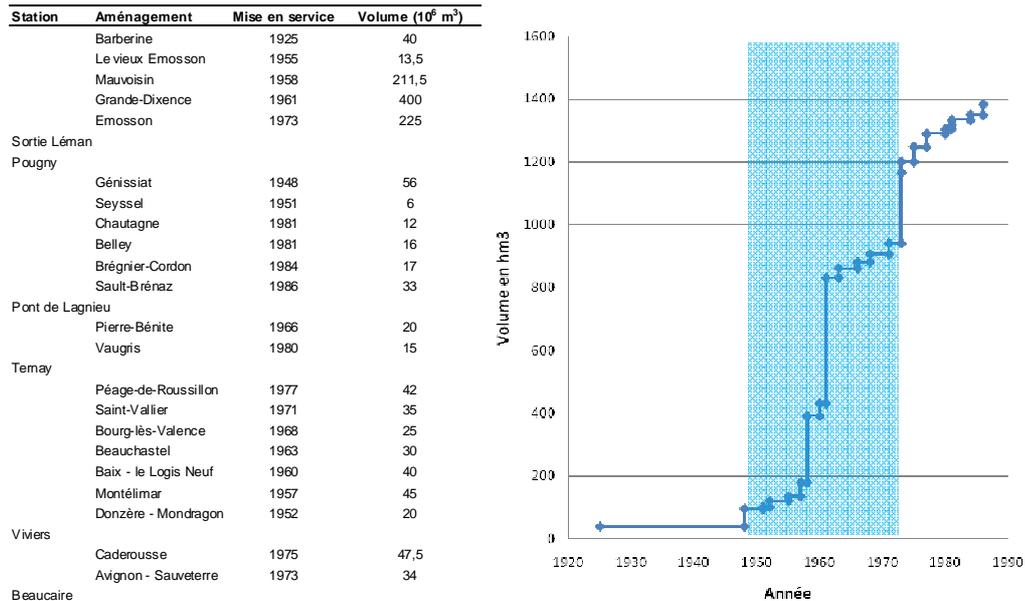


Figure 5 - Historique des réserves hydrauliques en amont du lac Léman et sur le linéaire du Rhône français

### 3.1.2.3. Le module et son évolution

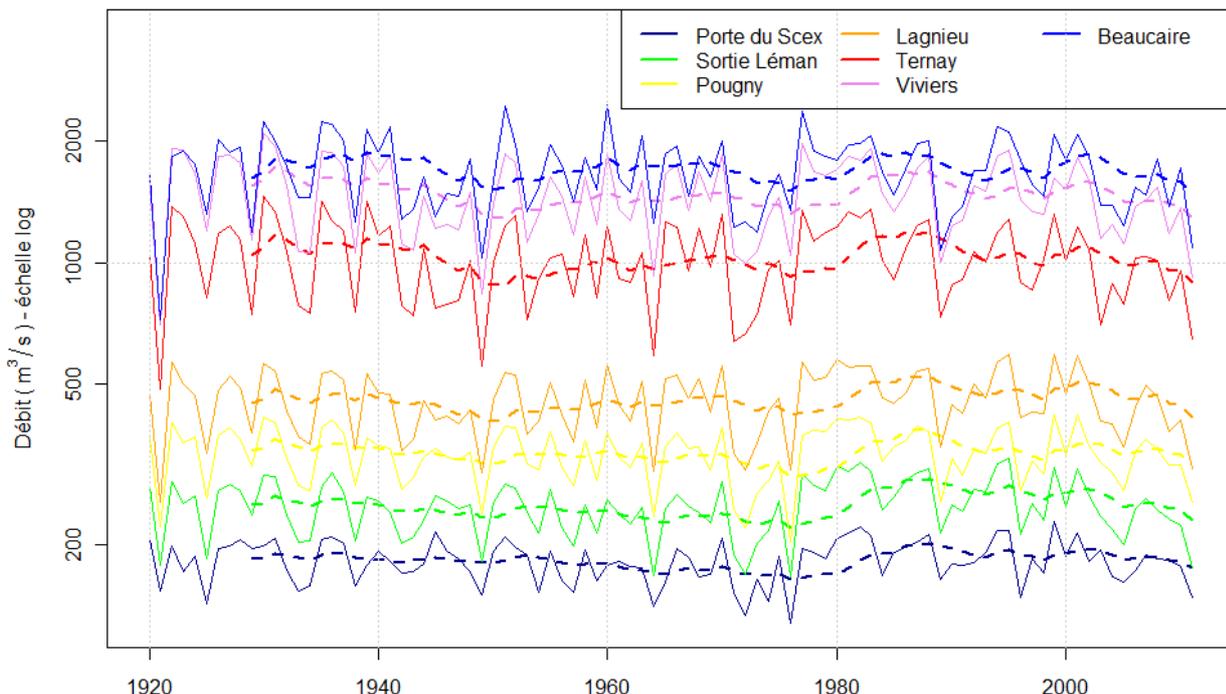


Figure 6 - Débits moyens annuels de 1920 à 2011 au droit de sept stations sur le linéaire du Rhône

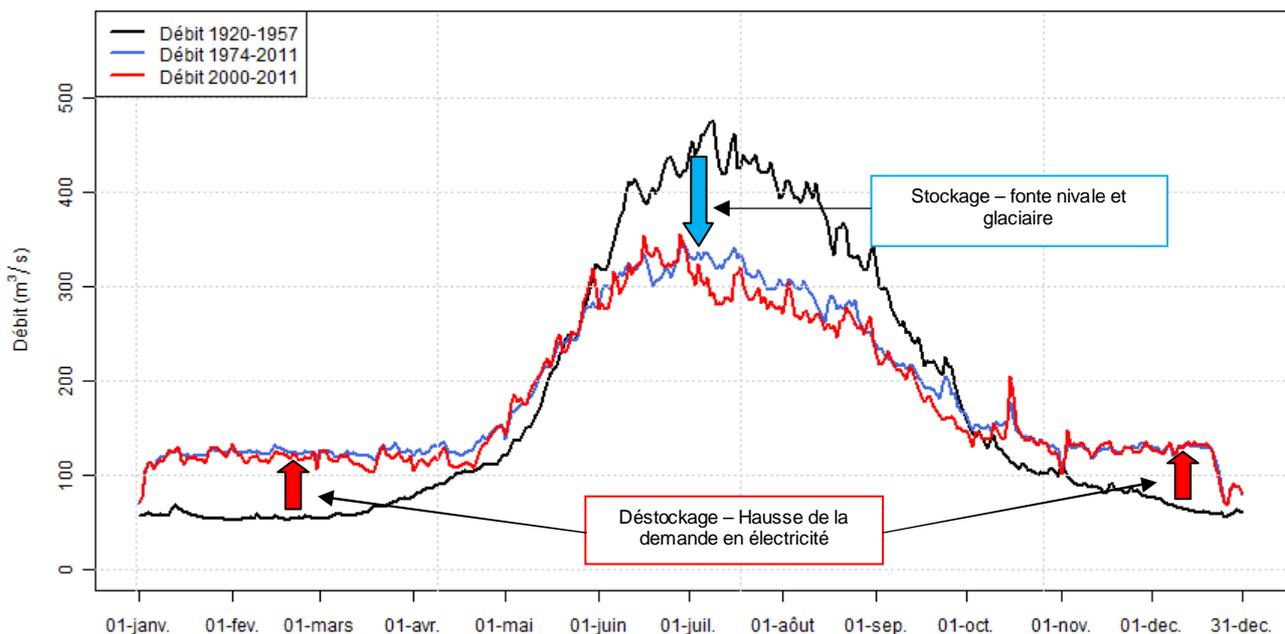
Le graphique précédent représente l'évolution du débit moyen annuel du Rhône en sept points caractéristiques du Rhône pour la période allant de 1920 à 2011. Son examen global montre tout d'abord une bonne cohérence entre les sept séries. On remarque ensuite que la moyenne mobile (sur 10 ans) centrée (traits en pointillé) est d'une relative stabilité entre les années 1920 et les années 1950 puis elle semble plus varier depuis cette date. L'analyse fine des tendances, à l'aide du test de Mann-Kendall, montre que ces variations ne sont pas suffisamment significatives pour constituer de véritables tendances (à la baisse ou à la hausse).

### 3.1.2.4. Les régimes hydrologiques et leur évolution inter-annuelle

Compte tenu des différentes phases d'aménagement du fleuve, le régime moyen du Rhône a été caractérisé sur trois périodes distinctes : 1920 à 1957, 1974 à 2010 et 2000 à 2011. On s'affranchit ainsi de la période qui correspond à la construction des plus grands barrages et on recherche si la période la plus récente a fait l'objet d'une évolution.

Dans un second temps, le régime hydrologique moyen mensuel a été caractérisé sur deux sous périodes au droit de chaque station. L'objectif est d'évaluer l'effet de gestion des aménagements sur les affluents par rapport à l'influence de la gestion suisse.

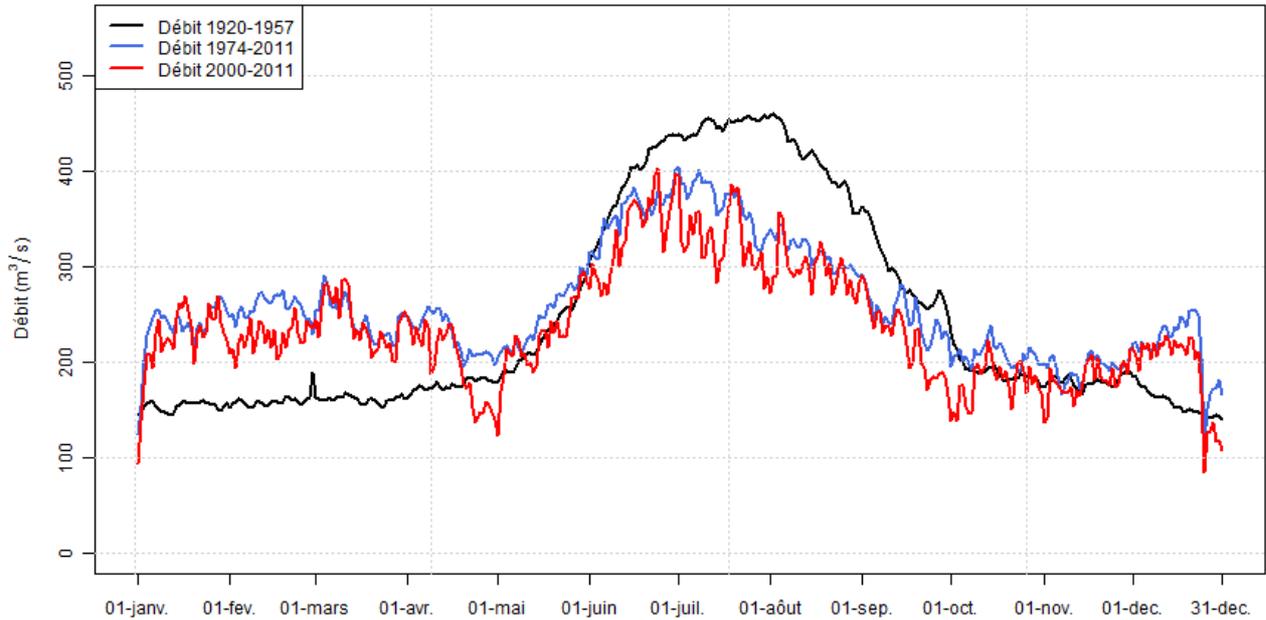
#### 3.1.2.4.1. Amont Léman



**Figure 7 - Régime hydrologique journalier moyen du Rhône à Porte du Scex de 1920 à 2011**

Le graphique ci-avant montre bien la modification des écoulements au cours de l'année du fait de la gestion des ouvrages. La comparaison 1974 – 2011 et 2000 – 2011, ne met pas en lumière d'évolution significative des régimes sur les dernières décennies. On retrouve notamment dans les deux cas, une baisse importante durant la période de fin d'année (fin décembre) correspondant à une baisse de la demande d'électricité.

**3.1.2.4.2. Aval Léman**

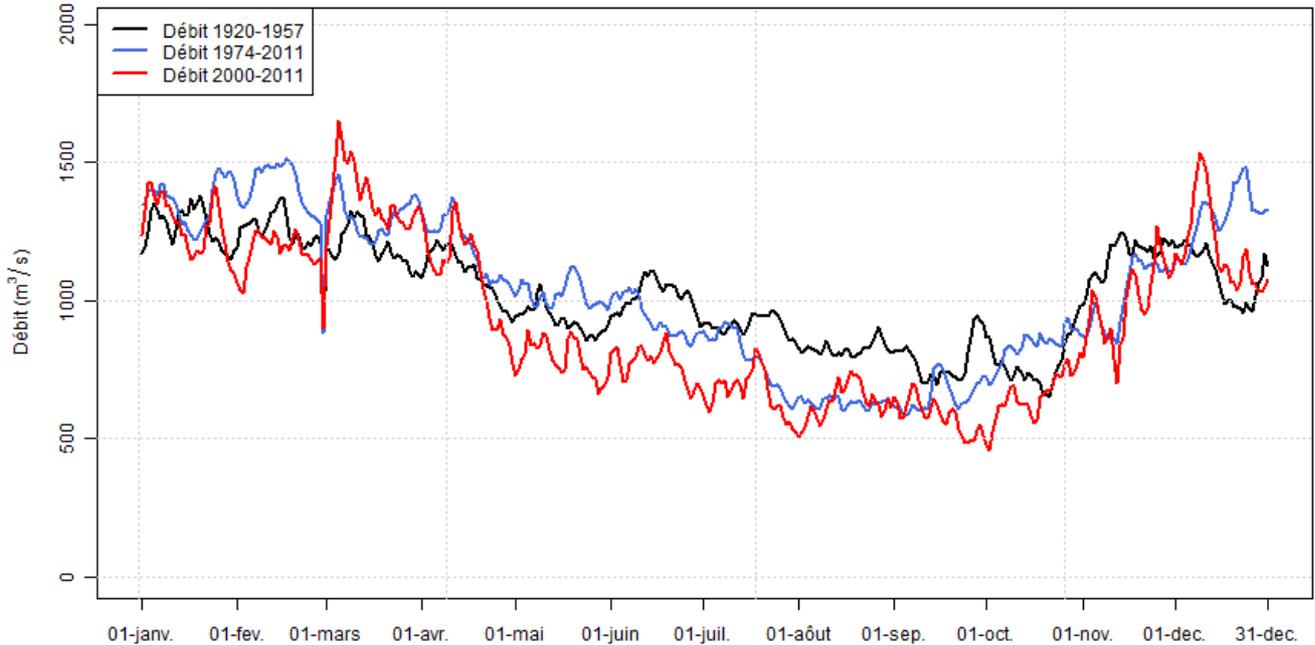


**Figure 8 - Régime hydrologique journalier moyen du Rhône à la sortie du lac Léman de 1920 à 2011**

Ce graphique permet d'établir le même constat qu'à la Porte du Scex quant à l'évolution du régime moyen du fait de la gestion des ouvrages hydroélectriques. Il permet également de montrer le bruit supplémentaire induit par la gestion propre du lac Léman. Au regard de la période récente 2000-2011, il semble y avoir une amplification de la gestion du lac.

Par le biais du graphique ci-dessous, on constate que l'influence de la gestion du lac Léman et des ouvrages en amont de la station de Ternay influence encore sensiblement le régime hydrologique : on a un stockage des eaux entre mai et octobre qui sont déstockées en hiver pendant les pics de demande d'électricité. Sur la période après aménagements, il semble que le régime moyen soit encore moins bruité qu'à Lagnieu. Il s'agit encore de l'effet de la contribution du bassin versant intermédiaire et de l'effet des aménagements hydroélectriques en amont de la station de Ternay.

Comme vu précédemment avec les régimes établis à Lagnieu, on distingue pour la fin de l'année, que le régime moyen 1974 – 2011 est différent du régime moyen 2000 – 2011. La gestion du Léman est à l'origine de ce décrochage de fin d'année.



**Figure 9 - Régime hydrologique journalier moyen du Rhône à Ternay de 1920 à 2011**

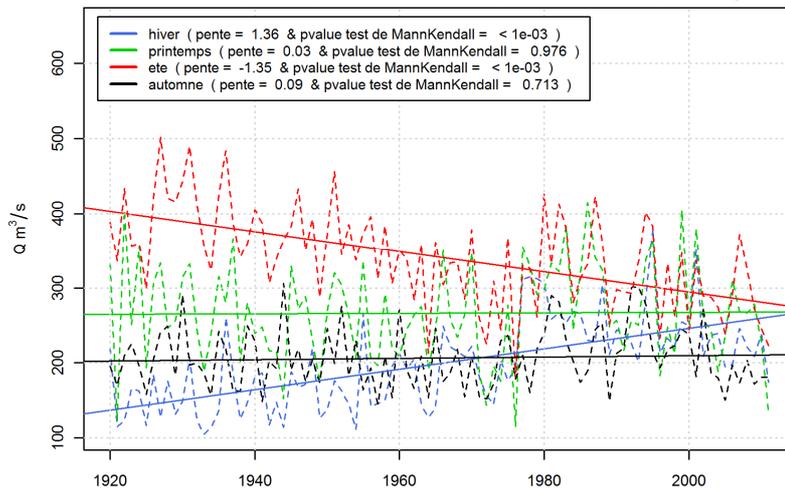
Plus à l'aval, à Viviers et à Beaucaire, on retrouve les mêmes constats que plus à l'amont sur les effets des aménagements et de leur gestion, mais avec des différences de régime plus atténuées.

### 3.1.2.5. Les tendances d'évolution du débit par saison

L'objectif de cette analyse est d'évaluer s'il existe des tendances par saison sur les écoulements et de définir qu'elles en sont la cause : la mise en place des barrages hydroélectriques et/ou le changement climatique.

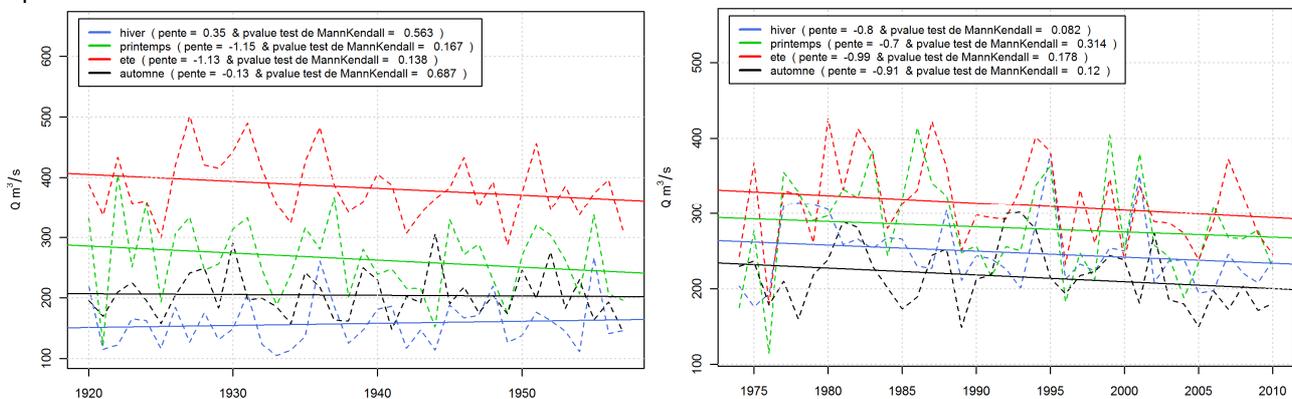
L'analyse des tendances a été réalisée au droit de toutes les stations étudiées sur le Rhône sur les moyennes saisonnières. Pour quantifier l'existence ou non de tendance à long terme, un calcul de régressions linéaires sur ces moyennes saisonnières sur la portée totale 1920 à 2011 et sur les deux sous périodes avant et après aménagements (1920-1957 et 1974-2011) a été mené. Afin d'évaluer la significativité des tendances le test de Mann Kendall a été retenu ; la tendance sera dite significative quand la *pvalue* calculée est inférieure à 0.05.

La Figure 10 rassemble les résultats obtenus sur la portée totale de la série de débit. On distingue nettement deux tendances sur les écoulements en hiver et en été avec une pente positive en hiver (+ 1.36 m<sup>3</sup>/s/an) et négative en été (-1.35 m<sup>3</sup>/s/an).



**Figure 10 - Test de tendance sur les débits moyens saisonniers en sortie du lac Léman de 1920 à 2011**

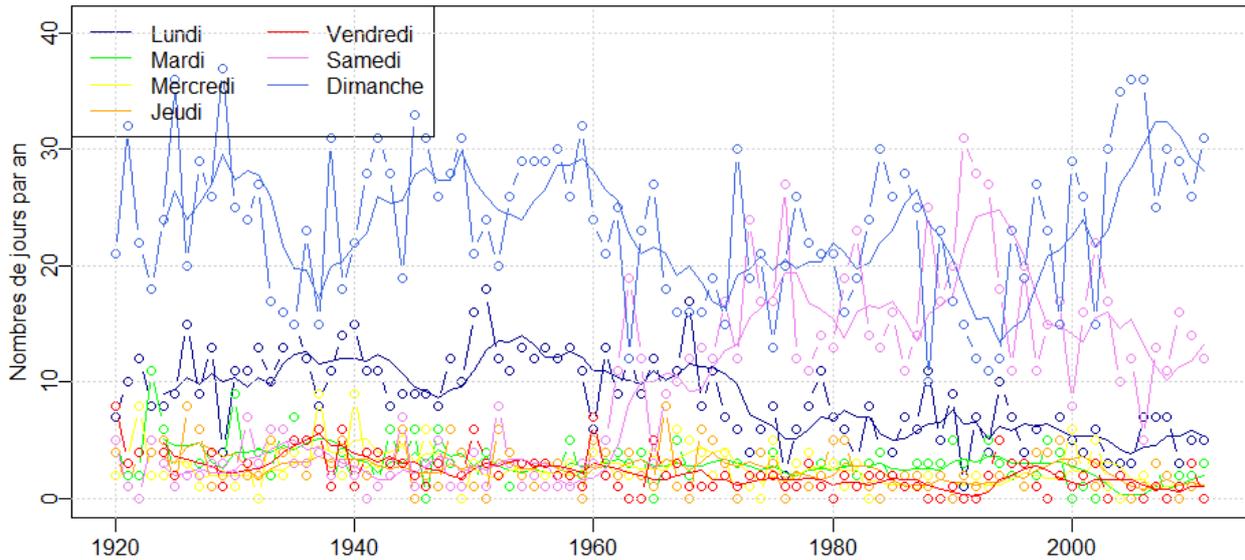
Par ailleurs, l'examen de la Figure 11 ci-après permet de montrer que la tendance globale est principalement liée à une rupture entre les années 1950 et les années 1970.



**Figure 11 - Test de tendance sur les débits moyens saisonniers en sortie du lac Léman de 1920 à 1958 (gauche) et de 1974 à 2011 (droite).**

En effet, en réalisant la même analyse sur la période avant et après aménagements, on ne constate plus de tendance saisonnière significative. On peut donc conclure que les tendances sur les écoulements observées en hiver et en été sont liées, en très grande partie, à la mise en service des barrages (et notamment à leur gestion associée) et non au changement climatique.

### 3.1.2.6. Gestion hebdomadaire des débits

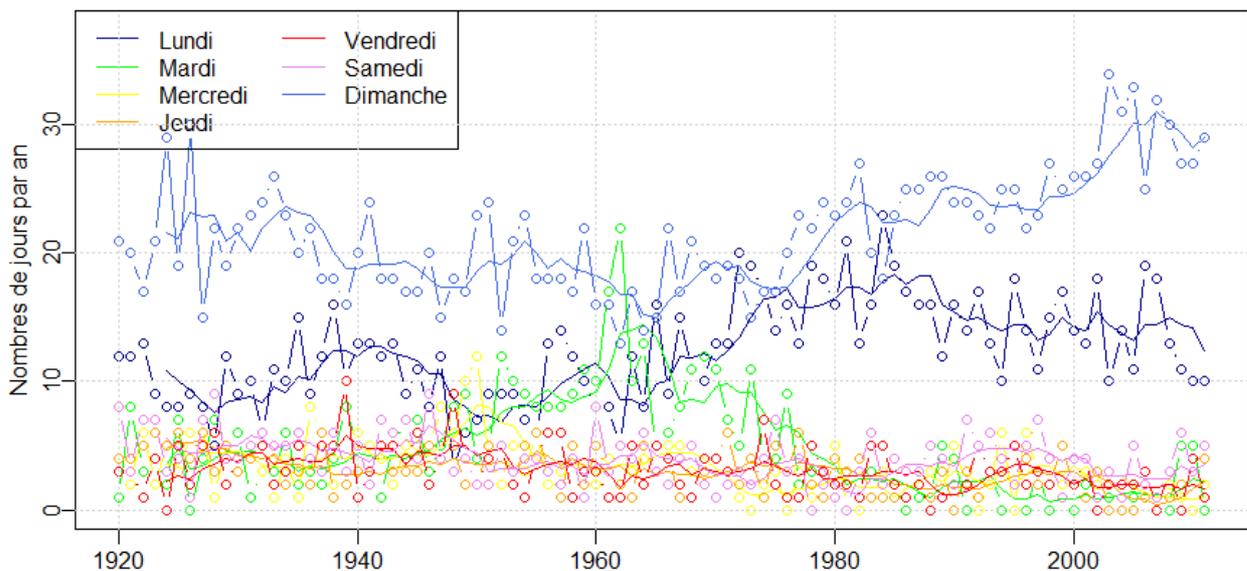


**Figure 12 - Jour de la semaine où survient le minimum hebdomadaire, débits en sortie du lac Léman entre 1920 à 2011**

A la sortie du lac Léman, le samedi et le dimanche constituent les jours de la semaine où la probabilité d'observer le débit minimum hebdomadaire est la plus forte. Ceci ne peut être que la conséquence d'une modification anthropique des écoulements. Ce constat est particulièrement vrai pour la période qui va depuis le début des années soixante dix à nos jours. Sur la partie inférieure du Rhône, l'influence du Léman est toujours visible mais avec un décalage sur la fréquence d'apparition des minimums hebdomadaires du aux temps de propagation des débits. En effet, nous avons montré que les jours où la probabilité d'observer le débit minimum hebdomadaire est la plus forte sont le dimanche et le lundi.

L'existence d'un régime hydrologique fortement influencé ces dernières années pourrait expliquer le réchauffement plus marqué entre Pougny et Bugey pour la période la plus récente. Il est toutefois difficile de connaître l'impact réel de la gestion des ouvrages hydroélectriques sur la thermie. Dans la partie 3.8, on explore plus en détail ces questions, en analysant notamment les effets de nouveaux modes de gestion du Léman sur la température du Rhône.

A Beaucaire, à la différence des débits sur le Haut-Rhône, on constate sur la période actuelle, après 2000, que le débit minimum hebdomadaire est observé 50% du temps le dimanche et plus de 30% le lundi, soit près de 80% pour ces deux jours.



**Figure 13 - Jour de la semaine où survient le minimum hebdomadaire - station de Beaucaire de 1920 à 2011**

En effet, cette différence, entre la fréquence d'observation des jours de la semaine dans le Haut-Rhône et le Bas-Rhône, est dû au temps de propagation des débits. Les débits en sortie du lac Léman mettent environ un jour pour se propager an aval du Rhône. Ainsi, l'influence de la gestion du lac est toujours présente mais avec un jour de décalage.

Ces analyses montrent qu'à l'échelle annuelle, les apports en eau du bassin versant du Rhône n'ont pas évolué depuis les années 1920. A l'échelle saisonnière, on note des évolutions marquées du débit du Rhône (pouvant atteindre 30% sur les débits mensuels), avec une **augmentation des débits en hiver et une baisse des débits estivaux**, avant et après une période charnière autour des années 1960. Ces effets sur le régime hydrologique du Rhône sont visibles jusqu'à Beaucaire mais sont d'autant moins marqués que l'on s'éloigne de l'exutoire du Lac Léman. La modification des régimes hydrologiques du Rhône est concomitante à la période d'intense aménagement hydraulique du Rhône. **A l'échelle hebdomadaire**, les chroniques montrent une gestion hydraulique plus dynamique du Lac Léman depuis les années 1990, avec des débits très faibles pendant le week-end par rapport au reste de la semaine.

### 3.1.3. Chroniques de températures de l'eau du Rhône

#### 3.1.3.1. Apport des mesures de températures du XIX<sup>ème</sup> siècle

Les analyses menées sur les données anciennes sont présentées plus en détail dans la partie « Méthodes et Analyses » de ce rapport.

Les mesures anciennes de température de l'eau du Rhône à Genève et à Lyon, ainsi que les mesures de température de la Saône ont été exploitées sur la période [1870-1877].

Dans un premier temps des modèles de type « Réseaux de Neurones » ont été construits sur la base d'un calage/test sur la période [1870-1877]. Ensuite ces modèles ont servi à simuler les températures de l'eau sur des périodes plus récentes pour lesquelles existent des mesures d'une grande précision ( $\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ). L'objectif était de comparer les résultats de ces modèles - intégrant des processus anciens - avec les données mesurées ces dernières décennies afin de mettre en évidence d'éventuelles modifications des processus contrôlant la température de l'eau.

Ces mesures anciennes s'avèrent très riches en information même si il faut prendre avec précaution certaines données. La qualité de l'information à Genève s'avère remarquable alors que celle de Lyon apparait satisfaisante en T°Eau, plus sujette à caution coté climatologie.

Si les processus qui gouvernent la T°Eau du Rhône à Genève semblent très stables dans le temps, il n'en va pas de même à Lyon, que ce soit sur la Saône ou le Rhône. Les processus d'échange entre l'air et l'eau apparaissent modifiés par des effets anthropiques multiples parfois antagonistes. Sur le Rhône à Lyon, la variabilité intra-annuelle des T°Eau apparait nettement réduite avec la gestion saisonnière des débits et/ou la construction des retenues qui augmentent l'inertie du fleuve. Sur la Saône, une dérive des processus est observée depuis 1985-1990 sans explication très claire.

#### 3.1.3.2. Températures sur la période [1920-2010]

Dans la partie « Méthodes et analyses » sont présentées le détail des mesures de température de l'eau disponibles sur le Rhône et ses principaux affluents. Ces mesures précises, réalisées de façon automatique, avec un pas de temps fin permettent de disposer de **séries de données journalières** de grande qualité depuis le milieu des années 1970 jusqu'à aujourd'hui.

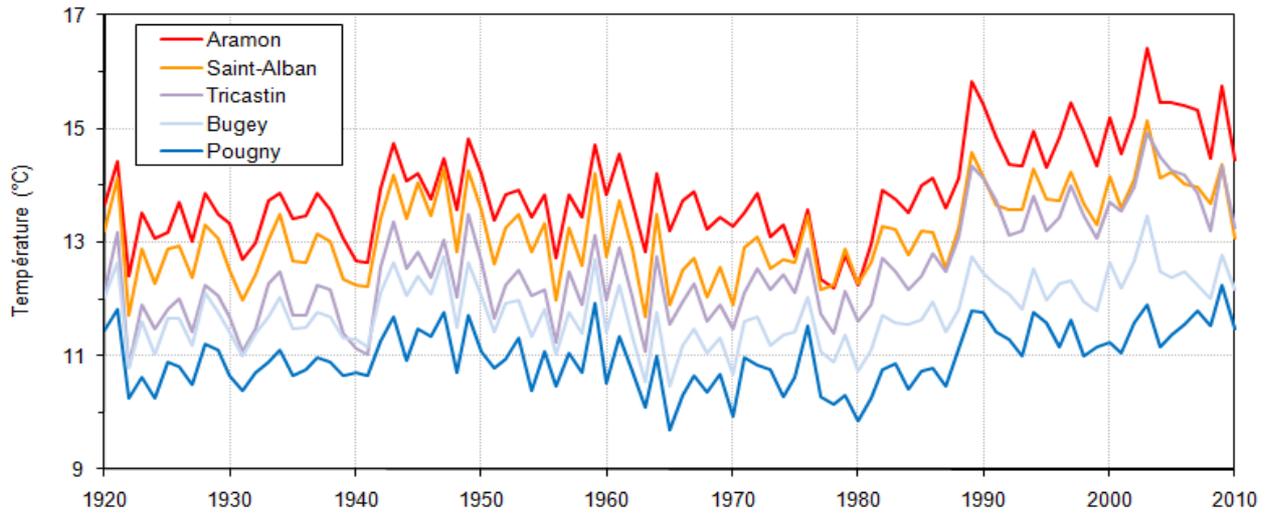
Compte tenu de la dynamique des phénomènes à étudier (évolution climatique, ...), il est apparu nécessaire de disposer d'une série de température de l'eau beaucoup plus longue. Pour cela, il a été réalisé un modèle numérique exploitant la méthode des Réseaux de Neurones artificiels, décrites également dans la partie « Méthodes et Analyses ».

Ce modèle avait notamment pour objectif de :

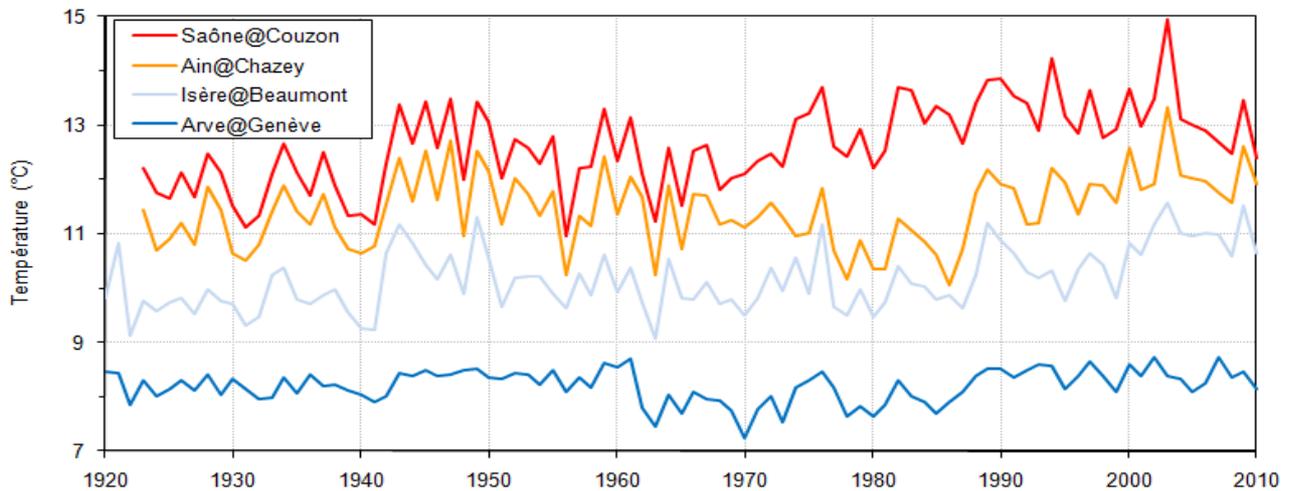
- Simuler au pas de temps journalier les températures de l'eau au niveau de 5 stations caractéristiques sur le Rhône, sur la période [1920-2010], période sur laquelle on disposait des principales données explicatives de la température de l'eau (données climatiques, données sur les rejets thermiques, caractéristiques des ouvrages hydroélectriques, ...)
- Réaliser des simulations exploratoires afin de tester la sensibilité de la température de l'eau du Rhône à différents leviers hydrauliques, comme une augmentation des débits à l'aval du Lac Léman ou de l'Isère.

Les températures à l'aval des principaux affluents ont tout d'abord été reconstituées, sur la période [1920-2010]. Ensuite, il a été reconstitué l'ensemble des températures journalières des 5 stations rhodaniennes suivantes : Pougny, Bugey, Saint-Alban, Tricastin, Aramon. On notera lorsque le nom de la station correspond à un centre de production d'électricité, la station est implantée à l'amont de l'installation.

Dans les graphiques suivants, seules les moyennes annuelles sont figurées pour des raisons de lisibilité. Ces valeurs sont issues des valeurs journalières fournies par le modèle.



**Figure 14. Séries reconstituées des températures de l'eau du Rhône entre 1920 et 2010 (moyenne annuelles)**



**Figure 15. Séries reconstituées des températures de l'eau des principaux affluents du Rhône entre 1920 et 2010 (moyenne annuelles)**

Les données journalières des 5 séries du Rhône et des 4 séries des affluents ont ensuite été traitées d'un point de vue statistique pour dresser des fiches synthétiques de la température de l'eau de ces 9 stations. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les parties suivantes et les fiches de synthèse figurent en annexe.

### 3.2. ÉVOLUTION DU RÉGIME THERMIQUE DU RHÔNE ET DE SES AFFLUENTS SUR LA PÉRIODE 1920–2010

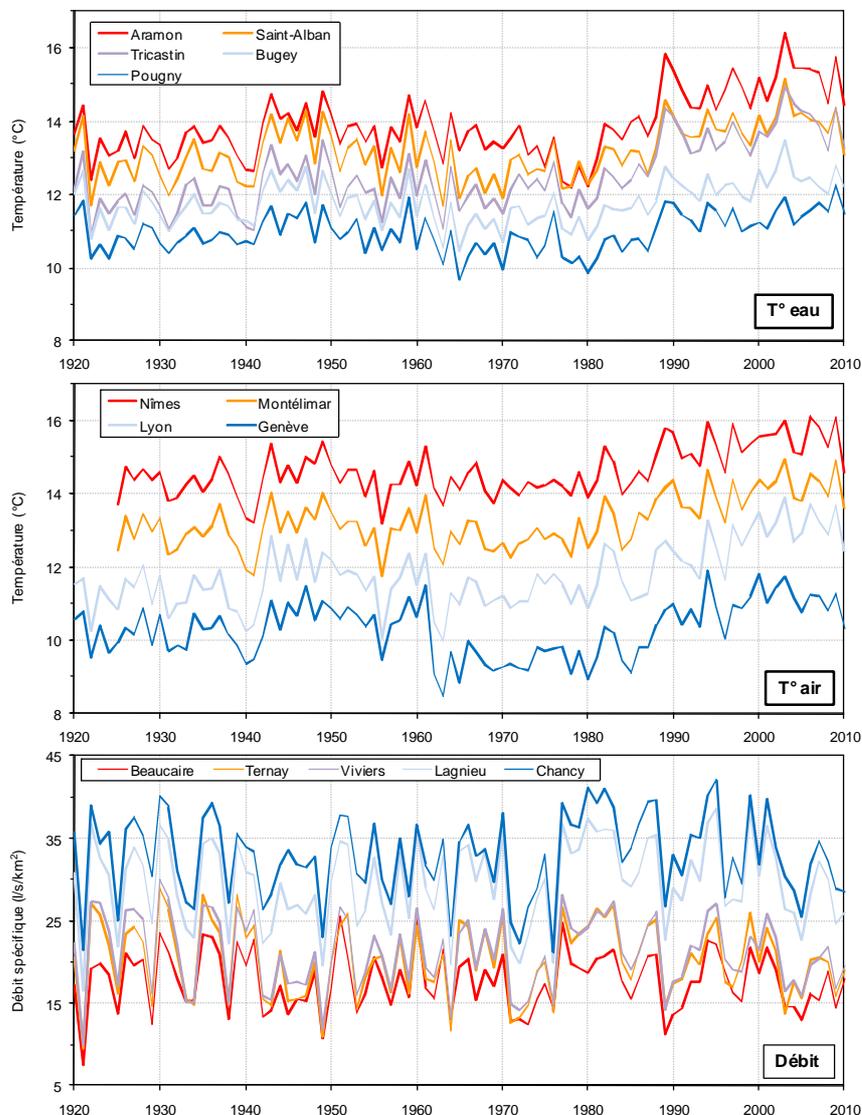
En préambule, rappelons que les valeurs mesurées et les valeurs reconstituées ont été traitées sans distinction au cours des analyses statistiques. Aussi, bien que les performances des modèles de reconstitution sont satisfaisantes (cf. Section 3.1), les résultats issus des analyses de tendances sont à interpréter avec précaution.

Des fiches de synthèse ont été établies pour chacune des neuf stations ayant fait l'objet de reconstitutions de température de l'eau (cinq sur le linéaire du Rhône et quatre sur les affluents majeurs). Ces fiches offrent une vision synthétique du régime thermique de chaque station, des tendances observées sur le long terme, et de l'évolution de quelques indicateurs pertinents du point de vue écologique. On les trouvera en annexe (quatre pages par station).

### 3.2.1. Stations sur le linéaire du Rhône

L'année 2003 a été la plus chaude pour toutes les stations sauf pour Pougny (2009), alors que les années les plus froides divergent selon les sites (en général autour des années 1960). La Figure 24 présente l'évolution des moyennes annuelles pour les températures de l'eau, mais également les moyennes annuelles atmosphériques (à Genève, Lyon, Montélimar et Nîmes), ainsi que les modules annuels.

Entre 1920 et 2010, la hausse des températures moyennes annuelles a été évaluée de façon globale, à l'aide d'une régression linéaire sur l'ensemble de la période. On retiendra que la grande majorité de cette évolution a eu lieu à partir de 1987. L'évolution inter-annuelle des températures annuelles est marquée sur le Bas-Rhône, avec 2.1°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon. Sur les autres stations du Rhône, cette hausse est nettement plus limitée : 0.4°C à Pougny, 0.6°C à Bugey et 0.9°C à Saint-Alban. Au niveau des affluents, cette hausse des températures de l'eau affecte principalement la Saône avec une hausse de 1.5°C depuis 1920, puis l'Isère dans une moindre mesure (0.8°C). L'analyse à l'échelle annuelle masque de fortes hétérogénéités saisonnières de ces évolutions. L'analyse au pas de temps mensuel met en évidence que ces **évolutions sont nettement plus importantes pendant la période estivale** (avec un paroxysme en août) alors qu'elles sont beaucoup moins significatives le reste de l'année. Depuis 1920, les températures moyennes du mois d'août ont ainsi augmenté de plus de 3.5°C à Aramon, 2.9°C à Tricastin, 2.3°C à Bugey et 1.1°C à Pougny. Cet effet saisonnier des hausses de températures est également très marqué sur la Saône sur laquelle on note une augmentation d'environ 2.9°C des températures du mois d'Août.



**Figure 16 - Évolution entre 1920 et 2010 des températures moyennes annuelles en 5 stations du Rhône (A), des températures moyennes annuelles atmosphériques en 4 stations du bassin (B), et des modules spécifiques**

On note que les tendances observées pour les températures de l'eau se retrouvent assez bien dans les séries de température de l'air, avec une augmentation nette depuis les années 1970 à 1980. Les séries de débit présentent une forte variabilité interannuelle, mais aucune tendance à long terme.

Concernant la thermie du fleuve à l'échelle mensuelle, certaines périodes se démarquent par leur écart aux valeurs normales. C'est le cas notamment du mois d'avril 2007, qui a été le mois d'avril le plus chaud pour les cinq stations. Cette période remarquable ressort clairement sur les courbes en "chevelu" (superposition de l'ensemble des régimes annuels, cf. fiches de synthèse). D'autres périodes marquantes par leurs températures élevées à toutes les stations sont les mois de mai 1990, juin 2003, juillet 2006, août 2003 et septembre 1991. Le fait que ces mêmes mois apparaissent pour chacune des cinq stations prises en compte dénote l'importance du transfert thermique amont-aval du fleuve. Pour la période hivernale, les températures mensuelles les plus élevées ont eu lieu à des époques variables selon les sites. En ce qui concerne les extrêmes minimaux, mentionnons le mois de février 1956, qui correspond au mois de février le plus froid sur toutes les stations.

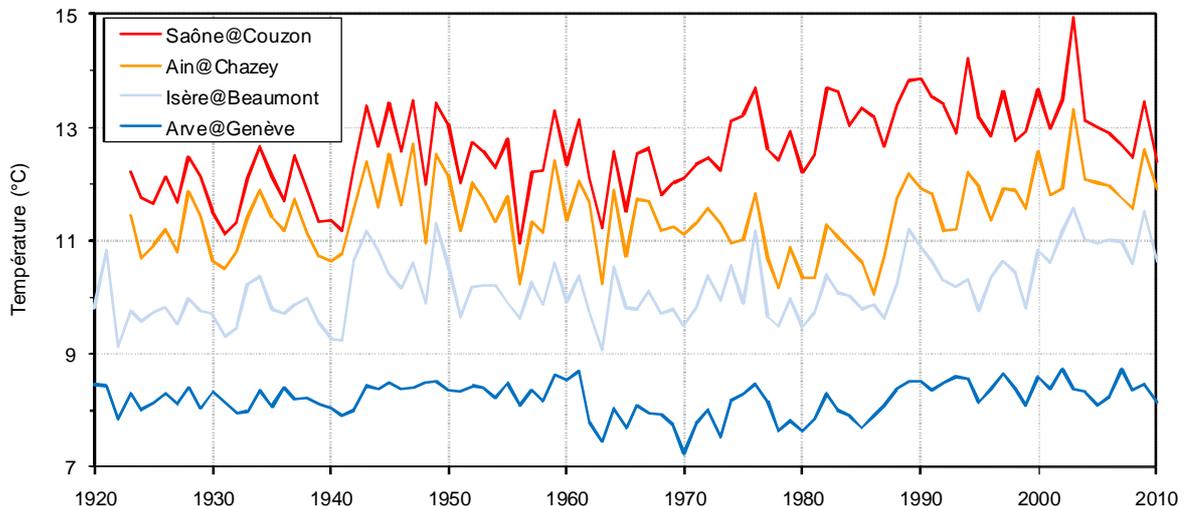
Concernant les régimes, la température de l'eau à la station de Pougny présente la plus grande variabilité en été, ce qui est essentiellement dû à l'occurrence des épisodes de goutte froide. Cette même station présente la plus faible variabilité en hiver, ce qui peut s'expliquer par l'effet tampon exercé par le lac Léman sur les températures hivernales. Bien que située dans la partie aval du bassin, la station de Tricastin est la seule sur laquelle des températures de 0°C ont été enregistrées (ou modélisées), et ce à plusieurs reprises. Ce phénomène est sans doute lié à la contribution des eaux froides de l'Isère.

Les tendances interannuelles sont variables selon le mois et la station considérés. L'évolution des températures est positive pour la quasi-totalité des mois, cette tendance étant exacerbée lors des mois estivaux. Ainsi, la période qui présente la plus grande hausse de température correspond au mois d'août pour les cinq stations. L'augmentation maximum entre 1920 et 2010 s'élève à +0.04°C par an, soit +0.41°C par décennie (station d'Aramon). De plus, l'augmentation semble s'accroître de l'amont vers l'aval du fleuve : la hausse maximum est de +0.12°C/décennie à Pougny (significative à 95%), +0.25°C/décennie à Bugey et Saint-Alban (significatives à 99%), +0.32°C/décennie à Tricastin (99%) et +0.41°C/décennie à Aramon (99%). A la station de Tricastin, l'hypothèse de non stationnarité des températures moyennes mensuelles est validée au seuil de confiance de 99% pour chacun des 12 mois de l'année, le taux variant entre +0.14 (avril) et +0.32°C par décennie (août). A l'inverse, à la station de Pougny seuls 7 mois présentent une hausse de température significative au seuil de confiance de 90% (et seulement 3 mois au seuil de 95%).

Le détail des fiches de synthèse est consultable en Annexe 1.

### 3.2.2. Stations sur les affluents

La tendance à la hausse identifiée sur le Rhône ne se retrouve pas systématiquement sur les affluents (Figure 25). C'est la Saône qui affiche l'évolution la plus nette, et cette tendance ascendante est progressive sur l'ensemble de la période couverte. Sur l'Ain, on note une évolution négative entre les années 1940 et 1985, en grande partie due à l'effet de la mise en place de plusieurs barrages dans les années 1960 (dont Vouglans en 1968) ; cette tendance descendante s'inverse ensuite jusqu'aux mesures actuelles. Sur l'Isère, la hausse des températures ne s'est réellement amorcée qu'à partir des années la fin des années 1980. Enfin, sur l'Arve, aucune tendance nette ne se dégage sur la période 1920-2010.



**Figure 17 - Évolution des températures moyennes annuelles des affluents du Rhône entre 1920 (ou 1923) et 2010**

La tendance positive identifiée sur la Saône est significative pour l'ensemble des mois de l'année et représente une hausse de 2.0°C sur l'ensemble de la période. En particulier, on notera que la température moyenne mensuelle mesurée actuellement en juin sur ce cours d'eau, correspond à la température moyenne mensuelle des mois de juillet et août lors des années 1920. Le régime thermique de la Saône étant en grande partie contrôlé par les conditions météorologiques, températures de l'air et de l'eau sont toute l'année proches de l'équilibre. Il est donc cohérent que la hausse des températures de l'air entraîne une augmentation de la thermie du cours d'eau.

L'évolution est beaucoup moins prononcée pour l'Ain, avec une hausse significative uniquement pour la période de mai à août. On observe même une diminution des températures moyennes mensuelles en septembre, due aux lâchers d'eaux froides liés à la gestion des aménagements qui jalonnent le cours de cet affluent depuis les années 1960.

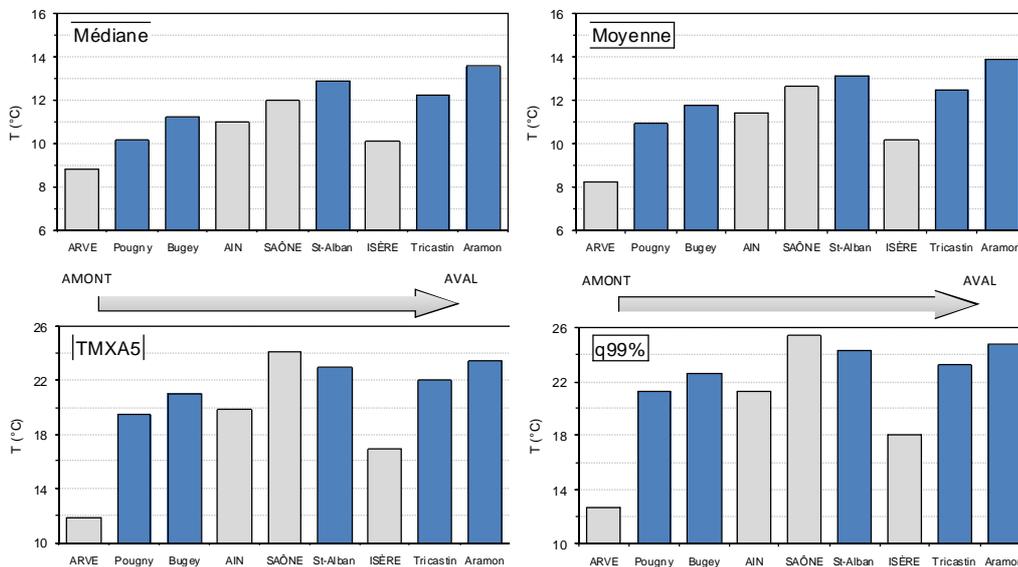
Pour l'Arve, aucune évolution significative n'a été identifiée sur aucun des 12 mois de l'année. Ceci s'explique par la forte composante nivale et glaciaire en été, qui contraint fortement la température de l'eau quelque soient les conditions atmosphériques.

Assez paradoxalement, l'Isère affiche une hausse sensible de ses températures, alors que son régime est également de type pluvio-nival. L'augmentation est significative d'avril à décembre, les mois de mai à août étant les plus fortement impactés par la hausse des températures. Il y a donc ici aussi un effet accru de la température de l'air sur la thermie du cours d'eau, potentiellement dû à la mise en service de nouveaux aménagements (Saint-Égrève notamment), qui pourraient favoriser les échanges thermiques air-eau.

Pour plus de détails, les fiches de synthèse des quatre affluents figurent en Annexe 1.

### 3.2.3. Évolution longitudinale sur toute la période d'étude

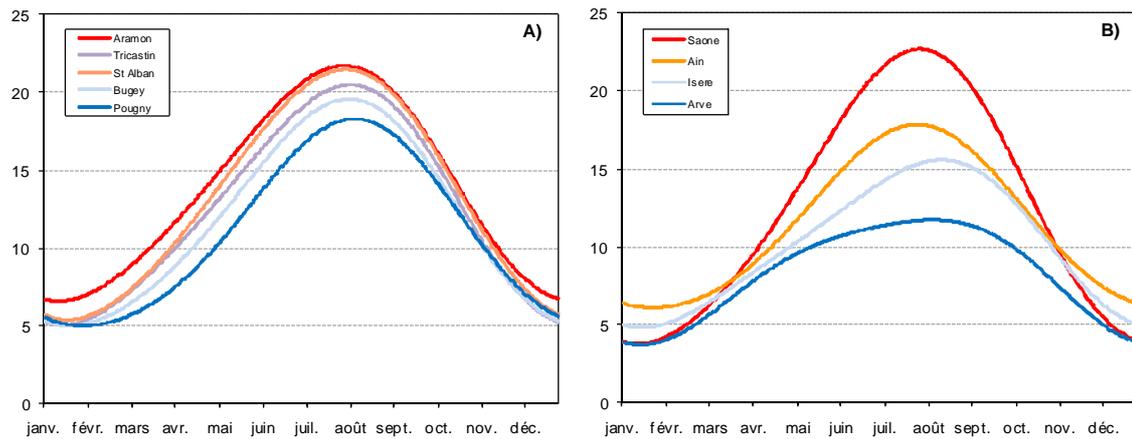
Quelques grandeurs caractéristiques ont été calculées à chaque station sur l'ensemble de la période d'étude, afin de caractériser les relations entre amont et aval. Il s'agit des moyennes interannuelles, des médianes interannuelles, des TMXA5 interannuelles et des quantiles 99% interannuels (les q99% correspondent aux valeurs dépassées moins de 4 jours par an). Le bilan de l'évolution longitudinale de ces statistiques est présenté en Figure 26.



**Figure 18 - Évolution longitudinale de quelques grandeurs caractéristiques pour la période 1920-2010**

La distribution des médianes et celle des moyennes sont très semblables, de même que les distributions de TMXA5 et de q99%. On retrouve ici les conclusions qui avaient été établies lors de la Phase I de l'Étude Rhône, à savoir une augmentation nette des températures entre Pougny et Saint-Alban (+2.2°C en moyenne ; +3.5°C pour la TMXA5), puis une légère baisse de Saint-Alban à Tricastin (-0.6°C en moyenne ; -1.0°C pour la TMXA5), et enfin une hausse entre Tricastin et Aramon (+1.4°C en moyenne ; +1.4°C pour la TMXA5). Concernant les affluents, les situations sont contrastées, avec deux affluents froids voire très froids, l'Arve et l'Isère, un affluent assez froid, l'Ain, et un affluent chaud uniquement en période estivale, la Saône.

Les régimes lissés médians interannuels des cinq stations du Rhône ont été dessinés sur un même graphe (Figure 27a), et les régimes des quatre stations situées sur les affluents majeurs ont fait l'objet du graphe adjacent (Figure 27b). Ces courbes offrent un aperçu clair des disparités rencontrées entre les sites :



**Figure 19 - Régimes médians des cinq stations rhodaniennes (A) et des quatre affluents (B) (lissage sur la période 1920-2010 ou 1923-2010 selon les sites)**

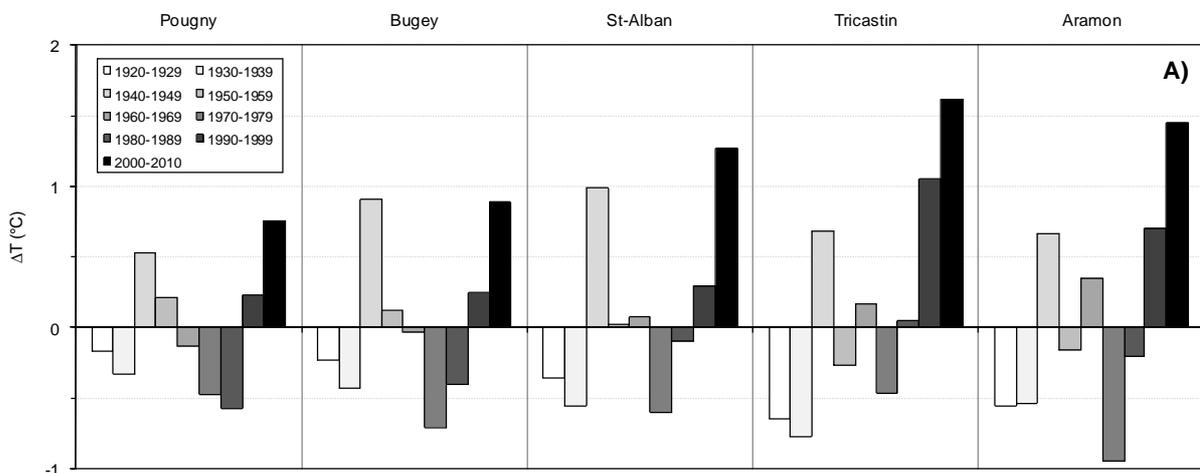
En ce qui concerne les stations du Rhône, on observe une variabilité plus importante au printemps et en été qu'en automne et en hiver, période pendant laquelle les courbes tendent à se rapprocher. L'écart maximum entre les régimes médians de Pougny et d'Aramon a lieu en mai, lorsqu'il s'élève à +4.6°C. Ce même écart est le plus faible pendant les mois de novembre-décembre (+1°C). L'amplitude thermique interannuelle est la plus élevée à Saint-Alban ( $T_{\max}-T_{\min}=16.1^{\circ}\text{C}$ ) et la plus faible à Pougny ( $T_{\max}-T_{\min}=13.3^{\circ}\text{C}$ ). D'autre part, le réchauffement printanier est plus précoce en allant vers l'aval du fleuve (à l'exception de la station de Tricastin). Le régime thermique de Tricastin est globalement plus froid que celui de Saint-Alban, sauf en période hivernale où les deux courbes se confondent. Pour le reste, on assiste à un réchauffement des eaux de l'amont vers l'aval.

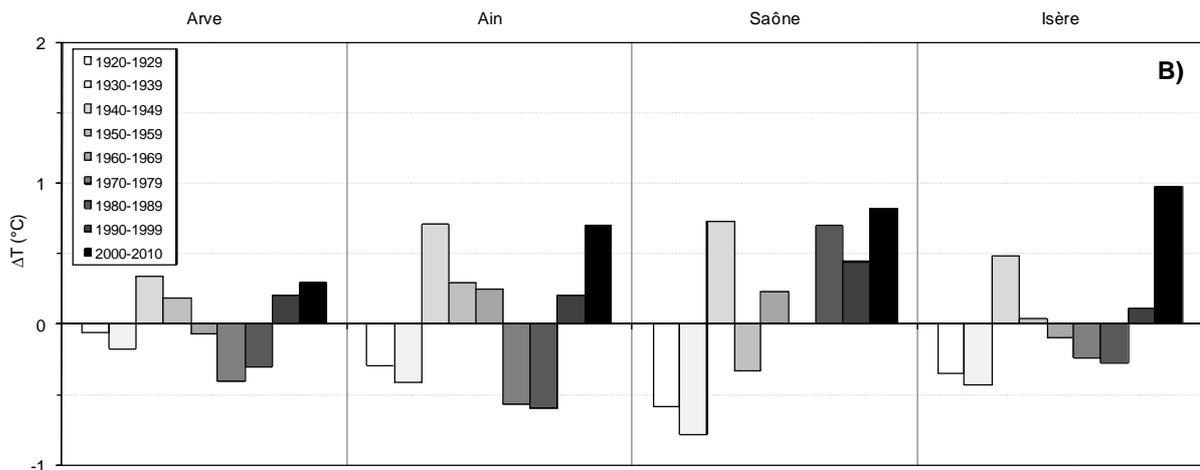
Les régimes médians calculés sur les affluents sont beaucoup plus disparates. On peut distinguer trois familles de cours d'eau, avec d'abord l'Arve et l'Isère, dont la thermie est fortement contrainte par la fonte nivale puis les apports glaciaires d'avril à août ; puis l'Ain, qui présente des températures assez froides ainsi qu'une faible amplitude thermique entre hiver et été ( $T_{\max}-T_{\min}=11.8^{\circ}\text{C}$ ) ; et enfin la Saône, dont l'amplitude thermique est particulièrement élevée ( $T_{\max}-T_{\min}=18.9^{\circ}\text{C}$  ; en valeur médiane la Saône a des eaux aussi froides que celles de l'Arve en hiver, et plus chaudes que celles du Rhône à Aramon en été).

### 3.2.4. Évolution longitudinale des variations inter-décennies

#### Variations par station

Afin d'ajouter une dimension temporelle aux informations précédentes, les variations de température de l'eau par rapport à la médiane interannuelle ont été calculées sur une base décennale. La Figure 26 montre l'évolution des écarts des médianes par décennie à la médiane interannuelle, d'une part pour les stations rhodaniennes (Figure 28a) et d'autre part pour les affluents (Figure 28b).



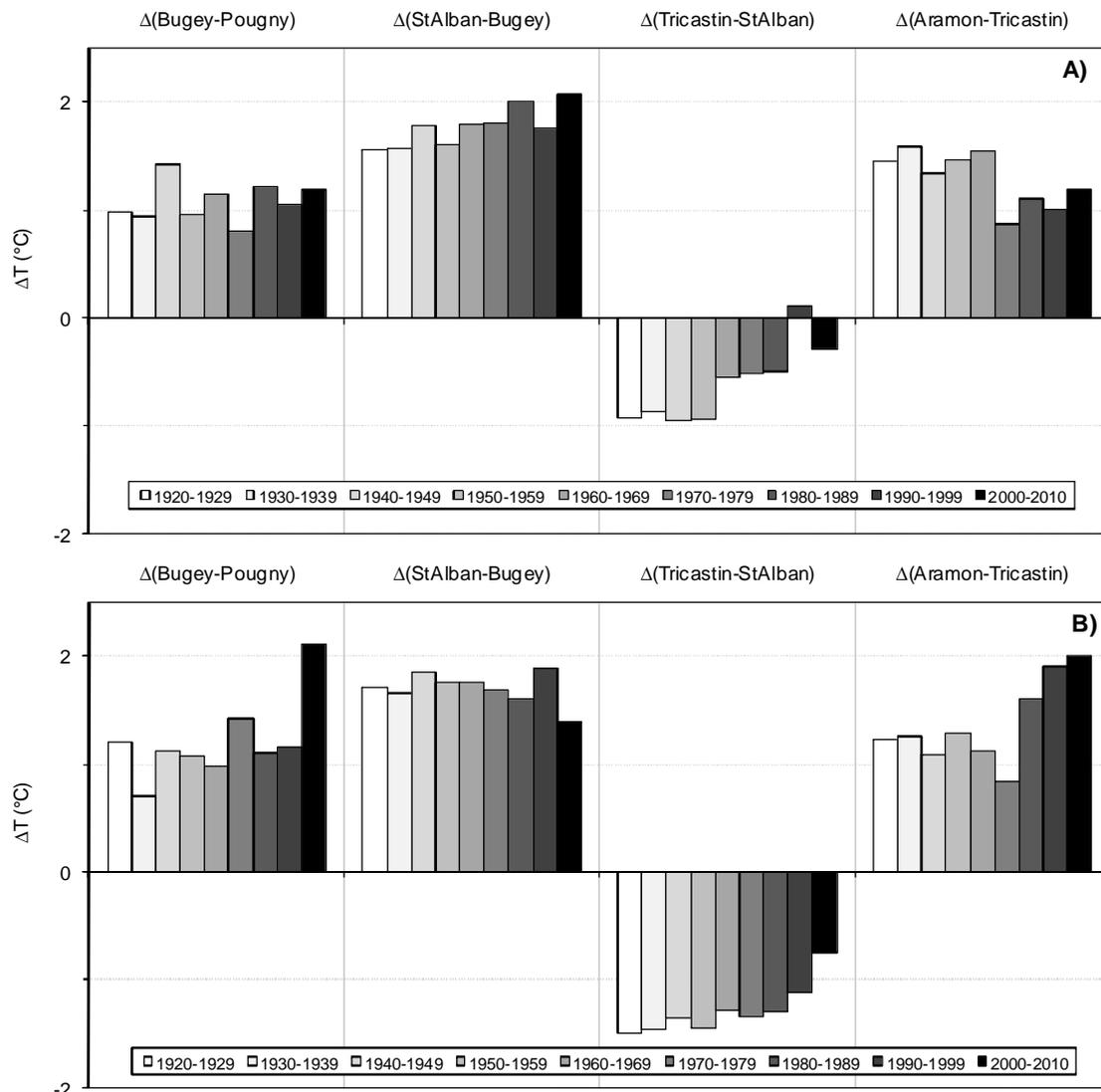


**Figure 20 - Évolution longitudinale des variations décennales par rapport à la médiane interannuelle pour les stations du Rhône (A) et de ses affluents (B)**

On observe une structure aléatoire dans la distribution des écarts : périodes chaudes (écarts positifs à la médiane) et périodes froides (écarts négatifs à la médiane) alternent de manière plus ou moins indéterminée. Pour presque toutes les stations, la décennie la plus chaude est celle de 2000-2010, avec des écarts à la médiane interannuelle compris entre +0.3°C et +1.6°C. A noter que la décennie 1940-1949 ressort également par ses températures médianes largement supérieures à la médiane interannuelle. A l'inverse, la décennie 1970-1979 montre les températures médianes les plus faibles, en particulier sur le Rhône (écarts entre -0.5°C et -1.0°C).

Écarts par tronçon sur le Rhône

L'analyse d'inter-comparaison a été poursuivie en calculant les écarts de température entre les différentes stations du Rhône, toujours sur une base décennale. Ainsi, l'évolution spatio-temporelle de la thermie a pu être considérée à partir des tronçons Pougny – Bugey, Bugey – Saint-Alban, Saint-Alban – Tricastin et Tricastin – Aramon. La Figure 29 présente la distribution des écarts pour les médianes (Figure 29a) et pour les q99% (Figure 29b).

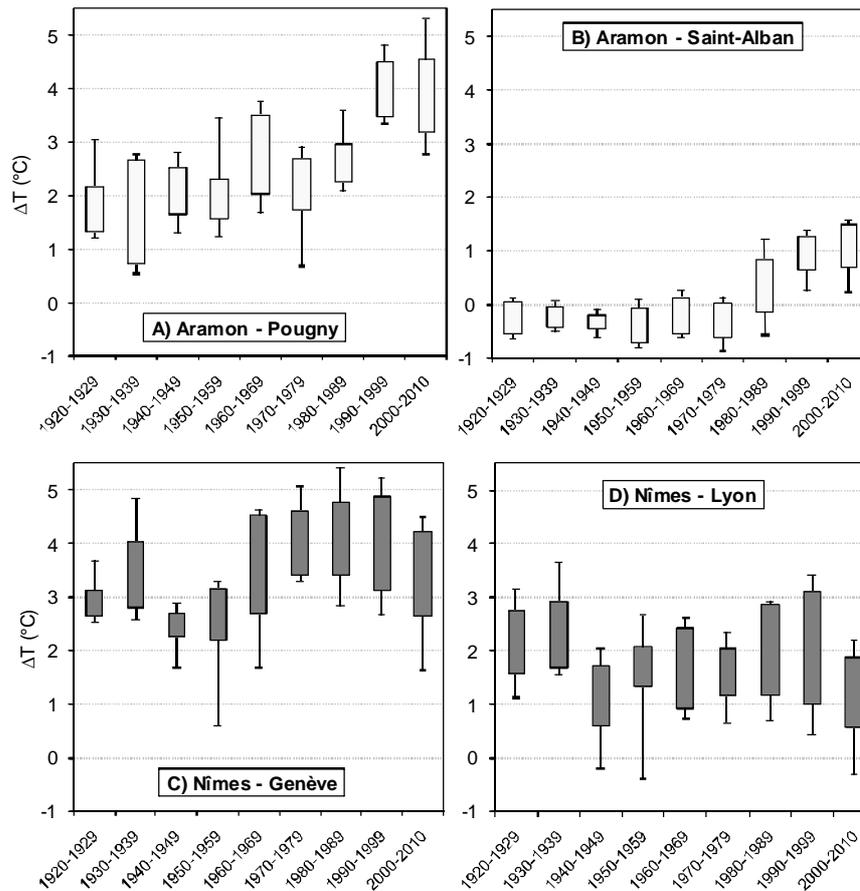


**Figure 21 - Évolution des écarts entre médianes par décennie (A) et entre q99% par décennie (B) pour les quatre tronçons du Rhône**

Aucune évolution significative entre Pougny et Bugey n'est visible sur les valeurs médianes. L'écart semble être stable, autour de +1°C à Bugey. Entre Bugey et Saint-Alban, il semble que l'écart médian augmente au fil des décennies, alors même qu'il diminue entre Saint-Alban et Tricastin. On observe enfin un décrochage dans les écarts médians entre Tricastin et Aramon, avec des valeurs sensiblement plus proches depuis la décennie 1970-1979 (passage de +1.5°C à +1°C environ).

A la différence des températures médianes, les valeurs de q99% font état d'une augmentation nette entre Pougny et Bugey, qui s'accroît fortement sur la dernière décennie ; cette hausse de l'écart sur le tronçon amont doit être mise en regard de la diminution de l'écart entre Bugey et Saint-Alban : les températures extrêmes ont donc augmenté davantage au droit de la station de Bugey qu'à Pougny et Saint-Alban. Plus en aval, on observe une diminution de l'écart (négatif) sur le tronçon Saint-Alban – Tricastin, concomitant à une augmentation de l'écart (positif) sur le tronçon Tricastin – Aramon. Les stations de Tricastin et d'Aramon ont donc également été affectées par une hausse de leurs températures extrêmes, et ce en particulier au cours des trois dernières décennies.

Bien que les tendances observées dans ce dernier graphique paraissent peu équivoques, nous avons souhaité vérifier si les variations d'une décennie à l'autre ne sont pas portées par une seule année remarquable (par exemple par l'année 2003 pour la dernière décennie), et si elles ne sont pas la conséquence de variations dans le forçage atmosphérique. Les q99% annuels et non décennaux ont donc été analysés (Figure 30), en se focalisant sur deux tronçons de référence : le tronçon Aramon – Pougny d'une part (Figure 30a), qui est intégrateur de l'ensemble des processus thermiques se produisant dans le fleuve ; et le tronçon Aramon – Saint-Alban d'autre part (Figure 30b), qui devrait mettre en évidence l'effet conjugué des réchauffements observés entre Saint-Alban et Tricastin et entre Tricastin et Aramon. En parallèle, le même exercice a été mené sur les q99% annuels de température de l'air, en considérant deux tronçons fictifs équivalents aux deux tronçons du fleuve : Nîmes – Genève (Figure 30c) et Nîmes – Lyon (Figure 30d).



**Figure 22 - Évolution inter-décennie des écarts de température entre q99% annuels pour deux tronçons du Rhône et pour les stations météorologiques correspondantes. Les boîtes représentent les écarts interquartiles (q25% et q75%) alors que les extrêmes correspondent aux q10% et q90%.**

La figure fait ressortir la même tendance à la hausse sur les dernières décennies, autant entre Aramon et Saint-Alban (l'écart médian évoluant de -0.3°C à +1°C environ) qu'entre Aramon et Pougny (l'écart médian évoluant de +2°C à +4°C environ). Ce résultat infirme donc l'hypothèse de la prédominance d'une année particulière pour l'explication des évolutions inter-décennie : la tendance est bien généralisée. A l'inverse, les variations des écarts de température de l'air n'affichent pas d'évolution nette sur la période d'étude. Le phénomène décrit est donc principalement (sauf dans certains cas, cf. réchauffement de la Saône) le fait de processus thermiques ayant lieu au sein du fleuve.

Cette hausse des écarts de température de l'eau s'amorce véritablement à partir de la décennie [1980-1989] pour le Haut-Rhône et, à partir de la décennie [1990-1999] à l'échelle de l'ensemble du Rhône français. Ces années de rupture correspondent à la période de mise en production des CNPE du Rhône (entre 1977 et 1986) et sont également concomitantes à l'année de rupture généralement identifiées dans les températures de l'air, en 1987 (cf 3.3.2).

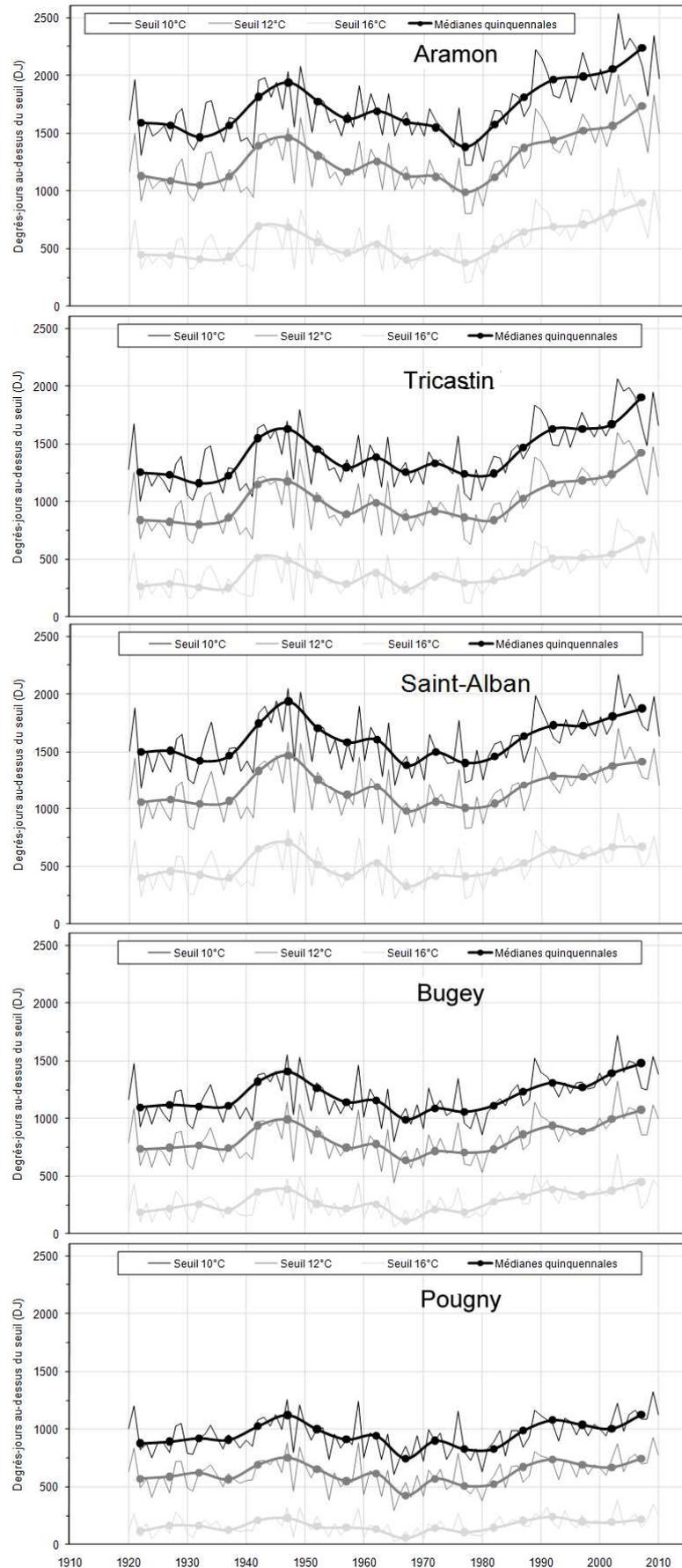
### 3.2.5. Évaluation de l'évolution des indicateurs thermiques utilisés en écologie

Les biologistes se basent généralement sur le cumul de degré.jour de la température de l'eau au dessus d'un seuil de température pour caractériser les cycles biologiques de certaines espèces aquatiques. En fonction des lieux et des espèces, ce seuil de température est variable. Par exemple, pour les cyprinidés, il est généralement admis que ce seuil est proche de 12°C. Nous avons choisi de déterminer la valeur de cet indicateur pour différents seuils afin que cet indicateur puisse être utilisé pour un large panel de situations et/ou d'espèces.

D'un point de vue longitudinal, le graphique suivant montre que cet indicateur augmente assez régulièrement de l'amont vers l'aval, quelque soit le seuil retenu.

D'un point de vue temporel, on remarque que depuis la fin des années 1980, cet indicateur augmente également de façon sensible sur l'ensemble du Rhône, excepté pour Pougny. L'évolution relative est la plus marquée pour le seuil à 16°C, pour lequel la valeur de l'indicateur augmente de près de 100% (doublement de la valeur). Pour les seuils à 12°C et 16°C, l'évolution à la hausse est surtout marquée sur le Bas Rhône (Aramon et Tricastin) où la valeur peut augmenter d'environ 50 % depuis 1980.

Les graphiques présentés dans les fiches de synthèse (annexe) montre que le jour julien de franchissement des seuils 10, 12 et 16°C tend à devenir plus précoce sur les dernières décennies, bien que la tendance soit moins significative que celle de l'évolution des degrés-jours.



**Figure 23 - Évolution de la Somme des degré.jours au dessus des seuils 10,12 et 16°C**

### **3.2.6. Synthèse sur les analyses de tendance**

À l'exception de la station située sur l'Arve, toutes les séries de températures analysées témoignent d'une hausse, de 0.5 à 2°C des températures moyennes annuelles sur la période 1920-2010, avec un maximum sur le Bas-Rhône (Tricastin et Aramon) et sur la Saône. Cette augmentation est maximum pour les mois d'été. Elle peut atteindre un maximum de 3.5°C en août à Aramon. L'augmentation séculaire de la température du Rhône n'a pas été linéaire : l'intégralité de la hausse provient de la période récente [1987-2010], pendant laquelle les rejets thermiques des CNPE, le réchauffement des températures de l'air et d'autres facteurs anthropiques ont été à l'origine de ce réchauffement des températures du Rhône.

Cette hausse des températures se traduit également sur les indicateurs utilisés en écologie comme le cumul des degrés-jours. La valeur de cet indicateur augmente régulièrement de l'amont vers l'aval. Sur cet indicateur, on retrouve l'évolution marquée à la hausse depuis 1987 avec des valeurs qui ont pu augmenter de 30% sur le Rhône aval (e.g. Aramon).

### 3.3. EVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES REJETS THERMIQUES DES CNPE A L'ÉLEVATION DES TEMPÉRATURES DU RHÔNE

#### 3.3.1. Préambule

La contribution des rejets thermiques des CNPE à l'évolution des températures du Rhône a été détaillée dans les phases précédentes de l'étude et notamment dans la phase 2 de l'Étude Thermique Rhône (ETRP2) basée sur l'examen des données [1991-2003].

Cette partie présente les compléments d'informations apportés par les nouvelles modélisations RN, calés sur des périodes plus longues [1977-2010], et surtout permettant de replacer les évolutions récentes dans un contexte évolutif à plus grande échelle temporelle [1920-2010].

#### 3.3.2. Définition des périodes temporelles étudiées

Météo France dispose de nombreuses séries de températures de l'air sur le territoire français depuis au moins le début du XXe siècle.

Ces séries ont fait l'objet de plusieurs études statistiques, notamment à l'échelle régionale pour les régions de Bourgogne et du Languedoc-Roussillon ainsi que pour le Val de Loire, dont voici quelques exemples :

- ADEME-Météo France, 2011. Changement climatique au 20ème siècle en Languedoc-Roussillon. [http://www.ademe.fr/languedoc-roussillon/docs/ChangementClimat\\_LR\\_20eSi%C3%A8cle\\_web.pdf](http://www.ademe.fr/languedoc-roussillon/docs/ChangementClimat_LR_20eSi%C3%A8cle_web.pdf)
- Feuillet T., 2009. L'évolution des températures à Nantes entre 1946 et 2000. Analyses statistiques des ruptures de tendance et interprétations. Cahiers nantais.
- Madelin M., Bois B., Chabin JP., 2010. Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique, EchoGéo.

Ces études mettent en avant une rupture dans la série des températures de l'air autour de **1987**. Par ailleurs, la mise en production du parc nucléaire (et des principaux rejets thermiques) s'est réalisée progressivement entre 1977 (Bugey) et 1986 (Tricastin).

Lors de la période « ancienne » [1920-1977], la variabilité interannuelle de la température du Rhône a été très marquée mais sans réelles tendances évolutives des températures. Dans les analyses présentées ci-après, il a été donc choisi de séparer la période ancienne [1920-1977], sans rejets thermiques significatifs liés aux CNPE, et la période récente [1988-2010] pendant laquelle les rejets des CNPE n'ont pas évolué. La période intermédiaire a été écartée pour ne pas inclure de biais liés à la montée progressive en puissance des CNPE sur le Rhône.

L'effet des rejets thermiques des CNPE sur la température du Rhône a ainsi pu être précisé à l'aide des modèles RN :

- en comparant sur la période récente les simulations avec et sans rejets thermiques des CNPE (puissance initialisées à 0),
- en comparant les températures de la période ancienne (sans CNPE) avec celles de la période récente (avec et sans rejets thermiques des CNPE).

#### 3.3.3. Effets des rejets thermiques des CNPE sur les températures du Rhône

##### 3.3.3.1. Effet des CNPE sur l'évolution séculaire des températures du Rhône

Dans l'analyse destinée à quantifier l'augmentation séculaire des températures de l'eau du Rhône, il a été choisi de comparer :

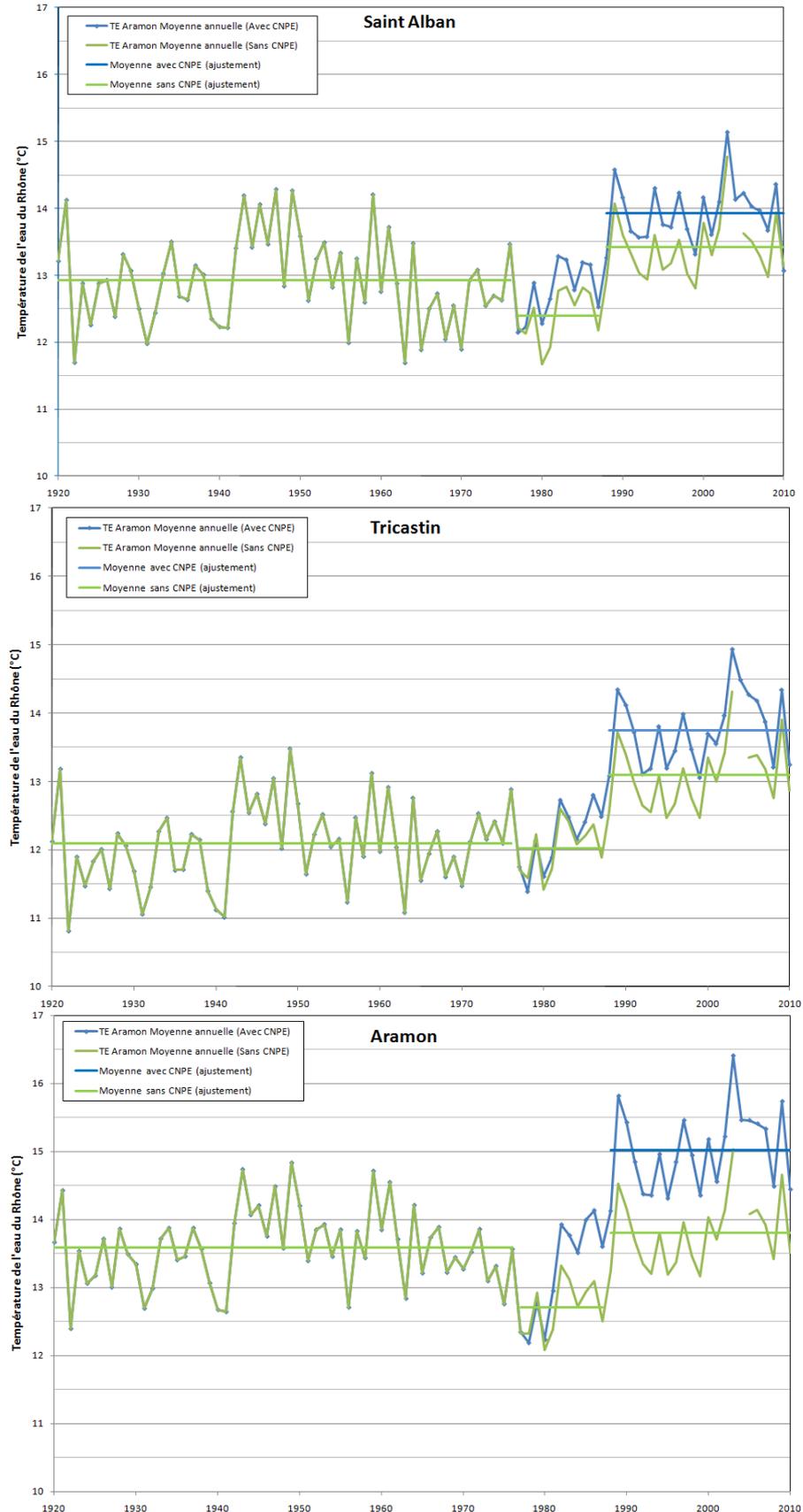
- la période « pré-nucléaire » entre [1920-1977] pendant laquelle la variabilité interannuelle des températures de l'eau est très marquée mais sans réelles tendances évolutives des températures,
- à la période climatique récente [1988-2010], période pendant laquelle les rejets thermiques n'ont pas été sensiblement modifiés et période où il a été montré une augmentation des T°C air sur le bassin.

Dans un premier temps, l'évolution des températures moyennes annuelles, produites par les modèles RN préalablement calés au niveau des 3 stations potentiellement impactées par les rejets thermiques des CNPE (Saint-Alban, Tricastin et Aramon)<sup>1</sup>, a été étudiée pour :

- le scénario de référence (avec les CNPE, *i.e.* comparables aux mesures)

<sup>1</sup> On rappellera que le nom de la station étudiée correspond à l'amont du Centre de Production d'Électricité éponyme.

▪ un scénario sans les CNPE (en initialisant à 0 les puissances des CNPE dans les données d'entrée du modèle).  
 Pour ces 2 scénarios, les températures moyennes annuelles, sont présentées dans les graphiques ci-après :



**Figure 24 - Évolution des températures annuelles moyennes, avec et sans CNPE**

D'après l'analyse des courbes précédentes, l'augmentation de la température moyenne annuelle entre 1920 et 2010, a été comprise entre 1.0°C à Saint-Alban et 1.6°C à Tricastin<sup>2</sup>. Cette augmentation globale intègre les effets de l'augmentation de la température de l'air, des rejets thermiques des CNPE, mais également des autres effets anthropiques.

Le scénario « sans rejets thermiques des CNPE » montre que cette dernière augmentation n'aurait pas dépassé 1.0°C en l'absence de rejets des CNPE (toutes choses étant égales par ailleurs) et permet de distinguer la part contributive des rejets thermiques des CNPE à l'augmentation des températures du Rhône.

	Saint-Alban	Tricastin	Aramon
<b>Températures moyennes annuelles</b>			
Moyenne des Temp. [1920-1976], en °C	12.93	12.09	13.59
Moyenne des Temp. [1977-1987] sans CNPE, en °C	12.40	12.02	12.70
Moyenne des Temp. [1988-2010] sans CNPE, en °C	13.42	13.09	13.81
Moyenne des Temp. [1988-2010] avec CNPE, en °C	13.92	13.75	15.02
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - [1920-1976], en °C	0.99	1.66	1.43
Augmentation des Temp. (sans CNPE, [1988-2010]) - [1920-1976], en °C	0.49	1.00	0.22
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - (sans CNPE [1977-1987]), en °C	1.52	1.73	2.32
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - (sans CNPE, [1988-2010])	0.50	0.66	1.21
Contribution des CNPE à l'augmentation des TE Moyenne/ période [1920-1976], en %	51%	40%	85%
Contribution des CNPE à l'augmentation des TE Moyenne/ période [1977-1987], en %	33%	38%	52%
<b>Températures "chaudes" (q95%)</b>			
Moyenne des Temp. [1920-1976], en °C	21.72	20.5	21.68
Moyenne des Temp. [1977-1987] sans CNPE, en °C	20.93	19.96	20.76
Moyenne des Temp. [1988-2010] sans CNPE, en °C	22.64	21.78	22.70
Moyenne des Temp. [1988-2010] avec CNPE, en °C	23.36	22.58	24.31
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - [1920-1976], en °C	1.64	2.08	2.63
Augmentation des Temp. (sans CNPE, [1988-2010]) - [1920-1976], en °C	0.92	1.28	1.02
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - (sans CNPE [1977-1987]), en °C	2.43	2.62	3.55
Augmentation des Temp. (avec CNPE, [1988-2010]) - (sans CNPE, [1988-2010])	0.72	0.8	1.61
Contribution des CNPE à l'augmentation des TE les plus chaudes (q95%) / période [1920-1976], en %	44%	38%	61%
Contribution des CNPE à l'augmentation des TE les plus chaudes (q95%) / période [1977-1987], en %	30%	31%	45%

**Tableau 2. Synthèse de l'évolution des températures annuelles moyennes et « chaudes » (q95%) avec et sans CNPE, et évaluation de la part contributive des CNPE au réchauffement global du Rhône**

Par construction, cet indicateur global (moyenne annuelle) intègre des périodes froides (e.g. goutte froide) pendant lesquelles les rejets thermiques vont contribuer à limiter la chute brutale des températures et des périodes chaudes pendant lesquelles les rejets thermiques peuvent accentuer les températures les plus élevées. Dans le premier cas, l'effet de réchauffement pourrait être bénéfique pour les écosystèmes (limitation des extrêmes froids et des gradients) alors que pour le second, un effet préjudiciable pourrait être observé.

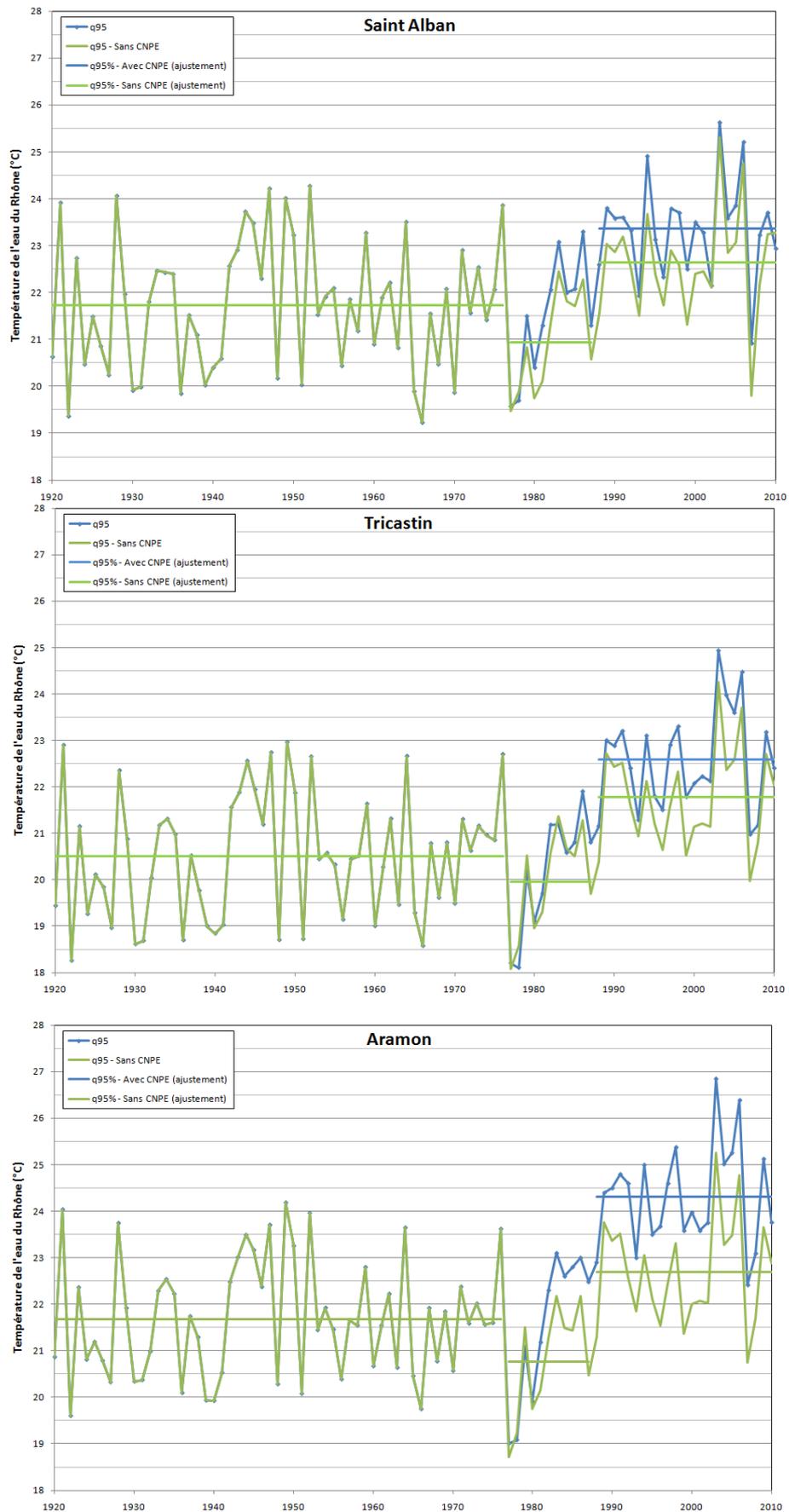
Plus encore que la moyenne annuelle, il est donc apparu pertinent, d'un point de vue écologique, d'analyser l'évolution des **températures les plus « chaudes » de l'année**. Pour cela le quantile 95 (q95%) a été retenu afin de caractériser les températures les plus chaudes rencontrées 5% de l'année, soit 18 jours/an.

L'augmentation des températures annuelles les plus chaudes (q95%, soit les 18 jours les plus chauds de l'année) est de 1.6°C à l'amont de Saint-Alban à 2.6°C à l'amont d'Aramon, entre les périodes [1920-1977] et [1988-2010]. Sans les rejets des CNPE, ces hausses auraient été plus limitées, entre 0.9°C à Saint-Alban et 1.2°C à Tricastin.

La part contributive (en %) des rejets thermiques des CNPE à l'élévation des températures du Rhône dépend étroitement du choix de la période de référence pour la comparaison avec les températures récentes [1988-2010]. Avec comme référence la période « pré-CNPE » [1920-1977], sans rejets thermiques significatifs et antérieure à l'année climatique charnière de 1987, la contribution des rejets thermiques CNPE peut être évaluée à 44% de l'augmentation séculaire des températures « chaudes » à Saint-Alban, 38% à Tricastin et 61% à Aramon.

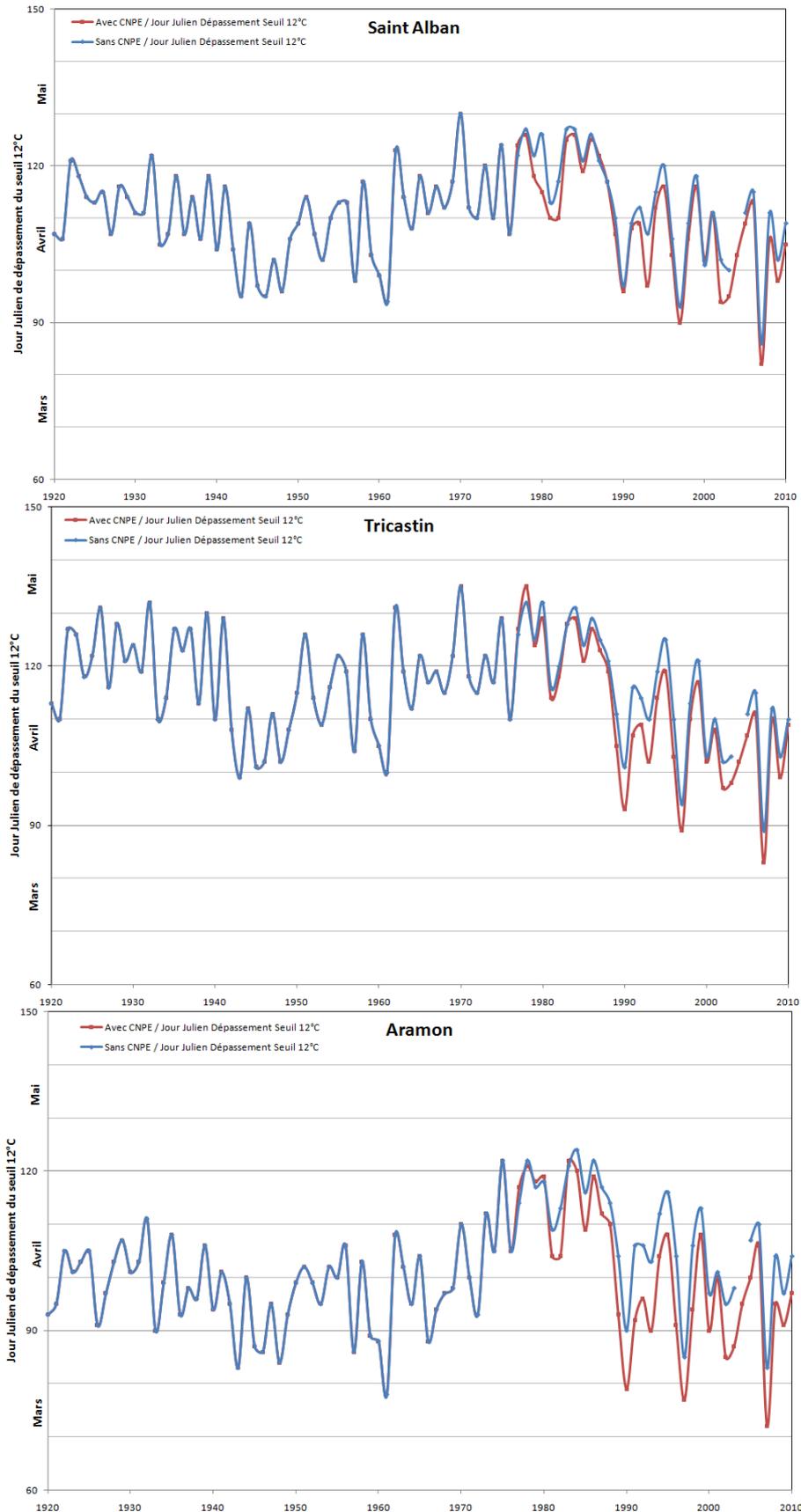
Avec comme référence la période [1977-1987], correspondant au début des mesures (utilisées dans l'étude ETRP2), ces chiffres chutent respectivement à 30, 31 et 45%.

<sup>2</sup> Ces chiffres sont légèrement plus faibles que ceux présentés précédemment. Ici ils correspondent au décalage entre les 2 périodes étudiées alors que dans la partie 3.2.1, ils sont issus d'une régression linéaire sur l'ensemble de la série [1920-2010].



**Figure 25 - Évolution des températures les plus élevées de l'année (q95%), avec et sans CNPE**

### 3.3.3.1. Effets sur la précocité des cycles annuels



**Figure 26. Évolution de la date de dépassement du seuil de température de 12°C, avec et sans CNPE**

Chaque cycle annuel de température a été analysé en déterminant la série de Fourier associée (à 2 harmoniques). Ce lissage permet notamment de comparer la précocité des cycles annuels, par exemple en déterminant la date (unique avec le lissage) de passage au dessus d'un seuil de température.

Dans les analyses suivantes, pour des raisons écologiques (cf ETRP3), il a été retenu un seuil de température de 12°C. Ces analyses ont ainsi permis de déterminer l'effet des CNPE sur la précocité des cycles annuels en analysant la date de dépassement du seuil de 12°C, au printemps.

Les graphiques précédents montrent tout d'abord que les dates de dépassement du seuil de 12°C sont assez comparables à Saint-Alban et à Tricastin ; les cycles de Tricastin étant légèrement plus précoces qu'à Saint-Alban, en lien avec l'arrivée d'eau froide de l'Isère. A Aramon, le seuil de 12°C est dépassé une vingtaine de jours plus tôt qu'à Tricastin.

A cette variabilité longitudinale, s'ajoute une importante variabilité interannuelle du jour julien (jour de l'année) de dépassement du seuil de 12°C. Pour une même série (avec ou sans CNPE), cette date peut varier d'un mois environ.

Grâce aux simulations issues des modèles RN, il a été possible d'évaluer l'effet des CNPE sur les dates de dépassement de ce seuil de 12°C, sur la période [1988-2010]. Les rejets thermiques des CNPE sont à l'origine d'un avancement des dates de dépassement du seuil à 12°C, d'environ 3 jours à Saint-Alban, 4.5 jours à Tricastin et 8.5 jours à Aramon.

Les rejets thermiques des CNPE sont à l'origine d'une précocité des cycles annuels (date de dépassement du seuil à 12°C) de 3 à 8 jours suivant les stations, en sachant que la variabilité interannuelle « naturelle » est d'environ 1 mois.

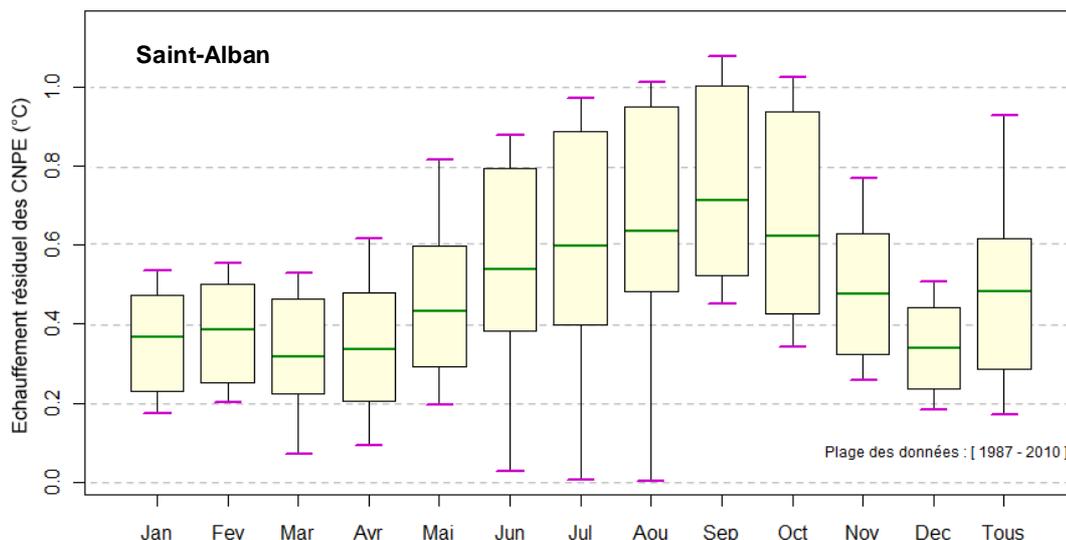
### 3.3.3.2. Effets saisonniers

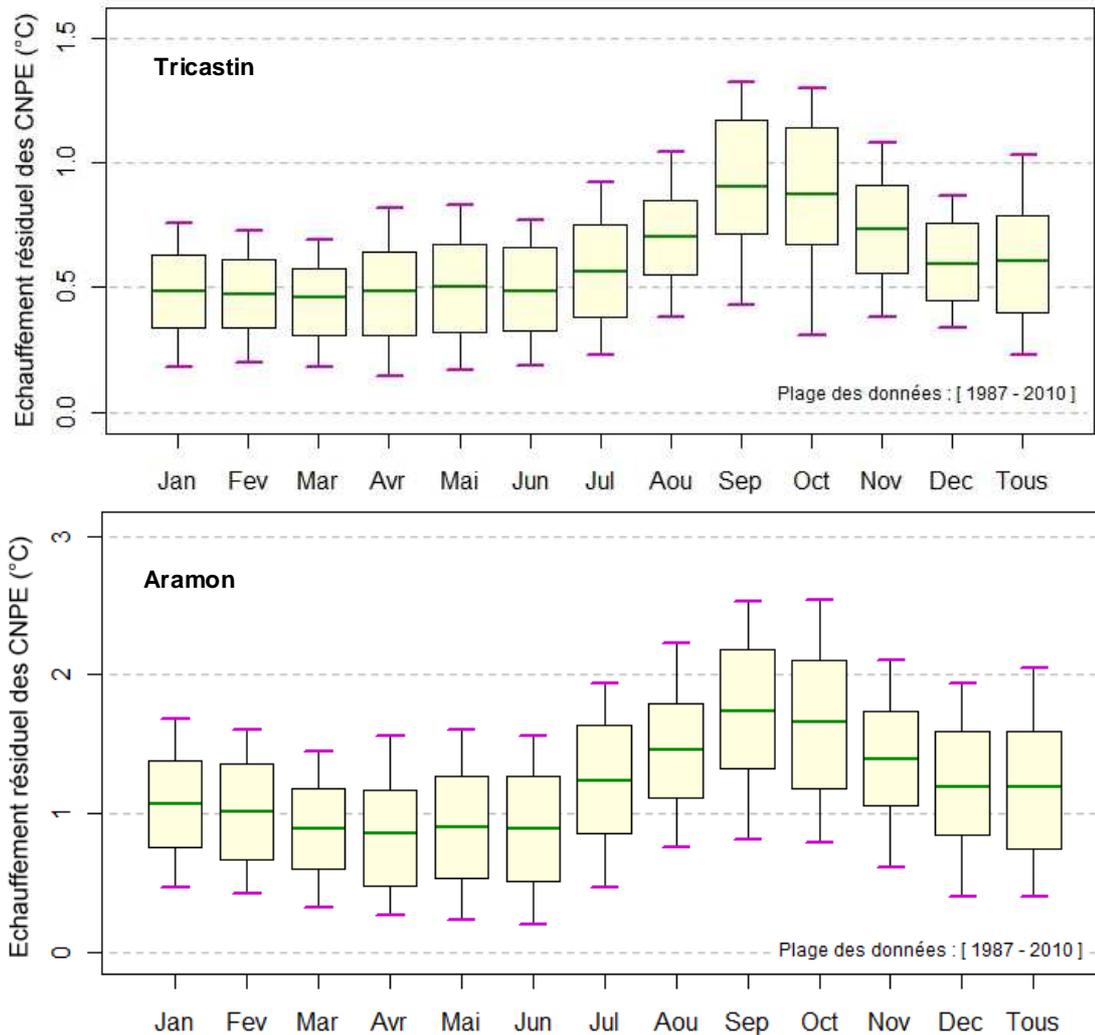
Les modèles RN (Saint-Alban, Tricastin et Aramon) préalablement calés sur les mesures disponibles ont permis de simuler quelles auraient été les températures du Rhône sur la période [1987-2010], sans la présence des rejets thermiques des CNPE. Pour chaque mois de l'année, la différence entre la température modélisée (avec les CNPE) et cette température simulée (sans les CNPE) permet d'estimer l'échauffement induit par les rejets thermiques des CNPE (Bugey, Saint-Alban et Tricastin) du Rhône.

Les graphiques suivants montrent un échauffement médian lié aux CNPE (différence avec et sans CNPE) d'environ 0.5°C à Saint-Alban, 0.6°C à Tricastin et 1.2°C à Aramon, sur la période [1987-2010].

Ces graphiques montrent également une saisonnalité des échauffements avec des *minima* au printemps et des *maxima* autour du mois de septembre.

Il n'y a pas de concomitance entre les échauffements maximum (septembre) et les températures de l'eau les plus élevées (juillet-août). En effet, en cas de températures élevées du Rhône les contraintes réglementaires sont à l'origine d'une diminution de la production des CNPE et de leurs rejets thermiques associés. Comme il a été évoqué ci-avant, la part contributive des CNPE à l'échauffement des températures est ainsi plus faible pour les températures élevées (q95%) que pour les températures moyennes.





**Figure 27 - Échauffements résiduels des CNPE à Saint-Alban, Tricastin et Aramon**

### 3.3.4. Cohérence avec les résultats de l'ETRP2

En plus de caractériser l'effet des rejets thermiques des CNPE sur les températures du Rhône, l'ETRP2 avait permis de quantifier l'augmentation globale des températures avec comme température de référence, les températures du début de la période de suivi, *i.e.* fin des années 1970/début des années 1980.

Cette période correspond à des températures particulièrement froides, *i.e.* parmi les plus froides depuis 1920. La comparaison des températures entre les périodes [1977-1986] et [1987-2003] avait permis de caractériser cette augmentation sur une fenêtre temporelle relativement courte.

Les « rythmes » (gradients) d'augmentation des températures présentées alors sont supérieurs à ceux indiqués ci-dessus, puisque la température initiale de référence est différente. Si on compare les données de l'ETRP2 et celles de l'ETRP4 sur une même fenêtre temporelle, elles sont néanmoins comparables, dans la limite des précisions des températures mesurées (0.3°C) et modélisées (1°C).

Entre les périodes [1920-1977] et [1988-2010], l'augmentation des températures annuelles les plus chaudes est de 1.6°C à l'amont de Saint-Alban à 2.6°C à l'amont d'Aramon. Les rejets thermiques des CNPE ont contribué à ces hausses, à hauteur de 0.7°C à Saint-Alban et 1.6°C à Aramon.

Sur la base des températures reconstituées par modélisation sur les périodes [1920-1977] et [1988-2010], l'augmentation séculaire de la température moyenne annuelle, a été comprise entre 1.0°C à Saint-Alban et 1.6°C à Tricastin et 1.4°C à Aramon.

En comparant les mêmes périodes, l'augmentation des températures annuelles les plus chaudes est de 1.6°C à l'amont de Saint-Alban, 2.1°C à Tricastin et 2.6°C à l'amont d'Aramon. Les rejets thermiques des CNPE ont contribué à ces hausses, à hauteur de 0.7°C à Saint-Alban, 1.3°C à Tricastin et 1.6°C à Aramon.

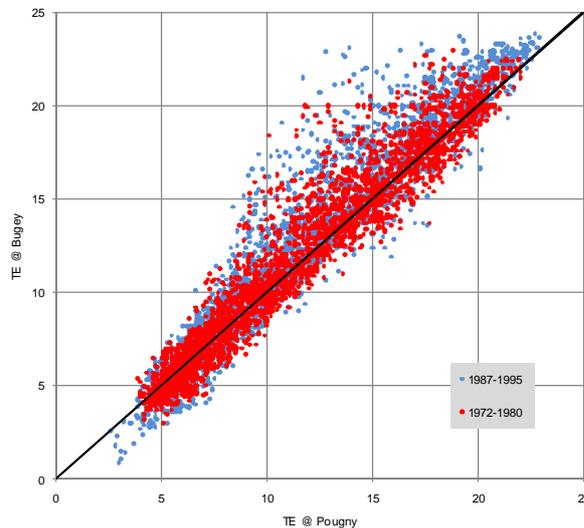
### 3.4. ÉVALUATION DE L'EFFET DES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES SUR LA THERMIE

Nos travaux d'extension des séries sont entachés d'une incertitude quant à leur fiabilité sur les périodes antérieures aux aménagements du fleuve. Nous avons tenté d'explorer plus en détail ce point, d'abord en étudiant l'évolution des mesures de température entre les stations de Pougny et de Bugey avant et après une série de barrages construits le long du tronçon dans les années 1980. Dans un second temps, nous avons mené des analyses de sensibilité des modèles au facteur "Volume des retenues".

#### 3.4.1. A partir des mesures de température, sur le Haut-Rhône

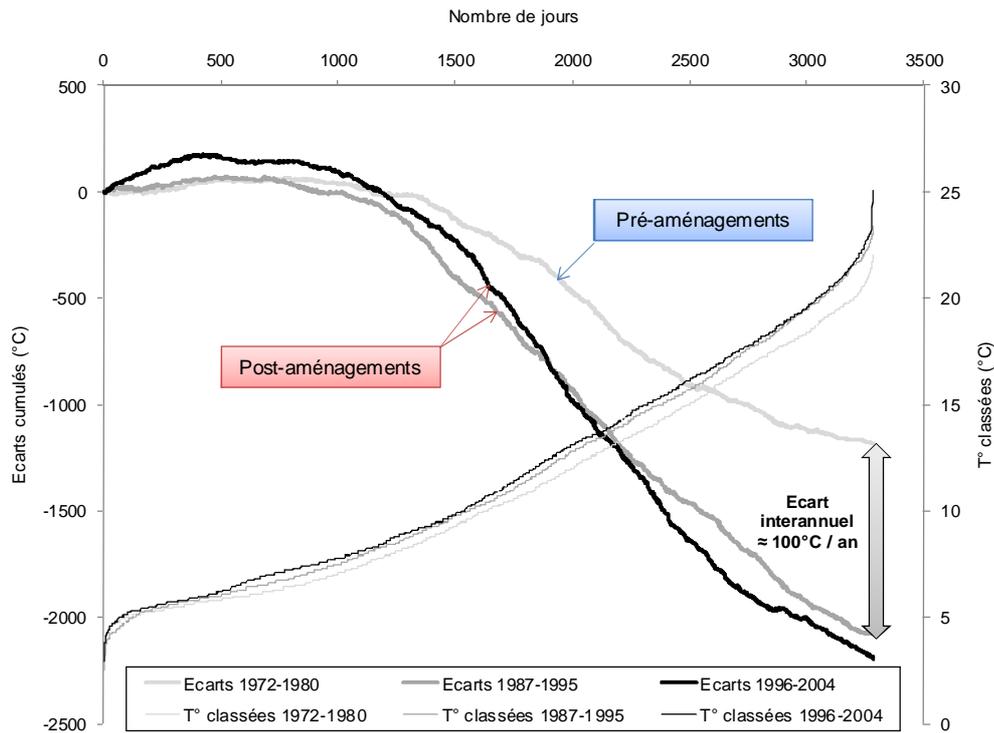
Entre 1981 et 1986 un total de quatre aménagements « récents » (par opposition à Génissiat, 1948) ont été construits sur le tronçon Pougny-Bugey. Il s'agit des retenues de Chautagne, Belley, Brégner-Cordon et Sault-Brénaz (volume total potentiellement stocké de 78 Mm<sup>3</sup>). Compte tenu du caractère relativement récent de ces ouvrages, des mesures de température sont disponibles à la fois avant et après leur construction. On se propose donc de mener une comparaison de l'état pré-aménagements récents [1972-1980] et de l'état post-aménagements récents [1987-1995].

La portée temporelle des données disponibles avant les aménagements à la fois à Pougny et à Bugey est de 9 ans (période 1972-1980). L'analyse s'est donc concentrée sur la comparaison du régime thermique de ces 9 années avec le régime thermique des 9 premières années post-aménagement (à savoir la période 1987-1995). En première approche, nous avons examiné la corrélation entre les séries de température sur ces 2 périodes test (Figure 17).



**Figure 28 - entre valeurs de température à Pougny et à Bugey pour les deux périodes identifiées**

La structure générale des deux nuages de points est assez similaire. La dispersion est plus élevée pour les valeurs comprises entre 15 et 25°C à Bugey, cette variabilité correspondant au temps de propagation d'épisodes soudains tels que les gouttes froides. Pour caractériser avec plus de précision les processus distinguant les 2 périodes, une analyse plus fine a été nécessaire. Faisant l'hypothèse que les différences sont potentiellement plus visibles pour les températures extrêmes, nous avons procédé au classement des températures journalières de Pougny sur chacune des 2 périodes (soit un total de 3288 valeurs). Puis, pour chaque valeur de température classée, le  $\Delta T$  correspondant ( $T_{\text{Pougny}} - T_{\text{Bugey}}$ ) a été calculé. En cumulant les valeurs de  $\Delta T$ , il a été possible de mettre en évidence certaines singularités, comme illustré en Figure 18. A noter que pour apporter de la robustesse à notre analyse, l'exercice a aussi été réalisé sur la période de 9 années suivante (1996-2004).

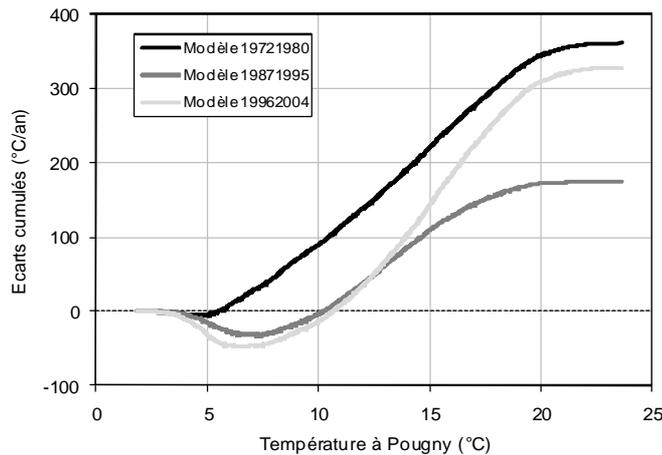


**Figure 29 - Courbes des températures classées à Pougny et des DeltaT cumulés correspondants sur le tronçon Pougny-Bugey pour 3 périodes distinctes**

Concernant les températures classées, les courbes des 3 périodes ont une allure semblable, bien que 1972-1980 présente des températures plus faibles. Ceci s'explique par l'effet du forçage atmosphérique, les années plus récentes étant globalement plus chaudes que les années 1970. Concernant les courbes cumulées, on observe un écart légèrement positif sur l'intervalle [0 – 6] °C, c'est-à-dire que dans des conditions hivernales, la température de Pougny est le plus souvent faiblement supérieure à celle de Bugey. Puis sur l'intervalle [6 – 25] °C, l'écart devient nettement négatif : le reste de l'année, la température de l'eau a plutôt tendance à augmenter le long du tronçon Pougny-Bugey. Ces constatations sont valables pour l'ensemble des 3 périodes testées.

Si l'on compare entre elles les courbes de  $\Delta T$  cumulés, on remarque que la structure des écarts est sensiblement différente entre la période antérieure et celles postérieures aux barrages. La période pré-aménagement exhibe un  $\Delta T$  global moins négatif que les 2 périodes post-aménagement : le bilan sur les 9 années est de  $-130^\circ\text{C}/\text{an}$  pour la période 1972-1980, contre  $-230^\circ\text{C}/\text{an}$  et  $-244^\circ\text{C}/\text{an}$  pour 1987-1995 et 1996-2004, respectivement. Cela correspond à une différence d'environ  $100^\circ\text{C}/\text{an}$  entre l'état pré-aménagement et l'état post-aménagement. D'après nos observations, l'effet des retenues sur la thermie se traduirait donc par un réchauffement plus important des eaux entre Pougny et Bugey depuis l'existence de la série d'aménagements sur ce tronçon. Ces résultats sont toutefois à tempérer, étant donné que d'autres variables peuvent avoir influé sur la température de l'eau sur ce tronçon.

Pour s'affranchir des autres variables (atmosphériques, hydrologiques) qui viendraient potentiellement bruite le signal, il a donc fallu caler 3 modèles à partir des 3 périodes identifiées (et ce à la fois à Pougny et à Bugey), puis utiliser ces modèles pour simuler la température de l'eau sur une autre période. Les écarts cumulés (Bugey-Pougny) entre valeurs simulées par ces trois modèles ont ensuite pu être confrontés (Figure 19). A la différence de la Figure 18, ces écarts sont positifs car ils correspondent à  $T_{\text{Bugey}} - T_{\text{Pougny}}$ .



**Figure 30 - Écarts cumulés moyens annuels des 3 modèles (simulations réalisées sur la période 1920-1970)**

Les deux courbes correspondant aux simulations post-aménagements récents (1987-1995 et 1996-2004) ont des structures similaires, avec une baisse observée pour les valeurs de température à Pougny inférieures à 7°C environ, puis une hausse jusqu'à 20°C environ, et enfin un palier jusqu'aux valeurs maximales. La courbe « pré-aménagements récents » (1972-1980) est quant à elle strictement ascendante pour des températures à Pougny de 5 à 20°C.

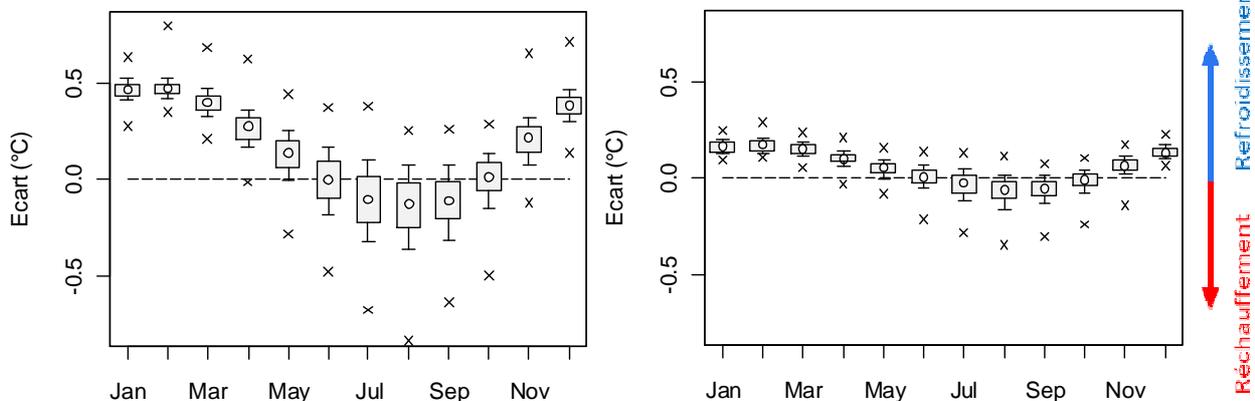
L'amplitude des écarts cumulés est très variable entre les modèles : +180°C/an en 1987-1995 contre +330°C/an en 1995-2004, alors que le modèle pré-aménagement présente une amplitude de +360°C/an. On ne peut donc pas tirer de conclusions certaines quant à l'impact des aménagements hydroélectriques « récents » [1981-1986] sur la thermie du Haut-Rhône.

### 3.4.2. A partir des données de simulation de température

Un exercice de calage double a été réalisé, en considérant une première famille de modèles intégrant la variable "Volume des retenues" dans leur calage (c'est-à-dire les modèles établis ci-avant), et une deuxième famille de modèles ne l'intégrant pas (modèles nouvellement développés à partir des précédents, en supprimant la variable en question de la liste des entrées). L'objectif était de déterminer si une différence significative affecterait les sorties des modèles, et ainsi de valider ou de récuser les hypothèses avancées précédemment.

#### À Bugey

L'analyse a été menée en distinguant les périodes antérieure et postérieure à la mise en service du barrage de Génissiat (1948). La Figure 21 décrit les écarts entre le modèle incluant la variable "Volume des retenues" (M) et le modèle construit à l'identique mais ne l'incluant pas (M<sub>v</sub>). Un écart positif correspond donc à une estimation plus élevée de la part du modèle "historique vrai" M comparé à celle du modèle "virtuel avec aménagements" M<sub>v</sub>. Dans un tel cas de figure, on considérera donc que la présence des retenues conduit à une diminution de la température. A l'inverse, si l'écart est négatif on en déduira une augmentation de la température en présence des ouvrages.

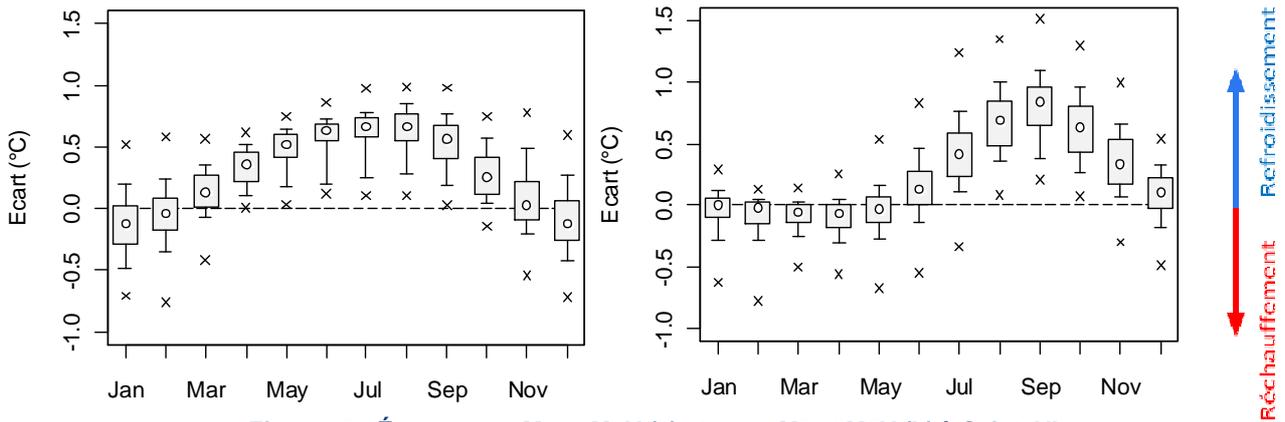


**Figure 31 - Écarts entre M et M<sub>v</sub> à Bugey pour les périodes 1920-1947 (a) et 1948-1971 (b)**

Les deux graphes ont des dynamiques similaires, bien que les amplitudes soient plus importantes pour la période 1920-1947. Le résultat le plus significatif est la diminution des températures hivernales en présence des retenues (écart positif). Cette baisse hivernale de la température de l'eau liée à la présence des barrages semble être moins marquée depuis la mise en eau de Génissiat : sur les mois de décembre, janvier et février, la médiane se trouve aux alentours de +0.5°C avant 1948, contre +0.2°C après (peu significatif). On observe également une augmentation légère des températures estivales, mais l'effet est moins marqué et la dispersion est plus importante.

À Saint-Alban

Le tronçon entre Bugey et Saint-Alban compte moins d'ouvrages hydroélectriques que les autres tronçons. Nous avons tout de même procédé aux tests de sensibilité sur les modèles M1 (données Ain et Saône en entrée) et M2 (sans données Ain et Saône), dont les résultats sont présentés en Figure 22.

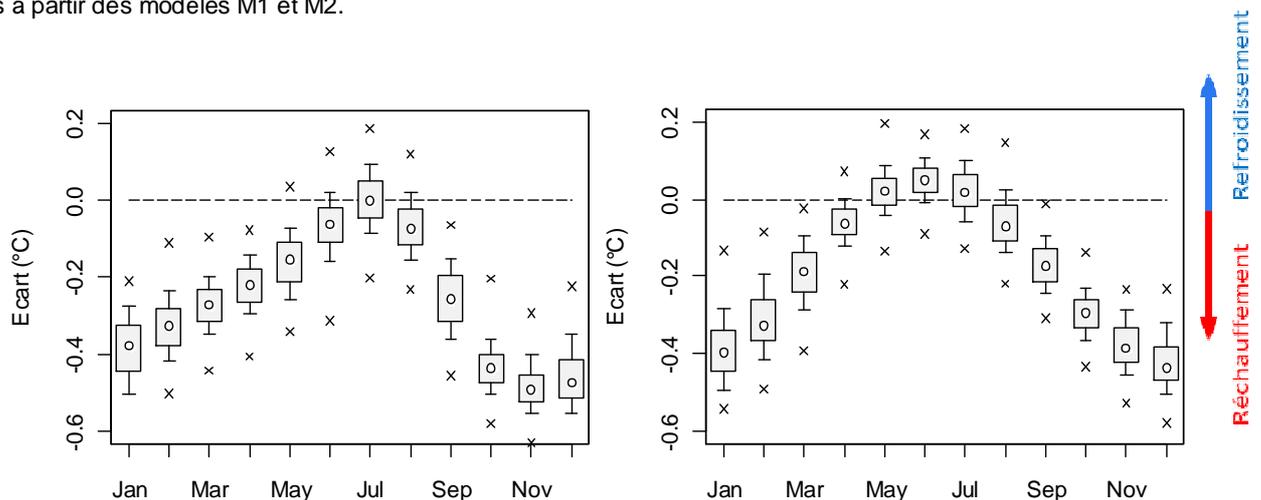


**Figure 32 - Écarts entre M1 et M1V (a) et entre M2 et M2V (b) à Saint-Alban**

Les résultats sont relativement différents selon le modèle considéré. La dispersion est plus importante pour le modèle M1 que pour M2. Toutefois, un élément commun aux deux analyses est la diminution des températures estivales provoquée par la présence des retenues (réduction de la variabilité thermique). Cet écart peut atteindre des valeurs de 0.5 à 1°C. Aucune tendance claire ne se dégage des périodes plus froides, où il semble que les différences soient moindres entre modèles historiques et virtuels.

À Tricastin

La station de Tricastin apparaît aussi comme un bon témoin de l'influence de la variable "Volume des retenues", car des variations importantes du paramètre ont lieu sur la période d'apprentissage des modèles. La Figure 23 expose les résultats obtenus à partir des modèles M1 et M2.



**Figure 33 - Écarts entre M1 et M1V (a) et entre M2 et M2V (b) à Tricastin**

La structure temporelle des écarts entre modèles est semblable pour M1 et pour M2. Selon les deux tests, un écart négatif de l'ordre de -0.5°C affecte les températures des mois hivernaux, l'écart diminuant progressivement pour atteindre des valeurs quasi-nulles en été. Le phénomène décrit est donc une augmentation des températures hivernales en présence des aménagements (réduction de la variabilité), bien que cela reste peu significatif.

### 3.4.3. Synthèse sur les effets des aménagements hydrauliques

La comparaison des mesures entre Pougny et Bugey (Section 3.2.1) a permis d'identifier une modification du régime thermique du fleuve avant et après l'aménagement récent du Haut-Rhône (entre 1981 et 1986, *i.e.* hors Génissiat), mais sans qu'il soit possible de caractériser l'effet thermique de ses aménagements et de leur gestion associée.

A plus grande échelle temporelle [1920-2010] et spatiale (tout le Rhône français), grâce aux modèles de température il a été possible de mettre en évidence un effet de l'ensemble des retenues (y compris Génissiat) sur le régime thermique du Rhône.

À Saint-Alban et à Tricastin, la variabilité saisonnière des températures est lissée par la présence des retenues. Ceci se manifeste à Saint-Alban par une diminution des températures estivales, et à Tricastin par une augmentation des températures hivernales. Ce phénomène peut être attribué à l'existence d'une stratification thermique dans les retenues, les couches d'eau en profondeur étant plus froides que celles à la surface pendant l'été, puis légèrement plus chaudes pendant l'hiver (cette thermocline est essentiellement due au fait que la densité de l'eau varie selon sa température). L'eau restituée en aval des retenues provient des couches en profondeur, il peut donc se créer un déséquilibre par rapport à l'état thermique naturel du fleuve (refroidissement en été, réchauffement en hiver). C'est ce type de mécanisme qui semble se produire sur le tronçon allant de Bugey à Tricastin. Cependant, la gamme de variations demeure relativement restreinte ( $\pm 1^\circ\text{C}$  maximum).

À Bugey, ce sont les températures hivernales qui sont le plus impactées, bien que la diminution soit très faible ( $-0.5^\circ\text{C}$  maximum). Ces résultats peuvent être expliqués par un rééquilibrage avec les conditions atmosphériques en sortie du lac Léman, rééquilibrage qui pourrait être favorisé par des temps de séjour augmentés à la faveur des ouvrages. Compte tenu de leurs faibles intensités, ces résultats n'ont pas été confirmés par l'analyse des mesures disponibles uniquement sur les périodes en pré et post-aménagements récents.

Les mesures de température disponibles avant et après la période récente d'aménagements du Haut-Rhône [1981-1986] n'ont pas permis de déterminer l'effet des aménagements hydrauliques récents (hors Génissiat) sur les modifications des régimes thermiques du Haut-Rhône.

A l'échelle du Rhône français, l'ensemble des aménagements hydrauliques ont un effet sur le régime thermique du fleuve, dont l'intensité dépasse rarement  $0,5^\circ\text{C}$ . Les retenues jouent un rôle tampon, de lissage caractérisé par une baisse de la variabilité des températures et par un réchauffement des températures hivernales qui peut atteindre  $0.4^\circ\text{C}$  en médiane mensuelle. En été, l'incidence des retenues sur la température du Rhône est différente suivant les stations ; l'effet de refroidissement étant le plus marqué, à Saint-Alban avec une incidence de  $0.6^\circ\text{C}$  (médiane des mois d'été).

## 3.5. ÉVALUATION DES EFFETS MARGINAUX SUR LES MODÈLES

Dans cette section, nous avons analysé la fonction de réponse des RN à des modifications marginales de certaines variables explicatives telles que la température de l'air, la température de l'eau en amont et le débit. L'objectif était d'une part de tester la robustesse des modèles, et d'autre part d'évaluer l'impact sur la température de l'eau de la modification (en faibles proportions) de l'une des variables de contrôle, toutes choses égales par ailleurs. La caractérisation des effets marginaux revient en fait à étudier les dérivées partielles de la température de l'eau en fonction de chacune des variables d'entrée. Dans notre cas, la variation totale de température de l'eau due aux modifications marginales des 3 variables de contrôle testées vérifie l'équation suivante :

$$dTE = \frac{\partial TE}{\partial TA} dTA + \frac{\partial TE}{\partial TE_{amont}} dTE_{amont} + \frac{\partial TE}{\partial Q} dQ \quad (1)$$

avec TE la température de l'eau, TA la température de l'air et Q le débit en un point.

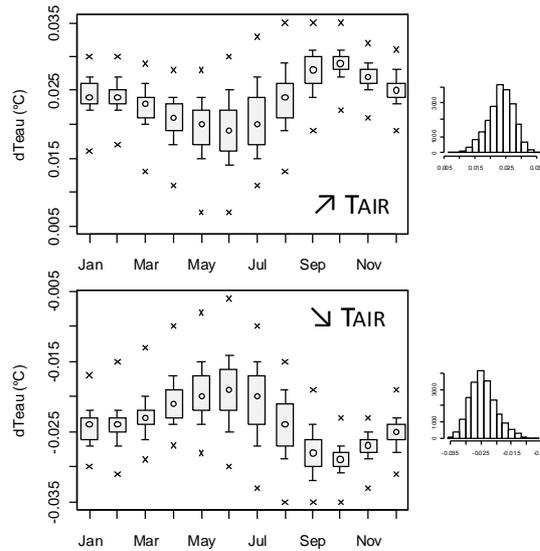
Ce travail a été mené pour chacune des stations étudiées sur le linéaire du Rhône. Les modifications testées depuis Pougny jusqu'à Aramon ont été les suivantes :

- variation de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  de la température de l'air
- variation de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  de la température de l'eau en amont (sauf à Pougny)
- variation de  $\pm 10 \text{ m}^3/\text{s}$  du débit
- variations combinées de température de l'air et de débit

### 3.5.1. Réponse des modèles à une modification minime

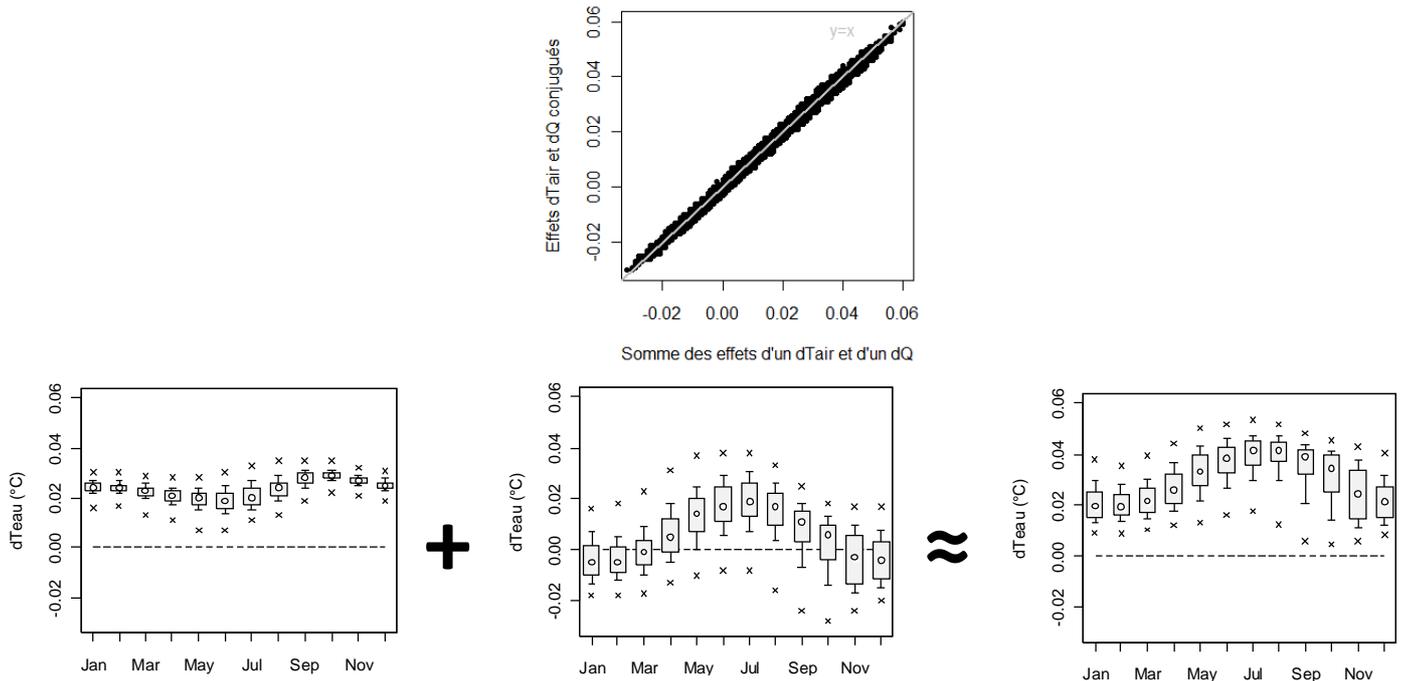
Les écarts entre température de l'eau simulée après modification et température de l'eau simulée sans modification des variables de contrôle, notés dTE, ont été calculés pour chaque scénario marginal testé. La structure des écarts a ensuite été analysée en fonction d'autres facteurs tels que le mois d'occurrence. Les réponses se sont avérées assez homogènes parmi les stations étudiées. Les points de convergence notoires sont :

1. la symétrie des réponses pour un delta positif et un delta négatif de la variable explicative. Ceci mène à penser que les effets marginaux sont bien décrits par des relations linéaires. La Figure 31 présente l'exemple à Saint-Alban des effets sur la température de l'eau d'une variation minime (positive et négative) de la température de l'air à Lyon. On notera le caractère symétrique de la distribution mensuelle des écarts.



**Figure 34 - Illustration de la symétrie des dTE pour une variation marginale de la température de l'air**

- l'indépendance des processus, mise en évidence par la comparaison entre la somme des effets de deux simulations (une variation de température de l'air et une variation de débit) et les effets conjugués de ces deux variations en une seule simulation. La comparaison a révélé des écarts quasiment identiques (voir Figure 32), ce qui va dans le sens de l'indépendance des deux réponses.

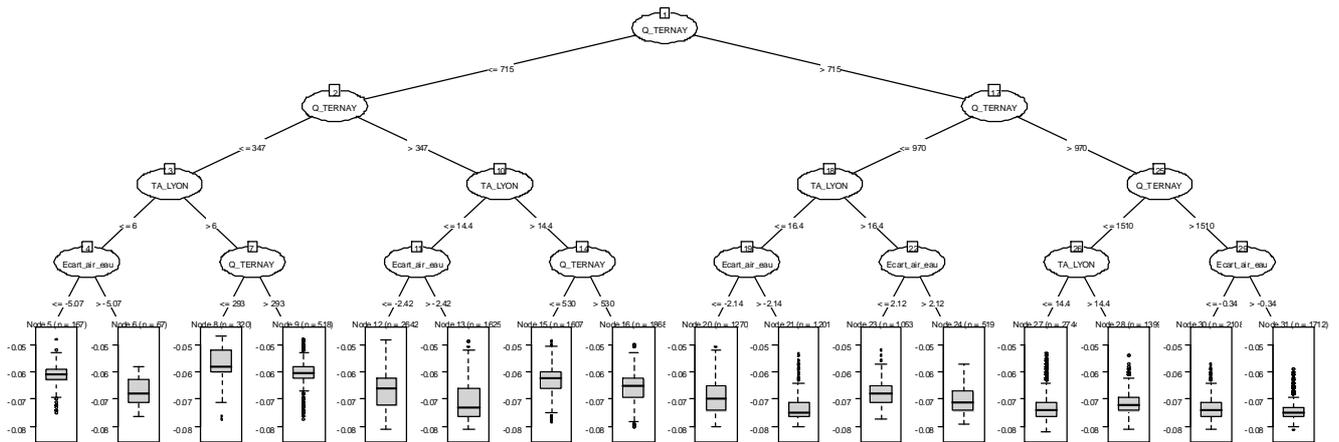


**Figure 35 - Comparaison entre les dTE issus de la somme des effets d'un dTAir et d'un dQ et les dTE issus des effets conjugués d'un dTAir et d'un dQ (exemple à Saint-Alban, dTA = +0.1°C et dQ = -10 m3/s)**

- une certaine saisonnalité dans les réponses, plus ou moins atténuée selon les sites et plus prononcée pour les variations de débit (voir les figures précédentes, structure des écarts au cours de l'année).

### 3.5.2. Hiérarchisation des variables explicatives

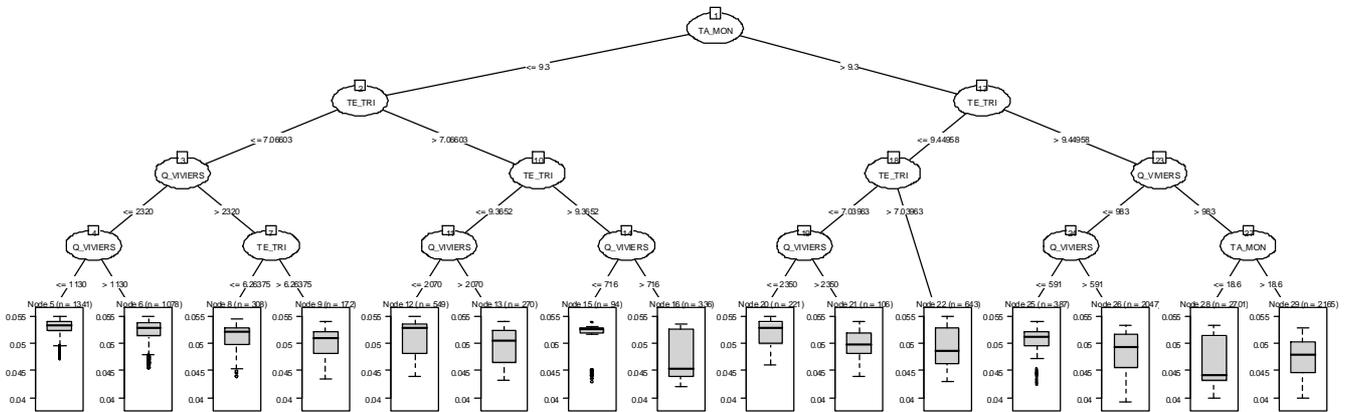
Dans un second temps, et afin de mieux cerner les variables responsables des variations de température de l'eau, des arbres de hiérarchisation conditionnelle des dTE ont été établis à partir des simulations marginalistes. Nous donnons ici l'exemple de la station de Saint-Alban pour un dTE amont (correspondant à la station de Bugey) de -0.1°C (Figure 33). La variable expliquant en premier lieu la variation de température de l'eau à Saint-Alban est le débit à Ternay :



**Figure 36 - Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE à Saint-Alban pour un dTE amont de  $-0.1^{\circ}\text{C}$ . Les boîtes à moustache représentent le profil des dTE pour chaque branche de l'arbre**

A cette station, la contrainte principale est donc le débit. On remarque que pour un débit fort, les dTE ont un caractère plus conservatif : les valeurs au sein des boîtes à moustache des nœuds 27 à 31 de l'arbre de la Figure 33, correspondant à un débit supérieur à  $1000\text{ m}^3/\text{s}$ , se rapprochent des valeurs minimales, i.e. aux alentours de  $-0.08^{\circ}\text{C}$ . A l'inverse pour un débit faible, les dTE sont moins conservatifs : par exemple pour le nœud 8, correspondant à un débit inférieur à  $293\text{ m}^3/\text{s}$ , les valeurs de dTE se rapprochent des valeurs maximales observées. Ces résultats suggèrent que sur ce tronçon, les échanges air-eau sont favorisés lorsque le débit est faible.

Un autre exemple est proposé pour la station de Tricastin. Dans ce cas, pour un dTE amont de  $+0.1^{\circ}\text{C}$ , la première variable permettant de décrire l'effet marginal sur la température de l'eau est cette fois-ci la température de l'air à Montélimar (Figure 34) :



**Figure 37 - Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE à Tricastin pour un dTE amont de  $+0.1^{\circ}\text{C}$**

Les arbres de hiérarchisation conditionnelle issus de l'ensemble des simulations réalisées et pour chaque station peuvent être consultés en annexe. On notera des comportements différents selon la localisation des stations :

1. à Pougny et à Bugey, c'est l'écart de température entre air et eau qui est prépondérant dans l'explication des dTE ; le débit peut également influencer mais de manière secondaire.
2. à Saint-Alban, le débit est la première variable explicative de la dérivée partielle de TE, l'effet du débit étant plus prononcé en été. Ceci peut s'expliquer par l'occurrence de débits plus faibles à cette période, couplée à des gradients air-eau plus élevés qui favorisent des dTE importants.
3. à Tricastin, le débit est cette fois très peu influent, la majorité des variations de TE étant contrôlée par la température de l'air. Cette différence de comportement peut être mise en regard de la situation de la station de Tricastin dans le canal d'amenée d'une retenue hydroélectrique : la thermie y est logiquement moins impactée par les variations de débit. La Figure 35 illustre l'influence de la température de l'air sur les dTE obtenues à partir d'une simulation marginaliste considérant un dQ de  $-10\text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.5.3. Propagation amont-aval d'une perturbation

#### 3.5.3.1. Sur la température de l'air

En se basant sur des variations moyennes interannuelles, il a été envisagé d'étudier la propagation amont-aval d'une perturbation faible du système. Pour la variable "Débit", l'hypothèse d'une dérivée partielle constante sur l'ensemble de l'échantillon n'est pas pertinente, étant donné que de fortes fluctuations subsistent autour du dTE moyen. Ainsi, l'analyse de la propagation s'est uniquement focalisée sur les conséquences d'un échauffement atmosphérique sur la température du Rhône, et non sur un couplage variation de température / variation de débit. Ce sont donc les deux premiers termes de l'équation (1) qui ont été pris en compte. Le Tableau 3 présente les effets sur la thermie du fleuve d'un accroissement de la température de l'air pour chacune des 5 stations étudiées.

	Echauffement à POUAGNY				Echauffement résiduel à BUGEY				Echauffement résiduel à SAINT-ALBAN				Echauffement résiduel à TRICASTIN				Echauffement résiduel à ARAMON			
	part due aux échanges air-eau	part due au transfert amont-aval	part due aux échanges air-eau	TOTAL	part due au transfert amont-aval	part due aux échanges air-eau	TOTAL	part due au transfert amont-aval	part due aux échanges air-eau	TOTAL	part due au transfert amont-aval	part due aux échanges air-eau	TOTAL	part due au transfert amont-aval	part due aux échanges air-eau	TOTAL				
<b>Moyenne</b>	<b>0.19°C</b>	→ 0.12°C	0.16°C	<b>0.28°C</b>	→ 0.19°C	0.24°C	<b>0.43°C</b>	→ 0.21°C	0.19°C	<b>0.40°C</b>	→ 0.34°C	0.11°C	<b>0.45°C</b>							
<b>Médiane</b>	<b>0.17°C</b>	→ 0.11°C	0.15°C	<b>0.26°C</b>	→ 0.18°C	0.24°C	<b>0.42°C</b>	→ 0.21°C	0.20°C	<b>0.41°C</b>	→ 0.34°C	0.11°C	<b>0.46°C</b>							
<b>Quantile 10%</b>	<b>0.02°C</b>	→ 0.01°C	0.14°C	<b>0.15°C</b>	→ 0.09°C	0.18°C	<b>0.27°C</b>	→ 0.12°C	0.16°C	<b>0.28°C</b>	→ 0.22°C	0.11°C	<b>0.33°C</b>							
<b>Quantile 90%</b>	<b>0.40°C</b>	→ 0.28°C	0.18°C	<b>0.46°C</b>	→ 0.36°C	0.29°C	<b>0.64°C</b>	→ 0.34°C	0.22°C	<b>0.56°C</b>	→ 0.52°C	0.12°C	<b>0.64°C</b>							

*Valeurs données pour un échauffement atmosphérique de 1°C considéré uniforme sur tout le bassin*

**Tableau 3. Échauffement relatif de l'eau et sa propagation amont-aval en considérant une hausse de la température de l'air de 1°C**

En considérant un échauffement atmosphérique généralisé et uniforme de 1°C, la hausse de température des eaux du Rhône résultant de cet échauffement serait, en moyenne, de 0.19°C à Pougny, de 0.28°C à Bugey, de 0.43°C à Saint-Alban, de 0.40°C à Tricastin et enfin de 0.45°C à Aramon. Précisons que pour les quatre dernières stations, ont été prises en compte dans le calcul des échauffements résiduels à la fois la composante liée au transfert amont-aval (second terme de l'équation (1)) et celle liée aux échanges air-eau (premier terme de l'équation (1)).

#### 3.5.3.2. Sur la température de l'eau

Sur les modèles en cascade, une baisse de température de l'eau de 0.1°C a été testée et ensuite nous avons analysé la part restante à l'aval. Par exemple, on a évalué la baisse de la température à Bugey suite à une baisse provoquée de 0.1°C à Pougny et ainsi de suite vers l'aval.

Température aval (°C)	Quantile 10	Moyenne	Quantile 90
Pougny-Bugey	0.058	0.064	0.070
Bugey->Saint Alban	0.060	0.069	0.077
Saint Alban->Tricastin	0.043	0.049	0.053
Tricastin->Aramon	0.078	0.085	0.092

**Tableau 4. Baisse des températures de l'eau à l'aval issues d'une baisse des températures de l'eau à la station amont de 0.1°C**

Le tableau précédent met en avant qu'en moyenne 2/3 des incréments (variation marginaliste) de température de l'eau se conserve sur le tronçon Pougny->Bugey puis sur le tronçon Bugey->Saint Alban. Ensuite, la conservation est moins bonne et atteint 50% entre Saint-Alban et Tricastin. Enfin, compte tenu de la distance relativement courte entre Tricastin et Aramon, 85% de la variation se conserve.

Au global, en moyenne, 18 % de l'incrément imposé à Pougny se conserve jusqu'à Aramon.

### 3.5.4. Synthèse des analyses marginalistes et de la conservation des perturbations

Les modèles ont permis de hiérarchiser le poids des principaux facteurs conditionnant la température de l'eau du Rhône. Suivant les stations analysées, ces facteurs peuvent être sensiblement différents. Sur le Haut-Rhône, l'écart entre les températures de l'air et de l'eau est le principal facteur contrôlant la température de l'eau alors que plus à l'aval, sur le Rhône Moyen (Saint-Alban), le débit du Rhône devient le facteur principal. Sur le Bas-Rhône, il est plus difficile d'extraire un facteur dominant.

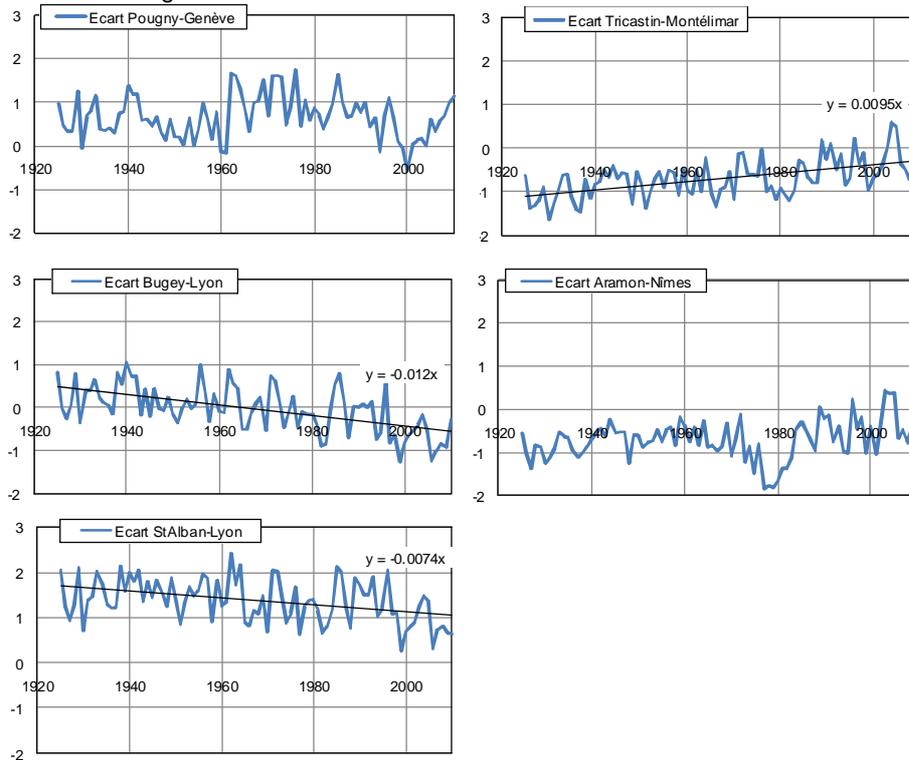
A propos des conservations des perturbations, il peut être retenu qu'en moyenne 2/3 des variations de température de l'eau à la station amont se conserve à la station à l'aval, sur les tronçons entre Pougny->Bugey et Bugey-> Saint-Alban. Entre Pougny et Aramon, en moyenne 18% d'une baisse de température du Rhône à Pougny se conserve à Aramon.

### 3.6. RELATIONS ENTRE TEMPÉRATURE DE L'EAU ET TEMPÉRATURE DE L'AIR

L'addendum au cahier des charges prévoit également une analyse historique des relations entre température de l'eau et température de l'air. L'évolution de ces relations air-eau a donc été étudiée, d'abord de manière globale sur toute la portée temporelle de l'étude, puis par décennie, et enfin par comparaison des ajustements de Fourier réalisés sur les régimes de températures de l'eau et de l'air.

#### 3.6.1. Évolution historique

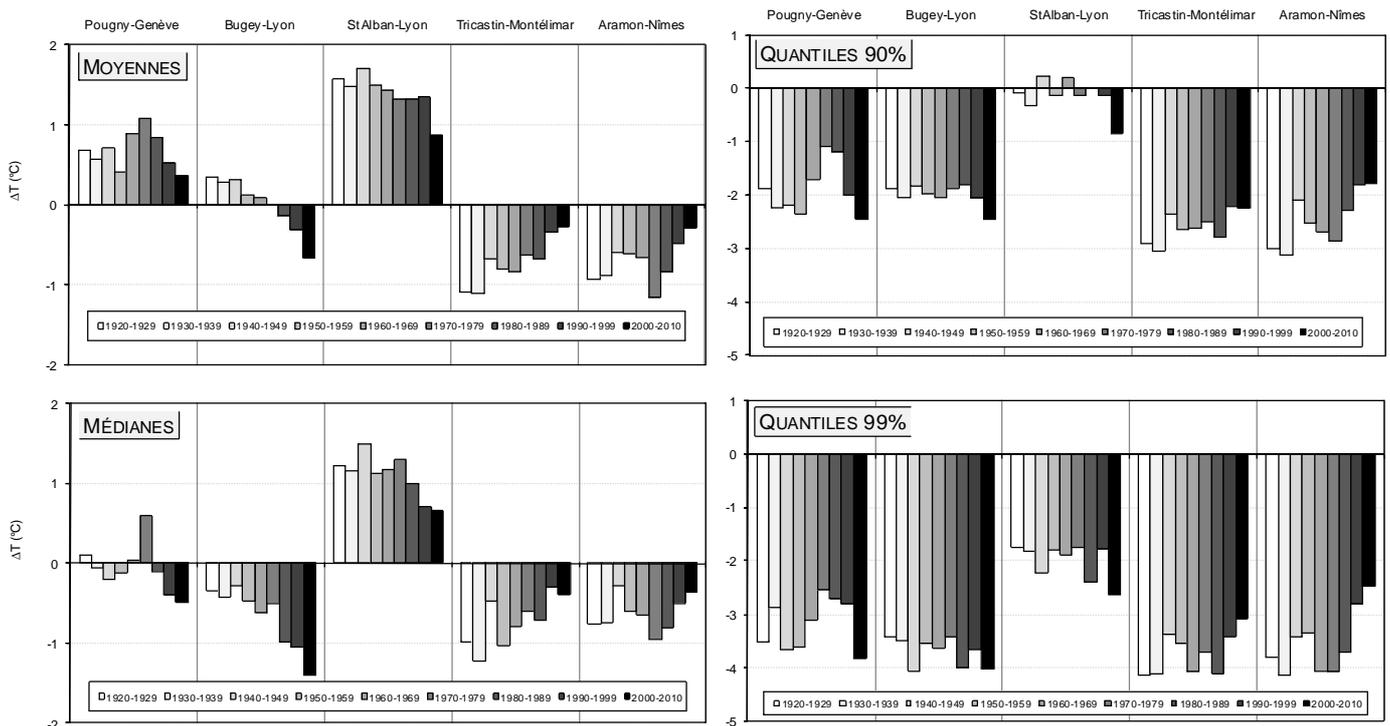
En première approche, l'analyse des écarts entre les moyennes annuelles "eau" et les moyennes annuelles "air" a été effectuée pour des couples de stations proches géographiquement : Pougny (eau) a été comparée à Genève (air), Bugey (eau) à Lyon (air), Saint-Alban (eau) à Lyon (air), Tricastin (eau) à Montélimar (air), et Aramon (eau) à Nîmes (air). Les résultats sont présentés dans la Figure 36.



**Figure 38 - Écarts entre température de l'eau moyenne annuelle et température de l'air moyenne annuelle pour les cinq stations rhodaniennes étudiées**

Les tendances observées sont variables selon les sites : aucune évolution notable n'est visible entre Pougny et Genève, de même qu'entre Aramon et Nîmes ; en revanche, une tendance négative est décelable entre Bugey et Lyon et entre Saint-Alban et Lyon (significatives à 95%), tandis qu'une tendance positive est visible entre Tricastin et Montélimar (significative à 95%). Il s'avère donc qu'en moyenne, la température de l'air à Lyon a crû davantage que la température du fleuve à Bugey et Saint-Alban, alors que la température de l'air à Montélimar a moins crû que la température du fleuve à Tricastin.

De même que pour la caractérisation de l'évolution des températures de l'eau (Section 3.3), une analyse statistique a été menée à partir des écarts entre chroniques de température de l'eau et de l'air, et ce à pas de temps décennal. Les métriques utilisées ont été la moyenne, la médiane, le q90% et le q99%. La Figure 37 synthétise les informations fournies par ces statistiques :



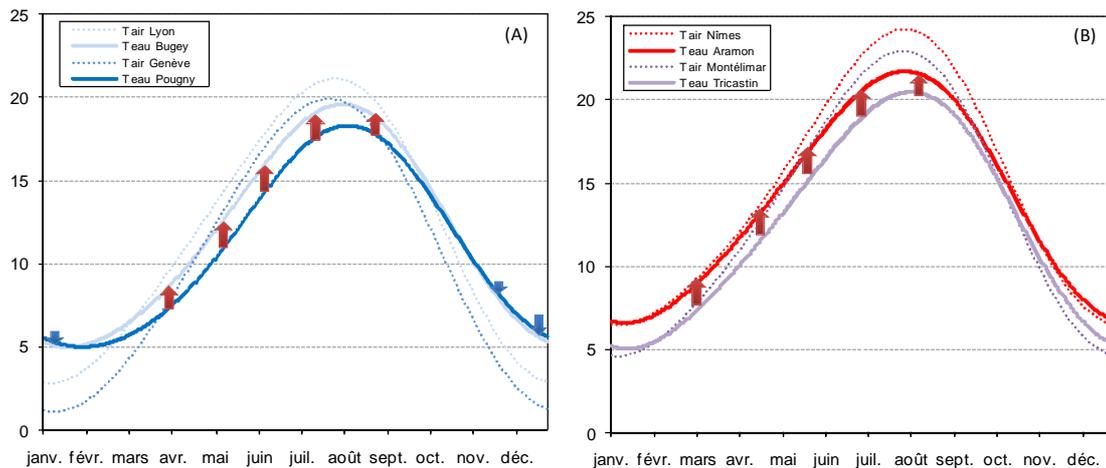
**Figure 39 - Évolution par décennie des moyennes, médianes, q90% et q99% des écarts air-eau**

En considérant les valeurs moyennes et médianes, on note une certaine équivalence entre températures de l'eau et de l'air : les écarts ne dépassent jamais 1 à 2°C. Entre Bugey et Lyon, et entre Saint-Alban et Lyon, on retrouve une évolution négative au fil des décennies, liée à la prédominance de la hausse de la température atmosphérique à Lyon par rapport à celle du fleuve. A l'inverse, plus en aval (Tricastin et dans une moindre mesure Aramon), la hausse de la température du Rhône est supérieure à celle de l'air.

En ce qui concerne les valeurs extrêmes, les températures de l'air affichent des niveaux bien supérieurs à ceux du fleuve, particulièrement pour les q99%. Une assez forte variabilité inter-décennie demeure sur l'ensemble des sites. A Aramon, les q99% de la température de l'eau tendent à rattraper ceux de la température de l'air à Nîmes sur les dernières décennies. Pour les autres stations, on n'observe pas de tendance nette. Globalement, l'ensemble de ces informations confirme la prépondérance du transfert thermique amont-aval qui caractérise le fleuve.

### 3.6.2. Équilibre dynamique air-eau

Sous nos latitudes, le régime thermique des systèmes naturels (atmosphériques et/ou aquatiques) a la particularité de décrire un signal qui se prête bien à l'analyse harmonique. Des ajustements de Fourier ont donc pu être établis à partir des moyennes journalières de température de l'eau et de l'air, puis ces régimes lissés ont été comparés, en considérant d'abord l'ensemble de la période d'étude, puis la variabilité par décennie. La Figure 38 donne un aperçu des régimes obtenus pour les stations du Haut-Rhône (Pougny et Bugey) et pour celles du Bas-Rhône (Tricastin et Aramon), ainsi que les régimes des stations météorologiques correspondantes.



**Figure 40 - Comparaison des régimes thermiques médians "air" et "eau" sur la période 1920-2010 pour le Haut-Rhône (A) et le Bas-Rhône (B)**

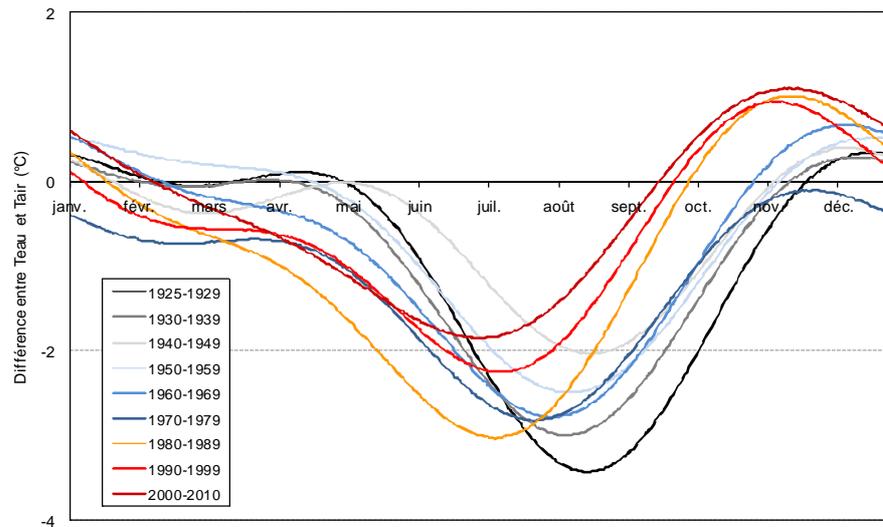
Bien qu'elles fournissent une vision "figée" des régimes thermiques sur plus de 90 ans, les courbes de cette figure peuvent nous renseigner sur les processus macro-échelle qui régissent les équilibres/déséquilibres thermiques au sein du fleuve. Ainsi, on observe que pour le Rhône amont l'état de pseudo-équilibre entre air et eau n'est jamais atteint. Le système est constamment en train de compenser le phénomène d'advection thermique de l'amont par des échanges air-eau : d'avril à septembre, l'air fournit des calories à l'eau entre Pougny et Bugey, la température atmosphérique étant supérieure à celle du fleuve (flèches rouges). En revanche, pendant les mois d'automne et d'hiver, le gradient thermique est inversé et c'est l'eau qui perd des calories au profit de l'air, ce qui se traduit par une température légèrement plus faible à Bugey qu'à Pougny (flèches bleues).

Pour le Rhône aval, la situation est différente puisque entre octobre et avril, le système est dans un état de pseudo-équilibre : entre Tricastin et Aramon les courbes de température de l'eau suivent la même translation (positive) que celle observée sur les courbes de température de l'air. En été, par contre, c'est vraisemblablement la contribution des eaux froides de l'Isère qui vient perturber l'équilibre : un fort gradient thermique s'esquisse entre air et eau au fur et à mesure que la température se réchauffe. De mars à mai, les échanges air-eau entre les deux stations compensent ce transfert d'eau froide, puis de juin à septembre ils ne suffisent plus à rétablir l'équilibre thermique, avec plus de 3°C d'écart entre air et eau en été (flèches rouges).

En résumé, en période estivale l'équilibre entre température de l'eau et les conditions atmosphériques n'est atteint qu'en amont proche de la confluence avec l'Isère (station de Saint-Alban, non présentée ici) ; ailleurs, le gradient thermique est dans le sens air>>eau. En période hivernale, le gradient de diffusion thermique est eau>>air en amont de la confluence avec l'Isère, alors qu'en aval on observe une équivalence entre air et eau.

Les forçages principaux responsables de la dynamique thermique du fleuve sont donc (1) le transfert thermique amont-aval depuis le Léman, (2) les conditions atmosphériques locales, moteur des échanges air-eau, et (3) la température de l'eau de l'Isère pour les tronçons en aval de la confluence.

A partir de cette analyse préliminaire, et pour concevoir plus finement les relations entre température de l'air et de l'eau, des régimes thermiques lissés ont été calculés pour chaque décennie couverte par la période d'étude. La différence entre régimes "eau" et régimes "air" a été déterminée pour chaque pas de temps afin de détecter d'éventuelles évolutions. Nous illustrons ici ce travail par le résultat le plus significatif, obtenu en comparant les stations d'Aramon et de Nîmes (Figure 39).



**Figure 41 - Distribution des écarts entre régimes lissés "eau" (Aramon) et régimes lissés "air" (Nîmes) par décennie**

Comme déjà relevé à la lecture de la Figure 38, l'équivalence des températures de l'air et de l'eau en période hivernale se confirme. Le gradient thermique estival air>>eau est également mis en évidence par des différences négatives à cette période (écart eau-air compris entre -2 et -3.5°C selon la décennie considérée). En ce qui concerne l'évolution temporelle du signal, un déphasage net se manifeste pour les trois dernières décennies (courbes en tons rouge-orangé) : l'échauffement de l'eau au printemps semble plus précoce, ce qui conduit à un rééquilibrage plus précoce avec l'atmosphère (écart air-eau nul en septembre-octobre au lieu de novembre pour les autres décennies). Cette modification du régime thermique induit même un gradient eau>>air d'octobre à janvier (jusqu'à +1°C), alors que les décennies précédentes faisaient plutôt état d'un pseudo-équilibre à cette période de l'année.

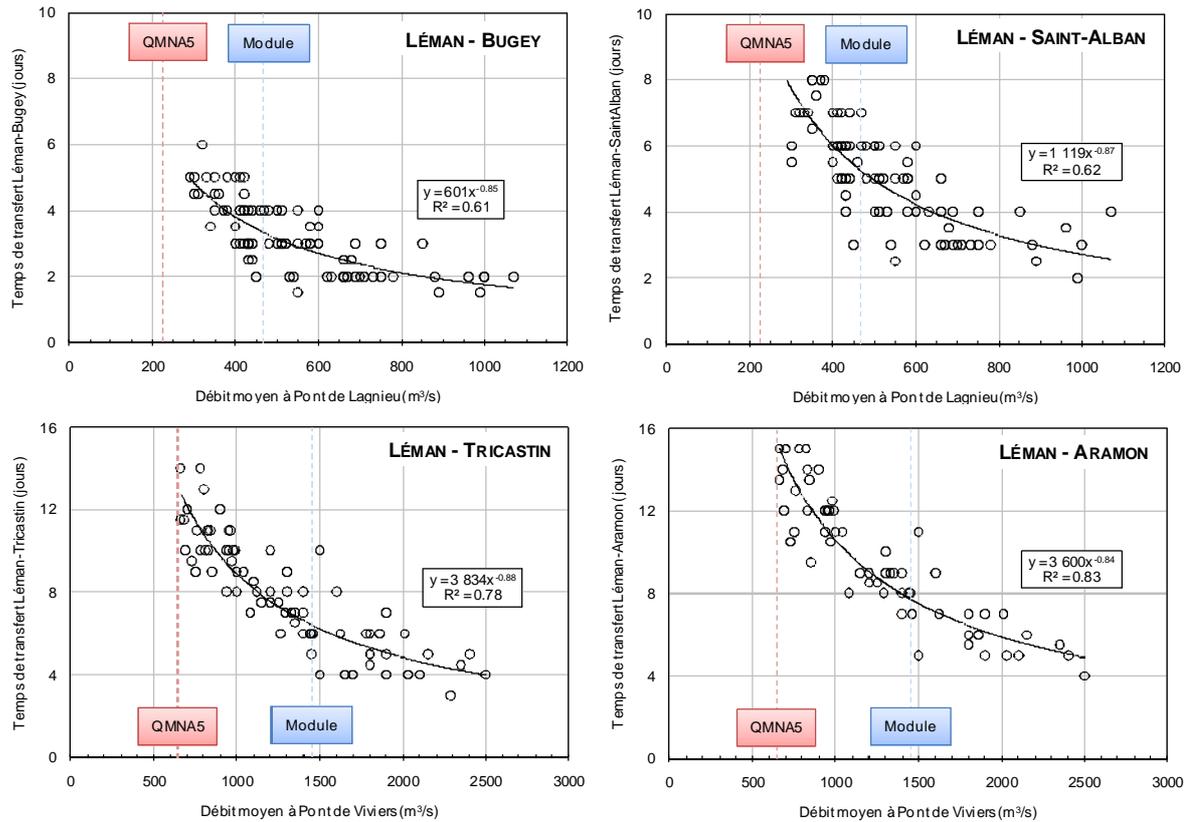
On trouvera en Annexe 3 l'ensemble des graphiques issus de l'analyse des régimes air-eau pour les cinq couples de stations étudiés.

### 3.7. ÉTUDE DE LA PROPAGATION AMONT-AVAL DU DÉBIT ET DE LA TEMPÉRATURE

La détermination des temps de transferts de la température de l'eau s'est basée sur l'analyse des épisodes de goutte froide et de leur propagation vers l'aval ; en parallèle, la détermination de la célérité de déplacement de l'onde de débit s'est basée sur l'analyse des crues et de leur propagation vers l'aval. Cette section passe brièvement en revue les méthodes utilisées et les résultats obtenus, puis nous présentons une analyse croisée des informations hydrologiques et thermiques.

#### 3.7.1. Vitesse de transfert thermique

La méthode employée pour estimer les temps de transfert thermique a consisté à identifier la date d'occurrence du "creux" de la goutte froide (température minimum atteinte pendant l'événement) pour chaque station, depuis la sortie du Léman jusqu'à Aramon. Le signal thermique étant fortement perturbé au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval, il n'a pas toujours été possible de fournir une estimation précise du temps de transfert jusqu'à Aramon. Les débits moyens ont également été relevés à Lagnieu et à Viviers pour chaque épisode (débit moyenné depuis l'amorce de la baisse de température jusqu'à son passage à la station en question). Pour ce travail, nous avons utilisé conjointement les relevés horaires et les chroniques moyennes journalières de 1991 à 2010. Un total de 85 gouttes froides a pu être analysé sur cette période (Figure 42).



**Figure 42 - Temps de transfert du signal thermique depuis la sortie du Léman et jusqu'à quatre points du Rhône**

Comme le montre le premier graphe, la réponse à Bugey est assez bruitée, le débit pouvant être très variable pour un même temps de transfert. On note tout de même une relation assez significative entre débit et temps de transfert de la température. Au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval du fleuve, le signal devient moins dispersé et une tendance claire se dégage. Ainsi, à Tricastin, pour des débits faibles le temps de propagation de la température est bien contraint par l'hydrologie, avec des durées de l'ordre de 12 à 14 jours lorsque l'on s'approche du QMNA5 à Viviers. En revanche, pour des débits supérieurs au module ( $> 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), le temps de propagation demeure assez variable, soit entre 4 et 8 jours. A Aramon également, on retrouve le même type de relation qu'à Tricastin. Pour le Rhône aval, il y a donc un effet très significatif du régime hydrologique sur la propagation de la thermie.

### 3.7.2. Célérité de l'onde de débit

L'évaluation de la célérité de l'onde de débit est issue du rapport EDF sur l'hydrologie du Rhône. Au pas de temps hebdomadaire, la gestion n'est pas cohérente entre l'amont et l'aval. En effet, on a une démodulation entre Pougny et Bognes et une modulation de Bognes à Ternay. Sur le Rhône inférieur la gestion semble cohérente entre les usines. Nous avons mis en évidence que les faibles et moyens débits étaient soumis à la gestion des aménagements ce qui ne permet pas d'identifier une fonction de transfert pour les faibles et les moyens débits. Toutefois, nous avons calculé un temps de propagation moyen sur les débits non soumis à l'effet de gestion (les débits de crue). Pour ce faire nous avons sélectionné des épisodes où le débit de la station est supérieur au débit d'équipement de l'usine en amont (cf. tableau 3.3 ci-après). Ceci permet de s'affranchir de l'effet de gestion. Au total nous avons sélectionné 117 épisodes de débits. Seulement huit épisodes sont communs à toutes les stations étudiées. Le Tableau 5 ci-après rassemble le nombre d'épisodes de débit sélectionnés pour mener à bien l'analyse.

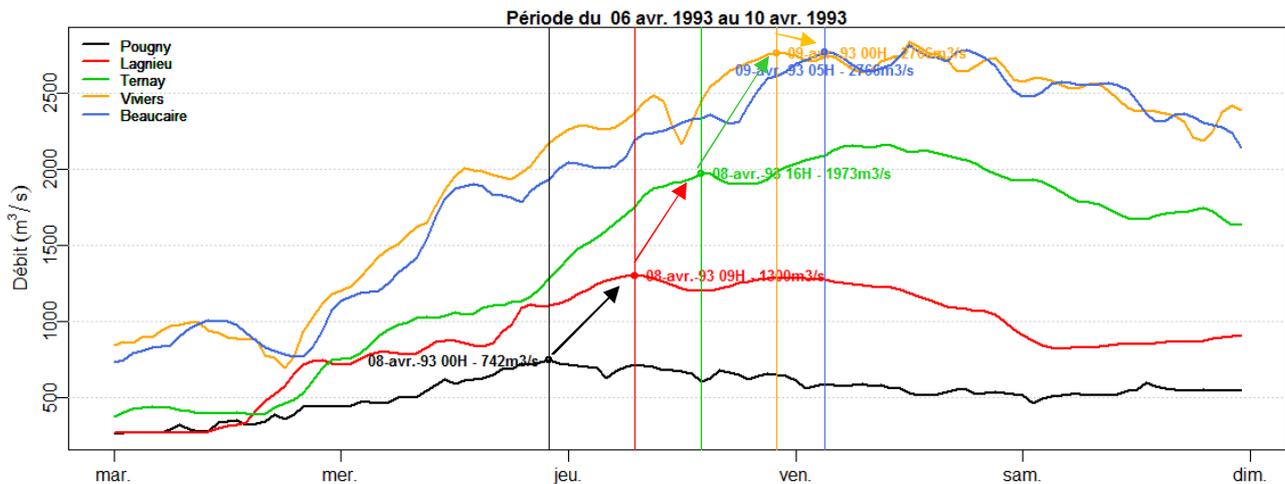
Station amont - aval	Nombre d'épisodes sélectionnés
Pougny - Lagnieu	23
Lagnieu - Ternay	25
Ternay - Viviers	25
Viviers - Beaucaire	22

**Tableau 5. Nombre d'épisodes de débit sélectionnés par tronçon (station amont – aval)**

Stations	Noms des aménagements	Débites équipés (m <sup>3</sup> /s)
Pougny	Pougny	490
Lagnieu	Sault Brénaz	700
Ternay	Pierre Bénite	1380
Viviers	Châteauneuf du Rhône	2200
Beaucaire	Beaucaire	2490

**Tableau 6.** Débit d'équipement des usines en amont de chaque station étudiée

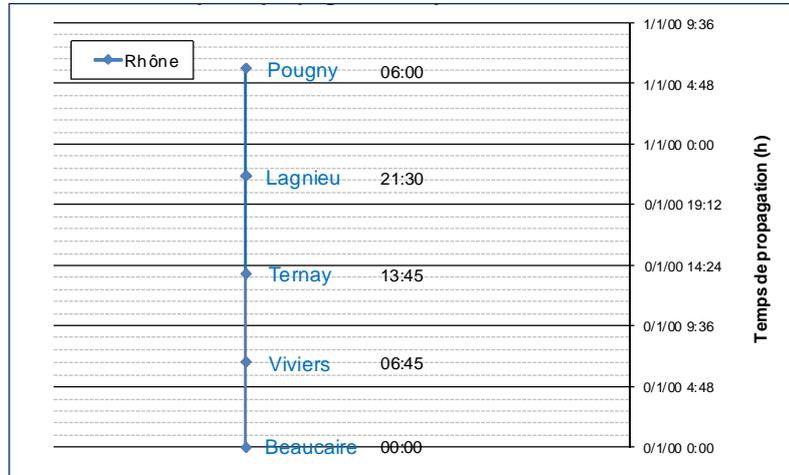
Pour calculer le temps de propagations entre chaque station, nous avons fait le choix d'identifier les pointes de crues. Ci-après nous montrons un épisode de crue généralisée.



**Figure 43 – Exemple d'épisode de crue généralisée du 06/04/1993 au 10/04/1993**

L'examen de la Figure 43 ci-dessus met en évidence la difficulté de l'exercice de sélection des pointes de crues. En effet, de part les apports des bassins versants intermédiaires, les crues sont « molles ». Par conséquent, il n'est pas aisé d'identifier la propagation de la pointe de crue d'amont en aval. Il va de soit que les résultats présentés ci-après peuvent être légèrement différent d'une personne à une autre. Toutefois, les résultats obtenus permettent de donner un ordre de grandeur du temps de propagation d'une crue sur le Rhône.

La figure ci-dessous représente le synoptique des temps de propagation moyen entre les cinq stations de débit étudiées.



**Figure 44 - Synoptique des temps de propagation moyen entre les cinq stations de débit étudiées**

Nous avons rassemblé, dans le Tableau 7 ci-après, les temps de propagation moyen avec leurs intervalles de confiances (moyenne +/- écart type « sd ») et le temps de propagation minimum et maximum.

	Temps de propagation					Distance (km)	Vitesse de propagation (km/h)		
	min	moy-sd	moy	moy+sd	max		moy-sd	moyenne	moy+sd
Pougny - Lagnieu	06:00	06:45	08:30	10:00	11:00	125	12,53	14,93	18,44
Lagnieu - Ternay	04:00	05:00	07:45	10:30	14:00	80	7,62	10,24	15,61
Ternay - Viviers	04:00	05:15	07:00	08:30	09:00	150	17,62	21,88	28,85
Viviers - Beaucaire	04:00	05:00	06:45	08:30	11:00	107	12,42	15,59	20,94

**Tableau 7. Synthèse des résultats sur les temps de propagations des hauts débits du Rhône**

Au regard des résultats obtenus, il est possible d'estimer une **vitesse de propagation des débits** (ou célérité) forts sur le Rhône, en moyenne égale à 15 km/h, et généralement comprise entre 12 et 21 km/h. Sur les débits faibles à modérés, la présence et la gestion des réservoirs empêchent de disposer d'une vision précise de ces valeurs.

### 3.7.3. Synthèse des vitesses de transfert hydraulique et thermique

Le transfert de débit (célérité) s'effectue en une journée entre le Léman et le delta. Cette célérité « rapide » est due à la gestion des aménagements hydroélectriques sous forme d'éclusées synchrones. Le transfert thermique (de masse) est beaucoup plus lent : entre 5 jours (en crue) et 15 jours (à l'étiage).

### 3.8. AMPLITUDES JOURNALIÈRES DE DÉBIT ET DE TEMPÉRATURE

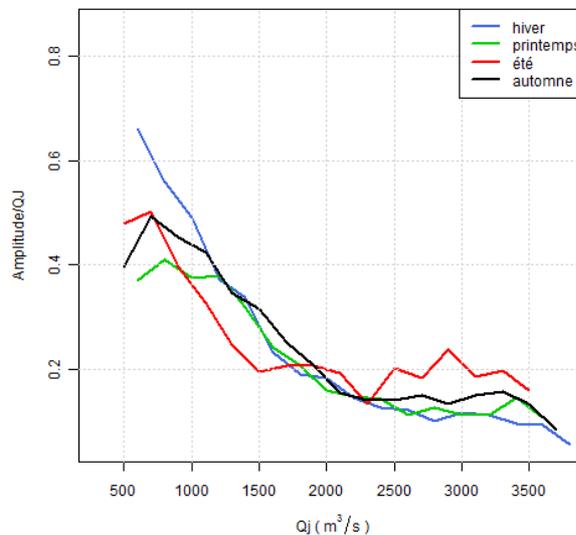
Les analyses ont été menées sur la période [1991-2010], période sur laquelle il était possible de disposer à la fois des données horaires de débit et de température. Amplitudes journalières de débit

#### 3.8.1. Amplitude journalière relative du débit

Une étude fine des amplitudes journalières, semi-hebdomadaires et hebdomadaires est présentée dans le rapport hydrologique. Seuls quelques points importants sont repris ci-après.

Par le biais du graphique ci-après, nous remarquons qu'il n'y a presque pas de gestion saisonnière. Toutefois, on constate que l'amplitude relative la plus forte est observée pour la saison hivernale avec une amplitude relative quasiment égale à 0.7 pour Viviers. Au-delà de 1000 m<sup>3</sup>/s, on n'observe plus de gestion saisonnière et les signaux sont confondus. Notons qu'au-delà d'un débit moyen journalier égal à 2250 m<sup>3</sup>/s, l'amplitude durant la saison estival est supérieur à celle des autres saisons. On peut supposer que ce phénomène ne soit pas lié à la gestion mais aux crues issues des affluents tels que les affluents de l'Isère et la Drôme par exemple.

Amplitude/QJ en fonction du débit journalier de 1992 à 2011  
 - Viviers -

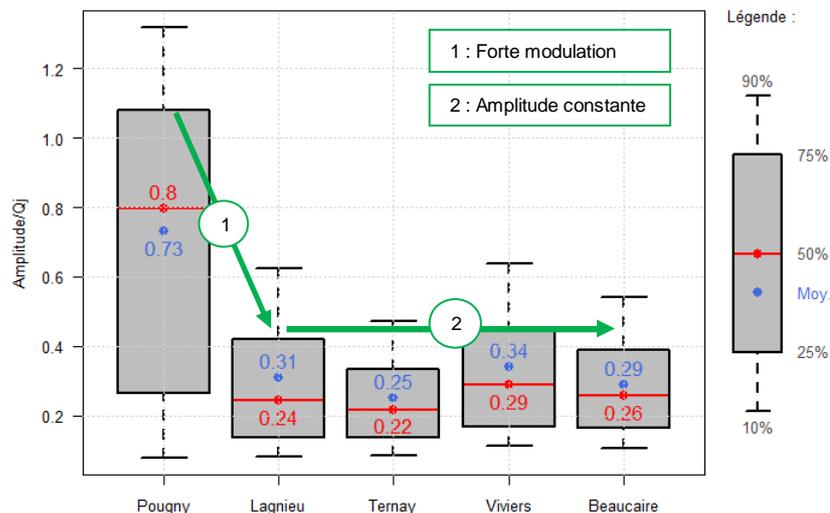


**Figure 45.** Amplitude journalière relative à Viviers sur toute la période en fonction du débit moyen journalier par saison.

Etant donné que les résultats trouvés à Beaucaire sont quasiment identiques que ceux trouvés à Viviers, nous ne détaillerons pas les graphiques.

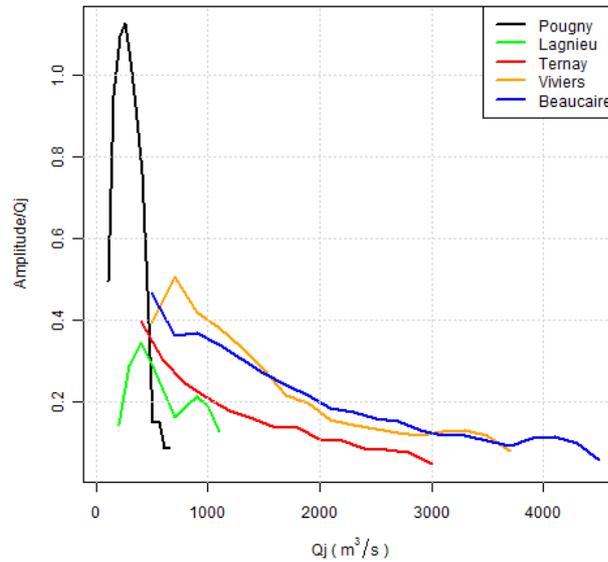
L'analyse a ensuite été menée sur le profil longitudinal du Rhône, *i.e.* sur l'ensemble des stations d'amont en aval.

Boîtes à moustaches sur les amplitudes/Qj de 1992 à 2011



**Figure 46.** Boîtes à moustaches des amplitudes journalières relatives d'amont en aval de 1992 à 2011.

**Amplitude/Qj en fonction du débit journalier de 1992 à 2011**



**Figure 47.** Quantile 50% des amplitudes journalières relatives d'amont en aval en fonction du débit moyen journalier.

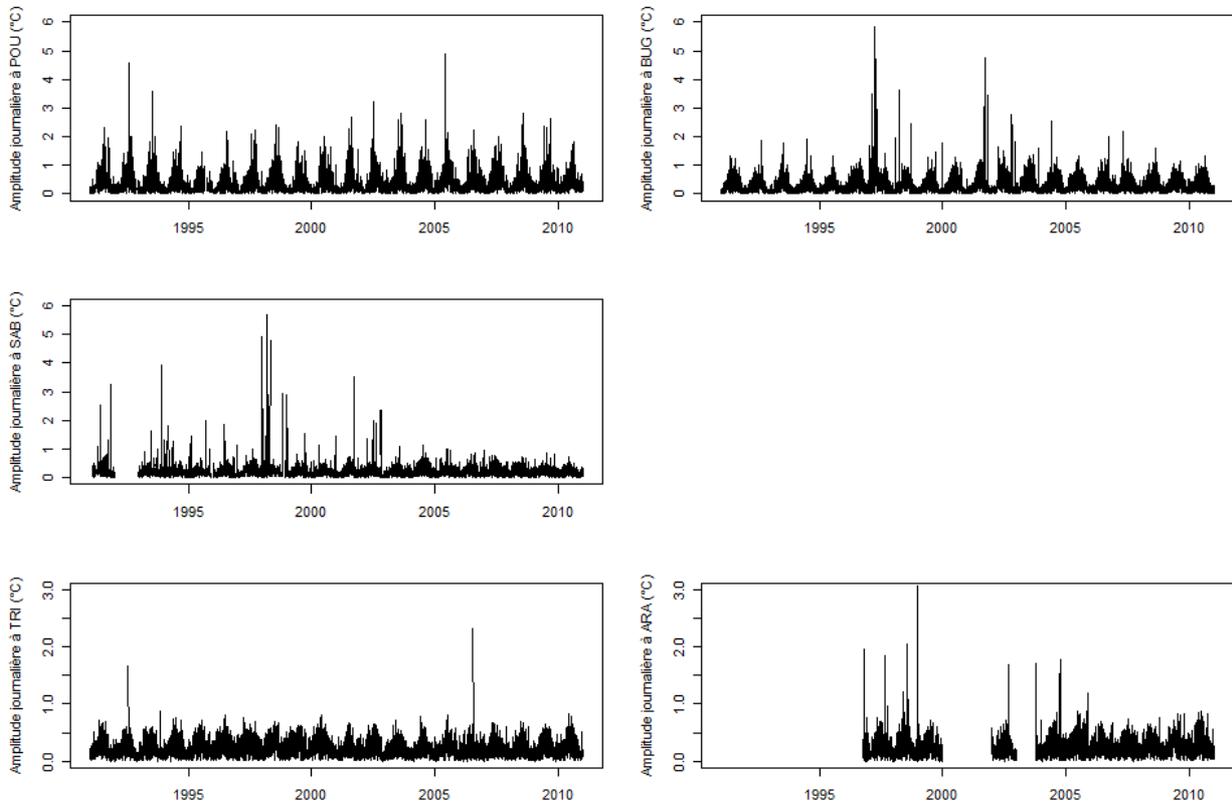
L'examen du graphique précédent permet de constater :

- une forte modulation entre Pougny et Lagnieu. En effet, du à la contrainte de débit réservé au droit du CNPE de Bugey qui est de 150 m<sup>3</sup>/s, les ouvrages entre Pougny et Lagnieu modulent le débit pour diminuer l'amplitude et atteindre le débit objectif au niveau de Bugey,
- une amplitude constante entre Lagnieu et Beaucaire (moyenne du quantile 50% égale à 0.26). Ceci laisse penser que la gestion est relativement synchrone entre ces stations.

A travers les graphiques précédents, on remarque des différences de gestion entre l'amont et l'aval. Ceci est dû aux débits d'équipement des ouvrages. En effet, la différence des débits capacitifs des usines influe une gestion différente entre les aménagements hydroélectriques. C'est pourquoi à Pougny, la gestion est optimisée autour du débit moyen journalier de 300 m<sup>3</sup>/s et qu'au-delà de ce débit la gestion est de plus en plus transparente. On observe le même constat à Lagnieu et Viviers. Toutefois, à Ternay et Beaucaire il n'y a pas de réelle optimisation en fonction du débit moyen journalier.

### 3.8.2. Amplitude journalière de température

#### 3.8.2.1. Caractérisation de l'amplitude



**Figure 48. Évolution des amplitudes journalières de température entre 1991 et 2010 sur les cinq stations étudiées**

Le graphique précédent met en évidence que, *a minima* depuis 1991, des cycles annuels de l'amplitude journalière de la température de l'eau du Rhône. Par ailleurs, les amplitudes moyennes sont de plus en plus faibles vers l'aval.

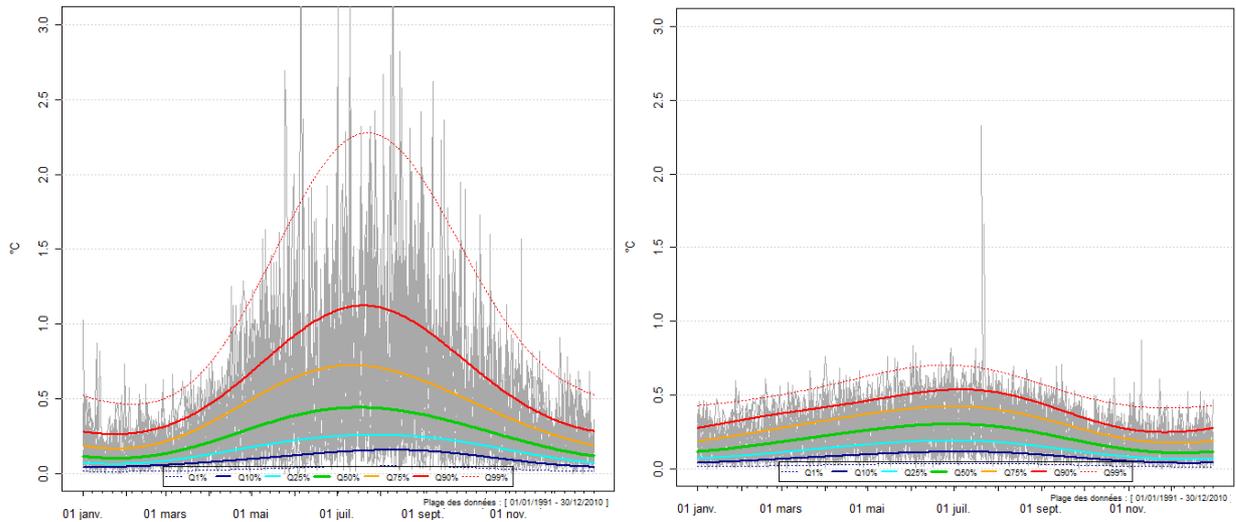
<b>Amplitudes journalières des Teau (°C)</b>	<b>Pouigny</b>	<b>Bugey</b>	<b>Saint-Alban</b>	<b>Tricastin</b>	<b>Aramon</b>
Moyenne annuelle	0.34	0.32	0.20	0.22	0.24
Moyenne de juillet	0.56	0.48	0.27	0.32	0.32
Moyenne d'août	0.58	0.45	0.23	0.27	0.26

**Figure 49. Moyennes des amplitudes journalières de température de l'eau du Rhône**

A Pouigny, les amplitudes journalières sont les plus importantes et atteignent en moyenne sur l'année 0.34°C. Les amplitudes sont nettement plus faibles sur le Bas-Rhône, puisqu'à partir de Saint-Alban, les amplitudes moyennes sont de l'ordre de 0.20°C. On note ainsi une assez forte variabilité longitudinale de l'amplitude journalière des températures de l'eau du Rhône. Ces amplitudes suivent également un régime annuel relativement marqué, avec des amplitudes maximum en été : en août pour Pouigny et en juillet pour les autres stations suivies et minimum en hiver.

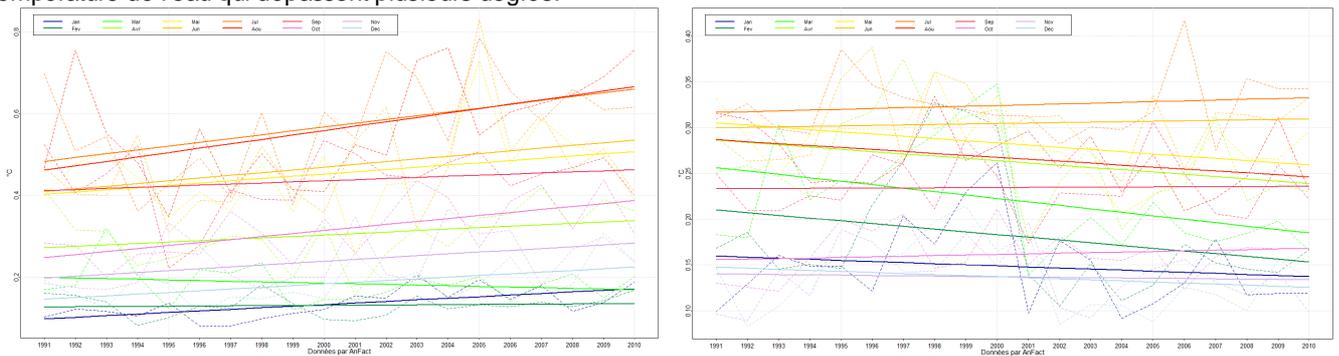
La figure suivante met en avant la présence d'un régime marqué des amplitudes thermiques journalières de l'eau. L'examen des ces graphiques illustrent deux principaux paramètres structurant la température de l'eau du Rhône : les échanges air-eau et les transferts amont-aval (via les gouttes froides).

Sur l'ensemble du Rhône, ces régimes sont assez similaires et montrent le régime des amplitudes est en lien avec les variations saisonnières des écarts de températures entre l'air et l'eau : les écarts et donc les amplitudes étant plus faibles en hiver qu'en été.



**Figure 50. Régime saisonnier des amplitudes thermiques à Pougny (à gauche) et à Tricastin (à droite)**

Par ailleurs, à Pougny, les amplitudes sont très marquées et principalement en lien avec le transfert des gouttes froides entre le Léman et la station. Le graphique de Pougny montre qu'il est possible de détecter la présence de gouttes froides toute l'année excepté pendant la période hivernale. L'été, les gouttes froides peuvent provoquer des variations journalières de température de l'eau qui dépassent plusieurs degrés.

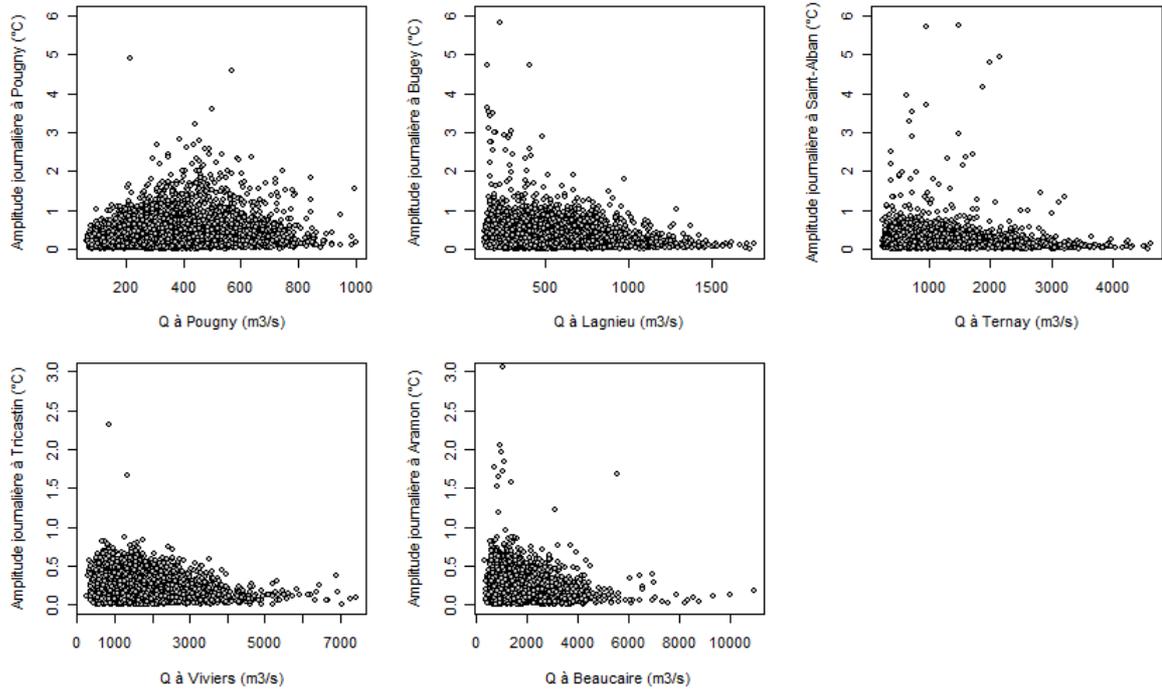


**Figure 51. Évolution des tendances mensuelles de l'amplitude journalière de la température de l'eau à Pougny (à gauche) et à Tricastin (à droite)**

Grâce à la figure précédente, même si les chroniques sont relativement courtes (~ 20 ans), il semble possible de mettre en évidence quelques tendances d'évolution des amplitudes à l'échelle mensuelle. A Pougny, l'amplitude journalière aurait ainsi augmenté, notamment pendant les mois d'été ou l'évolution atteint environ 20% sur la période considérée. Cette tendance, encore visible à Bugey, ne semble plus significative sur le Bas Rhône.

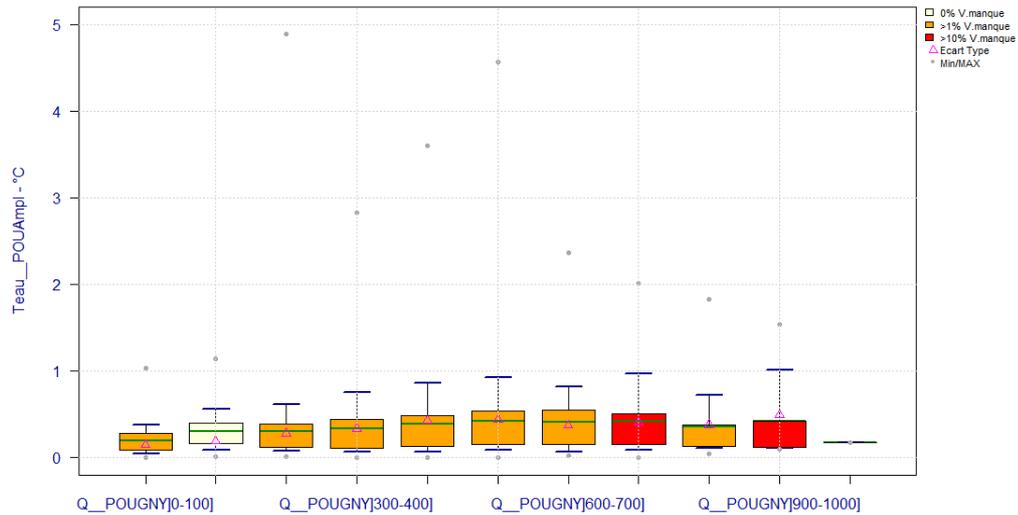
### 3.8.2.2. Lien débit/amplitude de température de l'eau

Pour mieux comprendre l'origine des variations de températures de l'eau, il est intéressant d'analyser les liens entre les amplitudes thermiques et les débits du Rhône.



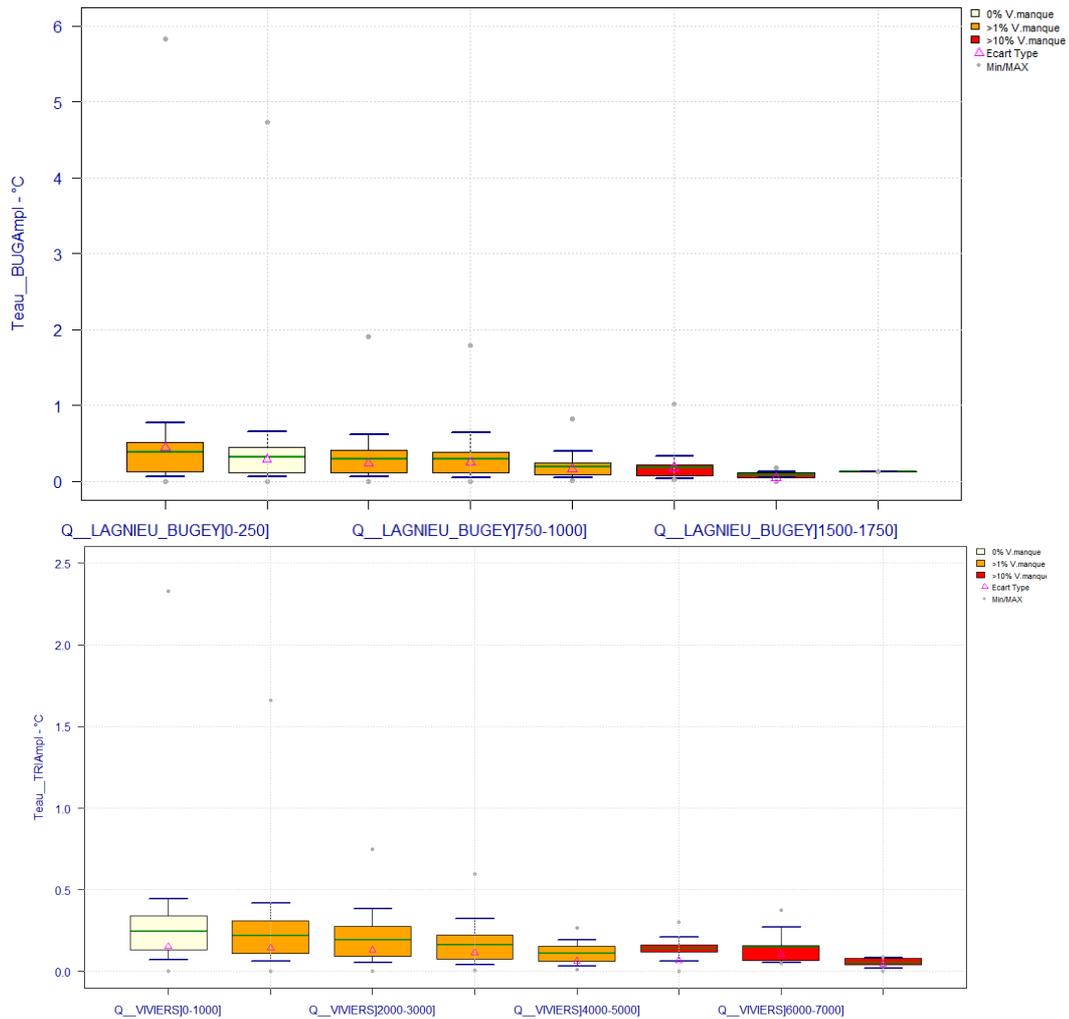
**Figure 52. Distribution des amplitudes thermiques journalières et le débit du Rhône**

De façon visuelle, il est possible de noter une distribution différente des amplitudes thermiques à Pougny et sur les stations situées plus à l'aval, comme à Tricastin.



**Figure 53. Distribution des amplitudes thermiques journalières à Pougny, en fonction des débits**

A Pougny, les amplitudes semblent augmenter linéairement lorsque les débits passent du débit d'étiage (QMNA5=149 m3/s) au débit de hautes eaux (q90% = 588 m3/s). Les gouttes froides étant plus fréquentes en été, lorsque le débit est important, pourrait expliquer ce constat.



**Figure 54. Distribution des amplitudes thermiques journalières à Bugey (en haut) et Tricastin (en bas), en fonction des débits**

A Tricastin, sur les classes de débits significatives, c'est-à-dire pour les débits inférieurs à 5000 m<sup>3</sup>/s (>99.9% des débits), il est possible de distinguer une baisse linéaire entre les classes 0-1000 et 4000-5000 m<sup>3</sup>/s, avec une diminution de moitié des principales variables statistiques caractérisant l'amplitude thermique (q10% à q90%, en enlevant les extrêmes). Sur Bugey, il est également possible de dresser un constat comparable.

A partir de Bugey, il semble donc que la gestion hydro-électrique du Rhône ait plus d'effet sur les amplitudes journalières de la température de l'eau du Rhône que l'arrivée des gouttes froides.

### 3.8.3. Synthèse sur les amplitudes journalières

Les amplitudes journalières de la température du Rhône sont en moyenne de 0.3°C avec une variabilité longitudinale et saisonnière de 0.2°C. Sur une grande partie du linéaire du Rhône, les écarts de température air-eau gouvernent l'intensité de ces amplitudes en dehors des périodes de «gouttes froides». Ces dernières sont à l'origine d'amplitudes infra-journalières de plus de 2°C sur le Haut-Rhône.

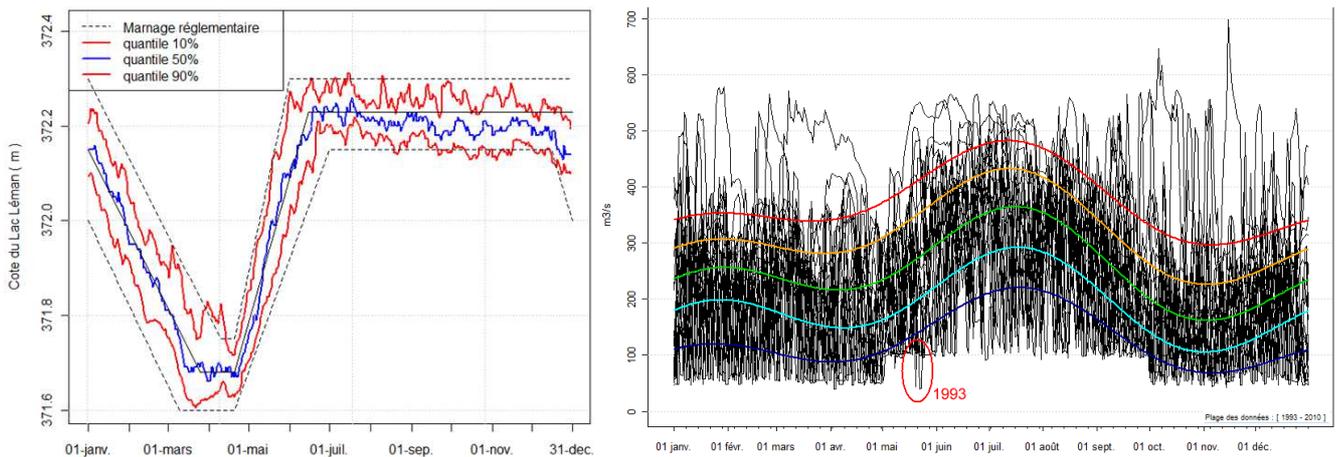
L'amplitude journalière de la température du Rhône est corrélée avec les débits du fleuve ; les amplitudes sont maximales en période d'étiage et minimales en hautes eaux, excepté à Pougny, en lien avec la présence des « gouttes froides ».

### 3.9. SENSIBILITÉ DES LEVIERS HYDRAULIQUES SUR LA THERMIE DU RHÔNE

#### 3.9.1. Modification de la gestion hebdomadaire du Léman

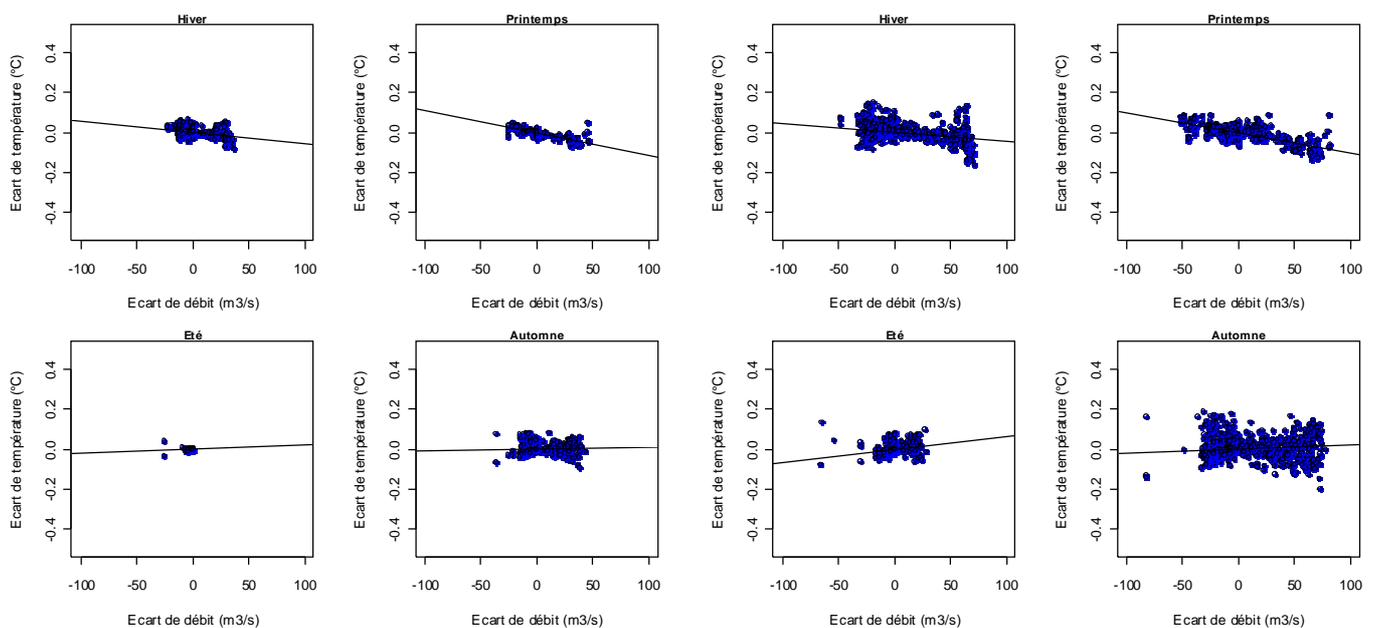
De par l'importance de son stock d'eau mobilisable, le lac Léman pourrait constituer un levier pour réduire les températures estivales du Rhône. Le débit réservé au droit de l'exutoire du Léman est fixé à 50 m<sup>3</sup>/s par le gestionnaire suisse, excepté sur la période entre le 1<sup>er</sup> mai et le 30 septembre où le débit réservé est porté à 100 m<sup>3</sup>/s.

La figure suivante montre que les débits réservés ont été globalement respectés sur la période étudiée [1993-2010] (excepté en 1993). Par ailleurs, en cas de faible hydrologie estivale (comme en 2011), il semble que les contraintes de cote soient moins scrupuleusement respectées.



**Figure 55. Évolution de la cote du Léman en 2011 (à gauche) et chevelu des débits en sortie Léman**

Un certain nombre de scénarios alternatifs de gestion du lac Léman ont été établis dans ce sens, en considérant des situations plus ou moins "réalistes". Ces scénarios intègrent une augmentation du débit réservé estival tout en gardant autant que possible le même volume d'eau hebdomadaire transitant à l'exutoire du Léman. Deux scénarios ont été retenus pour leur convenance : un premier (dit Q85) a consisté à relever le débit réservé estival à 85 m<sup>3</sup>/s, cette valeur ayant l'avantage d'assurer le maintien de la cote minimale du lac durant toute l'année.



**Figure 56 - Rapport entre écarts de température et de débit à Pougny selon les scénarios Q85 (gauche) et Q120 (droite)**

Le second scénario (dit Q120) a considéré un relèvement du seuil à 120 m<sup>3</sup>/s, cette valeur s'avérant en certaines occasions légèrement trop élevée pour respecter le marnage réglementaire du Léman (cf rapport hydrologique).

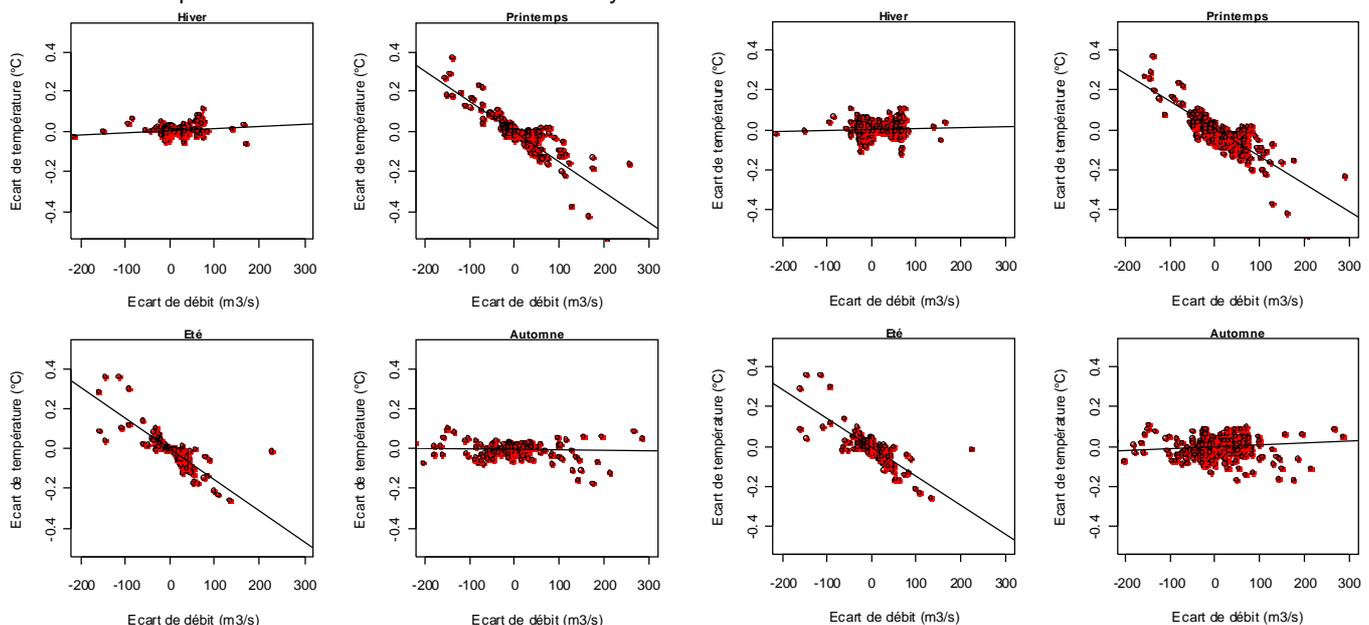
Des chroniques de débit ont été générées selon chacun des scénarios sur la période 1993-2008. Puis les modèles RN précédemment calés ont permis de reconstituer des séries de température modifiées. Les valeurs de température des simulations classiques ont ensuite été confrontées aux résultats des deux scénarios alternatifs. Ce travail a été mené à la station de Pougny, puis à celle de Bugey. La figure précédente présente les écarts de température et de débit obtenus à Pougny selon Q85 et Q120, en différenciant les valeurs par saison d'occurrence.

Aucune tendance significative ne ressort de ces graphes saisonniers. En outre, et quel que soit le débit, les variations de température sont très faibles, et toujours inférieures à  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . L'effet sur la thermie d'une variation de débit en sortie du Léman n'est donc pas véritablement décelable à Pougny.

Dans certaines conditions, il est possible qu'une augmentation du débit en sortie du lac induise une plus grande dilution des eaux (plus froides) de l'Arve au droit de la confluence, et par là même une hausse relative de la température en aval ; en théorie, cette hausse devrait être d'autant plus manifeste que l'écart de température entre Rhône et Arve est grand et que le débit de l'Arve est élevé. L'été est une période propice à l'occurrence de ce type de conditions (étiage du Rhône couplé à la contribution d'origine glaciaire de l'Arve). Pour la série Q120, la tendance faiblement positive (mais peu significative) pourrait être liée à ce phénomène.

Pour la série Q85, la densité d'écart de débit autour de 0 confirme que l'augmentation du débit réservé à 85 m<sup>3</sup>/s n'a pas d'incidence sur les débits estivaux (débit réservé réglementaire à 100 m<sup>3</sup>/s en été).

Une fonction de transfert des débits a ensuite été construite pour reconstituer un débit à Lagnieu correspondant aux scénarios de gestion Q85 et Q120. Cette fonction, bien que grossière, permet de prendre en compte un déphasage et un lissage dans le transfert de l'onde de débit entre Pougny et Lagnieu (débit utilisé pour le modèle Bugey). Par contre, il subsiste certains artefacts dans cette fonction, qui expliquent dans quelques cas des écarts de débit (mesuré/scénarios) très importants. Ainsi, les débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/s ne doivent être analysés.



**Figure 57 - Rapport entre écarts de température et de débit à Bugey selon les scénarios Q85 (gauche) et Q120 (droite)**

A Bugey, la réponse à une modification du mode de gestion du débit en sortie du Léman est variable selon les saisons : en automne ainsi qu'en hiver, on n'observe pas de tendance notable ; en revanche, au printemps et **en été**, les valeurs décrivent une relation linéaire décroissante. Ainsi, pour **une augmentation de débit de 50 m<sup>3</sup>/s, la diminution de la température à Bugey atteint 0.1°C environ**. Les résultats sont similaires pour les deux scénarios testés. On détecte donc bien un effet de baisse de la température de l'eau du Rhône pour une augmentation du débit du fleuve à Bugey. Néanmoins, signalons que ces variations demeurent très faibles, et insuffisantes dans une optique de "soutien thermique" estival.

Même si la définition des scénarios testés est perfectible, ces simulations ont permis de quantifier la sensibilité d'une variation du débit en sortie Léman sur la température de l'eau plus à l'aval et notamment à Bugey. Paradoxalement, à l'aval immédiat du Léman (Pougny), l'augmentation de débit peut potentiellement engendrer une hausse des températures du Rhône. Plus à l'aval, cette augmentation de débit provoque une baisse des températures du fleuve, en été et au printemps, mais dans des proportions très limitées (-0.1°C pour +50 m<sup>3</sup>/s).

### 3.9.2. Fonctionnement thermique d'un tronçon court-circuité du Rhône et effets de la modification des débits réservés sur la température du Rhône

#### 3.9.2.1. Généralités et élaboration des outils

Les tronçons court-circuités (TCC) du Rhône ou Rhône Court-Circuité (RCC) ou « Vieux-Rhône » constituent des compartiments au régime hydrologique fortement dépendant des aménagements du Rhône qui y régulent les déversés et les débits réservés. Ces compartiments sont peu étudiés quant à leur fonctionnement thermique et leur dépendance au facteur hydrologique. L'analyse présentée ici s'attache à préciser l'influence du débit du Rhône sur la thermie des RCC ainsi qu'à analyser leur sensibilité quant à une variation du débit réservé.

Parmi les nombreux TCC présents sur le Rhône, seul celui de Péage (longueur ~ 10 km) est analysé ici puisqu'il possède des séries chronologiques de température de l'eau suffisamment étendues pour modéliser fidèlement son fonctionnement. En effet on dispose de suivis de température au niveau de :

- la station « RCK » située en entrée du TCC au droit de la prise d'eau du canal de sports d'eaux-vives. Cette station constitue une référence d'entrée pour le TCC sur la période 2003-2010.
- la station « RCC », située au premier quart supérieur du TCC. Cette station peut constituer un point de référence amont de 1991 à 2010,
- La station « Seuil de Peyraud », située sur le dernier quart aval du TCC à l'aval immédiat du seuil. Cette station fournit une référence aval du TCC de 1984 à 2010,
- En outre, la station amont du CNPE de Saint Alban (amont SAL) fournit une référence Rhône en amont du TCC sur la période 1984 à 2010.

Il est important de noter la particularité de ce TCC lié à la présence du CNPE de Saint-Alban, à l'amont immédiat.

De 1984 à 2010 les débits du TCC sont reconstitués à partir du débit amont à Ternay ( $q_{10\%}=411$  m<sup>3</sup>/s ;  $Q_{50\%}=814$  m<sup>3</sup>/s ;  $Q_{90\%}=1960$  m<sup>3</sup>/s), de la capacité d'équipement (1600 m<sup>3</sup>/s) de l'usine de Péage de Roussillon et des débits réservés réglementaires du TCC : 10m<sup>3</sup>/s du 1 septembre au 31 mars et 20 m<sup>3</sup>/s du 1 avril au 31 août soit respectivement 1/80<sup>ème</sup> et 1/40<sup>ème</sup> du module. Cette série théorique est donc entachée de nombreuses incertitudes puisqu'elle ne prend pas en compte certains phénomènes comme les manœuvres d'exploitation. En première approximation, on peut néanmoins considérer que ces incertitudes sont relativement limitées aux regards des objectifs. Ce débit du TCC est donc caractérisé par deux régimes que sont le débit réservé et les déversés réalisés principalement lors de débits dépassant la capacité de l'aménagement. Le tableau suivant illustre les débits mensuels du TCC :

Mois/Débit (m <sup>3</sup> /s)	min	Moy	MAX	q50%	q75%	q90%
Jan	10	214	2000	10	250	792
Fev	10	194	2710	10	115	680
Mar	10	204	3040	10	20	751
Avr	20	175	2037	20	80	711
Mai	20	77	1550	20	20	184
Jun	20	57	2070	20	20	20
Jul	20	29	1043	20	20	20
Aou	20	21	339	20	20	20
Sep	10	23	870	10	10	10
Oct	10	85	2740	10	10	10
Nov	10	147	3000	10	10	511
Dec	10	154	1730	10	90	562
Tous	10	115	3040	20	20	360

**Figure 58. Débits mensuels statistiques en amont du RCC sur la période [1984-2010]**

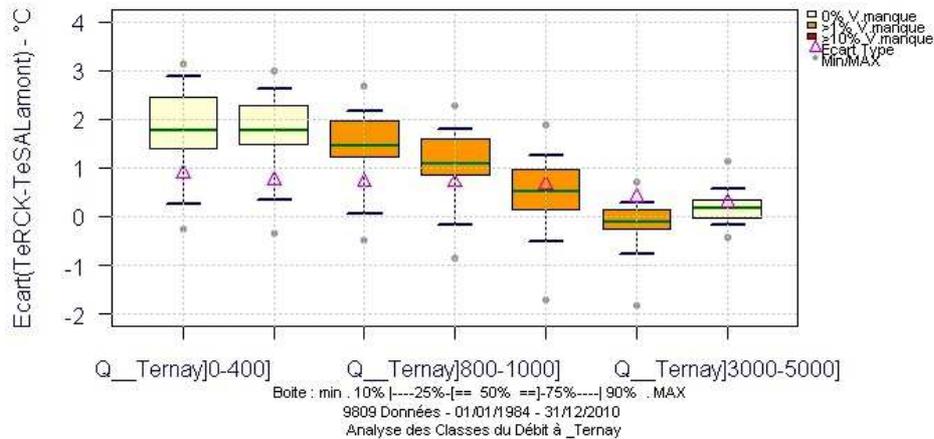
On constate que pour l'ensemble des mois, le débit réservé est présent plus de la moitié du temps. Pour la période de juin à octobre, le débit réservé est présent plus de 90% du temps. Quant à la période novembre à mai, le débit réservé est observé moins souvent, entre 50 et 75 % du temps, avec des déversés d'autant plus importants. Sur l'année, on retiendra qu'en moyenne, le **débit dans le RCC correspond au débit réservé 80 % du temps**.

A partir des données historiques et pour compléter les séries mesurées en amont du CNPE, deux modèles Réseau de Neurones « en série » ont été construits pour tester l'influence des paramètres de débit sur la température de l'eau. A l'aide de ces modèles le fonctionnement thermique du TCC de Péage est décomposé en deux tronçons. Le premier concerne l'influence du débit du Rhône amont sur la température d'entrée du TCC (station RCK). Le second concerne plus spécifiquement le TCC et la propagation d'amont en aval de ce facteur thermique au regard de la température de l'air et du débit du TCC. Les paramètres explicatifs (ou d'entrée) retenus pour la construction de ces modèles sont les suivants :

- Modèle RCK (amont RCC) : Puissances SAB, Débit à Ternay, Débit entrée RCC, Teau amont SAB,
- Modèle « Seuil de Peyraud » (aval RCC) : Teau RCK, Débit RCC, Tair Lyon.

### 3.9.2.2. L'influence du débit amont et des déversés sur la thermie du TCC

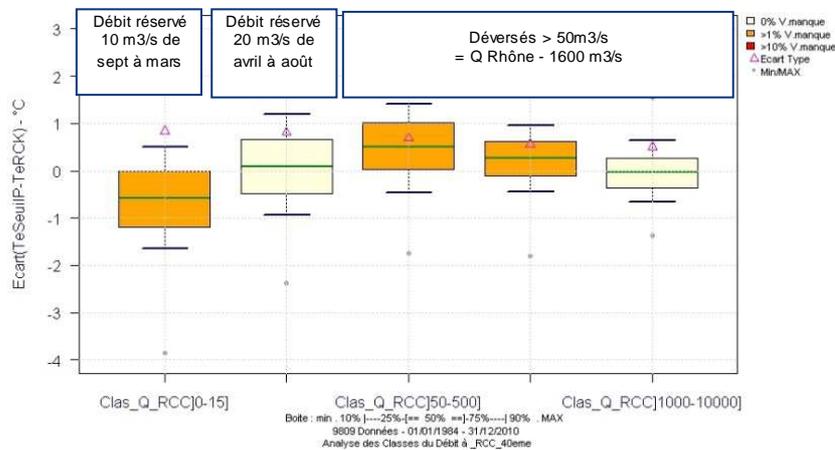
L'effet du débit du Rhône (à la station de Ternay) sur la propagation du rejet thermique du CNPE vers le TCC :



**Figure 59. Évolution de l'écart de température des eaux entre l'amont du RCC et l'amont du CNPE, en fonction des débits du Rhône**

L'écart de température entre l'amont SAL et RCK révèle la part du panache thermique du CNPE rejeté en rive gauche qui atteint le TCC en rive droite. La tendance montre que les faibles débits du Rhône favorisent une meilleure propagation du rejet thermique du CNPE vers le TCC et ce d'autant moins que ce débit augmente. L'échauffement est en moyenne de l'ordre de 1.7°C pour les faibles débits du Rhône et peut atteindre 2.8°C pour les valeurs les plus fortes (q90%). On retiendra que les forts débits du Rhône contraignent le panache thermique en rive gauche et limite ainsi sa propagation dans le RCC.

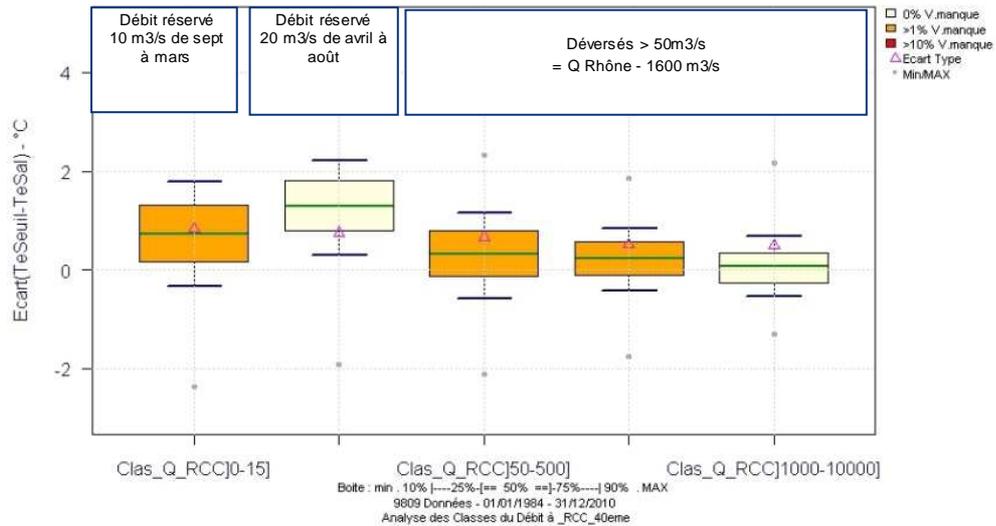
Ensuite, le débit du TCC a été analysé quant à son effet sur la propagation de la température de l'eau dans le TCC.



**Figure 60. Évolution des variations de température au sein du RCC, en fonction des débits du RCC**

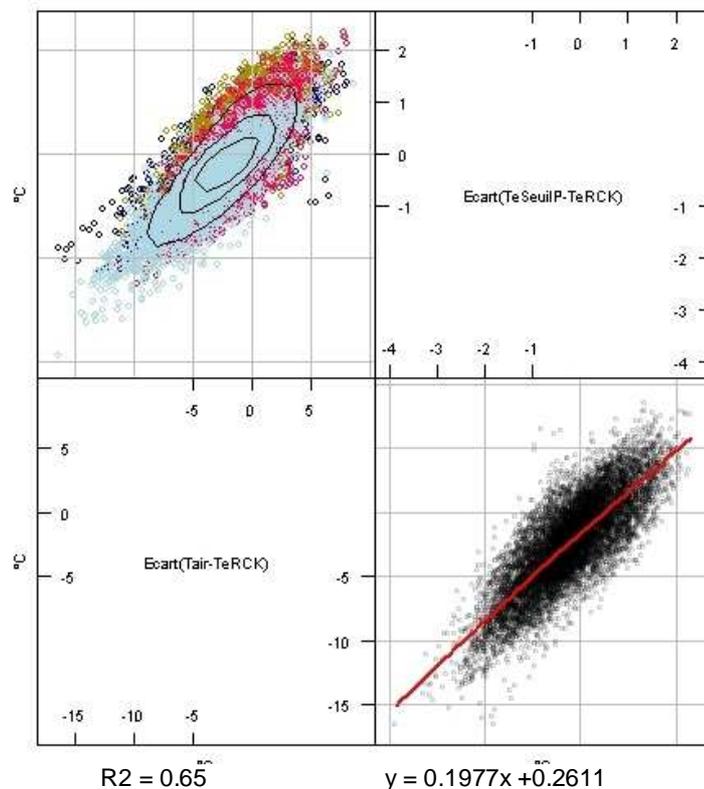
Pour les débits réservés, la relation observée est différente : le refroidissement est d'autant plus marqué tout au long du TCC que le débit est faible. Les déversés dans une gamme modérée (50 à 500 m3/s) prolonge cette tendance. Cette relation est cependant biaisée par la saisonnalité des régimes de débit réservé et de déversé. Ceci illustre néanmoins le rôle d'échangeur thermique du TCC favorisé par les faibles hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement modérées. Cette variation thermique est en moyenne comprise entre -0.6 et 0.5°C mais peut atteindre jusqu'à -1.6 à 1.4°C (q10% et q90%). Au delà de 500 m3/s, ce phénomène est rapidement atténué pour devenir nul aux plus forts débits.

Si l'on regarde sur la totalité des deux tronçons (amont TCC et TCC), l'effet du débit du Rhône et du débit du TCC sur la thermie du TCC est atténué par l'opposition des deux phénomènes détaillés ci-dessus :



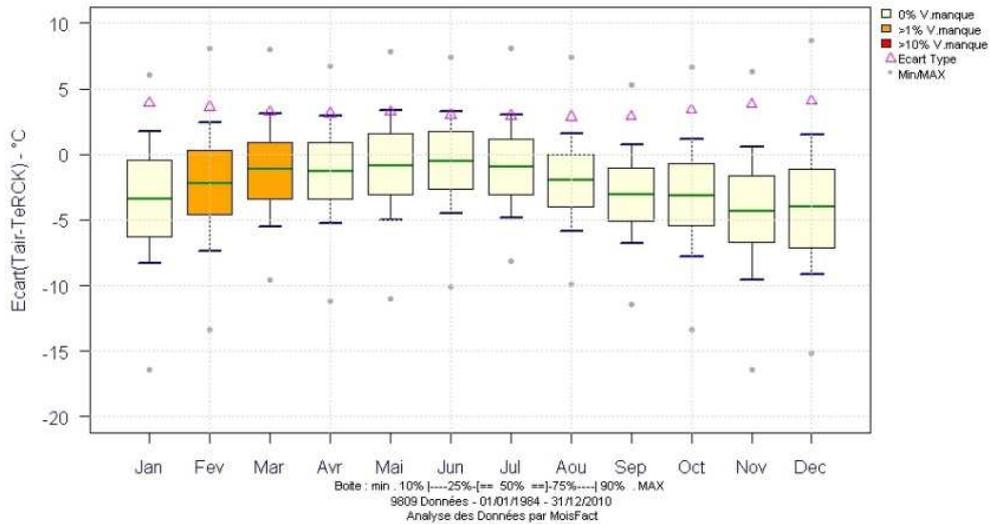
**Figure 61. Évolution de l'écart de température entre l'amont du CNPE et l'aval du RCC, en fonction des débits du RCC**

L'écart de température entre l'amont SAL et l'aval du TCC (Seuil de Peyraud) se révèle atténué sous l'effet du TCC. La tendance montre une augmentation de température de l'eau de 0.7 à 1.3°C en moyenne pour les débits réservés et pour les valeurs les plus fortes de 1.8 à 2.2°C (q90%). Ces différences entre ces deux débits réservés étant essentiellement liée à leur saisonnalité. Pour des débits du Rhône plus fort, l'écart thermique devient faible voire complètement gommé. Les débits du TCC et du Rhône ont donc in fine un impact limité sur la température de sortie du TCC. L'amplitude et le signe de cette variation thermique est fortement liée à l'écart de température présent entre l'air et l'eau comme le montre le graphique suivant :



**Figure 62. Relation entre écarts des températures air-eau et échauffement au sein du RCC**

Le fonctionnement thermique du TCC est saisonnalisé : l'air, plus froid que l'eau en période hivernale, favorise un refroidissement de l'eau au fil du TCC, et inversement en période estivale. Ce TCC, par équilibre avec l'air, a donc tendance à accentuer ses amplitudes thermiques par rapport à celles du Rhône amont, en favorisant l'échange avec l'atmosphère. Dans le cas précis du TCC de Péage, où la température d'entrée n'est pas à l'équilibre avec l'air sous l'effet des rejets thermiques du CNPE, le TCC peut fonctionner comme dissipateur ou accumulateur d'énergie selon les périodes de l'année :

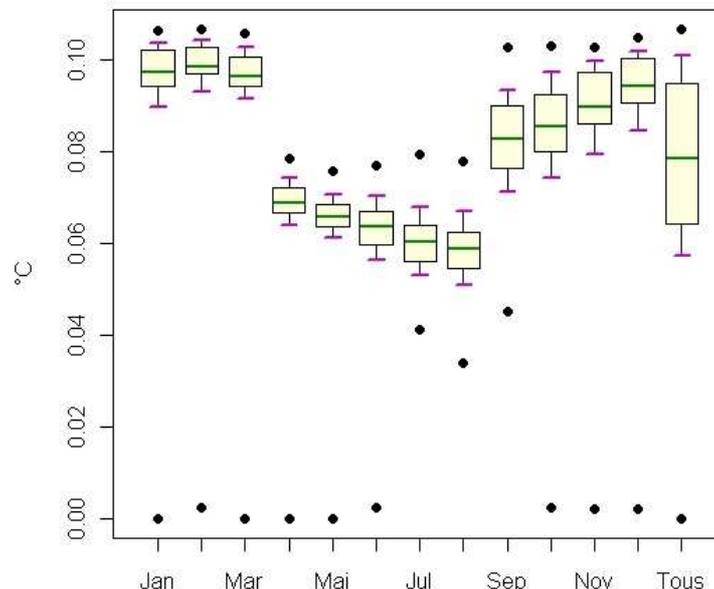


**Figure 63. Régime annuel des écarts de températures air-eau, en entrée du RCC**

Sur l'ensemble de l'année, en moyenne la température d'entrée du TCC est supérieure à celle de l'air sous l'effet du rejet du CNPE et de l'inertie thermique de l'eau. Le TCC de Péage-de-Roussillon fonctionne donc majoritairement comme un dissipateur d'énergie (écart moyen d'environ 3°C). Dans certains cas, en particulier de mars à juillet, le phénomène peut s'inverser.

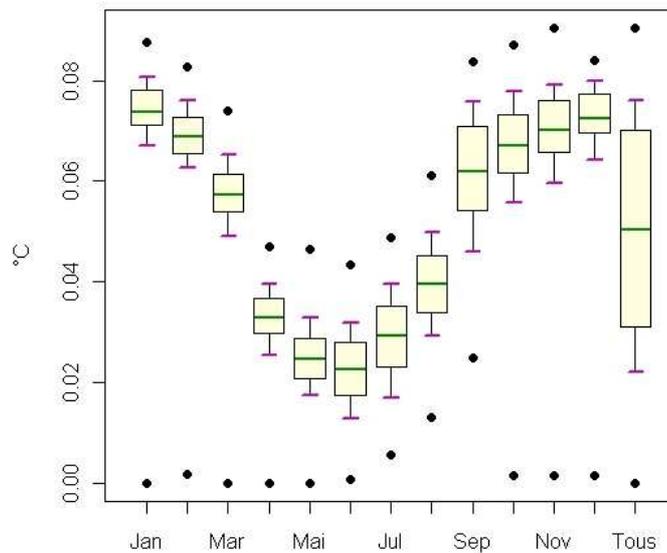
### 3.9.2.3. Effet d'une variation du débit réservé

A partir du modèle décrit précédemment, l'analyse présentée ici cherche à évaluer l'effet d'une augmentation du débit réservé du TCC de Péage à 1/20<sup>ème</sup> du module, soit 51 m<sup>3</sup>/s toute l'année (x2 oux4 suivant les saisons). Cet effet est regardé en comparant d'une part les résultats du modèle réseau de neurone calé sur le débit réservé actuel et d'autre part une simulation intégrant le relèvement de ce débit réservé. L'effet peut être évalué au niveau des stations de RCK et Seuil de Peyraud. Température de l'eau (simulé – modélisé) à RCK pour les débits réservés (QRCC<50m<sup>3</sup>/s) :



**Figure 64. Température de l'eau (simulée – modélisée) à RCK pour les débits faibles/réservés (QRCC<50m<sup>3</sup>/s)**

On constate une augmentation très faible de température, en moyenne sur l'année de 0.08°C avec un effet plus marqué de l'ordre de 0.10°C sur la période de septembre à mars (modification du débit réservé de 10m<sup>3</sup>/s à 51m<sup>3</sup>/s). D'avril à août, ce débit réservé relevé de 20m<sup>3</sup>/s à 51m<sup>3</sup>/s voit cette augmentation de température plus modérée, de l'ordre de 0.06 à 0.07°C. Température de l'eau (simulé – modélisé) à Seuil de Peyraud pour les débits réservés (QRCC<50m<sup>3</sup>/s) :

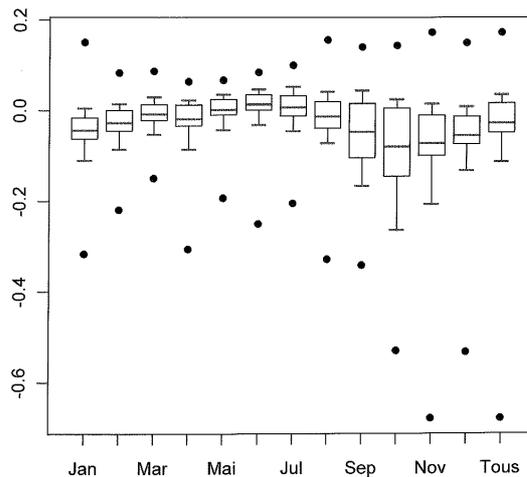


**Figure 65. Température de l'eau (simulée – modélisée) à Seuil de Peyraud pour les débits réservés (QRCC<50m3/s)**

On constate une augmentation de température plus limitée, en moyenne sur l'année de 0.05°C. Sous l'effet du transfert amont aval du TCC, les effets constatés au Seuil de Peyraud sont atténués avec respectivement sur les périodes de septembre à mars et de avril à août, une augmentation de la température de l'ordre de 0.07°C et de 0.03°C.

Cette simulation montre qu'une augmentation du débit réservé a tendance à modifier la dispersion du rejet thermique du CNPE de Saint-Alban en augmentant le transfert de celui-ci vers le TCC. Ce phénomène est cependant de faible ampleur, mais semble plus net lorsque l'augmentation de débit réservé est importante (période de septembre à mars initialement à 10m3/s). Par ailleurs, cette augmentation de température s'atténue au fil du TCC, sous l'effet des échanges air eau, pour se retrouver encore plus faible sur la partie aval du TCC à la station Seuil de Peyraud.

A noter cependant que si l'on s'attache à retracer la relation vue précédemment entre l'écart de température air/eau et la variation de température entrée/sortie du TCC, on observe la même relation linéaire. Ceci semble montrer que le relèvement du débit réservé au 1/20<sup>ème</sup> n'a pas d'incidence significative sur les capacités d'échange thermique air/eau du TCC. La principale différence reste qu'un volume plus important d'eau évacué par le TCC est soumis à la même capacité de dissipation d'énergie.



**Figure 66. Effet global de l'augmentation du débit réservé du RCC de Péage sur la température de mélange du Rhône, à l'aval éloigné de la confluence RCC/Canal de fuite du Rhône.**

Si l'on considère que la modification de débit sur le canal de fuite n'a pas d'effet sur la température de l'eau étant donné sa profondeur, le relèvement du débit réservé favorise donc au global, et en moyenne sur l'année, la baisse de la température du Rhône après mélange intégral.

La configuration particulière du TCC de Péage rend difficilement extrapolable ces résultats aux autres TCC du Rhône. On peut cependant souligner l'aptitude des TCC à équilibrer la température de l'eau avec celle de l'air. Le signe de cette variation étant fonction de la température d'entrée du système, de l'écart avec la température de l'air et plus faiblement du débit du TCC.

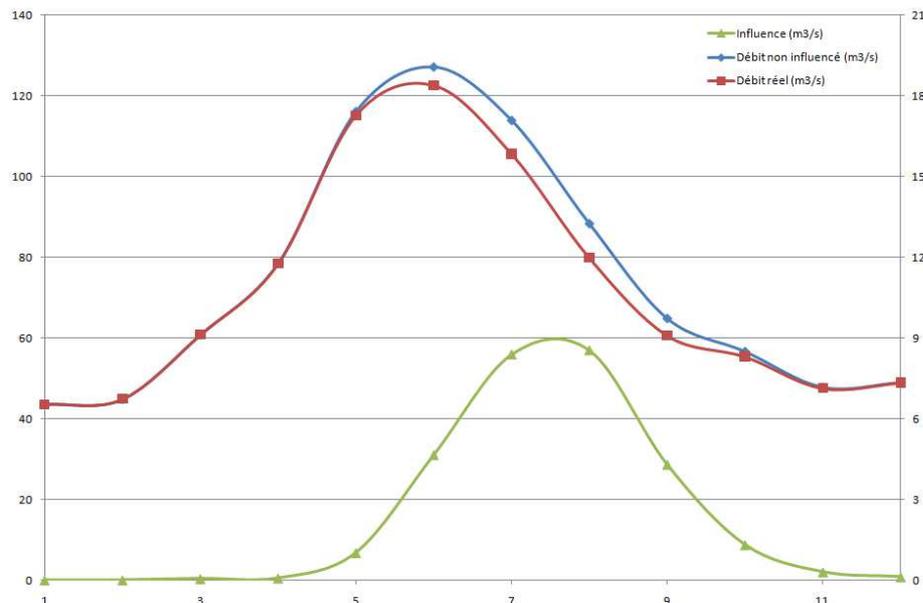
Les faibles débits du Rhône favorisent la propagation du rejet thermique du CNPE de Saint-Alban vers le TCC de Péage. Le TCC constitue un « échangeur » d'énergie avec l'atmosphère ; la majeure partie de l'année il joue un rôle de dissipateur d'énergie. L'écart entre température de l'eau et de l'air reste un facteur déterminant de l'évolution de la température au sein du TCC. Une augmentation du débit réservé au 1/20<sup>ème</sup> du module ne modifiera pas la température de sortie du TCC. Ceci permettra cependant à un plus grand volume d'eau de s'équilibrer avec la température de l'air et *in fine* de modifier par dilution, la température aval du Rhône, après mélange.

Par ailleurs, des courtes chroniques disponibles dans le TCC de Baix semblent montrer (cf Lot 3d) également que la température de l'eau à l'entrée du TCC peut dépendre de la stratification thermique dans la retenue amont. Dans ce cas particulier, l'écart air-eau est fort en été et la remise en équilibre produirait un échauffement rapide en début de tronçon.

### 3.9.3. Effets de la modification des débits de l'Arve

En tête de bassin, le fonctionnement hydrologique de l'Arve a été modifié au XX<sup>ème</sup> siècle, avec une exportation d'une partie des eaux vers l'extérieur du bassin et notamment :

- A partir de 1949, les eaux captées à l'aval du glacier de Tré-la-Tête sont envoyées vers la retenue de la Girotte (Beaufortain) avec un débit maximum potentiel d'environ 8 m<sup>3</sup>/s (débit d'équipement),
- A partir du milieu des années 1970, la mise en service des captages sous les glaciers d'Argentière et du Tour dont une partie des eaux de fonte est envoyée vers le barrage d'Emosson, en Suisse (débit d'équipement de l'ordre de 12 m<sup>3</sup>/s).



**Figure 67. Débit moyen mensuel [1976-2010] de l'Arve à Arthaz : le débit réel et non influencé (axe de gauche) et la valeur de l'influence (axe de droite)**

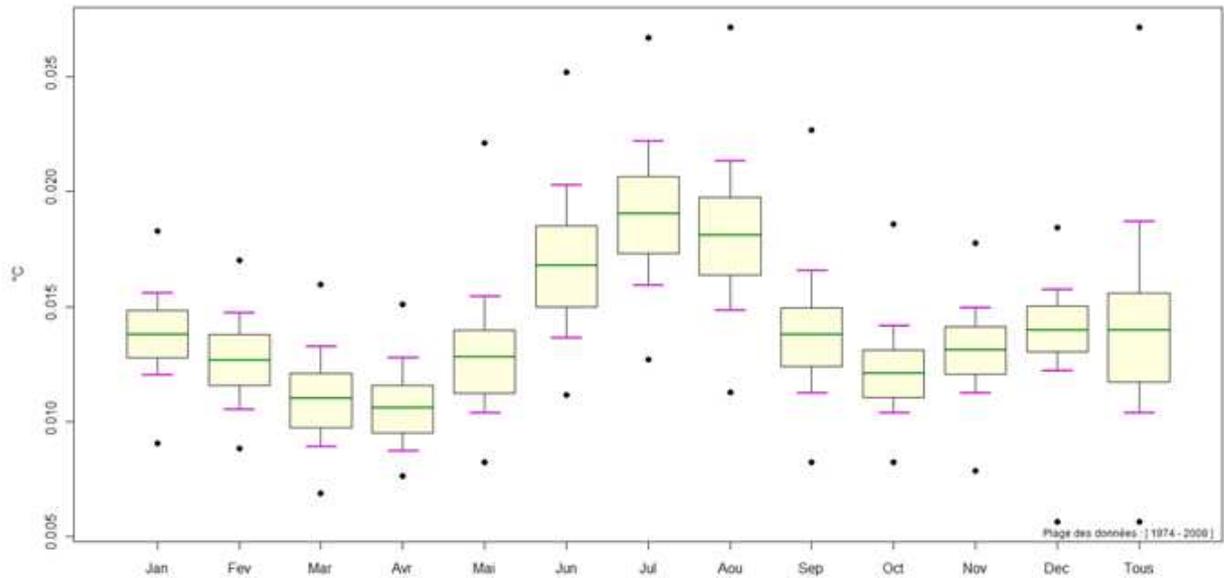
Pendant les mois d'été (juin à septembre), le débit dérivé vers l'extérieur du bassin versant de l'Arve atteint en moyenne près de 9 m<sup>3</sup>/s (moyenne mensuelle). Le reste de l'année, le débit dérivé est très limité et peut être considéré comme négligeable à l'échelle du Rhône. Avec un débit potentiel dérivé de 20 m<sup>3</sup>/s, il est probable que le débit réel dérivé puisse fréquemment dépasser 15 m<sup>3</sup>/s, notamment pendant les mois de juillet et d'août.

A l'aide du modèle de température de l'eau réalisé à Pougny, nous avons testé les effets d'une augmentation marginaliste de 1 m<sup>3</sup>/s du débit de l'Arve sur la température du Rhône, afin d'évaluer l'incidence d'une diminution temporaire de l'exportation des eaux de l'Arve sur la température du Rhône.

Les résultats issus de ce modèle montrent qu'une augmentation du débit de l'Arve de 1 m<sup>3</sup>/s provoque une baisse significative des températures de l'eau du Rhône à Pougny. Ces effets sont visibles toute l'année et sont saisonnalisés. En effet, pendant les mois d'été le refroidissement des eaux du Rhône à Pougny serait en moyenne d'environ 0.02°C et pourrait être susceptible d'atteindre ponctuellement 0.03°C.

Le fait d'avoir testé une augmentation marginale du débit de l'Arve implique que la réponse d'une augmentation deux fois plus importante du débit aurait des effets deux fois plus importants sur la température de l'eau (réponse linéaire).

Sans préjuger de l'augmentation de débit disponible dans l'Arve (et donc la diminution associée vers Emosson), il est possible de provoquer une **baisse de la température de l'eau estivale à Pougny de 0.4 à 0.5°C** (sur la base d'un débit complémentaire de 20 m<sup>3</sup>/s).



**Figure 68. Incidence d'une augmentation uniforme et unitaire (1 m<sup>3</sup>/s) des débits de l'Arve sur la température de l'eau du Rhône à Pougny (les incidences positives indiquent un refroidissement des eaux du Rhône)**

Par ailleurs, l'analyse marginaliste a montré qu'une diminution de 0.1°C à Pougny provoque une baisse de 0.064°C à Bugey. On a donc 64% de la baisse de la température de l'eau à Pougny qui se conserverait lors de son trajet jusqu'à Bugey.

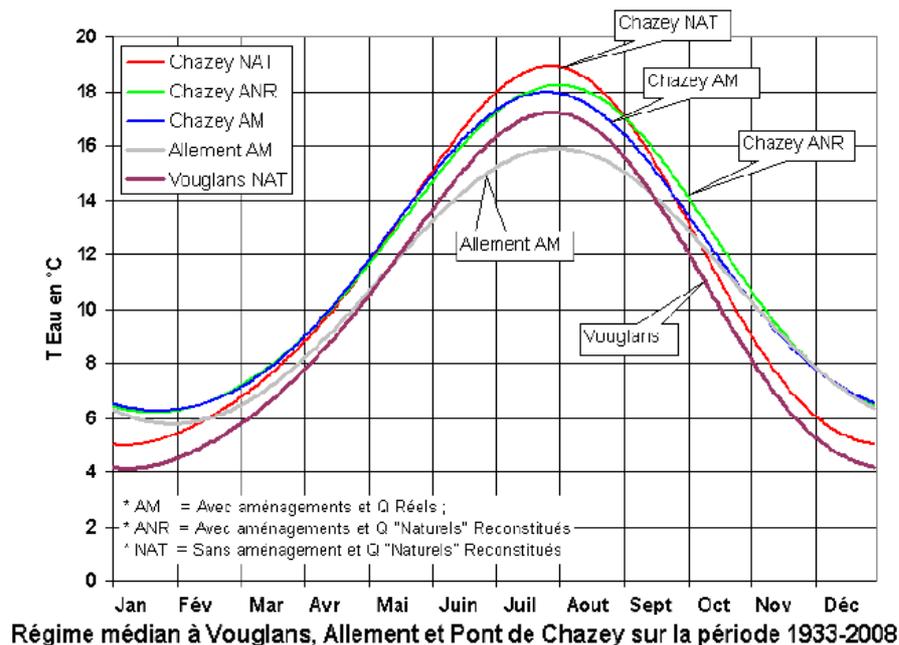
L'Arve, de par ses températures froides toute l'année, constitue un levier hydraulique efficace pour baisser la température du Rhône à Pougny, à hauteur de 0.02°C par m<sup>3</sup>/s supplémentaire dans l'Arve (en été), avec une conservation moyenne des 2/3 de cette baisse à Bugey.

### 3.9.4. Effets de la modification des débits de l'Ain

Les études menées par EDF sur la thermie de l'Ain ont été synthétisées dans la publication ci-après :

Poirel A., Gailhard J., Capra H., 2010. *Influence de la gestion des barrages-réservoirs sur la température de l'eau. Exemple d'application au bassin versant de l'Ain*. La Houille blanche.

Les aspects présentés ci-après sont principalement repris de cette publication.



**Figure 69 – Régimes thermiques médians à Vouglans, Allement et Pont de Chazey [1933-2008]**

En été la température médiane de l'Ain est de 18°C à Pont de Chazey avec les aménagements actuels. C'est la présence des retenues, par le biais notamment de la stratification thermique qu'elles induisent (Figure précédente), qui entraîne la plus grande modification de régime thermique (différence entre Chazey ANR et Chazey NAT), et ce, quelque soit le mode de gestion (Chazey AM ou Chazey ANR). Le refroidissement moyen de l'eau en été à Pont de Chazey, en lien avec la présence des retenues, est de 1°C environ.

Le soutien d'étiage estival est assuré par un débit qui, sauf situation exceptionnelle comme en 2003, est artificiellement maintenu à 12m<sup>3</sup>/s à l'aval d'Allement (il est alors supérieur aux débits entrants).

En première approximation, l'effet d'une augmentation du débit de l'Ain en période estivale peut être estimé sur la base des hypothèses suivantes :

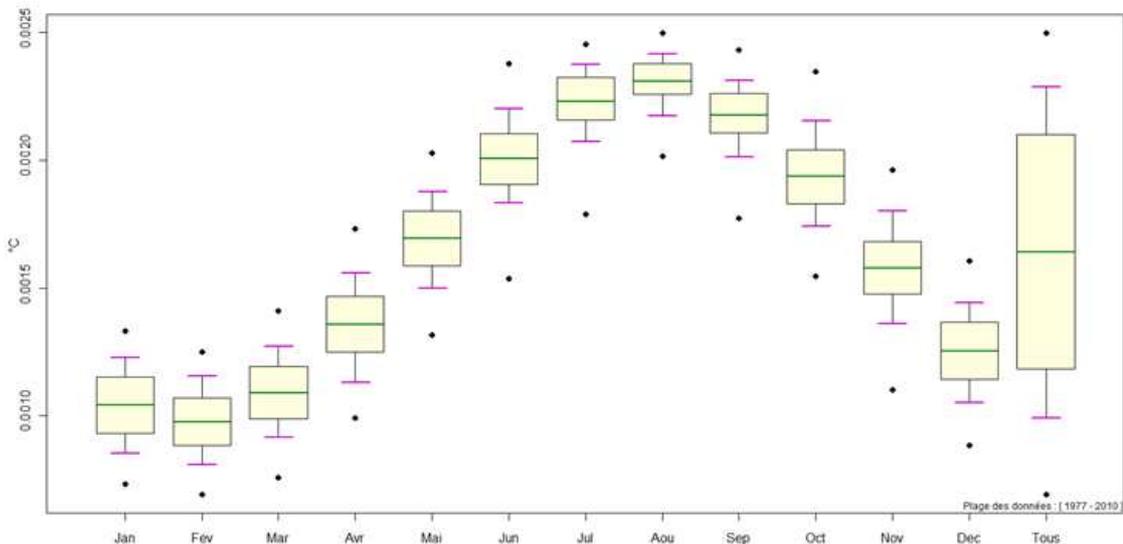
- Température estivale médiane de l'Ain (Pont de Chazey) : 18°C
- Débit d'étiage du Rhône à la confluence Rhône-Ain : 200 m<sup>3</sup>/s
- Température estivale du Rhône à la confluence : 22°C (sur la base d'une température médiane de 19.5°C à l'amont de Bugey et d'un échauffement résiduel lié à Bugey de 2.5°C).

Cette estimation ne tient pas compte de l'échauffement complémentaire en période de canicule, entre Pont de Chazey et la confluence Ain-Rhône.

Si tant est que la température de l'Ain puisse être inférieure à la température du Rhône à leur confluence, l'effet unitaire sur la température du Rhône, d'une augmentation du débit de l'Ain ne dépasserait pas en moyenne 0.002°C par m<sup>3</sup>/s complémentaire. Par ailleurs, on notera que les ressources en eau de la partie basse de la rivière d'Ain sont fortement sollicitées en période estivale, en lien avec les différents usages de la ressource (prélèvements agricoles, ...).

### 3.9.5. Effets de la modification des débits de l'Isère

Un modèle Réseau de Neurones à Tricastin a été construit spécifiquement pour tester la sensibilité de la température de l'eau de l'Isère. A l'aide de ce modèle, nous avons testé l'incidence d'une augmentation marginale de débit de 1m<sup>3</sup>/s (homogène toute l'année) sur la température de l'eau du Rhône à Tricastin. On rappellera par ailleurs que le débit moyen de l'Isère au mois d'août est de 267 m<sup>3</sup>/s.



**Figure 70 - Incidence d'une augmentation uniforme et unitaire (1 m<sup>3</sup>/s) des débits de l'Arve sur la température de l'eau du Rhône à Pougny (les incidences positives indiquent un refroidissement des eaux du Rhône)**

Pratiquement toute l'année, l'Isère étant plus froide que le Rhône, une augmentation de son débit va provoquer un refroidissement du Rhône à Tricastin, situé à l'aval du confluent Isère/Rhône. Le graphique précédent montre également que l'incidence d'une augmentation similaire du débit de l'Isère n'a pas la même incidence en fonction de la période de l'année. En période estivale, le refroidissement des eaux du Rhône pourrait atteindre près de 0.0025°C par m<sup>3</sup>/s de débit ajouté à l'Isère, alors que ce refroidissement est de l'ordre de 0.0015°C en moyenne sur l'année.

En absolu, le levier hydraulique de l'Isère destiné à faire baisser les températures du Rhône est limité (et fonction des hypothèses de débit complémentaire) pour plusieurs raisons et notamment :

- Le temps de séjour des eaux de l'Isère dans les retenues de basses altitudes comme celles du Drac et le long parcours de la rivière à basse altitude (Grésivaudan par ex.) provoque une augmentation significative des températures de ce cours d'eau, pourtant à forte composante nivo-glaciaire, avant son mélange avec les eaux du Rhône. Durant le mois d'août, on notera par exemple que les eaux de l'Isère (Beaumont-Montoux) possèdent en moyenne une température de 15.7°C alors que l'Arve possède une température de 11.4°C durant la même période,

- La distance entre la confluence de l'Isère avec le Rhône et Tricastin est suffisamment importante pour que l'effet de refroidissement après mélange soit très atténué au niveau de Tricastin.

### 3.9.6. Effets sur le Rhône de la modification des débits de la Durance aval

#### 3.9.6.1. Origine des variations de débit

La modification du Cahier des Charges de la concession de Salon/Saint-Chamas par décret du 28/12/2006 a impliqué une augmentation des débits restitués à l'aval de Mallemort. Le débit de la Durance aval a ainsi été modifié à partir de 2007 suite à l'application des nouvelles règles de restitution au niveau de Mallemort, en lien avec les contraintes environnementales de l'Etang de Berre.

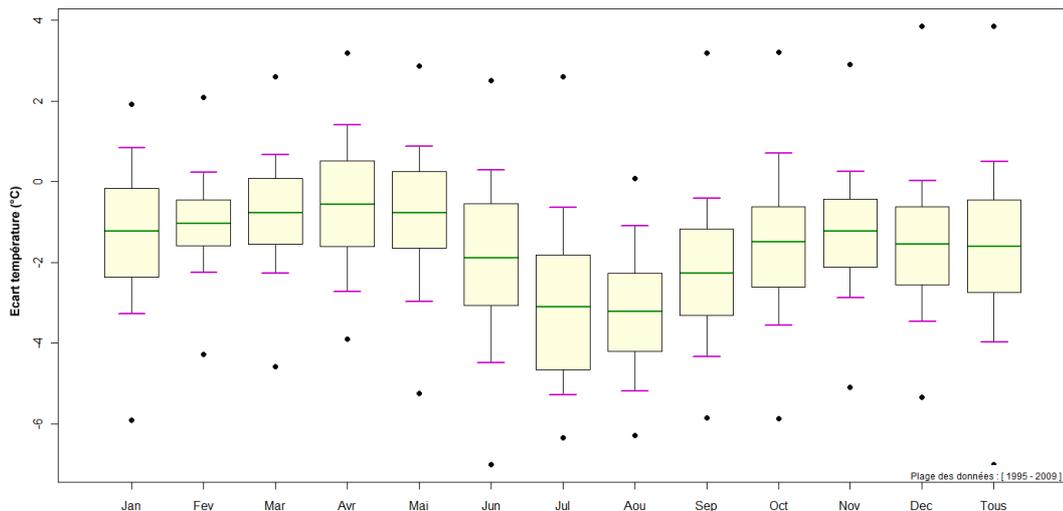
Par ailleurs, le débit réservé de la Durance a évolué ces dernières décennies. Initialement les ouvrages hydrauliques sur la Durance ont été dimensionnés pour garantir un débit minimum de 1/80<sup>ème</sup> du module toute l'année. En 1984 (loi pêche), le débit réservé a été rehaussé au 1/40<sup>ème</sup> du module, soit 4.6 m3/s à l'aval de la Durance (Bonpas). En 2014, il est prévu que le débit réservé soit relevé au 1/20<sup>ème</sup> du module, soit 9.2 m3/s à Bonpas.

#### 3.9.6.2. Effet de la Durance en période estivale avec un débit réservé à 4.5 m3/s

Dans les analyses suivantes, on considérera que la température suivie à l'amont d'Aramon et en rive droite est représentative de la température du Rhône avant mélange.

Dans un premier temps, nous avons évalué l'incidence de la Durance sur la température du Rhône pendant la période estivale.

Des études EDF antérieures (réalisées sur la base de mesures et de modélisations RN) ont montré qu'une grande partie de l'année, la Durance à Cheval Blanc (amont de Bonpas) était plus froide que le Rhône. En été, cette différence est relativement marquée puisqu'elle atteint en moyenne 3°C au mois d'août, sur la période [1995-2009]. Le graphique suivant montre également que durant les mois d'Août, la Durance à Cheval Blanc est plus froide que le Rhône 90 % du temps.



**Figure 71. Différence de température entre le Rhône à Aramon et la Durance à Cheval Blanc (les valeurs négatives de l'écart indiquent que la Durance est plus froide que le Rhône)**

Afin de tenir compte de l'échauffement de la Durance en aval de Bonpas et Cheval Blanc, on retiendra qu'au mois d'août, au confluent Durance-Rhône, la Durance est plus froide de 2.5°C (médiane) que le Rhône.

	QMNA5_Rhone = 670 m3/s à Beaucaire			Q_Aout_Moyen = 1080 m3/s à Beaucaire		
T_Rhone Amont (°C)	24	24	24	24	24	24
Q_RhoneAMont (°C)	665	665	665	1075	1075	1075
T_Durance (°C)	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
Q_Durance (m3/s)	4.5	9	100	4.5	9	100
DeltaT_avant mélange_ amont(°C)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
T_Rhone Aval (°C)	23.98	23.97	23.67	23.99	23.98	23.79
DeltaT-Après mélange (°C)	0.02	0.03	0.33	0.01	0.02	0.21
Q_Rhone Aval (m3/s)	669.5	674	765	1079.5	1084	1175

**Figure 72. Évaluation des effets thermiques de différents débits de la Durance sur le Rhône**

En supposant une dilution complète à la confluence, nous avons calculé la température du Rhône aval en supposant le mélange homogène entre les eaux du Rhône et de la Durance. Le tableau précédent indique que le débit réservé actuel de la Durance provoque en moyenne une baisse de 0.01°C pendant le mois d'août. Plus rarement, lorsque le débit du Rhône est très faible (QMNA5), cette baisse peut alors atteindre 0.02°C.

### 3.9.6.3. Effet de la Durance en période estivale avec le débit réservé futur

Le tableau précédent indique également, qu'à partir de 2014 (*i.e.* date de passage au 1/20<sup>ème</sup> du module pour le débit réservé, soit 9.2 m<sup>3</sup>/s), la Durance doublerait son effet de refroidissement sur le Rhône, qui reste néanmoins limité à environ 0.02°C en situation estivale normale et 0.03°C en situation exceptionnelle (débit quinquennal sec du Rhône).

### 3.9.6.4. Effet de la modification des restitutions pendant la période estivale

Depuis l'application des nouvelles règles de gestion sur la Durance Aval (2007), l'augmentation du débit restitué a été variable d'une année à l'autre et fonction de l'hydrologie des mois précédents. On notera par ailleurs que le débit d'équipement des aménagements de Saint-Chamas est de 265 m<sup>3</sup>/s et que ce débit constitue l'augmentation maximum (potentiel) du débit restitué.

Afin de tester la sensibilité d'une augmentation significative des débits restitués sur la température du Rhône, nous avons testé l'incidence d'une augmentation de 1 m<sup>3</sup>/s du débit restitué.

Les résultats, présentés dans le tableau précédent, montrent qu'une augmentation de 1 m<sup>3</sup>/s du débit restitué a pour effet de diminuer en moyenne de 0.002°C la température du Rhône, et exceptionnellement 0.003°C en période d'étiage du Rhône. On notera que ces augmentations de débit réservé concernent généralement des périodes de courtes durées (quelques jours consécutifs).

### 3.9.6.5. Synthèse des effets des modifications de débits de la Durance sur la thermie du Rhône

Jusqu'en 2007, la Durance était plus froide que le Rhône d'environ 2.5°C en été, ce qui provoquait une baisse de la température du Rhône de 0.01 à 0.02°C suivant les débits. L'augmentation du débit réservé (de 4.6 à 9.2 m<sup>3</sup>/s à Bonpas) à partir de 2014 doublera cet effet. Depuis 2007, l'augmentation des débits restitués dans la Durance Aval a contribué à augmenter l'effet de la Durance sur le refroidissement estival du Rhône aval (~ 0.25°C pour un débit complémentaire restitué de 100 m<sup>3</sup>/s).

Les effets de la Durance sur la thermie du Rhône restent limités compte tenu des débits en jeu et de la position très aval de la sa confluence avec le Rhône.

## 3.9.7. Synthèse des effets directs et indirects des différents leviers hydrauliques

L'augmentation du débit du Rhône en sortie du Léman ou par l'intermédiaire des principaux affluents aurait un double effet sur la température de l'eau du Rhône à l'aval :

- Un effet « direct », ressenti dès l'amont des principaux rejets thermiques localisés (CNPE, ..), destiné à diminuer la température de l'eau par apport complémentaire d'eau (plus froide que le Rhône). La partie précédente traite de cet aspect,
- Un effet « indirect », visible à l'aval des rejets thermiques, destiné à limiter l'augmentation de la température après mélange par augmentation du potentiel de dilution du rejet dans un débit plus important du Rhône.

Cet effet indirect a été évalué sur la base des principales hypothèses suivantes :

- Un débit d'étiage du Rhône (QCN7\_5 de 172 m<sup>3</sup>/s à Bugey et 504 m<sup>3</sup>/s à Tricastin),
- Un fonctionnement à pleine puissance des CNPE avec des besoins en eau suivants: ~ 90 m<sup>3</sup>/s à Bugey et ~ 168 m<sup>3</sup>/s à Tricastin,
- Des températures chaudes de l'eau du Rhône à l'amont (prise) : environ 25°C,
- Des eaux de rejet 8°C plus chaudes que les eaux amont.

L'effet indirect de l'augmentation de débit sur la baisse des températures à l'aval des CNPE (par dilution) a été évalué, de façon indépendante, à l'aval de Bugey et de Tricastin, pour une augmentation marginale de débit de 10 m<sup>3</sup>/s sur l'Arve et l'Isère (hypothèse). Cette évaluation apporte les résultats synthétisés dans le tableau suivant :

Levier hydraulique	Bugey Débit d'étiage QCN7_5=172 m <sup>3</sup> /s		Tricastin Débit d'étiage QCN7_5=504 m <sup>3</sup> /s	
	Effet direct	Effet indirect potentiel (aval CNPE)	Effet direct	Effet indirect Potentiel (aval CNPE)
Optimisation thermique de la gestion hebdomadaire du Léman	-0.002°C par m <sup>3</sup> /s	-0.008°C par m <sup>3</sup> /s	-	-
Débit Arve	-0.015°C par m <sup>3</sup> /s	-0.01°C par m <sup>3</sup> /s	-	-
Débit Isère	-	-	-0.0025°C par m <sup>3</sup> /s	-0.003°C par m <sup>3</sup> /s

**Figure 73 - Synthèse des effets directs et indirects des différents leviers hydrauliques sur la température estivale du Rhône**

Pour l'Ain, la baisse de température, à l'aval de la zone de mélange, a été évaluée à 0.002°C par m<sup>3</sup>/s supplémentaire. Pour la Durance, la baisse est comparable et ne concerne que l'extrême cours aval du fleuve.

Jusqu'à quelques dizaines de m<sup>3</sup>/s, on peut supposer que la réponse du système soit linéaire (cf partie 4.4 et il est donc possible d'utiliser cet « effet unitaire » (par m<sup>3</sup>/s) pour évaluer l'effet d'une augmentation plus importante de débit (par ex. en multipliant par 10 l'effet unitaire si on envisage d'ajouter 10 m<sup>3</sup>/s au débit actuel de l'Arve).

L'effet indirect par dilution est variable suivant le site étudié et est très lié au débit du Rhône. Il est du même ordre de grandeur que l'effet direct de baisse de température de l'eau par augmentation du débit. Pour le Léman, cet effet indirect est environ 4 fois supérieur à l'effet direct.

La hiérarchisation de l'intérêt des différents leviers hydrauliques est aujourd'hui inaccessible sur la seule base de la connaissance des effets unitaires décrits ci-avant. L'intensité de ces effets absolus est directement liée à l'effet unitaire identifié mais également aux débits mobilisables. La définition des débits mobilisables fait appel à des considérations techniques (hydrologiques par exemple) mais également à des aspects socio-économiques, et dépasse donc le cadre de cette étude.

Les analyses de sensibilité (ou marginalistes) conduites sur les relations entre débits et température de l'eau du Rhône et de ses affluents froids quantifient la force des leviers utilisables : les incidences sur les conditions thermiques sont comprises entre 0.005 (Isère) et 0,025°C (Arve) par m<sup>3</sup>/s supplémentaire (différents suivant les affluents). En situation « chaude », seule l'activation synchrone de plusieurs leviers à des niveaux importants (plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/s supplémentaires chacun) permettrait d'arriver à un effet thermique de l'ordre du degré Celsius.

## 4. MÉTHODES & ANALYSES

### 4.1. RECENSEMENT & COLLECTE DES DONNÉES

La construction des modèles de simulation de température de l'eau requiert l'introduction d'un certain nombre de variables explicatives, qui serviront à approximer la variable expliquée (ici la température de l'eau). Ces données d'entrée permettront d'abord le calage des modèles, puis l'extrapolation de la variable expliquée à une période pour laquelle cette dernière n'existait pas. La portée temporelle des séries utilisées en entrée doit donc, dans la mesure du possible, couvrir toute la période sur laquelle les simulations seront effectuées (phase d'apprentissage + phase de reconstitution). Cela coïncide dans notre cas avec la période 1920-2010. Un inventaire des paramètres susceptibles d'avoir un effet sur la température de l'eau a été réalisé (c'est-à-dire ceux présentant *a priori* une forte corrélation et/ou un contrôle important de la thermie). Les paramètres suivants ont été reconnus pertinents :

- séries de débit,
- séries de température de l'air,
- séries de puissance des CNPE fonctionnant en circuit ouvert,
- séries de volume cumulé des aménagements,
- séries de champs de pression atmosphérique.

Afin de réunir un jeu de données le plus exhaustif possible, diverses sources ont été exploitées. Les stations situées dans la partie suisse du bassin sont administrées par l'Office Fédéral de l'Environnement Suisse (OFEV), tandis que les données enregistrées sur le linéaire du Rhône peuvent être la propriété d'EDF, de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Rhône-Alpes, ou encore du Service de la Navigation Rhône-Saône (SNRS). La qualité des données s'est avérée assez hétérogène selon les paramètres considérés, selon les stations de mesure et selon les périodes couvertes.

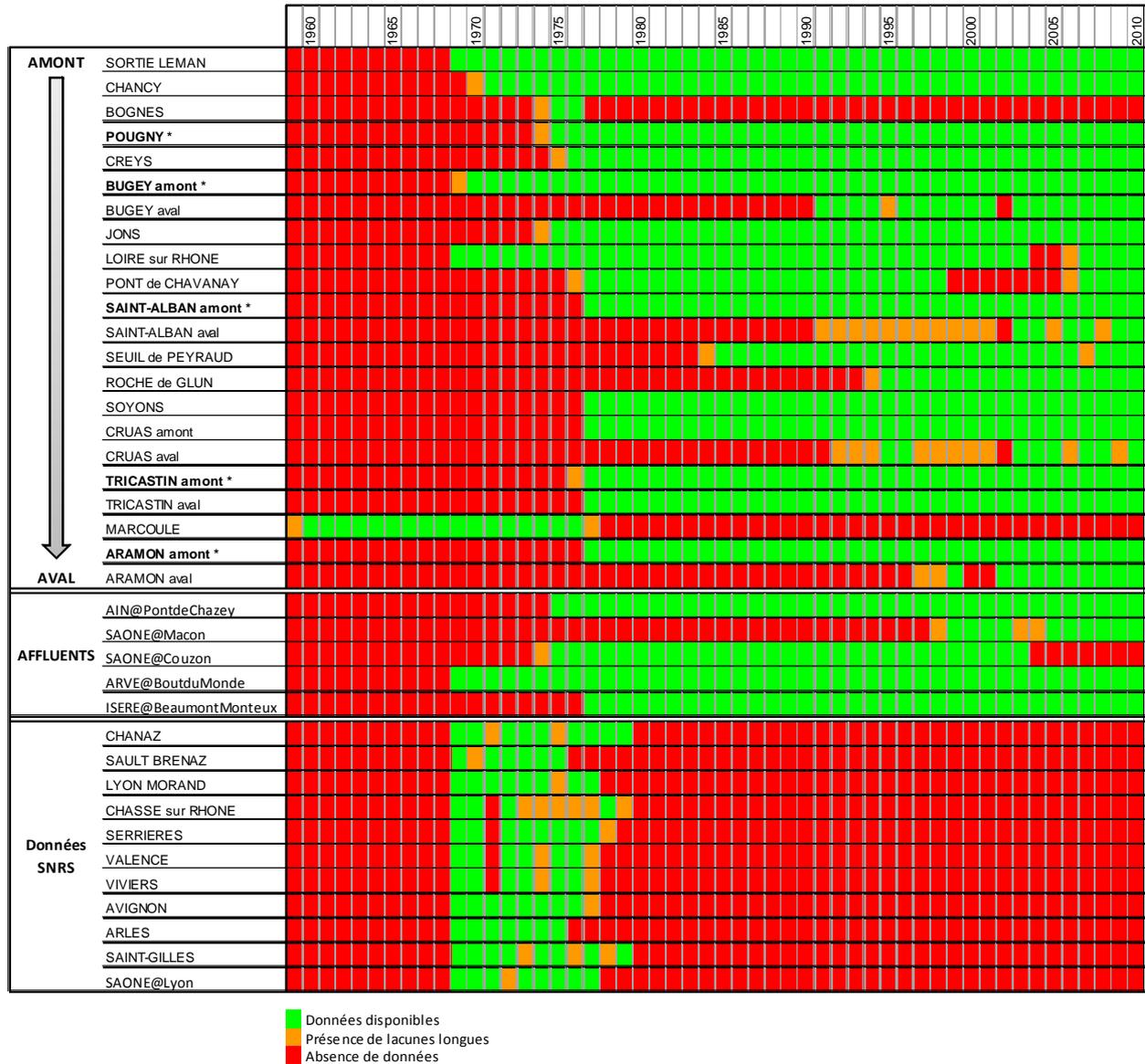
#### 4.1.1. Température de l'eau

Les premières mesures de température de l'eau sur le Rhône datent des années 1970, à l'exception de la station de Marcoule dont le suivi a démarré en 1959. Une quinzaine de stations de mesure ont été déployées par EDF sur le linéaire du fleuve et ses affluents depuis les années 1970 (Tableau 1).

A ces stations s'ajoutent deux suivis opérés par l'OFEV dans la partie amont du bassin, qui ont débuté en 1969-1970. Les deux stations sont situées en sortie du Lac Léman (Halle de l'Île) ainsi qu'à Chancy (limite de la frontière franco-suisse, proche Pougny).

Enfin, un total de 11 stations patrimoniales a fait l'objet d'un suivi par le SNRS entre 1969 et 1979. Il s'agit en grande partie de données parcellaires, qui seront exploitées uniquement en phase de comparaison – validation des séries reconstituées.

Le Tableau 1 offre un aperçu synthétique de la disponibilité des données de température de l'eau sur l'ensemble des stations consultées.



**Tableau 8. Bilan des données de température de l'eau disponibles**

### 4.1.2. Débit

Les données de débit disponibles sur le linéaire du Rhône proviennent essentiellement de l'OFEV (amont et partie en aval proche du Léman) et de la CNR (de Bognes à Beaucaire), alors que les données sur les affluents sont issues de stations gérées par EDF ou par la DREAL Rhône-Alpes.

#### 4.1.2.1. Au pas de temps journalier

**Le Tableau 9.** Données de débit collectées sur le Rhône et ses principaux affluents au pas de temps journalier

ci-dessous rassemble les informations sur les séries correspondant aux points de mesure cités ci-dessus, d'amont en aval :

Station	Organisme gestionnaire	Portée
le Rhône à la Porte du Scex (en entrée du Grand Lac)	OFEV	1920-2011
le Rhône en sortie du lac Léman (Halle de l'Île)	OFEV	1920-2011
l'Arve à Arthaz (amont confluence)	EDF	1961-2011

le Rhône à Pougny (aval de la confluence avec l'Arve)	OFEV/CNR	1920-2011
le Rhône à Bognes (aval de Génissiat)	CNR	1920-2011
le Rhône à Pont de Lagnieu (amont CNPE de Bugey)	CNR	1920-2011
l'Ain à Pont de Chazey (amont confluence)	DREAL	1959-2011
la Saône à Couzon (amont confluence)	DREAL	1952-1993 puis 2004-2011
le Rhône à Ternay (amont du CNPE de Saint Alban)	CNR	1920-2011
l'Isère à Pizançon (amont confluence)	EDF	1941-2004
le Rhône à Valence	CNR	1920-2011
le Rhône à Viviers (amont CNPE du Tricastin)	CNR	1920-2011
le Rhône à Beaucaire (aval de la confluence avec la Durance)	CNR	1920-2011

**Tableau 9.** Données de débit collectées sur le Rhône et ses principaux affluents au pas de temps journalier

#### 4.1.2.2. Au pas de temps horaire

Les données CNR présentées ci-dessous seront utilisées pour l'analyse sur la gestion des ouvrages le long du Rhône en aval du Léman et pour l'étude sur les temps de propagations des débits.

Station	Organisme gestionnaire	Portée
le Rhône à Pougny (aval de la confluence avec l'Arve)	CNR	1990-2011
le Rhône à Pont de Lagnieu (aval CNPE de Bugey)	CNR	1991-2001
le Rhône à Ternay (amont du CNPE de Saint Alban)	CNR	1990-2011
le Rhône à Viviers (amont CNPE du Tricastin)	CNR	1992-2011
le Rhône à Beaucaire (aval de la confluence avec la Durance)	CNR	1990-2011

**Tableau 10.** Données de débit collectées sur le Rhône au pas de temps horaire.

### 4.1.3. Puissance des CNPE

Les centrales de production d'électricité de Bugey, de Saint-Alban et du Tricastin fonctionnent en circuit ouvert, l'étude s'est donc concentrée sur ces trois CNPE. Les séries journalières de puissance de chacune des trois centrales ont donc été réunies pour l'alimentation des modèles. Pour la période 1977-1990, les données ont dû être récoltées directement sur site (sous format papier), puis digitalisées. Pour la période 1990-2010, les séries ont été extraites à partir de la base de données de l'Observatoire Statistique Gaz Électricité (OSGE).

### 4.1.4. Température de l'air

Quatre stations de mesure de la température de l'air disposant d'une portée temporelle suffisante ont été sélectionnées pour cette étude. Il s'agit des stations de Genève (Cointrin), Lyon (Bron), Montélimar et Nîmes. Les séries de données ont été téléchargées depuis le site de l'ECA&D (European Climate Assessment & Dataset, <http://eca.knmi.nl/>).

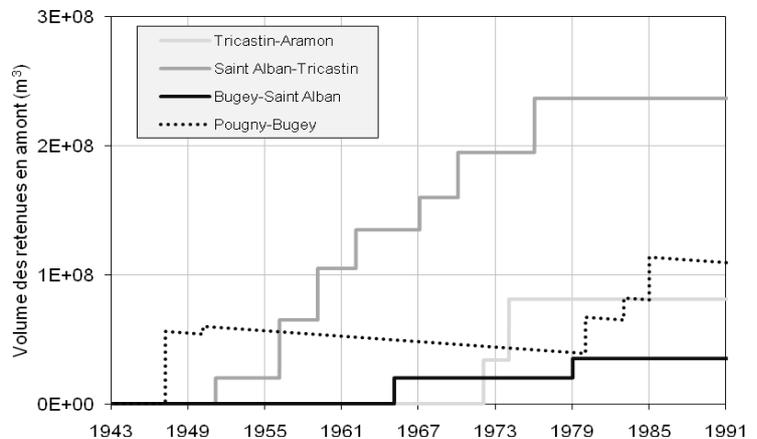
### 4.1.5. Champs de pression

Deux types de données ayant un lien avec les champs de pression atmosphériques ont également été utilisés : les données de pression atmosphérique à 0 m (portée temporelle 1850-2003) d'une part, et l'altitude des surfaces isobares 700 hPa et 1000 hPa (portée temporelle 1948-2010) d'autre part. Plusieurs études ont démontré que ces paramètres sont très adaptés à la simulation du phénomène de "goutte froide" (diminution brusque de la température de l'eau à l'exutoire du Léman suite à un long épisode venteux d'ouest en période estivale ; cette baisse peut atteindre plus de 10°C). Toutes les données ont été extraites de la base de données de l'ECA&D ('EMULATE' pour les champs de pression et 'NCEP/NCAR' pour les données d'altitude des isobares). Les données disponibles sur la base de l'ECA&D ont une résolution spatiale de 2.5° x 2.5° ; nous avons utilisé la maille encadrant la région du Léman, soit un total de 4 jeux de données.

### 4.1.6. Volumes des retenues

Enfin, des séries de volumes ont été générées afin de tenir compte de l'historique d'aménagement du fleuve. Ces séries correspondent, pour chaque tronçon, à la somme cumulée des volumes d'eau potentiellement stockés dans les retenues au fil du temps et de la construction des ouvrages hydroélectriques (Figure 2). On remarquera que pour l'aménagement de Génissiat, le colmatage progressif par les sédiments a été pris en compte (passage d'un volume de 56 Mm<sup>3</sup> lors de la mise en service en 1948 à 12 Mm<sup>3</sup> en 2010).

Station	Aménagement	Mise en service	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Pouigny	Génissiat	1948	56 (1948) → 12 (2010)
	Seyssel	1951	6
	Chautagne	1981	12
	Belley	1981	16
	Brégnier-Cordon	1984	17
	Sault-Brenaz	1986	33
Bugey	Pierre-Bénite	1966	20
	Vaugris	1980	15
Saint-Alban	Péage-de-Rousillon	1977	42
	Saint-Vallier	1971	35
	Bourg-à-Valence	1968	25
	Beauchastel	1963	30
	Baix - le Logis Neuf	1960	40
	Montélimar	1957	45
	Donzère - Mondragon	1952	20
Tricastin	Caderousse	1975	47.5
	Avignon - Sauveterre	1973	34
Aramon			

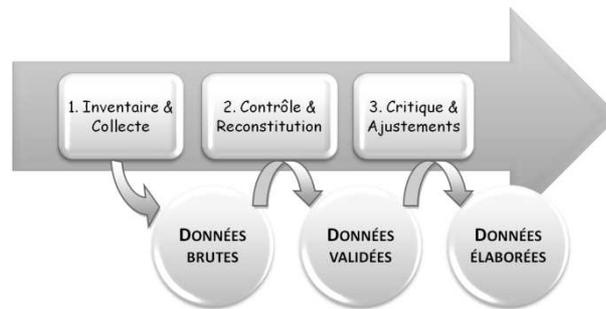


**Figure 74 - Historique d'aménagement du fleuve par tronçon et séries de volumes cumulés**

## 4.2. VALIDATION & CRITIQUE DES SÉRIES

Le processus de validation des séries de données s'articule généralement en trois étapes (Figure 3) :

- Au préalable, un soin particulier doit être accordé à l'inventaire et au recueil des données disponibles. Dans la mesure du possible, il faut s'attacher à obtenir des informations sur la qualité de la mesure et sur l'historique du site (par exemple les éventuels changements de sonde, déplacements, etc.).
- Dans un second temps, le contrôle des données permet de mettre en évidence les lacunes et données douteuses/aberrantes. Diverses techniques sont alors utilisées, allant de la visualisation graphique simple à des outils numériques offrant une analyse plus fine. Si besoin, il faut procéder à la reconstitution des données manquantes, par exemple par régression linéaire (simple ou multiple) avec les valeurs issues de sites voisins.
- Enfin, la dernière phase consiste à analyser de manière plus élaborée les chroniques validées. Généralement, on étudie les écarts (cumulés ou non) entre les séries de données de deux stations proches, de même que les résidus cumulés issus des régressions linéaires entre deux stations proches. Cette étape permet de détecter d'éventuelles dérives, décrochages, etc. On procède alors à la correction des données si nécessaire.

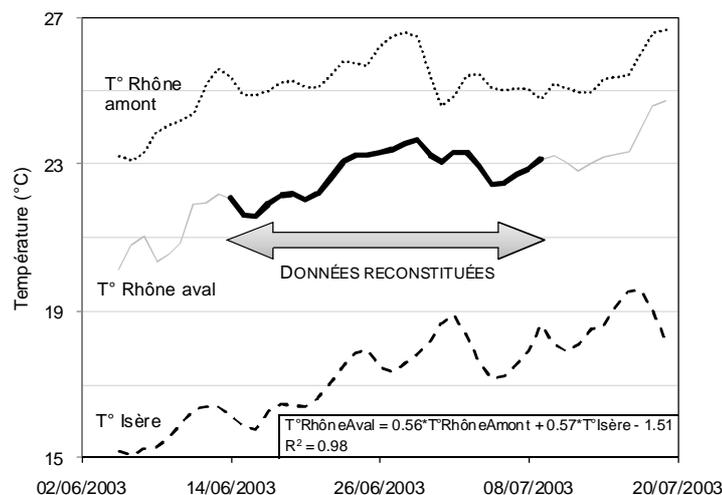


**Figure 75 - Schéma général du processus de validation des séries de mesure**

Dans le cadre de cette étude, un certain nombre de méthodes ont été employées de manière systématique pour chaque série à valider :

(1) L'examen visuel des séries temporelles a permis de procéder à un premier filtrage des données, notamment par l'identification des valeurs incohérentes. Ces valeurs sont souvent isolées, et vraisemblablement issues d'erreurs dans la chaîne d'acquisition des données. Elles ont fait l'objet d'un remplacement par simple interpolation linéaire entre la valeur à J-1 et la valeur à J+1.

(2) La détection des lacunes a ensuite été mise en œuvre au sein de chaque chronique. Les lacunes très courtes (1 jour) ont été comblées par interpolation linéaire. Les lacunes plus étendues (de 2 jours à 1 mois) ont été traitées à partir d'une régression linéaire calée entre la série considérée et une ou plusieurs autres séries dont le point de mesure se trouve à proximité et dont le régime thermique est *a priori* comparable. Par exemple, les lacunes identifiées dans la série à Soyons (station sur le Rhône en aval de la confluence avec l'Isère) ont pu être reconstituées avec les séries de la Roche-de-Glun (Rhône amont confluence Isère) et de Beaumont-Monteux (Isère aval), en ajustant une régression linéaire multiple entre ces stations à partir des 20 données avant lacune et des 20 données après lacune. On trouvera l'illustration de cet exemple en Figure 4.



**Figure 76 - Exemple de traitement d'une lacune à Soyons par régression multiple**

(3) Les lacunes longues (supérieures à 1 mois) n'ont pas fait l'objet de reconstitution. A noter que l'outil de modélisation par réseau de neurones est capable de gérer l'absence partielle de données au sein d'une chronique longue.

(4) Enfin, des études comparatives ont été réalisées entre séries proches pour la critique plus fine des données. Cet exercice avait déjà été mené dans le cadre de l'Étude Rhône – Phase II pour la période récente à compter de 1977 ; il a donc fallu le poursuivre pour les séries antérieures (1959-1976). Après sélection de 2 sites voisins, à la fois en termes de géographie et de régime thermique, un modèle linéaire a été compilé entre les 2 séries.

L'analyse graphique de l'évolution des résidus cumulés au modèle au cours du temps a permis d'identifier de possibles anomalies. Une autre analyse critique a consisté à étudier la relation entre variations journalières de température d'un site à l'autre. Il a ainsi été possible de s'affranchir de l'auto-corrélation inhérente à l'étude de séries proches. Les observations issues de ces analyses ont toujours été mises en regard de l'historique d'aménagement du Rhône. La construction d'un ouvrage peut en effet modifier localement le régime thermique du fleuve (influence sur les échanges eau-atmosphère), et donc affecter la relation entre les températures mesurées en 2 points du Rhône.

Dans tous les cas, un code spécifique a été attribué aux valeurs reconstituées. De même, la méthode utilisée pour la reconstitution des données a été conservée en mémoire, ceci afin d'assurer une traçabilité et un retour éventuel vers la donnée brute en phase de simulation.

### 4.3. MODÉLISATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU À L'AIDE DES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

#### 4.3.1. Grandes lignes de la modélisation de type réseau de neurones artificiels

Le principe de ce type de modélisation a été décrit en annexe de l'ETRP2. Il est rappelé ci-après uniquement les grandes lignes.

Cette modélisation statistique de type « boîte noire » permet d'approximer une variable à expliquer à partir de variables explicatives sans préjuger à aucun moment de la structure des relations qui les lient. Contrairement aux autres types de modélisations, on ne fait donc aucune supposition sur le fait que la relation qui lie température de l'air et de l'eau soit linéaire ou en  $(\Delta T_{\text{air-Teau}})^4$  par exemple.

En contre partie, cet outil nécessite une grande prudence d'utilisation à deux niveaux :

- il s'adapte à beaucoup de situations et donc est capable de reproduire même des erreurs de mesure si celles-ci sont rares ou non aléatoires,
- il est délicat à utiliser en dehors de sa plage de calage parce qu'être un bon outil d'interpolation ne signifie pas être fiable en extrapolation...

Pour pallier à ces défauts, les échantillons sont divisés en deux sous-échantillons : une partie de calage qui sert à caler les coefficients du réseau et une partie de test sur laquelle on juge de ses performances. Par rapport aux modèles de régression multiple ou aux modèles pseudo-déterministes utilisés en simulation des températures de l'eau, le test s'effectue sur plus de la moitié de l'échantillon initial.

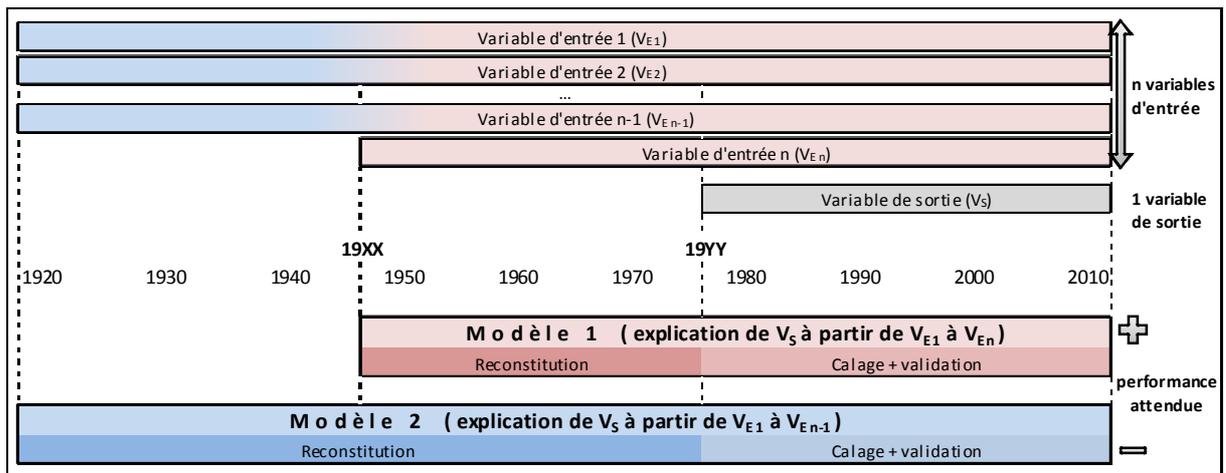
Les limites d'utilisation des modèles et d'interprétation des résultats sont précisées dans la partie 4.3.4.2.

#### 4.3.2. Démarche retenue

Les cinq stations identifiées pour la génération de chroniques historiques de température de l'eau font l'objet d'un suivi thermique depuis une quarantaine d'années : les premières mesures réalisées sur ces stations datent de 1969 à Bugey, 1974 à Pougny, 1976 à Tricastin, et 1977 à Saint-Alban et Aramon. Les reconstitutions ont donc porté sur les périodes allant de 1920 jusqu'aux premières données enregistrées.

L'outil utilisé est la modélisation par réseaux de neurones artificiels (RN). Cette modélisation de type "boîte noire" permet de décrire une variable de sortie à partir de plusieurs variables d'entrée, en introduisant des relations non-linéaires entre ces variables (par exemple par l'intermédiaire de fonctions sigmoïdes, hyperboliques, etc.). Le modèle procède à un calage sur une partie des données (typiquement 1/3 de la série, les valeurs étant dans notre cas piochées aléatoirement), suivi d'une phase de test sur une autre partie des données (typiquement les 2/3 restants). Un panel d'indicateurs permet d'évaluer la performance du RN : erreur quadratique moyenne, critère de Nash, coefficient de corrélation sur les variations, etc. La qualité prévisionnelle du modèle dépend de la pertinence des informations introduites comme variables explicatives (à savoir de leur qualité et de leur degré de corrélation avec la variable à expliquer). Une fois l'apprentissage terminé et la validation jugée satisfaisante, on peut procéder à la simulation de la variable expliquée sur la période historique. La structure des modèles élaborés dans le cadre de cette étude se compose d'une seule couche cachée, et de 3 à 4 neurones selon les cas.

La disponibilité des données d'entrée, et notamment leur portée temporelle, a pu représenter une contrainte pour la construction des RN. En effet, certaines des variables recueillies ne couvrent pas l'intégralité de la période visée en reconstitution (par exemple, une série de température de l'air dont les données ne seraient disponibles qu'à partir de 1940). Lorsque ce cas de figure s'est présenté, il a été nécessaire de réaliser deux modèles : un premier modèle calé avec l'ensemble des variables explicatives, mais sur une période tronquée (ex. 1940-1970) ; puis un second modèle calé sur un nombre limité de variables explicatives, permettant cette fois une reconstitution simplifiée sur l'ensemble de la période souhaitée (ex. 1920-1970). La démarche adoptée est représentée en Figure 5.



**Figure 77 - Représentation simplifiée de la procédure suivie pour la reconstitution des séries de température de l'eau en cas de contrainte en entrée**

Ici, la variable  $V_{En}$  est limitante, puisqu'à la différence des autres variables d'entrée, elle ne couvre pas l'ensemble de la période de reconstitution. Le passage du "Modèle 1" au "Modèle 2" induit logiquement une dégradation de la qualité prévisionnelle, le "Modèle 2" sollicitant un nombre moindre de variables explicatives. La date fictive '19YY' correspond à l'année de démarrage du suivi thermique (donc entre 1969 et 1977 selon les sites), et la date fictive '19XX' correspond à la première année de mesure de  $V_{En}$ .

Ce type de contrainte s'est présenté pour les stations de Pougny, de Saint-Alban et de Tricastin. Deux modèles ont donc été établis pour chacune de ces trois stations. Les reconstitutions issues des deux modèles ont systématiquement été comparées, et c'est le meilleur approximateur qui a été conservé sur la période de juxtaposition des deux chroniques (correspondant à la période 19XX-19YY sur la Figure 5). A noter que pour chacune des stations, une seule variable d'entrée a été limitante, ou un groupe de variables dans le cas des champs de pression atmosphérique.

D'autre part, l'optimisation des modèles s'est souvent accompagnée d'un prétraitement des variables explicatives, à savoir un lissage et/ou un décalage temporel de ces variables. Les coefficients de lissage introduisent un effet intégrateur dans les séries de données ; plus le coefficient est proche de 1, plus le lissage est fort. Les coefficients de décalage introduisent un effet retard dans les séries, un coefficient de 1 décalant les valeurs d'un pas de temps (24 h dans notre cas).

### 4.3.3. Description des modèles réalisés

#### 4.3.3.1. Principe

Les simulations de température de l'eau ont été réalisées selon un processus "en cascade", à savoir depuis l'amont (station de Pougny) vers l'aval (station d'Aramon). Ainsi, chaque chronique reconstituée en un point a ensuite été injectée comme variable explicative pour le modèle situé en aval. La présentation des résultats reprend cet ordre amont – aval.

#### 4.3.3.2. Station de Pougny

##### Données d'entrée

Le modèle à Pougny se distingue des quatre autres modèles parce qu'il n'a aucune température de l'eau amont en entrée. On peut donc s'attendre à des performances limitées en termes de calage, et par conséquent, de reconstitution.

La station de Pougny se trouvant en aval proche de la confluence avec l'Arve, il a semblé judicieux de fournir au modèle des informations sur cet affluent. Sa thermie particulière pourrait avoir un effet non négligeable sur la température de l'eau à Pougny. Les données de température de l'Arve n'existent que depuis 1969 ; il a donc été nécessaire de prolonger cette chronique sur la période 1920-1968. Un modèle RN a été calé dans cet optique, à partir des données de température de l'air à Genève et de débit de l'Arve. Le régime thermique de l'Arve, de type glacio-nival faiblement variable en été, a pu être approximé de manière satisfaisante, le modèle s'avérant performant grâce à cette faible variabilité (erreur quadratique moyenne  $< 0.6^{\circ}\text{C}$  ;  $r$  sur variations 0.69).

En raison de la disponibilité des données atmosphériques nécessaires à la retranscription des gouttes froides, deux modèles ont été construits à Pougny (cf. procédure détaillée en 2.3). Le Modèle 1 (M1) s'appuie sur les données d'altitude des isobares 700 et 1000 hPa (2 x 4 séries), et couvre la période 1948-1974 en reconstitution, alors que le Modèle 2 (M2) se base sur les pressions atmosphériques à 0 m (1 x 4 séries, moins de variables donc on s'attend à un ajustement moins précis), et couvre la période 1920-1974 en reconstitution.

Le Tableau 3 répertorie l'ensemble des variables explicatives utilisées pour le calage – validation de chacun des modèles.

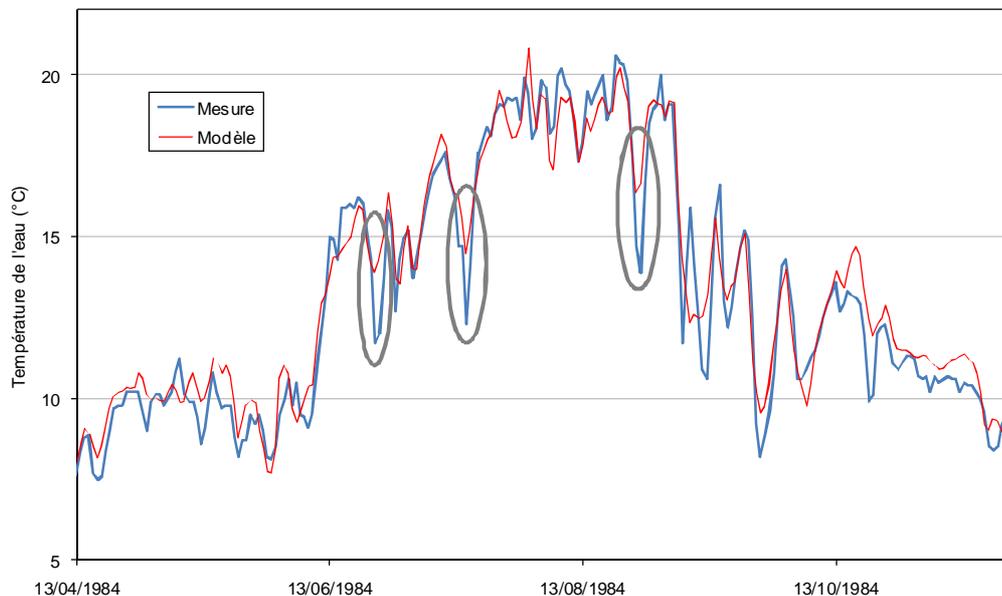
Variables d'entrée	Séries à reconstituer									
	TE_Pougny		TE_Bugey		TE_StAlban		TE_Tricastin		TE_Aramon	
	M1	M2			M1	M2	M1	M2		
Séries de T° eau	TE_Pougny			L0.62; D2; D3; D4						
	TE_Bugey				L0.56	L0.56; D1; D2				
	TE_SaintAlban						Vb; L0.5	L0.5		
	TE_Tricastin									Vb
	TE_Aramon									
	TE_Arne*	Vb; D1	Vb; D1							
Séries de T° air	TE_Ain*				L0.62					
	TE_Saône*				Vb; L0.5					
	TE_Isère*						L0.52	L0.52		
	TA_Genève	Vb; D1	Vb; D1	L0.9						
Séries de Débit	TA_Lyon		Vb	Vb; L0.9	L0.9	L0.9			L0.9	
	TA_Montélimar						L0.88			
	TA_Nîmes									L0.88
Séries de Z	Q_SortieLéman	Vb; L0.98; D1	Vb; L0.98; D1							
	Q_Chancy			D2						
	Q_Lagnieu			Vb	L0.98	L0.98				
	Q_Ternay				Vb; L0.9	Vb; L0.9				
	Q_Viviers						L0.86	L0.86		
	Q_Beaucaire									L0.88
Séries de Patm	Q_Arne	Vb; L0.98; D1	Vb; L0.98; D1							
	Z700/Z1000_106			Vb; L0.8						
	Z700/Z1000_107			Vb; L0.8						
	Z700/Z1000_125			Vb; L0.8						
Séries de Puissance	Z700/Z1000_126			Vb; L0.8						
	Patm_106			Vb; L0.8; L0.98						
	Patm_107			Vb; L0.8; L0.98						
	Patm_125			Vb; L0.8; L0.98						
Séries de V des retenues	Patm_126			Vb; L0.8; L0.98						
	PU_Bugey				Vb	Vb				
	PU_SaintAlban						Vb	Vb		
	PU_Tricastin								Vb	
	V_retenues			Vb	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb

Vb = variable de base  
 DX = variable décalée de X jours  
 LX = variable lissée avec coefficient X  
 \* séries obtenues par modélisation RN

**Tableau 11. Récapitulatif des variables utilisées pour le calage des RN**

Validation

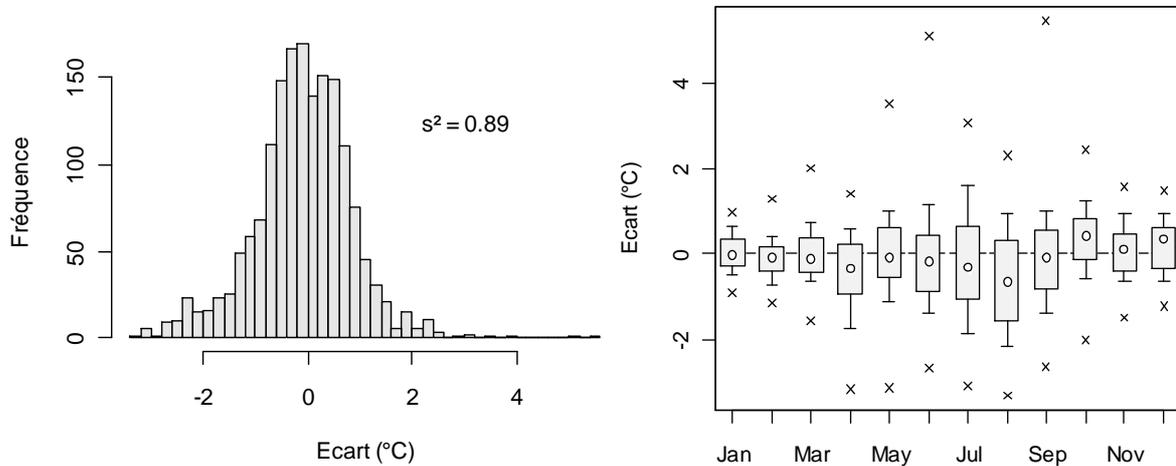
Dans l'ensemble, l'exercice de calage/validation s'est révélé satisfaisant, avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 1°C pour les deux modèles (M1 : 0.91°C et M2 : 0.95°C). On n'observe pas de dégradation significative entre les performances respectives des modèles M1 et M2. Bien que les RN donnent des résultats globalement honorables, ils montrent tous deux des limites à retranscrire fidèlement les gouttes froides estivales (ce qui pourrait être dû à un décalage temporel dans les données, qui impliquerait un lissage statistique de ces événements). La Figure 8 donne un aperçu des différences entre températures mesurées et modélisées (M1) à Pougny, pour une période estivale sélectionnée arbitrairement au sein de la phase de calage/validation. On notera que les écarts entre modèle et observation peuvent atteindre 3 à 4°C lors de ces abaissements soudains de la température du fleuve.



**Figure 78 - Résultats de calage/test en été à Pougny (exemple de l'année 1984). Les ellipses grises pointent les épisodes de goutte froide mal retranscrits par le modèle**

Critique des reconstitutions

La mise en place de la station de mesure à Chancy (territoire suisse en amont proche de Pougny) est antérieure à celle de Pougny de quelques années. Nous avons donc pu étudier les écarts entre valeurs issues du modèle à Pougny et valeurs mesurées à Chancy, ce sur la période 1970-1974. La Figure 9 rend compte de cette analyse.



**Figure 79 - Distribution fréquentielle (a) et temporelle (b) des écarts entre la température à Pougny modélisée (M1) et la température à Chancy mesurée entre 1970 et 1974. Les boîtes à moustache correspondent à q10, q25, q50, q75 et q90.**

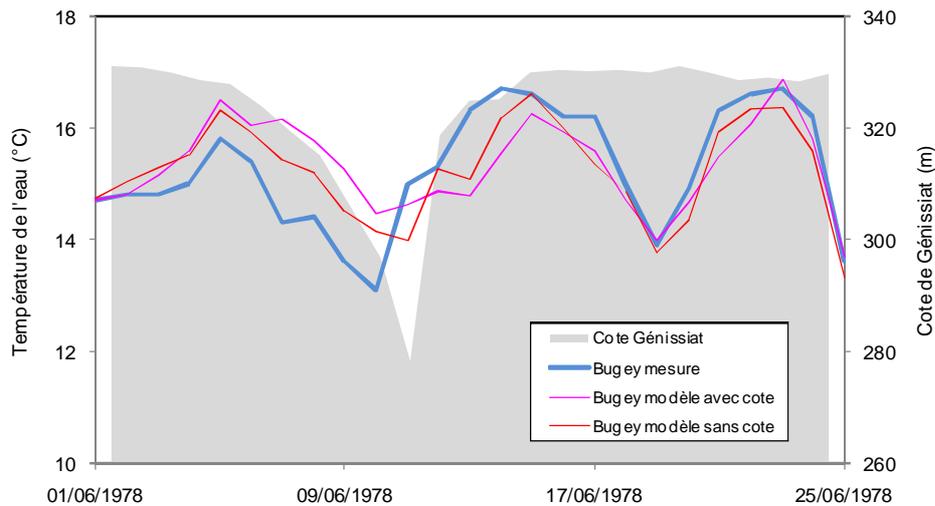
Très peu d'écarts persistent au-delà de l'intervalle  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Une dispersion plus importante affecte les écarts des mois de mai à septembre, ce phénomène étant attribué à la difficulté de modéliser précisément les gouttes froides. Globalement, les modèles M1 et M2 à Pougny donnent des résultats satisfaisants.

**4.3.3.3. Station de Bugey**

Données d'entrée

Bien que la chronique de température à Bugey démarre en 1969, la critique des données a permis de déceler l'existence de valeurs très approximatives et peu fiables sur la période 1969-1971 (précision  $0.5^\circ\text{C}$ , allure "en créneau"). C'est donc l'intervalle 1972-2010 qui a été privilégié pour la phase de calage/validation.

Le tronçon Pougny-Bugey a été considérablement modifié par la mise en service en 1948 du barrage de Génissiat (hauteur de chute 67 m). Il n'existe pas de mesures de température antérieures à cet aménagement, ce qui rend la reconstitution des données délicate avant cette date. De manière exploratoire, et afin de déterminer si les variations journalières de cote de la retenue ont une influence sur la thermie à Bugey, nous avons introduit cette variable dans le RN destiné à approximer les températures de l'eau à Bugey. Un RN témoin n'incluant pas en entrée les variations de cote a été construit en parallèle. Ce test de sensibilité a révélé que la qualité prévisionnelle n'est pas meilleure lorsque l'information sur Génissiat est disponible, même sur les périodes coïncidant avec une forte variation de cote (vidange du barrage par exemple). La Figure 10 montre l'évolution de la température à la station de Bugey lors de la vidange complète de juin 1978. Sur cette période, le modèle tenant compte de la cote à Génissiat a même tendance à être moins fidèle à la mesure que le modèle témoin.



**Figure 80 - Variations de température à Bugéy pendant la vidange de Génissiat de juin 1978**

Ces résultats relativement inattendus peuvent s'expliquer par le faible effet thermique global de la retenue, ou encore par l'existence possible de chenaux préférentiels d'écoulement qui limiteraient le temps de séjour des eaux en transit. La variable "cote de Génissiat" n'a donc pas été maintenue dans le modèle final.

La performance du modèle a été sensiblement augmentée lors de l'introduction de plusieurs variables calculées à partir de la série de température à Pougny : lissage à coefficient 0.62, décalage de 2 jours, 3 jours et 4 jours. Ces résultats dénotent l'influence majeure de la température du Rhône à Pougny sur la température du Rhône à Bugéy (phénomène de transfert thermique amont-aval).

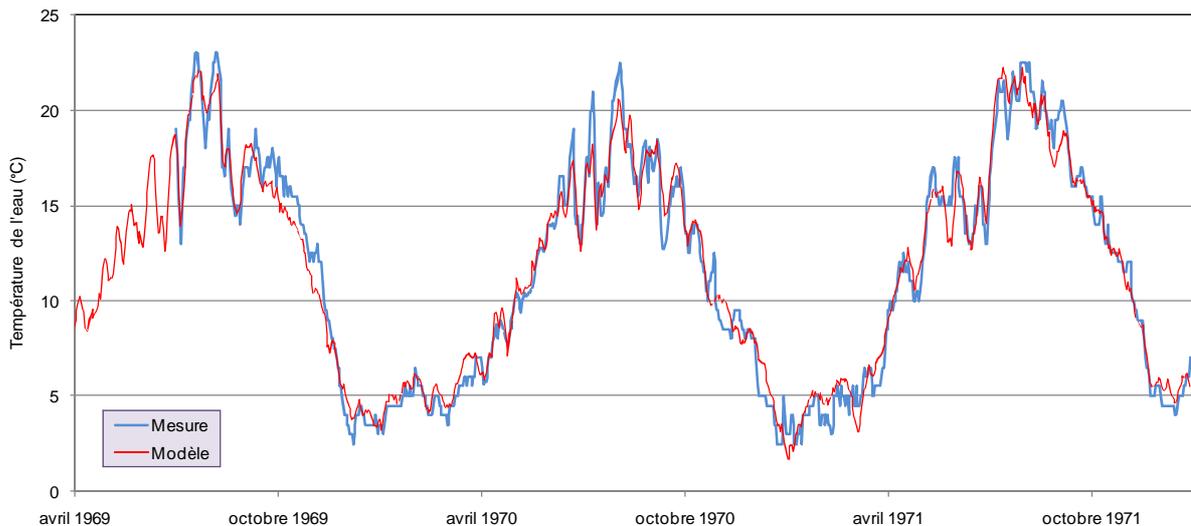
Le détail des variables utilisées en entrée dans le modèle à Bugéy pourra être consulté dans le Tableau 3.

Validation

L'erreur quadratique moyenne du RN de Bugéy est faible (0.59°C), les simulations s'ajustant très bien sur les mesures en période de calage/test. L'incorporation d'informations sur la température du fleuve en amont explique l'écart de performance avec les modèles à Pougny.

Critique de la reconstitution

Les mesures à Bugéy sur la période 1969-1971, considérées comme peu fiables, ont tout de même pu être confrontées aux données reconstituées (Figure 11). Sur certaines périodes, il semble que le modèle fournisse des valeurs plus vraisemblables que la mesure.



**Figure 81 - Comparaison entre les températures mesurées et modélisées à Bugéy entre 1969 et 1971**

Comme évoqué précédemment, une incertitude subsiste sur la fiabilité de la reconstitution des températures de l'eau avant l'aménagement de Génissiat. L'apprentissage du RN n'a pas pu inclure ce qu'il conviendrait d'appeler l'état thermique initial, du fait de l'absence de données de température à cette époque. La section 3.2 tente de répondre plus précisément aux questions liées à l'historique d'aménagement du fleuve.

#### 4.3.3.4. Station de Saint-Alban

##### Données d'entrée

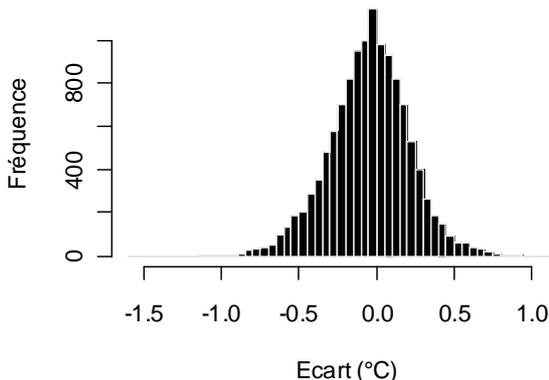
Deux affluents majeurs rejoignent le Rhône sur le tronçon entre Bugey et Saint-Alban. Il s'agit de l'Ain (confluence en aval proche de Bugey) et de la Saône (confluence à Lyon, une trentaine de kilomètres en amont de Saint-Alban). Les contributions thermiques de ces deux rivières pourraient influencer sur la température du Rhône mesurée à Saint-Alban. De la même façon que pour l'Arve, une reconstitution des valeurs de température sur ces deux affluents a donc été entreprise. La procédure a été la suivante :

- dans un premier temps, les séries de débit aval des deux cours d'eau (station à Pont de Chazey pour l'Ain et station à Couzon pour la Saône) ont dû être complétées par régression linéaire à partir de données provenant de stations en amont. Cette phase a permis d'obtenir deux chroniques validées couvrant la période 1923-2010 (données de débit inexistantes avant 1923 sur les deux affluents).
- ces chroniques validées ont permis d'alimenter deux RN (un par cours d'eau), avec ajout de la température de l'air à Lyon comme deuxième variable d'entrée pour les deux modèles. Les calages/tests ont été effectués sur la période 1975-2010 (erreurs quadratiques moyennes entre 0.8 et 1°C), et les reconstitutions de 1923 à 1974.
- les simulations issues du RN de l'Ain ont été utilisées pour compléter une reconstitution antérieure bénéficiant d'une meilleure qualité prévisionnelle (période de complément : 1923-1932). Les simulations issues du RN de la Saône ont été utilisées dans leur intégralité.

En raison de la contrainte liée à la portée temporelle limitée des reconstitutions sur l'Ain et la Saône, deux modèles ont dû être construits à Saint-Alban. Le Modèle 1 (M1) tient compte des variables issues des affluents, et couvre la période 1923-1976 en reconstitution, alors que le Modèle 2 (M2) ne s'appuie que sur les données collectées ou modélisées sur le Rhône, et couvre la période 1920-1976. Parmi les autres variables introduites en entrée des modèles figurent les données de puissance journalière du CNPE de Bugey. Le Tableau 3 donne le détail des variables explicatives pour ces RN.

##### Validation

Les indicateurs de performance des modèles M1 et M2 témoignent d'une très bonne approximation des valeurs mesurées. L'erreur quadratique moyenne est quasiment identique pour les deux modèles (M1 : 0.48°C et M2 : 0.49°C). Comme en atteste la Figure 12, les écarts sont minimes entre les deux approximateurs, avec presque aucune valeur au-delà de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

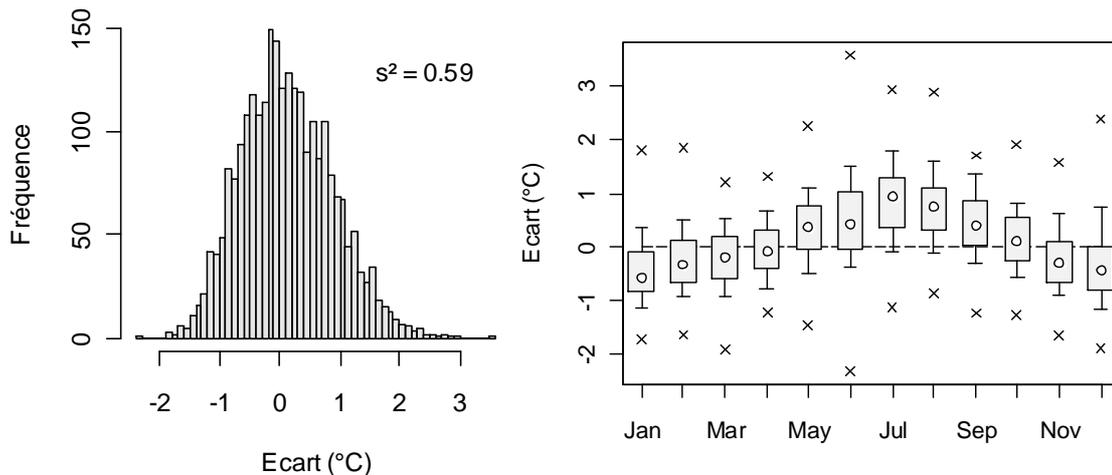


**Distribution des écarts entre M1 et M2 en calage/validation**

Ces résultats montrent que le renseignement des contributions de l'Ain et de la Saône n'est pas essentiel à la compréhension de la thermie à Saint-Alban. On peut considérer que les données de débit à Bugey et à Saint-Alban, couplées avec les données de température de l'air à Lyon, apportent suffisamment d'informations au RN pour expliquer les contributions des deux affluents, dont les températures sont très dépendantes des conditions atmosphériques.

##### Critique des reconstitutions

Une des stations du réseau de mesure déployé par le SNRS dans les années 1970 se trouve à Serrières (aval proche de Saint-Alban). De la même façon qu'à Pougny, on a donc pu évaluer la performance du modèle en reconstitution par l'intermédiaire d'une validation "à l'aveugle" sur la période 1969-1976 (Figure 13).



**Figure 82 - Distribution fréquentielle (a) et temporelle (b) des écarts entre la température modélisée à Saint-Alban (M1) et la température mesurée à Serrières entre 1969 et 1976. Les boîtes à moustache correspondent aux quantiles 10, 25, 50 (médiane), 75 et 90.**

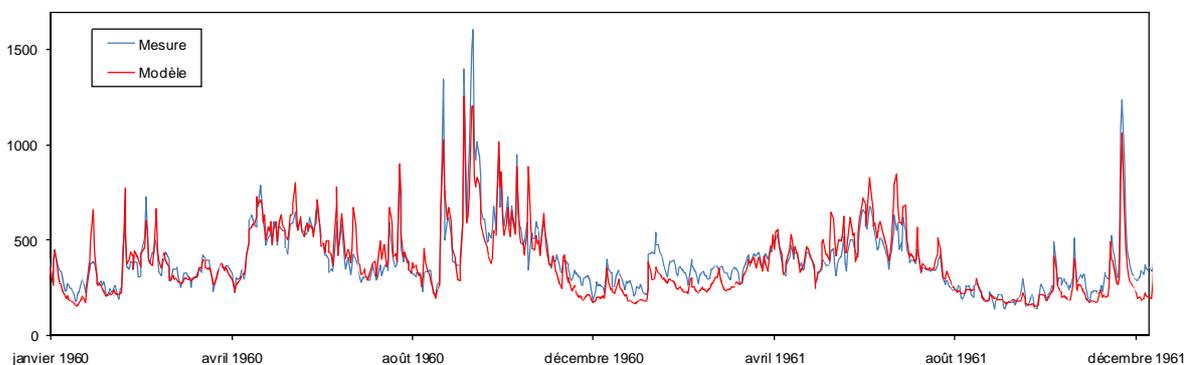
La dispersion des écarts est assez faible, et ce quelque soit le mois considéré. On note une tendance à la surestimation pendant les mois les plus chauds, ce phénomène n'étant pas négligeable. Un tel biais peut être dû au manque de représentativité des données du SNRS (mesures au thermomètre manuel). Les performances sont similaires pour le modèle M2. Les modèles à Saint-Alban fournissent donc des résultats satisfaisants sur la période récente. Reste l'incertitude sur les reconstitutions antérieures à la mise en service des aménagements, qui est traitée en section 3.2 de ce rapport.

#### 4.3.3.5. Station de Tricastin

##### Données d'entrée

L'Isère exerce une influence notable sur le régime thermique du Rhône aval : c'est un cours d'eau de type pluvio-nival dont la température moyenne est largement plus faible que celle des eaux du Rhône au droit de la confluence. Les séries de mesure 1995-2010 indiquent un  $\Delta T$  moyen interannuel de  $+4.5^\circ\text{C}$  entre le Rhône à la Roche-de-Glun et l'Isère à Beaumont-Monteux. La procédure adoptée pour reconstituer la température de l'eau à Tricastin tout en tenant compte des apports de l'Isère s'est donc déroulée comme suit :

- dans un premier temps, les mesures de débit sur l'Isère n'étant disponibles qu'à partir de 1941, il a été nécessaire de les reconstituer de 1920 à 1940. Un RN a été construit à cette fin. L'apprentissage du modèle s'est fait sur la période 1941-1951, pour s'affranchir des effets potentiels des barrages localisés en amont et construits à partir des années 1950. La validation s'est faite sur la plage de données 1952-1978. Trois variables explicatives ont été sélectionnées : le débit du Rhône à Temay (amont confluence), le débit du Rhône à Viviers (aval confluence), et le débit de l'Arve (régime nival au même titre que l'Isère). Les résultats du calage/test se sont avérés corrects, avec notamment un critère de Nash de 0.85, et un  $r$  sur variations de 0.72. La dynamique hydrologique journalière a bien été retranscrite par le modèle, avec une bonne réactivité générale ; des décalages significatifs et prolongés ont tout de même pu être observés entre mesure et modèle (voir Figure 14). Toutefois, nos exigences en termes de précision de la donnée de débit étant relativement limitées, nous avons considéré la chronique reconstituée comme valable pour l'objectif visé (à savoir l'alimentation du modèle de température de l'Isère).



**Figure 83 - Validation des données de débit de l'Isère à Beaumont-Monteux. Exemple des années 1960 et 1961.**

- A partir de la série de débits reconstitués, les températures de l'Isère ont pu être simulées sur la période 1920-1977 (1977 étant l'année de début des mesures validées à Beaumont-Montoux). Une nouvelle fois, nous avons opté pour l'utilisation d'un approximateur de type RN. Le calage s'est restreint à la période 1994-2010, les données de température enregistrées entre 1990 et 1993 nous paraissant douteuses (amplitudes annuelles plus faibles que la normale). Le débit de l'Isère et la température de l'air à Lyon ont été utilisées en entrée. Le modèle ainsi calé a fourni de bons résultats en test (erreur quadratique moyenne de 0.66°C).

- Une fois les modélisations achevées sur l'Isère, la simulation des températures à Tricastin a pu être envisagée. Comme à Saint-Alban et Pougny, deux modèles ont été développés en parallèle en raison de l'existence d'une variable d'entrée incomplète : il s'agit de la chronique de température de l'air à Montélimar, qui ne démarre qu'en 1925. Le modèle M1 considère donc la température de l'air à Montélimar (reconstitution 1925-1976), alors que le modèle M2 considère la température de l'air à Lyon (reconstitution 1920-1976). M1 et M2 se sont également appuyés sur la température du Rhône à Saint-Alban, sur celle de l'Isère à Beaumont-Montoux, sur la puissance journalière du CNPE de Saint-Alban, ainsi que sur les volumes cumulés des retenues (voir Tableau 3 pour les détails).

Validation

Les deux modèles affichent des performances *a priori* très satisfaisantes (erreurs quadratiques moyennes de 0.46°C). Cependant, en phase de simulation l'approximation de la température s'est avérée extrêmement sensible au coefficient de pondération appliqué à la variable "Volume des retenues", au point que les simulations soient aberrantes lorsque le modèle applique une pondération élevée. L'apprentissage a été réalisé sur une période très peu sujette à des variations du paramètre "Volume des retenues" (la majorité des retenues sur le tronçon de Saint-Alban à Tricastin ayant été construites avant 1977, cf. Figure 2) ; le modèle aurait donc tendance à intégrer cette information de manière erronée. Pour contourner ce point de blocage, deux nouvelles versions des RN ont été élaborées à partir de données supplémentaires en calage. Pour ce faire, il a été choisi d'utiliser la série ancienne de Marcoule (1959-1977) comme prolongement de la série réelle de Tricastin : l'apprentissage a ainsi pu s'opérer sur une gamme plus étendue de variations de la variable "Volume des retenues". La période 1959-1976 a été exclue du calage pour se focaliser sur les mesures plus récentes, de plus grande fiabilité. En comparaison des calages initiaux, les indicateurs de performance se sont révélés légèrement moins bons (erreurs quadratiques de 0.63°C et 0.65°C), le test sur la période 1959-1976 donnant logiquement des écarts plus élevés. Cependant, les sorties en simulation des nouvelles versions de M1 et M2 n'ont fait apparaître aucune anomalie, ce qui était l'objectif recherché.

A noter qu'il n'a pas été possible d'effectuer une analyse critique des reconstitutions à cette station, si ce n'est sur l'échantillon de test, puisque la chronique ancienne de Marcoule a été incluse en phase d'apprentissage.

**4.3.3.6. Station d'Aramon**

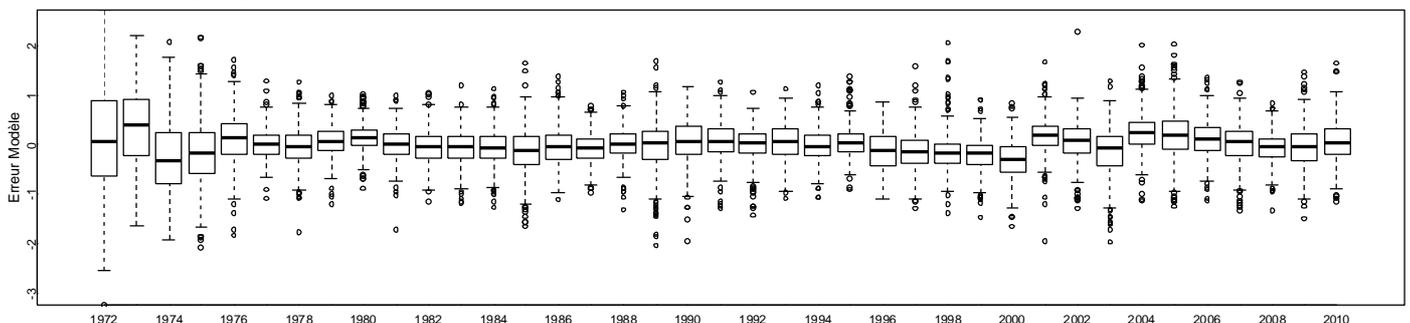
Données d'entrée

La Durance est le dernier affluent majeur du Rhône avant son delta. Les données de débit et de température étant très parcellaires sur ce cours d'eau, nous n'avons pu y caler de modèle. Toutefois, le débit modeste de la Durance (avant la mise en place de la dérivation de Saint-Chamas) en comparaison de celui du Rhône aval, nous laisse présumer une influence limitée en termes de température.

La procédure qui avait été suivie à Tricastin a été reconduite pour l'élaboration du modèle à Aramon : pour éviter un apprentissage sur une période sans variation de volume des retenues, la chronique de température d'Aramon a été prolongée avec les données mesurées par le SNRS à Avignon entre 1972 et 1976. Ce jeu de données est peu précis (mesure manuelle, valeurs journalières parfois extrapolées sur une semaine), mais la perte en précision sur l'erreur quadratique moyenne devrait être compensée par une qualité de reconstitution accrue. Les autres variables utilisées en entrée du modèle sont la température du Rhône à Tricastin, la température de l'air à Nîmes (qui a fait l'objet d'une reconstitution de 1920 à 1925), la puissance du CNPE de Tricastin, et le débit du Rhône à Beaucaire. On pourra se référer au Tableau 3 pour le détail des décalages/lissages appliqués aux variables.

Validation

La Figure 15 confirme l'ajustement moins performant sur les cinq premières années (1972-1976), qui coïncident avec les mesures du SNRS.

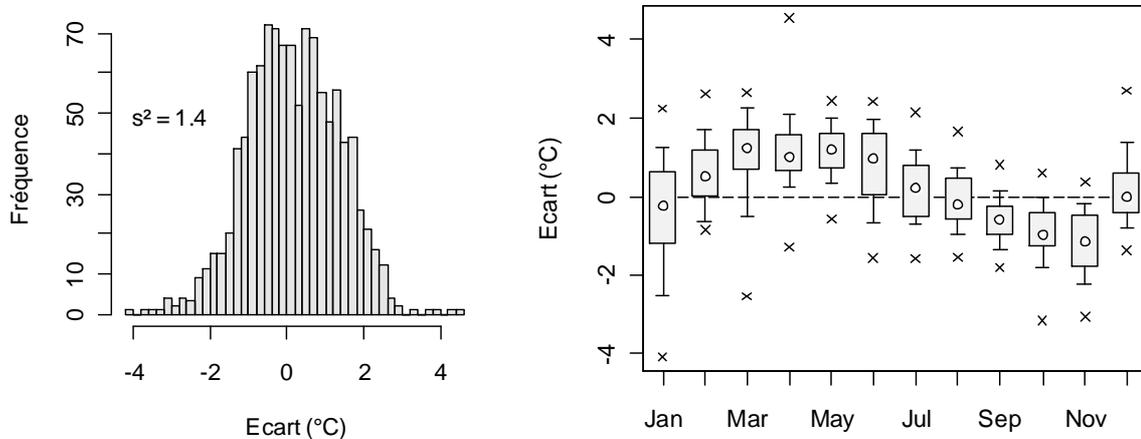


**Figure 84 - Illustration de la dispersion plus élevée sur les cinq premières années de calage/validation**

Les performances du RN d'Aramon sont globalement de bonne qualité, avec une erreur quadratique moyenne faible (0.47°C) et un *r* sur variations relativement élevé (0.63).

Critique des reconstitutions

La qualité de la série reconstituée a pu être appréciée par confrontation à une autre série ancienne du SNRS (station d'Arles, environ 30 km en aval). Cet exercice a été mené sur trois ans (1969-1971 ; Figure 16).



**Figure 85 - Distribution fréquentielle (a) et temporelle (b) des écarts entre la température modélisée à Aramon et la température mesurée à Arles entre 1969 et 1971. Les boîtes à moustache correspondent aux q10, 25, 50, 75 et 90.**

Dans l'ensemble les écarts sont faibles à modérés, tous les écarts interquartiles mensuels se maintenant dans l'intervalle  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Certaines valeurs peuvent ponctuellement atteindre  $\pm 4^\circ\text{C}$ . Cette distribution des écarts nettement structurée peut être imputée à un effet des variations de débit entre étiages estivaux et crues automnales, ou encore au problème de représentativité des mesures du SNRS.

**4.3.4. Performances et limites d'utilisation des modèles RN**

**4.3.4.1. Précisions**

A l'issue de ce travail de simulation, les températures ont pu être reconstituées correctement en cinq points du Rhône, ainsi qu'en quatre points situés sur ses affluents majeurs. Le pas de temps de reconstitution est journalier, et les reconstitutions couvrent la période allant de 1920 (ou 1923 pour les stations sur l'Ain et sur la Saône) aux premières mesures disponibles (années 1970). Sur le linéaire du Rhône, on notera que les performances des modèles vont en s'améliorant d'amont en aval. Ceci est principalement dû à l'atténuation de l'effet des gouttes froides vers l'aval, ce type d'événement étant difficile à simuler correctement.

Le Tableau 4 présente un bilan des performances affichées par chacun des modèles de température en phase de calage/validation.

**Tableau 4 : Critères de performance pour chaque modèle RN**

Modèle	Erreur quadratique moyenne	Critère de Nash	Coefficient de corrélation sur variations
Pougny (M1)	0.91	0.97	0.67
Pougny (M2)	0.95	0.96	0.62
Bugey	0.59	0.99	0.69
Saint-Alban (M1)	0.48	0.99	0.63
Saint-Alban (M2)	0.49	0.99	0.70
Tricastin (M1)	0.63	0.99	0.56
Tricastin (M2)	0.65	0.99	0.55
Aramon	0.47	0.99	0.63
Arve	0.56	0.97	0.69
Ain	0.78	0.97	0.64
Saône	1.00	0.98	0.64
Isère	0.66	0.98	0.50

#### 4.3.4.2. Limite d'utilisation des modèles et d'interprétation des résultats

Précisons également qu'une incertitude subsiste sur la fiabilité des reconstitutions avant l'existence des retenues hydroélectriques (non stationnarité des débits) : l'apprentissage des modèles n'a pas toujours pu inclure les états thermiques initiaux (pré-retendue). Cet aspect lié à l'effet des aménagements sur la thermie est approfondi en section 3.2.

Compte tenu de l'absence de séries de température fiables et à grande portée temporelle, la précision des séries de températures modélisées avant les années 1970 n'a pas pu être caractérisée finement. Les interprétations issues de ces séries modélisées antérieures aux années 1970 sont donc à exploiter avec précaution car ces températures sont entachées d'une erreur plus importante que sur la période postérieure.

Les modèles peuvent être considérés comme performants depuis la fin des années 1970 par rapports aux objectifs de l'étude, avec des **erreurs moyennes des températures journalières modélisées comprises entre 0.5 et 1.0°C** suivant les stations. On rappellera que la précision des mesures de températures sur cette même période est estimée à 0.3°C. Sur la période ancienne, entre 1920 et le début des années 1970, les erreurs sur les températures modélisées seraient plus élevées (~ du double) sans qu'il soit possible de les caractériser finement.

#### 4.4. QU'EST-CE QU'UNE ANALYSE MARGINALISTE ?

Un modèle RN peut être exploité pour tester la sensibilité de la variable de « sortie » à des variations des variables explicatives. Cette analyse peut être menée dans des gammes de valeurs « connues » par le modèle (lors de son apprentissage) des paramètres d'entrée.

Classiquement, ces analyses de sensibilité sont réalisées en testant l'effet d'une **variation marginale** (d'où le nom d'analyse marginale ou marginaliste) des variables d'entrée (e.g la température de l'air ou le débit) sur la variable de sortie (e.g. température de l'eau).

Dans l'ETRP4, les analyses marginalistes destinées à caractériser la sensibilité de la température de l'eau aux débits ont été réalisées en testant l'effet d'un incrément unitaire de débit (1 m<sup>3</sup>/s). **Cette valeur testée avec le modèle RN ne présage en rien du débit complémentaire qui pourrait être ajouté dans le cours d'eau.**

En première approximation, il est possible d'estimer l'effet d'un débit plus important que le débit unitaire testé en multipliant l'effet unitaire par le débit réel (réponse linéaire). Par exemple, si l'effet unitaire est un refroidissement de 0.01°C par m<sup>3</sup>/s de débit complémentaire, on peut évaluer l'effet d'un débit complémentaire de 20 m<sup>3</sup>/s à 0.01\*20=0.2°C.

#### 4.5. ANALYSES STATISTIQUES

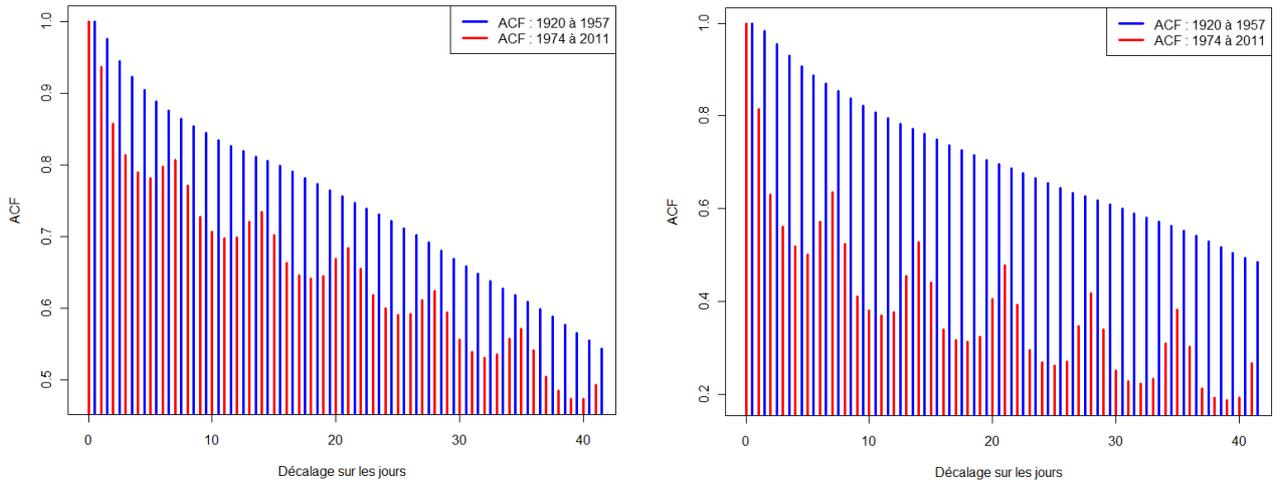
##### 4.5.1. Débit

L'analyse statistique des débits a fait l'objet de fiches de synthèse, par station, qui sont présentées en annexe du rapport hydrologique.

##### 4.5.2. Gestion hebdomadaire des débits

Nous avons vu précédemment que le régime hydrologique du Rhône avait été modifié du fait de l'équipement des barrages de retenue et de l'évolution de la gestion du lac Léman. L'analyse est cependant restée relativement globale et il convient de l'affiner.

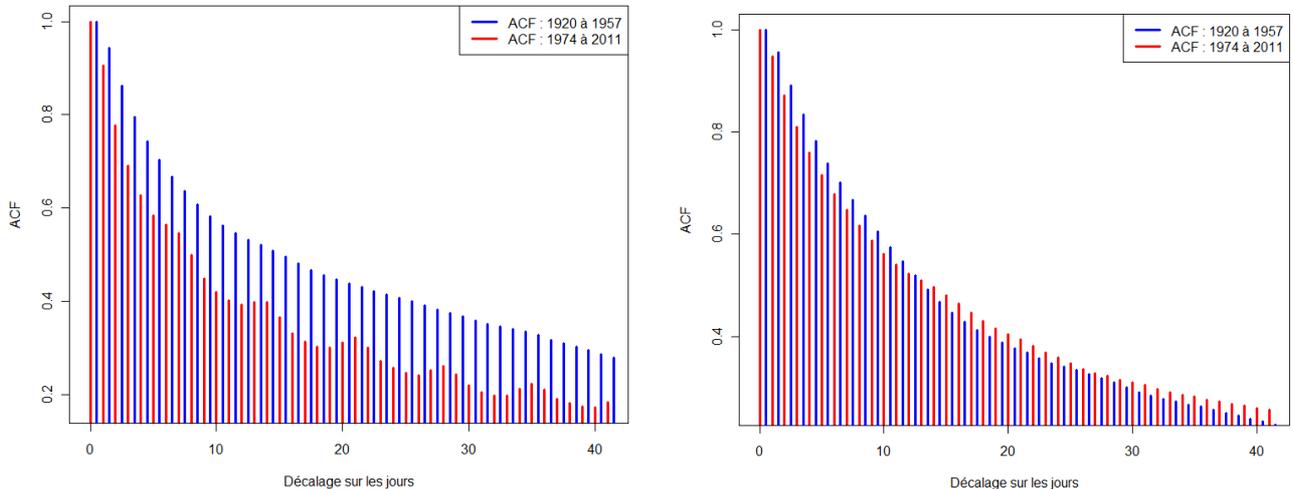
### 4.5.2.1. Mise en évidence de la gestion hebdomadaire



**Figure 86 - Test d'auto-corrélation des débits avant et après aménagements - Porte du Scex (à gauche) et sortie Léman (à droite).**

L'examen des graphiques ci-dessus met en évidence l'influence des aménagements hydroélectriques sur les débits :

- Avant aménagements le débit de la veille est corrélé avec celui du lendemain et la décroissance est linéaire ;
- Après aménagements, la dé-corrélation des débits est très rapide. De plus, on remarque que le débit de jour  $j$  est mieux corrélé avec le débit du jour  $j+8$  qu'avec le débit du jour  $j+5$  par exemple. Ce phénomène met en lumière la gestion hebdomadaire des aménagements hydroélectriques en amont du lac Léman.
- Les mêmes constats sont à faire en amont et en aval du lac Léman. On constate que la dé-corrélation des débits est encore plus rapide après aménagements en comparaison avec le test d'auto-corrélation fait à la Porte du Scex. Par ailleurs, l'influence de la gestion du lac est encore plus marquée : la corrélation du jour  $j$  et  $j+8$  est beaucoup plus soulignée.



**Figure 87 - Test d'auto-corrélation des débits avant et après aménagements : à Lagnieu (à gauche) et à Beaucaire (à droite).**

Au niveau de Lagnieu, l'influence des aménagements hydroélectriques sur la corrélation des débits est aussi marquée. Cependant, on constate que l'influence de la gestion hebdomadaire est beaucoup plus faible.

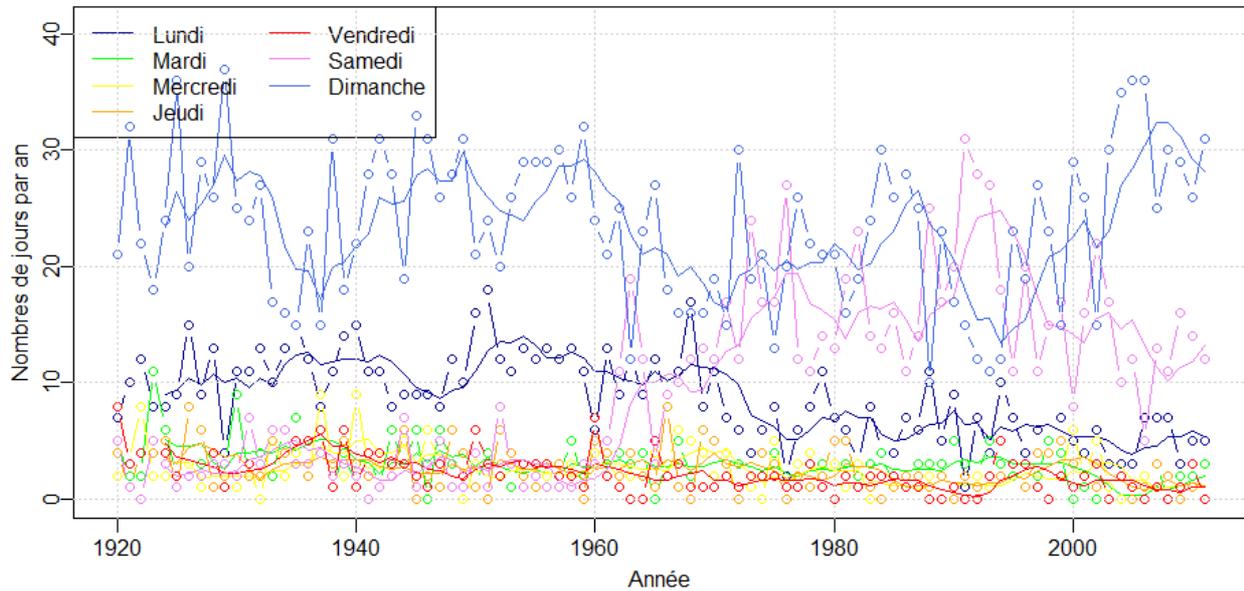
Au droit de la station de Beaucaire, le test d'auto-corrélation ne met pas en lumière de modification importante des débits. On remarque toutefois que la corrélation des débits sur les treize premiers jours est plus grande avant aménagements. Après ces treize jours, le débit du jour  $j$  est mieux corrélé avec le débit du jour  $j+14$  après aménagements qu'avant aménagements. L'influence de la gestion hebdomadaire au droit de Beaucaire n'est pas visible par le biais du test d'auto corrélation.

A travers les tests d'auto-corrélations des débits à la Porte du Scex, en sortie du Léman et à Lagnieu, nous avons mis en évidence la gestion hebdomadaire des ouvrages. Nous allons maintenant caractériser cette gestion.

L'existence d'un régime hydrologique fortement influencé ces dernières années pourrait expliquer le réchauffement plus marqué entre Pougny et Bugey pour la période la plus récente. Il est toutefois difficile de connaître l'impact réel de la gestion des ouvrages hydroélectriques sur la thermie.

### 4.5.2.2. Principales caractéristiques de la gestion hebdomadaire

#### 4.5.2.2.1. Répartition des débits minimums en sortie du Léman



**Figure 88 - Jour de la semaine où survient le minimum hebdomadaire, débits en sortie du lac Léman entre 1920 à 2011**

Par l'intermédiaire du graphique précédent, on remarque que :

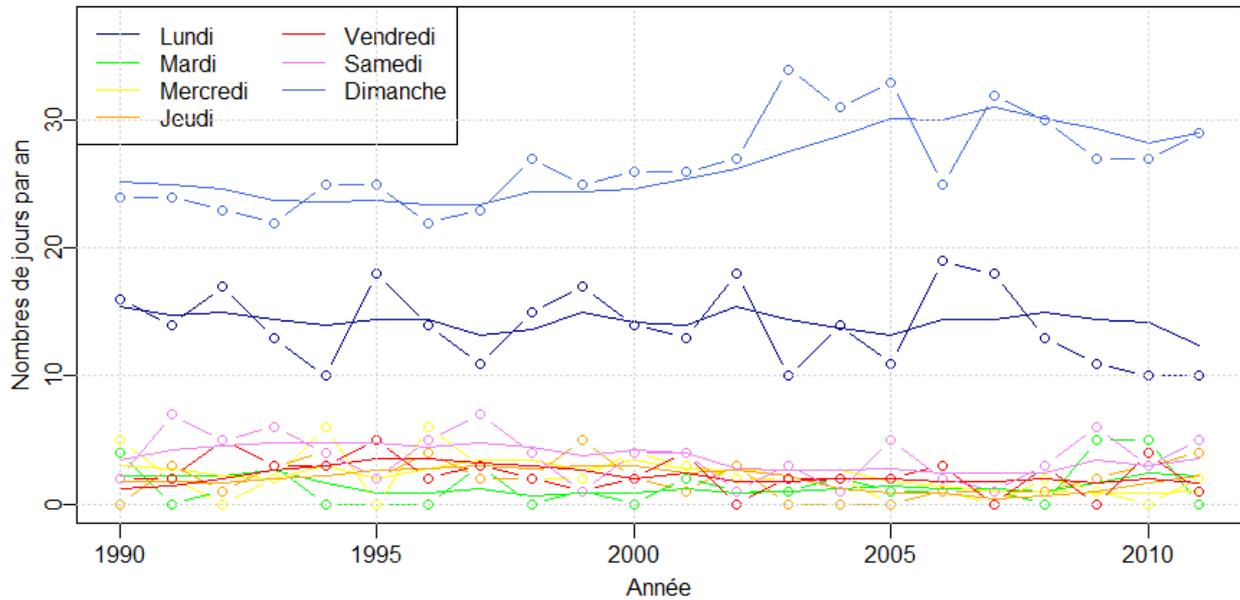
- de 1920 à 1960, les jours de la semaine ont des fréquences d'apparitions relativement constantes ;
- de 1960 à 1970, la fréquence d'apparition du samedi croît significativement (de 5% à 30%) tandis que la fréquence d'apparition du dimanche décroît (de 60% à 40%) ;
- de 1970 à 1980, la fréquence d'apparition du lundi décroît (de 20% à 10%) tandis que les fréquences d'apparitions du dimanche et du samedi croissent à nouveau du même ordre de grandeur ;
- de 1980 à ce jour (2011), les fréquences d'apparitions du lundi au vendredi sont constantes et les fréquences d'apparitions du samedi et du dimanche évoluent de manière contraire autour de la fréquence d'apparition 35%.

Toutes ces modifications mettent en lumière l'influence de la gestion du Léman. En outre, en comparant les fréquences d'apparitions du débit minimum hebdomadaire sur la période actuelle (après 2000) à la Porte du Scex et en sortie du Léman, on constate que :

- en sortie du lac, le débit minimum hebdomadaire est observé 50% du temps le dimanche et 30% du temps le samedi ;
- à la Porte du Scex, le débit minimum est observé seulement 5% du temps en moyenne le samedi.

Cette différence correspond sans nul doute à l'influence de la gestion du lac Léman.

#### 4.5.2.2.1. Répartition des débits minimums à Beaucaire



**Figure 89 - Jour de la semaine où survient le minimum hebdomadaire - station de Beaucaire de 1990 à 2011.**

A la différence des débits sur la partie supérieure du Rhône, on constate sur la période actuelle, après 2000, que le débit minimum hebdomadaire est observé 50% du temps le dimanche et plus de 30% le lundi, soit près de 80% pour ces deux jours. En effet, cette différence, entre la fréquence d'observation des jours de la semaine dans la partie supérieure et inférieure du Rhône, est dû aux temps de propagation des débits. Les débits en sortie du lac Léman mettent environ un jour pour se propager en aval du Rhône. Ainsi, l'influence de la gestion du lac est toujours présente mais avec un jour de décalage.

#### **4.5.2.2. Synthèse sur la répartition des débits minimums hebdomadaire**

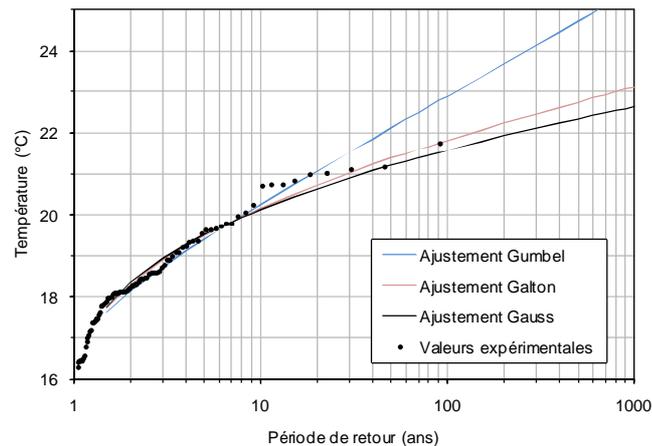
A la sortie du lac Léman, le samedi et le dimanche constituent les jours de la semaine où la probabilité d'observer le débit minimum hebdomadaire est la plus forte. Ceci ne peut être que la conséquence d'une modification anthropique des écoulements. Ce constat est particulièrement vrai pour le période qui va depuis le début des années soixante dix à nos jours. Sur la partie inférieure du Rhône, l'influence du Léman est toujours visible mais avec un décalage sur la fréquence d'apparition des minimums hebdomadaires du aux temps de propagation des débits. En effet, nous avons montré que les jours où la probabilité d'observer le débit minimum hebdomadaire est la plus forte sont le dimanche et le lundi.

### **4.5.3. Température**

Les analyses statistiques ont été menées sur la base des séries de mesures journalières complétées par les simulations. Les chroniques utilisées ont donc une portée temporelle de 91 ans pour les stations sur le Rhône, l'Arve et l'Isère (période 1920-2010), et de 88 ans pour l'Ain et la Saône (période 1923-2010). Lors des analyses, aucune distinction n'a été faite entre valeurs mesurées et valeurs reconstituées.

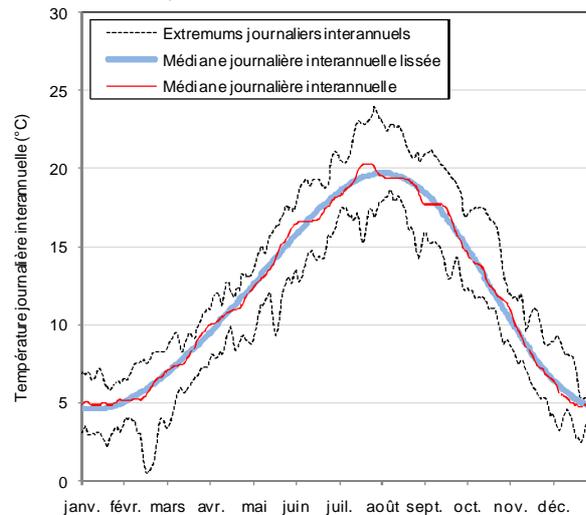
La première approche adoptée pour décrire les jeux de données a consisté à calculer des grandeurs caractéristiques pour chaque site. Les quantiles ont été obtenus en classant par ordre croissant l'ensemble des données de température d'une même station (fonction de répartition empirique), le quantile k% correspondant à la valeur supérieure ou égale à k% des observations. Par exemple, le quantile 90% (noté q90%) se réfère à une température dépassée seulement 10% du temps, soit une valeur dépassée environ 37 jours par an. L'écart interquartile renvoie à l'intervalle compris entre le q25% et le q75%, au sein duquel se situent donc la moitié des observations.

Afin de caractériser plus finement les valeurs extrêmes de température, les quantiles q95%, q99% et q99.9% ont été déterminés pour chaque station, à la fois sur la série complète et par décennie. En complément, plusieurs autres indicateurs ont été compilés, tels que les  $T_{max}$  (température annuelle maximale), les  $TCX_7$  et  $TCX_{30}$  de période de retour 5 ans (températures maximales sur 7 jours consécutifs et sur 30 jours consécutifs, respectivement) et les  $TMXA5$  (température mensuelle maximale de période de retour 5 ans). Pour ce faire, les valeurs de  $T_{max}$ , de  $TCX$  et de  $TMXA$  ont d'abord été calculées pour chaque année, classées, puis des lois de probabilité ont été ajustées aux fréquences empiriques. Plusieurs lois ont été testées (normale, log-normale, loi sur les extrêmes de Gumbel) afin de définir le meilleur ajustement. Ce sont les lois de type log-normal, ou loi de Galton, qui ont permis la description la plus fidèle des distributions de  $T_{max}$ ,  $TCX$  et  $TMXA$ . Ce type d'ajustement a donc été préféré pour les calculs. Un exemple de comparaison entre trois ajustements statistiques est donné en Figure 6 pour des valeurs issues de la station de Pougny. On remarquera que c'est avant tout sur les événements extrêmes (périodes de retour supérieures à 10 ans) que les trois ajustements divergent.



**Figure 90 - Ajustement de lois de probabilité sur les valeurs empiriques de TMXA à Pouigny**

Le régime thermique d'une station correspond à l'ensemble des valeurs médianes journalières de température de l'eau acquises à cette station pour une période de référence donnée, ainsi qu'à la dispersion autour de cette médiane (par exemple les q10%, q25%, q75% et q90%). La période de référence peut être une année, une décennie, ou encore une série complète. Le régime thermique de chacune des 9 stations étudiées a été déterminé de la sorte, dans un premier temps en utilisant les chroniques complètes, puis par décennie. Afin de s'affranchir de la variabilité interannuelle, d'autant plus manifeste que la période de référence est courte, un lissage des régimes a été réalisé par l'intermédiaire d'ajustements de Fourier à deux harmoniques. La Figure 7 illustre la différence entre un régime thermique "brut" en rouge et son semblable lissé en bleu (régime calculé à partir d'une décennie à Tricastin).



**Figure 91 - Lissage du régime thermique 1920-1929 par séries de Fourier (station du Tricastin)**

Ce type de lissage a également l'avantage de faciliter la comparaison entre régimes issus de stations différentes, ou entre régimes issus d'une même station mais de périodes différentes.

Un certain nombre de paramètres supplémentaires ont été extraits des ajustements de Fourier. Nous nous sommes concentrés sur les trois paramètres que sont la moyenne, l'amplitude (qui renseigne sur l'écart de température entre saison chaude et saison froide) et la phase (qui renseigne sur la précocité de la saison chaude). Ces paramètres ont été calculés pour chaque année afin de mettre en évidence d'éventuelles évolutions sur l'ensemble de la période analysée.

Une étude des tendances interannuelles a également été menée à partir des moyennes mensuelles de chaque année. Ainsi, nous avons pu distinguer l'évolution des températures pour chacun des 12 mois de l'année. Pour quantifier l'existence ou non de tendances à long terme, nous avons opté pour le calcul de régressions linéaires sur ces moyennes mensuelles. Un test de Fisher a été réalisé en routine pour juger du degré de significativité de la pente de la régression. Le test vérifie l'hypothèse que la pente de la régression linéaire est différente de 0 ; il indique le degré de confiance de la validité de cette hypothèse. Ainsi, chaque régression sur les moyennes mensuelles a pu être considérée comme non significative (en cas de rejet de l'hypothèse), ou significative à 90%, 95%, 99%, etc.

Enfin, le dernier volet de cette analyse statistique a concerné l'étude de quelques facteurs classiquement utilisés en écologie aquatique. En se basant sur les seuils de température de 10°C, 12°C et 16°C, reconnus pertinents pour les différentes phases de développement de tout un cortège d'espèces aquatiques, nous avons estimé pour chaque année le jour de franchissement de chacun des trois seuils, ainsi que la somme annuelle des degrés-jours au-dessus de ces trois seuils.

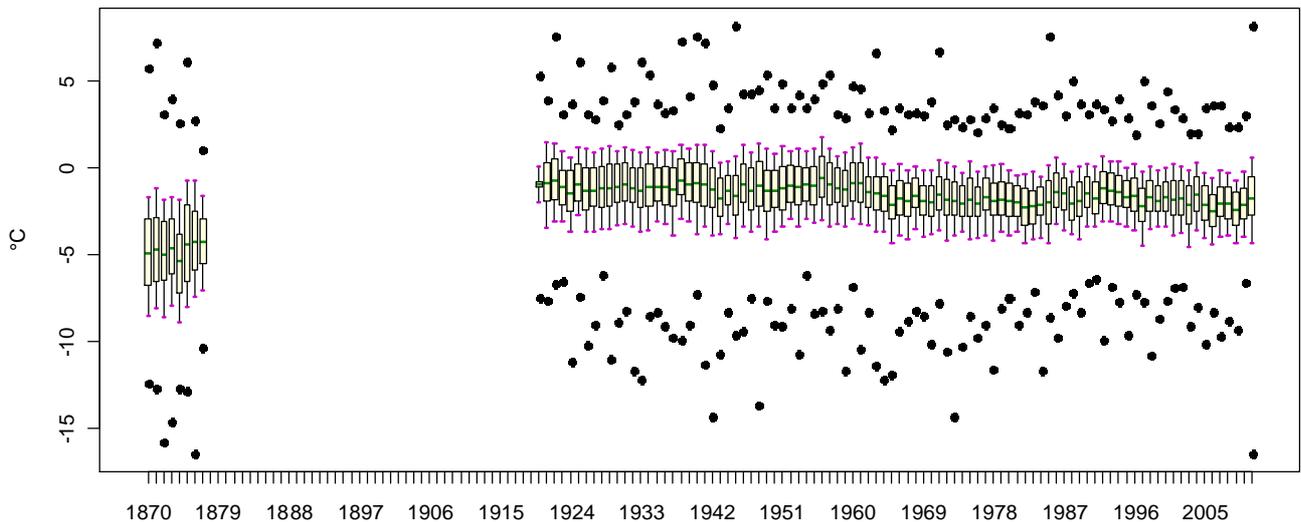
## 4.6. APPORTS DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU DU XIX<sup>ÈME</sup> SIÈCLE

### 4.6.1. Origine des données disponibles

Sur le Rhône, il existe trois séries de données de Température de l'Eau du XIX<sup>ème</sup> siècle :

- Le Rhône à Genève a été mesuré par l'Observatoire de Genève dirigé de 1839 à 1882 par E.Plantamour qui a initialisé de nombreuses séries de mesures hydroclimatologiques. Parmi celles-ci, existent des séries journalières de T°Eau et de Hauteur d'eau au Pont de Bergues en aval immédiat du Lac Léman de 1854 à 1924. En parallèle, il existe un relevé météorologique très complet à Genève sur la même période. Les méthodologies de mesures sont bien décrites et semblent parfaitement fiables pour l'époque. Au moins au début, c'est le même thermomètre qui sert pour l'eau et l'air. Par contre, les T°Eau à midi sont indisponibles le Dimanche pour cause d'office religieux... (*Archives des sciences physiques et naturelles de l'Université de Genève - volumes couvrant la période 1855 à 1924*)
- à Lyon, le Rhône à Pont Morand et la Saône à Pont de la Feuillée ont été mesurés à midi de 1870 à 1877 par la Commission Hydrométrique et des Orages de Lyon (dirigée par J.Fournet). Si les mesures de Hauteur d'eau sont mesurées sur une période plus longue et semblent avoir été faites avec beaucoup de soins, les mesures de T°Eau et de T°air disponibles apparaissent bien moins documentées. Les T°air mesurées lors des mesures de T°Eau correspondent a priori à des températures locales réalisées sans grande précaution : elles semblent difficilement utilisables (*Annales de la Société D'agriculture Histoire Naturelle et Arts Utiles de Lyon 1870-1877*).

#### Répartition annuelle des Ecart (T° de l'Air à Geneve-T° de l'Air à Lyon)



**Figure 92. Répartition annuelle des différences entre la T° Air à Genève et à Lyon**

- À Lyon, en rive gauche du Rhône, existe également une série de données journalières à 11h du matin durant le mois d'Avril 1870, mesures réalisées par Mr Marnas (*Annales de la Société D'agriculture Histoire Naturelle et Arts Utiles de Lyon 1871*).

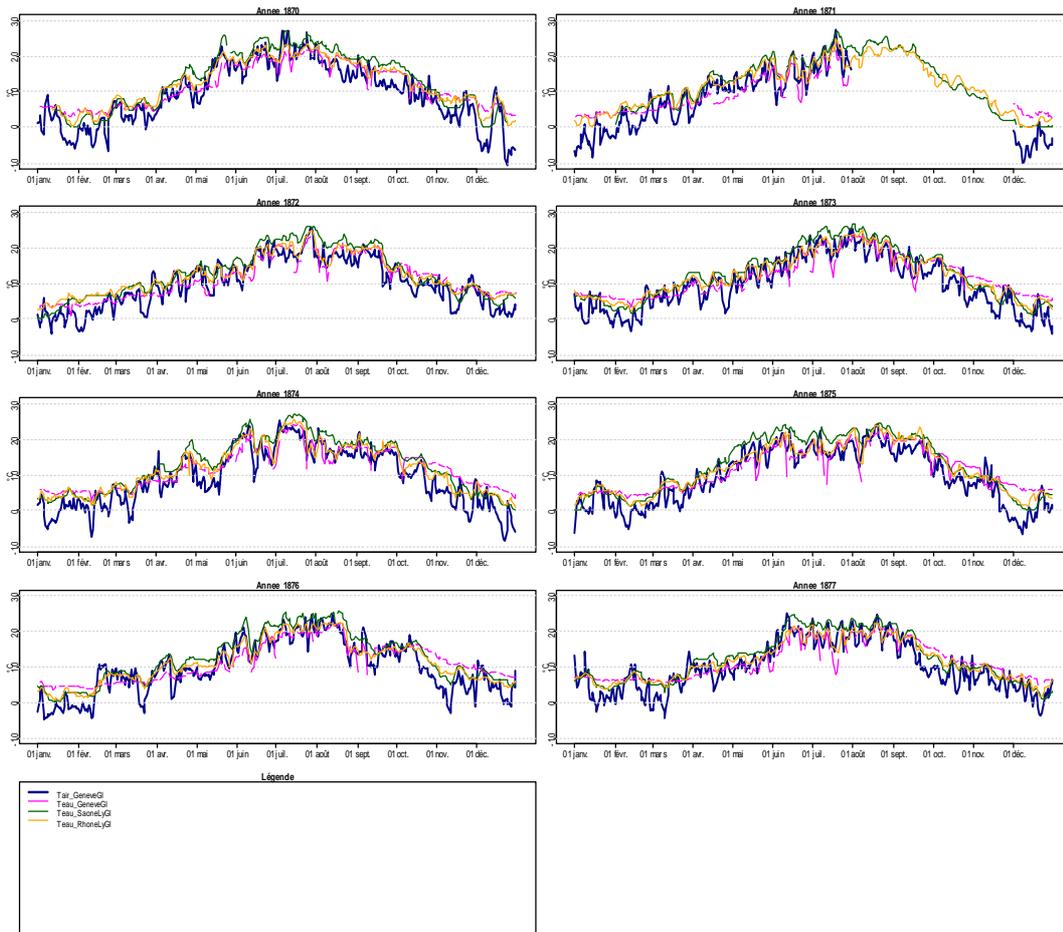
Par ailleurs, les champs de pression journaliers au niveau de la mer sont disponibles sur la période 1850-2003. Ils peuvent permettre d'affiner les types de temps et donc d'aider à la simulation des gouttes froides.

### 4.6.2. Validation des données

Outre une période manquante (Aout à Octobre 1871 sur Genève), les Dimanche à Genève et quelques données absentes en Janvier 1870 sur Lyon, toutes les données disponibles, ont été saisies numériquement par un prestataire à partir des documents anciens numérisés sous forme de fichiers « pdf ».

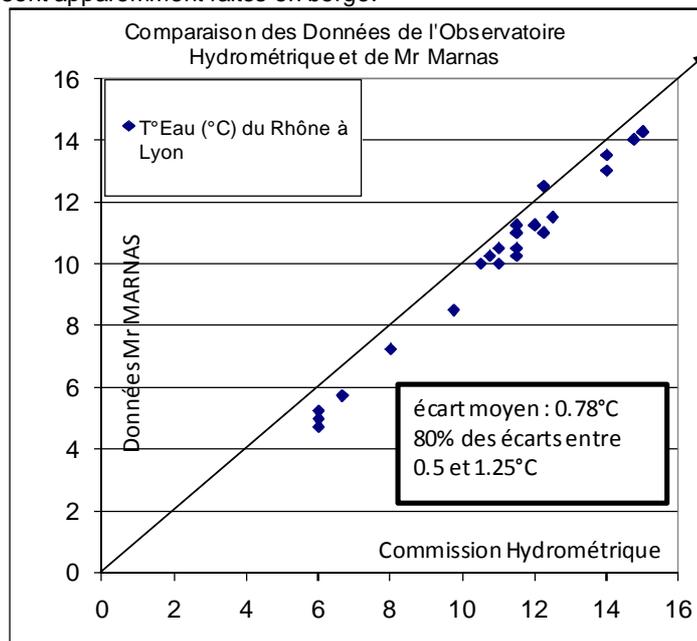
Par analyse graphique quelques rares valeurs aberrantes ont été corrigées (probables erreurs de typographie à l'origine et/ou de relecture des documents anciens).

Des tests de sensibilité à l'heure de mesure ont été réalisés sur la période récente où les données horaires sont disponibles. Ils ont montré que les T°Eau mesurées de 11h à 13h étaient très proches des températures moyennes journalières sur le Rhône et la Saône en liaison avec des cycles jour/nuit peu marqués sur ces deux fleuves profonds. La figure ci-après donne la chronologie des T°Eau et T°Air disponibles au pas de temps journalier.



**Figure 93. T° Air à Genève et des T° Eau à Genève et Lyon (Saône et Rhône)**

La comparaison entre les deux séries mesurées à Lyon donne une idée de la précision possible à l'époque. Il est certain que l'étalonnage des thermomètres et leur intercomparaison est très compliqué à cette époque et que cela fait l'objet de nombreux écrits et procédures. Sur les 27 données disponibles, l'écart moyen reste cependant assez faible ( $-0.8^{\circ}\text{C}$ ) assez proche des écarts d'aujourd'hui sur deux points de mesures différents avec deux chaînes de mesures différentes, d'autant que les mesures de Mr MARNAS sont apparemment faites en berge.



**Figure 94. Comparaison entre les 2 séries de mesures de T° Eau du Rhône à Lyon en Avril 1870**

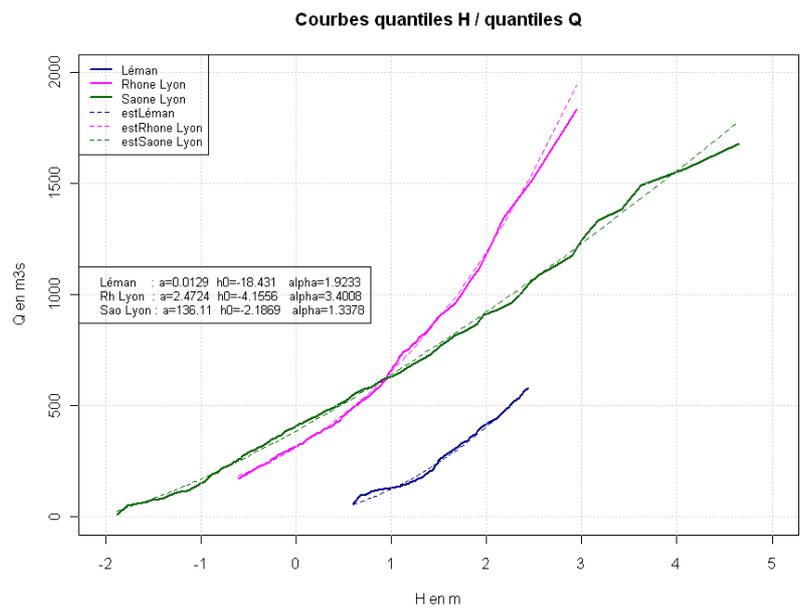
### 4.6.3. Reconstitution des données de débit

Ne disposant que des hauteurs d'eau aux différentes stations de mesures et sans aucun jaugeage disponible, la problématique de reconstitution des débits s'est avérée assez complexe. L'idée de travailler directement en hauteur en repassant les débits actuels en hauteurs d'eau a été envisagée mais la méthodologie pour retrouver des hauteurs d'eau aux différents points cohérents avec celles du XIXème siècle apparaissait tout aussi complexe compte tenu des modifications morphodynamiques. L'intérêt de retrouver les débits était d'offrir la possibilité d'une validation croisée des T°Eau amont/aval entre Genève et Lyon sur la période ancienne et sur la période récente.

La méthode utilisée est la suivante :

- Recherche des mois analogues (= les plus proches sur 3 critères) entre la période 1870-1877 et 1920-47 (avant Génissiat) sur la série de Genève,
- en T°Air,
- en Précipitation,
- en cumul de précipitation sur les mois de Novembre à Avril; en Mai, le même cumul d'Avril est conservé, et en Juin Juillet ce cumul est diminué proportionnellement à la T°Air pour retrouver 0 en Aout-Octobre (avec l'idée d'être « proportionnel » aux phénomènes d'accumulation et de fonte des neiges),
- Constitution de séries « analogues » où sont mis en parallèle les débits sur les mois analogues et les hauteurs mesurées au point considéré,
- Etablissement d'une « courbe » de tarage à partir des quantiles des hauteurs et des quantiles des débits utilisés comme des jaugeages (avec l'idée que le débit rencontré 10% du temps correspond à la hauteur d'eau rencontrée 10% du temps...). La formulation utilisée est du type  $Q=a*(h-h_0)^\alpha$ . Bien sûr, une telle méthodologie est très risquée dans les quantiles hauts c'est-à-dire lors des crues, mais contrairement à la majorité des études hydrologiques la bonne connaissance des débits de crue n'est pas essentielle pour établir un modèle de T°Eau,
- Application des courbes de tarage aux hauteurs d'eau de Genève et Lyon (Rhône et Saône).

An	Mois	AnP	MoisP
1870	1	1944	2
1870	2	1935	1
1870	3	1943	2
1870	4	1938	3
1870	5	1944	5
1870	6	1942	7
1870	7	1932	8
1870	8	1941	8
1870	9	1933	9
1870	10	1928	10
1870	11	1929	12
1870	12	1940	1



**Figure 95 - Exemple du tableau analogue des mois de l'année 1870 (à gauche) et pes pseudo-courbes de tarage établies (à droite)**

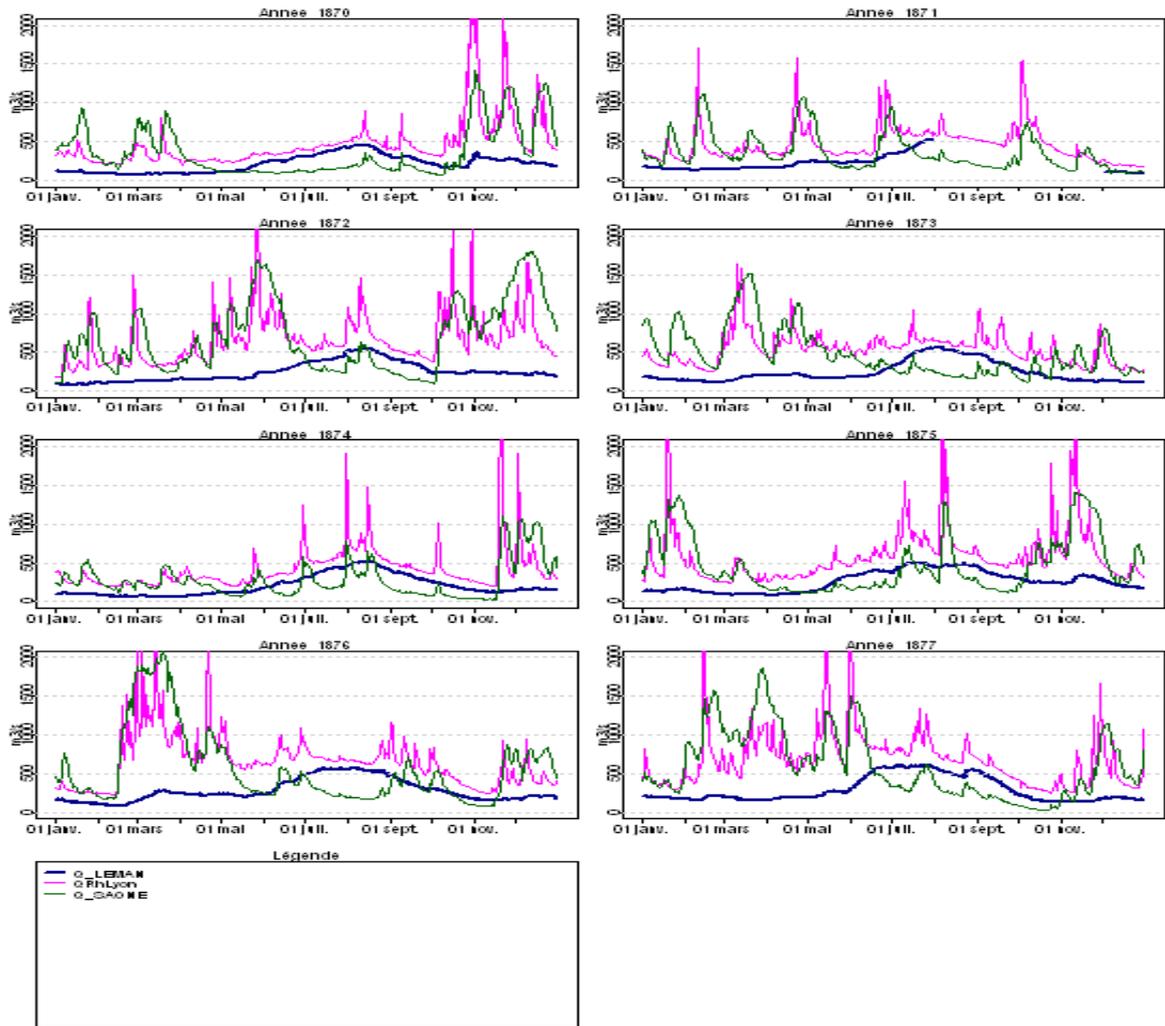
La comparaison des modules permet de vérifier que les modules sont cohérents entre la série de débit analogue et la série reconstituée.

Module sur 1870-77

QLéman	QRhoneLyon	QSaone
243	567	477

Module sur la « période » analogue

QLéman	QRhoneLyon	QSaone
244	563	478



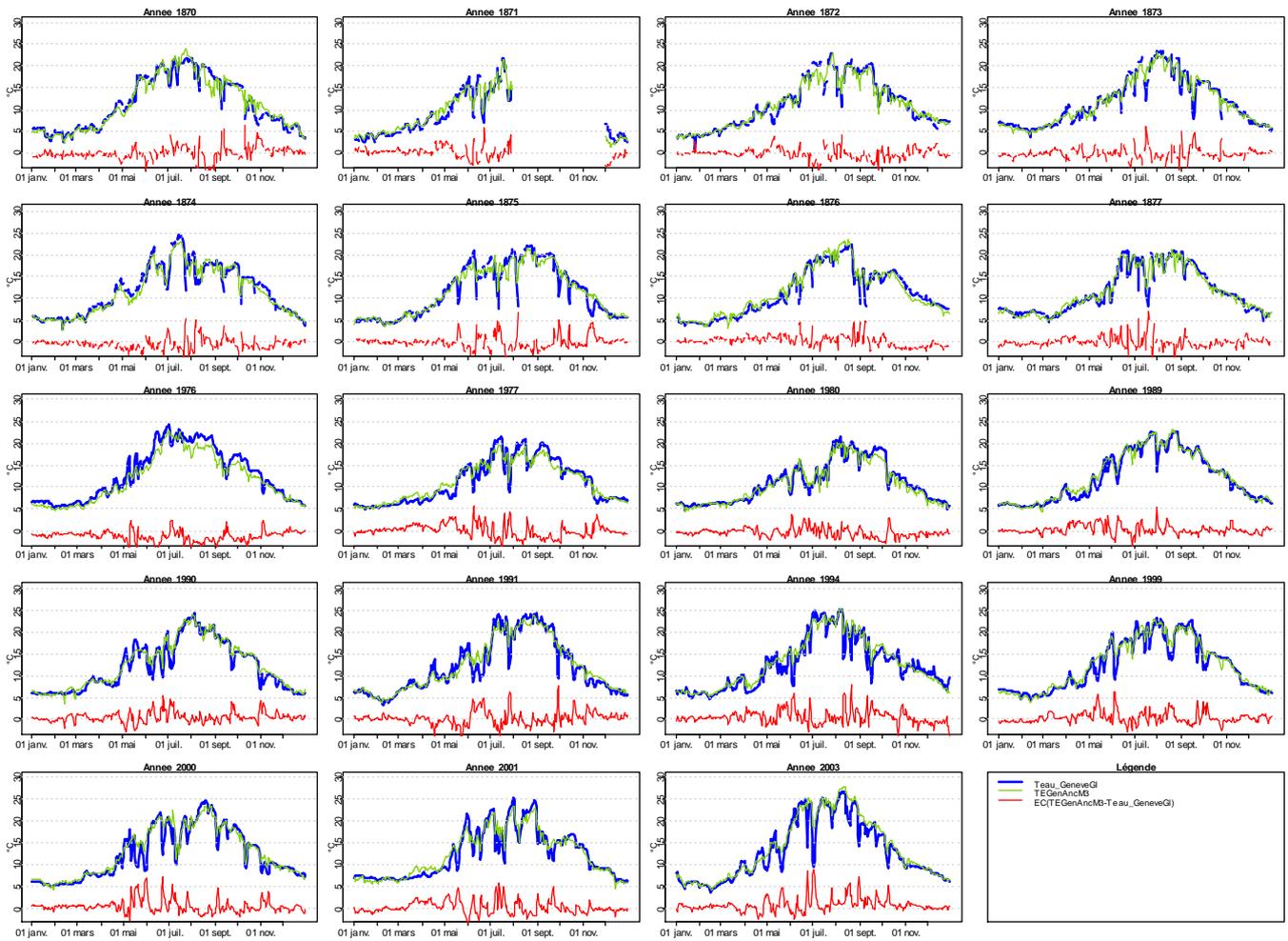
**Figure 96. Séries de débits reconstituées sur la période 1870-1877 à Lyon et Genève**

#### 4.6.4. Établissement des modèles de température de l'eau

Pour chacune des trois séries de T°eau, un modèle RN a été calé sur la base des données de 1871 à 1876 en gardant les années 1870 et 1877 en test. À l'aide du modèle précédent, les T°Eau sont simulées lorsque les variables utilisées sont disponibles (soit de 1920 à 2003 ou 2010 selon que les champs de pression atmosphériques entrent ou non dans les variables explicatives du modèle).

##### 4.6.4.1. Le modèle de T°Eau à Genève

Ce modèle est basé sur la Durée jour/nuit, la T°Air à Genève (avec lissage exponentiel pour tenir compte, mais avec de moins en moins de poids, de la T°Air des jours précédents), les données des champs de pression aux alentours (du jour et de la veille), du débit sortant Léman (avec lissage exponentiel).



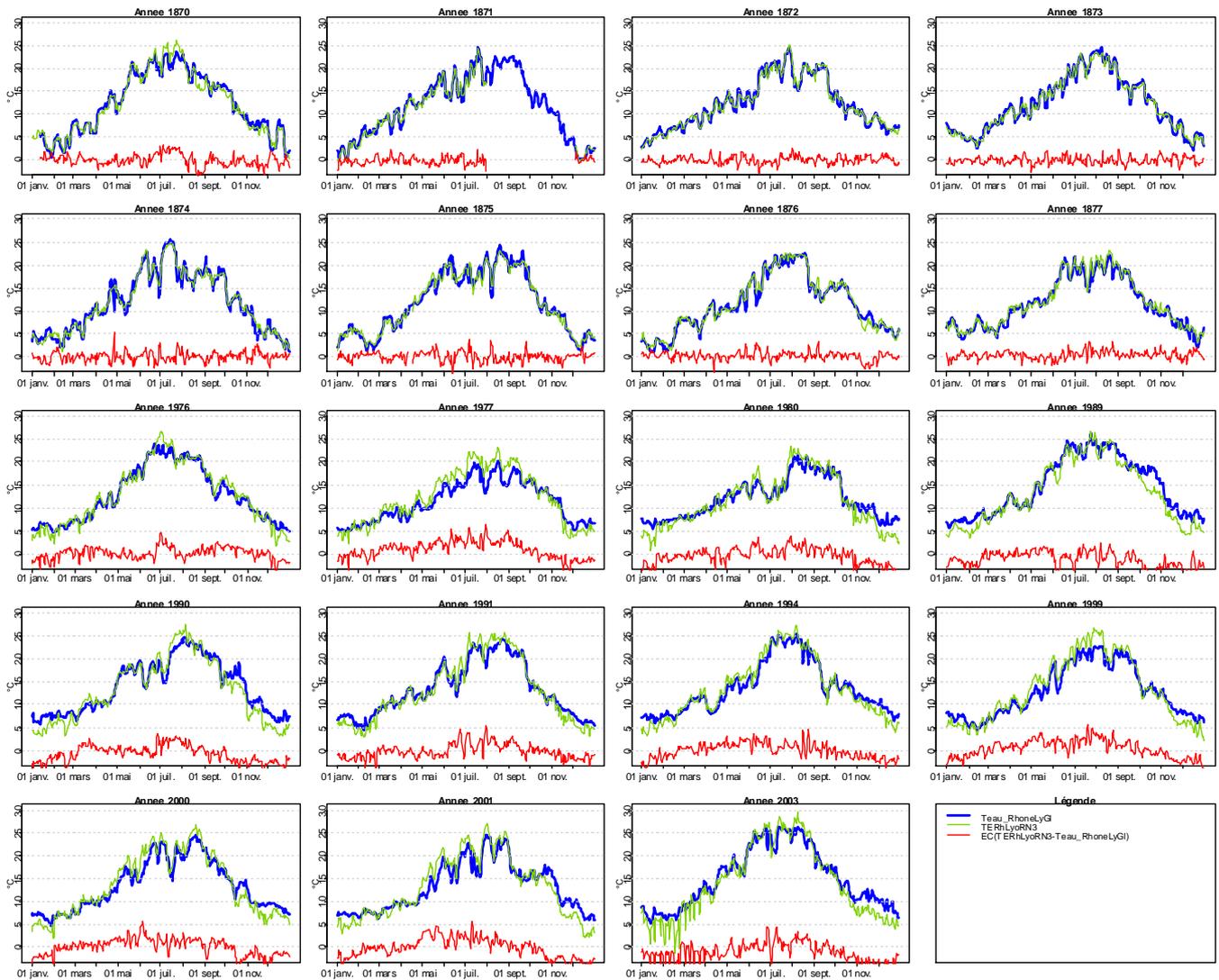
**Figure 97. Comparaison pour quelques années du modèle et de la mesure de T°Eau à Genève et écarts associés**

	NbVal	NbManq	Moy	ect	25%	50%	0.75
[1870-1877]	2382 obs	540 obs	0.01 °C	1.26 °C	-0.61 °C	-0.04 °C	0.50 °C
[1977-1986]	6574 obs	0 obs	-0.30 °C	1.41 °C	-1.14 °C	-0.36 °C	0.39 °C
[1987-2011]	6209 obs	2557 obs	0.11 °C	1.57 °C	-0.75 °C	-0.04 °C	0.80 °C
Tous	15165 obs	36334 obs	-0.09 °C	1.47 °C	-0.92 °C	-0.18 °C	0.56 °C

15165 Données - 02/01/1870 - 31/12/2003

#### 4.6.4.2. Le modèle de T°Eau du Rhône à Lyon

Ce modèle est basé sur la Durée jour/nuit, la T°Air à Genève (avec lissage), le débit sortant Léman (avec décalage), le débit à Lyon (avec lissage) et les températures de sortie du Léman des 3 jours précédents. Pour permettre des simulations sur la période 1920-1969, c'est le modèle de T°Eau à Genève qui a été utilisé comme référence de la T°Eau à Genève.



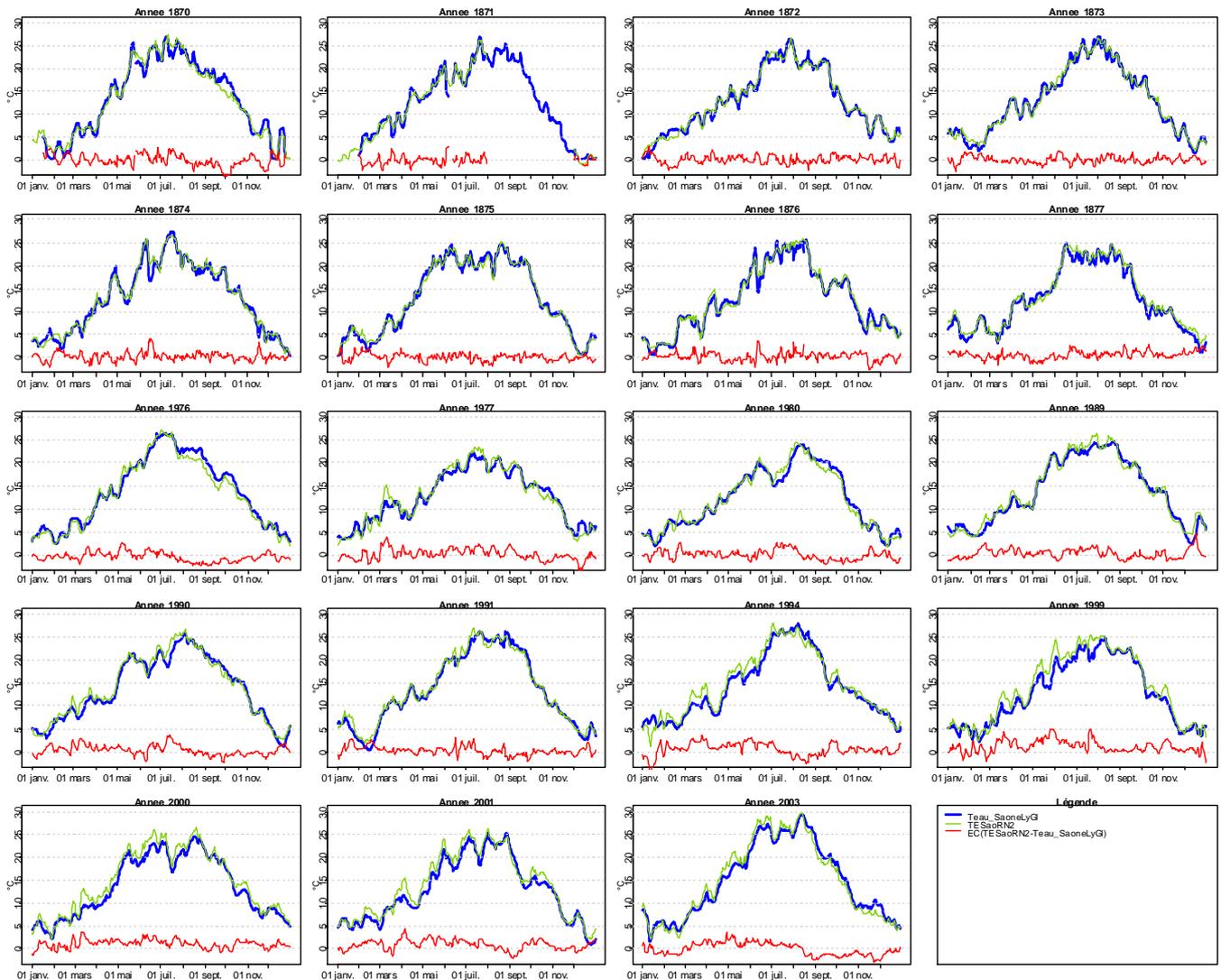
**Figure 98 - Comparaison pour quelques années du modèle et de la mesure de T°Eau du Rhône à Lyon et écarts associés**

	NbVal	NbManq	Moy	ect	25%	50%	0.75
[1870-1877]	2779 obs	143 obs	0.021 °C	0.987 °C	-0.618 °C	0.015 °C	0.635 °C
[1977-1986]	4612 obs	0 obs	-0.130 °C	2.163 °C	-1.372 °C	0.055 °C	1.307 °C
[1987-2011]	6210 obs	2556 obs	-0.303 °C	2.021 °C	-1.727 °C	-0.256 °C	1.088 °C
Tous	13601 obs	37898 obs	-0.178 °C	1.915 °C	-1.296 °C	-0.063 °C	1.027 °C

13601 Données - 12/01/1870 - 01/01/2004

#### 4.6.4.3. Le modèle de T°Eau de la Saône à Lyon

Ce modèle est basé sur la Durée jour/nuit, la T°Air à Genève (avec lissages), le débit de la Saône à Lyon (avec lissage).



**Figure 99. Comparaison pour quelques années du modèle et de la mesure de T°Eau de la Saône à Lyon et écarts associés**

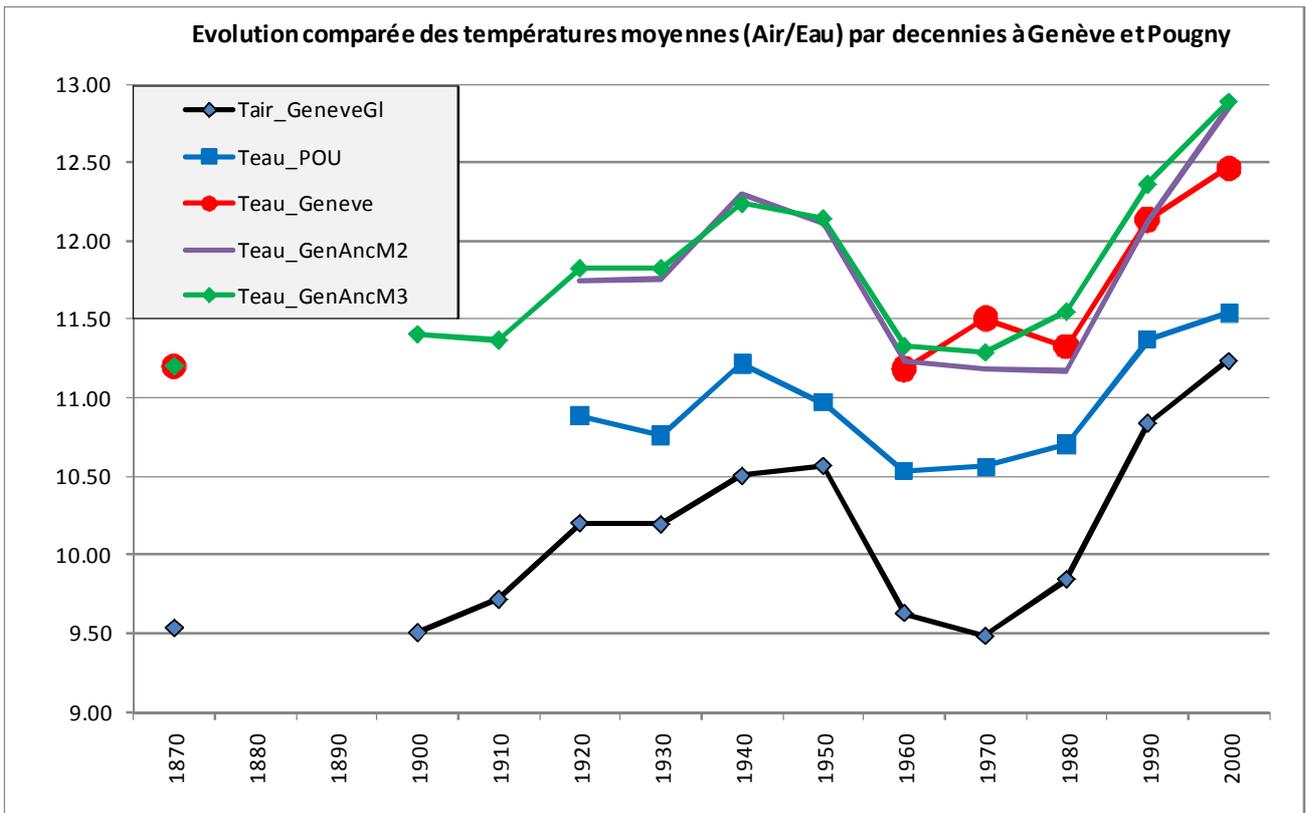
	NbVal	NbManq	Moy	ect	25%	50%	0.75
[1870-1877]	2727 obs	195 obs	0.151 °C	0.959 °C	-0.488 °C	0.148 °C	0.773 °C
[1977-1986]	4628 obs	0 obs	-0.221 °C	1.169 °C	-1.006 °C	-0.295 °C	0.471 °C
[1987-2011]	8766 obs	0 obs	0.817 °C	1.259 °C	-0.064 °C	0.787 °C	1.619 °C
Tous	16121 obs	35378 obs	0.406 °C	1.274 °C	-0.466 °C	0.339 °C	1.220 °C

16121 Données - 15/01/1870 - 31/12/2010

#### 4.6.5. Résultats globaux et interprétations

D'une manière générale, les modèles calés sur les données anciennes sont un peu moins performants que les modèles calés sur les données récentes. La différence de qualité des modèles est de 0.4°C de RMSE sur le modèle de Genève (1.3°C) comparé à Pougny (0.9°C), de 0.4°C sur le modèle du Rhône à Lyon (1°C) comparé à Bugey (0.6°C) ; les modèles sont de qualité identique sur la Saône.

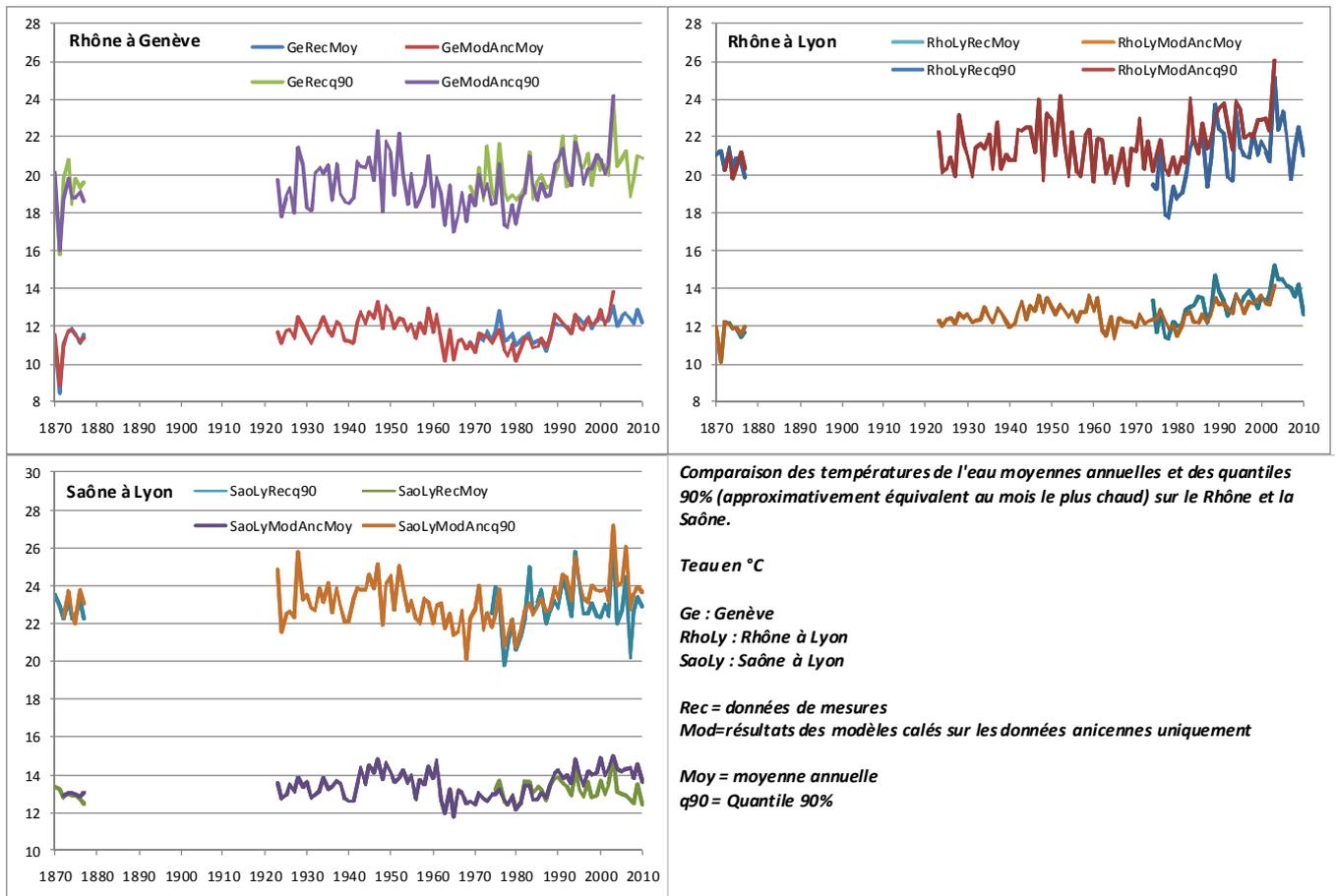
Le fait de ne disposer que des T°Air à Genève et pas à Lyon pénalise la qualité des résultats...pour les modèles à Lyon. Les graphes suivants permettent de comparer les résultats des modèles et des données mesurées par décennies et par années.



*TAir\_GenèveGl = Mesures de T°Air à Genève  
 TEau\_Pou=mesure+modèle de T°Eau à Pougny calé sur les données récentes ;  
 TEau\_Geneve = mesures de T°Eau à Genève  
 TEau\_GenM2 et M3 = modèles de T°Eau à Genève calés sur les données de 1871-76 ; le modèle M3 sans les débits permet d'estimer la T°Eau sur la période 1900-1920 où les débits ne sont pas disponibles*

**Figure 100. Moyennes par décennies des températures de l'eau et de l'air à Genève et Pougny (issues soit des mesures soit des modèles)**

L'analyse des moyennes de T°Eau sur les données disponibles de chaque décennie montre que la « décennie » 1870-1877 se situe au niveau des valeurs les plus froides mais est tout à fait comparable aux décennies 1900 et 1970. Il y a une nette similitude entre les températures de l'air et de l'eau ; l'écart entre la T°air à Genève et celle de sortie du Léman est proche de 1.5°C et elle reste identique au XIXème, au XXème et au XXIème siècle.



**Figure 101 - Comparaison des Températures de l'Eau du Rhône et de la Saône en moyenne annuelle et en quantile 90% sur les données mesurées (1870-1877 et 1974-2010) et sur les modèles calés uniquement sur les données anciennes (1870-1877)**

En analyse annuelle, les constats établis (en utilisant également sur les écarts modèle-mesures figurant dans les annexes) sont les suivants :

- Les modèles calés sur les données anciennes restent très performants aujourd'hui encore à Genève : les écarts modèle/mesure sont du même ordre de grandeur entre le passé et aujourd'hui ; de plus il n'y a aucun biais décelable. (NB : l'année 1871 n'est pas complète – il manque 4 mois de mesures d'où le fait qu'elle se singularise)
- À Lyon sur le Rhône, les modèles calés sur les données anciennes sont très satisfaisants comparés aux données anciennes. Ils restent plutôt bons en moyenne annuelle comparés aux données récentes mais la plage des écarts est beaucoup plus étendue. Sur le quantile 90%, le modèle prédit des températures chaudes environ 1.3°C plus chaudes que les mesures récentes.
- À Lyon sur la Saône, les modèles calés sur les données anciennes sont très satisfaisants en moyenne et en quantile 90% jusque dans les années 1985-1990. Ensuite il se produit une nette dérive entre le modèle et les mesures, le modèle prédisant des valeurs beaucoup plus élevées que mesurées. Le biais atteint environ 1°C sur les dernières années.

Les interprétations possibles (non exhaustives...) sont les suivantes :

- Les processus qui gouvernent les T°Eau en sortie du Léman ont peu évolué et que, de ce fait, les modèles anciens et les mesures récentes convergent.
- Pour le Rhône à Lyon, les processus qui gouvernent l'évolution des températures de l'eau sous l'effet de la climatologie ont évolué : la création des retenues a fortement ralenti la vitesse de transfert de l'eau tout en approfondissant (en moyenne) le Rhône. Les rejets d'eaux échauffées de Bugey se rajoutent à cette série de modifications anthropiques. Tout cela se retrouve sur le modèle ancien qui est incapable de prédire correctement les T°Eau à Lyon en hiver lors des fortes variations de débit (signal haché au rythme des variations de débits).

Cependant, l'ensemble de ces évolutions, contrairement à ce qui aurait pu être attendu, vont plutôt dans le sens d'une conservation de la T°Eau moyenne et d'un refroidissement des valeurs extrêmes. **En 2003, le Rhône « ancien » aurait été environ 1°C plus chaud avec le débit de 2003...**

En l'absence d'une série journalière de débits influencés à l'identique des années 1870-1877, il est impossible de préciser ces effets à partir du modèle.

Même si l'effet des modifications saisonnières et hebdomadaires de débits doivent se conjuguer à ces évolutions mais elles restent secondaires à l'échelle des moyennes annuelles.

L'effet principal détecté est lié à la baisse de surface d'échange entre l'air et l'eau en parallèle à un approfondissement moyen du Rhône : même si l'eau met aujourd'hui plus de temps entre Genève et Lyon, les échanges avec l'atmosphère sont moindre et ne concernent pas toute la masse d'eau dans les retenues.

Cela se vérifie sur le quantile 10% que le modèle prédit environ 1.5 à 2°C plus froid que la mesure. Il semble donc bien que l'inertie globale du système soit modifiée ce qui correspond bien aux évolutions morphologiques (approfondissement, retenues).

Plus surprenant, l'effet de Bugey (~1°C en moyenne à Lyon et 75% du temps inférieur à 1.5°C) n'est pas détectable par cette approche. L'analyse de ce constat est délicate et plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Les températures de l'air utilisées en modélisation sont proches de grandes agglomérations et ont donc une tendance à être de plus en plus en écart avec celles qui prévalent au dessus du Rhône. Certains auteurs donnent cet effet aux alentours de 1°C. Calé sur les données anciennes le modèle ne subit pas cette influence mais, en simulation, des T°Air plus (trop) élevées sont introduites d'où un effet « contraire » approximativement identique à celui du CNPE de Bugey
- En conséquence de l'anthropisation du fleuve, l'augmentation du rayon hydraulique sur de nombreux secteurs, le dépôt de sédiments fins sur d'autres (retenues), la création de chenaux (pour les usines hydro-électriques) avec de forts Strickler et la transformation de cette énergie de frottement en kWh via les turbines font que le frottement global de l'eau sur le fond donc l'échauffement lié à ce frottement ont été fortement diminués.  
Sous des hypothèses très grossières, une analyse menée avec le logiciel de l'USGS SSTEMP (modèle thermique 1D), montre qu'un écart de 0.5 à 1°C lié au changement de forme du lit et au changement du coefficient de frottement (Manning passant de 0.033 à 0.02) est possible.  
En amont du Léman, des effets supérieurs à 1.5°C ont été avancés pour l'effet des kWh enlevés par l'énergie hydro-électrique, mais, sur le Rhône aval, les ordres de grandeurs sont nettement plus faibles [http://www.eawag.ch/publications/eawagnews/www\\_en55/en55f\\_screen/en55f\\_wuest\\_s.pdf](http://www.eawag.ch/publications/eawagnews/www_en55/en55f_screen/en55f_wuest_s.pdf).
- L'ensemble des erreurs de mesures (~0.3°C) et de modèle (rmse -0.9°C) peut suffire à expliquer cette différence sur une courte période, mais c'est plus difficile à comprendre en moyenne sur plusieurs décennies car il s'agirait alors d'un biais systématique.
- Pour la Saône à Lyon, l'anthropisation est moindre en termes d'hydromorphologie et d'hydrologie. Les modifications pour passage au grand gabarit dans les années 1980 ne correspondent pas aux écarts détectés qui se manifestent au moins 5 à 10 ans après. Une lente dérive est d'ailleurs observée plutôt qu'un changement brusque de comportement de la série laissant supposer une cause qui met du temps à s'établir. À part la possibilité d'un approfondissement moyen de la Saône au fil du temps, il n'y a pas d'explication très satisfaisante au fait que le modèle ancien paraît très correct pour expliquer les T°Eau de 1975 à 1985 et qu'il se met à dériver ensuite. Mais, là encore, le modèle ancien donne des valeurs plus élevées que la mesure récente.

En conclusion, ces mesures anciennes s'avèrent très riches en information même si il faut prendre avec précaution certaines données. La qualité de l'information à Genève s'avère remarquable alors que celle de Lyon apparaît satisfaisante en T°Eau, plus sujette à caution coté climatologie, mais il existe sans doute d'autres chroniques aux alentours de Lyon.

Si les processus qui gouvernent la T°Eau du Rhône à Genève semblent très stables dans le temps, il n'en va pas de même à Lyon, que ce soit sur la Saône ou le Rhône. Sur ces deux rivières, les modèles calés sur les données anciennes donnent des valeurs différentes de celles mesurées avec les conditions de débit d'aujourd'hui. Les processus d'échange entre l'air et l'eau apparaissent modifiés probablement par des effets anthropiques multiples parfois antagonistes.

Sur le Rhône à Lyon, la variabilité intra-annuelle des T°Eau apparaît nettement réduite avec la gestion saisonnière des débits et/ou la construction des retenues qui augmentent l'inertie du fleuve.

Sur la Saône, une dérive des processus est observée depuis 1985-1990 sans explication très claire.

## **ANNEXES**

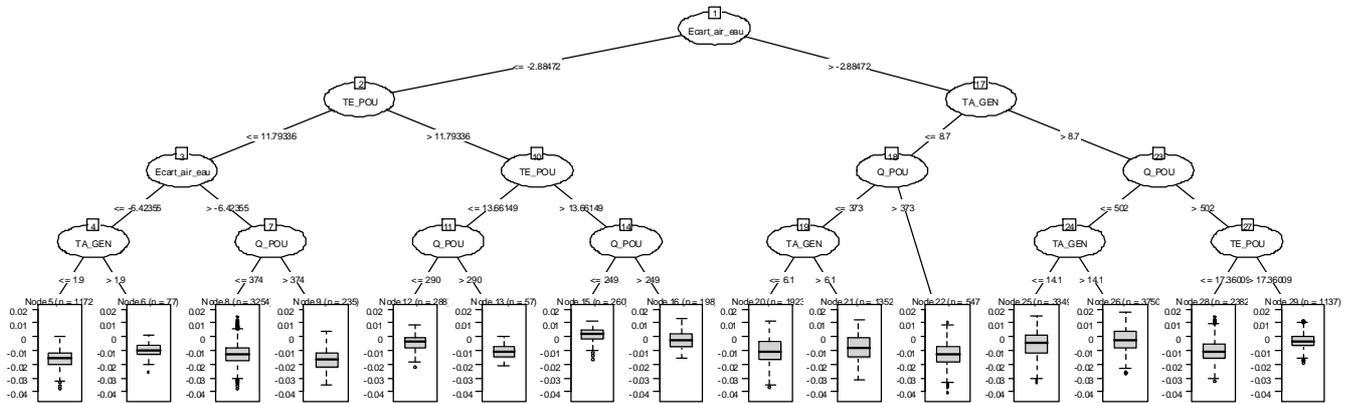
- Annexe 1 : Fiches de synthèse des stations de suivi des températures pour les 9 stations étudiées
- Annexe 2 : Arbres de hiérarchisation conditionnelle pour les modèles RN
- Annexe 3 : Régimes thermiques lissés et comparaisons air-eau
- Annexe 4 - Modèle de T°Eau du Rhône sur la base des données anciennes
- Annexe 5 – Fiches de synthèse des stations hydrologiques



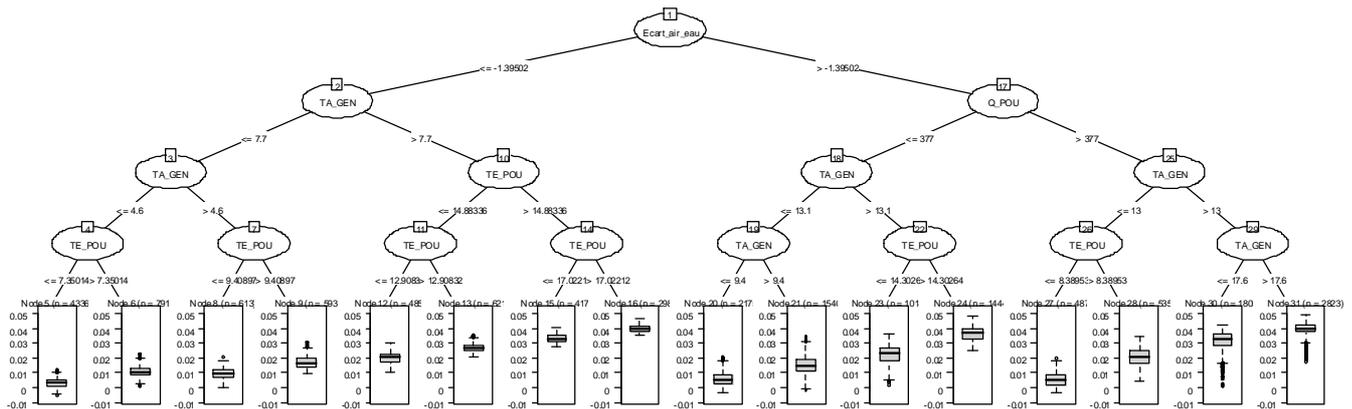
**1. ANNEXE 1 - FICHES DE SYNTHÈSE DES STATIONS DE SUIVI DES TEMPÉRATURES POUR LES 9 STATIONS ÉTUDIÉES**

## 2. ANNEXE 2 - ARBRES DE HIÉRARCHISATION CONDITIONNELLE POUR LES MODÈLES RN

### 2.1. POUIGNY

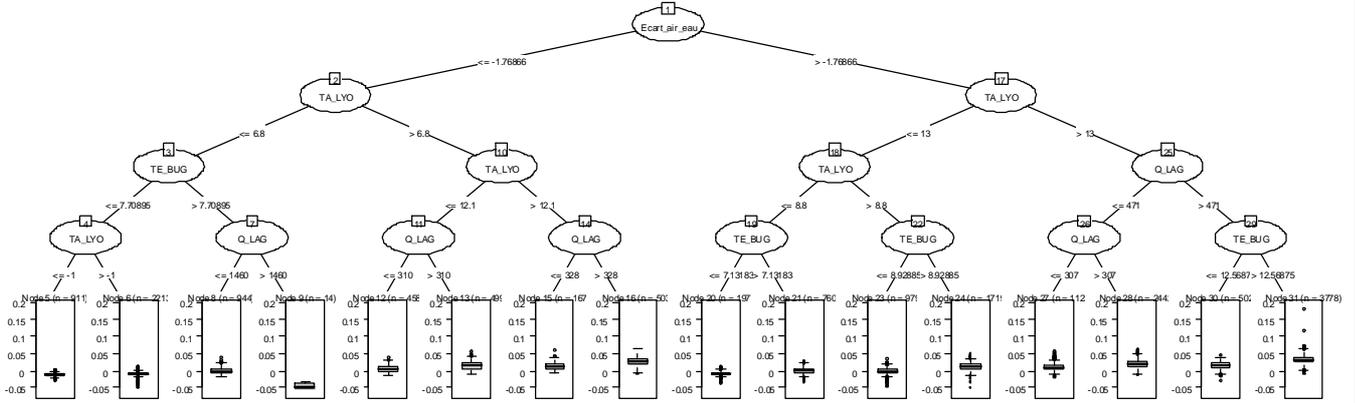


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dQ de -10 m3/s

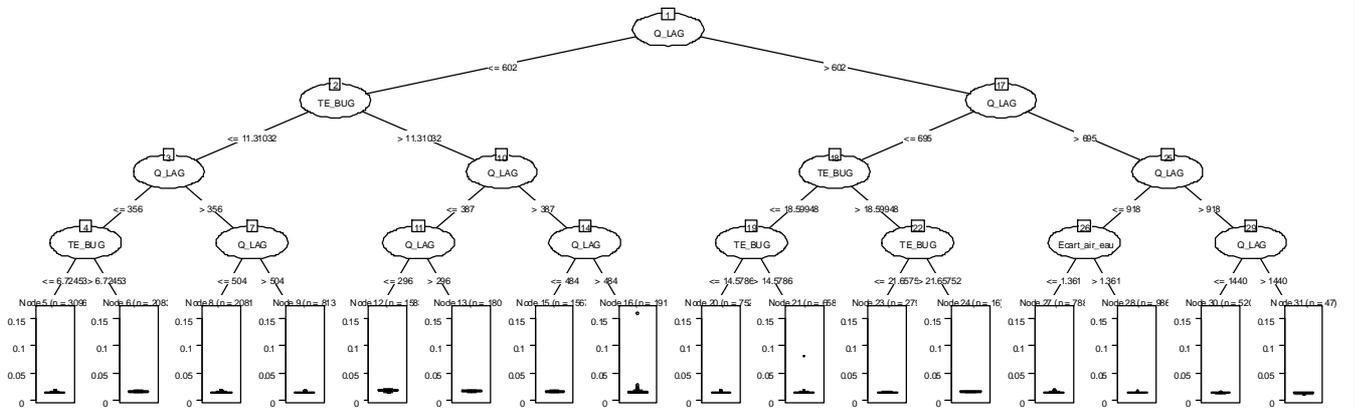


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTA de +0.1°C

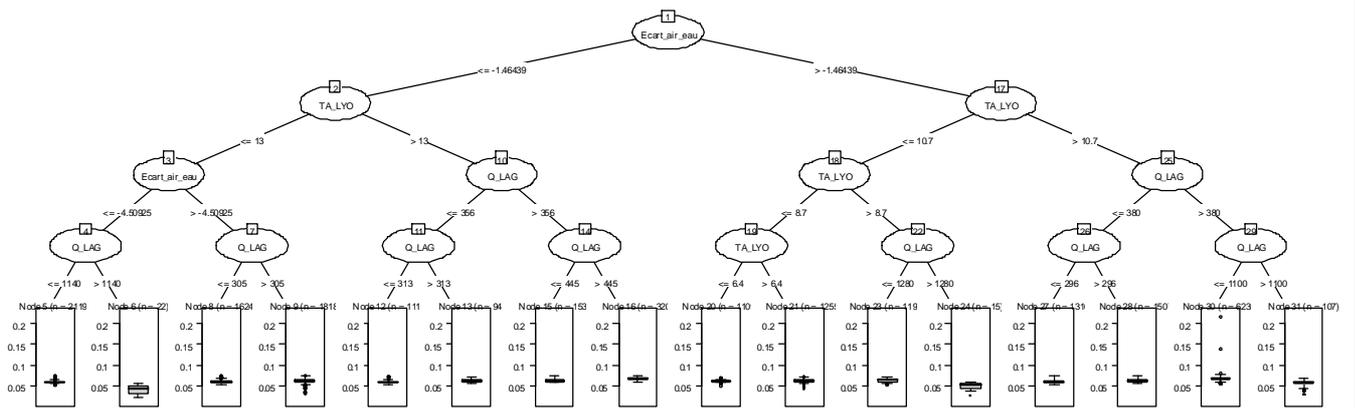
**2.2. BUGEY**



Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dQ de -10 m3/s

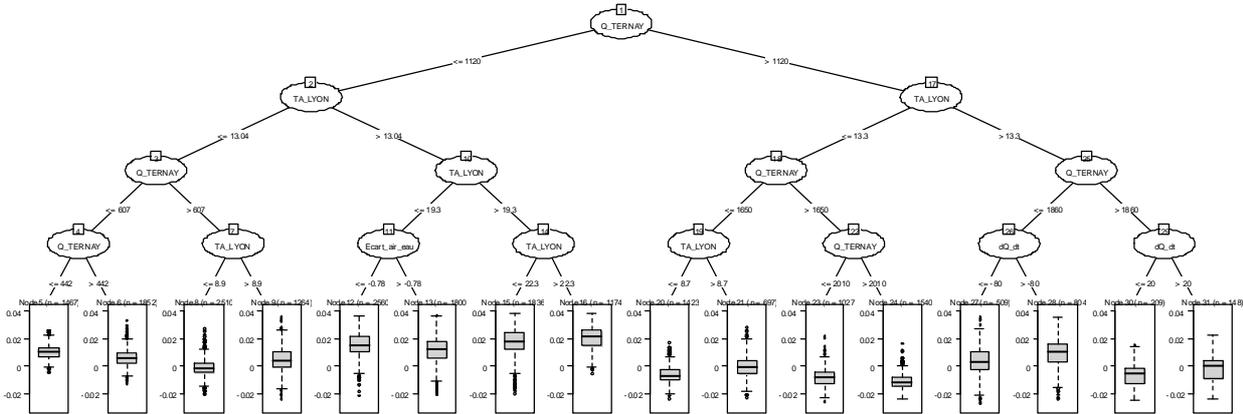


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTA de +0.1°C

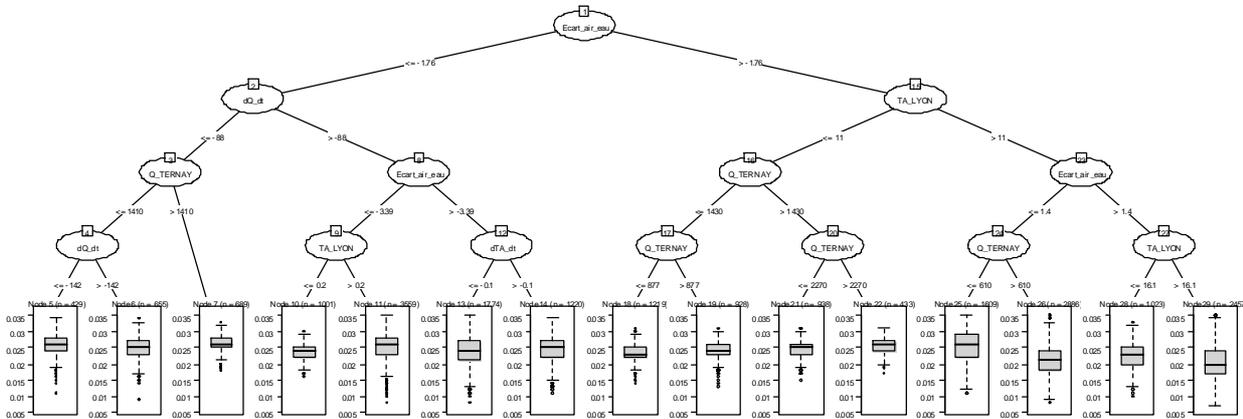


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTE amont de +0.1°C

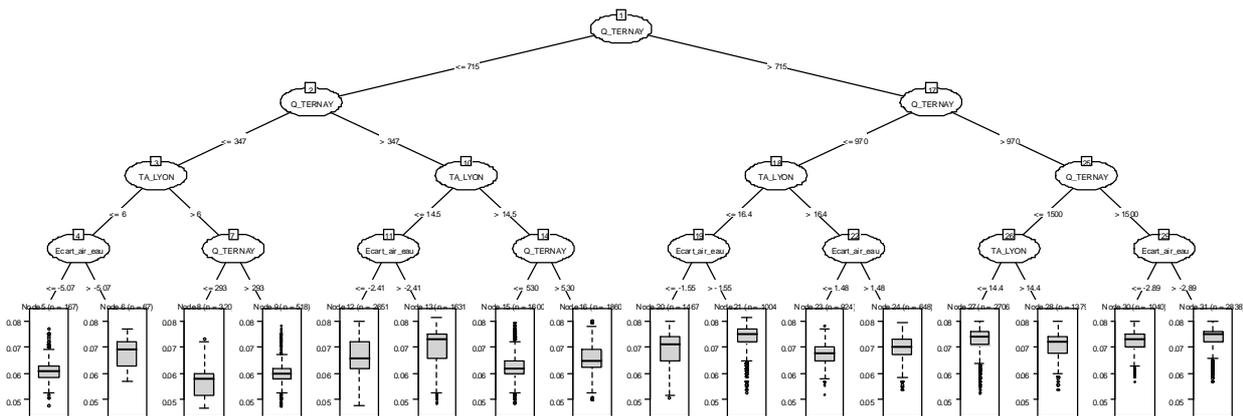
### 2.3. SAINT-ALBAN



Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dQ de -10 m3/s

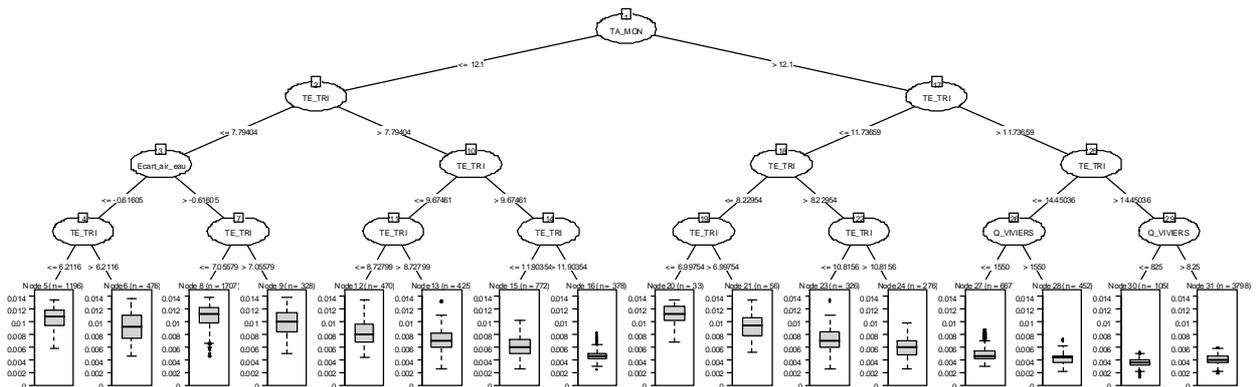


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTA de +0.1°C

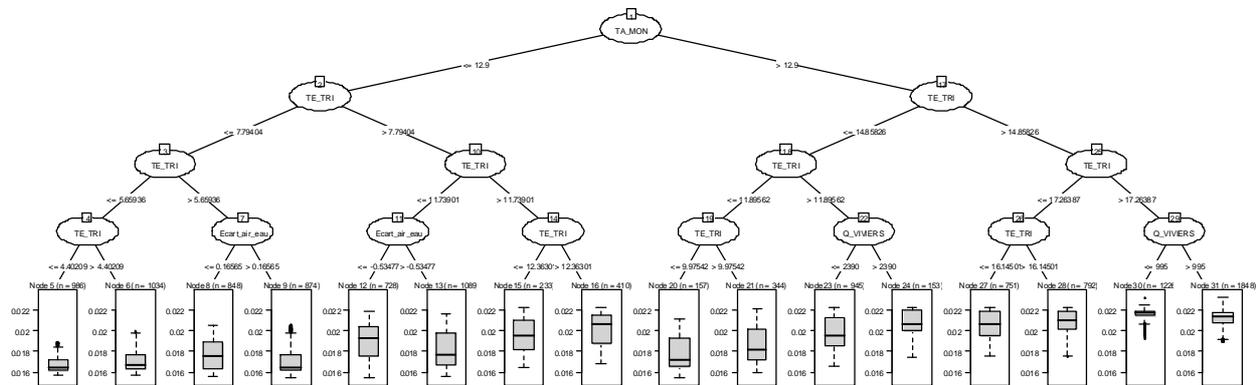


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTE amont de +0.1°C

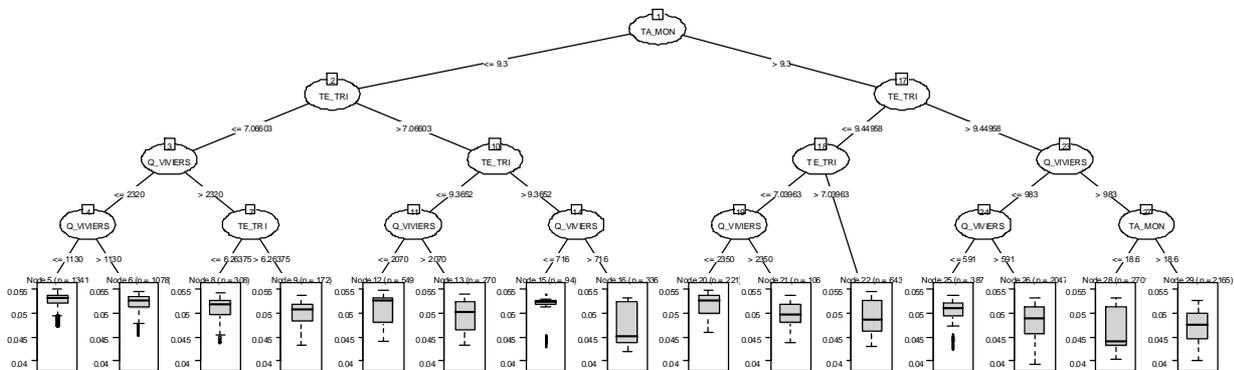
### 2.4. TRICASTIN



Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dQ de -10 m3/s

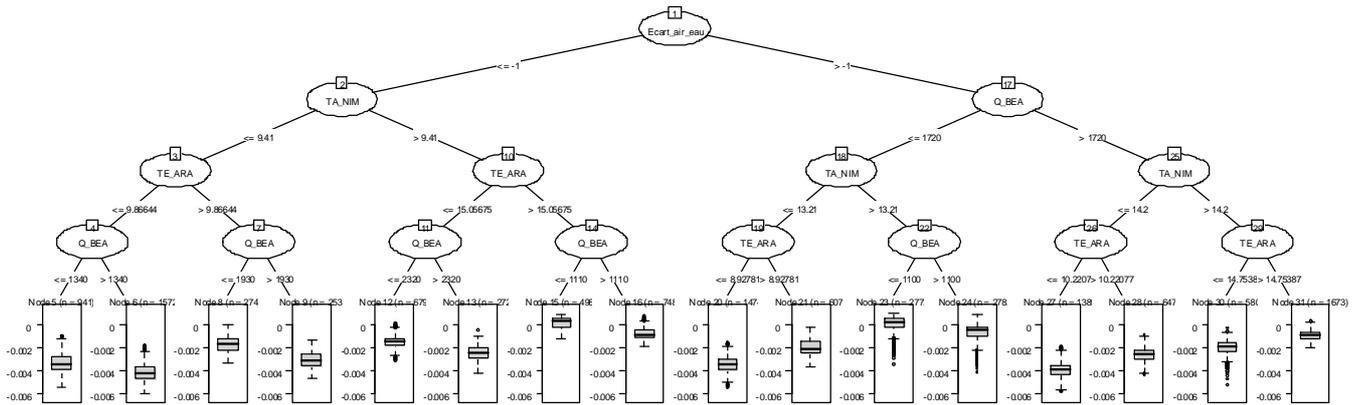


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTA de +0.1°C

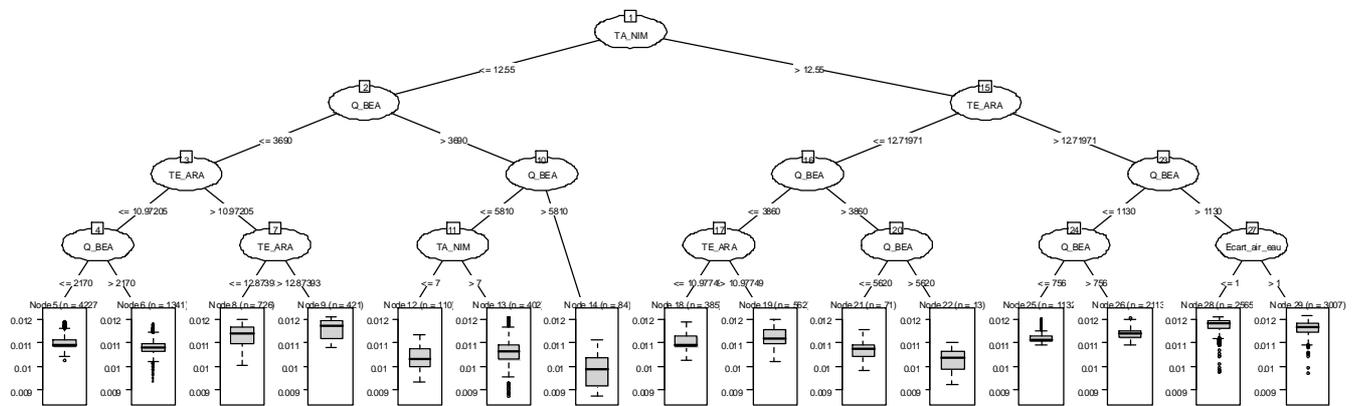


Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTE amont de +0.1°C

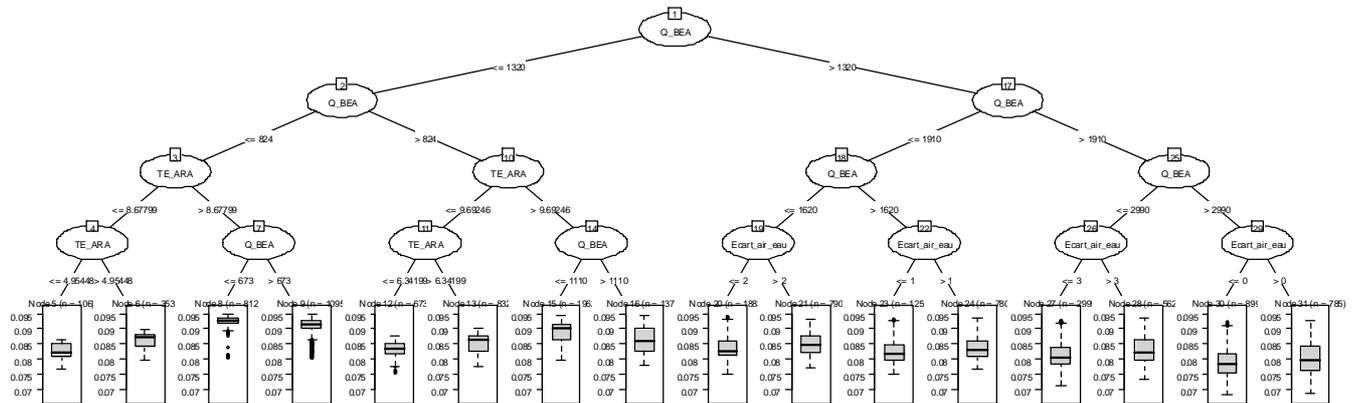
## 2.5. ARAMON



Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dQ de -10 m3/s



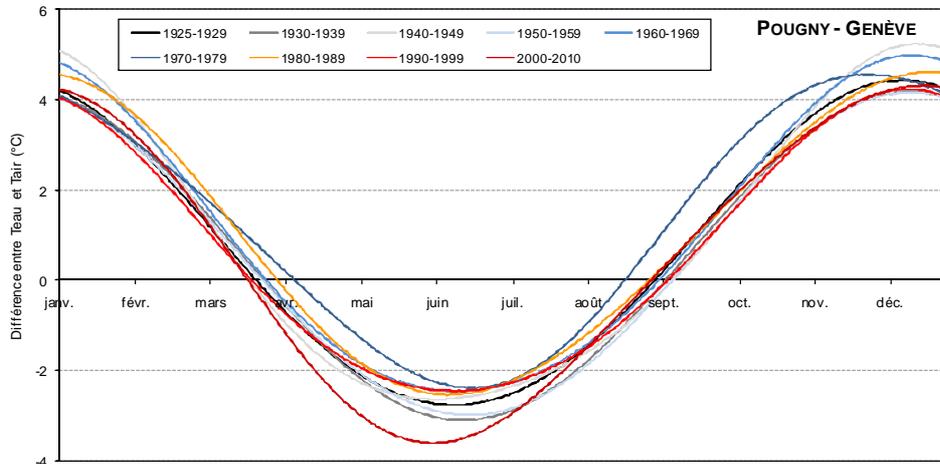
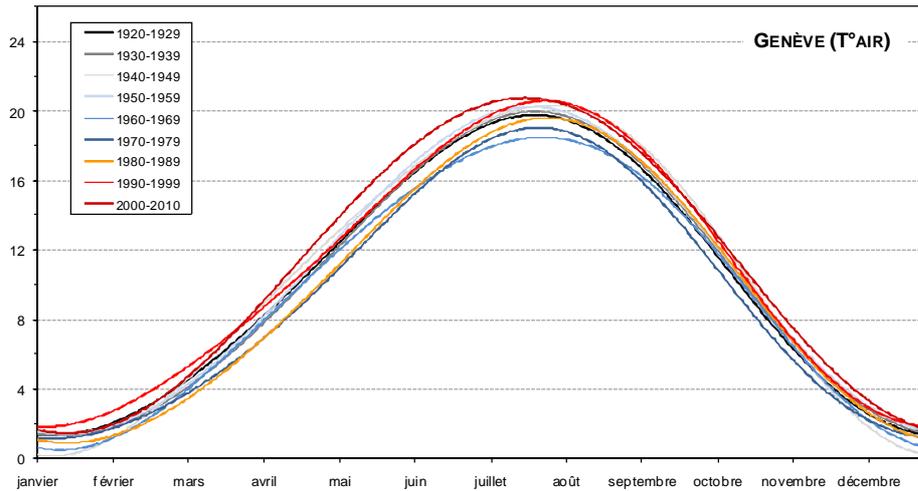
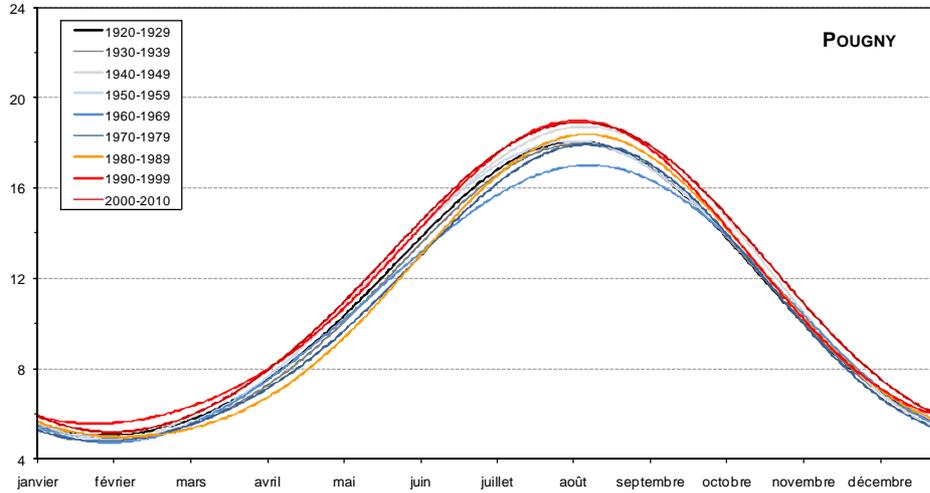
Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTA de +0.1°C



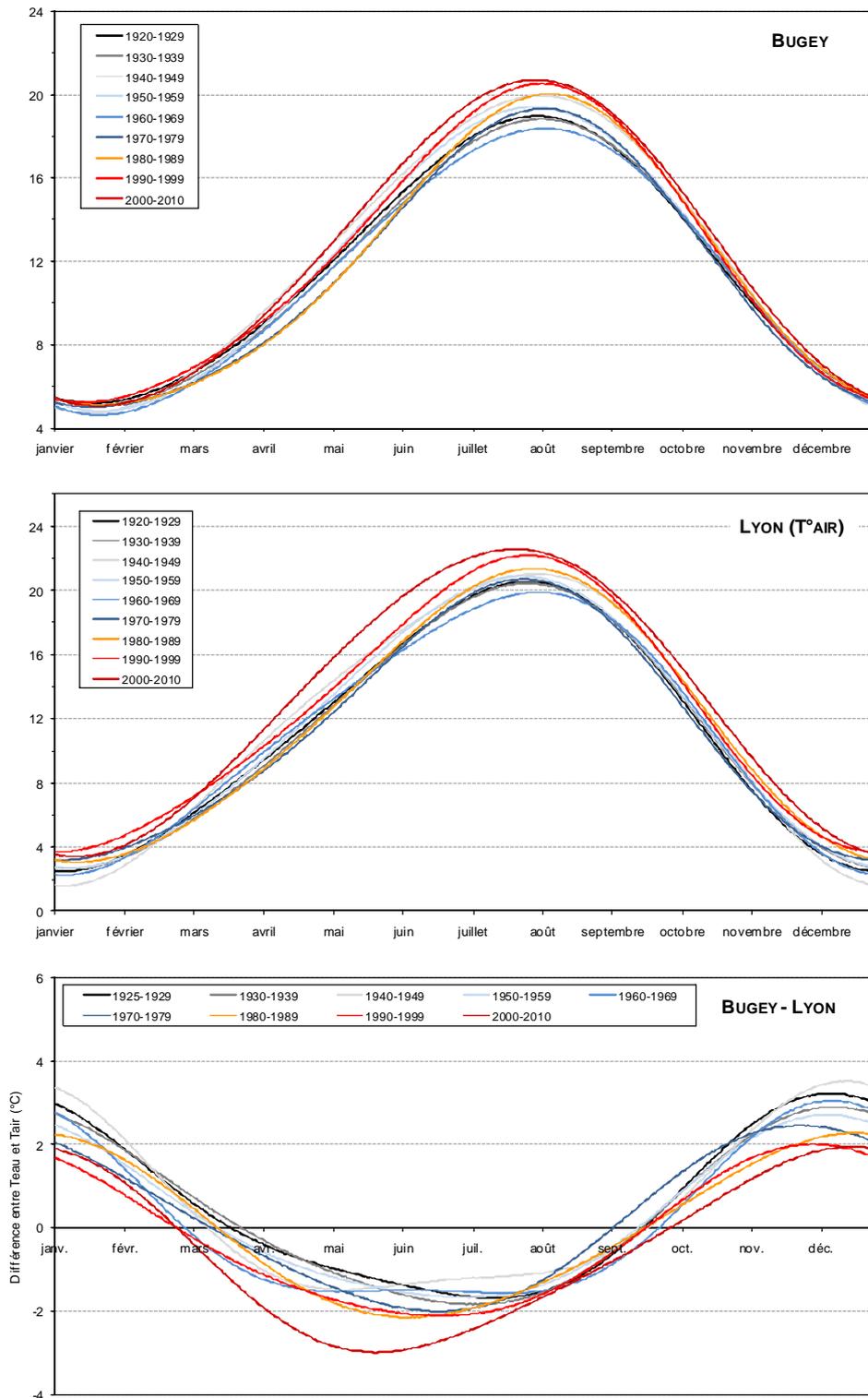
Arbre de hiérarchisation conditionnelle de dTE pour un dTE amont de +0.1°C

### 3. ANNEXE 3- RÉGIMES THERMIQUES LISSÉS ET COMPARAISONS AIR-EAU

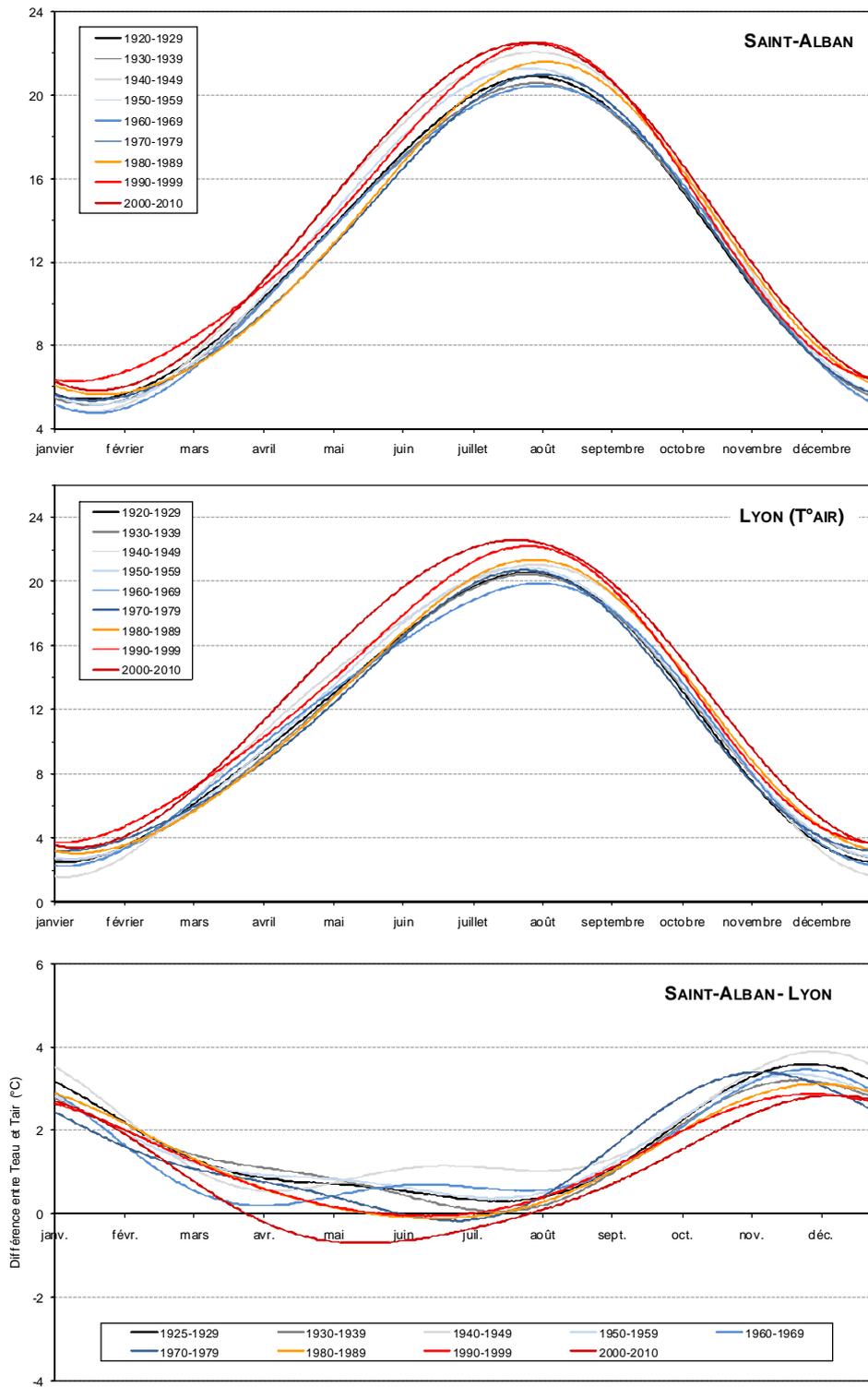
#### 3.1. POUIGNY / GENEVE



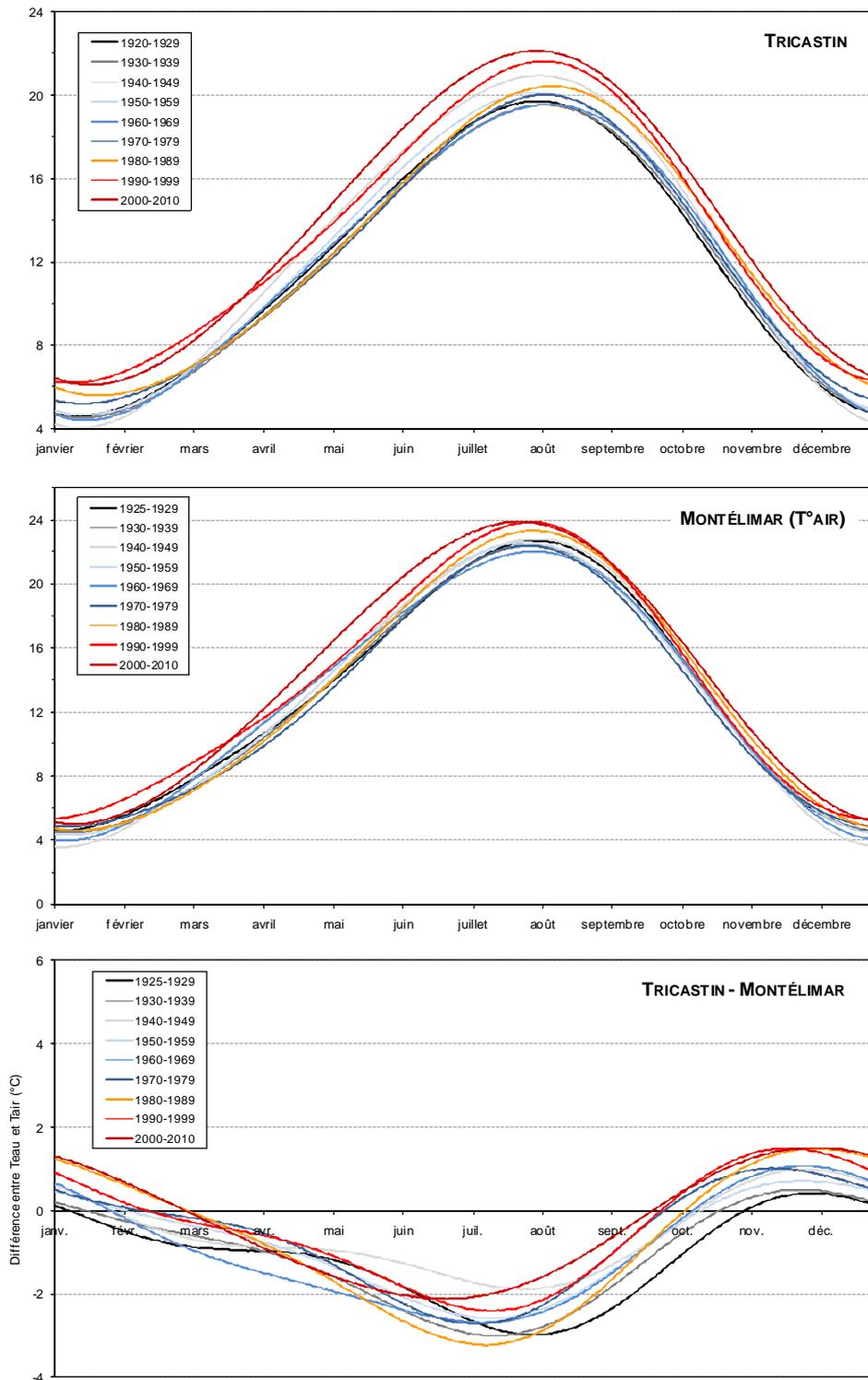
### 3.2. BUGEY / LYON



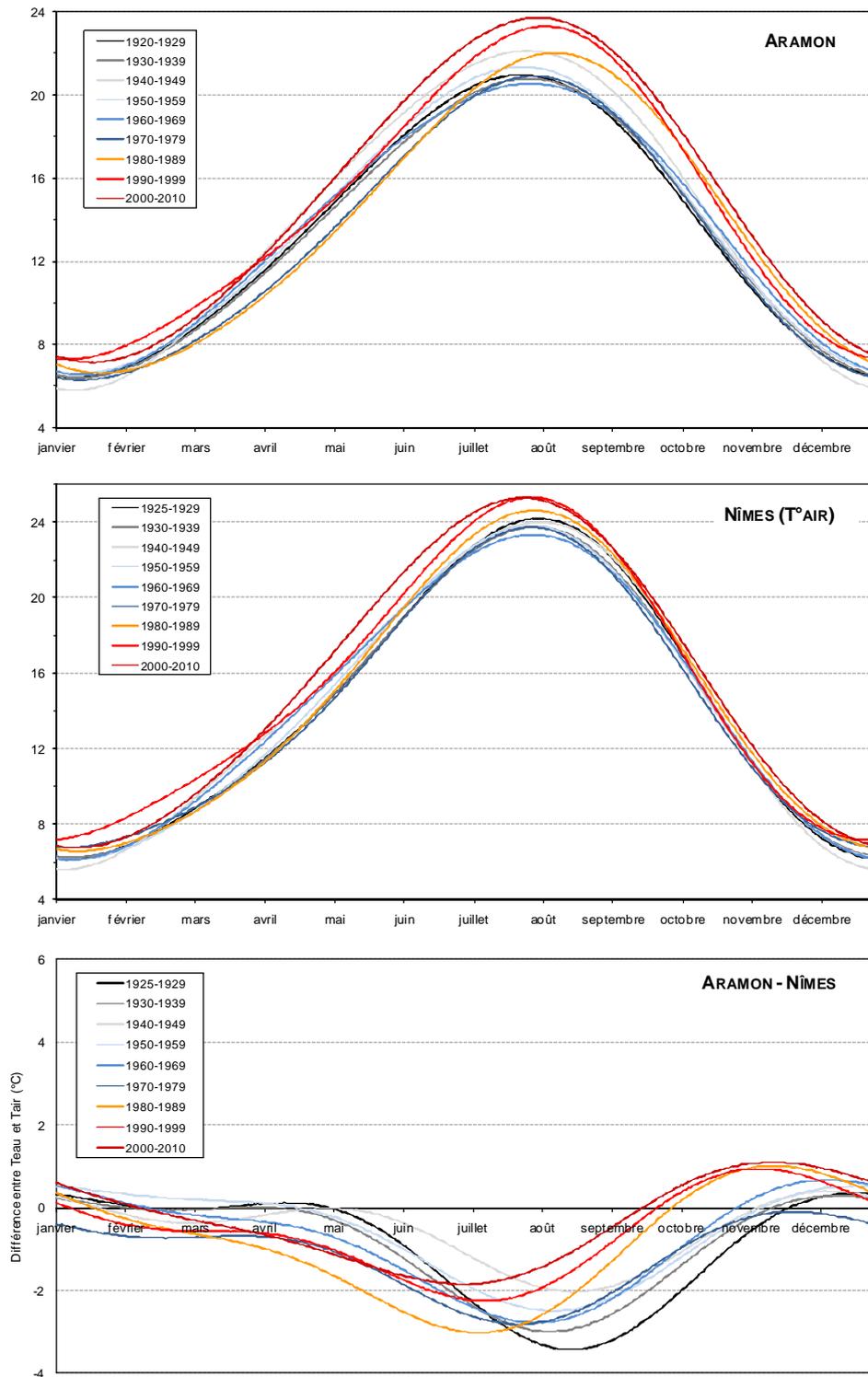
### 3.3. SAINT-ALBAN / LYON



### 3.4. TRICASTIN / MONTELMIMAR



### 3.5. ARAMON / NIMES

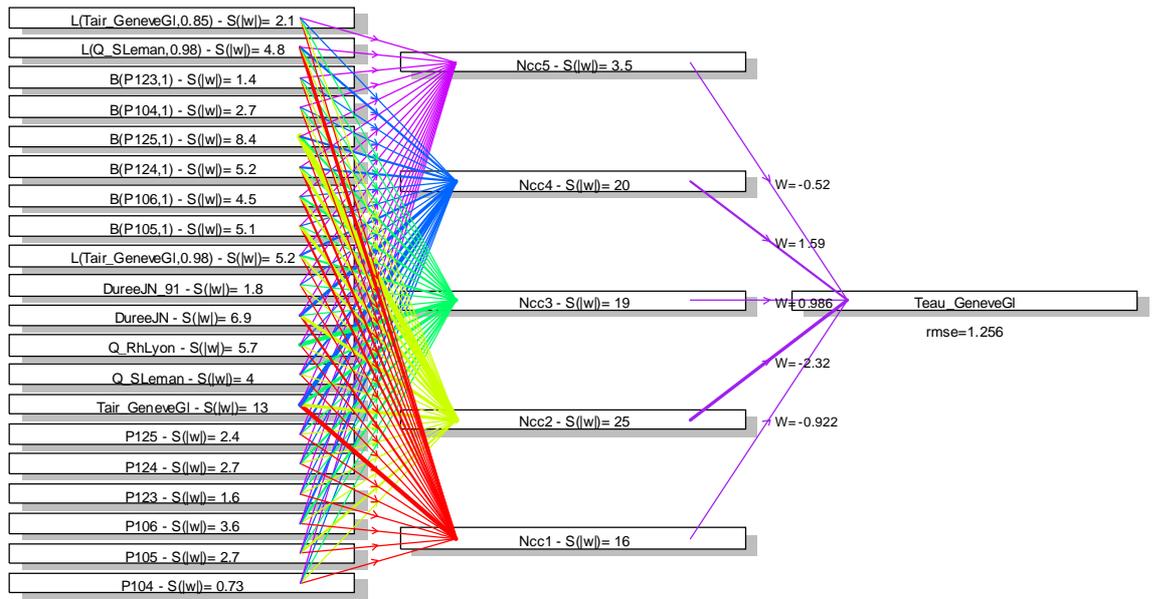


## 4. ANNEXE 4 - MODÈLE DE T°EAU DU RHÔNE SUR LA BASE DES DONNÉES ANCIENNES

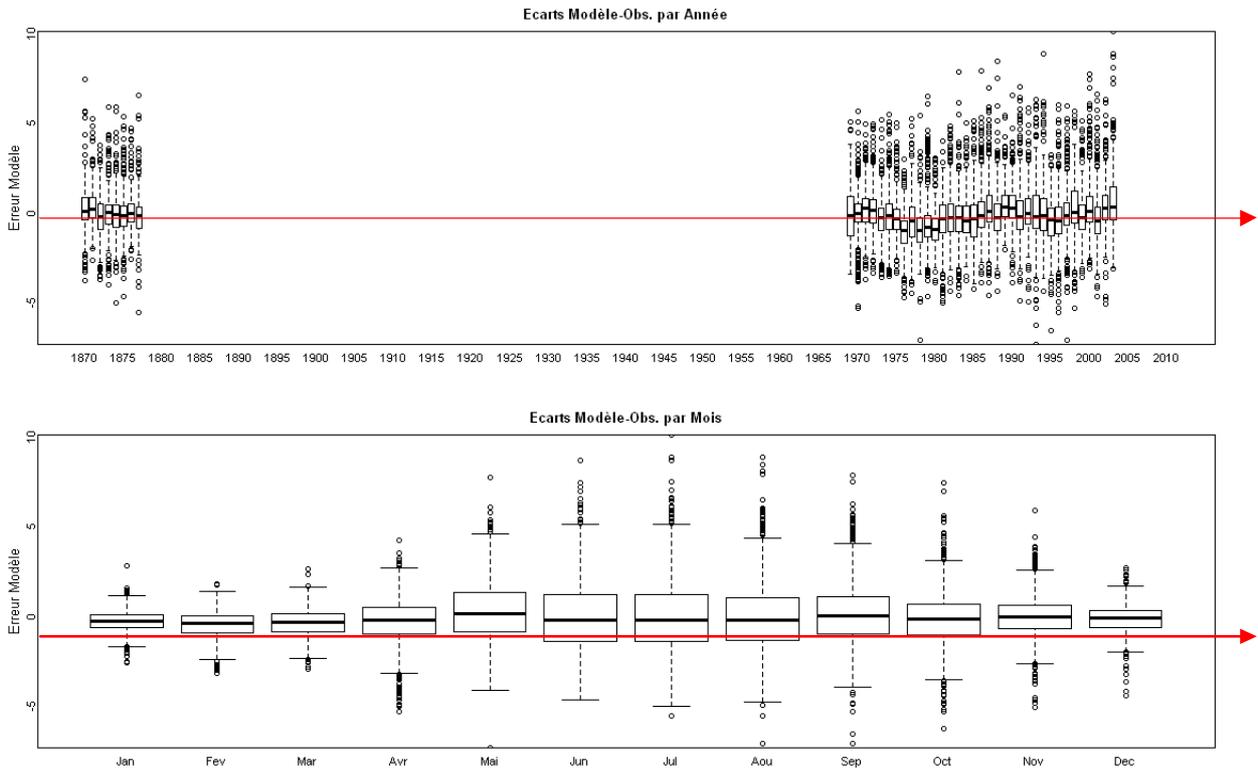
### 4.1. MODÈLE DE T°EAU DU RHÔNE À GENÈVE

#### 4.1.1. Schéma du modèle

Schéma du RN : TEGenAncM2



#### 4.1.2. Ecarts modele/mesure par années et par mois

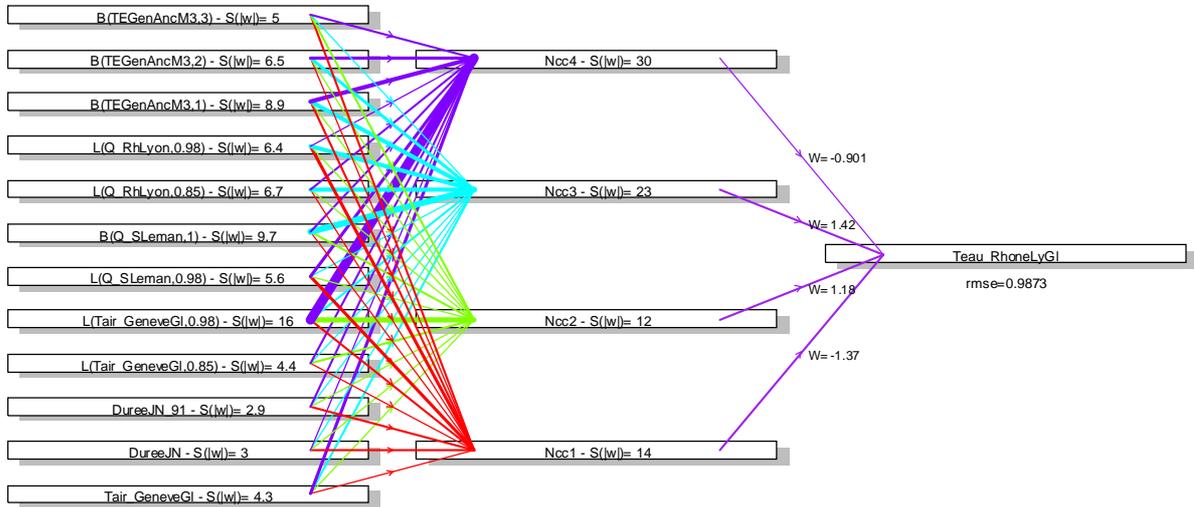


NB : seules les années 1871 à 1876 sont utilisées pour le calage, mais toutes les données possibles sont simulées et utilisées dans le calcul des écarts

## 4.2. MODÈLE DE T°EAU DU RHÔNE À LYON

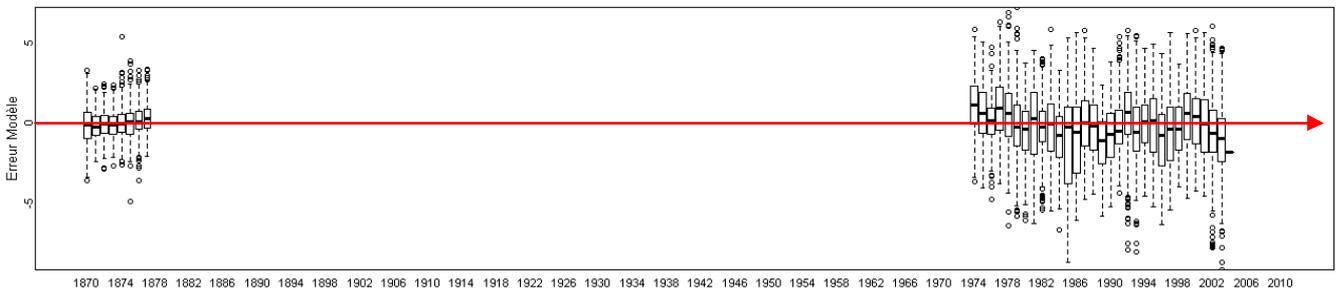
### 4.2.1. Schéma du modèle

Schéma du RN : TERhLyoRN3

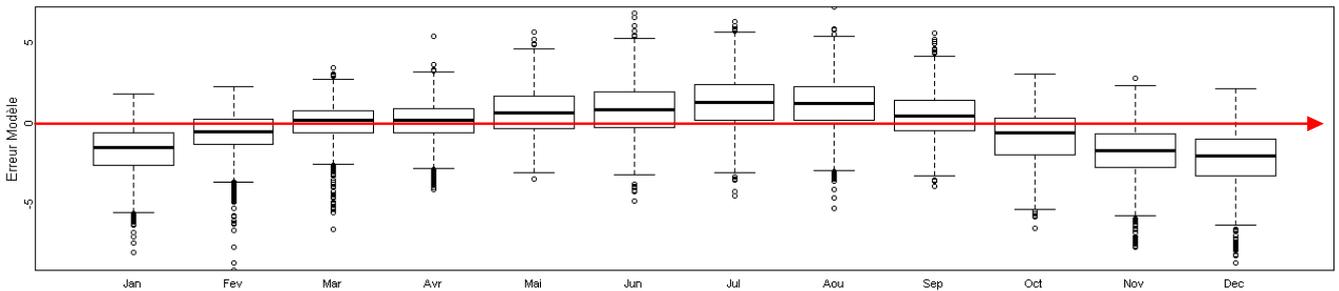


### 4.2.2. Ecart modèle/mesure par années et par mois

Ecart Modèle-Obs. par Année



Ecart Modèle-Obs. par Mois

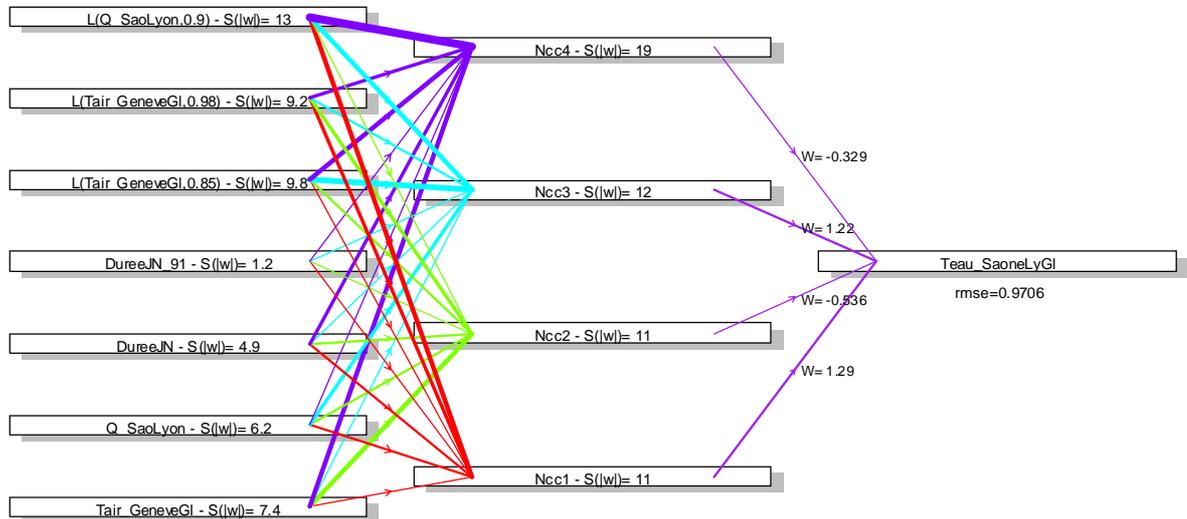


NB : seules les années 1871 à 1876 sont utilisées pour le calage, mais toutes les données possibles sont simulées et utilisées dans le calcul des écarts

### 4.3. MODÈLE DE T°EAU DE LA SAÔNE À LYON

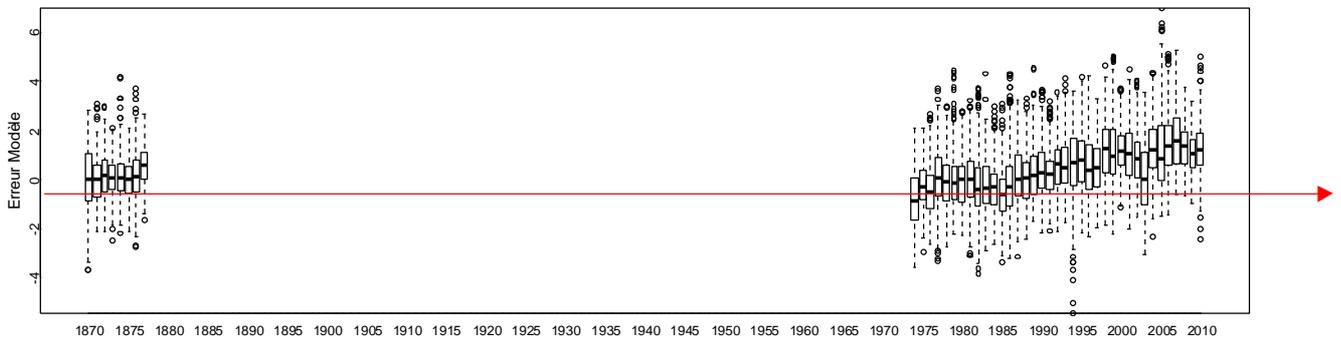
#### 4.3.1. Schéma du modèle

Schéma du RN : TESaORN2

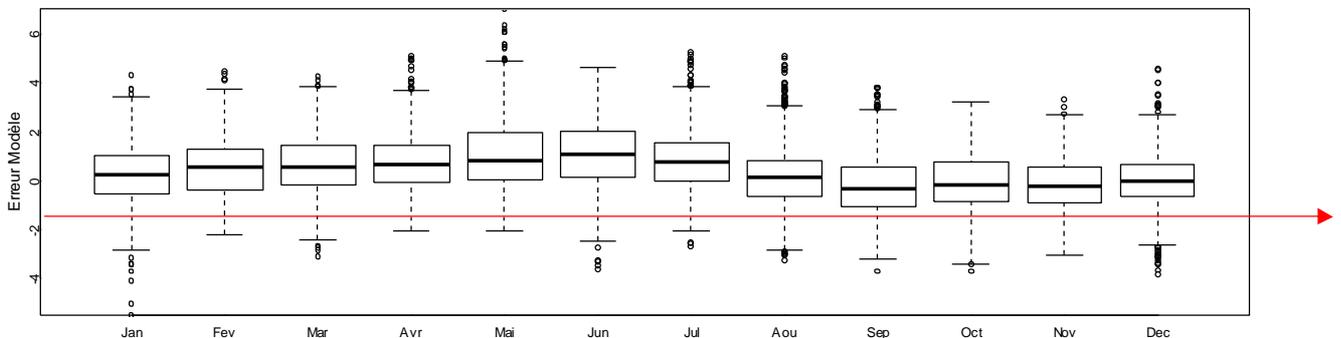


#### 4.3.2. Ecarts modele/mesure par années et par mois

Ecarts Modèle-Obs. par Année



Ecarts Modèle-Obs. par Mois



NB : seules les années 1871 à 1876 sont utilisées pour le calage, mais toutes les données possibles sont simulées et utilisées dans le calcul des écarts

## 5. ANNEXE 5 – FICHES DE SYNTHÈSE DES STATIONS HYDROLOGIQUES

Ces fiches ont été empruntés au rapport EDF complémentaire traitant de l'hydrologie du Rhône et dont voici la référence D4165/RAP/2012-0018A