



Auteur(s) : Benoît DESAINT - Alain POIREL

Date de diffusion : 01/06/2004

**RAPPORT**  
**ETUDE THERMIQUE DU RHONE - PHASE 2**  
**RAPPORT FINAL**

Réf.: D4161/RAP/2004-00156-A

Indice : A.01

88 pages

4 annexe(s)

Entité émettrice : EDF - DTG - Dpt Surveillance - Branche Environnement

Documents associés :

Résumé :

La seconde phase de l'étude thermique du Rhône vise à discerner la part respective des facteurs explicatifs que sont débits, conditions météorologiques, température de l'eau en amont, fonctionnement des Centre Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE), température de restitution des tronçons court circuités, autres rejets ... dans la température du Rhône observée en un point. On met ici en évidence la complexité de la thermique du Rhône, influencée sur tout son linéaire par les conditions de température d'eau en amont du fleuve, de météorologie, de fonctionnement des CNPE notamment. L'étude confirme et permet de quantifier un résiduel d'échauffement lié aux rejets des CNPE le long du fleuve, variable en fonction des conditions météorologiques mais rarement supérieur dans le temps et l'espace à l'impact d'un seul CNPE.

Intérêt documentaire : Oui  Non   
Documentation de référence : Oui  Non

Accessibilité  
Libre   
EDF-GDF   
Restreinte   
Confidentielle



DTG

**Création - Modifications**

Ind.	Auteur(s)			Vérificateur(s)			Approbateur		
	Nom	Signature	Date	Nom	Signature	Date	Nom	Signature	Date
	Benoît DESAINT			Alain POIREL			Olivier DIDRY		

**Suivi des indices et versions**

Ind.	Objet
A	Création

**Diffusion**

Destinataire(s) pour application	Sup.	Destinataire(s) pour information	Sup.
Membres du comité de pilotage de l'étude thermique globale du Rhône  DSIN : Mr GOELNER	10	MCPA : Mme THOMAS	1
		CNPE Bugey : M. ZWALD	1
	1	CNPE St Alban : M. VACCANI	1
		CNPE Cruas : M. JEAUNEAUX	1
		CNPE Tricastin : Mme FOUCHER	1
		Délégation de Bassin : MM ROUX & CASTAING	1
		DRD : MM GOSSE et KHALANSKI	1
		DTG : Archives ENV	2

## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
1.1. CONTEXTE .....	5
1.2. RAPPEL DU CAHIER DES CHARGES.....	5
<b>2. DESCRIPTION DES ÉCHAUFFEMENTS THÉORIQUES DES CNPE</b>	<b>7</b>
2.1. ANALYSE DES FRÉQUENCES EXPÉRIMENTALES .....	7
2.2. ANALYSE DES MOYENNES .....	8
2.2.1. Bugey.....	8
2.2.2. Saint Alban.....	8
2.2.3. Tricastin .....	8
<b>3. ANALYSE GRAPHIQUE DE SITUATIONS PARTICULIERES</b>	<b>9</b>
3.1. OBSERVATION GRAPHIQUE DU TRANSFERT AMONT-AVAL SUR LE RHONE .....	10
3.2. OBSERVATION DE SITUATIONS PARTICULIERES.....	11
3.2.1. De Pougny à Bugey (141 km) .....	11
3.2.2. De Bugey à St Alban (89 km).....	12
3.2.3. De St Alban à Roche de Glun (53 km).....	15
3.2.4. De Roche de Glun à Tricastin (86 km).....	17
3.2.5. De Tricastin à Aramon (70 km) .....	18
3.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 3 .....	19
<b>4. ETUDE DE L'INCIDENCE AVAL DE VARIATIONS AMONT</b>	<b>20</b>
4.1. MÉTHODE.....	20
4.1.1. Test de décision.....	20
4.1.2. Variables prises en compte.....	20
4.2. RÉSULTATS .....	21
4.2.1. Variation de température à J au Bugey et variations amont .....	21
4.2.2. Variation de température à J à Jons et variations amont.....	22
4.2.3. Variation de température à J à St Alban et variations amont.....	22
4.2.4. Variation de température à J à Tricastin et variations amont.....	23
4.2.5. Variation de température à J à Aramon et variations amont.....	23
4.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 4 .....	24

<b>5. MODÈLES EXPLICATIFS DES TEMPÉRATURES AVAL</b>	<b>25</b>
5.1. MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE	25
5.1.1. Méthode	25
5.1.2. Stations prises en compte	26
5.1.3. Résultats	26
5.2. MODELE RESEAU DE NEURONES	30
5.2.1. Méthode	30
5.2.2. Résultats	30
5.3. EVALUATION DU RESIDUEL DES ÉCHAUFFEMENTS DES CNPE	40
5.3.1. Propagation d'une variation d'échauffement (par le modèle linéaire)	40
5.3.2. Evaluation de l'échauffement résiduel moyen des 3 CNPE sur la période 1991-2003	43
5.3.3. Intégration des échauffements des 3 CNPE sur la période 1991-2003	46
5.3.4. Conclusion sur la période 1991-2003	51
5.4. ANALYSE DE SITUATIONS PARTICULIERES	52
5.4.1. Analyse des résidus du modèle de régression linéaire	52
5.4.2. Choix des situations particulières	52
5.4.3. Etude des situations de température amont Bugey > 20 °C	58
5.4.4. Etude des situations où la somme des échauffements théoriques des CNPE est supérieure à 6°C	61
5.4.5. Regard sur les situations croisées	63
5.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 5	66
<b>6. CONCLUSION GENERALE</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXE 1 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE</b>	<b>68</b>
<b>ANNEXE 2 : DESCRIPTION DES ÉCHAUFFEMENTS DES CNPE</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXE 3 : PRINCIPES DE LA MODÉLISATION PAR RÉSEAU DE NEURONES</b>	<b>76</b>
<b>ANNEXE 4 : EXEMPLES DETAILLES DE MODELISATION DES TEMPERATURES DE L'EAU</b>	<b>79</b>

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. CONTEXTE

Ce document constitue le rapport final de la deuxième phase de l'étude thermique globale du Rhône.

La première phase de cette étude a établi différentes statistiques de température sur plus de vingt ans à plusieurs pas de temps en 15 points du Rhône et de ses affluents (cf. annexe 1 : carte des points de mesure). La période d'étude ayant servi à l'établissement de ces références, initialement 1977-1999, a été étendue jusqu'à 2003 afin de tenir compte des enseignements de cette année exceptionnelle. Cette extension fait l'objet du rapport complémentaire n° D4161/RAP/2004-00135-A.

La première phase a également précisé le régime thermique du fleuve par différentes fréquences au dépassement ainsi que la répartition des classes de température à l'échelle de l'année ou du mois. Cela a mis en évidence 2 périodes au comportement thermique bien distinct : 1977-1987 et 1988-2003. Aucune relation de cause à effet n'a été recherchée dans cette première phase de constat.

La seconde phase de l'étude vise à discerner la part respective des facteurs explicatifs que sont débits, conditions météorologiques, température de l'eau en amont, fonctionnement des Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE), température de restitution des tronçons court-circuités, autres rejets ... dans la température du Rhône observée en un point. Elle vise plus particulièrement à évaluer la part de l'échauffement apporté par les CNPE au niveau de différentes stations de mesure du Rhône. Elle doit ainsi permettre de répondre aux questions liées à l'éventuel cumul des échauffements des différents CNPE le long du fleuve. Ces interactions seront étudiées dans différentes conditions hydro-climatologiques, notamment en étiage et/ou en période de réchauffement naturel des eaux.

Cette seconde phase se fonde sur la période 1991-2003, sur laquelle sont disponibles les données des échauffements théoriques liés aux rejets des CNPE.

### 1.2. RAPPEL DU CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges de cette étude comportait cinq points à amender au besoin en fonction des résultats obtenus :

- Analyse graphique de situations particulières

Il s'agit d'une étape visuelle et descriptive permettant d'identifier le comportement thermique dans des configurations de rejet particulières.

- Etude de l'incidence aval des variations amont

On évalue ici la pertinence des relations statistiques entre les variations au pas de temps journalier de variations amont telles que les rejets d'un CNPE et les variations de température de l'eau constatées à l'aval (en tenant compte des temps de transfert entre stations de mesure).

- Test de dérive des relations statistiques amont-aval en fonction des rejets

Cette étape vise le même objectif que la précédente. Elle est cependant plus fine en détection car elle utilise le cumul de faibles écarts dans le même sens : des écarts négligeables pris séparément deviennent détectables quand on les cumule.

Cette méthode plus précise ne sera mise en œuvre que si l'étape précédente n'a pas permis d'établir l'incidence aval de variations amont.

Ces deux étapes répondent stricto sensu à la problématique du cumul des échauffements.

- Modèle explicatif des températures aval

Cette méthode classique, basée sur la régression linéaire, mais prenant en compte les temps de transfert amont-aval, doit permettre d'identifier la contribution des variables significatives à l'échauffement des eaux du Rhône (température de l'air, débits, rejets thermiques).

- Modèle « boîte noire »

A titre expérimental, ce type de modèle peut permettre d'identifier si l'introduction d'une variable d'entrée quelconque (un rejet thermique par exemple) peut améliorer la prévision d'une variable de sortie (une chronique de température d'eau aval par exemple) sans préjuger des processus en jeu. Il utilise un approximateur universel : les réseaux de neurones.

La mise en œuvre des tests de dérive n'a pas été jugée utile en cours d'étude du fait des résultats obtenus dans le point 2 mettant déjà en évidence l'incidence aval de variations amont.

Les résultats sont présentés par tronçon, de station en station jugées pertinentes pour la compréhension du fonctionnement thermique du fleuve. L'étude porte dans un premier temps sur l'ensemble de l'échantillon (1991-2003) puis se focalise sur quelques situations particulières choisies pour leur sensibilité au regard du paramètre température.

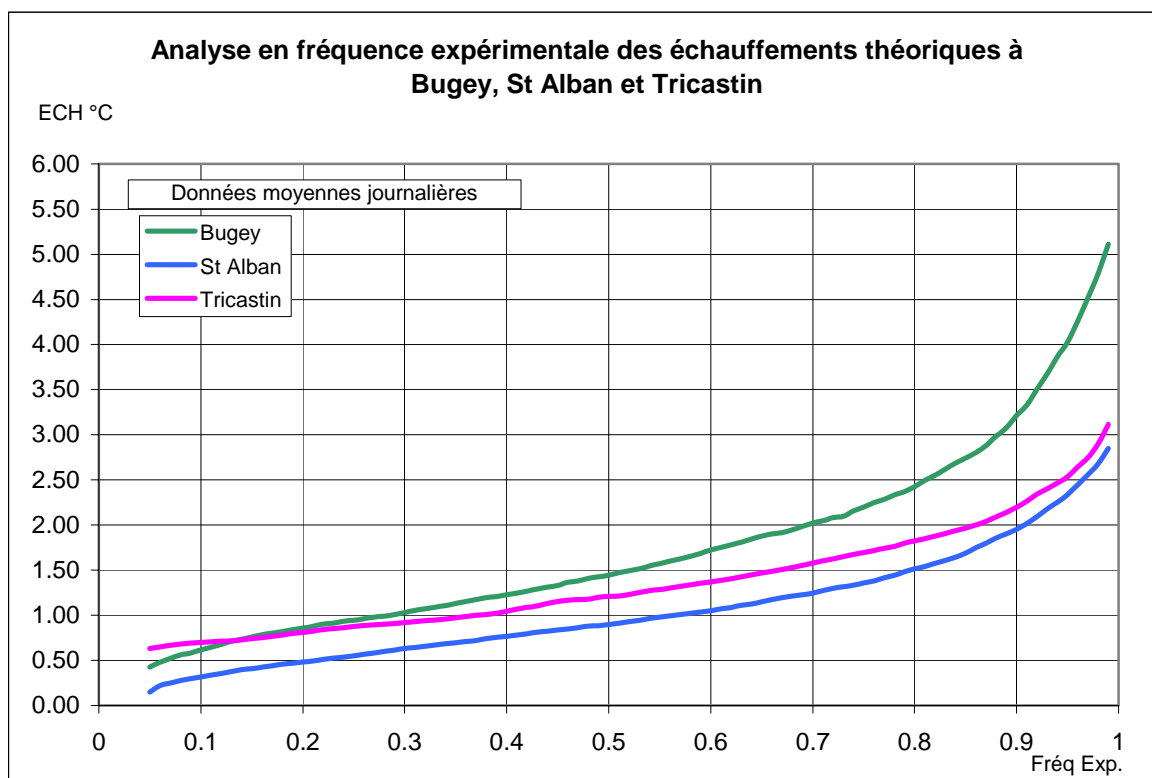
## 2. DESCRIPTION DES ÉCHAUFFEMENTS THÉORIQUES DES CNPE

Les données d'échauffement des CNPE du Bugey, de St Alban et de Tricastin sont issues d'un calcul théorique proportionnel à la puissance du site et inversement proportionnel au débit du Rhône. Ce sont les résultats de ce calcul qui sont présentés ci-après en moyenne journalière. On trouvera en annexe 2 une analyse statistique de ces échauffements.

*Remarque : les échauffements du CNPE de Cruas, considérés comme négligeables car généralement inférieurs à la précision de la mesure (0.3°C), ne sont pas traités ici. Notons par ailleurs que les échauffements du CNPE de Tricastin sont calculés par rapport au débit du canal à Bollène et non de l'intégralité du fleuve.*

### 2.1. ANALYSE DES FRÉQUENCES EXPÉRIMENTALES

Le graphe suivant donne pour les trois CNPE la fréquence expérimentale des valeurs d'échauffements calculés de 1991 à 2003. Ces valeurs sont données en moyenne journalière ; les éventuelles fluctuations au cours de la journée sont donc lissées.



Les échauffements au Bugey sont généralement les plus élevés, ce qui est notamment la conséquence de débits plus faibles à l'amont du Rhône. On constate cependant que la plupart des échauffements sont inférieurs à 3°C : près de 90 % au Bugey, plus de 95 % à Tricastin et à St Alban. Ces statistiques étant données en valeurs moyennes journalières, elles n'excluent évidemment pas des échauffements instantanés potentiellement plus élevés.

## 2.2. ANALYSE DES MOYENNES

On trouvera en annexe 1 les graphes des moyennes hebdomadaires, mensuelles et annuelles ainsi que des statistiques sur les moyennes journalières.

### 2.2.1. Bugey

La moyenne annuelle des échauffements sur la période est de 1,72 °C, sans qu'aucune tendance d'évolution ne soit perceptible.

En moyenne mensuelle, les échauffements sont sensiblement saisonnalisés avec un creux entre mai et août lié à la concomitance de plus forts débits (fusion nivale puis glaciaire) et de puissances plus faibles.

### 2.2.2. Saint Alban

La moyenne annuelle des échauffements sur la période est de 1,03 °C, sans qu'aucune tendance d'évolution ne soit perceptible.

En moyenne mensuelle, les échauffements sont légèrement saisonnalisés avec des valeurs plus faibles :

- en été, liés à de plus faibles puissances du site,
- en hiver, liés à de plus forts débits (apports de la Saône).

### 2.2.3. Tricastin

La moyenne annuelle des échauffements sur la période est de 1,34 °C, sans qu'aucune tendance d'évolution ne soit perceptible.

En moyenne mensuelle, les échauffements sont sensiblement saisonnalisés avec des creux en mai-juin liés aux apports de fusion par l'Isère et en hiver aux plus forts débits amont.



### 3. ANALYSE GRAPHIQUE DE SITUATIONS PARTICULIERES

Cette analyse graphique a vocation à illustrer le comportement thermique du fleuve dans différentes situations particulières notamment définies par :

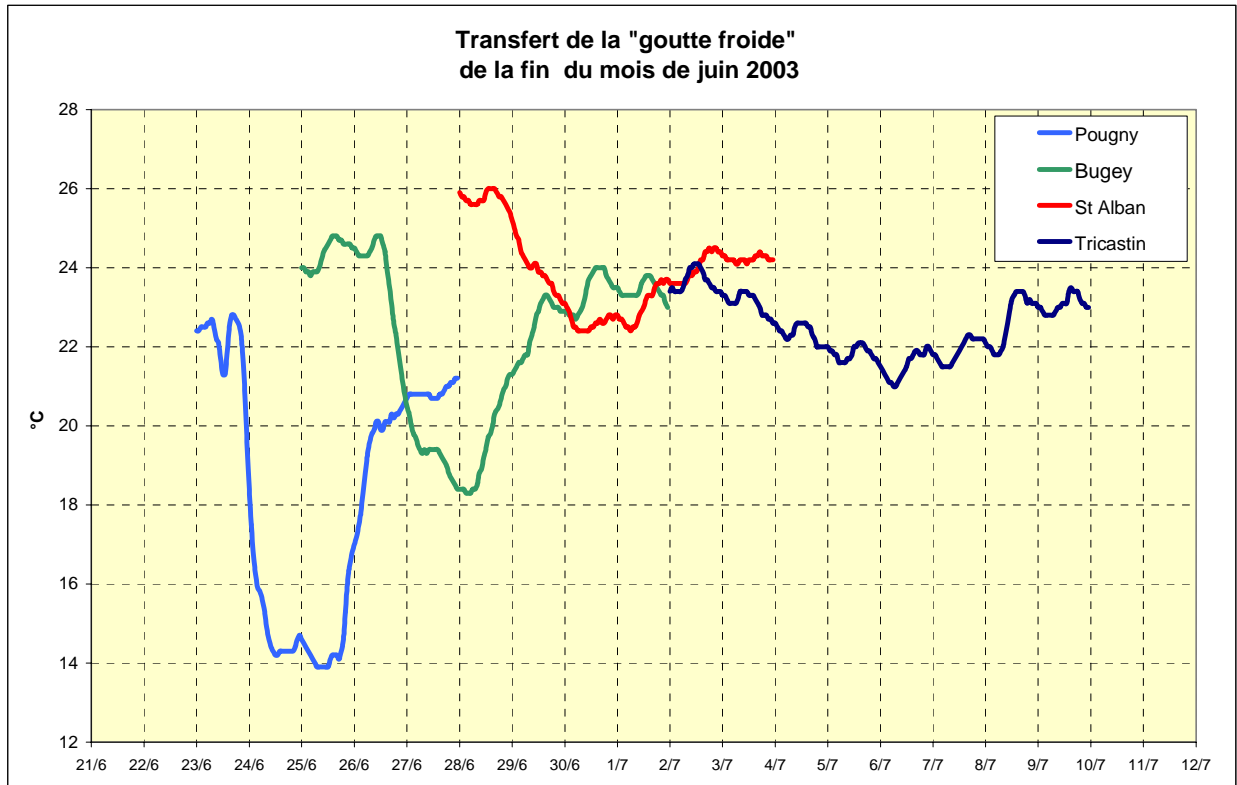
- les conditions de débit,
- les conditions météorologiques,
- pour les tronçons concernés, le fonctionnement ou non du CNPE amont.

On considère en effet a priori que ces facteurs ont une influence essentielle sur la température de l'eau en un point.

*Remarque : Les conditions météorologiques conditionnent les échanges thermiques entre l'air et l'eau ; dans l'analyse qui suit, on a retenu comme paramètre synthétique de ces conditions l'écart de température entre l'air et l'eau, même si le vent, la nébulosité, la durée du cycle jour/nuit...sont autant de facteurs influençant les échanges.*

### 3.1. OBSERVATION GRAPHIQUE DU TRANSFERT AMONT-AVAL SUR LE RHONE

De brusques baisses de température sont régulièrement observées en été à l'amont du Rhône français. Elles s'expliquent par le passage de « gouttes froides » générées par la remontée d'eau de fond du lac Léman. Ces « gouttes froides », dont le déterminisme est mal connu, sont autant de marqueurs thermiques du fleuve.



Comme le montre le graphe ci-dessus, le suivi de ces marqueurs met en évidence :

- l'importance des transferts amont-aval sur le Rhône : une modification de la température en un point du fleuve se propage à l'aval,
- la longueur des temps de transfert de la température, bien supérieure à ceux des débits (sur l'exemple : environ 10 j entre Pougny et Tricastin pour un débit du Rhône amont d'environ 400 m<sup>3</sup>/s, alors que les temps de transferts du débit ne dépasse pas 2 à 3 j),
- l'existence de chocs thermiques brutaux pouvant atteindre 10 °C en 24 h à l'amont du Rhône français.

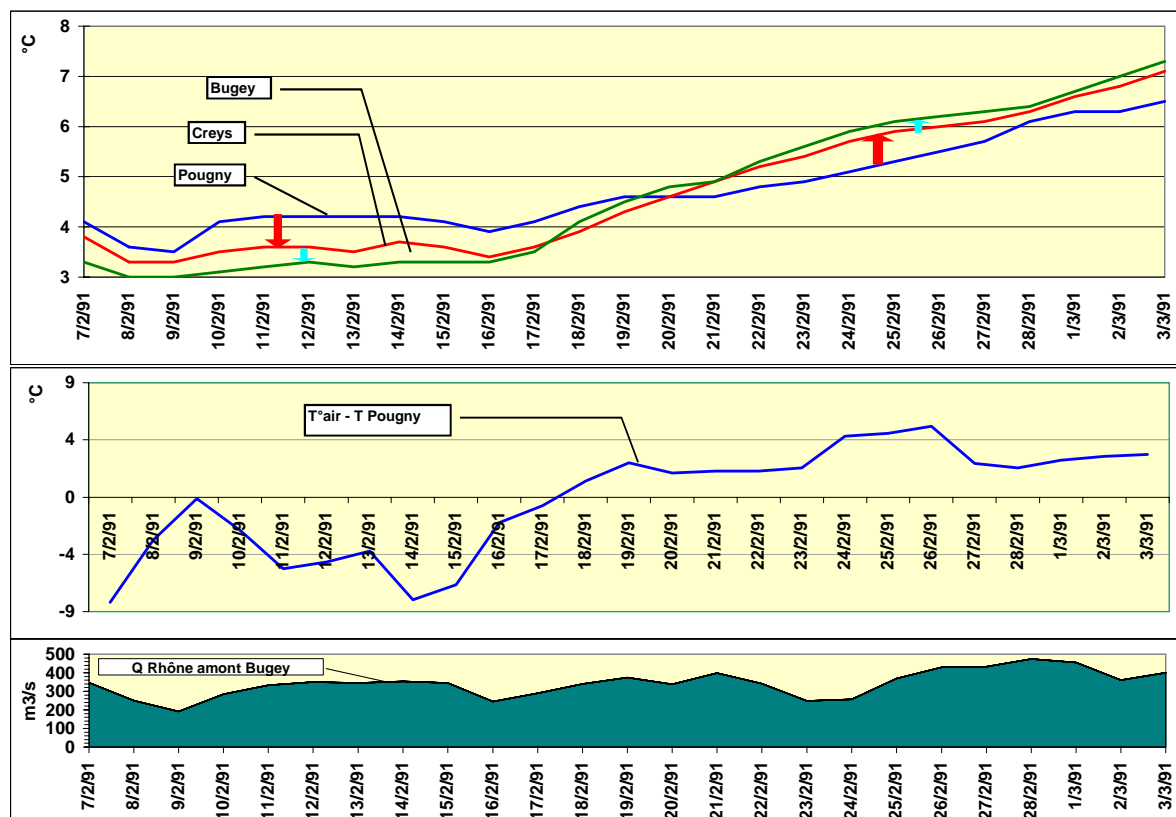
### 3.2. OBSERVATION DE SITUATIONS PARTICULIERES

#### 3.2.1. De Pougny à Bugey (141 km)

L'évolution thermique de ce tronçon est essentiellement conditionnée par :

- les conditions météorologiques,
- la gestion des débits.

On examine ici l'effet d'une inversion de l'écart air/eau représentée sur le second graphique. Le graphique du haut représente des températures d'eau à Pougny, Creys et Bugey.



Sur le graphe ci-dessus, l'eau se refroidit de Pougny à Creys puis de Creys à Bugey quand l'air est plus froid que l'eau à Pougny, puis se réchauffe dans le cas contraire.

On constate également que l'évolution est plus marquée entre Pougny et Creys qu'entre Creys et Bugey, la distance parcourue étant trois fois supérieure et l'écart entre l'air et l'eau se réduisant progressivement.

**Quand l'air est plus chaud que l'eau, il apporte des calories à l'eau et vice versa. Ces situations inverses peuvent se succéder d'un jour à l'autre.**

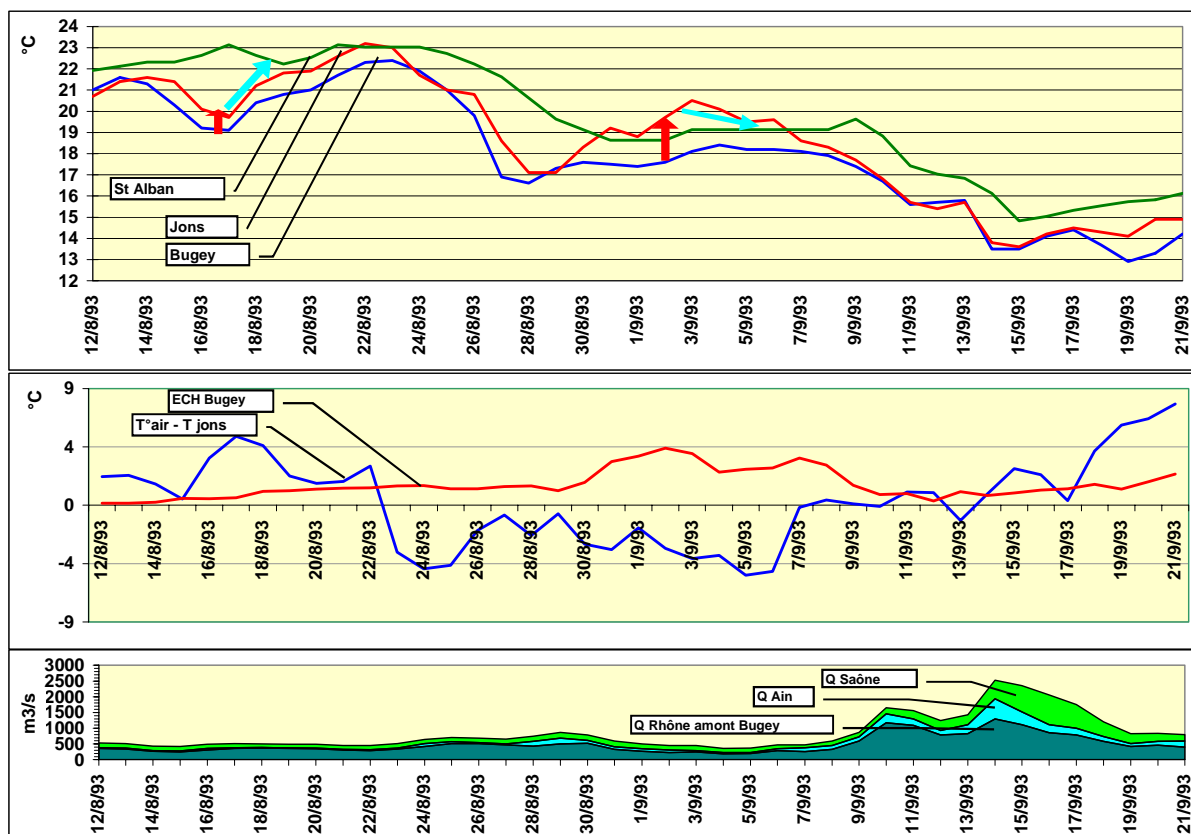
### 3.2.2. De Bugey à St Alban (89 km)

#### 3.2.2.1. Observation des variations de différents facteurs d'influence

L'évolution thermique de ce tronçon dépend :

- des conditions météorologiques,
- du débit du Rhône,
- des apports thermiques de l'Ain et de la Saône, proportionnels à leurs température et débit,
- du fonctionnement du CNPE du Bugey,
- d'autres influences (agglomération lyonnaise...).

On examine ici les effets conjugués de variations d'écart air/eau, de fonctionnement du CNPE et de débit. Sur le graphique du bas, le débit du Rhône est « décomposé » avec les débits des différents cours d'eau (qui sont donc superposés sur le graphe).



Sur le graphe ci-dessus, plusieurs effets peuvent être discernés :

- au début de la période, l'échauffement du CNPE est quasi-nul mais le fleuve se réchauffe de Bugey à Jons (17km) puis de Jons à Saint Alban (72km) car l'air est plus chaud que l'eau ; le temps de transfert de Bugey à St Alban est d'environ 3 jours,
- au milieu de la période, l'air devient plus froid que l'eau, mais le CNPE échauffe : sous cette double influence, l'eau s'échauffe de Bugey à Jons, puis se refroidit jusqu'à St Alban,

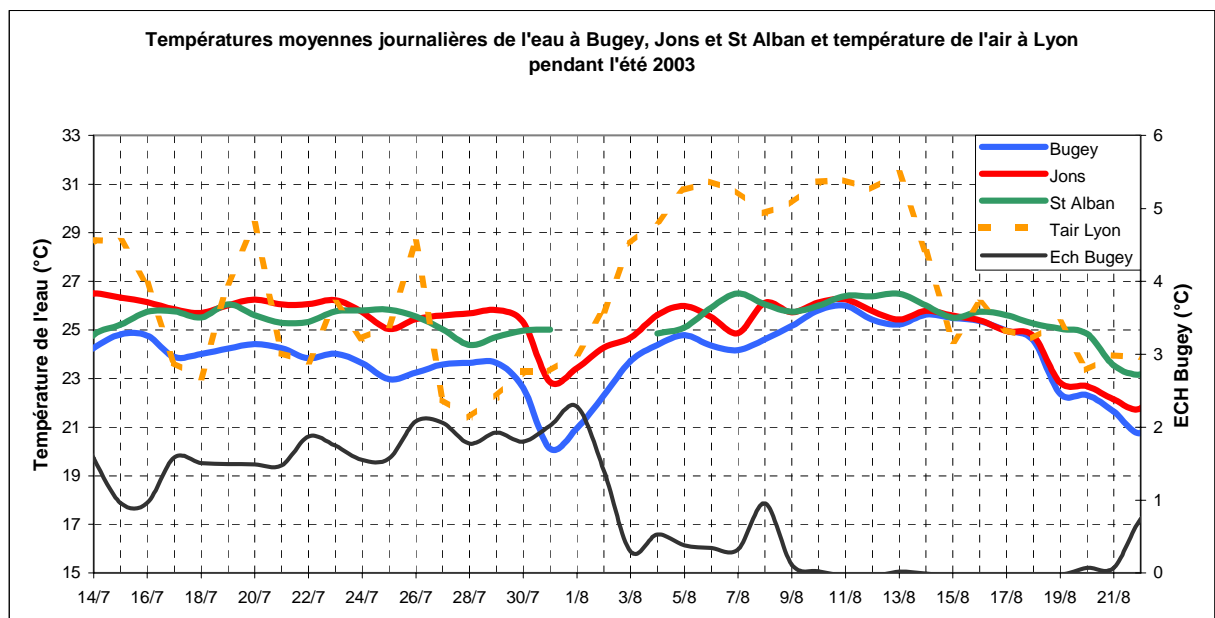
- en fin de période, le débit augmente fortement : le temps de transfert de Bugey à St Alban passe à 1 jour environ (voir baisse du 14/09 répercutée le 15/09 à St Alban) et l'échauffement du CNPE baisse fortement par dilution (température à Jons et Bugey amont confondues). La température à St Alban demeure supérieure à celle de Bugey du fait des apports chauds de la Saône.

**Sur cette période, le fonctionnement du CNPE du Bugey se fait sentir jusqu'à St Alban avec une atténuation plus ou moins forte dépendant de l'écart air/eau, des apports de la Saône et du niveau des débits.**

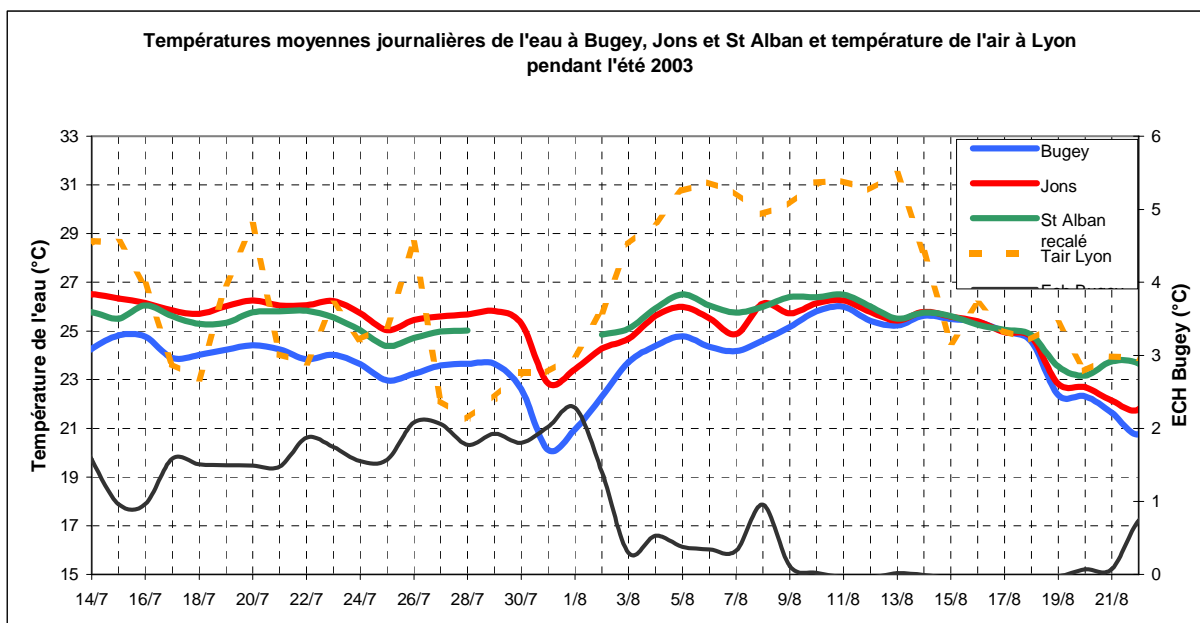
### 3.2.2.2. Observation de la période caniculaire du mois d'août 2003

Les températures d'air et d'eau rencontrées pendant l'été 2003 ont été historiques. Les débits de l'Ain et de la Saône ont par ailleurs été très faibles pendant cette période, de sorte qu'on peut considérer leur influence comme négligeable.

Les conditions météorologiques et le fonctionnement du CNPE deviennent alors les principaux facteurs d'évolution de la température. L'observation de cette période est donc intéressante pour la compréhension du fonctionnement thermique du fleuve en situation exceptionnelle.



Si l'on « recale » les courbes en tenant compte du temps de transfert (2 à 3 jours entre Bugey et St Alban), on obtient le graphe suivant :



Deux périodes sont à distinguer sur cet événement :

- Jusqu'au début du mois d'août, l'échauffement du CNPE du Bugey varie entre 1 et 2 °C environ tandis que les températures d'air et d'eau sont en moyenne assez semblables : l'eau s'échauffe entre Bugey et Jons sous l'influence du rejet puis sa température diminue légèrement de Jons à St Alban : un équilibre semble donc atteint voire légèrement dépassé à l'aval du Bugey sous l'effet du rejet et le fleuve tend à y revenir ensuite.
- A partir du début du mois d'août, les températures d'air augmentent fortement pour devenir supérieures d'environ 4 degrés à celles de l'eau tandis que l'échauffement du CNPE tend vers 0 : la température de l'eau en amont du Bugey augmente de 2 à 3 degrés, mais n'évolue quasiment plus jusqu'à Saint Alban bien que l'air demeure beaucoup plus chaud. Un équilibre longitudinal semble donc à nouveau établi, cette fois sous l'effet des processus naturels . La stabilité de la température de l'eau alors que l'air est plus chaud de plusieurs degrés est toutefois surprenante et ne peut s'expliquer que par des processus non pris en compte dans notre analyse (échanges avec la nappe, ...).

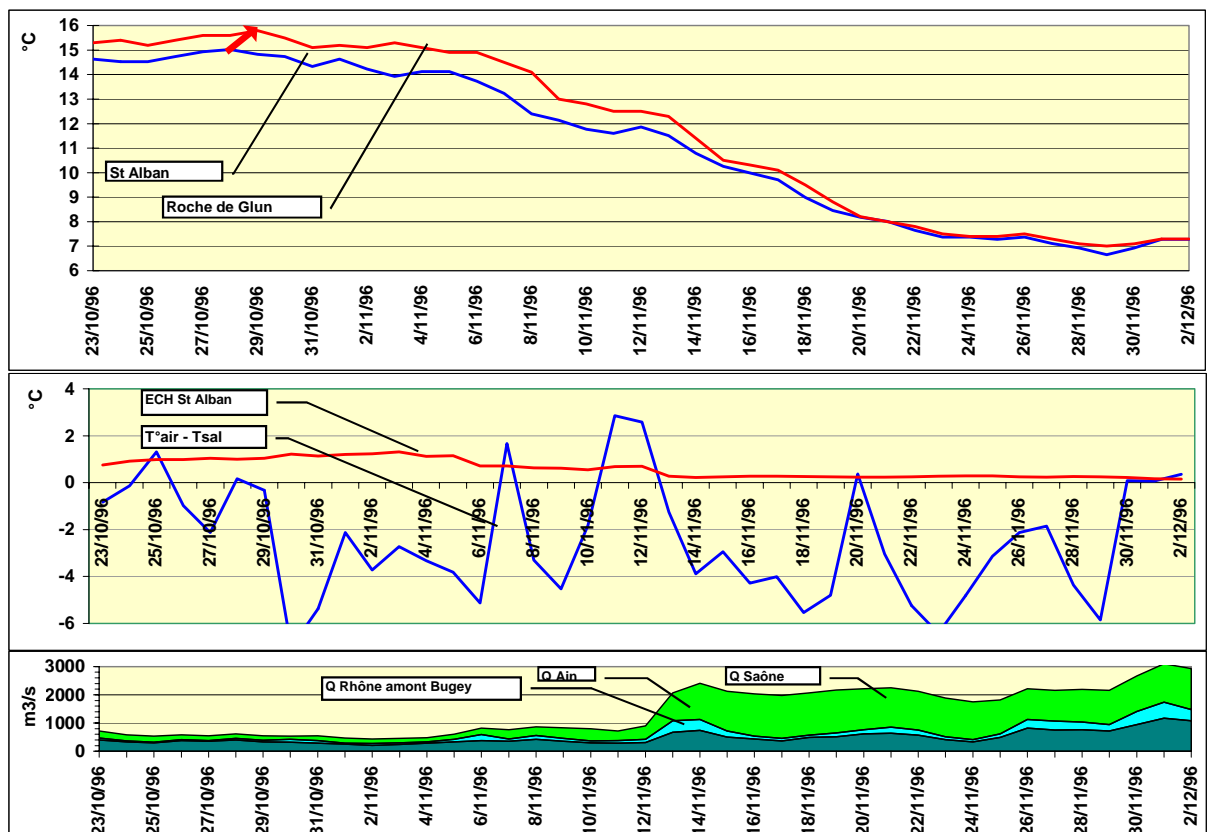
**Cette observation tendrait à montrer que, dans ces situations exceptionnelles, un équilibre thermique peut s'établir dès l'amont du Rhône français.**

### 3.2.3. De St Alban à Roche de Glun (53 km)

#### 3.2.3.1. Observation des variations de différents facteurs d'influence

Ce tronçon est essentiellement influencé par :

- les conditions météorologiques,
- la gestion des débits,
- le fonctionnement du CNPE de St Alban.



Sur le graphe ci-dessus, deux périodes se succèdent avec des conditions de débit très différentes :

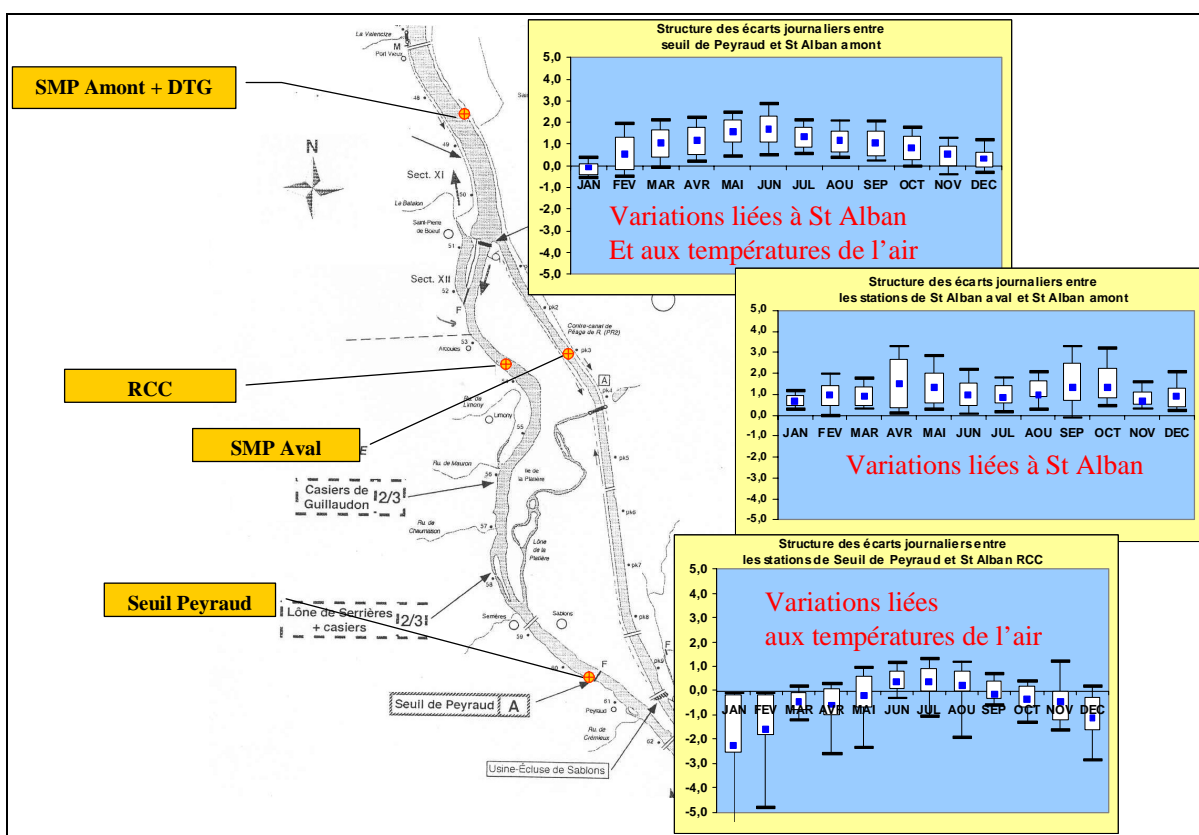
- Jusqu'au 12/11 environ, le débit varie entre 500 et 1000 m<sup>3</sup>/s : l'échauffement du CNPE de St Alban se répercute à Roche de Glun entre j+1 et j+2, atténué par un écart air/eau négatif.
- Après le 12/11, le débit est compris entre 2000 et 3000 m<sup>3</sup>/s et les deux courbes se confondent : l'échauffement du CNPE devient par dilution quasi-nul, le temps de transfert passe à quelques heures limitant fortement l'influence de la température de l'air, pourtant nettement plus basse que celle que l'eau.

**En condition de forts débits, l'influence des facteurs « externes » (conditions météorologiques, CNPE...) devient de second ordre. La température en un point est alors presque entièrement conditionnée par le transfert de la température amont.**

### 3.2.3.2. Observation des variations de température dans le Rhône court-circuité

Le tronçon court-circuité (TCC) du Rhône à l'aval de St Alban est le seul équipé de stations de température permettant de suivre son évolution. Le graphe ci-dessous représente le régime mensuel des températures :

- à l'amont de St Alban,
- à l'aval de St Alban dans le canal (SMP aval),
- à l'entrée du tronçon court-circuité (RCC),
- à la fin du tronçon court-circuité (Seuil de Peyraud).



- Entre les stations amont et aval, situées dans le canal, les écarts ont la structure des échauffements du CNPE (maximas au printemps et à l'automne),
- Entre les stations RCC et Seuil de Peyraud, situées dans le TCC et uniquement influencées par les processus naturels, les écarts ont la structure de la température de l'air (maximum en été),
- Enfin, entre la station amont et celle de Seuil de Peyraud, les deux influences se conjuguent (écart positif presque toute l'année).

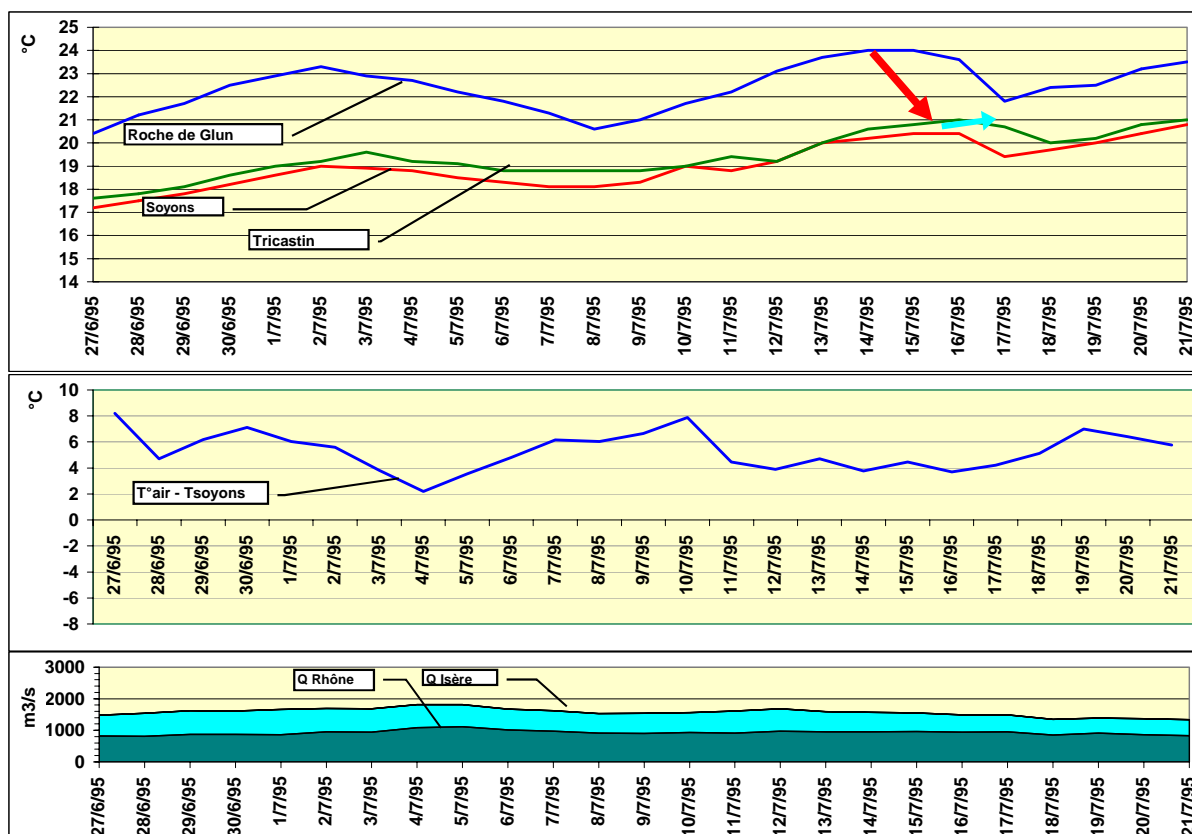
**Ce TCC, long de 11 km et d'un débit généralement de 20 m<sup>3</sup>/s (débit réservé), apparaît donc plus sensible que le canal aux conditions météorologiques .**



### 3.2.4. De Roche de Glun à Tricastin (86 km)

Ce tronçon est influencé par :

- les conditions météorologiques, assez différentes de celles rencontrées en amont (la température d'air prise en référence est alors celle de Montélimar), avec un probable effet sensible du vent,
- les conditions de débit du Rhône,
- la confluence avec l'Isère, plus froide que le Rhône.



Sur le graphe, ci-dessus, on a représenté les températures à Roche de Glun, à Soyons, immédiatement à l'aval de la confluence avec l'Isère, et à Tricastin. Pendant cette période estivale, les débits de l'Isère et du Rhône sont comparables tandis que l'air est plus chaud que l'eau.

- De Roche de Glun à Soyons, la baisse de température liée au mélange avec l'Isère est très forte.
- De Soyons à Tricastin, l'eau se réchauffe lentement sous l'effet des conditions météorologiques.

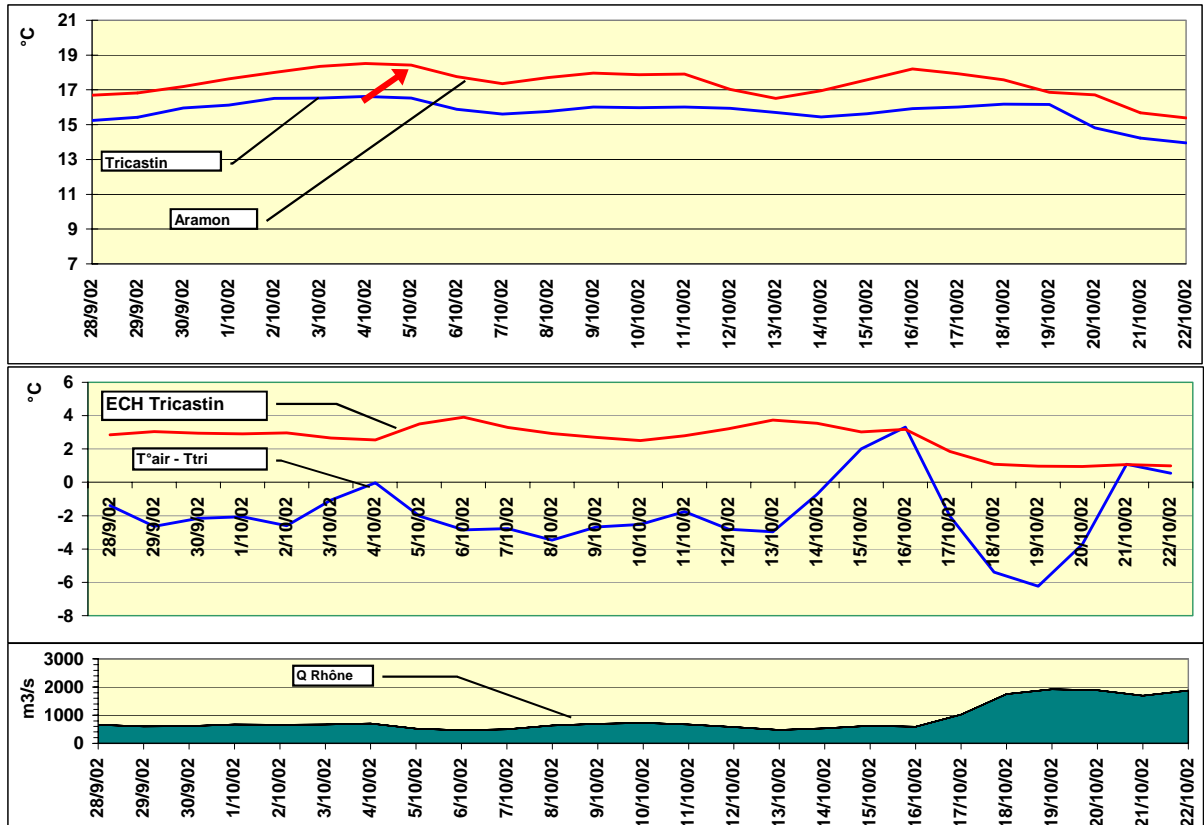
**En période estivale, quand le débit de l'Isère est comparable à celui du Rhône, son influence à la baisse sur la température de l'eau est très forte, ce qui a pour effet, en creusant l'écart avec l'air, de renforcer les échanges thermiques avec l'atmosphère à l'aval de la confluence.**

### 3.2.5. De Tricastin à Aramon (70 km)

Sur ce tronçon, les facteurs prépondérants de l'évolution de la température d'eau sont :

- les conditions météorologiques,
- l'échauffement du CNPE de Tricastin.

Les influences de l'Ardèche et de la Durance sont supposées négligeables.



Pendant cette période, l'échauffement du CNPE est compris entre 2 et 4°C tandis que l'air est plus froid que l'eau. La température à Aramon est supérieure à celle de Tricastin mais seulement de 1 à 2°C environ, l'air atténuant fortement l'échauffement lié au CNPE.

Quand le débit augmente fortement en fin de période, l'échauffement du CNPE diminue sensiblement par dilution.

**Sur cette période, l'effet du CNPE de Tricastin se fait sentir jusqu'à Aramon, atténué quand l'écart air/eau est négatif ou quand les débits sont élevés.**

### 3.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

**L'observation graphique de diverses situations particulières met en évidence :**

- **Le rôle prééminent du transfert amont-aval de la température en sortie du lac Léman, d'autant plus fort que le débit est élevé. Les temps de transfert de la température diffèrent en outre significativement de ceux du débit et varient fortement avec lui.**
- **L'influence des conditions météorologiques, en particulier quand l'écart de température entre l'air et l'eau devient significatif.**
- **Le rôle des affluents, soit du fait de la modification du régime des débits (aval confluence Saône notamment), soit du fait de la modification de la température d'eau par mélange (aval confluence Isère notamment).**
- **L'influence du fonctionnement des CNPE, au moins sur les points situés à l'aval proche d'un CNPE,**
- **La possible influence des tronçons court-circuités du Rhône, notamment en été, qui réagissent plus fortement que le canal principal aux variations des conditions météorologiques.**

**Tous ces facteurs concourent à l'atteinte d'un équilibre thermique du fleuve. Les échanges entre l'air et l'eau, en grande partie conditionnés par leur écart de température, jouent en ajustement par rapport à cet équilibre : la part du « chemin » vers l'équilibre réalisée par un des facteurs, en réduisant l'écart entre l'air et l'eau, réduira également l'influence des conditions météorologiques sur le fleuve.**

**Plus qu'ils ne se cumulent, ces différents facteurs se conjuguent donc pour former la température de l'eau en un point du Rhône.**

## 4. ETUDE DE L'INCIDENCE AVAL DE VARIATIONS AMONT

### 4.1. MÉTHODE

#### 4.1.1. Test de décision

Dans ce chapitre, on évalue la pertinence des relations statistiques entre les variations au pas de temps journalier des facteurs d'influence amont (température d'eau amont, température d'air, débit, échauffement d'un CNPE...) et les variations de température de l'eau constatées en un point à l'aval (en tenant compte du temps de transfert).

L'outil statistique proposé - les tests de décision - confronte, à un seuil de significativité donné, une hypothèse H0 et une hypothèse contraire H1.

On propose d'appliquer le test au coefficient de corrélation entre deux variations (par exemple la corrélation entre la variation du rejet d'un CNPE et la variation de température de l'eau d'un point aval). Le seuil de significativité est fixé à 95 %, ce qui signifie que l'on se donne 5 % de chances de se tromper en affirmant que le coefficient de corrélation est significatif. On utilise ici un test de Fischer.

*Remarque : On rappelle que le coefficient de corrélation ne manifeste pas une causalité mais une co-variation : deux variables peuvent co-varier sans lien de causalité.*

*Par ailleurs, les variables observées ne sont souvent pas indépendantes. Par exemple, la corrélation entre les variations de température à j à Bugey amont et Tricastin amont est bonne bien que la variation de j à Tricastin ne doive rien à celle de j à Bugey. Les deux points réagissent en fait le même jour de la même manière à des variations de température d'air statistiquement assez homogènes sur le bassin.*

#### 4.1.2. Variables prises en compte

On corrèle successivement les variations de température de l'eau en 5 points du Rhône aux variations amont de ses principaux facteurs d'influence.

Les cinq stations retenues sont : Bugey amont, Jons, St Alban amont, Tricastin amont et Aramon amont. Les variations amont sont prises en compte sur plusieurs jours précédents afin de tenir compte des temps de transfert.

**Les résultats présentés portent sur l'ensemble de l'échantillon de la période 1991-2003 ; il s'agit donc d'une analyse « moyenne ».**

*Remarque : l'intérêt de la station de Jons est d'être la seule située immédiatement (17 km) à l'aval d'un CNPE. Elle peut être considérée à ce titre comme une station de bon mélange traduisant l'impact immédiat du CNPE.*

## 4.2. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en tableau. Les variations des variables amont figurent en colonne et on remonte dans le passé (de J à J-6) quand on descend dans le tableau. A chaque nœud du tableau, on a indiqué le coefficient de corrélation entre la variation de température à J au point examiné et la variation des variables à J...J-6 . Ce coefficient de corrélation a été colorisé en fonction de sa significativité selon l'échelle suivante :

	Non significatif
	Faiblement significatif
	Moyennement significatif
	Significatif
	Très significatif

Les variables sont figurées comme suit :

- Delta T représente une variation de température de l'eau ou de l'air,
- Delta Q représente une variation de débit,
- Delta ECH représente une variation de l'échauffement d'un CNPE.

### 4.2.1. Variation de température à J au Bugey et variations amont

Delta T Bugey	Delta T Pougny	Delta T air	Delta Q Rhône
J	0.12	0.15	-0.07
J-1	0.14	0.26	-0.15
J-2	0.34	0.20	-0.10
J-3	0.49	0.14	-0.05
J-4	0.25	0.12	-0.02
J-5	-0.01	0.03	0.01
J-6	-0.10	-0.02	0.02

- Une variation de température à J à Bugey amont est fortement corrélée aux variations de j-2, j-3 à Pougny : on trouve là une traduction de la variabilité des temps de transfert de la température entre les deux points.
- L'effet des variations de température d'air est logiquement intégré sur toute la durée du transfert.
- La variation de la température d'eau est inverse de celle du débit (coefficient de corrélation négatif).

#### 4.2.2. Variation de température à J à Jons et variations amont

Delta T JONS	Delta T BUG	Delta ECH Bug	Delta Tair	Delta Qrhone	Delta Qain	Delta Tain
J	0.74	0.32	0.33	-0.27	-0.25	0.48
J-1	0.40	0.25	0.25	-0.24	-0.18	0.34
J-2	0.04	-0.03	0.07	-0.05	0.00	0.08
J-3	-0.05	-0.05	0.07	0.00	-0.01	0.05
J-4	-0.10	-0.02	0.07	0.01	0.00	0.05
J-5	-0.07	-0.05	0.02	0.04	0.03	0.01
J-6	-0.04	-0.05	-0.02	0.04	0.02	-0.04

- Compte tenu de la faible distance entre les deux stations, une variation de température à J à Jons est bien corrélée aux variations à Bugey amont de j et j-1.
- Si l'on regarde la force des coefficients, la variation de température à J à Jons est très corrélée avec la variation de température au Bugey, puis avec celle de l'air, puis avec l'échauffement du CNPE.

#### 4.2.3. Variation de température à J à St Alban et variations amont

Delta T SAL	Delta T BUG	Delta ECH Bug	Delta Tair	Delta Qrhone	Delta Qain	Delta Tain	Delta Qsaone	Delta Tsaône
J	0.35	-0.06	0.14	0.02	-0.01	0.30	-0.20	0.53
J-1	0.53	0.01	0.29	-0.15	-0.13	0.36	-0.18	0.49
J-2	0.54	0.15	0.26	-0.18	-0.13	0.35	-0.11	0.35
J-3	0.29	0.12	0.14	-0.09	-0.06	0.21	-0.07	0.20
J-4	0.07	0.03	0.09	-0.04	-0.02	0.09	-0.05	0.12
J-5	-0.03	-0.01	0.09	-0.03	-0.02	0.05	-0.03	0.05
J-6	-0.07	0.00	0.07	-0.01	-0.02	0.05	-0.01	0.01

- Par rapport à Jons, à St Alban la corrélation d'une variation à J avec les variations à Bugey amont se décale sur j-1 / j-3.
- L'effet des variations de température de l'air est toujours fort et réparti sur la durée du transfert.
- La corrélation avec la variation d'échauffement du CNPE du Bugey se décale également dans le temps (de j/j-1 à j-2/j-3) et perd en significativité.
- Les fortes corrélations entre la variation à J à St Alban et les variations de température des affluents à J sont dues à la non-indépendance des variables (co-variation avec la température d'air sur les trois cours d'eau en même temps).

#### 4.2.4. Variation de température à J à Tricastin et variations amont

Delta T TRI	Delta T	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta T	Delta	Delta	Delta
	BUG	ECH Bug	Tair	Qrhone	Qain	Tain	Qsaone	Tsaône	SAL	ECHSal	Qisere	Tisere
J	0.41	-0.03	0.26	-0.01	0.00	0.39	-0.13	0.55	0.47	0.04	0.04	0.43
J-1	0.31	0.00	0.42	-0.07	-0.06	0.40	-0.19	0.44	0.47	0.08	-0.12	0.37
J-2	0.22	-0.01	0.23	-0.07	-0.09	0.24	-0.18	0.28	0.38	0.06	-0.13	0.27
J-3	0.18	0.07	0.11	-0.12	-0.13	0.15	-0.11	0.20	0.22	0.11	-0.12	0.16
J-4	0.13	0.08	0.09	-0.08	-0.06	0.12	-0.04	0.13	0.12	0.11	-0.04	0.07
J-5	0.07	0.04	0.07	-0.04	-0.01	0.07	-0.03	0.06	0.05	0.05	-0.02	0.02
J-6	0.04	0.02	0.04	-0.02	-0.01	0.03	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.00

- L'effet de la variation de température au Bugey se décale dans le temps entre j-2/j-4.
- L'effet des variations de l'air est toujours fort et réparti sur la durée du transfert.
- L'effet des variations d'échauffement du CNPE du Bugey se décale encore dans le temps (j-3/j-5) et perd de nouveau en significativité.
- La corrélation avec l'échauffement du CNPE de St Alban est moyennement significative. A j-3 et j-4, elle est artificiellement élevée car elle se confond avec celui du CNPE du Bugey. Les échauffements des CNPE sont en effet bien corrélés (les CNPE fonctionnent statistiquement souvent en même temps).
- L'effet de l'Isère à la baisse sur la température de l'eau apparaît assez nettement, ce que traduit la corrélation négative assez forte avec ses variations de débit.

#### 4.2.5. Variation de température à J à Aramon et variations amont

Delta T ARA	Delta T	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta	Delta T	Delta	Delta	Delta	Delta
	BUG	ECH Bug	Tair	Qrhone	Qain	Tain	Qsaone	Tsaône	SAL	ECHSal	Qisere	Tisere	Tri
J	0.43	-0.07	0.16	0.04	0.05	0.30	-0.16	0.53	0.54	0.01	0.07	0.45	-0.02
J-1	0.39	0.02	0.38	-0.13	-0.11	0.42	-0.21	0.48	0.43	0.13	-0.12	0.36	0.13
J-2	0.25	0.07	0.30	-0.16	-0.14	0.33	-0.20	0.32	0.32	0.17	-0.17	0.26	0.21
J-3	0.16	0.08	0.16	-0.13	-0.10	0.19	-0.14	0.20	0.22	0.09	-0.11	0.17	0.13
J-4	0.11	0.05	0.09	-0.08	-0.07	0.11	-0.07	0.13	0.13	0.07	-0.05	0.09	0.07
J-5	0.06	0.02	0.05	-0.04	-0.04	0.06	-0.03	0.07	0.05	0.04	-0.02	0.05	0.03
J-6	0.01	0.01	0.04	-0.01	-0.01	0.03	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01
J-7	0.01	0.00	0.04	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.02	0.01

- L'effet des variations de température de l'air est toujours fort et réparti sur la durée du transfert, maintenant de l'ordre de la semaine.
- La corrélation avec les variations d'échauffements des CNPE amont est difficile à discerner du fait de leur inter-dépendance. Elle s'étale de j-1 à j-5 pour les trois échauffements confondus, celui du Bugey apparaissant maintenant peu significatif.

### **4.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 4**

**L'analyse de ces corrélogrammes fait apparaître :**

- **Le décalage et l'étalement dans le temps des « impulsions » amont quand on progresse vers l'aval, ce qui traduit à la fois la durée et la variabilité des temps de transfert de la température sur le fleuve.**
- **La diminution progressive de la significativité des coefficients de corrélation, visible par exemple sur l'échauffement du CNPE du Bugey, qui traduit la décroissance de l'impact des variations amont vers l'aval.**



## 5. MODÈLES EXPLICATIFS DES TEMPÉRATURES AVAL

Deux types de modélisation ont été mis en œuvre :

- la régression linéaire multiple, fondée sur les liens statistiques entre variables,
- les réseaux de neurones, de type « boîte noire ».

Les modèles présentés ici sont dans un premier temps construits sur l'ensemble de l'échantillon 1991-2003, c'est-à-dire toutes conditions de débit, température d'air, fonctionnement des CNPE confondues. Il s'agit donc d'une analyse « en moyenne » qui fait ensuite l'objet d'une déclinaison pour certaines situations particulières.

### 5.1. MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE

#### 5.1.1. Méthode

Les modèles envisagés sont basés sur la régression linéaire, c'est à dire que la variable à expliquer (ici la température de l'eau) s'écrit comme une combinaison linéaire de variables explicatives (ici les variations amont). Les coefficients de cette relation sont déterminés statistiquement. Dans le cadre de notre étude, on cherche à établir les relations statistiques qui permettent d'expliquer une valeur donnée en un point choisi du fleuve, en fonction des conditions amont en température de l'eau, en température de l'air sur le parcours de l'eau, et des conditions de fonctionnement des CNPE amont.

Cette méthode statistique a l'avantage de prendre en compte de manière globale des processus qui ne seraient pas modélisés par une méthode déterministe : par exemple le poids de la température de l'air dans la relation peut facilement intégrer d'autres variables météorologiques (vent, nébulosité...) ou l'effet des tronçons court-circuités dont la température de l'eau varie étroitement avec celle de l'air alors que ces variables ne sont pas intégrées explicitement dans la relation.

Les modèles présentés ici sont construits « en variation », c'est-à-dire qu'on cherche à expliquer la variation de température d'eau à J ( $T_j - T_{j-1}$ ) en un point par les variations amont de différentes variables. On procède par étape en priorisant les variables : on prend d'abord en compte les variations de température amont, puis les variations de température d'air et en dernier lieu les variations d'échauffement des CNPE.

La variation de température d'eau à J au point considéré s'écrit finalement sous la forme :

$$DT_j = a.DT\_eau \text{ amont} + b.D\_Tair + c.Dech\_CNPEamont$$

Le coefficient de corrélation de la régression linéaire permet de mesurer :

- l'intérêt de l'ajout d'une variable à chaque étape, par le gain d'explication de la variance (information totale disponible) qu'elle apporte (gain de R<sup>2</sup>),
- la qualité de la relation établie in fine, par la valeur du R<sup>2</sup>.

### 5.1.2. Stations prises en compte

Un découpage cohérent du Rhône a été recherché pour tenir compte à la fois de ses caractéristiques naturelles et de l'objectif d'évaluer le résiduel d'échauffement d'un CNPE amont au CNPE aval.

Les relations statistiques sont établies pour les six tronçons suivants : Pougny – Bugey, Bugey – Jons, Jons – St Alban, St Alban – Roche de Glun, Roche de Glun – Tricastin et Tricastin – Aramon.

Chaque tronçon est isolé et fait l'objet d'un modèle spécifique qui explique la variation de température à J au point aval (DT<sub>j</sub> à Bugey par exemple) par les variations amont sur ce tronçon (DT\_Pougny et DT<sub>air</sub> par exemple).

### 5.1.3. Résultats

#### 5.1.3.1. De Pougny à Bugey (141 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à Bugey par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (Pougny),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Lyon)

DT BUGEY à J	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Air	DT_Air	DT_Air	DT_Air	R2
Fonction de :	J	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J	J-1	J-2	J-3	
DT_Rh amont	0.156	0.080	0.179	0.300	0.132	0.050					<b>0.389</b>
Ajout DT_Air	0.074	0.031	0.153	0.297	0.133	0.051	0.054	0.069	0.049	<b>0.015</b>	<b>0.495</b>

#### Lecture du tableau

Sur la première ligne on a figuré toutes les variables prises en compte pour expliquer la variation de température à J à Bugey amont (DT Bugey à J),

Comme on procède par étape, on fait d'abord la régression entre DT Bugey à J et les variations de température d'eau amont, ici celles observées à Pougny de J-5 à J : les résultats de cette première régression figurent sur la deuxième ligne. La relation s'écrit alors :

$$DT_{Bugj} = 0.156 DT_{Rhj} + 0.080 DT_{Rhj-1} + 0.179 DT_{Rhj-2} + 0.300 DT_{Rhj-3} + 0.132 DT_{Rhj-4} + 0.050 DT_{Rhj-5}$$

Le coefficient de corrélation (R<sup>2</sup>) de cette relation est de 0.39 ce qui signifie que 39 % seulement de l'information observée (données de 1991 à 2003) est expliquée.

On refait alors la régression en ajoutant comme variables explicatives les variations de la température de l'air de J-3 à J. Le gain de R2 (0.39->0.495) est très significatif, ce qui permet de dire que ces nouvelles variables sont pertinentes pour expliquer le DT Bugey à J. Mais en valeur absolue le R2 demeure assez faible, ce qui fait dire que la relation obtenue est limitée pour expliquer le DT Bugey à J : environ 50 % de l'information disponible n'est pas bien rendue par le modèle.

### 5.1.3.2. De Bugey à Jons (17 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à Jons par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (Bugey amont),
- DT\_Ain : variation de la température d'eau de l'Ain (Chazey),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Lyon)
- Dech\_bug : variation de l'échauffement du CNPE du Bugey

DT JONS à J	DT_Rh J	DT_Rh J-1	DT_Ain J	DT_Ain J-1	DT_Air J	Dech J	Dech J-1	R2
Fonction de :								
DT_eau am	0.630	0.105	0.376	0.054				<b>0.629</b>
Ajout DT_Air	0.617	0.122	0.284	0.076	0.040			<b>0.644</b>
Ajout de Dech	0.612	0.148	0.280	0.066	0.028	0.420	0.255	<b>0.782</b>

L'influence des variations amont est limitée à j/j-1 (comme déjà constaté dans le chapitre précédent).

Le gain d'explication est sensible à chaque ajout de variable : il est particulièrement fort quand l'échauffement du Bugey entre en jeu ; il est plus limité pour la température de l'air compte-tenu de la faible distance séparant Bugey de Jons. La significativité de la relation obtenue in fine est très satisfaisante (R2 = 0.78).

### 5.1.3.3. De Jons à St Alban (72 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à St Alban par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (Jons),
- DT\_Saô : variation de la température d'eau de la Saône (Couzon),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Lyon).

DT ST ALBAN à J	DT_Rh J	DT_Rh J-1	DT_Rh J-2	DT_Rh J-3	DT_Saô J	DT_Saô J-1	DT_Air J	DT_Air J-1	R2
Fonction de :									
DT_eau am	0.077	0.189	0.241	0.063	0.255	0.070			<b>0.588</b>
Ajout DT_Air	0.032	0.172	0.260	0.089	0.158	0.115	0.032	0.029	<b>0.617</b>

Le gain d'explication apporté par la température de l'air est plus faible qu'attendu : l'essentiel de la variation de température à J en amont de St Alban est expliquée par la température d'eau amont. La significativité de la relation obtenue in fine est satisfaisante.

### 5.1.3.4. De St Alban à Roche de Glun (53 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à St Roche de Glun par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (St Alban),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Lyon),
- Dech\_sal : variation de l'échauffement du CNPE de St Alban.

DT R de Glun à J	DT_Rh J	DT_Rh J-1	DT_Rh J-2	DT_Air J	DT_Air J-1	Dech J	Dech J-1	Dech J-2	R2
Fonction de :									
DT_eau am	0.325	0.468	0.139						<b>0.608</b>
Ajout DT_Air	0.235	0.494	0.184	0.033	0.031				<b>0.662</b>
Ajout de Dech	0.178	0.489	0.205	0.033	0.029	0.014	0.295	0.318	<b>0.717</b>

Le gain d'explication apporté par chaque variable est très sensible. L'influence des variations observées à St Alban se fait sentir de J à J+2 à Roche de Glun, le temps de transfert étant centré sur 1 jour (coefficient plus fort de la variation de température amont et de la variation d'échauffement à j-1). La significativité de la relation obtenue est satisfaisante (R2 = 0.717).

### 5.1.3.5. De Roche de Glun à Tricastin (86 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à Tricastin par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (Roche de Glun),
- DT\_Isè : variation de la température d'eau de l'Isère (Beaumont-Monteux),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Montélimar)

DT TRICASTIN à J	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Isèr	DT_Isèr	DT_Isèr	DT_Air	DT_Air	R2
Fonction de :	J	J-1	J-2	J	J-1	J-2	J	J-1	
DT_eau am	0.289	0.233	0.104	0.207	0.010	0.054			<b>0.495</b>
Ajout DT_Air	0.154	0.255	0.164	0.118	0.059	0.087	0.064	0.054	<b>0.633</b>

Le gain d'explication apporté par la température de l'air (près de 15 % de la variance) s'explique par la situation de fort écart de température entre l'air et l'eau observée après la confluence avec l'Isère une partie de l'année. La significativité de la relation obtenue in fine est satisfaisante.

### 5.1.3.6. De Tricastin à Aramon (70 km)

On cherche à expliquer la variation de température à J à Aramon par les variables suivantes :

- DT\_Rh : variation de la température d'eau amont du Rhône (Tricastin),
- DT\_Air : variation de la température de l'air (Montélimar),
- Dech\_tri : variation de l'échauffement du CNPE de Tricastin.

DT ARAMON à J	DT_Rh	DT_Rh	DT_Rh	DT_Air	DT_Air	Dech	Dech	Dech	R2
Fonction de :	J	J-1	J-2	J	J-1	J	J-1	J-2	
DT_eau am	0.525	0.350	0.151						<b>0.603</b>
Ajout DT_Air	0.424	0.342	0.212	0.026	0.030				<b>0.626</b>
Ajout de Dech	0.395	0.333	0.221	0.026	0.030	0.186	0.267	0.116	<b>0.668</b>

Le gain d'explication est sensible à l'ajout de chaque nouvelle variable. Une variation de température à Aramon s'explique toutefois essentiellement par la variation de température amont. La significativité de la relation obtenue est satisfaisante.

## 5.2. MODELE RESEAU DE NEURONES

### 5.2.1. Méthode

Cette modélisation de type « boîte noire », totalement indépendante de la précédente, a pour avantage de ne rien préjuger de la forme des relations qui lient les variables entre elles. Par contre, elle doit être validée sur un échantillon de test conséquent, différent de l'échantillon de calage, et sur lequel on juge des performances du Réseau de Neurones (RN).

On trouvera en annexe 3, des éléments méthodologiques permettant de mieux comprendre la méthode utilisée et les résultats produits.

### 5.2.2. Résultats

#### 5.2.2.1. De Bugey à Jons

Le tableau ci-après directement, issu de l'outil de calage des réseaux de neurones, donne les principales informations obtenues sur les échantillons de calage et de test.

```

BUG -> JONS : Calage 1991-1995 / test 1996 - 2003
=====
Nombre de neurones de la couche cachée : 4

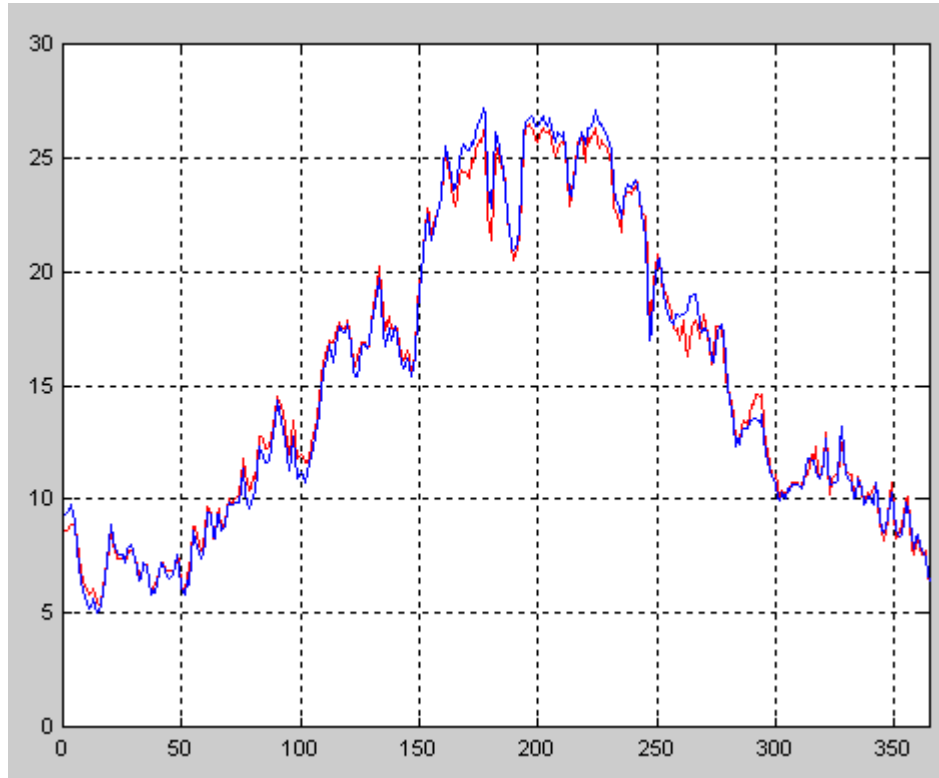
----- Analyse des autocorrélations -----
-----
Autocorrélation
calage : autocor. obs = 0.9929      autocorr. sur dObs = 0.3456
test   : autocor. obs = 0.9935      autocorr. sur dObs = 0.3662

----- Analyse des modèles RN -----
-----
Modèle RN complet
calage : cor. mod/obs = 0.9973      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.8834
test   : cor. mod/obs = 0.9969      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.8836
Modele RN avec ech BUG mis à 0
calage : cor. mod/obs = 0.9899      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.8200
test   : cor. mod/obs = 0.9884      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.7934

----- Analyse des résidus -----
-----
Modèle RN complet
Moyenne résidu calage = 8.8e-6      Résidu maximal     = 3.671
Moyenne résidu test   = -0.0375     Résidu maximal     = 3.481
Modele RN avec ech BUG mis à 0
Moyenne résidu calage = 1.026      Résidu maximal     = 4.978
Moyenne résidu test   = 1.135      Résidu maximal     = 6.411

```

Exemple de l'année 2003 (échantillon de test)  
[Modèle en bleu ; Mesure en Rouge]



### 5.2.2.2. De Bugey à St Alban

Contrairement aux méthodes de régression multiple où les variations Jons -> St Alban ont été étudiées, nous avons fait le choix de partir de l'amont de Bugey pour étudier le résiduel à St Alban. Cela implique un nombre de variables plus grand, ce qui n'est pas un problème majeur pour les réseaux de neurones.

```

BUG -> SAL : Calage 1991-1995 / test 1996 - 2003
Nombre de neurones de la couche cachée : 5

----- Analyse des autocorrélations -----
-----
Autocorrélation
calage : autocor. obs = 0.9974      autocorr. sur dObs = 0.5360
test   : autocor. obs = 0.9975      autocorr. sur dObs = 0.5311

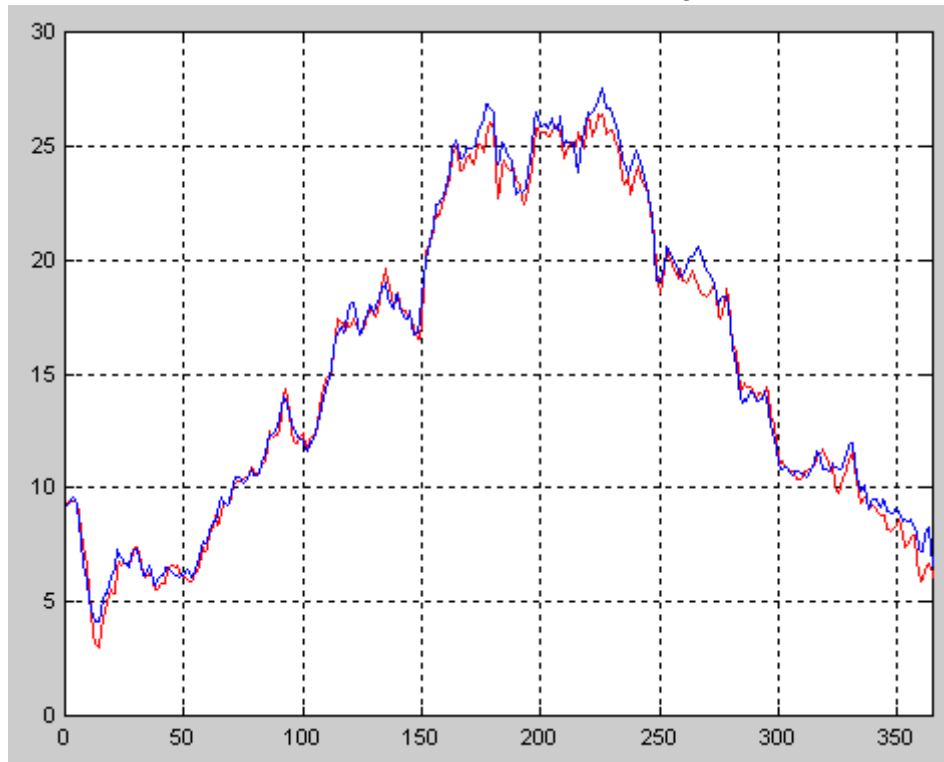
----- Analyse des modèles RN -----
-----
Modèle RN complet
calage : cor. mod/obs = 0.9980      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.8307
test   : cor. mod/obs = 0.9973      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.8012
Modele RN avec ech BUG mis à 0
calage : cor. mod/obs = 0.9955      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.7582
test   : cor. mod/obs = 0.9944      cor. d.Mod/d.Obs   = 0.7238

----- Analyse des résidus -----
-----
Modèle RN complet
Moyenne résidu calage = -4.5e-8      Résidu maximal     = 1.074
Moyenne résidu test   = -0.2933      Résidu maximal     = 1.76
Modele RN avec ech BUG mis à 0
Moyenne résidu calage = 0.4760      Résidu maximal     = 2.519
Moyenne résidu test   = 0.2829      Résidu maximal     = 2.745

```



Exemple de l'année 2003 (échantillon de test)  
[Modèle en bleu ; Mesure en Rouge]



### 5.2.2.3. De St Alban à Roche de Glun

A partir de ce tronçon, la problématique se complique avec mises à zéro virtuelles et successives des échauffements de Bugey (BUG), puis de St Alban (SAL), puis des deux :

SAL -> RGL: Calage 10/1994-12/1999 / test 2000 - 2003

=====

Etapes

- 1 Mise à zéros des échauffements SAL
- 2 Sal amont = SAL sans ech BUG
- 3 Sal amont = SAL sans ech BUG ; Ech SAL mis à 0

Nombre de neurones de la couche cachée : 4

----- Analyse des autocorrélations -----

```
-----
- calage : autocor. obs = 0.9976      autocorr. sur dObs = 0.5717
- test   : autocor. obs = 0.9975      autocorr. sur dObs = 0.5025
```

----- Analyse des modèles RN -----

Modèle RN complet

```
- calage : cor. mod/obs = 0.9974      cor. d.Mod/d.Obs = 0.863
- test   : cor. mod/obs = 0.9982      cor. d.Mod/d.Obs = 0.846
```

Modèle RN avec Ech SAL mis à 0

```
- calage1: cor. mod/obs = 0.9946      cor. d.Mod/d.Obs = 0.8028
- test1  : cor. mod/obs = 0.9959      cor. d.Mod/d.Obs = 0.7799
```

Modele RN avec ech BUG mis à 0

```
- calage2: cor. mod/obs = 0.9955      cor. d.Mod/d.Obs = 0.8181
- test2  : cor. mod/obs = 0.9969      cor. d.Mod/d.Obs = 0.8094
```

Modele RN avec ech SAL et BUG mis à 0

```
- calage3: cor. mod/obs = 0.9910      cor. d.Mod/d.Obs = 0.7510
- test3  : cor. mod/obs = 0.9925      cor. d.Mod/d.Obs = 0.7341
```

----- Analyse des résidus -----

Modèle RN complet

```
- Moyenne résidu calage0 = 0.0001      Résidu maximal = 1.424
- Moyenne résidu test0   = 0.1622      Résidu maximal = 1.503
```

Modèle RN avec Ech SAL mis à 0

```
- Moyenne résidu calage1 = 0.7532      Résidu maximal = 2.667
- Moyenne résidu test1   = 0.9644      Résidu maximal = 3.337
```

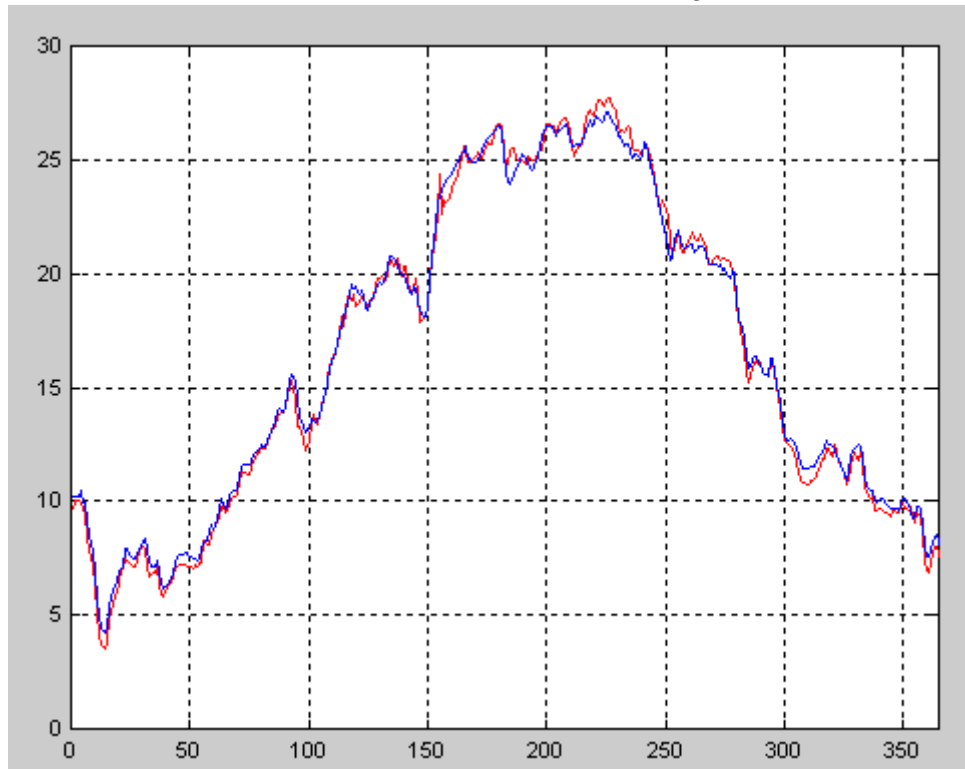
Modele RN avec ech BUG mis à 0

```
- Moyenne résidu calage2 = 0.4579      Résidu maximal = 2.713
- Moyenne résidu test2   = 0.6504      Résidu maximal = 2.301
```

Modele RN avec ech SAL et BUG mis à 0

```
- Moyenne résidu calage3 = 1.236      Résidu maximal = 4.299
- Moyenne résidu test3   = 1.483      Résidu maximal = 4.247
```

Exemple de l'année 2003 (échantillon de test)  
[Modèle en bleu ; Mesure en Rouge]



**5.2.2.4. De St Alban à Tricastin**

SAL -> TRI: Calage 1991-1997 / test 1998 - 2003

=====

Etapes

- 1 Mise à zeros des échauffements SAL = Var 19 à 22
- 2 Sal amont = SAL sans ech BUG
- 3 Sal amont = SAL sans ech BUG ; Ech SAL mis à 0

Nombre de neurones de la couche cachée : 5

----- Analyse des autocorrélations -----

-----

- calage : autocor. obs = 0.9976      autocorr. sur dObs = 0.5047
- test    : autocor. obs = 0.9977      autocorr. sur dObs = **0.5062**

----- Analyse des modèles RN -----

-----

Modèle RN complet

- calage : cor. mod/obs = 0.9978      cor. d.Mod/d.Obs      = 0.7754
- test    : cor. mod/obs = 0.9973      cor. d.Mod/d.Obs      = **0.7371**

Modèle RN avec Ech SAL mis à 0

- calage1: cor. mod/obs = 0.9973      cor. d.Mod/d.Obs      = 0.7714
- test1   : cor. mod/obs = 0.997        cor. d.Mod/d.Obs      = **0.7563**

Modele RN avec ech BUG mis à 0

- calage2: cor. mod/obs = 0.9973      cor. d.Mod/d.Obs      = 0.7541
- test2   : cor. mod/obs = 0.9966      cor. d.Mod/d.Obs      = **0.7231**

Modele RN avec ech SAL et BUG mis à 0

- calage3: cor. mod/obs = 0.9963      cor. d.Mod/d.Obs      = 0.7487
- test3   : cor. mod/obs = 0.9959      cor. d.Mod/d.Obs      = **0.7372**

----- Analyse des résidus -----

-----

Modèle RN complet

- Moyenne résidu calage0 = -0.000004      Résidu maximal      = 1.205
- Moyenne résidu test0    = -0.041              Résidu maximal      = 2.086

Modèle RN avec Ech SAL mis à 0

- Moyenne résidu calage1 = **0.2158**              Résidu maximal      = 1.653
- Moyenne résidu test1    = **0.1981**              Résidu maximal      = 2.085

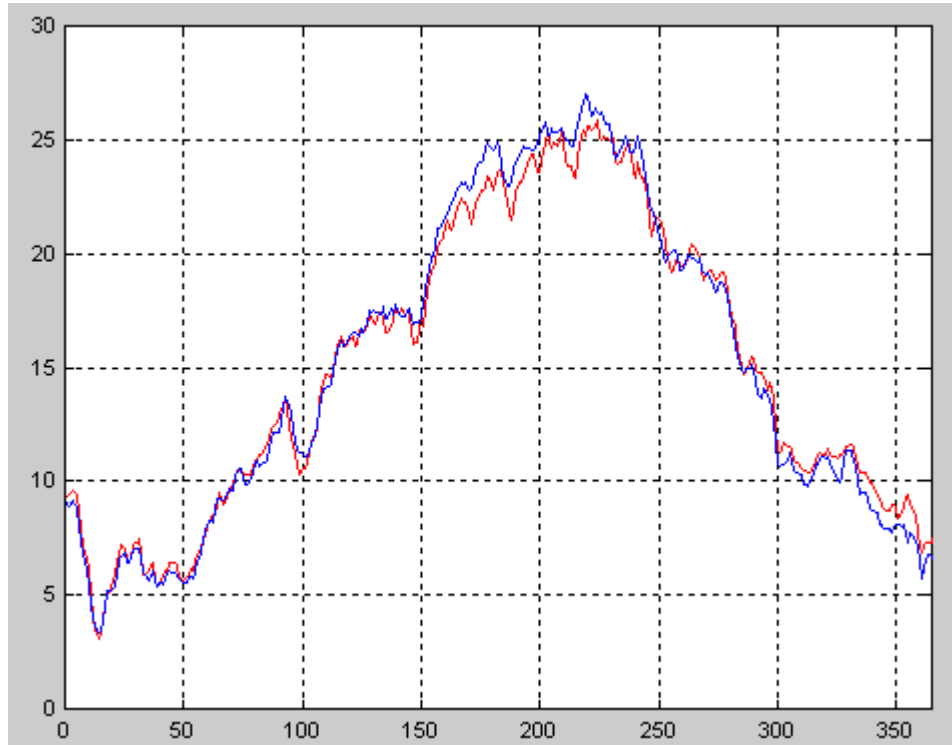
Modele RN avec ech BUG mis à 0

- Moyenne résidu calage2 = **0.2653**              Résidu maximal      = 1.71
- Moyenne résidu test2    = **0.2601**              Résidu maximal      = 2.453

Modele RN avec ech SAL et BUG mis à 0

- Moyenne résidu calage3 = **0.4893**              Résidu maximal      = 2.438
- Moyenne résidu test3    = **0.509**                Résidu maximal      = 2.445

Exemple de l'année 2003 (échantillon de test)  
[Modèle en bleu ; Mesure en Rouge]



### 5.2.2.5. De Tricastin à Aramon

TRI -> ARA : Calage 1991-1995 / test 1996 - 2003

=====

Etapes

- 1 Mise à zeros des échauffements TRI
- 2 TRI amont = TRI sans ech BUG
- 3 TRI amont = TRI sans ech SAL
- 4 TRI amont = TRI sans ech SAL+BUG+TRI

----- Analyse des autocorrélations -----

-----

- calage : autocor. obs = 0.9975	autocorr. sur dObs = <b>0.5482</b>
- test : autocor. obs = 0.9976	autocorr. sur dObs = <b>0.5305</b>

----- Analyse des modèles RN -----

-----

Modèle RN complet

- calage : cor. mod/obs = 0.9986	cor. d.Mod/d.Obs = 0.8349
- test : cor. mod/obs = 0.9982	cor. d.Mod/d.Obs = <b>0.8108</b>

Modèle RN avec Ech TRI mis à 0

- calage1: cor. mod/obs = 0.9979	cor. d.Mod/d.Obs = 0.8213
- test1 : cor. mod/obs = 0.9977	cor. d.Mod/d.Obs = <b>0.7962</b>

Modele RN avec ech BUG mis à 0

- calage2: cor. mod/obs = 0.9982	cor. d.Mod/d.Obs = 0.8308
- test2 : cor. mod/obs = 0.9978	cor. d.Mod/d.Obs = <b>0.8039</b>

Modele RN avec ech SAL mis à 0

- calage3: cor. mod/obs = 0.9985	cor. d.Mod/d.Obs = 0.8282
- test3 : cor. mod/obs = 0.9980	cor. d.Mod/d.Obs = <b>0.7980</b>

Modele RN avec ech TRI+SAL+BUG mis à 0

- calage4: cor. mod/obs = 0.996	cor. d.Mod/d.Obs = 0.8097
- test4 : cor. mod/obs = 0.9958	cor. d.Mod/d.Obs = <b>0.7747</b>

----- Analyse des résidus -----

-----

Modèle RN complet

- Moyenne résidu calage0 = -1.7e-5	Résidu maximal = 1.352
- Moyenne résidu test0 = 0.103	Résidu maximal = 1.414

Modèle RN avec Ech TRI mis à 0

- Moyenne résidu calage1 = <b>0.4524</b>	Résidu maximal = 2.261
- Moyenne résidu test1 = <b>0.5788</b>	Résidu maximal = 2.284

Modele RN avec ech BUG mis à 0

- Moyenne résidu calage2 = <b>0.2292</b>	Résidu maximal = 1.683
- Moyenne résidu test2 = <b>0.379</b>	Résidu maximal = 1.796

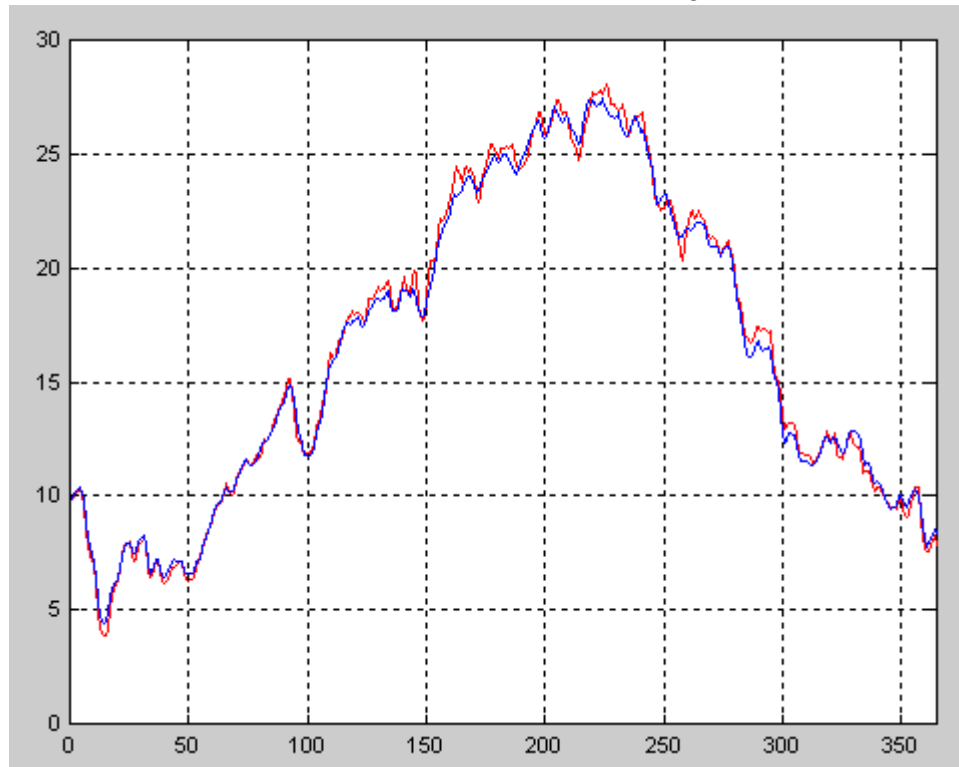
Modele RN avec ech SAL mis à 0

- Moyenne résidu calage3 = <b>0.1929</b>	Résidu maximal = 1.505
- Moyenne résidu test3 = <b>0.3221</b>	Résidu maximal = 1.852

Modele RN avec ech TRI+SAL+BUG mis à 0

- Moyenne résidu calage4 = <b>0.8699</b>	Résidu maximal = 2.857
- Moyenne résidu test4 = <b>1.070</b>	Résidu maximal = 3.362

Exemple de l'année 2003 (échantillon de test)  
[Modèle en bleu ; Mesure en Rouge]



### 5.3. EVALUATION DU RESIDUEL DES ÉCHAUFFEMENTS DES CNPE

On a ainsi construit selon deux méthodes très différentes des modèles de température du Rhône. On est alors en mesure d'évaluer la part résiduelle des échauffements des CNPE en différents points du Rhône et de comparer les résultats obtenus par chacune des deux méthodes (régression linéaire et réseau de neurones).

#### 5.3.1. Propagation d'une variation d'échauffement (par le modèle linéaire)

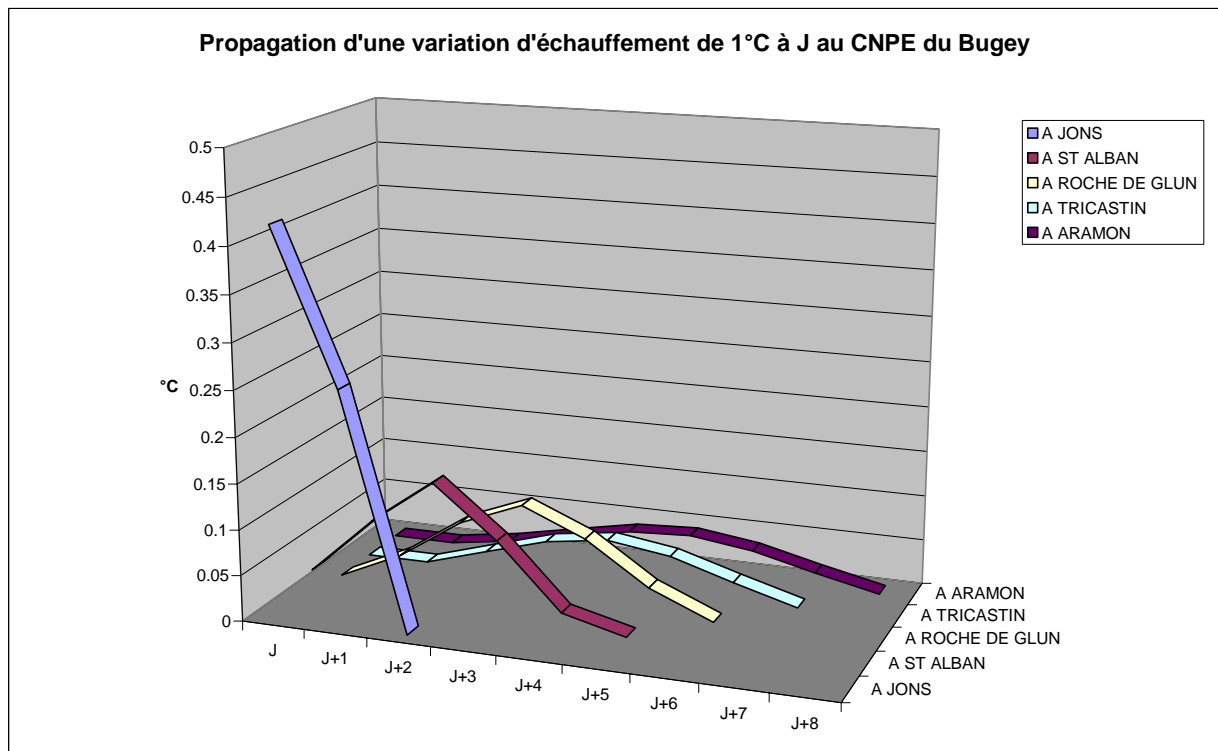
En « emboîtant » les modèles linéaires, on peut simuler la propagation d'une variation d'échauffement.

Par exemple : DT Jons à J s'écrit en fonction de DECH\_Bugey. Comme DT St Alban à J s'écrit en fonction de DT Jons, on peut écrire DT St Alban à J en fonction de DECH\_Bugey et propager ainsi de proche en proche l'échauffement du CNPE du Bugey jusqu'à Aramon.

Cela donne une bonne représentation visuelle du processus.

##### 5.3.1.1. Rejet du CNPE du Bugey

Sur le graphe ci-dessous, on a représenté la propagation dans le temps et l'espace d'une variation de 1°C de l'échauffement du Bugey. On estime par le modèle le résiduel de cet échauffement à Jons, St Alban, Roche de Glun, Tricastin et Aramon. Visuellement, on « voit passer » ce résiduel à chaque station.

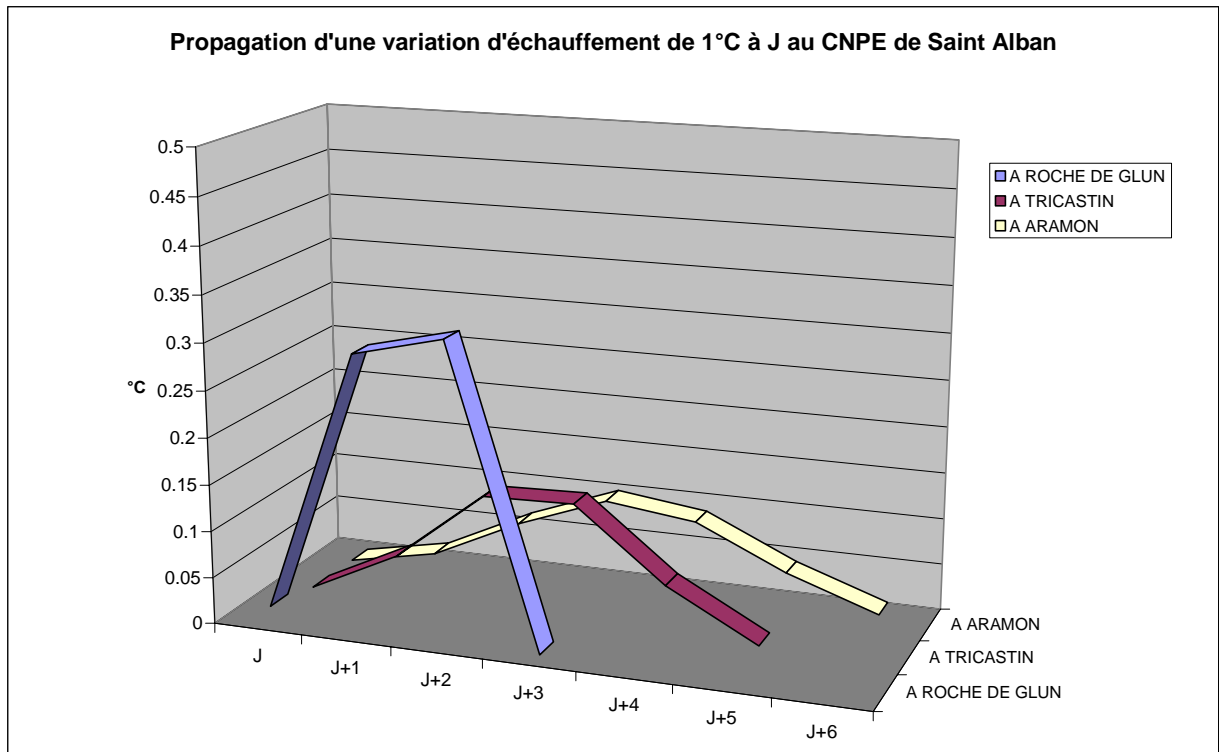


Une augmentation de 1°C de l'échauffement un jour donné se répercute à l'aval jusqu'à Aramon en s'étalant dans le temps et en s'atténuant fortement.



*Remarque : comme le modèle est construit « en moyenne », la forme du résiduel d'échauffement est également moyenne : elle donne une assez bonne idée globale des processus mais peut être assez fautive pour une situation donnée. Par exemple, la vitesse de propagation de l'échauffement peut différer sensiblement de celle présentée ci-dessus dans des conditions de débits particulières.*

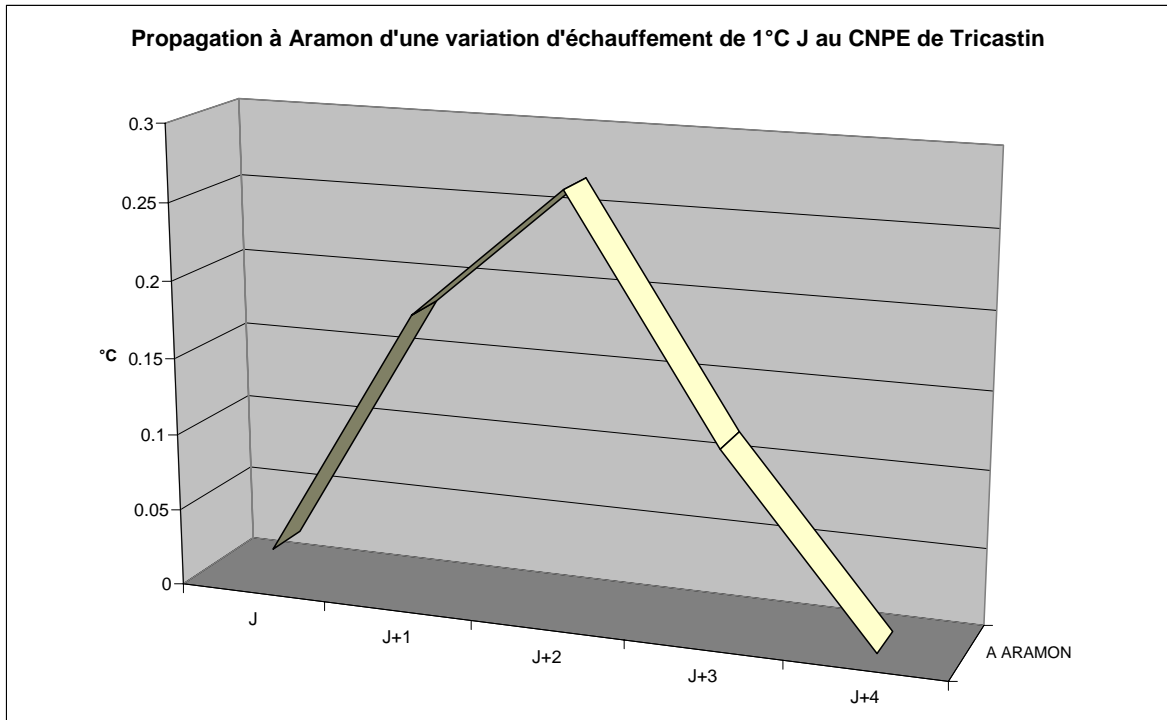
**5.3.1.2. Rejet du CNPE de St Alban**



Une augmentation de 1°C de l'échauffement un jour donné se répercute à l'aval jusqu'à Aramon en s'étalant dans le temps et en s'atténuant fortement.

### 5.3.1.3. Rejet du CNPE de Tricastin

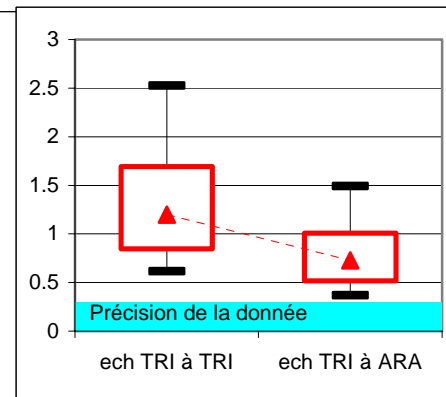
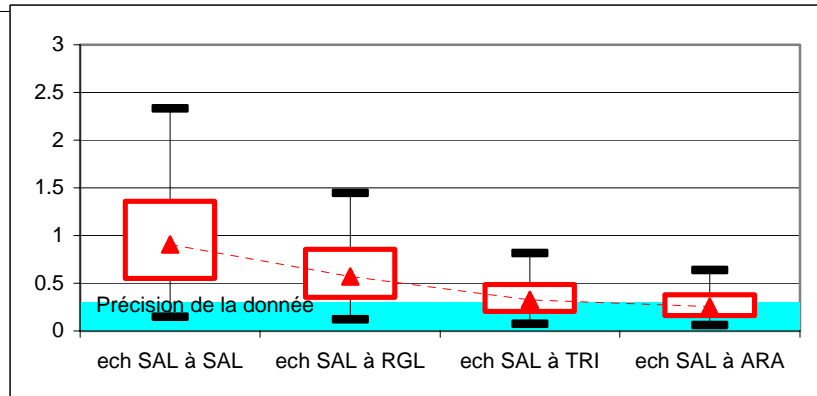
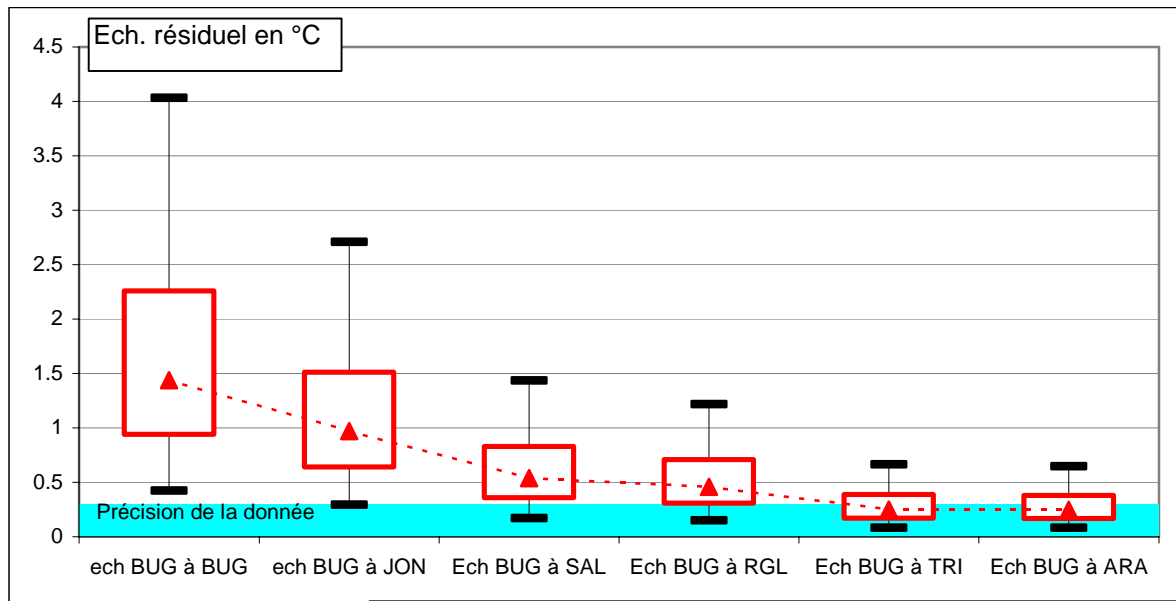
On ne dispose à l'aval du CNPE de Tricastin que de la station d'Aramon.



### 5.3.2. Evaluation de l'échauffement résiduel moyen des 3 CNPE sur la période 1991-2003

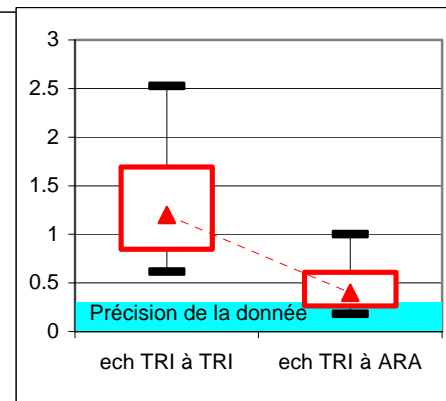
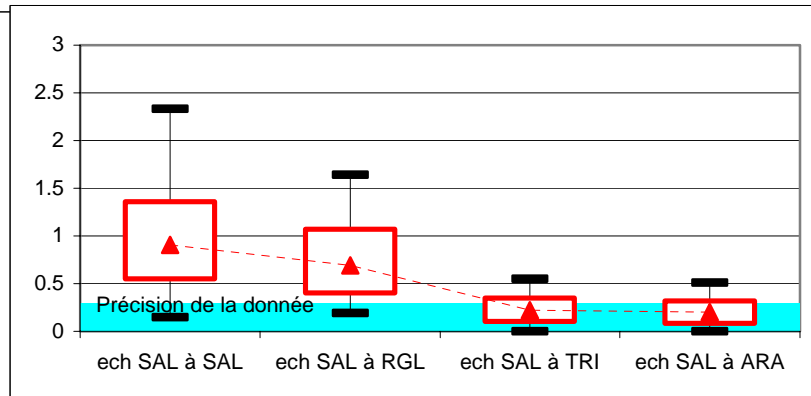
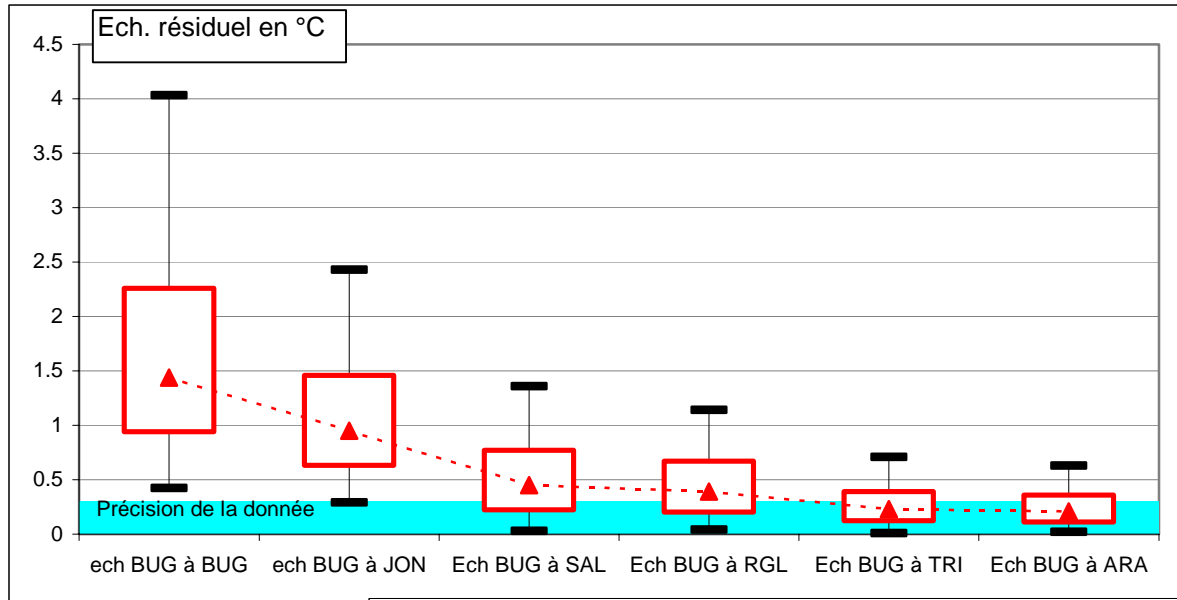
#### 5.3.2.1. Par le modèle linéaire

Le graphe ci-après donne, pour chaque CNPE, une représentation des échauffements résiduels en différents points à l'aval. Au droit du CNPE, l'échauffement indiqué correspond à l'échauffement théorique calculé, alors que pour l'aval, il correspond à l'échauffement résiduel établi d'après les modèles (intégrale des courbes du paragraphe précédent).



Le triangle rouge représente la médiane des résiduels modélisés.  
Le rectangle rouge est borné par les quantiles 25 % et 75 % et contient donc 50 % des valeurs.  
Les segments noirs représentent les quantiles 5 % et 95 % et bornent donc 90 % des données.

**5.3.2.2. Par le modèle réseau de neurones**



Le triangle rouge représente la médiane des résiduels modélisés.  
Le rectangle rouge est borné par les quantiles 25 % et 75 % et contient donc 50 % des valeurs.  
Les segments noirs représentent les quantiles 5 % et 95 % et bornent donc 90 % des données.

### 5.3.2.3. Analyse des résultats des deux modèles

Comme le montre les tableaux suivants, les évaluations obtenues par les deux méthodes ne sont que ponctuellement différentes, notamment à l'amont d'Aramon. **Globalement, elles convergent fortement.**

#### *Résiduel médian du CNPE du Bugey*

	A BUG	A JONS	A SAL	A RDG	A TRI	A ARA
Modèle linéaire	1.44	0.97	0.54	0.46	0.25	0.24
Réseau de neurones	1.44	0.95	0.45	0.39	0.23	0.21

#### *Résiduel médian du CNPE de St Alban*

	A SAL	A RDG	A TRI	A ARA
Modèle linéaire	0.90	0.57	0.32	0.26
Réseau de neurones	0.90	0.69	0.22	0.20

#### *Résiduel médian du CNPE de Tricastin*

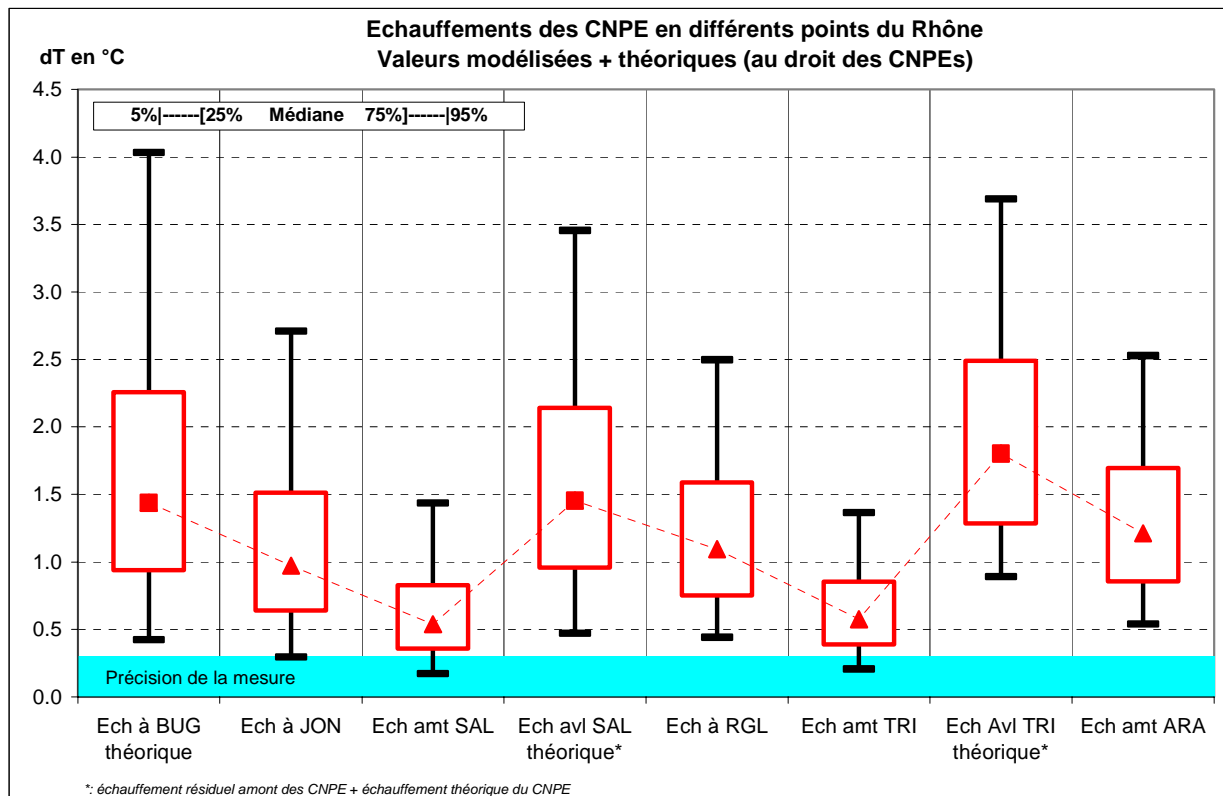
	A TRI	A ARA
Modèle linéaire	1.20	0.72
Réseau de neurones	1.20	0.40

Les résiduels d'échauffement des CNPE décroissent régulièrement en fonction de la distance parcourue. Pour les rejets des CNPE de Bugey et St Alban, les valeurs résiduelles à l'aval sont le plus souvent voisines de la précision de mesure.

### 5.3.3. Intégration des échauffements des 3 CNPE sur la période 1991-2003

On cherche ici à évaluer l'échauffement conjugué des 3 CNPE. En ajoutant les échauffements résiduels et théoriques précédents par colonne, on obtient une vision synthétique des échauffements résiduels tout au long du Rhône.

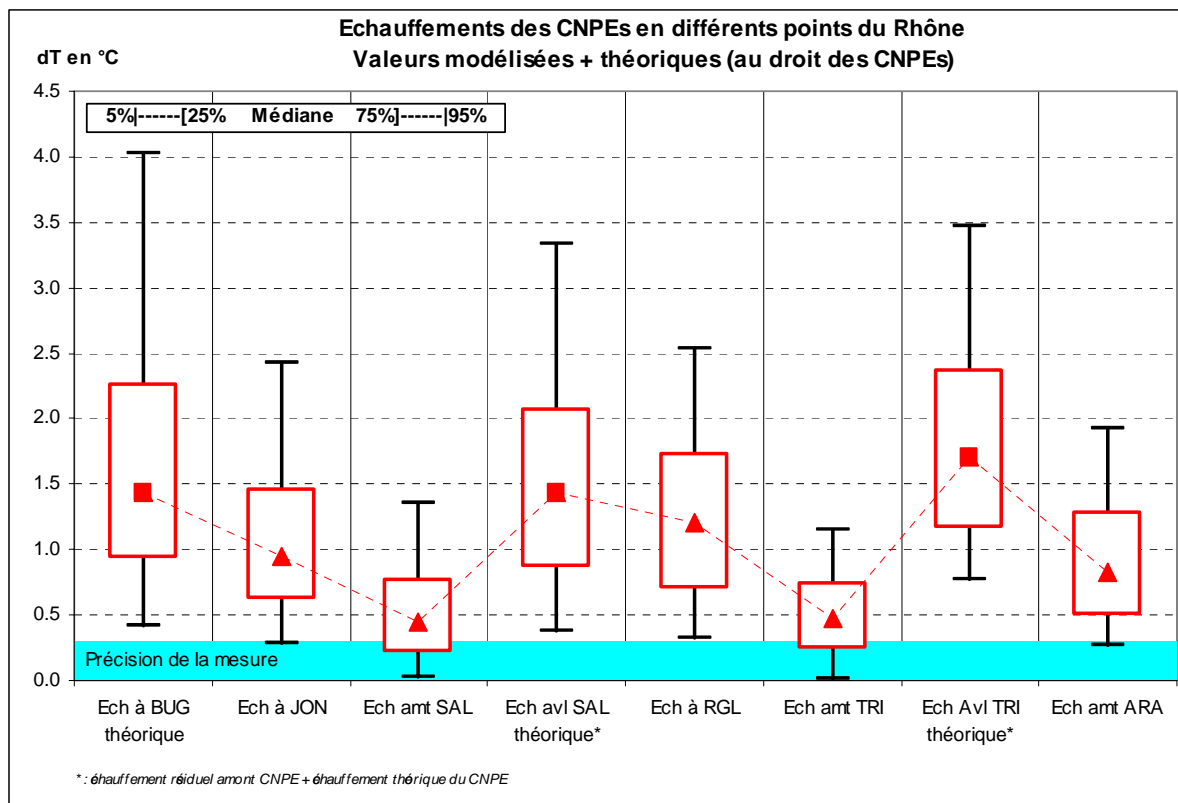
#### 5.3.3.1. Evaluation de l'échauffement résiduel moyen par le modèle linéaire



Les triangles correspondent à des résiduels modélisés à des points de mesure.

Les carrés représentent des résiduels théoriques résultant de la somme de l'échauffement théorique du CNPE et de l'échauffement résiduel des CNPE amont.

### 5.3.3.2. Evaluation de l'échauffement résiduel moyen par le réseau de neurones



### 5.3.3.3. Analyse des résultats

Là encore les résultats des deux méthodes convergent fortement : seul le tronçon Tricastin-Aramon donne des résultats sensiblement différents.

*Résiduel total médian*

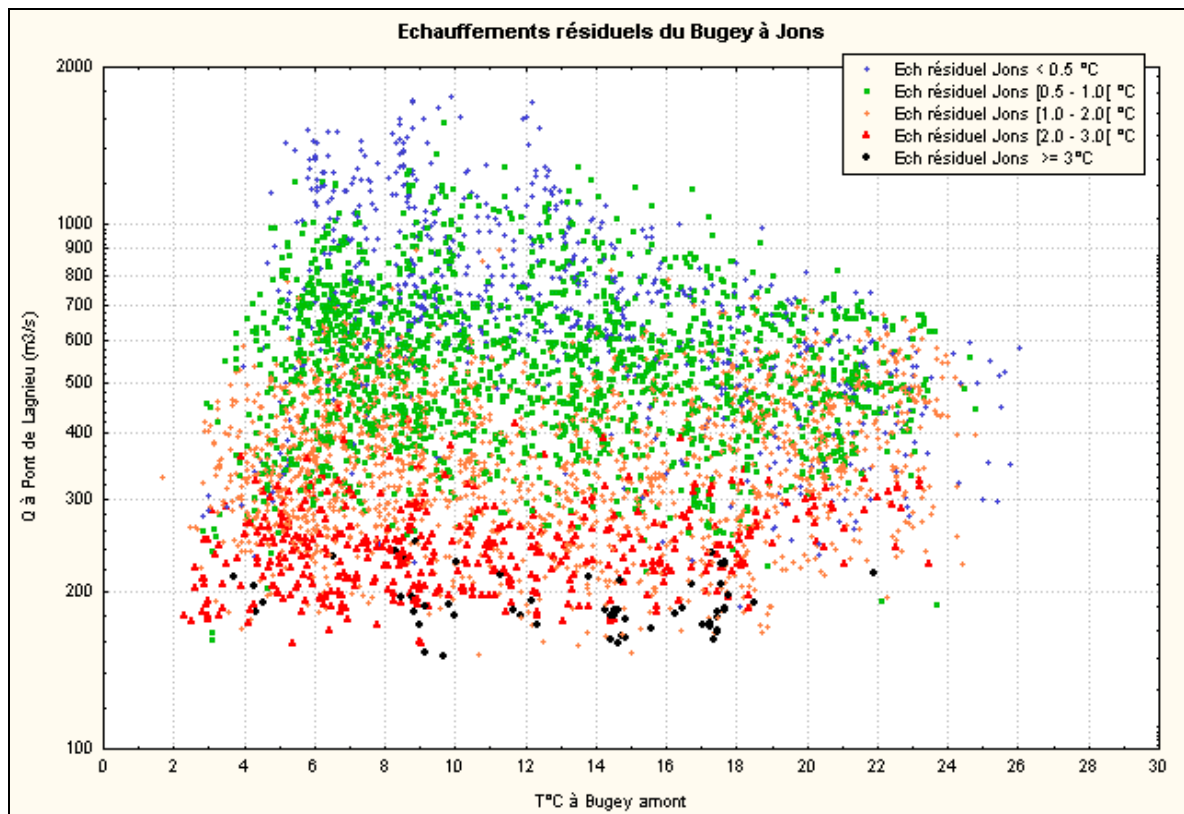
	À BUG	A JONS	Amt SAL	Aval SAL	A RDG	Amt TRI	Aval TRI	A ARA
Régression linéaire	1.43	0.97	0.54	1.45	1.09	0.57	1.80	1.21
Réseau de neurones	1.43	0.95	0.45	1.44	1.20	0.47	1.70	0.83

**Remarque :** 85 % des résiduels situés au-delà du quantile 95 % correspondent à des journées où la somme des échauffements théoriques des CNPE a été supérieure à 6 °C ; cette situation méritera donc d'être envisagée plus particulièrement pour préciser les situations extrêmes.

### 5.3.3.4. Résultats complémentaires du réseau de neurones

Les résiduels d'échauffement évalués par le réseau de neurones sont ici présentés dans l'espace débit-température de l'eau ce qui permet d'affiner l'analyse.

#### 5.3.3.4.1. *Echauffement résiduel du Bugey à Jons en fonction du débit et de la température de l'eau*



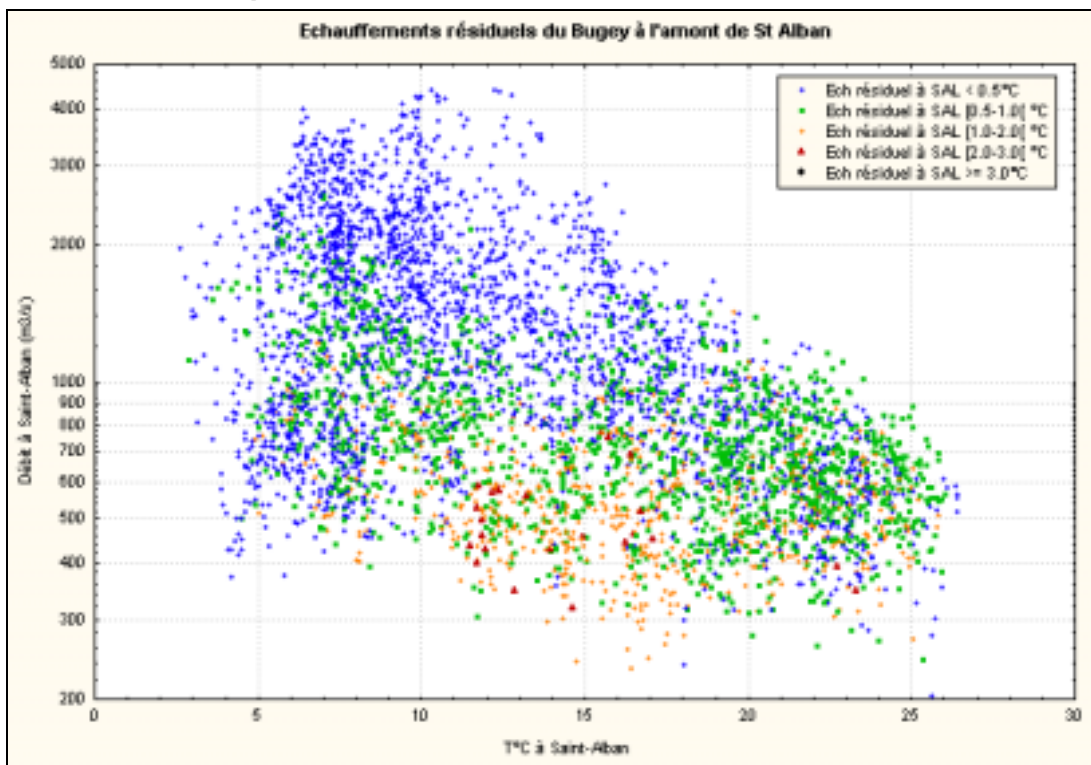
Ce graphe, qui représente la distribution des résiduels d'échauffement du CNPE du Bugey à Jons, soit 17 km à l'aval du CNPE, met bien en évidence :

- l'effet très fort des débits sur l'intensité des échauffements, les résiduels supérieurs à 2°C se situant pour la plupart à des débits inférieurs à 300 m<sup>3</sup>/s,
- la rareté des résiduels d'échauffement au-delà de 24 °C de température d'eau en amont du site et des résiduels forts au-delà de 18 °C.

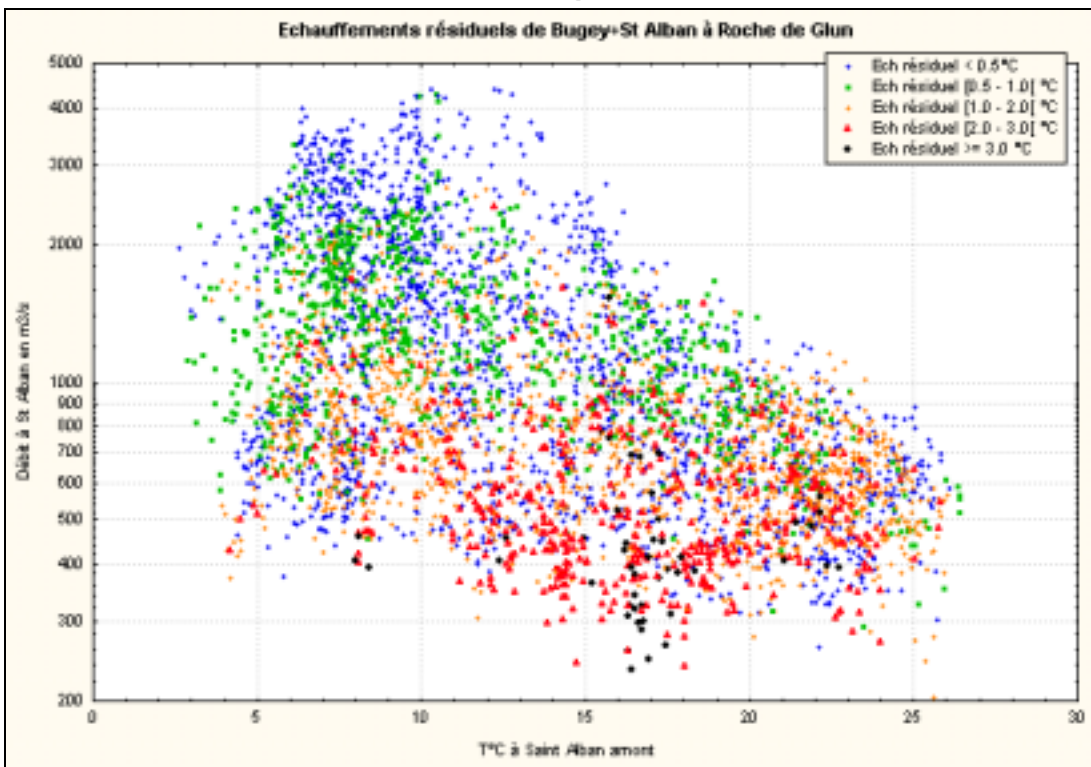
Les graphes suivants confortent cette analyse, quelle que soit la station observée ou le rejet de CNPE envisagé.



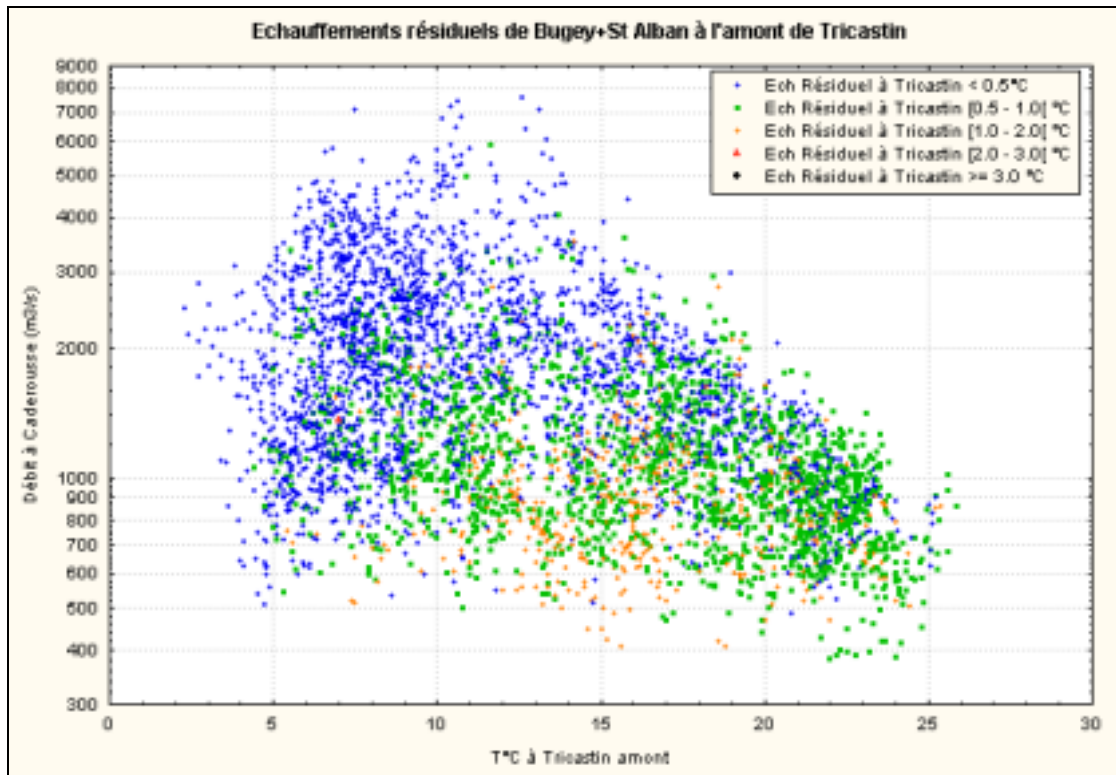
**5.3.3.4.2. Echauffement résiduel du Bugey à St Alban en fonction du débit et de la température de l'eau**



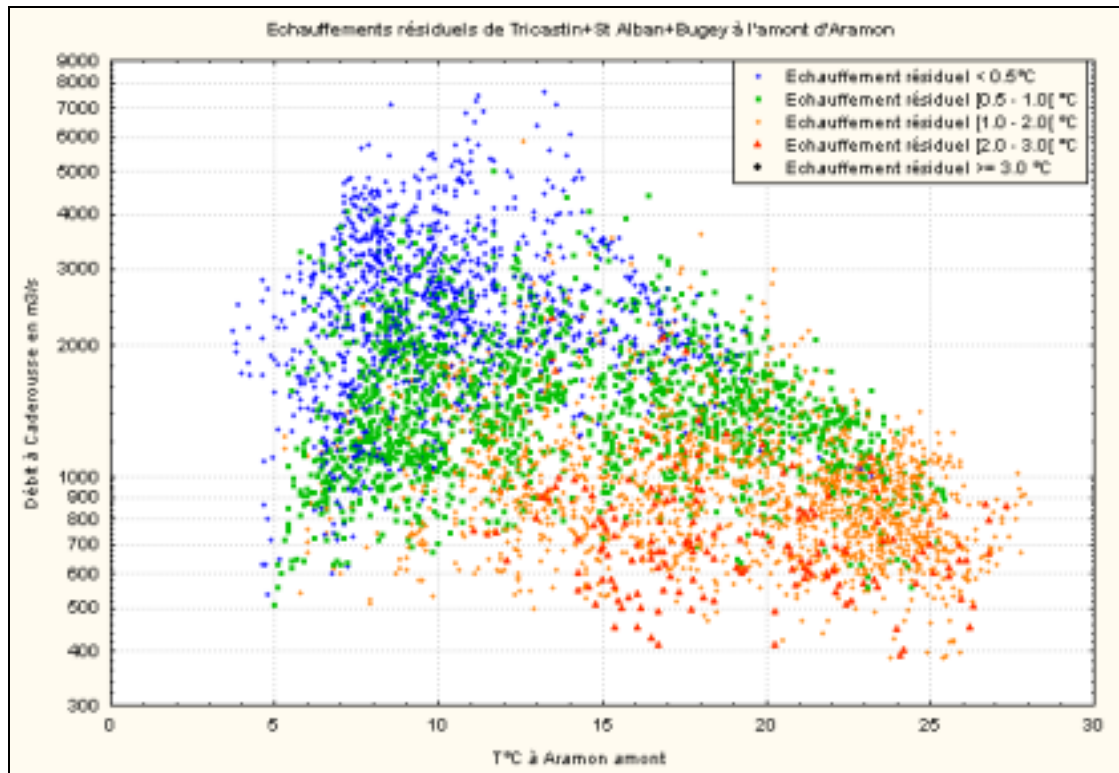
**5.3.3.4.3. Echauffement résiduel du Bugey et de St Alban à Roche de Glun en fonction du débit et de la température de l'eau**



**5.3.3.4.4. Echauffement résiduel du Bugey et de St Alban à Tricastin en fonction du débit et de la température de l'eau**



**5.3.3.4.5. Echauffement résiduel du Bugey, de St Alban et de Tricastin à Aramon en fonction du débit et de la température de l'eau**



#### 5.3.4. Conclusion sur la période 1991-2003

L'analyse des échauffements des CNPE et de leurs résiduels montre que leur intensité est inversement proportionnelle au débit : par exemple, les résiduels d'échauffement du CNPE Bugey à Jons ne sont élevés ( $> 2^{\circ}\text{C}$ ) que pour des débits du Rhône amont inférieurs à 300 m<sup>3</sup>/s.

Par ailleurs, ils le sont rarement quand les températures d'eau sont chaudes : au-delà de 18°C en amont de Bugey, les résiduels d'échauffements supérieurs à 2°C sont rares ; au-delà de 26°C à St Alban amont, l'échauffement résiduel n'a pas dépassé 1.2°C depuis 1991. À Tricastin, ce phénomène d'échauffement plus faible dans les fortes températures est moins net car les 26°C en moyenne journalière ne sont pas atteints.

Bien que très différentes, les deux méthodes de modélisation mises en œuvre conduisent à des résultats convergents. Aux différents points du Rhône envisagés, l'échauffement médian lié aux rejets des CNPE est dans la gamme [0.5 – 1.7]°C ; et encore, les valeurs les plus fortes correspondent à l'aval immédiat du CNPE où l'on a ajouté au résiduel de l'amont, l'échauffement théorique calculé du site. À l'amont de St Alban et de Tricastin, les échauffements résiduels médians sont de l'ordre de 0.5°C.

Si l'on s'intéresse à des événements moins fréquents, le résiduel total de tous les CNPEs amont, est, à chaque site de mesure, 95 % du temps inférieur à 2.5°C (2.7°C à Jons par le modèle linéaire).

Seuls les sites en aval immédiat des CNPEs sont soumis à des échauffements totaux qui, plus de 5% du temps, dépassent 3°C (toujours en utilisant les échauffements théoriques supposés en mélange intégral).

Les résultats présentés jusqu'ici ont été établis sur l'ensemble de l'échantillon 1991-2003 et peuvent donc être considérés comme moyens. Afin d'affiner l'analyse, on a réalisé le même travail pour des situations particulières, choisies pour leur sensibilité au regard du paramètre température.

Compte-tenu de la convergence constatée entre les deux méthodes de modélisation, l'exercice n'a été mené qu'avec les modèles de régression linéaire.

## 5.4. ANALYSE DE SITUATIONS PARTICULIERES

### 5.4.1. Analyse des résidus du modèle de régression linéaire

Afin d'éclairer le choix des situations particulières, une analyse des résidus des modèles linéaires précédemment présentés a été conduite.

L'analyse des résidus des modèles (écarts entre les valeurs observées et celles prévues par le modèle) permet de se faire une idée de leur fiabilité. On a analysé simplement les résidus sur deux critères :

- leur moyenne : plus elle s'écarte de 0, plus le modèle est « biaisé » c'est-à-dire qu'il représente en moyenne mal la réalité,
- leur écart-type : plus il s'écarte de 0, moins le modèle rend compte des phénomènes censés être pris en compte (par exemple : temps de transfert).

On a tenu compte dans cette analyse de la précision de mesure des phénomènes observés : l'incertitude de mesure sur la température de l'eau est généralement admise à 0.3 °C.

On a analysé les résidus selon deux grilles :

- une analyse mensuelle, sans réel sens physique, mais aisée à comprendre,
- une analyse par type de situation physique : température de l'eau du fleuve, débit du fleuve, écart de température air/eau et échauffement des CNPE.

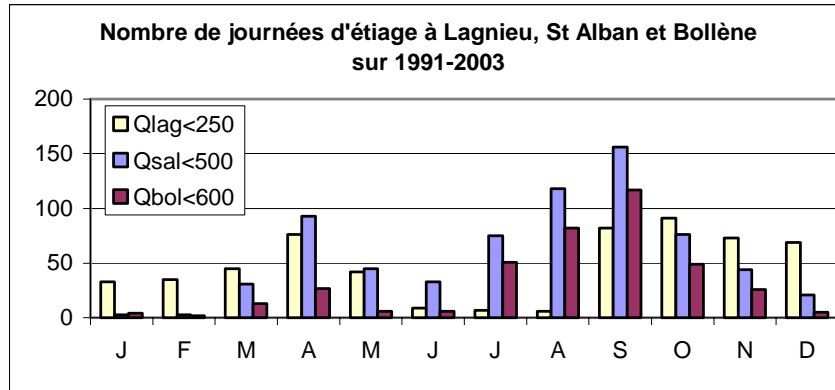
L'analyse des résidus des modèles sur leur tronçon montrent finalement les modèles assez fidèles à la réalité, sauf à l'amont de Lyon. Comme l'évaluation des résiduels d'échauffement est basée sur l'enchaînement des modèles, les faiblesses des modèles amont constatées dans certaines situations se répercutent à l'aval. Il apparaît donc nécessaire d'affiner l'exercice en construisant des modèles adaptés à ces situations particulières.

### 5.4.2. Choix des situations particulières

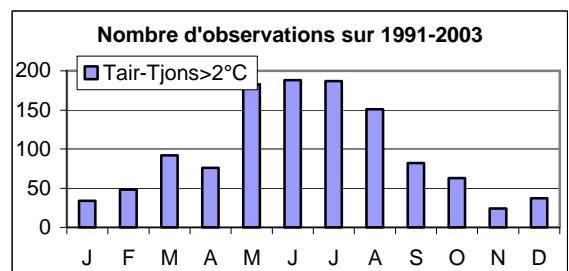
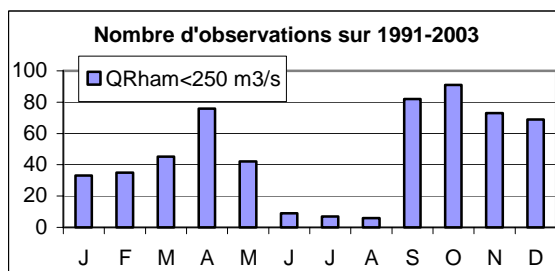
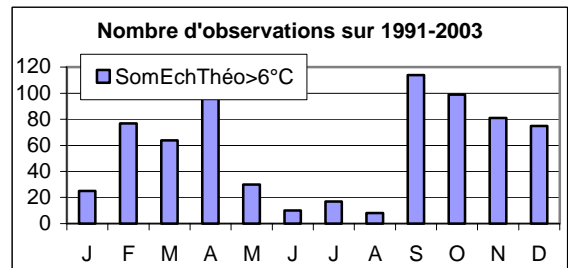
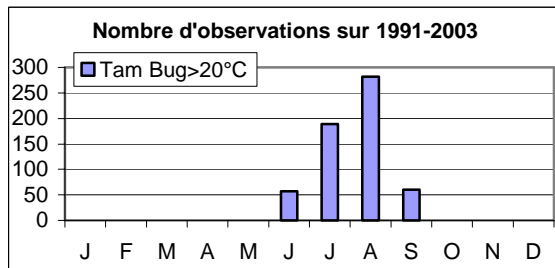
Quatre critères de situations particulières étaient pressentis :

- la température amont du Rhône,
- les débits amont et aval du Rhône,
- l'écart entre les températures de l'air et de l'eau,
- la somme des échauffements théoriques des CNPE de Bugey, St Alban et Tricastin.

A l'analyse, des populations répondant aux critères « débit » et « écart air-eau » sont difficiles à étudier. En effet, leur caractère erratique (le débit du Rhône amont peut varier du simple au double dans la même semaine presque en toute saison) conduit à sélectionner une suite de petites périodes indépendantes. Or, compte-tenu de l'importance du phénomène de transfert sur le fleuve, il est essentiel de pouvoir travailler sur des plages temporelles assez longues. Par ailleurs, l'étiage en amont ne correspond pas nécessairement à un étiage à l'aval comme le montre le graphe suivant :



Enfin, le croisement avec les autres critères amplifie cet effet et raréfie les observations comme on peut le constater en comparant les répartitions annuelles des situations extrêmes des différents paramètres :



A titre d'exemple, on ne dénombre que 26 observations pour Qlagnieu < 250 m3/s et Tbugey > 20°C et 54 observations pour Somme des ech théo > 6°C et Tair-Teau > 2°C.

Notons par ailleurs que les critères « somme des échauffements théoriques des CNPE » et « débit d'étiage à Lagnieu » ont bien sûr des répartitions très proches.

On propose donc de s'en tenir aux critères « température de l'eau » et « somme des échauffements théoriques CNPE », dont les répartitions dans l'année sont complémentaires et qui demeurent, en tout état de cause, représentatifs des situations sensibles.

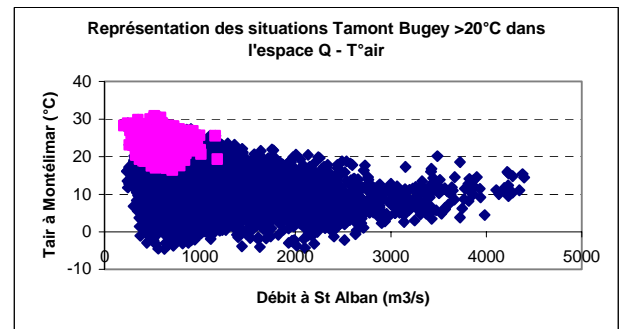
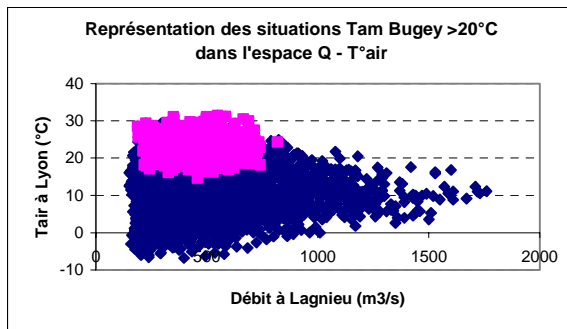
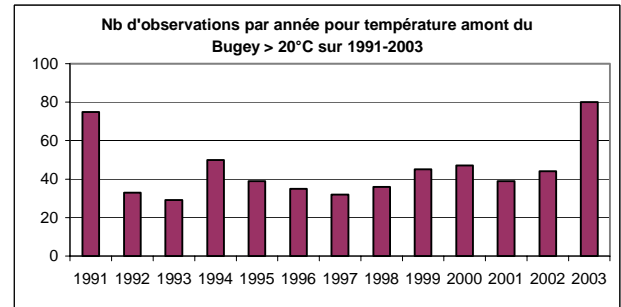
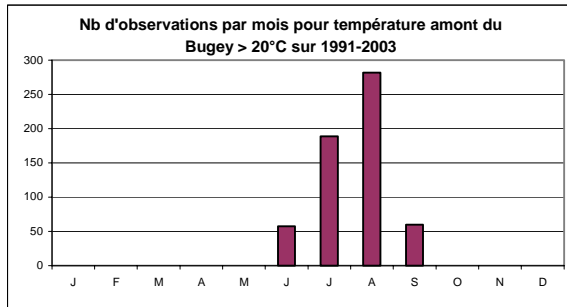
Les situations particulières sont donc sélectionnées sur deux critères :

- Journées de la période 1991-2003 où la température en amont du Bugey a été supérieure à 20 °C. Cette population présente les caractéristiques suivantes :

<b>Critère : T à BUGEY amont &gt; 20°C (= quantile 88 ; moyenne = 21.7 °C)</b>		Normale de la période 1991-2003	Commentaire
Effectif	585	4748	= 12 % des obs.
Débit moyen à Lagnieu (m3/s)	444	488	= médiane
Débit moyen à St Alban (m3/s)	580	1090	= quantile 25
Débit moyen à Bollène (m3/s)	780	1240	= quantile 25
Tair-Teau Rhône amont (°C)	0.81	-0.5	= quantile 65
Tair-Teau Rhône aval (°C)	1.84	-0.1	= quantile 70
Somme moyenne des ech. des CNPE (°C)	4.04 (1.26 Bug, 1.1 SAI, 1.7 Tri)	4.07	= quantile 50

Cette population, représentative de températures élevées du Rhône, présente un effectif suffisant par rapport aux besoins statistiques. Elle correspond par ailleurs à des situations de débit plutôt faibles à l'aval, d'air plus chaud que l'eau (réchauffement de l'eau et meilleure propagation des influences amont) et d'échauffement normal des CNPE.

Les graphes, ci-dessous, décrivent plus précisément cet échantillon. Les points bleus représentent l'ensemble de l'échantillon 1991-2003 ; les points roses représentent les situations sélectionnées.



Cette population est donc concentrée sur les mois d'été, répartie de manière assez homogène sur les 14 années d'étude, et caractérisée par des débits du Rhône plutôt faibles, surtout à l'aval de la confluence avec la Saône.

- Journées de la période 1991-2003 où la somme des échauffements théoriques des trois CNPEs a été supérieure à 6 °C. Cette population présente les caractéristiques suivantes :

Remarque : on s'appuie ici sur la somme des échauffements journaliers des CNPE lissée sur 5 jours (représentant ainsi des périodes de fonctionnement des CNPE relativement stables).

**Critère : somme des éch. théo. CNPE > 6°C**  
**(= quantile 85 ; moyenne = 7.46 °C)**

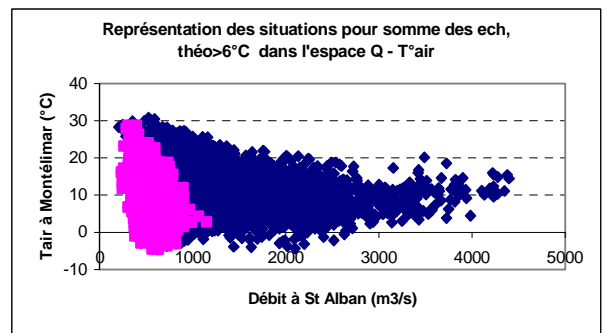
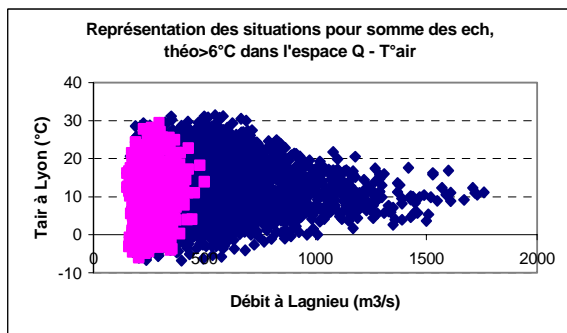
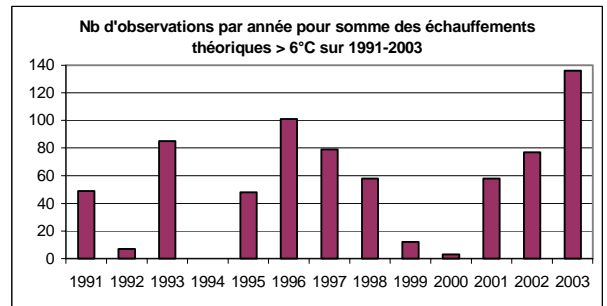
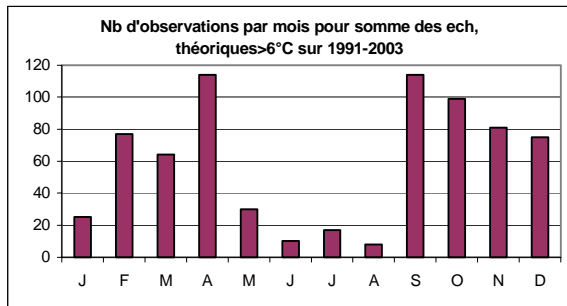
		Normale de la période 1991-2003	Commentaire
Effectif	714	4748	= 15 % des obs.
T amont Bugey (°C)	11.2	12.3	= médiane
Débit moyen à Lagnieu (m3/s)	253	488	= quantile 12
Débit moyen à St Alban (m3/s)	510	1090	= quantile 15
Débit moyen à Bollène (m3/s)	723	1240	= quantile 16
Tair-Teau Rhône amont (°C)	-2.6	-0.5	= quantile 28
Tair-Teau Rhône aval (°C)	-1.5	-0.1	= quantile 32

Cette population, représentative des périodes de fort échauffement des CNPE, présente un effectif suffisant pour les besoins statistiques. Elle correspond à des périodes où l'air est sensiblement plus froid que l'eau, où le fleuve est en étiage relatif sur l'essentiel de son linéaire, sa température étant en moyenne au niveau de la normale de la période.

Par ailleurs, rappelons que, dans l'étude des résiduels d'échauffement sur 1991-2003, il est apparu que 85 % des résiduels situés au-delà du quantile 95 % correspondaient à des journées où la somme des échauffements théoriques des CNPE était supérieure à 6°C. Ce critère permet donc d'explorer plus finement les situations extrêmes de la période d'étude.



Les graphes, ci-dessous, décrivent plus précisément cet échantillon :



Ces situations sont rares en été et plus ou moins souvent rencontrées d'une année à l'autre. Elles correspondent en outre à des bas débits tant en amont qu'en aval du fleuve, et comme déjà vu, sont peu représentées dans les gammes de température d'eau élevée (96 % de l'échantillon correspond à des températures en amont du Bugey inférieures à 20 °C).

Avec ces deux situations particulières, la plupart des périodes de l'année sont donc prises en compte.

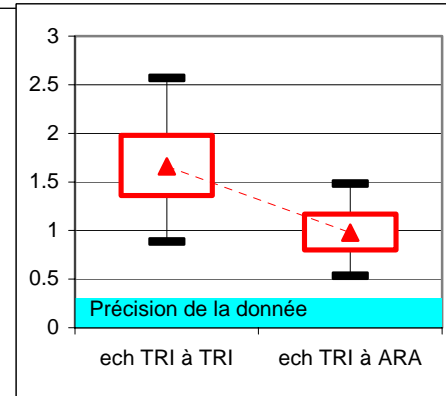
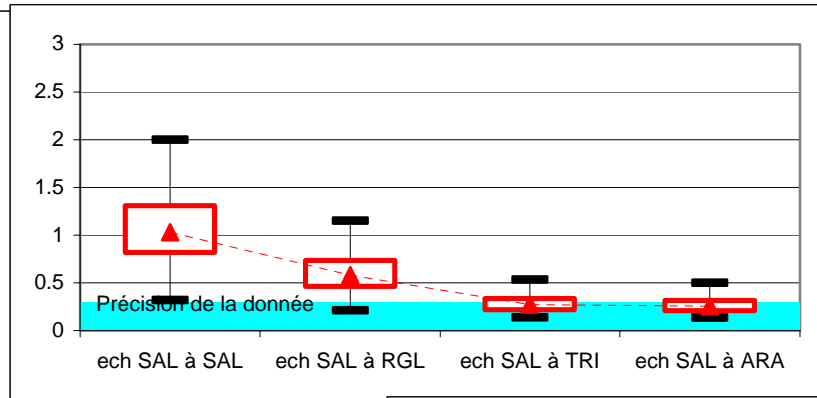
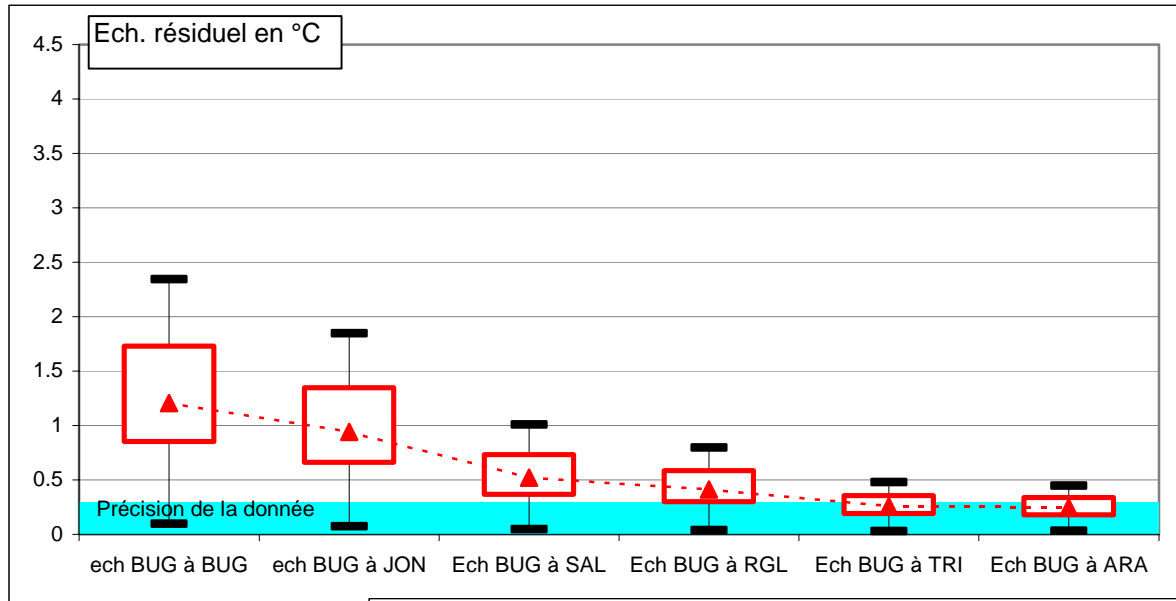
### 5.4.3. Etude des situations de température amont Bugey > 20 °C

#### 5.4.3.1. Résultats bruts des modèles linéaires

Tronçon	R2 de la régression obtenue
Bugey - Jons	0.82
Jons – St Alban	0.66
St Alban – Roche de Glun	0.72
Roche de Glun - Tricastin	0.43
Tricastin - Aramon	0.56

Les modèles établis sont plutôt meilleurs à l'amont de la confluence avec l'Isère. La mauvaise qualité du modèle de Roche de Glun à Tricastin rend plus douteux les résultats à l'aval.

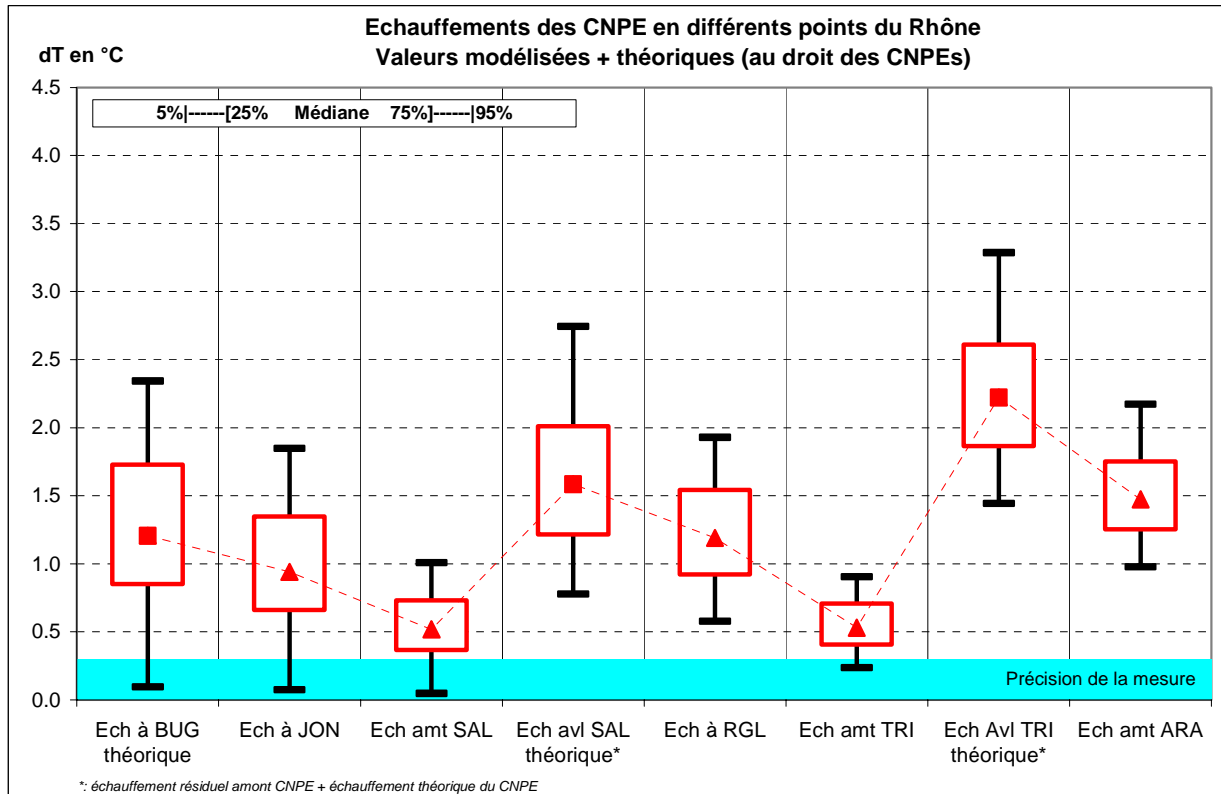
**5.4.3.2. Evaluation de l'échauffement résiduel de chaque CNPE pour température amont Bugey > 20 °C**



Le triangle rouge représente la médiane des résiduels modélisés.  
Le rectangle rouge est borné par les quantiles 25 % et 75 % et contient donc 50 % des valeurs.  
Les segments noirs représentent les quantiles 5 % et 95 % et bornent donc 90 % des données.

Les résiduels d'échauffement dans ces situations sont globalement plus faibles qu'en moyenne. Toutefois, l'air étant plus chaud que l'eau, les échauffements du CNPE du Bugey se conservent mieux en part relative. La part résiduelle des CNPE de St Alban et de Tricastin est en revanche plus faible, la température d'équilibre de l'eau étant assez souvent dépassée à l'aval immédiat des sites, favorisant les échanges négatifs avec l'atmosphère, donc l'« érosion » de l'échauffement.

### 5.4.3.3. Intégration des 3 CNPE pour température amont Bugey > 20 °C



Les échauffements conjugués des CNPE sont sensiblement plus faibles que sur l'ensemble de l'échantillon : l'échauffement médian du Rhône est dans la gamme [0.5 – 1.5] °C, sauf à l'aval du CNPE de Tricastin où il atteint 2.2 °C pour 1.8 °C en moyenne, avec les réserves liées à la mauvaise qualité des modèles aval. Le quantile 95 % se situe dans la gamme [0.9 – 3.3] °C au lieu de [1.3 – 4] °C en situation moyenne.

A chaque point de mesure, le résiduel total de tous les CNPEs est 95 % du temps inférieur à 2.2 °C ; là-aussi la valeur de 2.2°C à Aramon est à prendre avec précaution du fait de la mauvaise qualité des modèles aval, tout comme le fait que 9% des valeurs dépassent 3°C à l'aval immédiat de Tricastin.

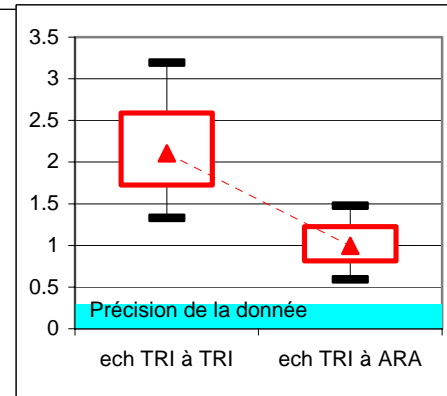
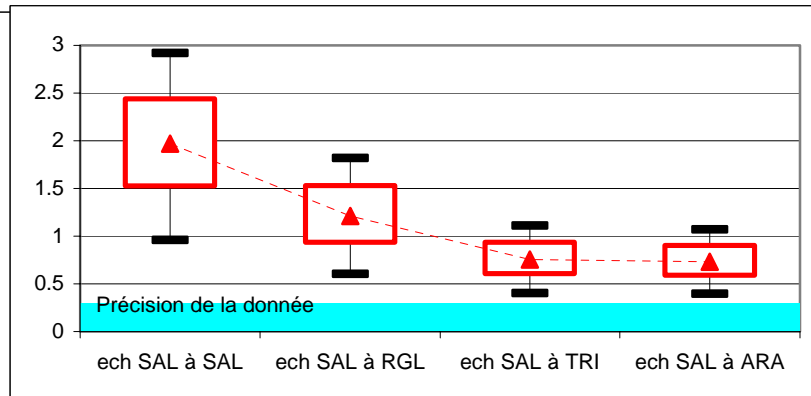
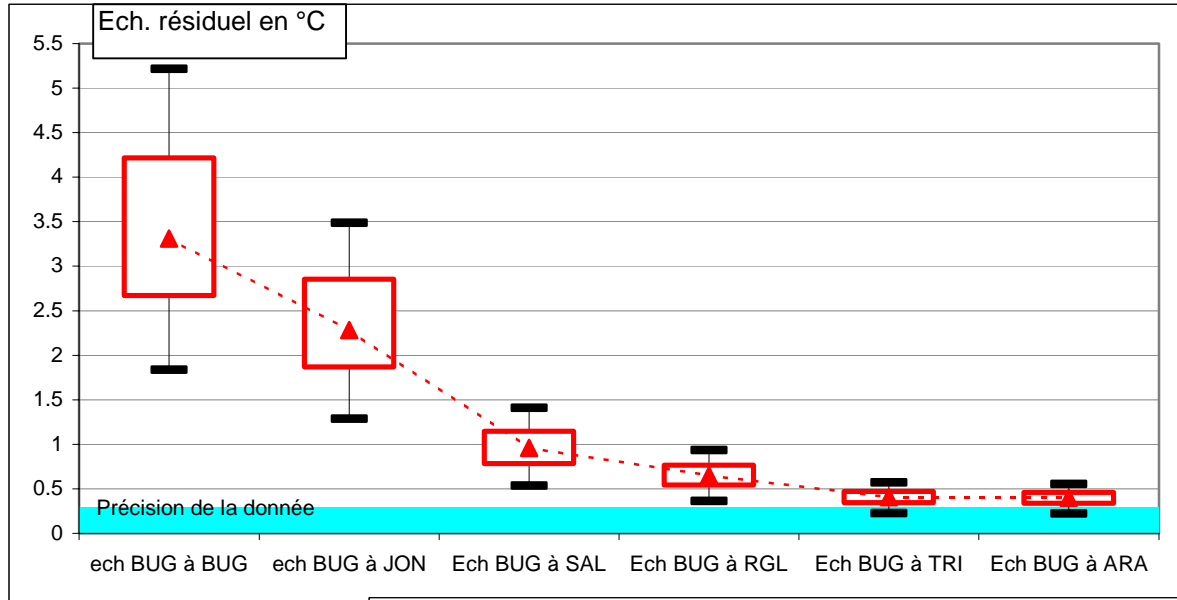
#### 5.4.4. Etude des situations où la somme des échauffements théoriques des CNPE est supérieure à 6°C

##### 5.4.4.1. Résultats bruts des modèles

Tronçon	R2 de la régression obtenue
Bugey - Jons	0.67
Jons – St Alban	0.56
St Alban – Roche de Glun	0.52
Roche de Glun - Tricastin	0.56
Tricastin - Aramon	0.56

Les modèles établis sont globalement moins bons que ceux établis sur l'échantillon global mais demeurent satisfaisants.

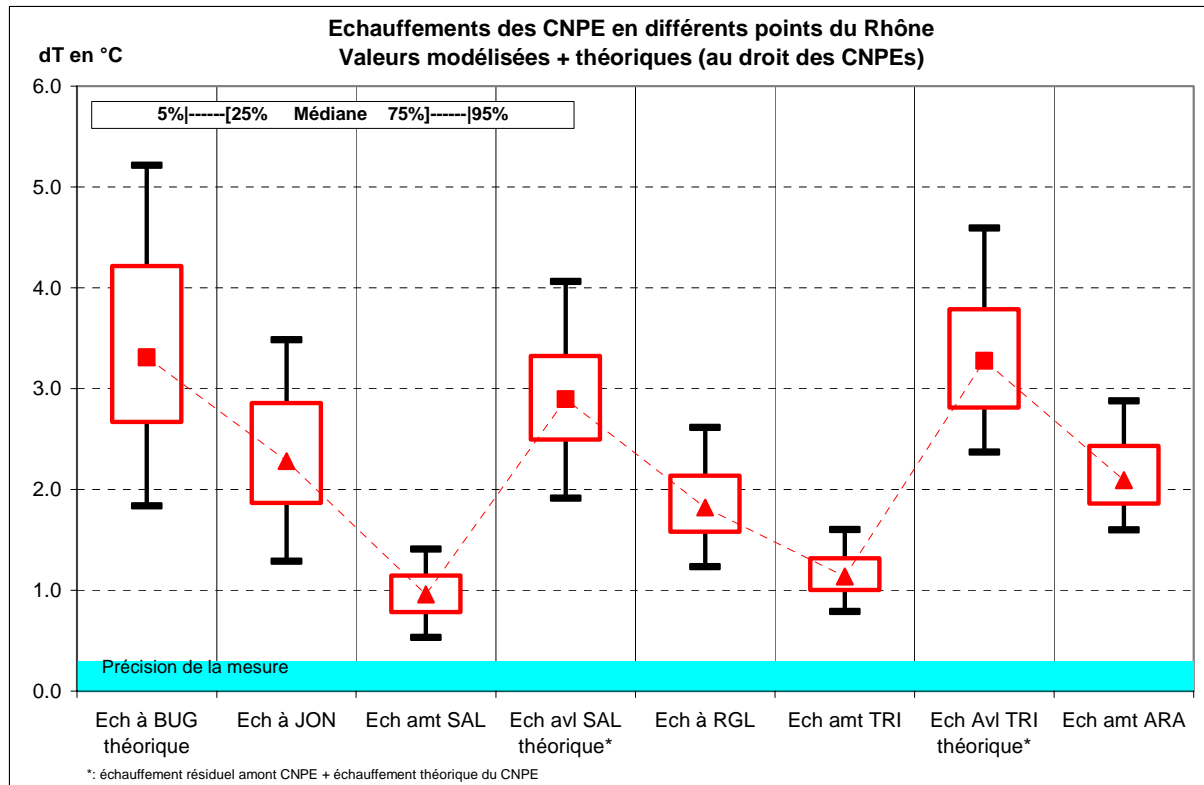
**5.4.4.2. Evaluation de l'échauffement résiduel de chaque CNPE pour somme des échauffements théoriques des CNPE supérieure à 6 °C**



Le triangle rouge représente la médiane des résiduels modélisés.  
Le rectangle rouge est borné par les quantiles 25 % et 75 % et contient donc 50 % des valeurs.  
Les segments noirs représentent les quantiles 5 % et 95 % et bornent donc 90 % des données.

Les échauffements sont bien sûr ici beaucoup plus forts mais dans ces situations d'air plus froid que l'eau, l'« érosion thermique » du rejet est forte, ce qui se traduit par une décroissance plus rapide du résiduel avec la distance que sur l'échantillon moyen.

### 5.4.4.3. Intégration des trois CNPE pour somme des échauffements théoriques des CNPE supérieure à 6 °C

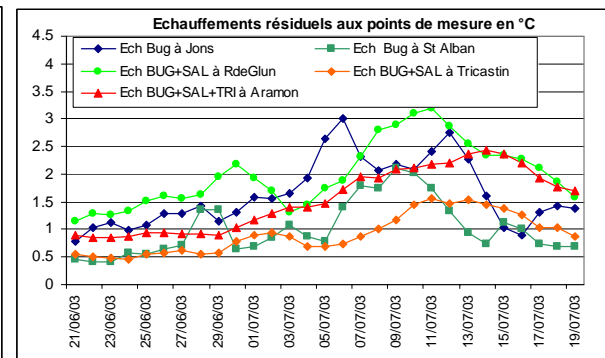
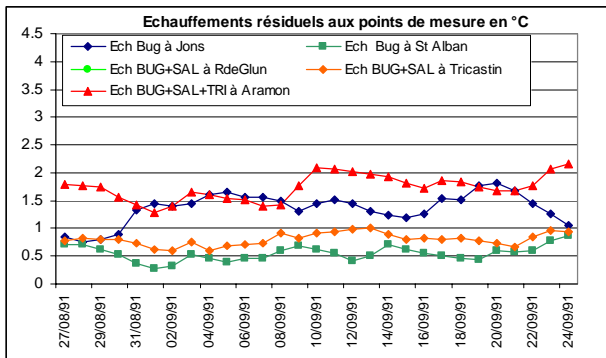
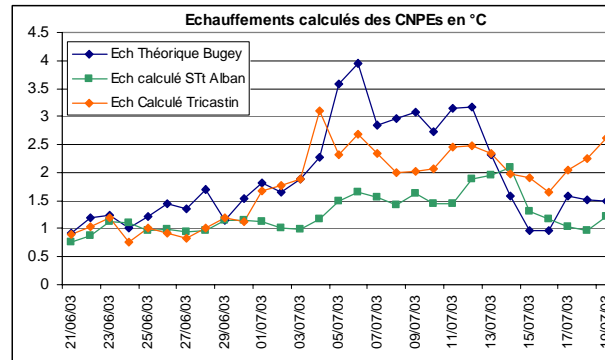
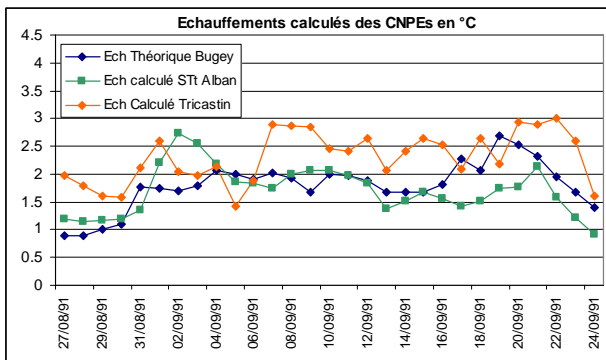
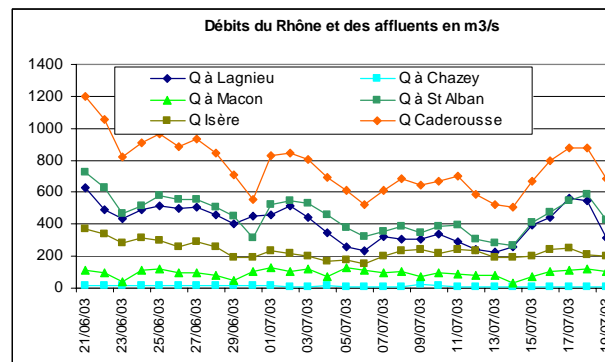
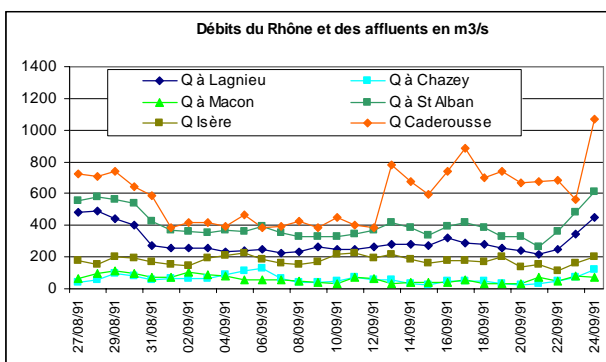
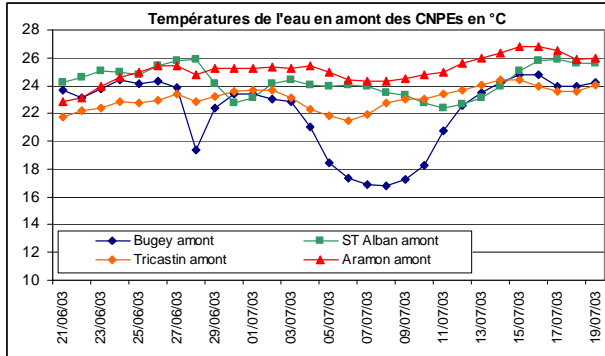
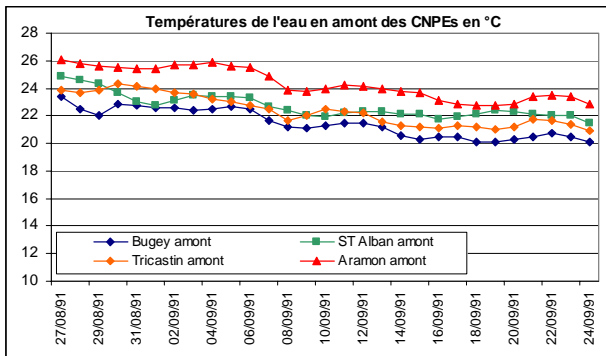


Les échauffements conjugués des CNPE sont sensiblement plus forts que sur l'ensemble de l'échantillon : l'échauffement médian du Rhône est dans la gamme [0.95 – 3.3] °C. Cependant, si l'on exclut les avals immédiats des sites, on se retrouve dans la gamme [0.95 – 2.3] °C.

Si on s'intéresse à des évènements rares, le résiduel total de tous les CNPEs est, à chaque site de mesure, 95 % du temps inférieur à 3 °C sauf à Jons (3.5°C, mais seulement 17 km à l'aval de Bugey).

### 5.4.5. Regard sur les situations croisées

Le trop faible nombre d'observations ne permet pas de faire de statistiques sur les situations croisées où la température d'eau est supérieure à 20°C et la somme des échauffements théoriques des CNPE est supérieure à 6°C. Les graphes suivants représentent cependant deux de ces situations, en septembre 1991 et en juillet 2003.





- Septembre 1991

Pendant cette période, les températures d'eau sont à la baisse, l'air étant alors plus froid que l'eau. Les échauffements des CNPE sont soutenus, mais leurs résiduels à l'aval sont en comparaison assez limités, confirmant une forte « érosion thermique » des rejets :

- de l'ordre de 0.5°C à l'amont de St Alban pour 2°C d'échauffement théorique au CNPE du Bugey,
- de 0.5 à 1°C à l'amont de Tricastin pour 3.5 à 4°C d'échauffement total aux CNPE du Bugey et de St Alban,
- de l'ordre de 1.5°C à l'amont d'Aramon plus de 6°C au total sur les 3 CNPE.

- Juillet 2003

La période de forts échauffements correspond en fait au passage d'une « goutte froide » sur le Rhône. La température de l'eau en amont de Bugey, supérieure à 20°C, tombe temporairement à 17°C. L'air étant alors beaucoup plus chaud que l'eau, la conservation des échauffements est meilleure, particulièrement entre Bugey et St Alban :

- de l'ordre de 2°C à l'amont de St Alban pour 3 à 4°C d'échauffement théorique au CNPE du Bugey,
- de 1.5°C à l'amont de Tricastin pour 4.5°C d'échauffement total aux CNPE du Bugey et de St Alban,
- de l'ordre de 2.5°C à l'amont d'Aramon pour 7°C au total sur les 3 CNPE.

## 5.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 5

- La mise en œuvre de méthodes de modélisation a permis de quantifier plus précisément le résiduel des échauffements des CNPE le long du Rhône. Le tableau ci-dessous récapitule les principaux résultats obtenus en trois points de mesure amont de sites de production :

Station	Statistique du résiduel	En situation moyenne *	Tam Bugey > 20°C	Somme Ech. Théo. > 6°C
Amont St Alban	Médiane	0.5	0.5	0.9
	Quantile 95 %	1.4	1.0	1.4
Amont Tricastin	Médiane	0.5	<i>0.5</i>	1.1
	Quantile 95 %	1.2	<i>0.9</i>	1.6
Amont Aramon	Médiane	1.0	<i>1.4</i>	2.1
	Quantile 95 %	2.2	<i>2.2</i>	2.8

\* : moyenne des résultats des modèles linéaires et réseaux de neurones

*En italique, résultats moins fiables*

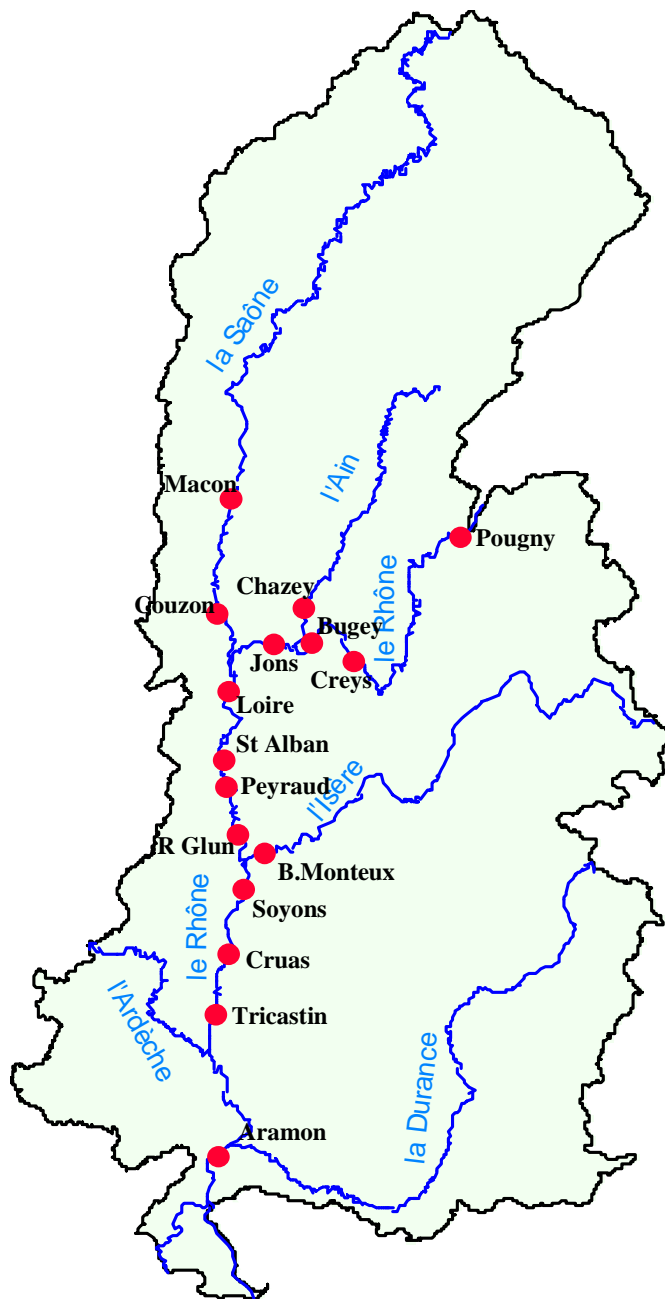
- Les deux méthodes mises en œuvre, bien que très différentes, mènent à des résultats convergents : aux différents points du Rhône envisagés (points de mesure et aval théorique des CNPE), l'échauffement médian lié aux rejets des CNPE est dans la gamme [0.5 – 1.7]°C en moyenne ([0.5 – 1]°C si l'on exclue les avals théoriques des sites) et, à chaque site de mesure, inférieur à 2.5°C 95 % du temps.
- L'analyse de situations particulières à fort enjeu montrent qu'en situation chaude les échauffements se conservent mieux mais que les résiduels absolus sont globalement plus faibles (voir quantile 95 %); inversement, en situation de forts échauffements des CNPEs, l'« érosion thermique » est forte avec la distance mais les résiduels restent plus forts in fine dans une eau plutôt froide.

## 6. CONCLUSION GENERALE

**Des travaux menés dans le cadre de la phase 2 de l'étude thermique globale du Rhône sur la période 1991-2003, plusieurs enseignements peuvent être tirés :**

- 1- Les caractéristiques thermique du Rhône sont gouvernées par de nombreux facteurs, souvent inter-dépendants, dont les principaux sont par ordre décroissant d'importance :**
  - la propagation de la température de l'eau en sortie du lac Léman, du fait des caractéristiques hydrauliques et hydrologiques du Rhône et de ses affluents,
  - les conditions météorologiques rencontrées par l'eau sur son trajet,
  - les échauffements des Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE).
  
- 2- L'étude confirme que les échauffements liés aux rejets des différents CNPE ne s'additionnent pas d'amont en aval. Toutefois, un échauffement faible subsiste à l'amont des sites de production, de l'ordre de 0,5 °C à Saint-Alban et Tricastin et de 1°C à Aramon en moyenne sur les 14 années de la période d'étude ; 95 % du temps, il ne dépasse pas 1,4°C à l'amont de St Alban, 1,2°C à l'amont de Tricastin et 2,2°C à l'amont d'Aramon.**
  
- 3- Deux situations particulières ont été plus particulièrement étudiées :**
  - quand la température de l'eau du Rhône est élevée (supérieure à 20°C à l'amont de Bugey), les échauffements conservés des CNPE sont globalement plus faibles qu'en moyenne ; les situations de température d'eau élevée et de rejets forts sont d'ailleurs rares,
  - quand les échauffements induits par les rejets des CNPE sont forts (supérieurs à 6°C pour les 3 CNPE), ils se conservent moins bien mais les échauffements conservés à l'aval demeurent plus élevés qu'en moyenne; la température de l'eau est cependant alors généralement plus tempérée.
  
- 4- Les deux premières phases de l'étude thermique globale du Rhône ont conduit à une bonne connaissance des processus à l'œuvre dans l'évolution de la température du fleuve. Elles ont notamment permis de valider des outils et des méthodes d'investigation sur de longues périodes d'étude incluant en particulier l'année exceptionnelle 2003.**

## ANNEXE 1 - LOCALISATION DES STATIONS DE MESURE



## **ANNEXE 2 : DESCRIPTION DES ÉCHAUFFEMENTS DES CNPE**

**•BUGEY**

**•ST ALBAN**

**•TRICASTIN**



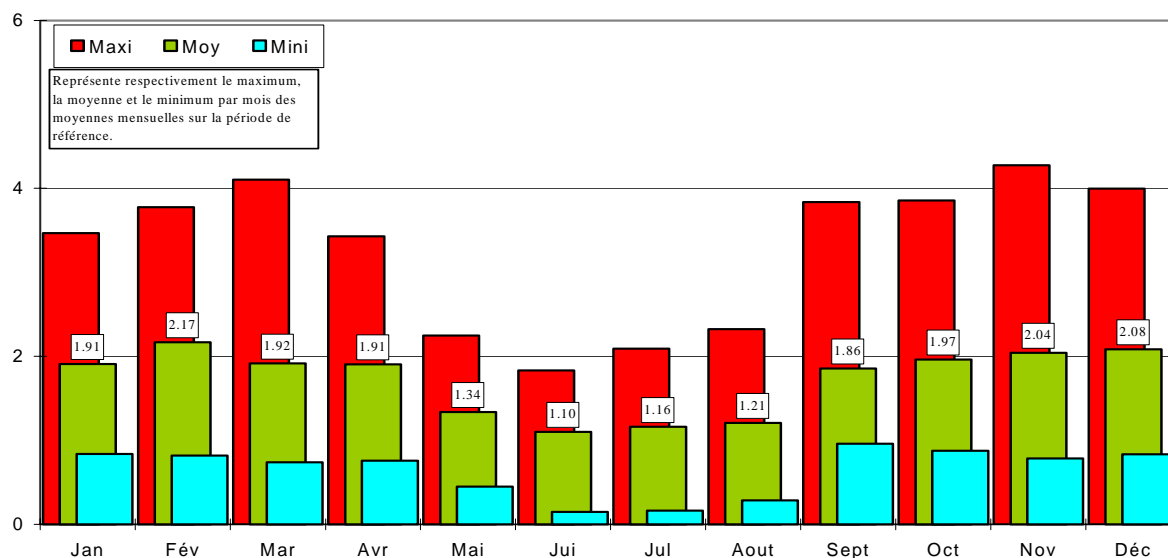
**CNPE :                      BUGEY                      Période de référence :    1991 - 2003**

**4 - Tableau des statistiques en moyenne mensuelle**

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Moy	1.91	2.17	1.92	1.91	1.34	1.10	1.16	1.21	1.86	1.97	2.04	2.08	1.72
Min	0.84	0.82	0.74	0.76	0.45	0.15	0.16	0.28	0.96	0.87	0.78	0.83	0.15
(Année)	1992	1995	2001	1999	1995	2002	2002	2003	1994	1993	1992	1996	
Max	3.47	3.78	4.11	3.43	2.25	1.83	2.09	2.32	3.84	3.86	4.28	4.00	4.28
(Année)	2002	1993	1993	1997	1993	1998	2003	1998	1996	1996	2001	2001	

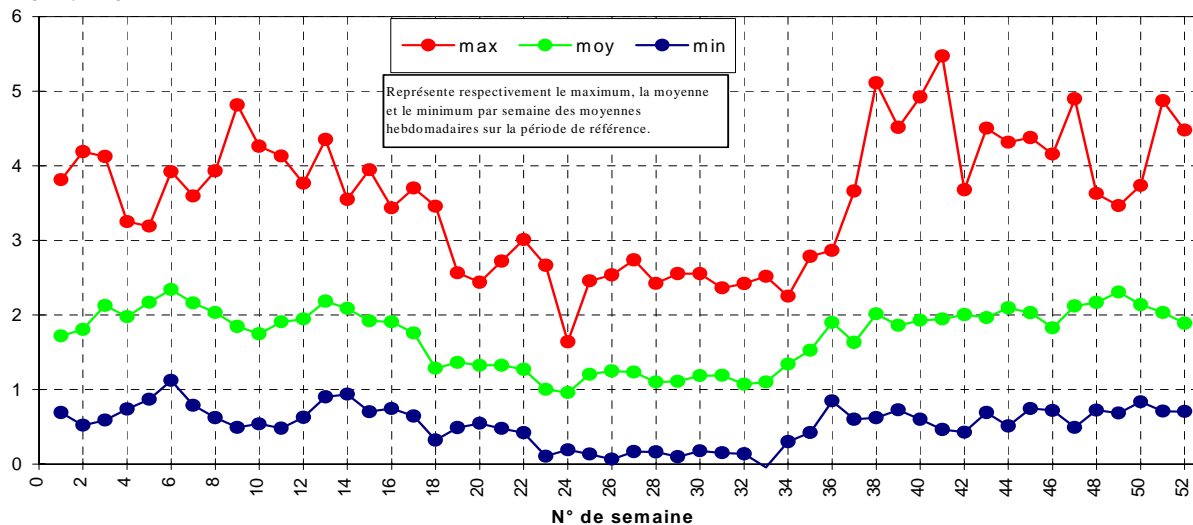
**5 - Régime annuel sur les moyennes mensuelles**

ECH en °C



**6 - Régime annuel sur les moyennes hebdomadaires**

ECH en °C



**CNPE : SAINT ALBAN** **Période de référence : 1991 - 2003**

**1-Tableau des statistiques en moyenne journalière**

Statistiques	ECH en °C
Nombre de données	4749
Moyenne inter-annuelle	1.03
Minimum inter-annuel	0.01
Maximum inter-annuel	3.86
Médiane (50%)	0.9
Ecart Type	0.65
Kurtosis	0.77

Tendance sur la période en	
moyenne annuelle	0.0224
maximum annuel	0.0288
minimum annuel	0.0122

TMNA 5	2.3
période de retour 5 ans	

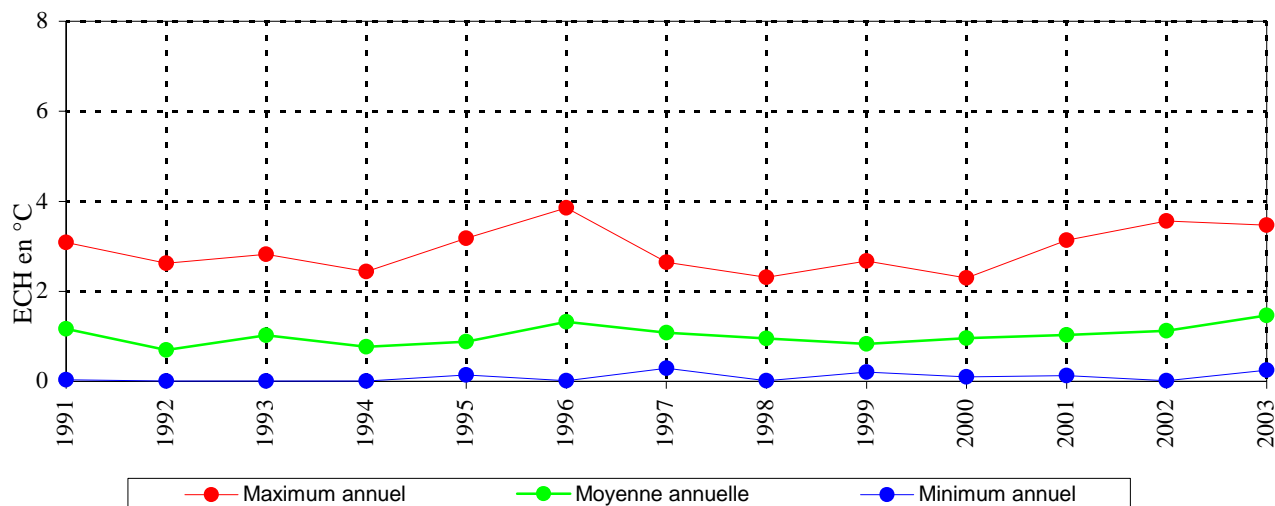
Centiles	ECH en °C	Centiles	ECH en °C
1%	0.0	75%	1.4
5%	0.1	90%	1.9
10%	0.3	95%	2.3
25%	0.5	99%	2.8

**Valeurs extrêmes**

	les plus faibles observées		les plus fortes observées	
1	1	0.0	1	3.9
2	2	0.0	2	3.7
3	3	0.0	3	3.6
4	4	0.0	4	3.6
5	5	0.0	5	3.6

TCN 7 jours	2.6	TCN 30 jours	1.8
période de retour 5 ans			

**2-Graphique d'évolution des moyennes annuelles**







**CNPE : TRICASTIN** **Période de référence : 1991 - 2003**

**1-Tableau des statistiques en moyenne journalière**

Statistiques	ECH en °C
Nombre de données	4749
Moyenne inter-annuelle	1.34
Minimum inter-annuel	0.33
Maximum inter-annuel	4.05
Médiane (50%)	1.2
Ecart Type	0.61
Kurtosis	0.91

Centiles	ECH en °C	Centiles	ECH en °C
1%	0.5	75%	1.7
5%	0.6	90%	2.2
10%	0.7	95%	2.5
25%	0.9	99%	3.1

Tendance sur la période en	
moyenne annuelle	0.0124
maximum annuel	0.0303
minimum annuel	0.0104

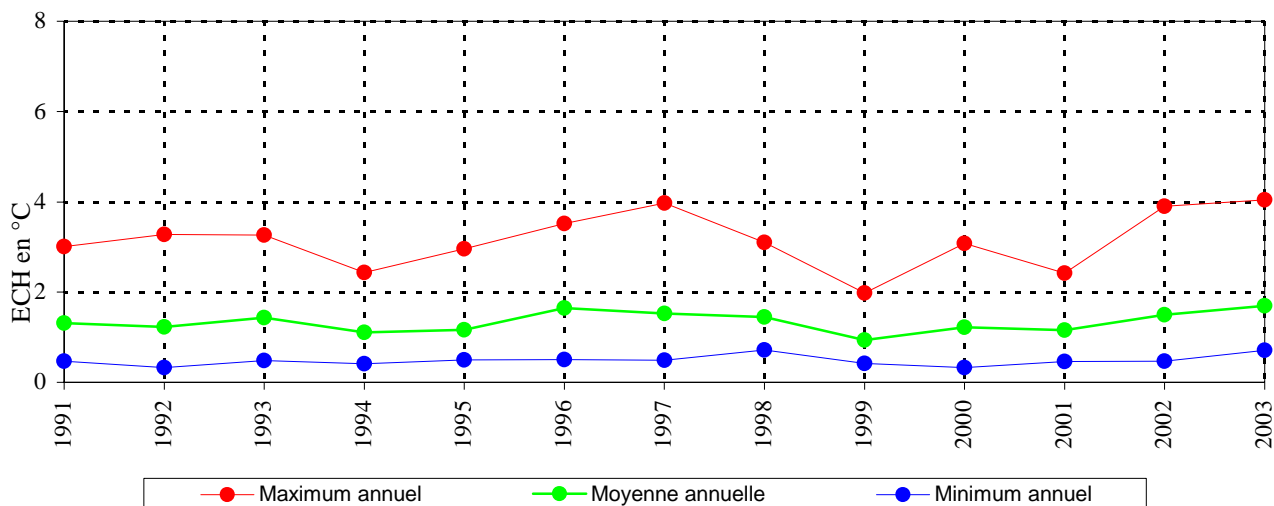
**Valeurs extrêmes**

	les plus faibles observées		les plus fortes observées	
1	1	0.3	1	4.0
2	2	0.3	2	4.0
3	3	0.3	3	3.9
4	4	0.3	4	3.9
5	5	0.4	5	3.8

TMNA 5	2.5
période de retour 5 ans	

TCN 7 jours	2.8	TCN 30 jours	2.0
période de retour 5 ans			

**2-Graphique d'évolution des moyennes annuelles**





## **ANNEXE 3 : PRINCIPES DE LA MODÉLISATION PAR RÉSEAU DE NEURONES**

## 1. PRINCIPE DE L'ÉTUDE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES

Cet outil statistique 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 par exemple aucune supposition sur le fait que la relation qui lie température de l'air et de l'eau soit linéaire ou en  $(\Delta T_{air-Teau})^4$ .

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

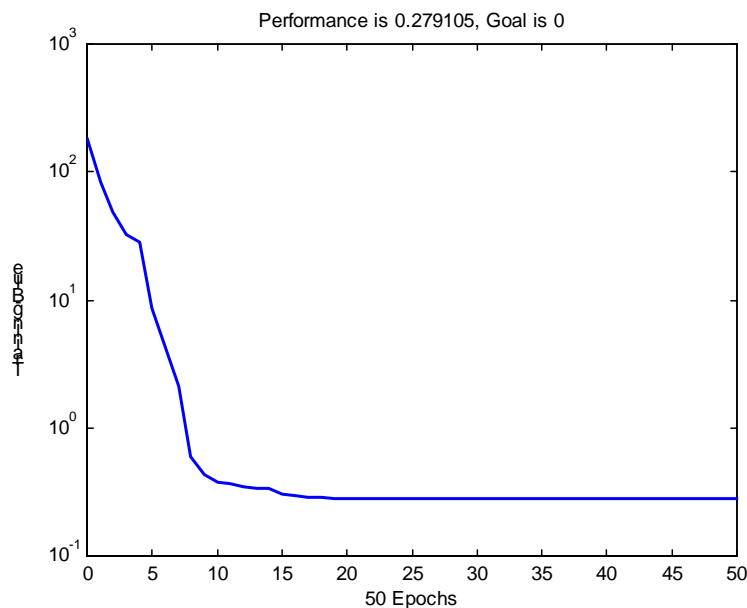
1/ il s'adapte à beaucoup de situations et est donc capable de reproduire même des erreurs de mesure si celles-ci sont rares ou non aléatoires, 2/ il est délicat à utiliser en dehors de sa plage de calage parce qu'être un bon outil d'interpolation ne signifie pas être fiable en extrapolation...

Pour pallier 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.

## 2. EVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES MODÈLES POUR LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

Pour tester l'efficacité des modèles RN, on essaie de retrouver la chronique de Bugey amont à partir des données de Pont de Pougny ( $T^{\circ}Eau$  et débit) et des températures de l'air.

Modèle retenu : réseau de neurones de type "feed-forward backpropagation" avec 1 couche cachée (c'est le minimum possible...), le moins de "neurones" possibles (3 à 5) sans dégrader la performance. Cette structure, la plus simple possible, est choisie pour minimiser le nombre de coefficient à caler en espérant ainsi augmenter la robustesse du modèle et éviter les phénomènes de sur-apprentissage (réseau de plus en plus performant sur l'échantillon de calage et de moins en moins sur l'échantillon de test).





Exemple d'apprentissage (diminution de l'erreur quadratique moyenne par rétro-propagation de l'erreur en fonction des « séances » d'apprentissage).

**ANNEXE 4 :EXEMPLES DETAILLES DE MODELISATION DES  
TEMPERATURES DE L'EAU**

## 1. MODÉLISATION DU TRONÇON : POUIGNY – BUGEY AMONT

Le calage d'un réseau permettant d'estimer les températures à l'amont de Bugey à partir des températures l'eau à Pont de Pougny, des températures de l'air et des débits a permis de mettre au point la méthode précédemment décrite.

Définition des périodes de calage et de test : calage 1991-1996 ; test 1997 – 2003.

Nombre de neurones de la couche cachée : 4.

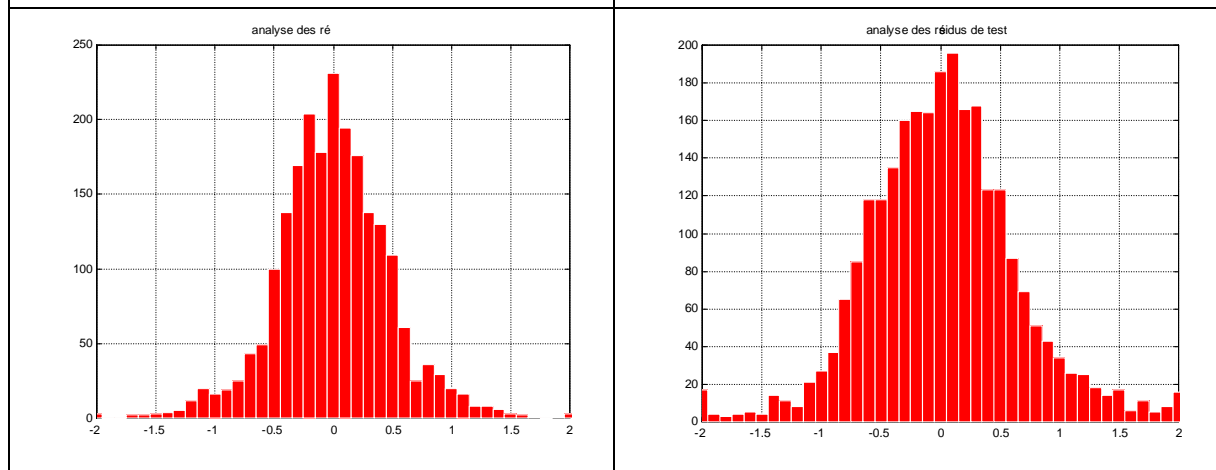
16 variables utilisées : [Durée jour/nuit], [T° à Pougny(j-1 à j-4)], [Q à Pougny(j-1 à j-4)], [Q à Lagnieu(j)], [T° Air (j à j-4)], [Indice des TAir antérieures {0.1\*Tair(j)+0.9\*Indice(j-1)} ].

La qualité du modèle est évaluée au regard de 3 critères, surtout sur l'échantillon de test :

- La comparaison des coefficients de corrélation obtenus par rapport à l'autocorrélation (i.e. le modèle le plus simple consistant à prendre pour j+1 la valeur de j).
- La comparaison de ces mêmes coefficients non plus sur la série mais sur la variation d'un jour sur l'autre.
- La distribution des écarts modèle/mesure.

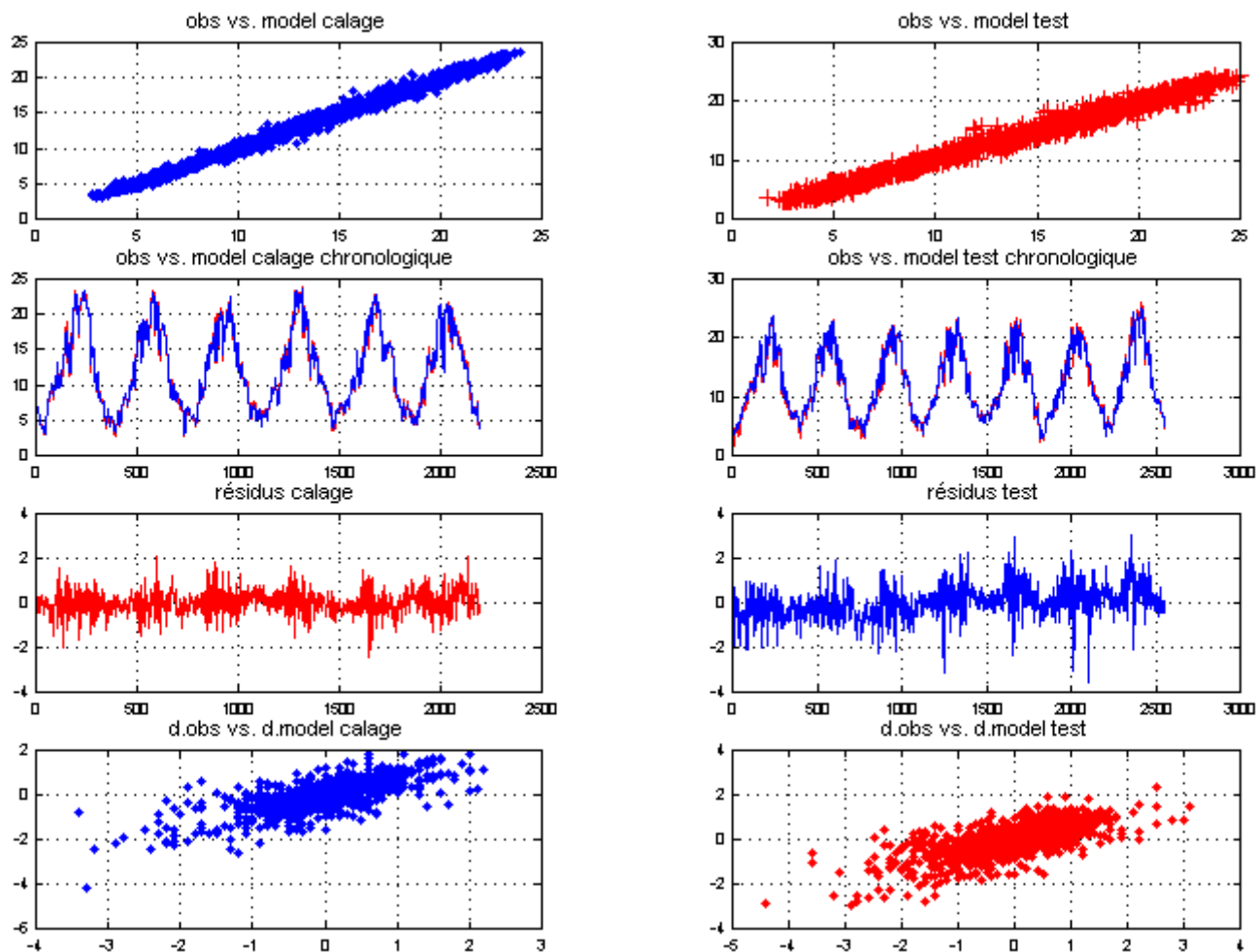
Le tableau, ci-après, illustre ces 3 critères :

Calage		Test	
autocorrélation obs	= 0.9951	autocorrélation obs	= 0.994
Autocorr. sur dObs	= 0.499	autocorr. sur dObs	= 0.4383
corrélation mod/obs	= 0.9964	corrélation mod/obs	= 0.9937
corrélation dMod/dObs	= 0.731	corrélation dMod/dObs	= 0.6987
Moyenne résidu calage	= -8e-6	Moyenne résidu test	= 0.034
Résidu maximal	= 1.84	Résidu maximal	= 3.294



Pour compléter cette vision, 4 graphiques complémentaires sont visualisés sur la période de calage et celle de test : comparaison modèle/mesure en graphe XY et en graphe chronologique, idem pour les variations d'un jour sur l'autre.





Dans l'exemple, ci-dessus, les résultats obtenus en valeur naturelle des variables sont tout à fait comparables aux auto-corrélations des séries. Il faut noter que celles-ci sont très fortes et que, par conséquent les modèles obtenus sont seulement aussi satisfaisants que le modèle de persistance (qui consiste à prendre comme valeur du jour celle de la veille).

Par contre, si on s'intéresse aux variations d'un jour sur l'autre, sur l'échantillon de test, l'auto-corrélation n'est plus que de 0.438 alors que le modèle RN atteint 0.686.

De ce fait, il s'avère assez performant pour expliquer les variations constatées d'un jour sur l'autre à Bugey à partir des données de l'amont uniquement. La robustesse du modèle RN se trouve également dans les résultats de l'année 2003, très correctement simulée bien qu'elle soit en dehors des limites d'apprentissage du réseau.

La structure des résidus est assez satisfaisante sur l'échantillon de test : centrée sur 0, à peine plus dispersée que sur l'échantillon de calage...Par contre, sa structure temporelle met en évidence une période avant/après 1999 avec des résidus plutôt négatifs sur 1977-1999 et plutôt positifs sur 2000-2003. De même, les résidus sont plus importants en été qu'en hiver (en absolu) mais similaires en relatif.

## 2. MODÉLISATION PAR RÉSEAU DE NEURONES DU TRONÇON BUGEY – ST ALBAN AVEC ÉCHAUFFEMENT DU CNPE DE BUGEY

Ce paragraphe constitue un exemple détaillé du travail effectué sur chaque tronçon.

### 2.1. PRINCIPE D'ANALYSE DES EFFETS DU CNPE DU BUGEY À ST ALBAN

Le principe d'analyse est le suivant :

- Calage d'un premier réseau intégrant toutes les variables amont significatives (T° amont Bugey, T°Saône, T°Air, Débits...+ l'échauffement lié à Bugey),
- Sans modifier le calage, mise à 0 des échauffements de Bugey (pour simuler le non fonctionnement de Bugey),
- Calage d'un second réseau sans les échauffements de Bugey (intègre indirectement les liens entre l'échauffement de Bugey et les autres variables : débit pour la dilution, T°Air pour l'appel de puissance).
- Comparaison des 3 modèles.

### 2.2. MISE AU POINT DU RÉSEAU INTÉGRANT TOUTES LES VARIABLES

Pour limiter les variables du réseau, toutes les variables ont d'abord été introduites, puis on a cherché à enlever des variables redondantes ou déductibles des autres, dans la mesure où leur retrait n'abaisse pas les performances du réseau.

Assez logiquement, les variables de débits sur les affluents et sur le Rhône amont n'interviennent pas si on suppose connu le débit à St Alban qui les intègre toutes. Au final, c'est cette seule variable qui a été conservé pour le débit.

Plus curieusement, les Températures de l'eau de l'Ain et de la Saône semblent très peu influentes car très fortement liées aux températures de l'air. La prise en compte des T°Air de j à j-5 et d'une variable Indice des Températures de l'Air antérieures [lissage exponentiel de la forme :  $0.1 \cdot T_{Air}(j) + 0.9 \cdot \text{Indice}(j-1)$ ] permet de s'en affranchir. Il apparaît donc que la connaissance du débit à St Alban et des T°Air suffit au réseau pour intégrer l'effet des affluents...

Au final, les variables retenues sont donc :

- la durée Jour/Nuit,
- le débit à St Alban (j),
- les T°Eau à Bugey amont de j-1 à j-4,
- les échauffements dûs à Bugey de j-1 à j-4,
- les T°Air à Lyon de j à j-4,
- l'indice de T°Air antérieures Ind90.

### 2.3. CALAGE ET RÉSULTATS DU RÉSEAU COMPLET

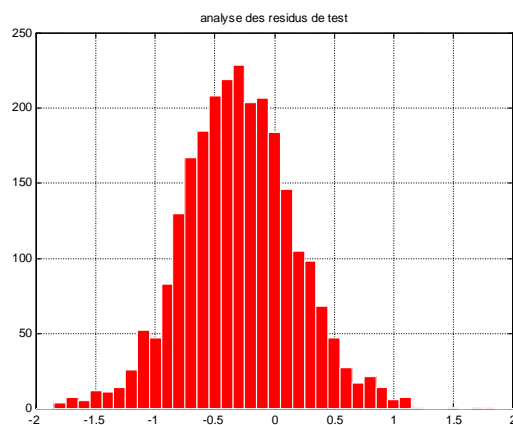
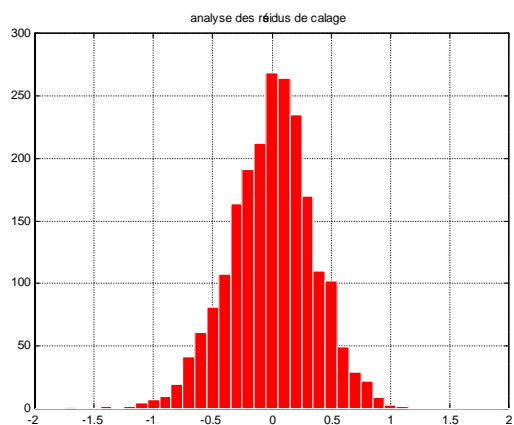
Définition des périodes de calage et de test : calage 1991-1996 ; test 1997 – 2003.

Nombre de neurones de la couche cachée : 5.

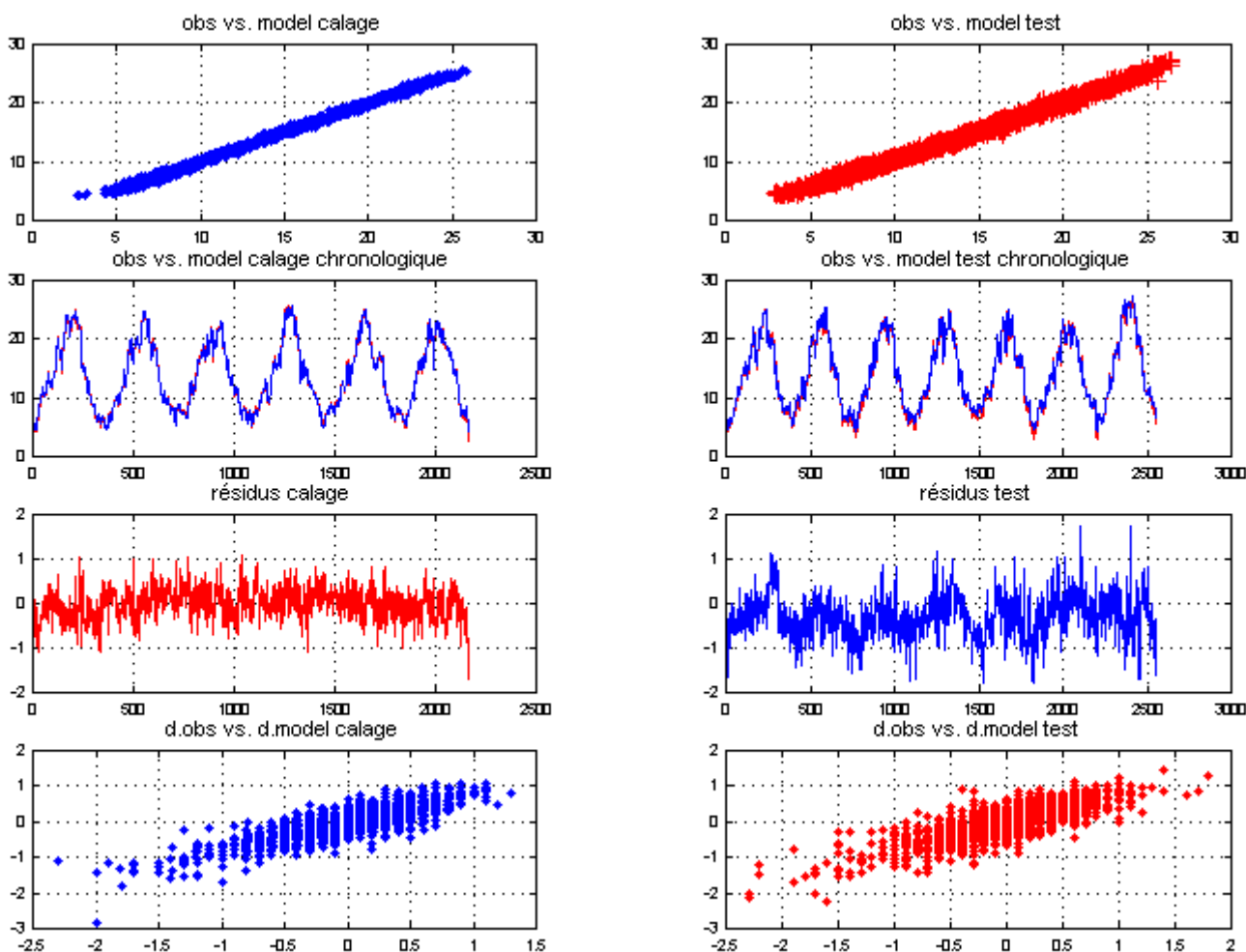
16 variables utilisées : [Durée Jour/nuit], [T° à Bugey(j-1 à j-4)], [Ech à Bugey(j-1 à j-4)], [Q à StAlban(j)], [T° air(j à j-4)], [Indice des TAir antérieures  $\{=0.1 \cdot T_{air}(j) + 0.9 \cdot \text{Indice}(j-1)\}$ ].

Résultats du réseau :

Calage		Test	
autocorrélation obs	= 0.9974	autocorrélation obs	= 0.9975
Autocorr. sur dObs	= 0.5360	autocorr. sur dObs	= 0.5311
corrélation mod/obs	= 0.9980	corrélation mod/obs	= 0.9973
corrélation dMod/dObs	= 0.8307	corrélation dMod/dObs	= 0.8012
Moyenne résidu calage	= -4e-08	Moyenne résidu test	= -0.293
Résidu maximal	= 1.07	Résidu maximal	= 1.76



Graphes observé/prévu et chronologiques sur les températures et les variations de température à St Alban amont



Par rapport à Pougny->Bugey, le réseau Bugey->StAlban est de bien meilleure qualité en valeur absolue avec 64% de variance expliquée sur les variations amont-aval au lieu de 50% sur Pougny->Bugey.

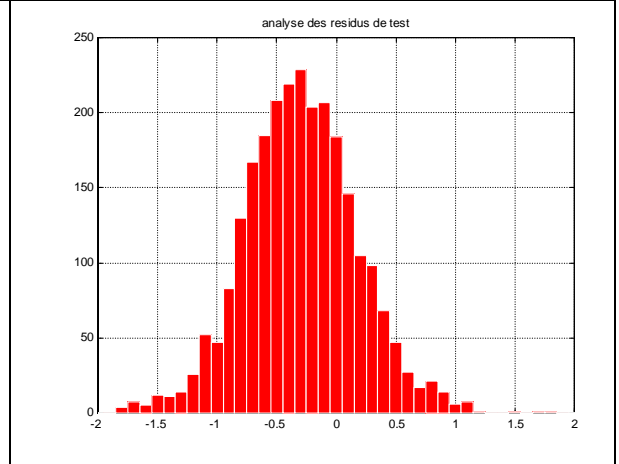
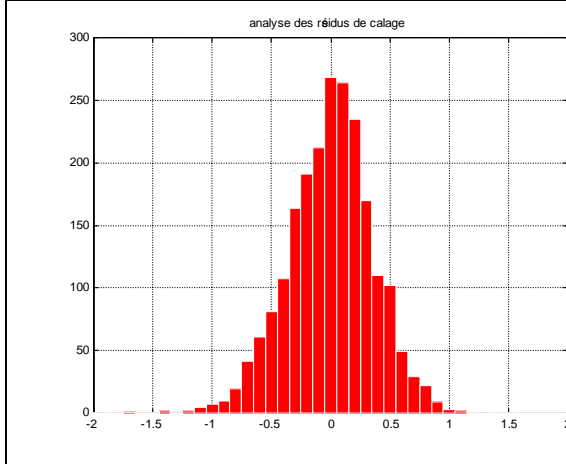
Par contre, sur l'échantillon de test, les résidus montrent un biais systématique de  $-0.3^{\circ}\text{C}$  qu'il reste à expliquer. Ce biais semble beaucoup plus fort durant les périodes hivernales et est peut être à relier aux problèmes de déplacement de la station de température de l'eau de Pont de Chavannay à la drome de St Alban (passage de rive droite à rive gauche du Rhône). Lors de ce changement de station, il avait été mis en évidence que les données de Pont de Chavannay étaient significativement plus froides probablement à cause du support de la sonde (tube inox sur un plot béton) sensible à la température de l'air.

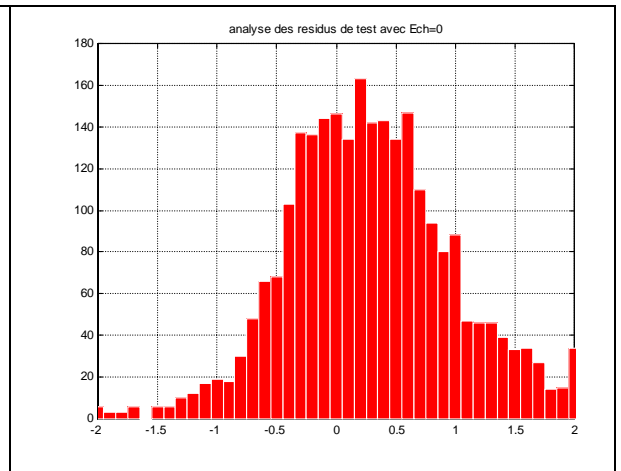
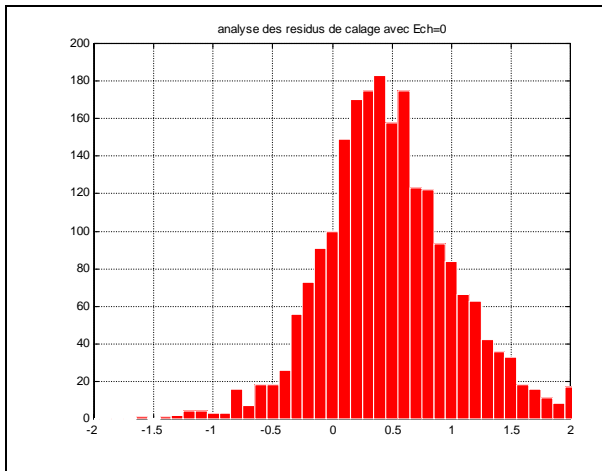
#### 2.4. MISE À ZÉRO DES ÉCHAUFFEMENTS DU CNPE DU BUGEY

La bonne qualité de reconstitution des températures de l'eau amont St Alban à partir des données de Bugey laisse supposer que chaque processus (fonction de transfert des  $T^{\circ}\text{amont}$ , des échauffements du CNPE et des  $T^{\circ}\text{Air}$ ) est correctement pris en compte.

Il existe cependant des relations entre les variables « explicatives » utilisées si bien qu'un processus peut éventuellement être sur ou sous-représenté par ses principales variables explicatives : par exemple l'échauffement est dépendant du débit (dilution). Dans le réseau, la variable débit est donc susceptible « d'embarquer » avec elle une partie du processus échauffement (ou le contraire...). La méthodologie qui consiste à mettre à zéro la variable d'échauffement du CNPE du Bugey pour étudier les températures à St Alban comme si Bugey ne fonctionnait pas n'est donc pas complètement valide... mais ce problème se retrouve à l'identique avec toutes les autres méthodologies qui font intervenir une étape de calage.

Calage	Test
autocorrélation obs = 0.9974	autocorrélation obs = 0.9975
autocorr. sur dObs = 0.5360	autocorr. sur dObs = 0.5311
<b>AVEC ECHAUFFEMENTS</b>	
corrélation mod/obs = 0.9980	corrélation mod/obs = 0.9975
corrélation dMod/dObs = 0.8307	corrélation dMod/dObs = 0.8012
Moyenne résidu calage = -4e-08	Moyenne résidu test = -0.293
Résidu maximal = 1.07	Résidu maximal = 1.76
<b>SANS ECHAUFFEMENTS MIS à 0</b>	
corrélation mod/obs = 0.9955	corrélation mod/obs = 0.9944
corrélation dMod/dObs = 0.7582	corrélation dMod/dObs = 0.7238
Moyenne résidu calage = 0.476	Moyenne résidu test = 0.283
Résidu maximal = 2.52	Résidu maximal = 2.74



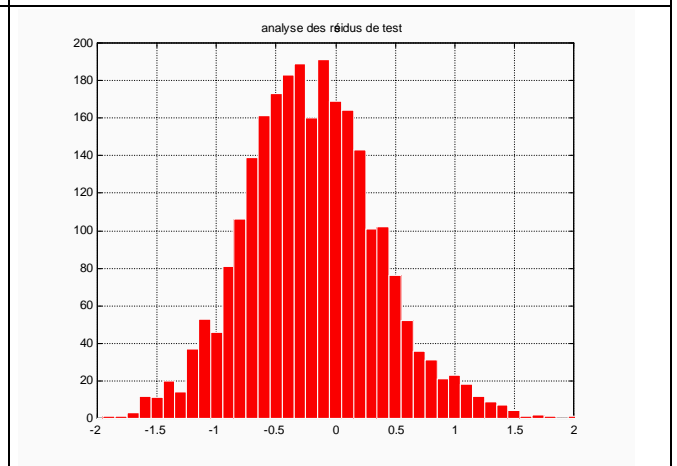
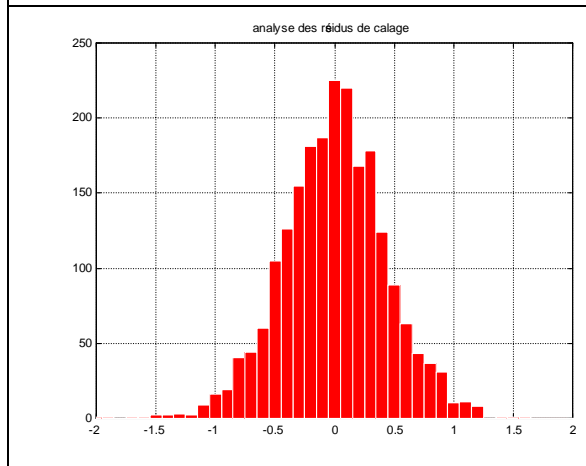


Avec les échauffements mis à zéro, les statistiques se dégradent nettement et un biais systématique apparaît que ce soit sur l'échantillon de calage ou de test. Ce biais atteint environ 0.47°C sur l'échantillon de calage et 0.29+0.28= 0.57 sur l'échantillon de test. Sur l'échantillon de test, la structure des résidus est beaucoup plus étalée, un peu moins excentrée.

## 2.5. CALAGE D'UN RÉSEAU SANS LES VARIABLES D'ÉCHAUFFEMENT

Pour tester la capacité des variables T°Air, débit et T°Eau à reconstituer les échauffements du CNPE du Bugey, on cale un réseau sans les variables d'échauffement :

Calage		Test	
autocorrélation obs	= 0.9974	autocorrélation obs	= 0.9975
autocorr. sur dObs	= 0.5360	autocorr. sur dObs	= 0.5311
corrélation mod/obs	= 0.9971	corrélation mod/obs	= 0.9963
corrélation dMod/dObs	= 0.7531	corrélation dMod/dObs	= 0.7050
Moyenne résidu calage	= -8e-07	Moyenne résidu test	= -0.201
Résidu maximal	= 1.64	Résidu maximal	= 1.99



De manière assez satisfaisante, les caractéristiques statistiques de ce réseau sont très similaires à celles du réseau avec échauffements mis à zéro. L'apport de la variable échauffement du CNPE du Bugey est donc significatif, faisant passer la variance expliquée de 52 à 64%.

Cette variable peut être considérée comme relativement indépendante des autres car la différence entre le réseau avec échauffements mis à zéro et le réseau calé sans la variable échauffement n'est pas significative.

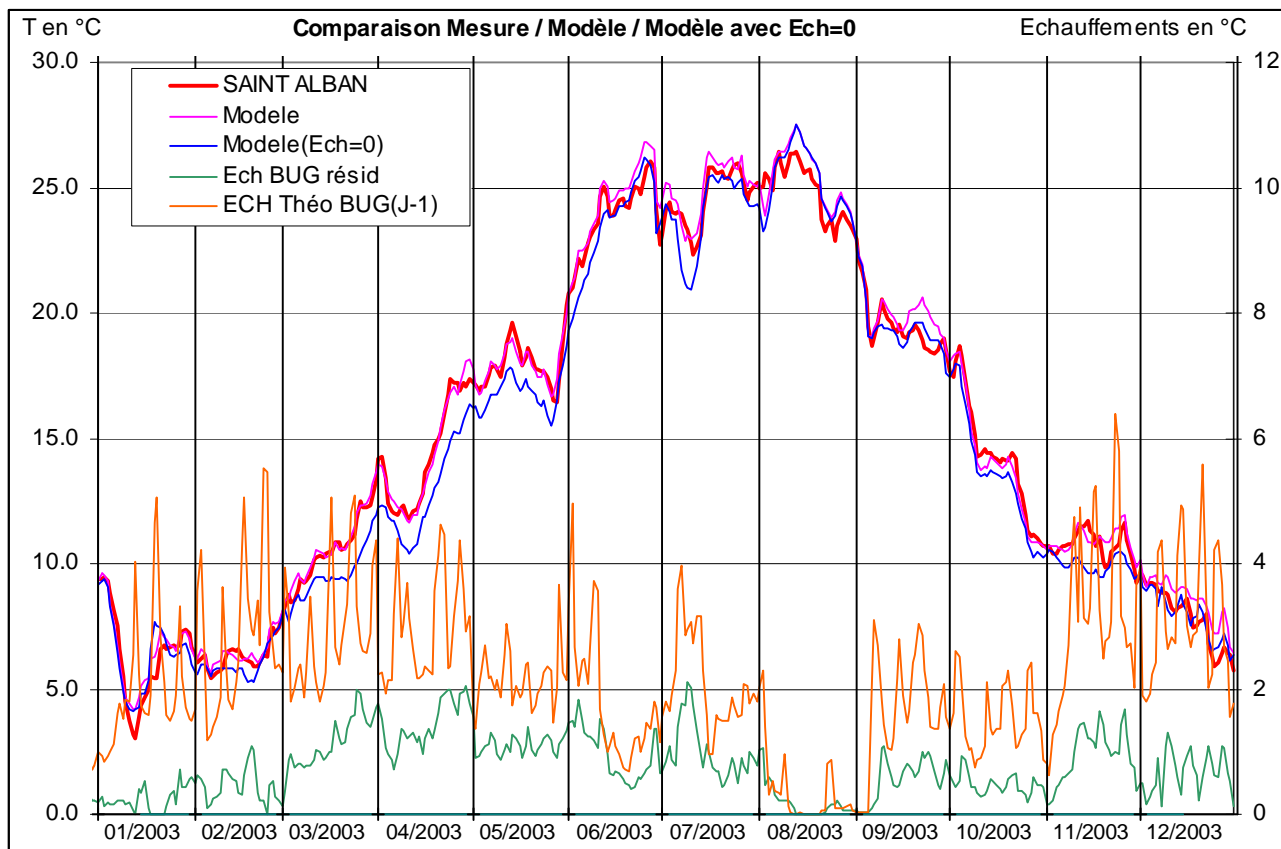
Par contre, le biais trouvé entre échantillon de calage et échantillon de test reste bien visible, traduisant le fait que ce biais n'est pas dans l'échauffement du Bugey...

## 2.6. EXEMPLE D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Par différence entre le réseau avec échauffements réels et le réseau avec échauffements Bugey mis à zéro, on peut estimer la chronique des échauffements résiduels du CNPE du Bugey à St Alban.

Le graphe suivant donne pour 2003 (jamais inclu dans les échantillons de calage),

- la mesure,
- le réseau optimal,
- le réseau avec échauffement mis à zéro,
- l'échauffement du Bugey (à j-1)
- l'écart entre le réseau optimal et le réseau avec échauffement mis à zéro assimilé au résiduel de l'échauffement du Bugey à St Alban amont.



Selon cette approche, le résiduel d'échauffement à St Alban est de 0.54°C pour une moyenne inter-annuelle de 1.72°C en échauffement théorique. Cet échauffement résiduel apparaît bien lié aux conditions atmosphériques, notamment aux périodes où la température de l'air est bien supérieure aux températures de l'eau.

On peut alors repositionner cet échauffement résiduel dans l'espace des variables T°Eau et débit pour mieux visualiser cet impact thermique en fonction des facteurs écologiques principaux :

