



BILAN DES REPONSES ECOSYSTEMIQUES OBSERVEES SUR LE PARC EN SITUATION DE CANICULE

SYNTHESE

Ce document constitue la pièce C du dossier de demande de modifications temporaires des prescriptions associées aux rejets thermiques par recours à l'article R593-40-II du code de l'environnement.

Elle s'appuie sur le retour d'expérience du suivi environnemental des CNPE enregistré lors des derniers épisodes caniculaires (2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022) et sur le bilan des travaux de recherche sur les liens entre la température et l'hydrobiologie (objet des programmes de recherche Thermie-Hydrobiologie 2008 – 2013 et en cours sur 2016 - 2020).

Cette pièce a été préparée pour l'ensemble des CNPE pouvant être potentiellement concernés par ce type de demande (quelle que soit la demande formulée en pièces A et B), soit les **CNPE de Golfech, Bugey, Saint-Alban, et Tricastin**.

Elle se base sur le bilan du retour d'expérience du suivi environnemental des CNPE en période caniculaire, notamment :

- les valeurs maximales de température enregistrées durant les canicules de référence (2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022) ;
- une description du panache thermique de chaque CNPE permettant de délimiter spatialement la zone aval influencée par les rejets thermiques et d'identifier d'éventuelles zones non touchées par le panache ;
- les réponses biologiques et microbiologiques observées durant ces épisodes dans le cadre du suivi environnemental des CNPE ;
- les résultats de la surveillance renforcée mise en œuvre pour les CNPE de Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Golfech lors de la canicule de 2022.

Les programmes de surveillance et les études mis en place notamment pendant et après les canicules de 2003 et 2006 ont permis d'appréhender les répercussions de ces épisodes climatiques exceptionnels sur le fonctionnement des écosystèmes. Depuis, les mesures réalisées lors des épisodes caniculaires plus récents (2015, 2018, 2019 et 2022) sont venues compléter et renforcer les observations de 2003 et 2006.

Les données acquises dans le cadre de la surveillance renforcée des CNPE montrent une modification structurelle temporaire (proportion des espèces) de certains compartiments à l'amont et à l'aval, sans que l'équilibre biologique global du peuplement ne soit remis en cause. Par ailleurs, aucune différence significative, entre l'amont et l'aval des CNPE bord de rivière n'a été mise en évidence pour l'ensemble des compartiments, à l'exception de l'été 2022 concernant la structure du peuplement piscicole pour le CNPE de Saint-Alban, où de faibles effectifs et proportions de juvéniles à l'aval ont été observés en août et à l'automne 2022. Compte tenu

des informations disponibles, cette différence ne peut toutefois pas être attribuée au fonctionnement du CNPE en période de canicule. Cette observation spécifique et unique devra s'apprécier au regard des données qui seront acquises les années suivantes puisque l'évolution de la structure du peuplement piscicole s'apprécie à un pas de temps pluriannuel.

Ainsi, les éléments disponibles à ce jour ne permettent pas de mettre en évidence un effet supplémentaire des rejets thermiques des CNPE par rapport aux effets occasionnés par les évènements climatiques exceptionnels.

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	5
2	DONNEES UTILISEES.....	6
	2.1 SITES ETUDIES.....	6
	2.2 PERIODES ANALYSEES.....	6
	2.3 DONNEES UTILISEES	7
3	RETOUR D'EXPERIENCE DES CANICULES ENTRE 2003 ET 2022.....	8
4	CARACTERISATION DES REJETS THERMIQUES DES CNPE	10
	4.1 GENERALITES SUR LA DILUTION DES REJETS THERMIQUES.....	10
	4.2 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE GOLFECH	11
	4.3 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE BUGEY.....	20
	4.4 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE SAINT-ALBAN.....	29
	4.5 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DU TRICASTIN	41
	4.6 ZOOM SUR LES ECHAUFFEMENTS RESIDUELS SUR LE BASSIN DU RHONE ..	49
	4.7 CONCLUSION	54
5	REPONSES DES ECOSYSTEMES.....	56
	5.1 PHYSICO-CHIMIE DES EAUX.....	56
	5.1.1 RESULTATS 2003 A 2019.....	56
	5.1.2 RESULTATS 2022	57
	5.2 BILAN DES REPONSES BIOLOGIQUES.....	58
	5.2.1 REPONSES COURT-TERME.....	58
	5.2.2 REPONSES LONG-TERME	63
	5.2.3 CONCLUSION SUR LES REPONSES BIOLOGIQUES.....	64
	5.3 BILAN DES REPONSES MICROBIOLOGIQUES	65

5.3.1	BACTERIES INDICATRICES D'UNE CONTAMINATION FECALE (<i>ESCHERICHIA COLI</i> ET ENTEROCOQUES)	65
5.3.2	CYANOBACTERIES	67
5.3.3	AMIBES <i>NAEGLERIA FOWLERI</i>	68
6	OBSERVATIONS BIOLOGIQUES AU REGARD DES TEMPERATURES MAXIMALES RENCONTREES.....	69
6.1	RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA GARONNE AU DROIT DE GOLFECH EN 2019 ET 2022 69	
6.1.1	CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES DE L'ETE 2019	70
6.1.2	RESULTATS DE LA SURVEILLANCE HYDROECOLOGIQUE RENFORCEE EN 2019..	71
6.1.3	CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES DE L'ETE 2022	72
6.1.4	RESULTATS DE LA SURVEILLANCE HYDROECOLOGIQUE RENFORCEE EN 2022..	73
6.1.5	CONCLUSION SUR LES OBSERVATIONS BIOLOGIQUES AU REGARD DES TEMPERATURES MAXIMALES RENCONTREES SUR LA GARONNE AU DROIT DU CNPE DE GOLFECH.....	74
6.2	RETOUR D'EXPERIENCE DU RHONE AU DROIT DE BUGEY SUITE A L'ETE 2022	76
6.2.1	CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES DE L'ETE 2022	76
6.2.2	RESULTATS DE LA SURVEILLANCE HYDROECOLOGIQUE RENFORCEE EN 2022..	77
6.3	RETOUR D'EXPERIENCE DU RHONE AU DROIT DE TRICASTIN EN 2022.....	78
6.3.1	CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES DE L'ETE 2022	78
6.3.2	RESULTATS DE LA SURVEILLANCE HYDROECOLOGIQUE RENFORCEE EN 2022.	80
6.4	CONCLUSION SUR LES OBSERVATIONS BIOLOGIQUES AU REGARD DES TEMPERATURES MAXIMALES RENCONTREES	81
7	CONCLUSION	81
	ANNEXE 1 : CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES, VALEURS PRESENTEES ET CLEF DE LECTURE	83
	ANNEXE 2 : « SYNTHESE DU PROGRAMME DE RECHERCHE THERMIE-HYDROBIOLOGIE (2016-2020) »	84

1 INTRODUCTION

La présente demande de modification des prescriptions sur les rejets thermiques par recours à l'article R593-40-II du code de l'environnement s'appuie d'une part, sur un retour d'expérience du suivi environnemental des CNPE enregistré lors des épisodes caniculaires entre 2003 et 2022, et d'autre part, sur l'engagement d'EDF à poursuivre des travaux de recherche sur les liens entre la température et l'hydrobiologie (objet des programmes de recherche en thermie et hydrobiologie).

L'importance de la température sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, depuis les processus cellulaires jusqu'aux grandes fonctions des écosystèmes, a été confirmée par le programme de recherche Thermie-Hydrobiologie. La complexité des interactions en jeu dans le milieu naturel rend toutefois difficile l'analyse du seul rôle du paramètre température. L'état d'avancement des connaissances scientifiques actuelles sur les liens entre la température et la biocénose est présenté dans la synthèse du programme de recherche Thermie-Hydrobiologie jointe en annexe de la présente pièce.

Le retour d'expérience du suivi environnemental des CNPE en période caniculaire est l'objet principal de cette pièce, où l'on présente successivement :

- les valeurs maximales de température enregistrées durant les canicules de référence entre 2003 et 2022). Il est ainsi possible de comparer un événement extrême avec ces épisodes de référence ;
- une description du panache thermique de chaque CNPE permettant de délimiter spatialement la zone aval influencée par les rejets thermiques et d'identifier d'éventuelles zones non touchées par le panache ;
- les réponses biologiques et microbiologiques observées durant ces épisodes notamment dans le cadre du suivi environnemental des CNPE.

2 DONNEES UTILISEES

2.1 SITES ETUDIES

Les sites étudiés sont les CNPE de Golfech, Bugey, Saint-Alban et Tricastin.

2.2 PERIODES ANALYSEES

Les étés 2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022 constituent les épisodes caniculaires de référence.

- **Des canicules historiques : 2003 et 2006**

La différence notable entre les épisodes de 2003 et 2006 provient des déficits pluviométriques accumulés entre 2003 et 2005 (source : publication du Conseil Supérieur de la Pêche du 24 juillet 2006 « La situation des milieux aquatiques en France en juillet 2006 »).

Ces deux canicules restent les épisodes de référence en termes de températures pour la majorité des CNPE, avec notamment des records historiques pour les températures d'eau atteintes en amont des CNPE (Cf. Tableau 1).

- **Un été 2022 exceptionnellement chaud et sec**

L'été 2022 a été le deuxième été le plus chaud depuis 1900 et le 10^{ème} été le plus sec depuis 1959. Il a été marqué par une succession de trois vagues de chaleur. Durant l'été 2022, 33 jours cumulés de vague de chaleur ont été recensés (record depuis 1947 – source Météo-France). Un déficit de précipitations a aussi été observé durant l'été 2022 avec notamment un mois de juillet exceptionnellement sec (mois le plus sec jamais enregistré).

Concernant le fonctionnement des CNPE, l'été 2022 a été marqué par le passage en Situation Exceptionnelle (SE) en lien avec les autorisations temporaires accordées aux CNPE de Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Golfech à fonctionner au-delà des limites réglementaires prévues dans leurs autorisations de rejet (limites en conditions climatiques normales¹ - CCN) et/ou limites en conditions climatiques exceptionnelles - CCE) en raison de la demande pour nécessité publique de maintien de ces CNPE à un maximum de puissance. Ces autorisations temporaires portent notamment sur les limites prescrites sur la température aval.

Il est à noter que le CNPE de Golfech a eu recours dans un premier temps aux limites thermiques fixées en CCE² du 15 au 22 juillet 2022 et le 4 août 2022 (sur la base d'un requis RTE à un niveau minimum de puissance).

Les limites réglementaires en conditions climatiques normales (CCN) n'avaient pas été dépassées depuis 2006 (sauf sur Golfech en 2018 – cf. §4.2). Les données acquises dans le cadre du programme de surveillance renforcée déployé durant l'été 2022 permettent d'acquérir des données complémentaires sur les épisodes caniculaires et d'évaluer l'influence d'un fonctionnement des CNPE au-delà des limites fixées en conditions climatiques normales³.

¹-Du fait des conditions de fonctionnement non prévues par les décisions limites en CCE et/ou d'une demande de fonctionnement à pleine puissance émise par la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC – Ministère de la Transition écologique) au-delà du requis de puissance sur le réseau électrique par RTE.

² Appellées « situations climatiques exceptionnelles » au titre de l'arrêté de rejet du 18 septembre 2006.

2.3 DONNEES UTILISEES

Les données utilisées pour constituer la présente synthèse comportent :

- Les données thermiques acquises par le CNPE dans le cadre du suivi réglementaire des limites thermiques. Des relevés in-situ (thermographies aériennes, profils de température, mesures en points fixes) complètent ce suivi en caractérisant l'étendue et les caractéristiques du panache thermique ;
- Les données de la surveillance environnementale pérenne des CNPE (i.e. surveillance en conditions climatiques normales) ;
- Les données acquises par l'enclenchement de dispositions propres à la surveillance en cas d'épisode caniculaire. Elles concernent principalement des données acquises pendant ou à la suite de l'épisode caniculaire de 2003.
- Les données acquises lors de la surveillance renforcée mise en œuvre en 2022³.

³ D455022006439 indice 1 – Bilan du fonctionnement des centrales nucléaires du Blayais, de Saint-Alban-Saint-Maurice, de Golfech, du Tricastin et du Bugey pendant la période estivale 2022.

3 RETOUR D'EXPERIENCE DES CANICULES ENTRE 2003 ET 2022

Ce chapitre décrit les températures maximales observées en amont et en aval de chaque CNPE durant les canicules entre 2003 et 2022 qui sont les épisodes caniculaires de référence. Le panache thermique est décrit pour chaque CNPE au chapitre suivant.

Au cours de ces épisodes caniculaires, ont été enregistrées les plus fortes températures des cours d'eau au droit des CNPE sur la période de données disponibles. Les températures maximales sont présentées dans les Tableau 1 (températures amont) et Tableau 2 (températures aval). Les périodes analysées correspondent aux périodes estivales (ces températures maximales ayant toutes été atteintes entre juillet et août).

Tableau 1 : Températures maximales mesurées en amont (en moyenne journalière) des CNPE situés en bord de rivière lors des étés 2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022 (les cases correspondent aux valeurs maximales sur l'ensemble des données disponibles).

Bassin	CNPE	Eté 2003	Eté 2006	Eté 2015	Eté 2018	Eté 2019	Eté 2022
Garonne	Golfech	29,6 °C	29,0 °C	27,5 °C	28,1°C	29,2°C	29 ,1°C
Rhône	Bugey	25,9 °C	25,7 °C	24,9 °C	24,7°C	24,4°C	25,2°C
	Saint-Alban	26,5 °C	26,8 °C	26,8 °C	26,9°C	26,6°C	26,6°C
	Tricastin	25,9 °C	26,1 °C	25,6 °C	26,1°C	26,4°C	25,7°C

Les canicules ayant conduit aux températures **en amont** les plus élevées sont celles de :

- 2003 pour les CNPE de Golfech et Bugey;
- 2018 pour le CNPE de Saint-Alban ;
- 2019 pour le CNPE de Tricastin.

Tableau 2 : Températures maximales (mesurées ou calculées en moyenne journalière) en aval des CNPE lors des étés 2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022 (les cases correspondent aux valeurs maximales sur l'ensemble des données disponibles).

Bassin	CNPE	Limites sur la température aval ⁴		Nature de la donnée	Eté 2003	Eté 2006	Eté 2015	Eté 2018	Eté 2019	Eté 2022
		CCN ⁵	CCE ⁶							
Garonne	Golfech	28 °C	30 °C	Calcul	29,8°C	28,9°C	27,7°C	28,2°C*	29,2°C *	29,2°C
Rhône	Bugey	26 °C	27 °C	Calcul	25,9°C	25,8°C	25,9°C	25,9°C	25,8°C	26,8°C
	Saint-Alban	28 °C	29 °C	Calcul	27,4°C	27,6°C	28,0°C	28,0°C	27,9°C	28,0°C**
	Tricastin	28 °C	29 °C	Calcul	28,7°C	27,8°C	27,8°C	27,5°C	27,5°C	28,6°C

* A noter pour Golfech, la température maximale indiquée en 2019 correspond à la valeur maximale **mesurée** en amont car le CNPE était à l'arrêt lors de la période où les températures ont été les plus chaudes (il s'agit donc d'une température non influencée par le CNPE). En 2018, elle correspond à la valeur maximale calculée durant la courte période où le CNPE a utilisé les limites en CCE, en raison de la demande de RTE de maintien en puissance d'un réacteur du CNPE de Golfech à une puissance de 1000 MW. Lors de tous les autres épisodes (mise à part 2015), la température en amont a dépassé au moins une fois le seuil de 28°C associé aux limites en conditions climatiques normales.

** En 2022, la température aval en aval du CNPE de Saint-Alban a dépassé la limite prescrite en CCN avec une température de 28,04°C. La valeur présentée dans le tableau ci-dessus est arrondie.

⁴ Limites en vigueur au 1er janvier 2020

⁵ CCN : Conditions Climatiques Normales.

⁶ CCE : Conditions Climatiques Exceptionnelles.

4 CARACTERISATION DES REJETS THERMIQUES DES CNPE

Une description des panaches thermiques des CNPE de Golfech, Bugey, Saint-Alban et Tricastin est présentée dans ce chapitre. Elle s'appuie sur l'ensemble des données thermiques recueillies en période estivale (principalement des profils de température et/ou thermographies aériennes). Les échauffements résiduels en champ lointain à l'aval du CNPE de Golfech et des CNPE de la vallée du Rhône sont également présentés.

4.1 GENERALITES SUR LA DILUTION DES REJETS THERMIQUES

Les caractéristiques d'un panache thermique (intensité, extension latérale de la veine de rejet, stratification verticale) dépendent de nombreux facteurs. On citera notamment le type de refroidissement (circuit ouvert/fermé), la puissance du CNPE (fonctionnement à pleine charge ou à charge réduite), le type d'ouvrage de rejet (rejet en berge ou conduite multipores), mais également des paramètres environnementaux comme les conditions hydrauliques du cours d'eau récepteur (qui dépendent du faciès d'écoulement dans la portion du milieu récepteur concernée) et dans une moindre mesure, les conditions météorologiques qui conditionnent les échanges thermiques air-eau (température de l'air, vent, nébulosité, humidité de l'air).

Pour les CNPE en bord de rivière, le débit du cours d'eau influe directement sur la dilution des rejets thermiques dans le milieu récepteur, et donc sur l'échauffement après mélange. Sont présentés ci-dessous les débits de référence mesurés pour tous les CNPE de bord de rivière présentés au présent dossier :

Tableau 3: Débits de référence par CNPE.

Bassin	CNPE	Période des données utilisées pour l'analyse statistique	QMNA-5 ⁷	VCN3-10 ⁸	Module
Garonne	Golfech ⁹	1967 – 2019	74 m ³ /s	45 m ³ /s	388 m ³ /s
Rhône	Bugey ¹⁰	1920 – 2018	202 m ³ /s	141 m ³ /s	455 m ³ /s
	Saint-Alban ¹¹	1972 – 2019	356 m ³ /s	233 m ³ /s	1020 m ³ /s
	Tricastin ¹²	1952 – 2017	498 m ³ /s	325 m ³ /s	1250 m ³ /s

⁷ QMNA-5 : débit mensuel minimum annuel, de période de retour 5 ans.

⁸ VCN3-10 : débit moyen des 3 jours consécutifs les plus faibles de l'année, de période de retour 10 ans.

⁹ Débit à la station de Lamagistère

¹⁰ Débit à la station de Lagnieu

¹¹ Débit à la station de Ternay

¹² Débit dans le canal de Donzère (Rhône)

L'étiage correspond aux situations où la dilution complète est atteinte plus rapidement en aval (le mélange étant meilleur à bas débit), tandis que les échauffements après mélange peuvent être plus élevés¹³. Ces valeurs sont à comparer aux débits observés lors des campagnes de mesure des panaches thermiques présentées ci-après.

Dans la suite, le panache thermique est caractérisé pour chaque CNPE à l'appui des données thermiques relevées en période estivale. Chaque illustration est accompagnée d'informations sur les conditions de mesure permettant de replacer la donnée dans le contexte de la demande formulée dans le présent dossier.

4.2 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE GOLFECH

Le CNPE de Golfech est situé sur la Garonne à 40 km à l'ouest de Montauban. Il est équipé de 2 tranches 1300 MW en circuit fermé. Le prélèvement est réalisé au droit du canal de dérivation de Golfech, en aval de la retenue de Malause, et le rejet est réalisé via une conduite multipores (6 asperseurs alignés transversalement dans la Garonne) située à environ 200 m en aval de la confluence du canal de restitution avec la Garonne.

Les échanges thermiques air-eau dans les tours aéroréfrigérantes sont plus efficaces en période estivale en raison d'un air plus sec. Cet accroissement de la performance des tours aéroréfrigérantes avec l'augmentation de la température de l'air contribue aussi à limiter à quelques dixièmes de degré l'échauffement de la Garonne après mélange apporté par le CNPE de Golfech.

• Caractérisation du panache thermique

En aval de l'ouvrage de rejet, le panache thermique a été étudié au moyen de plusieurs thermographies aériennes réalisées en août 2006, mars 2007, juillet 2015, août 2018, juillet 2019 et juillet 2022. La thermographie de juillet 2022 a été réalisée alors que le CNPE fonctionnait en conditions climatiques exceptionnelles (température en aval après mélange > 28°C). D'importants moyens de mesure ont également été déployés sur Golfech pour caractériser plus finement l'hétérogénéité spatiale des températures en aval du rejet dans le cadre du Groupe de Travail initié en 2006 par le ministère en charge de l'Environnement, EDF et l'ASN, portant sur l'impact thermique des CNPE en situation de canicule : des campagnes de mesures de température (transects et points fixes) ont ainsi été réalisées lors des étés de 2007 à 2012. Seules les thermographies aériennes réalisées en période estivale sont présentées dans ce paragraphe car elles permettent de décrire précisément les caractéristiques du panache thermique.

Les résultats de ces campagnes ont permis de montrer qu'à côté de la veine d'eau échauffée existent des zones non-échauffées. En situation estivale (dans les conditions rencontrées lors des mesures), la zone située aux abords du CNPE présente une hétérogénéité spatiale des températures (de l'aval immédiat du rejet jusqu'à 1 km environ) en raison :

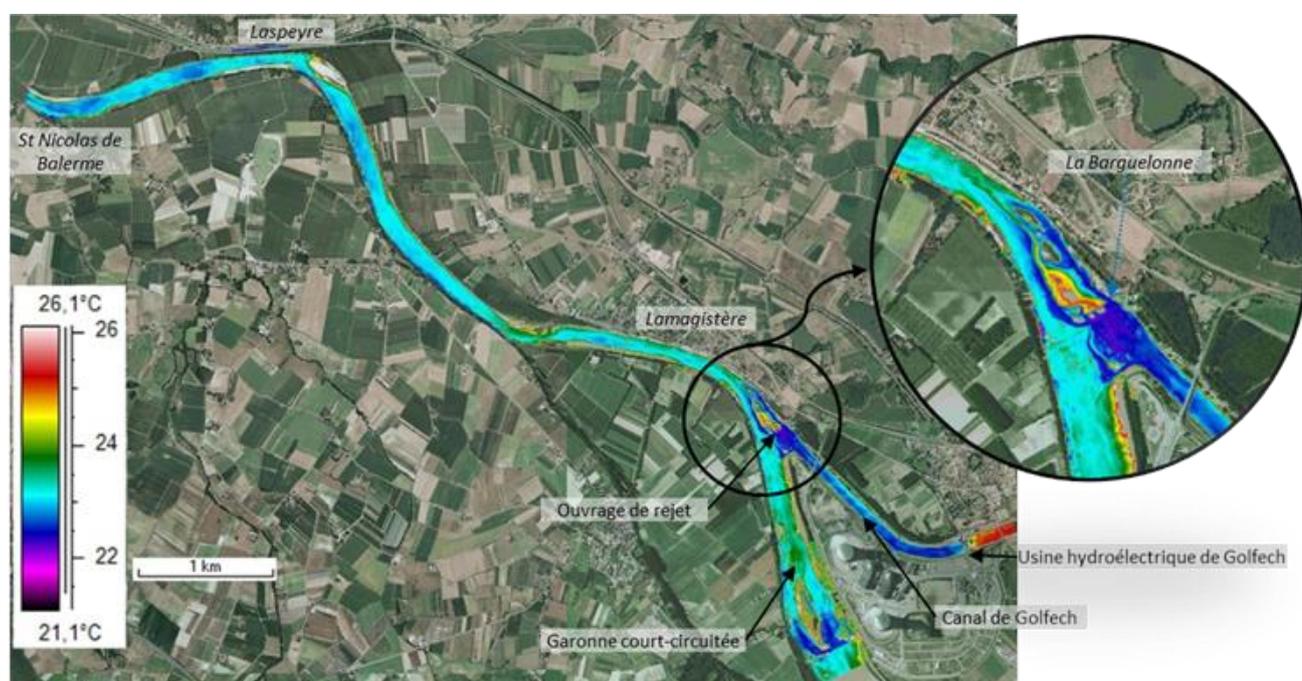
- de la gestion de l'eau en amont du site, où les températures peuvent être plus élevées qu'au droit des rejets du CNPE (au niveau de la retenue de Malause et sur le Tarn) ;
- de la présence de zones d'eaux peu profondes et d'herbiers où les températures sont plus élevées que les zones d'eaux courantes ;
- de l'apport d'eau froide de la Barguelonne visible en rive droite.

¹³ Notamment pour les CNPE en circuit ouvert. L'échauffement des CNPE en circuit fermé est également dépendant des conditions météorologiques.

- **Données acquises en période estivale**

- **Thermographie du 23 août 2006**

La Figure 1 présente ci-dessous la thermographie aérienne réalisée le 23 août 2006 entre 16h30 et 17h30 pour un débit en Garonne de 47 m³/s à Lamagistère. Le CNPE fonctionne à 100 % de puissance. L'eau prélevée par le CNPE correspond à l'eau turbinée en fond de canal, plus frais que la Garonne ; elle est mesurée à 23,1°C. En sortie des buses de rejet en Garonne, l'eau est mesurée à 28,3°C et à 26,4°C à 200 m du rejet. A 800 m, la Garonne est relativement homogène à environ 24°C, une température comparable à celle mesurée dans le tronçon court-circuité au droit du CNPE. Cette situation correspond à un échauffement calculé après mélange de 0,75°C. La dilution rapide du rejet thermique est favorisée par le positionnement des diffuseurs dans la prolongation du canal de restitution, plus frais que la Garonne.



**Figure 1 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Golfech durant l'été 2006.
A gauche : vue globale ; à droite : zoom sur la zone de rejet (conduite multipores).**

- **Thermographie du 28 juillet 2015**

Une thermographie a également été réalisée le 28 juillet 2015 (Figures 2 et 3), pour un débit en Garonne de 71 m³/s¹⁴, avec la tranche 2 à 100 % de puissance et la tranche 1 à environ 75 %. L'échauffement calculé après mélange est de 0,1 °C (moyenne horaire à 14 h).

Sur la Garonne court-circuitée en amont du CNPE, la température est d'environ 25,5°C. Plus en aval, juste avant la confluence avec le canal de Golfech, la température de surface est comparable à celle du canal au même niveau (entre 25,2°C et 25,3°C). La température du canal augmente depuis l'usine hydro-électrique de Golfech

¹⁴ Débit moyen journalier le 28/07/2015.

(24,7°C) jusqu'à la confluence avec la Garonne (25,2°C) en raison des faibles profondeurs d'eau, plus sensibles aux conditions atmosphériques.

Au niveau de la confluence entre le canal et la Garonne, on observe au milieu du lit des températures naturellement plus élevées (entre 26,0°C et 29,0°C), liée à une zone d'accumulation de sédiments avec des eaux très peu profondes et à la présence de macrophytes partiellement émergés.

Plus en aval, on visualise nettement les buses de rejet au-dessus desquelles la température est comprise entre 30,0°C et 31,6°C (juste au-dessus des exutoires). La température diminue ensuite rapidement entre 26,0°C et 28,0°C sur une zone qui s'étend sur 300 m de long et 100 m de large (Figure 2), la température d'eau restant plus élevée en raison de faible profondeur d'eau dans certaines zones.

Environ 300 m en aval des buses, le panache s'amenuise progressivement pour atteindre une largeur minimum de 15 m et une température de 26,3°C, soit environ 0,8°C de plus qu'en rive gauche où une veine froide est maintenue (hors influence du panache). La rive gauche reste relativement plus fraîche en aval, avec une moyenne de 25,5°C contre 25,9°C en rive droite, à 800 m en aval du pont de Lamagistère. Le courant plus intense en rive gauche explique en partie ces différences.

Après ce méandre de la Garonne jusqu'au niveau de Laspeyre (Figure 3), la température de l'eau varie peu (25,7°C en moyenne). Après Laspeyre et jusqu'à St Nicolas de Balermé, on observe un léger rafraîchissement de la Garonne, avec une température moyenne de 25,4 °C.

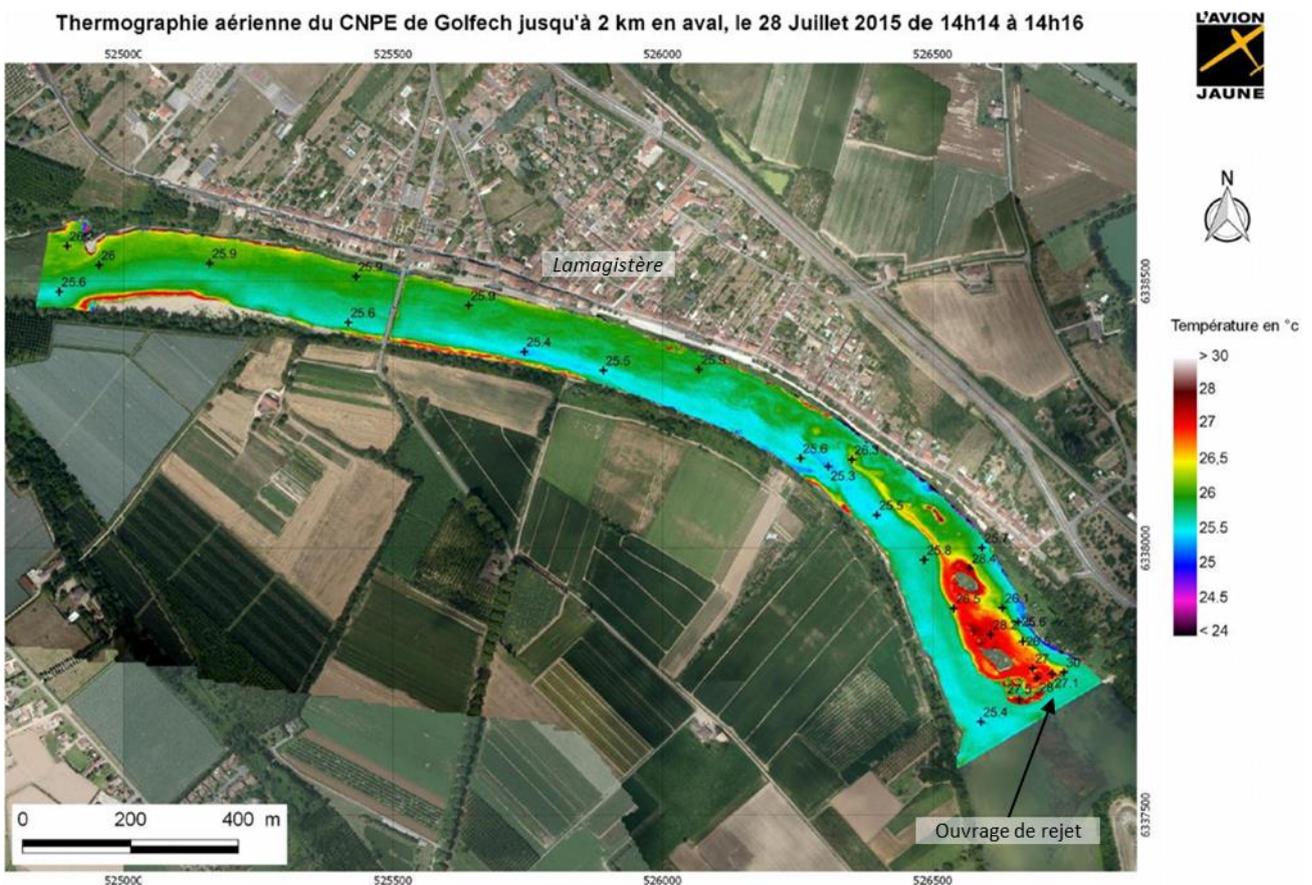


Figure 2 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Golfech durant l'été 2015 (vue sur 2 km).

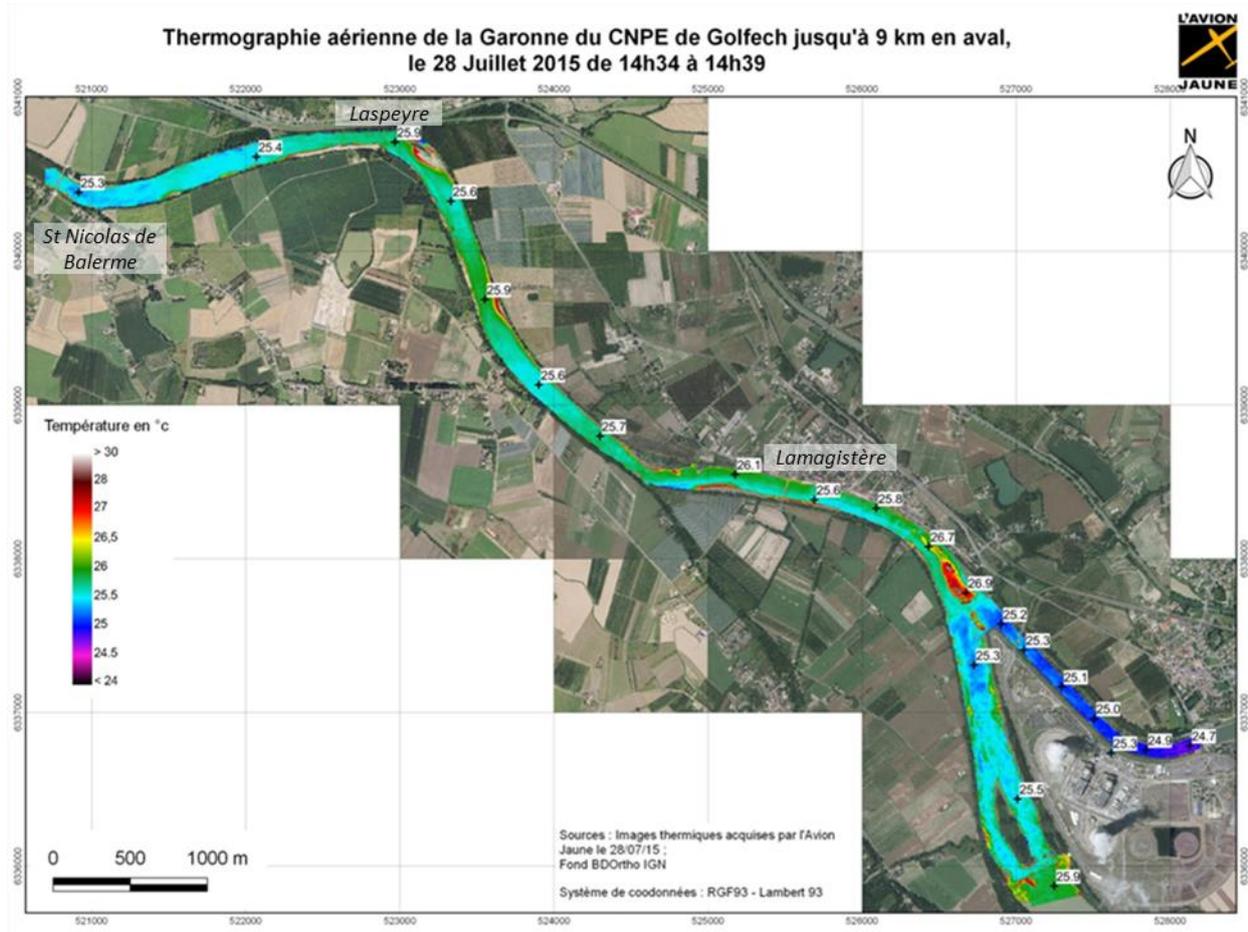


Figure 3 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Golfech durant l'été 2015 (vue globale).

- Thermographie du 15 août 2018

Une thermographie aérienne a été réalisée le 15 août 2018 pour une puissance nominale de l'ordre de 10% et pour un débit de la Garonne autour de 140 m³/s. Cette campagne a été réalisée suite au passage le 6 et 7 août 2018 du CNPE en conditions climatiques exceptionnelles (limites prévues dans les autorisations de rejet, sur requis RTE), c'est-à-dire avec un dépassement de la limite de température aval de 28°C. Cette première entrée (depuis 2006) en conditions climatiques exceptionnelles (CCE) est associée réglementairement à la réalisation d'une thermographie dans les 15 jours suivant le passage en CCE. Ce dépassement ayant été court (36 heures) et les conditions météorologiques n'ayant pas permis d'effectuer les vols à une date plus proche, la thermographie a été réalisée le 15/08/2018, soit 8 jours après l'entrée en CCE.

Comme pour la précédente thermographie, l'emprise globale est d'environ 12 km, depuis la commune de Golfech jusqu'à celle de Saint-Nicolas-de-la-Balerme. En raison d'un nombre plus limité de données in-situ, le recalage en absolu des températures apparentes en surface n'a pas pu être réalisé. Ainsi, les températures indiquées sur la

Figure 4 sont plutôt à considérer de manière relative (c'est-à-dire en considérant les écarts entre mesures et non les valeurs absolues seules).



Figure 4 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Golfech durant l'été 2018.

En dehors des valeurs minimales et maximales de températures sur des zones très localisées, les températures d'eau sont relativement homogènes sur l'emprise étudiée, avec des écarts de température inférieurs à 2°C sur l'ensemble de la thermographie. Une zone d'élévation homogène de température est notable sur 500 m en aval de l'ouvrage de rejet, mais qui reste faible, la température atteignant de l'ordre de 0,6°C de plus qu'en amont. À noter aussi la présence de grands herbiers aquatiques qui influencent la température d'eau mesurée dans ces zones (seules les principales zones d'herbiers ont été extraites du thermogramme).

En conclusion, la puissance du CNPE de Golfech étant à seulement 10 % de la puissance nominale le jour de l'acquisition, l'influence des rejets d'eau échauffées était donc très limitée lors de cette campagne.

- Thermographie du 4 juillet 2019

Une thermographie aérienne a été réalisée le 4 juillet 2019 pour un fonctionnement à pleine puissance des 2 tranches et pour un débit de la Garonne autour de 93 m³/s. Cette campagne a été réalisée lors de la première vague de canicule de l'été 2019, sans que le CNPE ne soit passé en conditions climatiques exceptionnelles (c'est-à-dire que la température aval est restée inférieure à 28°C). L'objectif était de caractériser le panache pour un fonctionnement à pleine puissance du CNPE, pour des températures en aval approchant 26°C à 28°C.

Comme pour les précédentes thermographies, l'emprise globale est d'environ 12 km, depuis la commune de Golfech jusqu'à celle de Saint-Nicolas-de-la-Balerme.

Malgré un fonctionnement à pleine puissance du CNPE, cette campagne montre que le panache n'influence pas significativement les températures de la Garonne au-delà de quelques centaines de mètres en aval du point de rejet, notamment par comparaison aux températures naturellement atteintes dans le tronçon court-circuité (en amont des rejets). Cela s'explique par un échauffement amont-aval apporté par le CNPE très faible dans ces conditions estivales : lors de cette campagne, l'échauffement après mélange apporté par le CNPE était de l'ordre de 0,2°C.

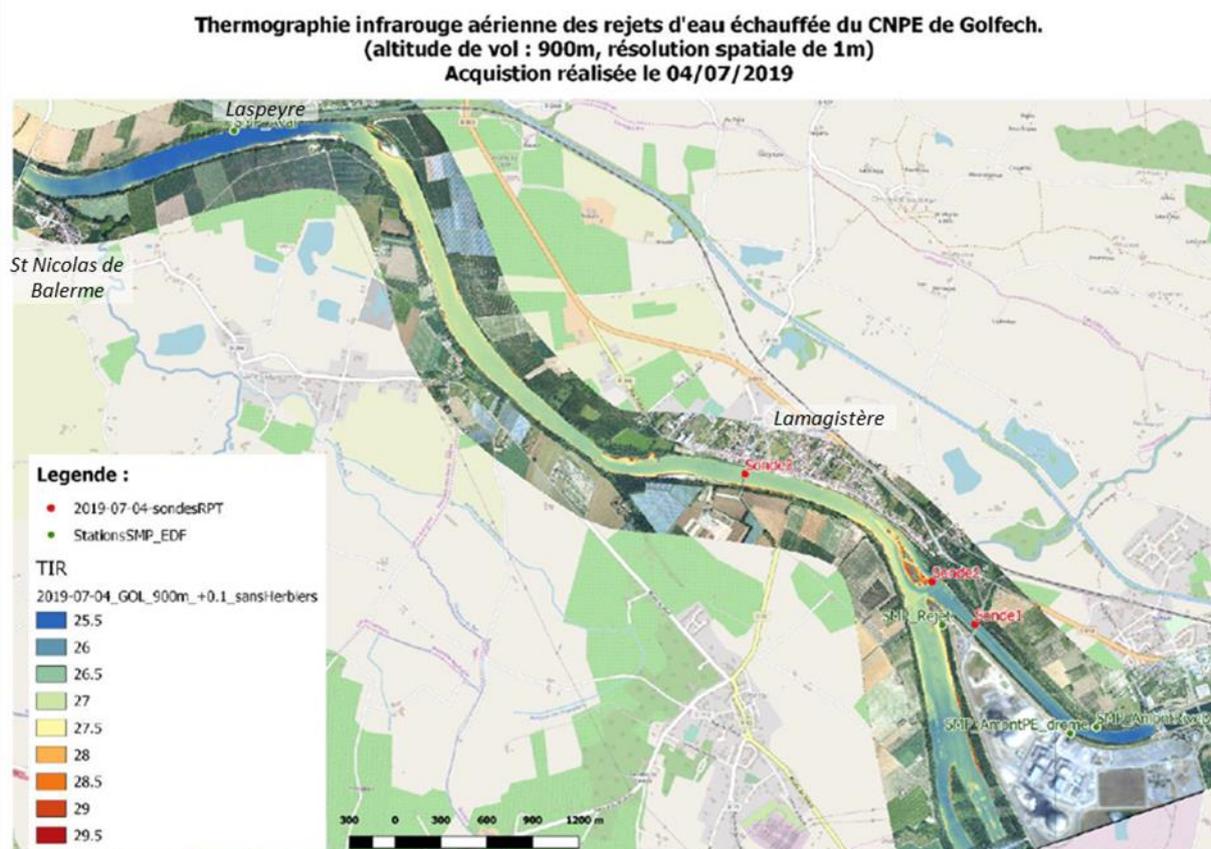


Figure 5 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Golfech durant l'été 2019.

- [Thermographie du 21 juillet 2022](#)

Une thermographie aérienne a été réalisée le 21 juillet 2022 pour un fonctionnement à pleine puissance de la tranche 2 (tranche 1 à l'arrêt) et un débit de la Garonne autour de 66 m³/s. Cette campagne a été réalisée lors de la seconde vague de chaleur de l'été 2022, suite au passage en conditions climatiques exceptionnelles (entre le 15 et le 22 juillet 2022). La température aval calculée après mélange était d'environ 28,5°C (en moyenne journalière), avec un échauffement horaire calculé après mélange variant sur la journée de 0,03°C à 0,1°C (échauffement moyen journalier de 0,06°C). A l'heure du vol (vers 16h), la température mesurée à la prise d'eau était d'environ 29°C et l'échauffement calculé après mélange de 0,06°C. L'objectif de cette campagne était de caractériser le panache pour un fonctionnement à pleine puissance d'une des deux tranches en conditions climatiques exceptionnelles (température aval après mélange supérieure à 28°C).

Cette thermographie intègre le tronçon court-circuité (TCC) de la Garonne (linéaire de 3,5 km), le canal de Golfech (linéaire de 2,5 km) et la Garonne en aval de la restitution (linéaire de 3 km).

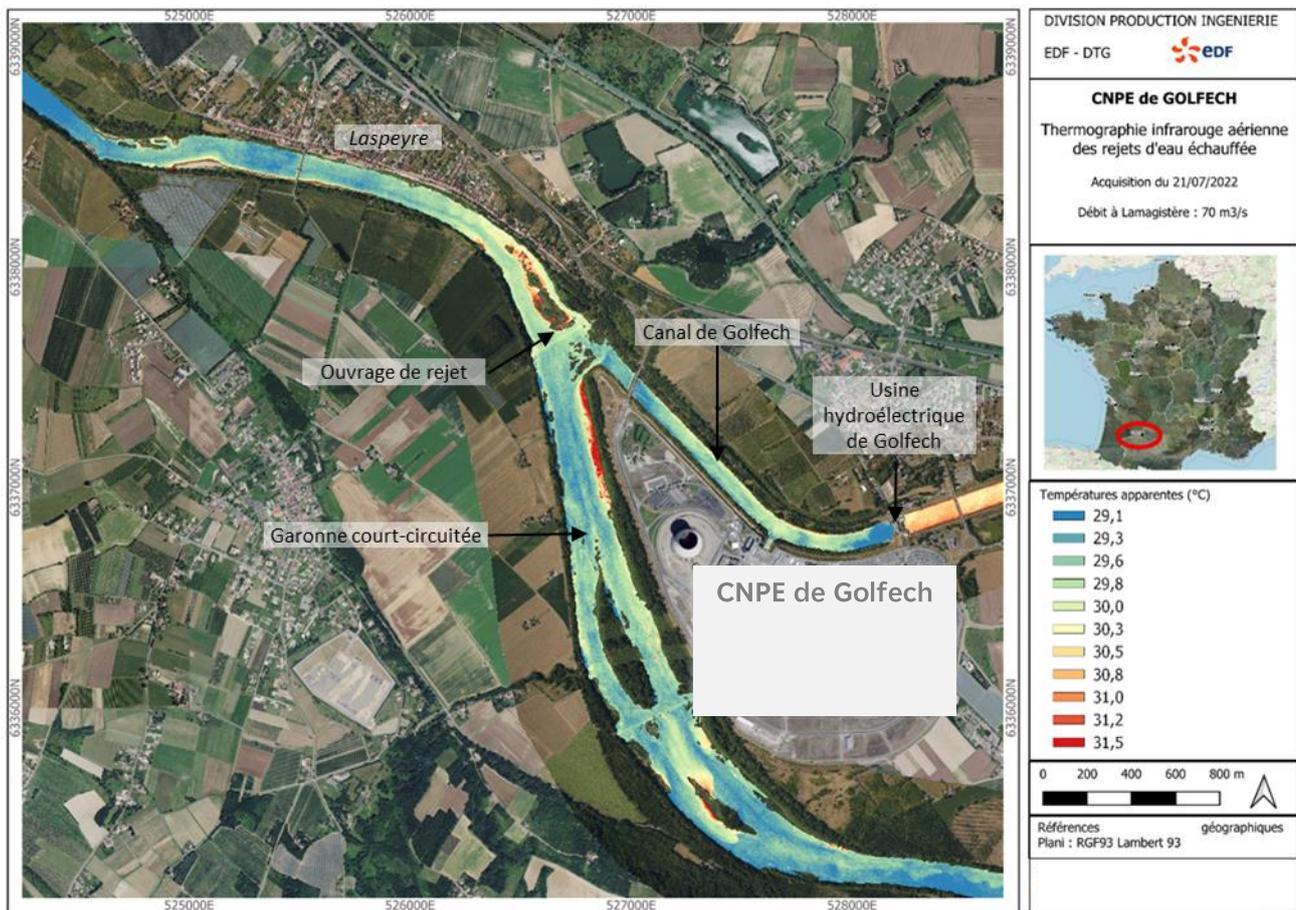


Figure 6 : Vue globale de la thermographie réalisée le 21/07/2022 à Golfech vers 16h

Sur l'emprise des mesures, la thermographie montre des températures d'eau en surface globalement similaires entre les 3 biefs (tronçon court circuité de la Garonne, canal de fuite en aval de l'usine de Golfech et la Garonne en aval de la restitution), avec des températures de l'ordre de 29°C à 30°C.

Des hétérogénéités naturelles sont visibles en surface en différentes zones (berges, îles, herbiers) avec notamment une zone plus chaude en bord de rive droite du TCC au nord (proche de la restitution) liée à la présence d'herbiers (élévation de la température de l'ordre de 1,5°C), ainsi qu'une nappe d'eau plus chaude en surface dans le sillage de la première île (échauffement de plus de 1°C).

L'influence des rejets du CNPE est également visible avec un panache thermique très localisé en aval immédiat de la conduite multipores, avec un échauffement du même ordre de grandeur que les variations naturelles de températures d'eau en surface dans le tronçon court-circuité de la Garonne (de l'ordre de 1,5°C). Au-delà de quelques centaines de mètres, la masse d'eau retrouve rapidement des températures d'eau en surface proches de celles non influencées par l'ouvrage de rejet et équivalentes à celles atteintes dans le tronçon court-circuité de la Garonne. Il est à noter que la présence d'herbiers aquatiques dans la zone située à l'aval immédiat de

l'ouvrage de rejet du CNPE rend difficile l'évaluation de l'échauffement maximal atteint en surface, du fait de la modification de l'écoulement de la masse d'eau qui influence les températures de surface.

Enfin, la zone du canal usinier et du canal de fuite montre un contraste plus important des températures d'eau en surface en raison de l'effet de l'usine de Golfech, dont l'effet retenue est visible en amont, avec des températures en aval de l'usine proche de celles atteintes dans le tronçon court circuité de la Garonne.

ZOOM SUR LES MESURES AUX BOUEES DURANT L'ETE 2022

Entre le 25 juin et le 11 septembre 2022, un suivi de température d'eau de la Garonne en points fixes a également été installé en différents points du cours d'eau : les bouées ont été positionnées dans le canal de fuite en amont de la restitution à la Garonne, dans le TCC en aval du seuil V et en aval immédiat de l'ouvrage de rejet. Ces bouées viennent compléter les mesures réalisées en continu à la prise d'eau du CNPE (SMP amont, située dans le canal de fuite en aval de l'usine de Golfech) et à la SMP aval (située en rive droite à Laspeyres, à environ 6 km en aval de l'ouvrage de rejet du CNPE)

Il s'agit de mesures ponctuelles spatialement mais s'inscrivant dans la durée et couvrant les différents épisodes de canicule de l'été 2022.

L'évolution globale des températures mesurées aux différentes bouées (hors proximité des rejets) montre un comportement très similaire des températures d'eau entre le tronçon court-circuité de la Garonne, le canal de fuite, la mesure à la SMP amont (prise d'eau du CNPE) et la SMP aval. Ces évolutions très similaires se traduisent notamment par des températures maximales très proches et un nombre de jours supérieurs au seuil de 28°C quasiment identiques entre les mesures à la prise d'eau, dans le TCC et à la SMP aval.

Les mesures réalisées proches des rejets montrent des températures plus élevées comme attendu, compte tenu de l'influence des eaux échauffées rejetées par le CNPE, en lien avec le fonctionnement des aéroréfrigérants, et de l'effet des herbiers situés à proximité.

L'ensemble de ces mesures montrent que le suivi en continu associées aux 3 stations multi-paramètres (amont, rejet, aval) est représentatif des températures atteintes dans la Garonne en amont de l'ouvrage de rejet (canal ou tronçon court circuité), à proximité des rejets et en aval de l'ouvrage de rejet après mélange.

Conclusion

Ces différentes thermographies aériennes réalisées en période estivale et à bas débit montrent que les caractéristiques du panache sont similaires quel que soit le débit rencontré et que la conduite multipores favorise une dilution rapide des rejets thermiques. Quelques centaines de mètres en aval, les échauffements maximaux observés sont en effet inférieurs à 1°C et proches des variations naturelles observées entre les deux berges ou dans des zones de faibles profondeurs d'eau.

Ces différentes campagnes montrent que le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE de Golfech quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées.

- **Echauffements résiduels en aval du CNPE de Golfech (champ lointain / échelle régionale)**

L'étude EDF-R&D, réalisée suite à l'été 2003 et basée sur des calculs théoriques par modélisation, a conclu qu'en situation de canicule associée à de faibles débits, la part de l'échauffement naturel (température de l'air et rayonnement solaire) est rapidement prépondérante sur l'échauffement dû au CNPE. L'échauffement résiduel lié au CNPE s'atténue en effet au fur et à mesure que l'on s'éloigne du CNPE. Dans les conditions de l'été 2003, à 15 km, il persiste environ 55 % de l'échauffement initial après mélange, à 40 km, il n'en persiste plus que 20 %, ce qui est négligeable à l'échelle des variations naturelles de température et de l'incertitude de mesure (l'échauffement après mélange en aval du CNPE étant de l'ordre de 0,1°C à 0,5°C plus de 90% du temps en période estivale).

4.3 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE BUGEY

Le CNPE du Bugey est constitué de 4 tranches 900 MW. Les eaux de refroidissement sont rejetées en berge en rive droite du Rhône par l'intermédiaire de deux ouvrages principaux : en amont (à proximité de la station de pompage de la tranche 2), le canal de rejet des tranches 4-5 en circuit fermé (aussi utilisé pour le rejet des circuits auxiliaires des îlots nucléaires – circuits SEB et SEC – des tranches 2 à 5) et 650 m plus en aval, le canal de rejet des tranches 2-3 en circuit ouvert.

- **Caractérisation du panache thermique**

A l'échelle locale, toutes les observations réalisées à ce jour – thermographies (voir figures ci-dessous) et transects – montrent que la veine échauffée est localisée en rive droite sur les premiers kilomètres, avec des zones non-échauffées en rive gauche.

- **Données acquises en période estivale**

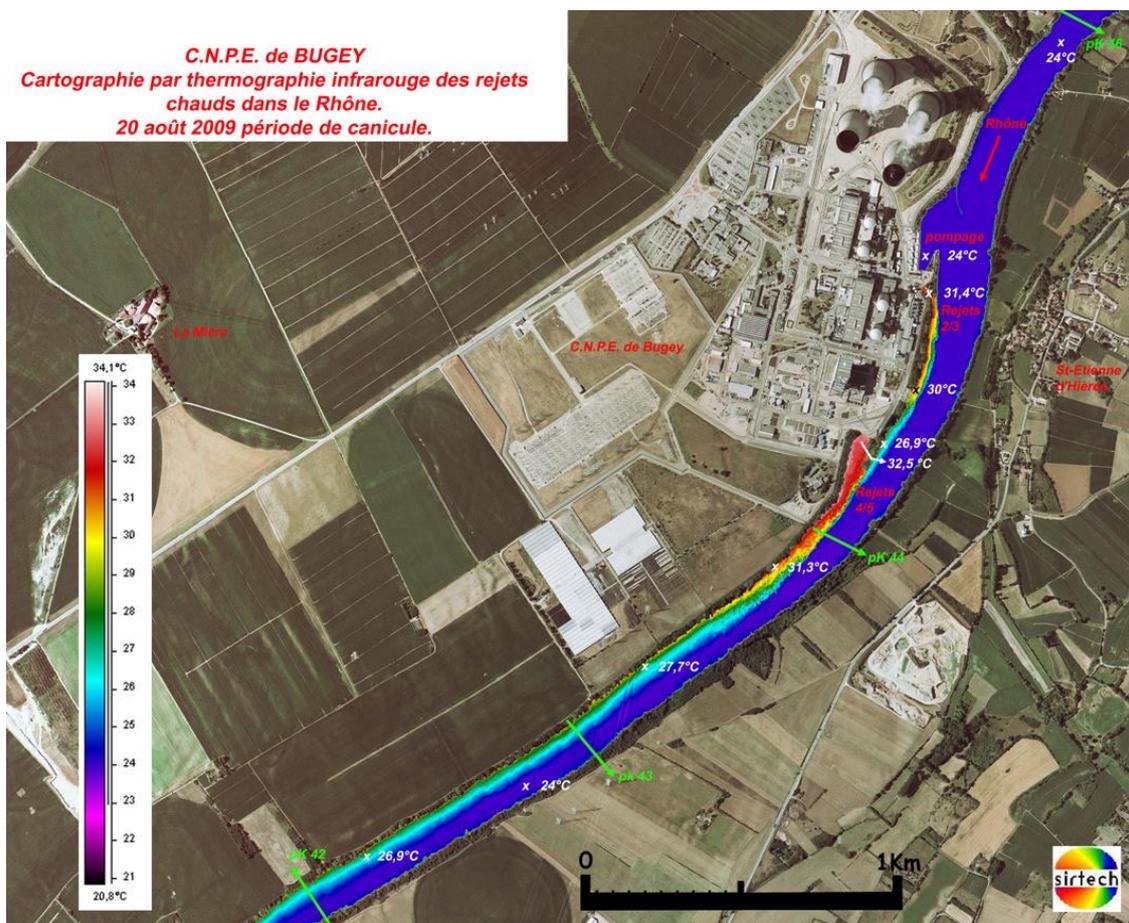
Le panache thermique du CNPE a été caractérisé par 3 campagnes en période estivale (août 2009, septembre 2012, août 2018). Ces données acquises lors des périodes estivales ont été complétées par la mise en place de capteurs de température durant l'été 2022 pour suivre l'évolution des températures des eaux du Rhône dans la durée suite aux conditions caniculaires de l'été 2022 et au fonctionnement du CNPE du Bugey en situation exceptionnelle.

- **Thermographie réalisée en août 2009**

La thermographie réalisée en 2009 (Figure 7) à un débit du Rhône entre 400 et 475 m³/s (soit un débit proche du module) montre l'existence d'une veine échauffée en rive droite sur les premiers kilomètres, visible jusqu'à la confluence avec l'Ain. Elle est réalisée en période chaude avec des températures de l'air d'environ 36 °C et une température du Rhône en amont de 22,7 °C. Les tranches 2, 4 et 5 fonctionnent à pleine puissance, la tranche 3 est à l'arrêt (1 tranche sur 2 en circuit ouvert est donc en fonctionnement). Cette situation correspond à un échauffement moyen journalier de 1,1 °C après mélange.

Les transects de température réalisés 2 jours plus tard confirment la présence en rive droite de cette veine échauffée. Le mélange vertical est atteint dès l'aval immédiat du rejet des tranches 2 et 3. Le mélange de la veine est total à l'aval de la confluence avec l'Ain.

C.N.P.E. de BUGEY
Cartographie par thermographie infrarouge des rejets
chauds dans le Rhône.
20 août 2009 période de canicule.



CARTOGRAPHIE THERMIQUE DES REJETS CHAUDS DU CNPE DE BUGEY DANS LE RHÔNE
Le 20 Août 2009 - Département en période de Canicule - Début d'intervention 16h52

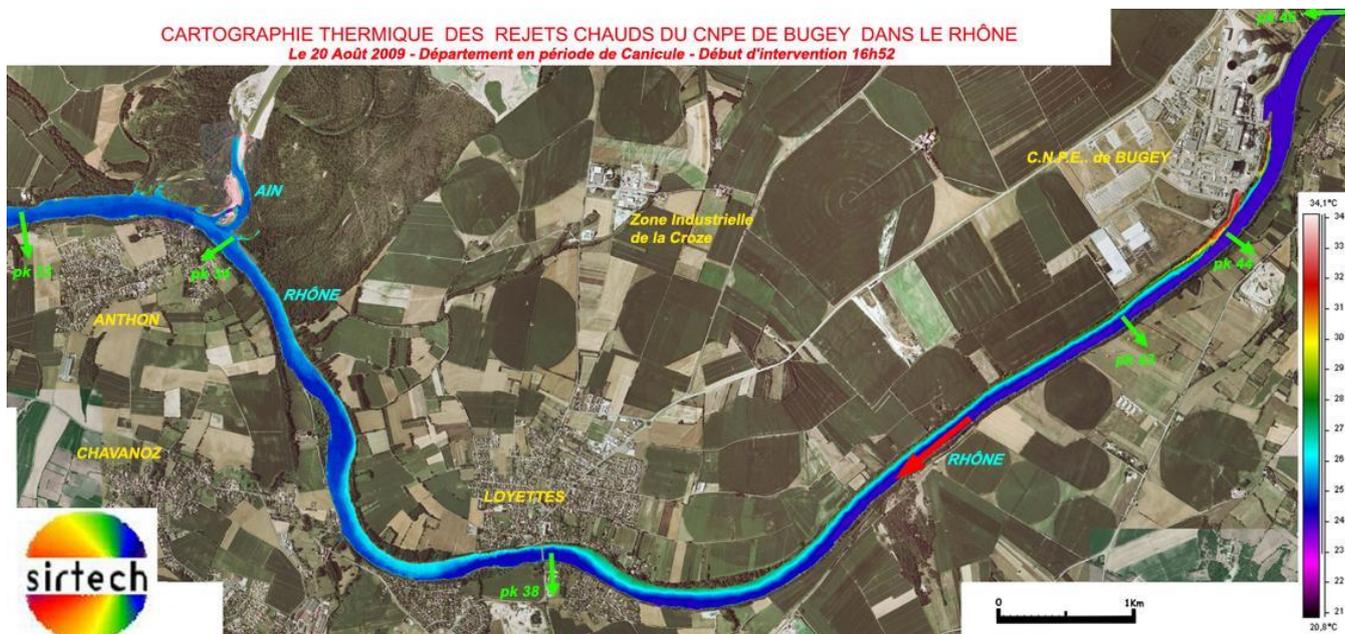
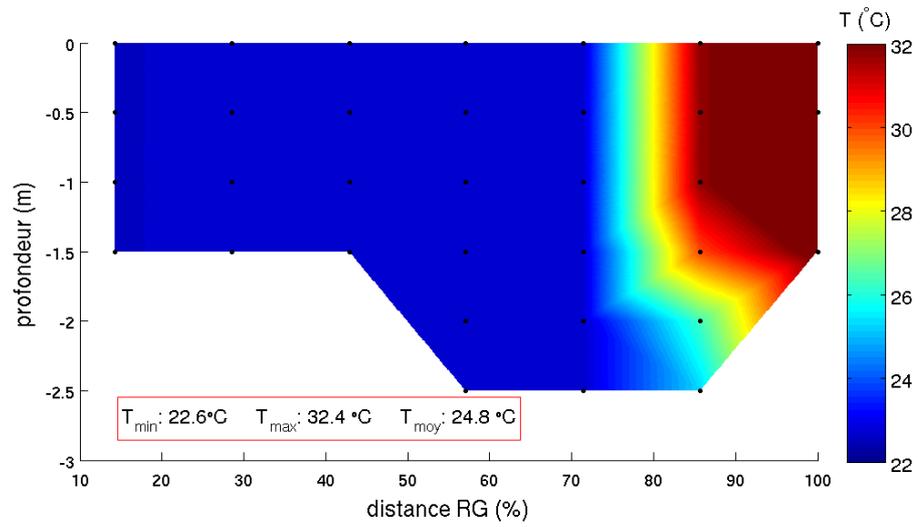


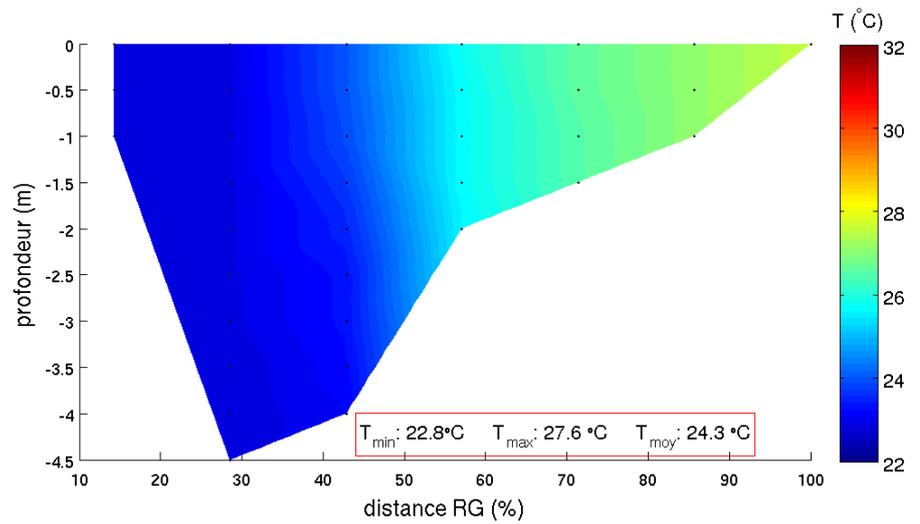
Figure 7 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Bugey le 20 août 2009.

Nota : contrairement à ce qui est indiqué sur la figure du haut, les rejets des tranches 2-3 en circuit ouvert sont situés en aval des rejets des tranches 4-5 en circuit fermé.

**Aval immédiat du rejet
des tranches 2 et 3
(Pk 43)**



**Amont du pont de
Loyettes (Pk 38)**



**Amont de la confluence
avec l'Ain (Pk 34)**

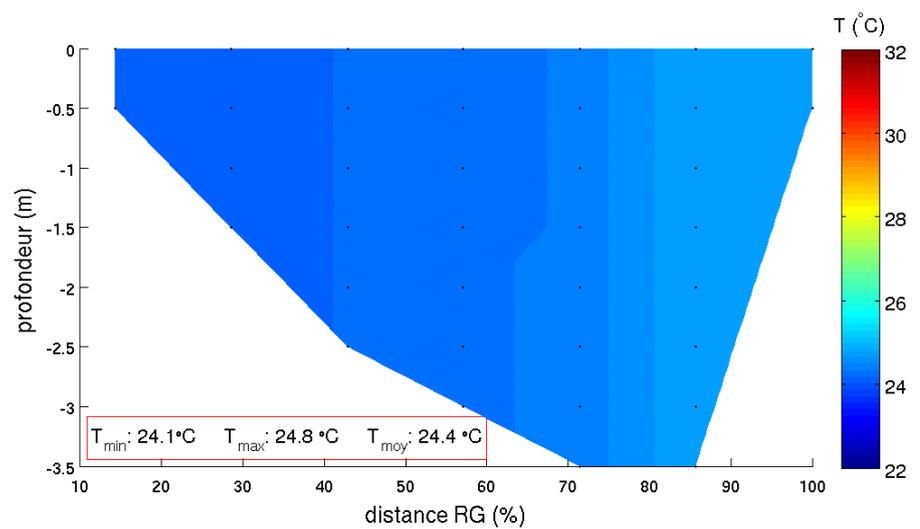


Figure 8 : Profils thermiques en aval du CNPE de Bugey le 22 août 2009
(débit moyen du Rhône de $364 \text{ m}^3/\text{s}$, échauffement moyen de $1,1^{\circ}\text{C}$ après mélange).

- Thermographie réalisée en septembre 2012

En septembre 2012 (Figure 9), une thermographie aérienne est réalisée avec les tranches 2-3 (circuits ouverts) et 4 (circuit fermé) à pleine puissance, la tranche 5 (circuit fermé) étant à l'arrêt. La veine toujours localisée en rive droite est plus rapidement diluée en aval en raison d'une dilution favorisée par un débit bas du Rhône (environ 180 m³/s), inférieur au QMNA-5 (voir Tableau 3). L'apport par l'Ain (46 m³/s) d'eau plus fraîche (environ 15 °C) génère une veine plus fraîche en rive droite en aval de la confluence.

Thermographie aérienne du Rhône en amont et en aval du CNPE de Bugey

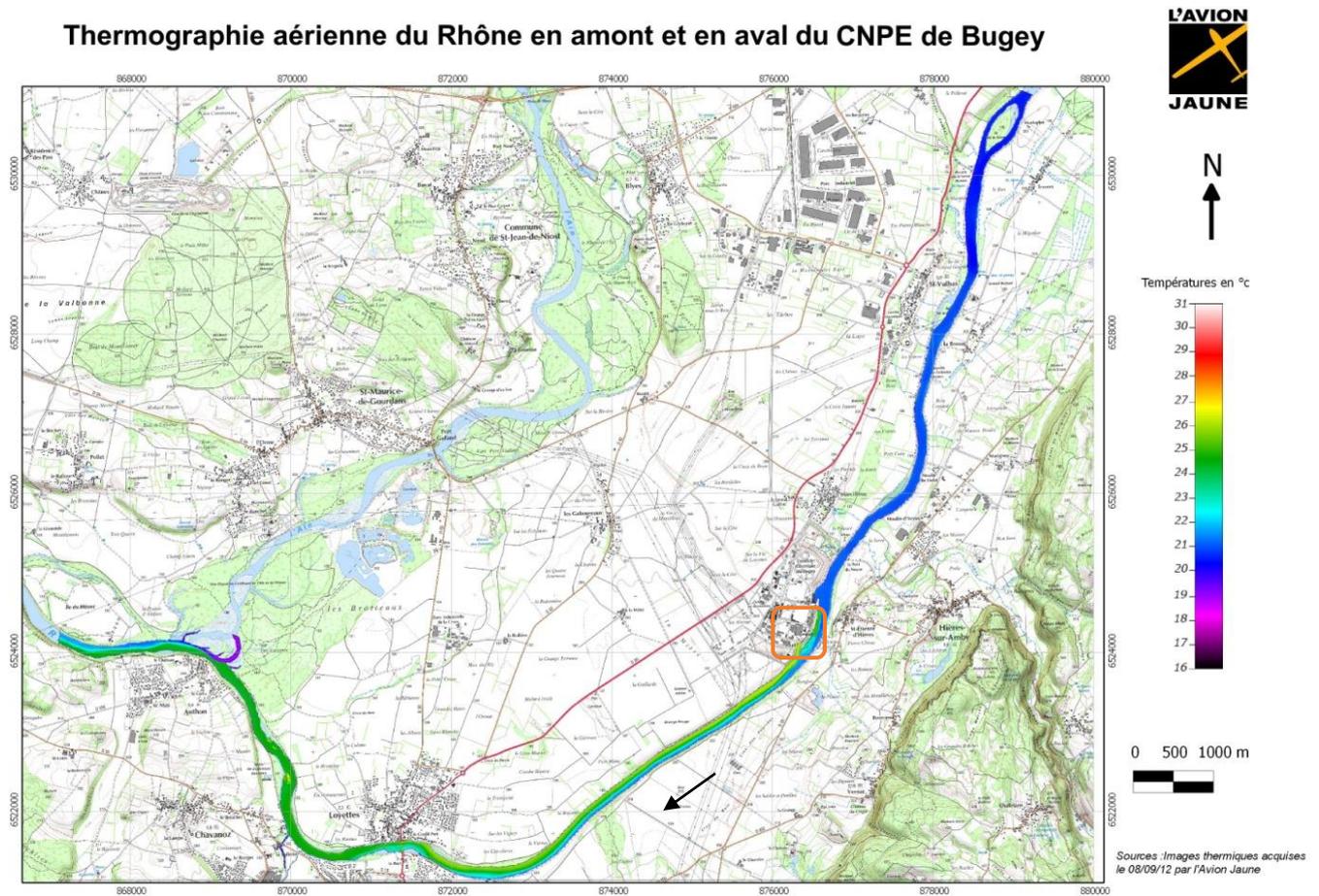


Figure 9 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Bugey le 8 septembre 2012
(Le CNPE est localisé par le carré orange).

- Profils réalisés en août 2018

Le 7 août 2018 (Figure 10), des profils de température ont été réalisés avec seulement la tranche 4 (circuit fermé) à pleine puissance, les tranches 2-3 (circuits ouverts) et 5 (circuit fermé) étant à l'arrêt. Ces profils ont été réalisés en période de canicule (température de l'air comprise entre 27°C et 35°C), avec, durant la campagne, une température moyenne du Rhône en amont de 25,4°C et un débit moyen du Rhône de 420 m³/s (variant de 380 à 500 m³/s). Cette situation correspond à un échauffement moyen amont-aval calculé de 0,2°C après mélange, les contraintes réglementaires (limite de 26°C sur la température aval) ayant contraint le CNPE à arrêté les 2 tranches en circuit ouvert sur cette période (T°aval calculée de 25,6°C en moyenne lors des mesures).

Sept profils ont été réalisés sur une distance de 10 km en aval des rejets depuis l'amont du CNPE jusqu'à la confluence avec l'Ain (Figure 10). Ils illustrent la répartition du panache d'eau échauffée et sa dilution progressive vers l'aval. Dans cette situation, la veine est bien moins échauffée que lors des thermographies présentées ci-dessus, en raison du rejet limité à la tranche 4 (en aval immédiat du rejet, il apparaît une zone échauffée de 5°C par rapport à l'amont).

Les profils effectués à l'aval du rejet montrent une stratification thermique transversale nette avec une veine d'eau échauffée contenue en rive droite du Rhône et une eau à la température du Rhône en amont du CNPE en rive gauche. Cette stratification s'atténue entre l'aval immédiat des rejets et la commune Loyettes (entre 4 km et 5 km en aval). Le brassage des eaux commence à se faire entre le pont de Loyettes et la confluence avec l'Ain. La masse d'eau peut être qualifiée d'homogène en amont immédiat de la confluence avec l'Ain.

Ainsi, la veine d'eau chaude reste localisée en rive droite, avec une dilution complète atteinte au niveau de la confluence avec l'Ain. Ces conditions de fonctionnement sont représentatives du fonctionnement du CNPE en CCE (tranches 2-3 à l'arrêt) et illustrent ce que serait la veine de rejet dans une telle situation.

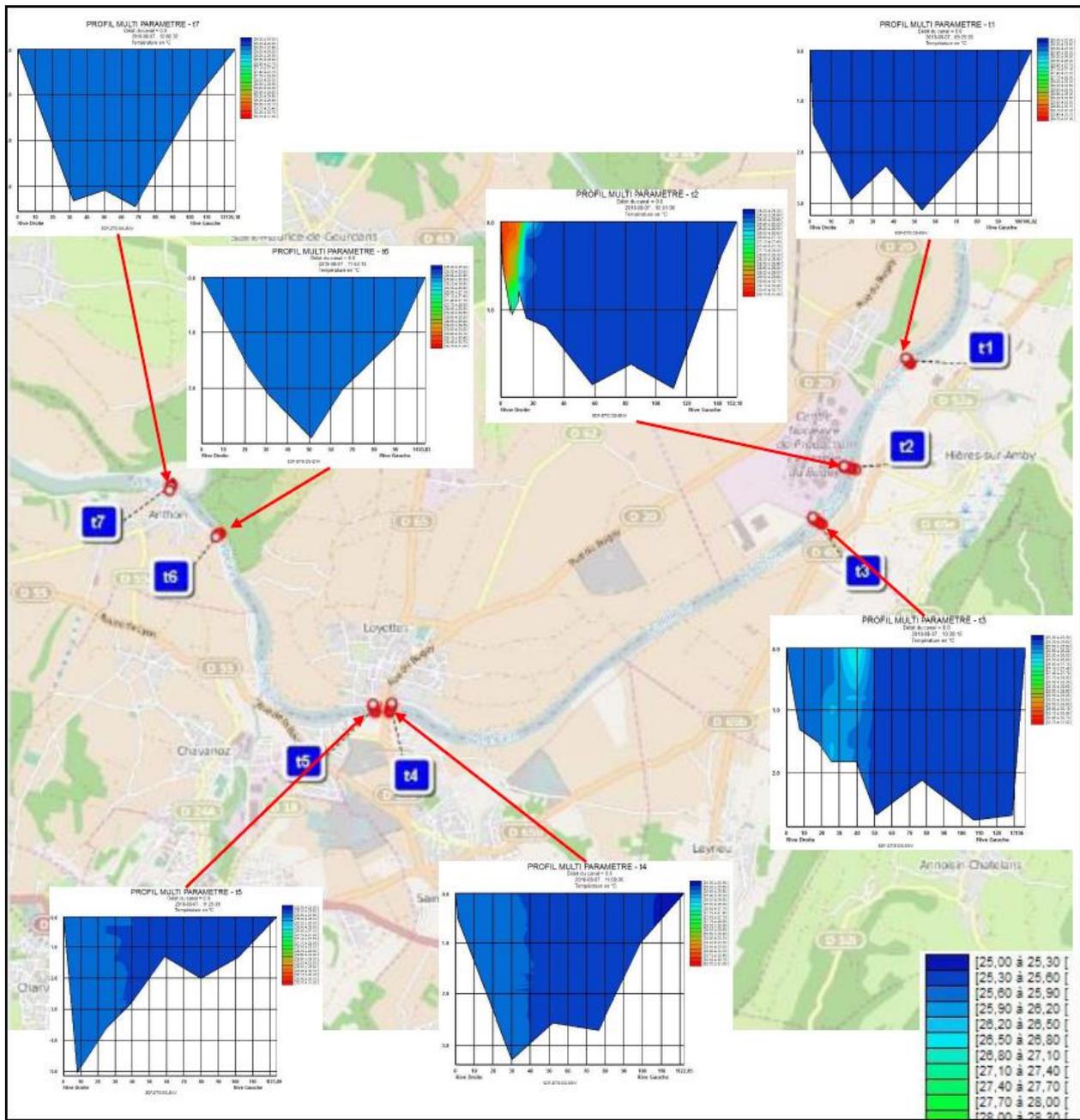


Figure 10 : Profils de température réalisés en aval de Bugey en août 2018

- [Suivi de température d'eau du Rhône en points fixes](#)

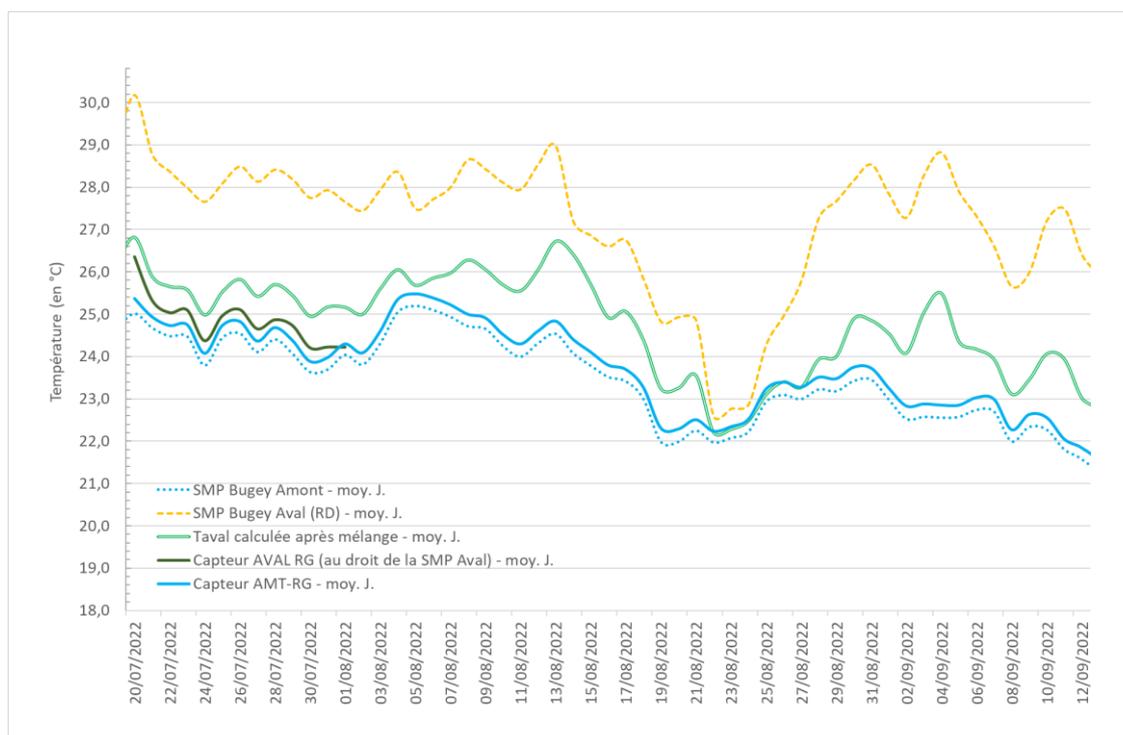
Lors de la première vague de chaleur de juillet 2022, une tranche en circuit ouvert de Bugey a dû être maintenue en fonctionnement avec une température en aval après mélange au-delà de 26°C suite à un aléa sur une tranche en circuit fermé, conduisant à une demande d'autorisations temporaires pour la tranche en circuit ouvert afin de pouvoir répondre au minimum de puissance requis par RTE. Une seconde autorisation temporaire a été accordée durant le mois d'août pour un maintien à puissance maximale d'une tranche pour économiser les réserves de gaz et d'eau en prévision de l'hiver.

Afin de suivre cette situation **exceptionnelle de fonctionnement du CNPE du Bugey en période de canicule, plusieurs capteurs de température d'eau ont été installés¹⁵ dans le Rhône entre mi-juillet et mi-septembre 2022.**

Il est à noter que le capteur installé en rive gauche (capteur « AVAL-RG ») au droit de la SMP de Loyettes a été détérioré le 1^{er} août 2022 : seuls 13 jours de mesures de température sont disponibles en ce point. Cette défaillance est liée à une action humaine, indépendante d'une défaillance propre du capteur, malgré un positionnement dans une zone de courant à distance de la berge, via un tronç immergé en grande partie dans le cours d'eau et donc inaccessible sans une embarcation.

En aval direct du canal de rejet 2-3, l'écart maximal de température entre la rive droite et la rive gauche est de l'ordre de 10°C. Ces écarts de température entre la rive gauche et la rive droite correspondent à des périodes où l'une des deux tranches en circuit ouvert est en fonctionnement à pleine puissance (la tranche 2 puis la tranche 3). Lorsque les tranches en circuit ouvert sont à l'arrêt (entre le 22 et le 26 août), les écarts entre la rive droite et la rive gauche sont limités (de l'ordre de 0,2°C). **La rive droite à l'aval proche du canal de rejet est sous influence directe du rejet alors que la rive gauche n'est pas influencée.**

Les données disponibles à 6 km en aval confirment que les rejets thermiques du CNPE ne sont pas complètement mélangés aux eaux du Rhône : les températures mesurées à la SMP aval, localisée en rive droite du Rhône, sont plus importantes que celles mesurées en rive gauche et que la température aval calculée après mélange.



¹⁵ 5 capteurs ont été installés : en amont - rive droite et rive gauche, en aval immédiat du rejet – rive droite et rive gauche – et en aval en rive gauche, au droit de la SMP aval.

Figure 11 : Températures mesurées en rive droite et rive gauche du Rhône à Loyettes (capteur aval RG et SMP aval située en rive droite) comparées à la température aval calculée après mélange et à la température mesurée à la SMP amont (en moyennes journalières) en 2022

Une différence de température de l'ordre de 3°C à 4°C entre la rive droite et la rive gauche est observée au droit de la SMP aval. De plus, les écarts entre les températures mesurées en amont du CNPE et les mesures en aval en rive gauche sont très faibles (entre 0,3°C et 0,6°C) au regard de l'incertitude des mesures (de l'ordre de 0,3°C). Ainsi, l'influence des rejets thermiques est faible voire négligeable en rive gauche. Ces mesures confirment que la SMP aval permet de suivre la zone influencée par la veine échauffée issue des rejets thermiques du CNPE.

Les mesures réalisées durant la période estivale 2022 confirment la connaissance du panache thermique issue des données de suivi thermique déjà disponibles. Les caractéristiques du panache sont similaires pour l'ensemble des campagnes réalisées : le panache thermique en aval du CNPE se caractérise par une veine échauffée localisée en rive droite sur les premiers kilomètres, avec des zones non-échauffées en rive gauche.

Ces mesures confirment aussi la complémentarité des mesures aux SMP amont et aval pour suivre les températures en zone influencée ou non influencée autour du CNPE car les températures en rive gauche en amont du pont de Loyettes sont proches de celles mesurées à la SMP amont.

Conclusion

Les différentes campagnes de mesures réalisées ont permis de suivre le panache thermique du CNPE du Bugey dans différentes configurations de fonctionnement. L'échauffement du milieu lié au fonctionnement du CNPE dépend essentiellement du type de tranche en fonctionnement, de la puissance produite, ainsi que du débit du Rhône. Cependant, quelles que soient les conditions rencontrées, les caractéristiques du panache thermique du CNPE du Bugey sont similaires, avec un panache localisé en rive droite sur les premiers kilomètres et qui se dilue progressivement pour atteindre un mélange complet au niveau de la confluence avec l'Ain.

Les différentes campagnes montrent ainsi que le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE de Bugey quelles que soit les conditions hydrauliques rencontrées.

Nota : en cas de situation exceptionnelle, selon le niveau de puissance requis pour le CNPE du Bugey et la disponibilité des tranches (ouvert ou fermé), les rejets thermiques du CNPE du Bugey seraient préférentiellement limités à ceux des deux tranches en circuit fermé. Dans cette situation, le panache serait d'une moindre intensité que celui observé sur les deux thermographies aériennes de 2009, 2012 et lors des mesures de 2022 (pour lesquelles au moins une tranche en circuit ouvert était à pleine puissance) et serait plus proche de celui observé lors de la campagne d'août 2018.

En cas de canicule exceptionnelle, se produisant de manière concomitante à une situation d'indisponibilité des tranches en circuit fermé et d'un requis d'un niveau de puissance pour le CNPE du Bugey, le retour d'expérience

de l'été 2022 montre qu'un fonctionnement du site avec *a minima* une tranche en circuit ouvert pourrait se produire, conduisant dans ce cas à un panache thermique similaire à celui observé en 2009, 2012 ou 2022.

4.4 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DE SAINT-ALBAN

Le CNPE de Saint-Alban est constitué de 2 tranches 1300 MW en circuit ouvert. Les eaux de refroidissement sont restituées au Rhône par un canal situé en rive gauche.

- **Caractérisation du panache thermique**

A l'aval immédiat de l'ouvrage de rejet et sur les premières centaines de mètres en aval, le panache thermique est principalement contenu sur la moitié gauche du Rhône, en raison de la configuration de l'ouvrage de rejet puis le panache s'étend rapidement sur toute la largeur du Rhône, en restant limité à la couche supérieure du plan d'eau pour des débits moyens du Rhône.

Les caractéristiques du panache dépendent du débit du Rhône et des conditions de vent rencontrés. Un débit du Rhône élevé conduit à une veine plus marquée en rive gauche, tandis qu'un débit plus faible favorise l'étalement du panache, principalement en surface, sur toute la largeur du Rhône, ainsi qu'en profondeur. Il est important de souligner que le panache conserve une stratification verticale marquée sur les premiers kilomètres dans la retenue en raison des hauteurs d'eau importantes dans ce tronçon (10 à 12 mètres suivant les transects).

- **Données acquises en période estivale**

- **Campagnes réalisées lors de l'été 2015**

Le panache thermique a été caractérisé au moyen d'une thermographie aérienne (août 2015) et de transects de température (juillet 2015), dans des conditions hydrologiques et thermiques relativement proches (Cf. Tableau 4Tableau). Sans être un débit extrêmement faible, le débit du Rhône correspondait à un débit représentatif du débit moyen mensuel du Rhône au mois d'août.

Tableau 4 : Conditions lors des 2 campagnes thermiques réalisées à Saint-Alban à l'été 2015.

Conditions rencontrées	Transects de température 7 juillet 2015	Thermographie aérienne 6 août 2015
Débit moyen du Rhône durant la campagne	600 m ³ /s	624 m ³ /s
Puissance du CNPE (2 x 1300 MW)	100 % (2 tranches)	100 % (2 tranches)
Température d'eau en amont durant la campagne	25,5 °C	22,4 °C
Echauffement du Rhône après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	1,9 °C	1,8 °C
Température aval calculée après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	27,4°C	24,2°C

La thermographie aérienne permet de caractériser le panache thermique en surface (Figure 12). En sortie du canal de rejet, le panache thermique présente, lors de la réalisation de cette campagne, une température en surface d'environ 28°C. Il atteint rapidement la rive droite. Plus en aval, la température est homogène en surface, à environ 27 °C, avec une température qui diminue ensuite progressivement en surface dans la retenue.

À partir de la zone de dérivation, la diminution de la température en surface dans le canal du Rhône est d'environ 2°C à 3°C jusqu'à la limite aval de la thermographie. Le mélange progresse dans le canal de dérivation : il n'est pas complètement atteint à l'usine des Sablons où la température en surface, d'environ 25°C, reste supérieure à celle attendue après mélange.

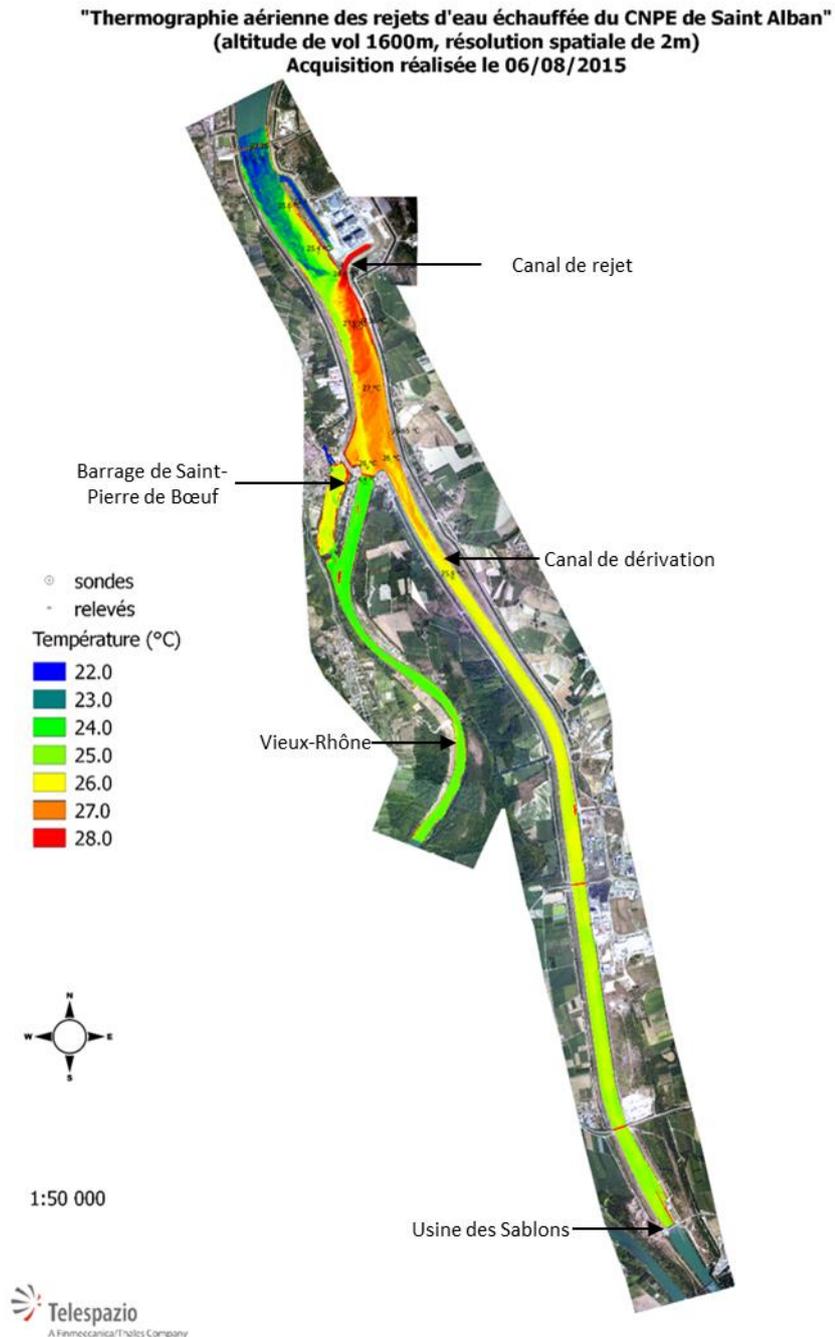
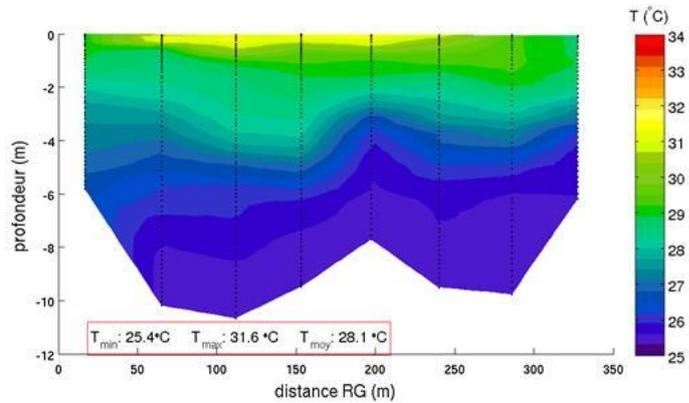


Figure 12 : Thermographie aérienne du panache thermique du CNPE de Saint-Alban le 6 août 2015 (débit du Rhône d'environ 624 m³/s et température amont de 22,4 °C). Le CNPE fonctionne à pleine puissance durant la campagne avec un échauffement calculé après mélange de 1,8 °C.

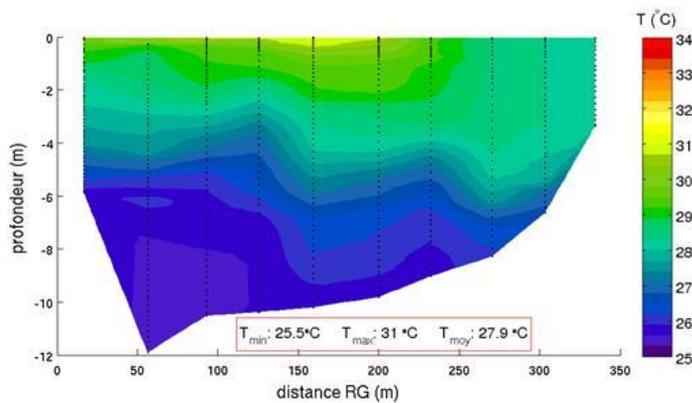
Le Vieux Rhône, alimenté par la retenue à un débit réservé de 75 m³/s, est à une température homogène en surface d'environ 24°C dès l'aval du barrage. Elle est supérieure d'environ 2°C par rapport à la température de l'eau en amont du CNPE, soit une élévation de température proche de celle calculée après mélange

Les transects réalisés en juillet 2015 (Figure 13) illustrent la stratification verticale du panache thermique et sa dilution progressive vers l'aval. La température en amont du CNPE est homogène à 25,5°C. A 1 km en aval, l'échauffement maximal sur le profil est de 6,2°C ; à 1,3 km, il est de 5,5°C ; à 2,1 km (dans le canal de dérivation), il n'est plus que de 4,2 °C. Les températures les plus élevées sont mesurées sur la couche supérieure du plan d'eau (les 4 premiers mètres, sur une profondeur totale d'environ 10 mètres).

**Profil de température
à 1,0 km en aval**



**Profil de température
à 1,3 km en aval**



**Profil de température
à 2,1 km en aval
(dans le canal de dérivation)**

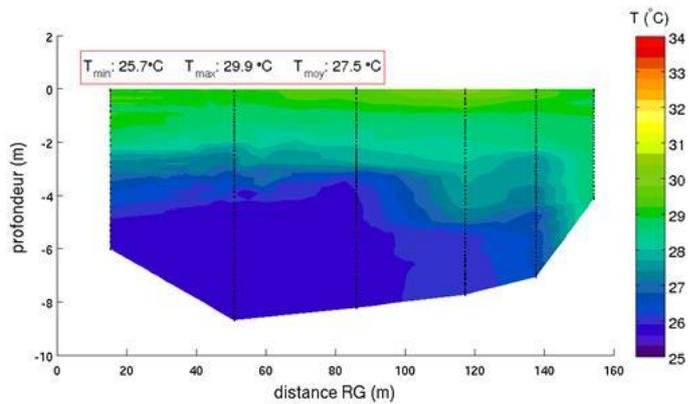


Figure 13 : Transects de température en aval du CNPE de Saint-Alban le 7 juillet 2015 (débit du Rhône de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ et température du Rhône de $25,5^{\circ}\text{C}$ en amont). Le CNPE fonctionne à pleine puissance et l'échauffement calculé après mélange est de $1,9^{\circ}\text{C}$.

- [Campagnes réalisées lors de l'été 2016](#)

Les 2 campagnes de l'été 2016 (profils et thermographie aérienne) ont été réalisées pour des conditions de températures et de débit très proches, les profils ayant été réalisés le lendemain de la thermographie aérienne.

Tableau 5 : Conditions lors des 2 campagnes thermiques réalisées à Saint-Alban à l'été 2016.

Conditions rencontrées	Transects de température 7 juillet 2016	Thermographie aérienne 6 juillet 2016
Débit moyen du Rhône durant la campagne	892 m ³ /s	860 m ³ /s
Puissance du CNPE (2 x 1300 MW)	95% (2 tranches)	95 % (2 tranches)
Température d'eau moyenne mesurée à la SMP amont durant la campagne	19,6°C	19,6°C
Echauffement du Rhône après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	1,2°C	1,3°C
Température aval calculée après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	20,8°C	20,9°C

Sur la thermographie réalisée le 06/07/2016 (Figure 14), on observe un échauffement net de la température en surface liée aux rejets du CNPE, avec une élévation de l'ordre de 8,5°C. Puis, le mélange des eaux chaudes et froides s'effectue rapidement en surface entre le CNPE et le barrage de Saint Pierre de Bœuf pour conduire à une température de surface d'environ 22°C en amont de la dérivation, à environ 2 km à l'aval des rejets du CNPE de Saint Alban (soit environ +3°C par rapport à la température en amont issue de la thermographie).

Dans le canal de dérivation, cette diminution est plus lente, même si les températures sont quasiment homogènes en surface dans le canal. La température observée en limite aval de la zone d'étude, à 11 km en aval du CNPE est d'environ 21°C, soit une élévation de température par rapport à l'amont proche de celle calculée après mélange (20,9°C).

Dans le tronçon court-circuité (Vieux Rhône), les températures d'eau sont plus faibles (d'environ 1°C) sur les premiers kilomètres en aval du barrage que celle de l'eau du canal au même niveau, avec une élévation de température proche de l'échauffement calculé après mélange (21°C).

"Thermographie aérienne des rejets d'eau échauffée du CNPE de Saint Alban"
 (altitude de vol 1500m, résolution spatiale de 1.6m)
 Acquisition réalisée le 06/07/2016

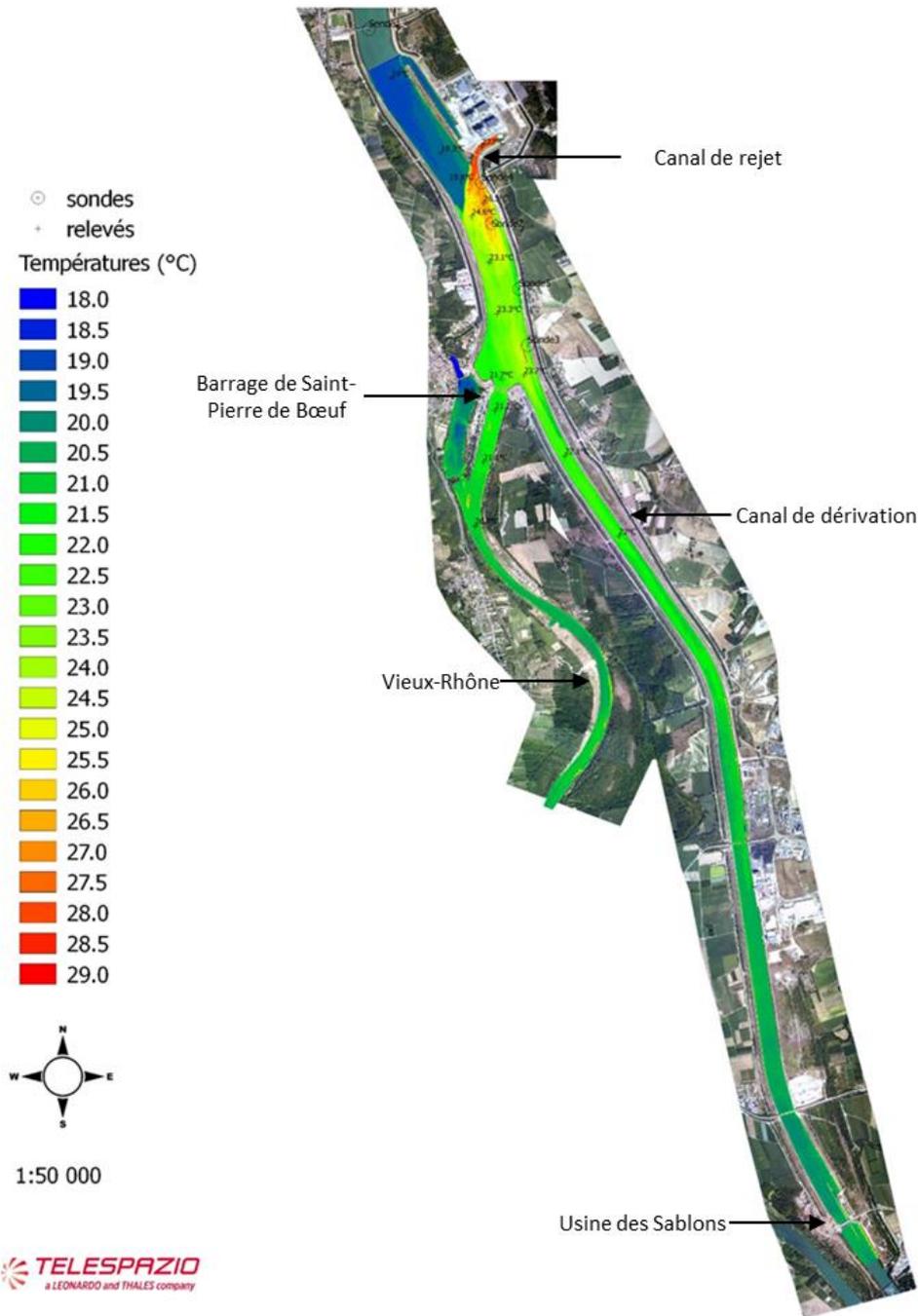
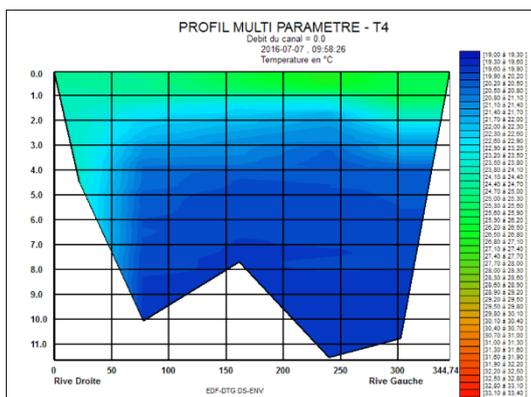


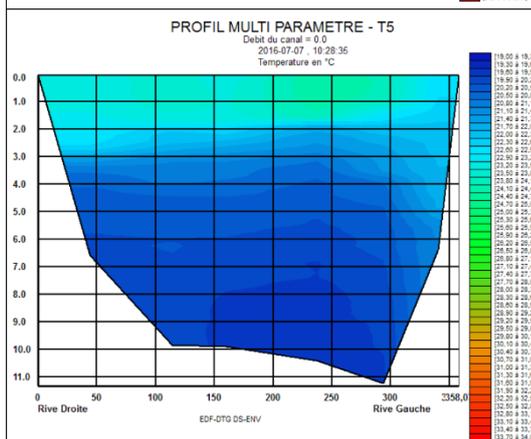
Figure 14 : Panache thermique acquis par infra-rouge le 06/07/2016 pour un débit moyen du Rhône de 860 m³/s et une température amont de 19,6°C. Le CNPE fonctionne à 95 % de puissance.

Les transects réalisés en juillet 2016 (Figure 15) illustrent la stratification verticale du panache thermique et sa dilution progressive vers l'aval pour des conditions de débit du Rhône un peu plus élevé qu'en 2015. La température en amont du CNPE est homogène à 19,6°C. A 0,5 km en aval, l'échauffement maximal sur le profil est de 7,3°C ; à 1,3 km, il est de 4,6°C ; à 2,1 km (dans le canal de dérivation), il est de 4,3 °C avec une stratification qui reste visible sur les 3 à 4 premiers mètres.

Profil de température à 0,5 km en aval des rejets



Profil de température à 1,3 km en aval (500 m en amont de la dérivation)



Profil 2,1 km en aval du rejet (en entrée du canal de dérivation)

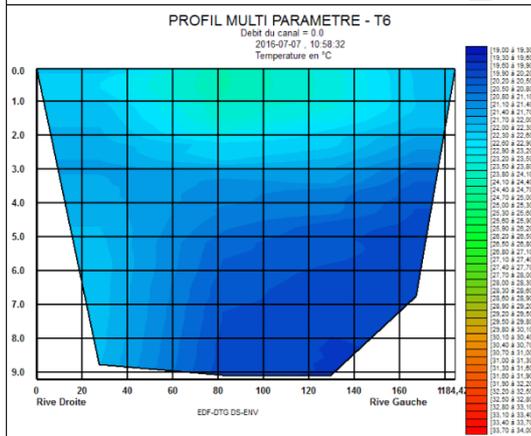


Figure 15: Transects de température en aval du CNPE de Saint-Alban réalisés le 07/07/2016. Le débit du Rhône est d'environ 900 m³/s, le CNPE fonctionne à 95 % de sa puissance nominale.

- **Profils de température réalisés en août 2018**

Des profils de température ont été réalisés en août 2018 afin de caractériser le mélange du panache thermique sur la profondeur (stratification) dans une gamme de débit plus faible, tout en étant en situation de canicule (cf. Tableau 6Tableau). Ces profils ont en effet été réalisés avec des températures en amont d'environ 26°C, proches des valeurs maximales atteintes durant l'été 2018 (Cf. Tableau 1). Cette situation correspond à un échauffement moyen amont-aval calculé de 1,2°C après mélange, les contraintes réglementaires (limite de 28°C sur la température aval) ayant contraint le CNPE à arrêter une des 2 tranches en circuit ouvert.

Tableau 6 : Conditions des profils de température réalisés à Saint-Alban à l'été 2018

Conditions rencontrées	Profils de température 2 août 2018
Débit moyen du Rhône durant la campagne	530 m ³ /s
Puissance du CNPE (2 x 1300 MW)	50 % (1 seule tranche à pleine puissance)
Température d'eau en amont durant la campagne	26°C
Echauffement du Rhône après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	1,2°C
Température aval calculée après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	27,2°C

Les profils réalisés en aval du rejet (Figure 16) confirment les observations des températures d'eau en surface issue des campagnes précédentes : ils permettent d'observer que la veine chaude se mélange rapidement sur toute la largeur du Rhône et sur les 4 à 5 premiers mètres en profondeur. Les profils réalisés dans la retenue permettent de montrer que dans cette gamme de débit, une veine plus froide reste présente en profondeur. A environ 2 km à l'aval des rejets de la centrale, en amont du canal de dérivation, la masse d'eau est presque totalement homogène.

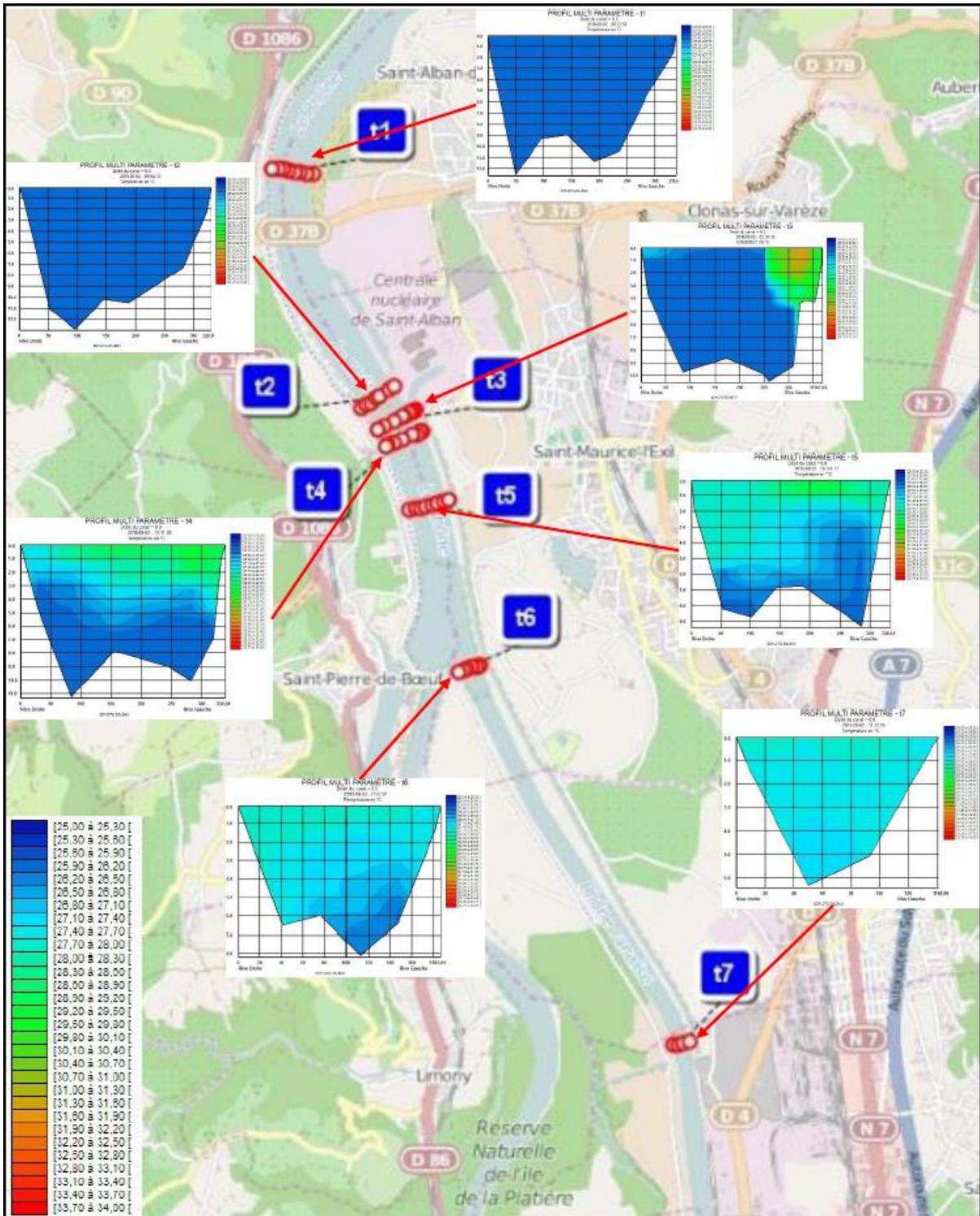


Figure 16 : Profils de température réalisés en aval de Saint-Alban le 02/08/2018. Le débit du Rhône est d'environ 530 m³/s, le CNPE fonctionne à 50% de sa puissance nominale.

- Profils de température réalisés en août 2022

Des profils de température ont été réalisés en août 2022 afin de suivre le panache thermique en situation exceptionnelle. Le CNPE a été en situation exceptionnelle le 12 août avec une température aval calculée après mélange de 28,04°C. Il est à noter que cette valeur reste inférieure à la limite réglementaire prévue par la décision ASN en conditions climatiques exceptionnelles (29°C pour le CNPE de Saint-Alban). La situation exceptionnelle était dans ce cas liée aux conditions de fonctionnement non prévues par les décisions limites en CCE (demande de la DGEC de fonctionnement à pleine puissance)..La campagne de mesure a été réalisée le 11 août 2022 par EDF DTG. Elle s'est déroulée entre 09h30 et 13h00, pour un débit du Rhône en amont du CNPE de Saint-Alban de l'ordre de 360 m³/s (débit mesuré au niveau de l'usine de Vaugris, en moyenne sur la durée de la campagne, et de l'ordre du QMNA 5 – cf. Tableau 3). Ces profils ont été réalisés pour une température d'eau en amont de 26,2°C, proche des valeurs maximales atteintes (26,9°C durant l'été 2018 - Cf. Tableau 1). Dans cette situation avec 1 tranche en fonctionnement à pleine puissance, l'échauffement moyen amont-aval calculé était de 1,7°C après mélange.

Tableau 7 : Conditions des profils de température réalisés à Saint-Alban au mois d'août 2022

Conditions rencontrées	Profils de température 11 août 2022
Débit moyen du Rhône durant la campagne	360 m ³ /s
Puissance du CNPE (2 x 1300 MW)	50 % (1 seule tranche à pleine puissance)
Température d'eau en amont durant la campagne	26,2°C
Echauffement du Rhône après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	1,7°C
Température aval calculée après mélange (valeur moyenne calculée durant la campagne)	27,9°C

6 profils de température ont été réalisés lors de cette campagne, depuis l'amont du CNPE jusqu'au droit de la SMP aval, à des emplacements proches de ceux choisis lors des campagnes précédentes.

Ces profils montrent que la veine d'eau échauffée se répartit rapidement sur toute la largeur du Rhône dès l'aval immédiat des rejets, tout en restant en surface du fait de sa densité plus faible. Les températures s'homogénéisent ensuite sur la largeur du Rhône (avec une diminution des valeurs maximales) et le panache se mélange progressivement sur la colonne d'eau, tout en conservant une hétérogénéité verticale sur tous les profils.

La stratification verticale observée en 2022 dans le canal de dérivation du Rhône est plus marquée que lors de précédentes campagnes réalisées pour un débit faible du Rhône, notamment sur les profils de température réalisés en 2018. Une des hypothèses envisagées pour expliquer cette stratification serait l'effet probable des modalités de gestion de l'aménagement hydroélectrique sur une période de l'ordre de la journée (effet de stockage engendrant des vitesses d'eau plus faibles dans la retenue et le canal de dérivation).

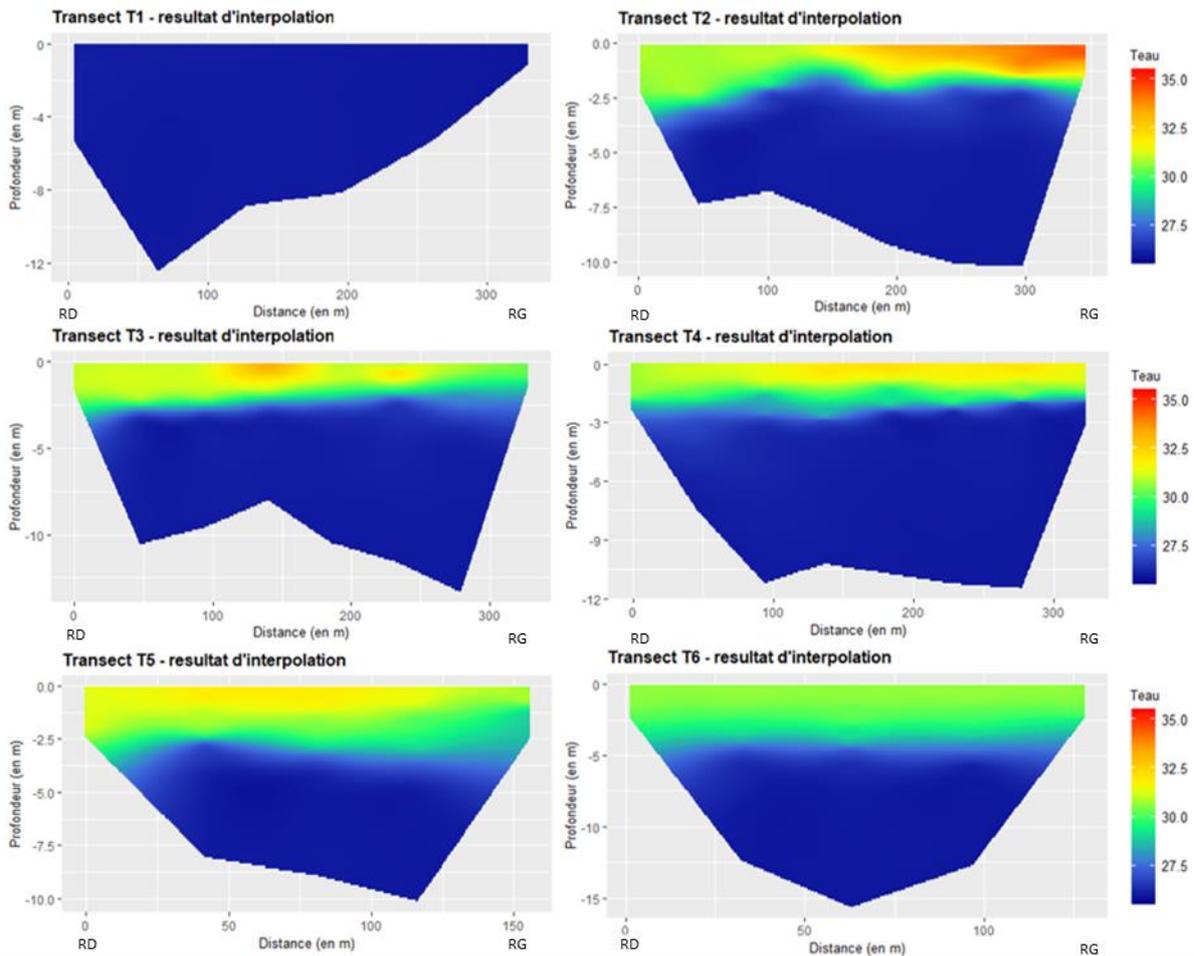


Figure 17 : Profils de température (°C) mesurés lors de la campagne du 11/08/2022

Ainsi, les données acquises durant la journée du 11 août 2022 confirment la représentativité de la SMP aval et sa capacité à mesurer les températures les plus chaudes atteintes dans la veine de rejet au niveau du canal de dérivation, compte-tenu de sa localisation en surface.

Malgré une stratification plus marquée observée dans le canal de dérivation pour cette plage de débit du Rhône, cette campagne confirme les caractéristiques globales du panache déjà observées en aval du CNPE de Saint-Alban, avec notamment une veine chaude en surface dans la retenue et une masse d'eau non influencée localisée en profondeur.

- Conclusion

Ces campagnes de suivi du panache thermique ont permis de **caractériser la dilution progressive du panache thermique en aval du CNPE de Saint-Alban en situation estivale** :

- **Dans la retenue**, en amont du barrage de St-Pierre-de-Bœuf : les températures les plus élevées sont mesurées sur la couche supérieure de la retenue, avec une veine chaude qui atteint rapidement toute la largeur du Rhône

(dès 0,3 km en aval des rejets à bas débit). La présence d'une couche non influencée thermiquement reste visible dans la retenue en profondeur dans la gamme des débits observés.

- **Dans le canal de dérivation** : on observe une homogénéisation progressive jusqu'à l'usine des Sablons, située à environ 11 km en aval des rejets, le mélange complet étant toujours atteint en aval de l'usine des Sablons grâce au brassage dû à l'usine.

- **Dans le tronçon court-circuité (Vieux Rhône)** : on observe des températures homogènes en surface, avec une élévation de température moyenne correspondant à l'échauffement attendu après mélange. Cela est probablement lié à la position de la prise d'eau dans la retenue permettant le transfert du débit réservé en aval du barrage de St-Pierre-de-Bœuf et à l'effet de brassage associé.

Ainsi, suivant le débit du Rhône, le mélange des rejets est considéré comme complet entre 6 km et 11 km en aval des rejets du CNPE.

Les différentes campagnes de mesures réalisées ont permis de suivre le panache thermique du CNPE de Saint-Alban dans différentes configurations de fonctionnement.

Pour l'ensemble des conditions rencontrées, les caractéristiques du panache thermique du CNPE de Saint-Alban comportent des similarités, avec un panache localisé en rive gauche en aval immédiat du canal de rejet, qui s'étend rapidement sur toute la largeur du cours d'eau et se dilue progressivement pour atteindre un mélange complet en aval de l'usine des Sablons.

4.5 LES REJETS THERMIQUES DU CNPE DU TRICASTIN

Le CNPE du Tricastin est constitué de 4 tranches 900 MW en circuit ouvert. Les rejets thermiques sont effectués dans un canal de rejet qui rejoint le canal de Donzère-Mondragon en rive droite. Des diffuseurs installés en bout de conduite favorisent le mélange rapide des rejets.

- **Description du panache thermique**

Entre les rejets et l'usine hydro-électrique de Bollène située à 3 km en aval, le panache thermique est situé en rive droite du canal de Donzère-Mondragon. Le brassage créé par l'usine conduit au mélange complet de la veine chaude au-delà de l'usine. Le canal de Donzère-Mondragon rejoint ensuite le Vieux-Rhône environ 10 km en aval de l'usine de Bollène. L'eau du canal subit alors une dilution liée à la confluence avec le Vieux Rhône intégrant les apports de l'Ardèche. Le régime thermique du Vieux-Rhône, fortement influencé par les conditions météorologiques en raison des faibles hauteurs d'eau, est globalement plus chaud l'été et plus frais l'hiver que l'eau du canal de Donzère.

- **Données acquises en période estivale**

- **Campagnes réalisées en 2006**

Deux campagnes de transects (Figure 18) ont permis de caractériser le panache thermique durant l'année 2006. Ces acquisitions ont été réalisées dans deux situations comparables en termes de débit dans le canal :

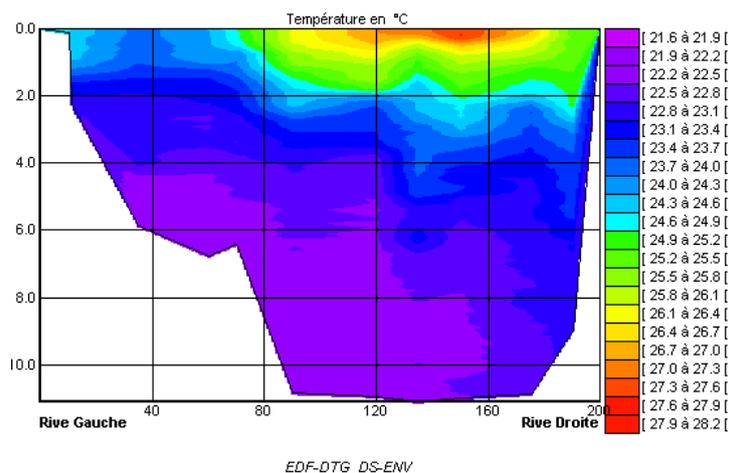
- Le 12/09/2006 : le CNPE est à 65 % de puissance, le débit est de 700 m³/s, et l'échauffement après mélange de 1,6 °C ;
- Le 17/10/2006 : le CNPE est à pleine puissance, le débit est de 700 m³/s, et l'échauffement après mélange de 2,9 °C.

Les profils au point kilométrique 186 indiquent la présence d'une veine chaude en surface dans le canal, dont l'influence est ressentie sur les 4 premiers mètres sous la surface pour une profondeur totale du canal d'environ 11 mètres. En aval de l'usine de Bollène située à 3 km en aval, la dilution du panache thermique est complète avec une différence maximale de température de 0,4 °C sur les profils.

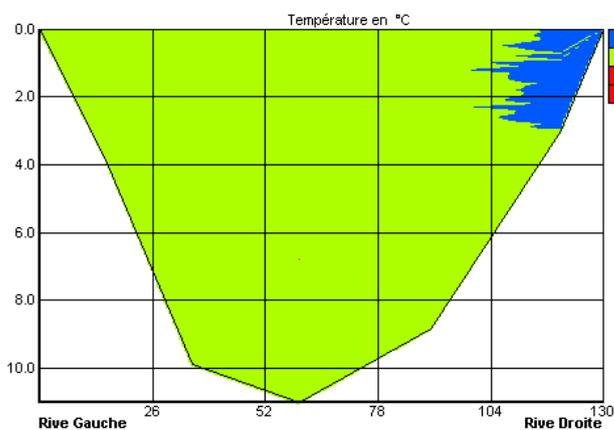
12/09/2006

Débit du canal : 700 m³/s
 ΔT après mélange : 1,6 °C
CNPE à 65 % de puissance

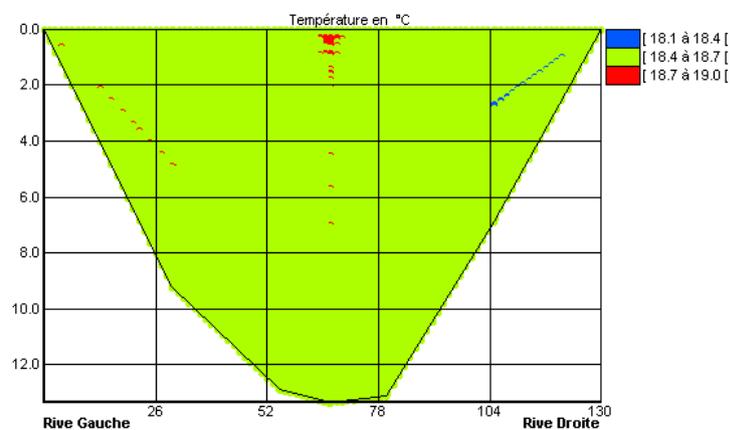
1 km en aval des rejets (pk 186)



3 km en aval de l'usine de Bollène (pk 192)



EDF-DTG DS-ENV



EDF-DTG DS-ENV

Figure 18 : Transects de température en aval du CNPE de Tricastin réalisés en 2006.

- Campagnes réalisées en 2017 et 2018

Le suivi du panache thermique a été également réalisé à travers deux campagnes plus récentes réalisées en 2017 et 2018, comprenant chacune :

- une thermographie aérienne infrarouge sur 12 km afin de connaître la température de l'eau à la surface du Rhône ;
- des profils de température situés en amont et en aval des rejets (sur 15 km environ), afin de connaître la distribution de température dans la colonne d'eau.

Ces deux types d'acquisition sont complémentaires et permettent une description complète du panache thermique. Seuls les résultats de la campagne de 2017 sont présentés ici car réalisée en période estivale et pour un plus faible débit du Rhône. La campagne réalisée en 2018 a eu lieu en avril pour un débit du Rhône autour de 1500 m³/s : elle montre une dilution rapide de la veine de rejet, avec un mélange quasi homogène dès l'amont de l'usine de Bollène.

En 2017

Une campagne de thermographie aérienne a été réalisée le 5 juillet 2017 pour une puissance du CNPE de l'ordre de 75% de la puissance maximale (soit 3 tranches à pleine puissance et une à l'arrêt) et pour un débit moyen du Rhône lors des mesures de l'ordre de 790 m³/s (le débit réel variant au pas horaire entre 660 m³/s et 880 m³/s). L'emprise globale était d'environ 12 km depuis le pont situé à 3,8 km en amont des rejets jusqu'à environ 5,5 km à l'aval de l'usine de Bollène. L'échauffement amont-aval théorique était de 2,3°C (en moyenne journalière).

Les conditions météorologiques le 5 juillet 2017 étaient proches d'une situation de canicule avec des températures d'air comprises entre 27°C et 33°C et des températures d'eau dans le Rhône en amont du site de l'ordre de 21°C.

Une augmentation de l'ordre de 8°C à 9°C entre les températures dans le canal de rejet et la zone en amont du CNPE est observée sur cette thermographie (Cf. Figure 19). En aval immédiat de la jonction entre canal de rejet et canal du Rhône, cet échauffement reste plus élevé en rive droite, puis le mélange s'effectue ensuite rapidement en aval sur la quasi-totalité de la section. L'impact est plus faiblement visible en aval de l'usine avec des températures de surface de l'eau qui sont supérieures à celles de l'amont de l'ordre de 1°C.

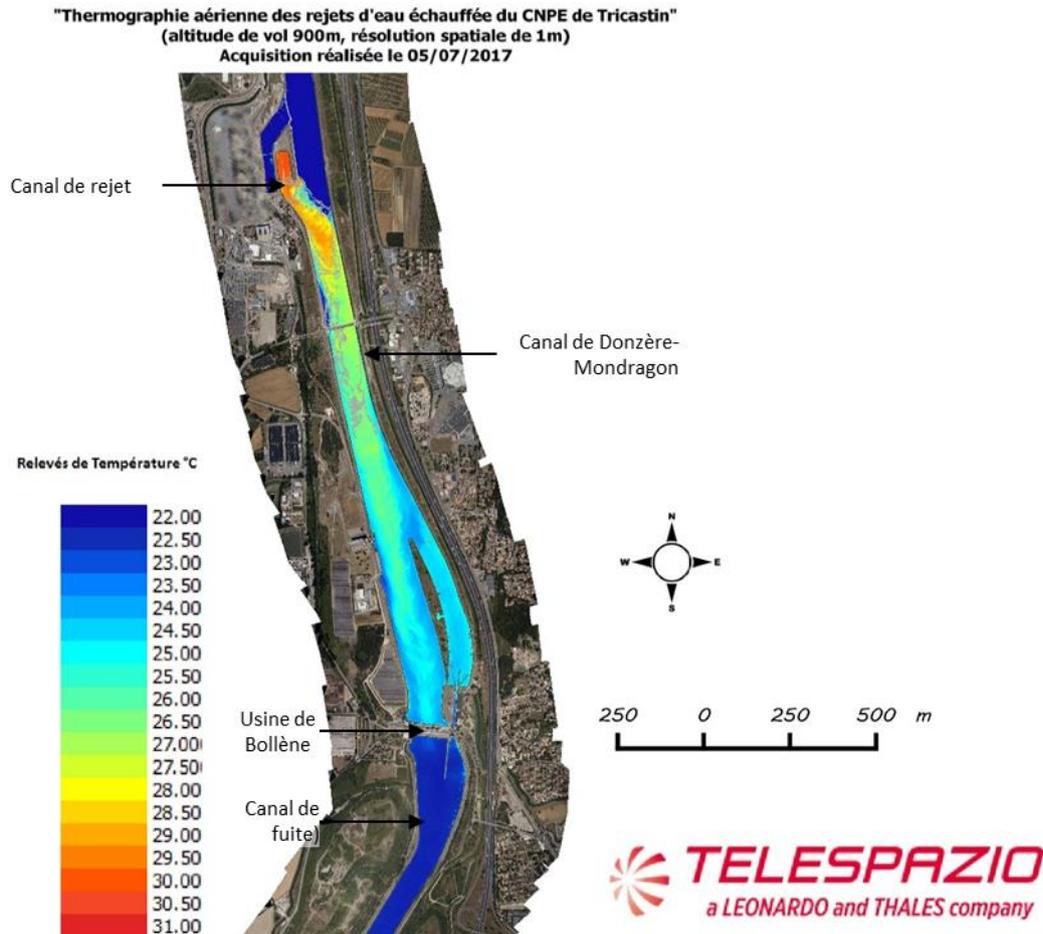


Figure 19 : Thermographie réalisée le 5 juillet 2017 en aval du CNPE du Tricastin. Le débit du Rhône est d'environ 790 m³/s, le CNPE fonctionne à 75% de sa puissance nominale.

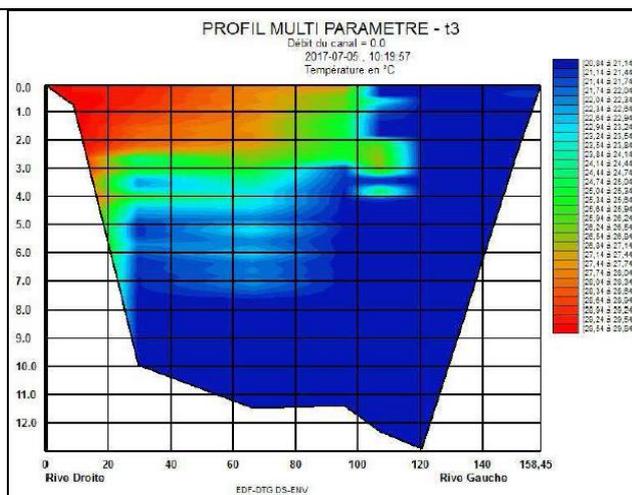
En parallèle de cette thermographie, 9 profils de températures ont été réalisés sur le Rhône, avec 2 profils réalisés en amont des rejets, 7 profils réalisés en aval des rejets dont 4 profils situés entre les rejets et l'usine de Bollène et 2 profils dans le canal de fuite en aval de l'usine. Le dernier profil a été réalisé en aval de la restitution dans le Rhône.

Les résultats de ces profils (Figure 20) confirment les résultats observés en surface :

- Les températures sont **homogènes** sur les transects réalisés **en amont du rejet** de la centrale.
- Les profils effectués à l'aval du rejet permettent d'observer que l'eau du rejet touche rapidement en surface tout le canal. La veine d'eau plus chaude initialement située en rive droite se diffuse ensuite sur toute la largeur du canal. Une **stratification thermique** est observée en aval des rejets, avec une veine d'eau échauffée flottant sur une veine à une température similaire à celle en amont des rejets. Cette veine se mélange ensuite progressivement sur toute la section jusqu'à l'usine de Bollène ;
- Les profils réalisés en aval de l'usine confirment que la masse d'eau est **homogène plus en aval**.

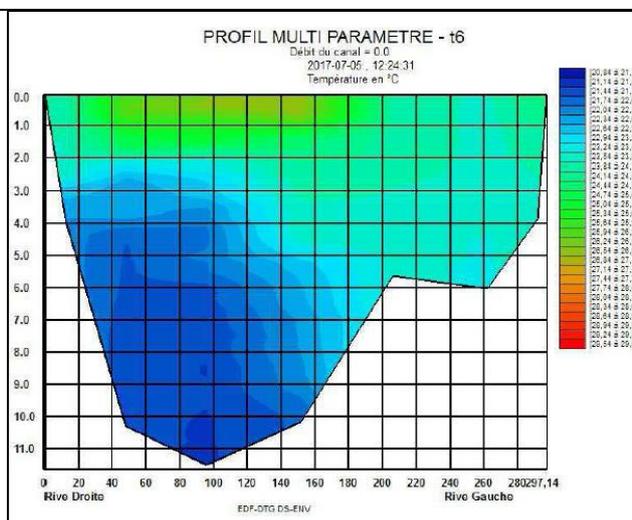
Profil en aval immédiat des rejets

La veine d'eau chaude du rejet s'est dispersée en rive droite sur une centaine de mètres de largeur.



Profil situé en amont de l'usine de Bolène (1,6 km en aval des rejets)

La veine de rejet s'est propagée sur toute la largeur du canal ; la masse d'eau reste hétérogène, avec une eau plus chaude en surface (jusqu'à 5 à 6 mètres de profondeur).



Profil situé en aval de l'usine de Bolène

La masse d'eau est totalement homogène.

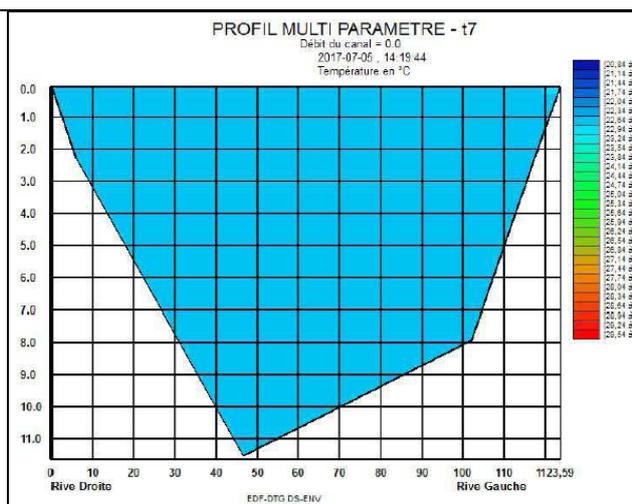


Figure 20 : Profils de température réalisés en aval de Bugey le 05/07/2017. Le débit du Rhône est d'environ 790 m³/s, le CNPE fonctionne à 75% de sa puissance nominale.

- Campagne réalisée en 2022

Durant l'été 2022, la surveillance renforcée du panache thermique a été réalisée à partir de profils de température d'eau. Ce type de mesure est adapté à la configuration du site (hauteurs d'eau importantes notamment) et permet de rendre compte de l'évolution longitudinale et transversale des zones échauffées, depuis le canal de rejet jusqu'au droit de la SMP aval, pour un fonctionnement du CNPE en Situation Exceptionnelle.

Lors de cette campagne de mesure, le 10 août 2022, les tranches 1, 2 et 4 étaient en fonctionnement avec :

- Une température amont du Rhône de 24,9°C,
- une température calculée en aval après mélange de 28,1°C (moyenne journalière) et un échauffement de 3,2°C.
- un débit du Rhône dans le canal de Donzère compris entre 350 et 400 m³/s.

Les six profils de température réalisés sont localisés :

- A 3,8 km en amont des rejets,
- entre les rejets et l'usine hydroélectrique de Bollène,
- en aval de l'usine de Bollène, au droit de la SMP aval.

Les mesures réalisées montrent que :

- La veine d'eau échauffée se répartit très rapidement sur toute la largeur du canal. L'échauffement est plus important en rive droite en aval immédiat des rejets, même si la veine chaude est déjà visible sur toute la largeur de la section.
- Dans cette masse d'eau échauffée, les températures s'homogénéisent rapidement sur la largeur du canal et les valeurs maximales observées diminuent à mesure que l'on s'éloigne des rejets.
- La veine de rejet présente une stratification verticale nette à l'aval des rejets et se mélange lentement, en conservant cette hétérogénéité verticale sur l'ensemble des profils situés à l'amont de l'usine de Bollène.
- Au niveau de la station SMP aval, située en aval de l'usine hydroélectrique de Bollène, la masse d'eau est totalement homogène.

Les données acquises pour un fonctionnement du CNPE de Tricastin en Situation Exceptionnel confirment les observations réalisées dans le passé lors des différentes campagnes de mesures : la veine chaude est totalement mélangée en aval de l'usine de Bollène et les mesures de températures d'eau à la SMP aval sont représentatives des températures aval après mélange.

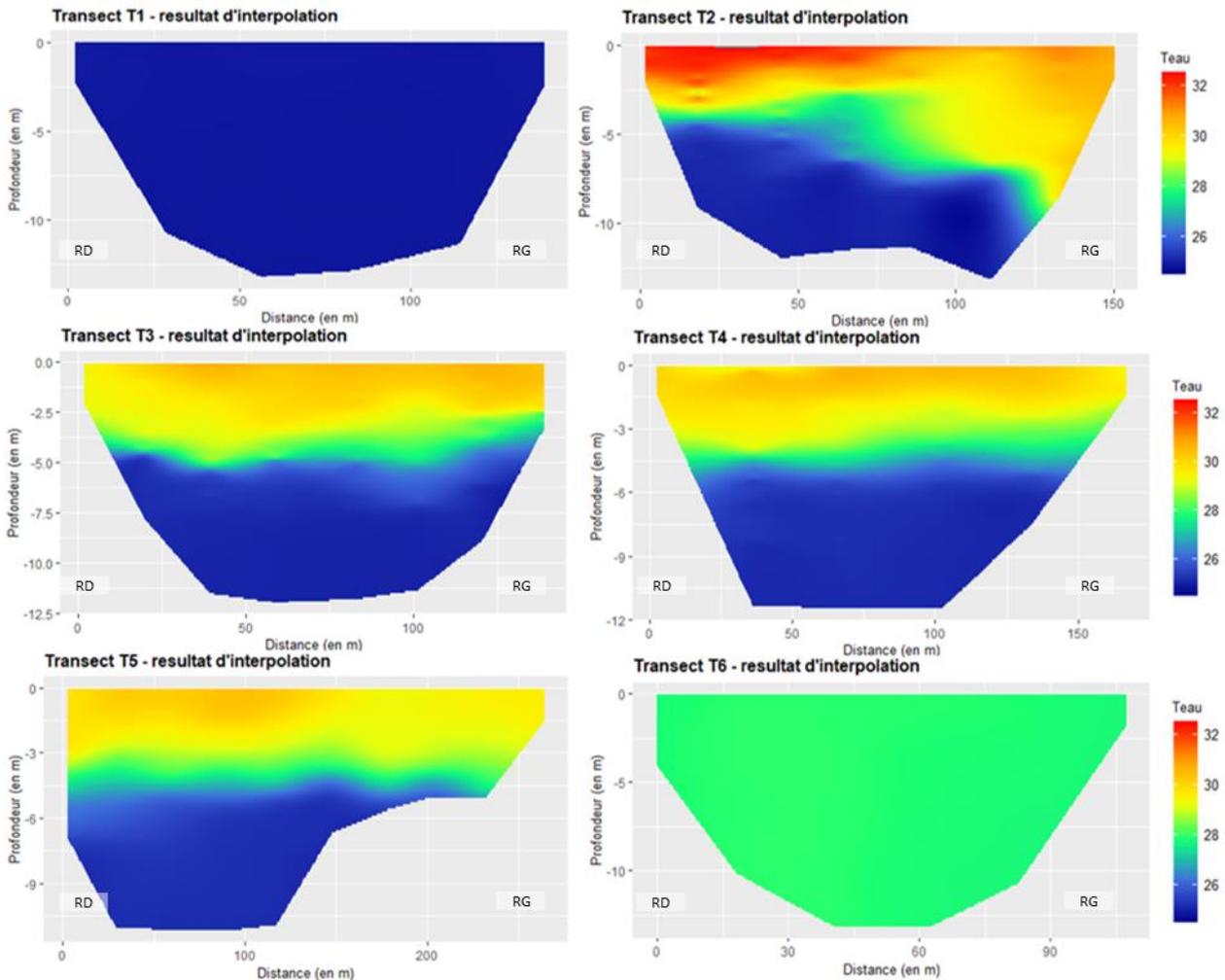


Figure 21 : Profils de température (°C) mesurés lors de la campagne du 10/08/2022

- Conclusion

Ces campagnes ont permis de caractériser le panache thermique du CNPE du Tricastin en période estivale, pour des débits du Rhône plutôt faibles et pour des situations de fonctionnement variées du CNPE, avec notamment une campagne réalisée en Situation Exceptionnelle.

Ces différentes campagnes de mesure confirment que les conditions hydrauliques en aval du CNPE sont favorables à la dilution dans le Rhône et que les caractéristiques du panache thermique sont similaires quelles que soient les conditions de débits et de température du Rhône. Ainsi :

- la veine de rejet s'étend rapidement sur toute la largeur du Rhône, le positionnement des rejets en rive droite conduisant à un mélange progressif sur toute la largeur du canal jusqu'à l'usine de Bollène,
- la section en aval de l'usine de Bollène est considérée comme homogène d'un point de vue thermique.
- le mélange complet des rejets est observé en aval de l'usine de Bollène, au droit de la SMP aval, située à 5 km en aval des rejets du CNPE.
- compte tenu des débits du Rhône, la dilution des rejets du CNPE dans le canal est donc relativement rapide à l'échelle du cours d'eau et de l'aménagement à ce niveau (le canal usinier mesure 17 km et le canal de restitution de l'usine est long de 11 km).

Ainsi, quel que soit le débit du Rhône, le mélange des rejets est considéré comme complet à 5 km en aval des rejets du CNPE, ce qui correspond à une distance de dilution relativement rapide à l'échelle du Rhône.

Ces différentes campagnes montrent que le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE de Tricastin quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées.

4.6 ZOOM SUR LES ECHAUFFEMENTS RESIDUELS SUR LE BASSIN DU RHONE

L'échauffement après mélange d'un CNPE se propage vers l'aval du cours d'eau et diminue au cours de sa propagation en raison des échanges thermiques avec l'atmosphère et des éventuels apports d'eau fraîche par les affluents. La décroissance de cet échauffement dit « échauffement résiduel » dépend entre autres du débit du milieu récepteur et des conditions météorologiques (température de l'air, ensoleillement, humidité, vent).

La propagation vers l'aval des échauffements des CNPE de Bugey, Saint-Alban et Tricastin (CNPE munis de circuits de refroidissement ouverts) a été caractérisée au cours de la phase II de l'Étude Thermique Rhône.

- **Étude Thermique Rhône**



Cette étude a permis de rappeler les grands facteurs qui influent sur la température de l'eau du Rhône : les transferts amont-aval d'eau, la discontinuité du lac Léman et dans une moindre mesure : les conditions météorologiques locales (température de l'air), la dilution par les affluents et les échauffements des CNPE.

Par ailleurs, les échauffements liés aux rejets des CNPE ne s'additionnent pas d'amont en aval, mais se conjuguent : lorsque le Rhône reçoit un échauffement supplémentaire, celui-ci n'est pas cumulé, mais dissipé en partie en fonction des conditions météorologiques. Il subsiste ainsi un échauffement résiduel en aval qui s'atténue progressivement. Lors de l'étude thermique Rhône, l'échauffement moyen lié à la contribution des CNPE a été évalué sur la période 1988-2010.

Sur les périodes les plus chaudes, les résultats de cette étude indiquent un échauffement résiduel lié au CNPE (en moyenne sur les 18 jours les plus chauds de l'année) de :

- 0,7°C à l'amont de Saint-Alban (issu des échauffements apportés par le CNPE de Bugey) ;
- 0,8°C à l'amont de Tricastin (issu des échauffements résiduels associés au CNPE de Bugey et Saint-Alban) ;
- 1,6 °C à Aramon (échauffement résiduel résultant de la contribution des CNPE en amont).

A l'échelle régionale, l'étude thermique du Rhône a montré, à partir de l'analyse statistique des mesures, qu'une variation de l'échauffement lié :

- au CNPE de Bugey met environ 2 jours pour se propager jusqu'à Jons et plus d'une semaine pour atteindre Aramon.
- au CNPE de Saint Alban met environ 2 jours pour se propager jusqu'à La Roche de Glun et 3 jours pour atteindre Aramon. **L'échauffement issu du CNPE de Saint-Alban est principalement atténué par la confluence avec l'Isère, rivière plus froide que le Rhône.**
- au CNPE du Tricastin met environ trois jours pour se propager jusqu'à Aramon, 70 km en aval du Tricastin.

• **Modélisation des échauffements résiduels le long du Rhône**

À la suite de l'été 2015, une modélisation complète du Rhône a été réalisée par EDF R&D. Celle-ci permet de modéliser la température du Rhône en différents points du fleuve jusqu'à Arles, en tenant compte de l'apport des différents affluents du Rhône, des phénomènes météorologiques rencontrés le long du fleuve, ainsi que de la propagation des échauffements apportés par les CNPE, via la modélisation du fonctionnement de leur source froide.

Des simulations complètes ont été réalisées sur la période 1977-2015 pour différents scénarios de fonctionnement des CNPE. La différence de températures d'eau atteinte en un point donné du Rhône, entre un scénario avec ou sans fonctionnement CNPE, permet de déterminer **l'échauffement résiduel** résultant de l'influence cumulée des rejets thermiques des CNPE situés en amont.

Concernant les périodes de plus fortes températures du Rhône, une analyse a été menée sur les périodes où la température d'eau en amont de Bugey est supérieure au centile 95%, soit **sur les périodes estivales les plus chaudes** (correspondant à 18 jours en moyenne par an, pour des températures en amont de Bugey > 21,5°C), en considérant différents états de fonctionnement des CNPE du Rhône (voir Figure 22). La propagation des échauffements en aval, **dans ces situations estivales les plus chaudes**, montre un échauffement moyen après mélange en aval de Bugey de 1,3°C à 2,4°C suivant le scénario de fonctionnement du CNPE, ce qui conduit à un échauffement moyen de 0,7°C à 1,3°C en amont de Saint-Alban. L'échauffement ajouté par le CNPE de Saint-Alban conjugué à l'échauffement résiduel de Bugey est ensuite atténué par les apports de l'Isère et se traduit par un échauffement résiduel moyen dans ces situations estivales de 0,8°C à 1,4°C en amont de Cruas, similaires à ceux atteints en amont du CNPE de Tricastin. À l'aval du Rhône, l'échauffement résiduel moyen cumulé **dans ces situations estivales les plus**

chaudes est de 1,4°C à 2,2°C à Arles, en considérant l'échauffement supplémentaire apporté par le CNPE de Tricastin.

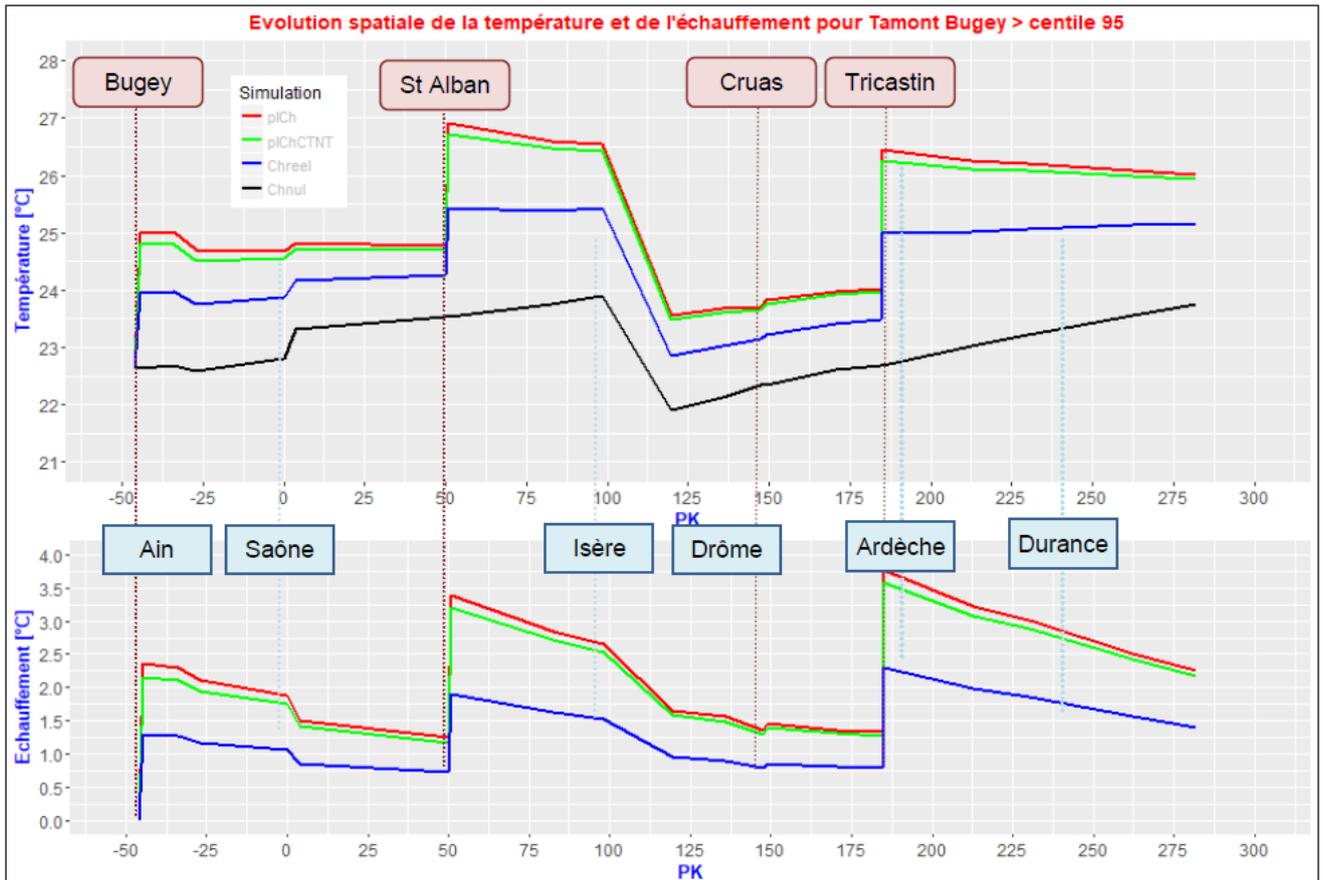


Figure 22 : Evolution spatiale des températures et échauffements résiduels lors des périodes où la température du Rhône à l'amont du Bugey est supérieure au quantile 95 (en noir, température de référence sans influence des CNPE, en bleu, scénario de fonctionnement des CNPE à puissance réelle produite sur la période simulée, en vert, scénario à puissance maximale avec respect des limites en conditions climatiques normales, en rouge, scénario à puissance maximale, au-delà des limites autorisées en CCN).

Conclusion

La température de l'eau du Rhône est influencée par plusieurs grands facteurs, principalement les transferts d'eau amont-aval et la discontinuité du lac Léman et, dans une moindre mesure, par les conditions météorologiques locales, la dilution par les affluents et par les échauffements apportés par les CNPE.

Par ailleurs, les échauffements liés aux rejets des CNPE ne s'additionnent pas de manière arithmétique d'amont en aval, mais ils s'atténuent progressivement : lorsque le Rhône reçoit un échauffement supplémentaire, celui-ci est dissipé progressivement en aval en fonction des conditions météorologiques et de l'apport des affluents, notamment de la Saône et de l'Isère.

4.7 CONCLUSION

Ces données montrent que les caractéristiques du panache thermique varient principalement en fonction de la conception du circuit de refroidissement, de l'ouvrage de rejet et des conditions d'écoulement. Ainsi, la dilution du panache des rejets thermiques pour les CNPE dépend **de la puissance thermique rejetée** (i.e. du niveau de puissance du CNPE) **et du débit du cours d'eau** en bord de rivière, et non des températures d'eau atteinte dans le milieu.

Ainsi, le panache thermique est très peu visible pour les CNPE qui fonctionnent en circuit fermé en situation de canicule, les conditions estivales étant favorables au fonctionnement des tours aéroréfrigérantes.

Dans tous les cas, les données collectées en période estivale et présentées ci-dessus sont considérées représentatives des caractéristiques du panache thermique dans des situations d'écoulement similaires, même si les températures étaient amenées à être plus élevées. Cette représentativité des données collectées depuis plusieurs années, durant différents épisodes de canicules est confirmée par les campagnes de surveillance du panache thermique réalisées durant l'été 2022 sur les sites de Golfech, de Bugey, Tricastin et dans une moindre mesure pour le CNPE de Saint-Alban.

Le tableau ci-dessous présente site par site le bilan de la surveillance du panache thermique réalisée.

Bassin	CNPE	Méthode de suivi	Mesures réalisées (O/N)			Bilan des campagnes de suivi thermique disponibles
			Canicule	CCE	SE	
Garonne	GOL	TIR & points fixes (+ profils)	O	O	O*	Le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE de Golfech quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées (panache rapidement dilué en aval).
Rhône	BUG	TIR & Profils + points fixes	O	N	O*	Le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE de Bugey quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées (veine chaude localisé en rive droite puis mélange progressif entre Loyettes et la confluence avec l'Ain).
	SAL	TIR & Profils	O	N	O**	Le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une bonne connaissance du panache thermique du CNPE de Saint-Alban quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées. La réalisation de profils de température complémentaires pourrait permettre de mieux appréhender les facteurs qui conditionnent la dilution du panache dans le canal de dérivation pour des faibles débits conjugués avec des températures élevées.
	TRI	TIR & Profils	O	N	O	Le suivi réalisé depuis plusieurs années permet d'avoir une connaissance complète du panache thermique du CNPE du Tricastin quelles que soient les conditions hydrauliques rencontrées (mélange complet en aval de l'usine de Bollène).

* suivi en SE réalisé à partir de mesures en points fixes (juillet à septembre 2022)

** profils de température réalisés 1 jour avant le passage en SE

5 REPONSES DES ECOSYSTEMES

Les paragraphes ci-dessous décrivent pour chaque compartiment de l'écosystème qui fait l'objet d'une surveillance, les réponses court-terme observées :

- lors des étés caniculaires 2003, 2006, 2015, 2018 et 2019 ; ces années constituent les épisodes caniculaires de référence pendant lesquels les CNPE ont fonctionné dans le cadre des CCN et mis en place le programme de surveillance associé (à l'exception de Golfech qui a réalisé une campagne supplémentaire dans le cadre des CCE en 2018).
- Lors de l'été 2022, première année de mise en œuvre du programme de surveillance en Situation Exceptionnelle, qui plus est de manière conséquente (plusieurs semaines de surveillance renforcée). Du fait du caractère exceptionnel de l'été 2022 au regard de la surveillance mise en œuvre, les résultats de cette année sont mis en évidence dans un paragraphe dédié pour chaque compartiment.

Le paragraphe traitant des réponses biologiques à long-terme s'appuie, quant à lui, sur plusieurs études (Etude thermique Rhône, Programme de recherche Thermie-Hydrobiologie), basées sur l'analyse de chroniques longues (couvrant généralement plusieurs décennies).

5.1 PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

5.1.1 Résultats 2003 à 2019

L'hydrologie est un paramètre déterminant de la variabilité de la physico-chimie des eaux. En période de sécheresse, les faibles débits exerceront donc une influence directe sur les concentrations en éléments minéraux. Par ailleurs, la température contrôlant les réactions métaboliques, elle agit indirectement sur les cycles biogéochimiques et donc sur le contrôle des éléments minéraux nécessaires au développement des organismes.

En 2003, les variations des paramètres physico-chimiques dues aux changements hydrologiques et thermiques ont été plus ou moins visibles selon les bassins hydrographiques voire selon les sites d'un même bassin. Ces variations sont restées, dans l'ensemble, modérées par rapport aux gammes de variations connues pour ces paramètres.

Selon les sites, les faibles débits peuvent avoir une incidence plus ou moins marquée sur les concentrations des différentes substances suivies de par l'effet de moindre dilution. Sur le bassin du Rhône, on a observé soit une tendance à la baisse de la concentration en matières azotées, soit une absence d'évolution significative (p. ex : Bugey). Sur le bassin de la Garonne à hauteur du CNPE de Golfech, les faibles débits

de l'été 2003 ont entraîné une augmentation des concentrations en éléments azotés et phosphorés par rapport aux années antérieures. Cependant, en 2018 et 2019, les concentrations en ammonium (NH_4^+) sont restées faibles malgré des conditions hydrologiques contrastées (débits élevés en 2018 et faibles en 2019).

Excepté à Tricastin (faible diminution observée) en 2003, les concentrations en oxygène dissous (O_2) ou les processus de dégradation de la matière organique ont été peu affectés. Plus récemment, à Golfech, lors des épisodes caniculaires de 2018 et 2019, aucune modification des paramètres d'oxygénation du milieu n'a été observée. Des valeurs basses ($< 5\text{mg/L}$) ont pu être observées au lever du soleil en aval éloigné du CNPE de Golfech (c'est-à-dire après mélange complet) en lien avec la conjonction d'une température élevée et des processus de respiration des organismes non compensés par la photosynthèse encore peu active à cette période de la journée. Ces observations ponctuelles n'ont pas eu de conséquence pour la faune et la flore. La zone du rejet est quant à elle toujours restée bien oxygénée grâce notamment aux échanges forcés entre air et eau dans les tours aéroréfrigérantes.

Pour l'ensemble des CNPE, aucune différence sur la qualité des eaux n'a été observée entre l'amont et l'aval des CNPE lors des épisodes caniculaires entre 2003 et 2019. Sur tous les bassins, le retour à des valeurs normales des paramètres physico-chimiques a été observé au plus tard lors de l'apparition des pluies automnales qui marque la fin de l'épisode de canicule/sécheresse. La physico-chimie des eaux n'a donc pas été durablement modifiée lors des épisodes caniculaires.

5.1.2 Résultats 2022

Les résultats du suivi renforcé mis en œuvre en 2022 sur les sites de Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Golfech n'ont pas mis en évidence d'influence du fonctionnement des CNPE en période de canicule sur les paramètres suivis (pH, conductivité, oxygène dissous, matières en suspension, ammonium pour l'ensemble des CNPE, ainsi que DCO et DBO5 pour Tricastin et Golfech).

En ce qui concerne le suivi réalisé en CCN, le suivi réalisé à Bugey et Saint-Alban montre que les résultats de 2022 restent globalement dans les gammes de valeurs observées des dix dernières années. De manière attendue et comme observé sur la période 2003-2019 (cf. §5.1.1), il est constaté une diminution de l'ammonium et des nitrates en période estivale en lien avec la consommation biologique de ces ions. De manière concomitante a été observée à cette période une baisse du TAC¹⁶, TH¹⁷ et des hydrogénocarbonates (et corrélativement de la conductivité) via la moindre solubilité du CO_2 et la précipitation d' HCO_3^- engendrée par l'élévation saisonnière de la température. L'influence de l'alcalinité sur les teneurs en silice est particulièrement marquée cette année avec des valeurs estivales très faibles, \leq

¹⁶ Titre Alcalimétrique Complet (teneur en hydroxydes, en carbonates et en bicarbonates).

¹⁷ Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau)

2mg/L et globalement < 3 mg/L entre juin et septembre. Les moyennes 2022 en silice sont ainsi toutes inférieures à celles des diverses chroniques, quelle que soit la station.

Pour le CNPE de Golfech les valeurs de DCO observées en période estivale sont dans les mêmes gammes de valeurs que les mesures réalisées hors période estivale (entre 8 et 10 mg O₂/L), à quelques exceptions près (quelques valeurs ponctuellement entre 11 et 14 mg O₂/L aux SMP). La DBO5 a tendance à être légèrement supérieure en période estivale avec quelques valeurs entre 2 et 3 mg O₂/L, tandis qu'elle est < 2 mg O₂/L entre janvier et mai et en novembre. Les concentrations en ammonium sont plus élevées les premiers jours d'août et retrouvent des valeurs équivalentes au reste de l'année dès le début du mois d'août.

Lors de l'épisode caniculaire 2022, la physico-chimie du secteur (amont et aval) n'a pas été durablement modifiée et aucune différence sur la qualité des eaux n'a été observée entre l'amont et l'aval des CNPE.

5.2 BILAN DES REPONSES BIOLOGIQUES

Les réponses biologiques lors des épisodes caniculaires résultent de l'interaction d'un ensemble de paramètres physiques et biologiques. Le nombre important d'interactions rend l'interprétation des évolutions observées particulièrement complexe. Il reste donc encore difficile aujourd'hui de dresser un lien direct entre un paramètre physique donné (la température) et les réponses biologiques et particulièrement lors d'épisodes caniculaires qui restent des épisodes peu fréquents et donc mal connus.

5.2.1 Réponses court-terme

Ce paragraphe reprend les observations qui ont été faites entre l'été et l'automne des années 2003, 2006, 2018 (pour Golfech) et 2022. Pour l'ensemble des compartiments biologiques, les observations en situation caniculaire sont comparées à celles des années antérieures issues des surveillances en conditions climatiques normales.

5.2.1.1 Plancton, diatomées et macrophytes

5.2.1.1.1 *Résultats 2003-2018*

A hauteur de la plupart des CNPE, il n'a pas été observé de biomasse planctonique (phytoplancton et zooplancton) inhabituelle, malgré les températures plus élevées. La composition de ces communautés (type et nombre d'espèces, densité par espèce...) a été modifiée en amont et en aval des CNPE. Seul le Rhône à hauteur des sites de Saint-Alban et Tricastin a connu un développement planctonique plus important à l'amont et à l'aval en 2003.

Des observations identiques ont été faites pour les diatomées ou les macrophytes, avec des modifications de composition des communautés mais pas de développement accru de ces compartiments. Seul le Rhône

à Tricastin a vu un développement macrophytique plus élevé que lors des années sans épisode caniculaire marqué.

Pour le plancton, les diatomées et les macrophytes, les années de canicule et/ou de sécheresse ont été caractérisées par une précocité des cycles biologiques de ces compartiments par rapport aux autres années.

A minima pour les macrophytes, il semble que ce soient les conditions printanières qui fixent le degré de développement des espèces, les conditions estivales n'ayant que peu d'influence sur la biomasse d'une année donnée.

Pour l'ensemble des CNPE, il n'a pas été relevé de différence significative entre l'amont et l'aval sur les compartiments planctons, diatomées ou macrophytes. L'effet du rejet thermique des CNPE n'a pas été plus marqué pendant les périodes caniculaires de 2003, 2006 ou 2018.

5.2.1.1.2 Résultats 2022

Les résultats de la surveillance renforcée mise en œuvre en 2022 sur le site du Bugey ne mettent pas en évidence de différence notable entre l'amont et l'aval sur les compartiments planctons et diatomées, mais une légère eutrophisation du milieu sur l'ensemble du tronçon suivi (amont comme aval) en lien avec les conditions de canicule et d'étiage.

En dépit de conditions hydroclimatiques estivales potentiellement favorables en 2022, les teneurs en pigments chlorophylliens sont restées très faibles à Bugey et Saint-Alban (< 2 µg/L à Bugey et < 7 µg/L à Saint-Alban).

A Saint-Alban, la surveillance renforcée de l'été 2022 ne met pas en évidence de différence notable entre l'amont et l'aval sur les compartiments planctoniques (phyto- et zoo-plancton). Le peuplement de diatomées benthiques est globalement comparable entre les deux stations, avec une diminution de l'indice diatomées en août, plus prononcée à l'aval qu'à l'amont. Cette dégradation peut s'expliquer pour les deux stations en partie par une eutrophisation plus sensible du milieu avec l'évolution des conditions hydrologiques estivales, et un possible effet d'amplification en aval en lien avec l'échauffement, ou par la situation de la station aval, située dans le canal de fuite de l'usine hydroélectrique CNR de Sablons, qui est fortement influencée par les éclusées lors des périodes de débit plus faible, ce qui aboutit alors à la mise à sec régulière de la frange littorale où se développe les diatomées. Toutefois, les résultats observés au mois de novembre confirment la tendance habituelle de la station aval éloignée qui présente la richesse la plus élevée (à égalité avec la station rejet) et un peuplement à nouveau diversifié et équilibré. En ce qui concerne les macrophytes, les conditions hydrologiques et thermiques du printemps et de l'été 2022 (étiage marqué et prolongé et températures de l'eau élevées) ont favorisé le développement de la végétation aquatique, sauf pour le

Potamot pectiné et les algues filamenteuses pour lesquels une régression est notée sur tout le secteur rive gauche de la retenue situé en aval du CNPE entre les relevés de mi-juin et ceux de début août.

A Tricastin, aucune différence notable entre l'amont et l'aval n'a été mise en évidence sur le compartiment phytoplanctonique. Malgré quelques différences ponctuelles entre l'amont et l'aval en termes de densité et de richesse du zooplancton ou en termes de richesse et d'IBD pour les diatomées benthiques, il n'est pas mis en évidence d'influence notable du fonctionnement du CNPE en période de canicule sur ces deux compartiments.

A Golfech, La surveillance du phytoplancton montre une production algale plus élevée à l'aval du CNPE, et présentant un maximum fin août. La richesse du peuplement était aussi plus élevée à l'aval. Ces observations pourraient être liées à la présence d'un aménagement hydraulique entre la station amont et la station aval, particulière à ce site (en termes de positionnement des stations vis-à-vis de l'aménagement), sans lien avec le fonctionnement du CNPE. Le zooplancton présentait une richesse plus élevée à l'aval lors des 3 campagnes estivales, avec une structure du peuplement comparable entre les deux stations. La densité était plus élevée début août en aval, mais était comparable lors les campagnes suivantes. La richesse des diatomées benthiques était temporairement plus faible en août sur l'ensemble du secteur d'étude. L'IBD calculée à l'aval immédiat des rejets du CNPE était également plus faible en août par rapport aux autres stations avant de retrouver des valeurs comparables aux autres stations en septembre. Ainsi, il ne peut être exclu un effet des températures élevées sur les populations de diatomées benthiques à l'aval immédiat (Lamagistère) au mois d'août. Toutefois, les résultats de septembre confirment que cette éventuelle influence présente un caractère ponctuel dans le temps et démontrent la résilience du compartiment diatomique. Enfin, le suivi en CCN des macrophytes met en évidence une richesse spécifique plus élevée par rapport aux années précédentes à l'amont comme à l'aval, les conditions hydrologiques et thermiques de 2022 ayant certainement favorisé le développement macrophytique. La note IBMR est supérieure à l'amont par rapport à l'aval, de manière cohérente avec les résultats du suivi ces 7 dernières années.

5.2.1.2 Invertébrés

5.2.1.2.1 Résultats 2003 -2019

Peu d'évolutions ont été relevées pour les invertébrés pendant l'épisode caniculaire de 2003 ou lors de l'automne qui a suivi. De manière similaire aux macrophytes, plancton et diatomées, des modifications de la composition des communautés d'invertébrés ont été observées, sans différence notable entre l'amont et l'aval. Sur le Rhône à Bugey, Saint-Alban et Tricastin, le développement préférentiel d'espèces à caractère thermophile a été observé.

Globalement, les conditions automnales ont permis un retour à des communautés d'invertébrés plus classiquement observées les années précédentes. D'autre part, aucune différence sur les communautés d'invertébrés n'a été relevée pendant les périodes caniculaires entre l'amont et l'aval des CNPE.

5.2.1.2.2 Résultats 2022

Pour l'année 2022, la surveillance réalisée pour les CNPE de Bugey, Tricastin et Golfech n'a pas mis en évidence d'effet particulier des conditions climatiques singulières (étiage marqué et canicule) de la période estivale 2022 sur la macrofaune benthique.

A Saint-Alban, une baisse progressive de la richesse est constatée à l'aval éloigné et dans le RCC (milieux les plus lotiques, i.e. courants) depuis plusieurs années. La richesse totale annuelle 2022 à l'aval immédiat et à l'aval éloigné suit cette tendance et est plus faible qu'aux trois autres stations. Il semblerait que la stabilité hydrologique de 2022 ait profité à la station RCC, pour laquelle la richesse totale annuelle est en nette augmentation par rapport à 2021.

5.2.1.3 Poissons structure du peuplement

5.2.1.3.1 Résultats 2003-2019

Quel que soit le CNPE considéré, les suivis réalisés pendant les épisodes caniculaires n'ont jamais mis en évidence de mortalités piscicoles. De la même manière, en 2003, 2006 et 2018, de façon similaire aux autres compartiments, le seul effet qui a pu être observé pour le compartiment piscicole est une modification temporaire de sa composition. En 2018 à Golfech, la modification observée du peuplement (légère baisse de densité en aval immédiat) n'a pu être attribuée au seul effet de la canicule étant données les valeurs élevées de débits qui ont pu également jouer un rôle important dans la répartition des peuplements piscicoles et leur capturabilité en pêche électrique.

En 2003, sur les cours d'eau relativement froid comme le Rhône à Bugey, les espèces d'eau froide (truite, vairon, loche franche et blageon) ont été moins pêchées que les années précédentes mais sont apparues de nouveau à l'automne. Ceci laisse supposer pour ces espèces une capacité d'évitement du Rhône devenu plus chaud au profit d'affluents restés plus frais (effet d'un couvert végétal plus important ou effet des apports de nappe).

Si d'un bassin-versant à un autre les espèces favorisées par les périodes caniculaires changent, le pool d'espèces thermophiles concerné reste relativement restreint à une dizaine d'espèces. Les deux effets les plus nets sont une meilleure survie des juvéniles en fin d'été (effectifs automnaux plus importants) et une croissance plus importante.

5.2.1.3.2 Résultats 2022

Pour l'année 2022, les éventuelles différences observées dans la structure des peuplements lors des périodes de CCE/SE (effectifs plus faibles à l'aval à Bugey) sont globalement limitées à la période estivale et un retour à des résultats habituels (sans différence notable amont/aval) est constaté à l'automne, à l'exception du CNPE de Saint-Alban. Pour ce CNPE, les résultats du suivi de la structure du peuplement piscicole indiquent un moindre effectif et une moindre proportion de juvéniles à la station aval par rapport à la station amont pendant la période estivale ainsi qu'à l'automne, tout en restant dans les valeurs déjà rencontrées à cette station. Ces résultats pourraient s'expliquer par un comportement d'évitement de certaines espèces vis-à-vis de la zone échauffée, couplé à des conditions défavorables d'habitat et de courantologie dans le canal de fuite, n'offrant pas de zone de refuge thermique.

Plus spécifiquement, à Tricastin les conditions de stabilité hydrologique se sont avérées favorables pour la reproduction des poissons, la survie des jeunes stades, et la croissance estivale des juvéniles des espèces phytophiles (exemple : le brochet), phyto-lithophiles (brème bordelière, gardon) et lithophiles (chevaine, hotu, spirilin, toxostome). Des données complémentaires acquises dans le cadre de travaux de recherche ont permis de montrer que les tailles atteintes en septembre par les jeunes chevaines ont été moindres en regard de la longue période de températures supérieures à 12°C. Il est probable que les fortes températures de l'été et le nombre de jours successifs pendant lesquels la température a excédé 25°C ont été des facteurs de stress au cours de cette période de croissance.

5.2.1.4 Poissons – état sanitaire

Les pêches automnales en 2003 et, dans une moindre mesure, celles des épisodes caniculaires de 2018 et 2019 à Golfech, et en 2022 à l'aval à Tricastin ont pu mettre évidence des développements parasitaires plus importants sur quelques individus, sans incidence notable sur la survie des individus et globalement du peuplement piscicole. En 2019, à Golfech, des parasites ont été observés (lernées) avec le CNPE à l'arrêt pour respect des limites thermiques réglementaires (Température de la Garonne autour de 29°C). Dans l'ensemble des observations faites lors des épisodes caniculaires entre 2003 et 2019, aucune différence notable n'a été relevée dans les communautés de poissons entre l'amont et l'aval des CNPE.

Le développement des parasites de poissons bien qu'en partie lié à la température (qui conditionne la dynamique des hôtes et des parasites), dépend surtout de la mise en présence des hôtes et des parasites. La probabilité d'infestation des hôtes pourrait ainsi être augmentée d'une part, par une accélération de la dynamique de population des parasites et d'autre part, par un ralentissement des vitesses d'écoulement consécutif à la diminution des débits. L'origine de la charge parasitaire est donc sans doute multifactorielle (température, hydrologie...) (EDF, 2017¹⁸). **Ainsi, dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de conclure quant à l'effet de l'augmentation des températures sur le risque sanitaire pour**

¹⁸ Maire A. (2017) Synthèse bibliographique sur l'influence de la température sur l'état de santé de la faune piscicole. Rapport EDF No. 6125-3313-2017-00186-FR.

les poissons d'eau douce en raison de la complexité des mécanismes sous-jacents en lien avec l'adaptation et la sensibilité thermique à la fois des hôtes et des parasites. Le suivi de ce paramètre n'apparaît donc pas pertinent dans l'objectif d'évaluer l'influence sur l'écosystème du fonctionnement des CNPE en période de canicule.

5.2.1.5 Poissons migrateurs

L'effet de la canicule de l'été 2003 sur quatre espèces de grands migrateurs (le saumon atlantique, l'alose, l'anguille et la lamproie marine) de la Garonne et de la Dordogne a été analysé à partir des données de passage des migrateurs en utilisant les résultats des comptages à hauteur des dispositifs de franchissement de Golfech et de Tuilières et à partir de diverses observations réalisées lors de cet épisode caniculaire.

Les températures élevées (autour de 24°C) semblent avoir été à l'origine de l'arrêt de la montaison des salmonidés. Cependant l'alose et l'anguille ont circulé autant que les années antérieures, et la lamproie marine a atteint des records à l'ascenseur de l'usine hydroélectrique de Golfech. Pour les aloses, la forte élévation de température du mois de juin 2003 semble avoir entraîné un arrêt précoce de la reproduction.

La similarité des phénomènes observés sur la Garonne à Golfech et la Dordogne à Tuilières laisse penser que l'effet des rejets thermiques de la centrale nucléaire de Golfech a été faible, voire inexistant, par rapport à l'effet du réchauffement global exceptionnel.

5.2.2 Réponses long-terme

Ce paragraphe reprend les observations réalisées dans le cadre de plusieurs études (Etude thermique Rhône, Programme de recherche Thermie-Hydrobiologie 2008-2013, validé par l'IRSTEA (aujourd'hui INRAe) et EDF R&D et approuvé par le Ministère en charge de l'écologie et l'ASN), basées sur l'analyse de chroniques longues (couvrant généralement plusieurs décennies). Les informations existantes sur les évolutions à long-terme des compartiments biologiques concernés, suite aux épisodes caniculaires, sont plus restreintes notamment en raison du faible nombre de canicule au cours des 30 dernières années. Ainsi on ne dispose d'éléments que pour les communautés d'invertébrés et de poissons des bassins Rhône, Seine et Meuse.

Dans le cas de l'analyse de chroniques de données à long terme, l'analyse de l'effet de la température seule est très complexe. En effet, des phénomènes extrêmes concernant d'autres paramètres (notamment l'hydrologie avec les phénomènes de crues), rentrent en interaction avec les effets de la température et rendent difficile tout lien direct entre un phénomène biologique et le paramètre température seul.

Sur l'ensemble des études, il ressort que les tendances évolutives majeures des peuplements suivent celles des paramètres environnementaux au cours des 30-40 dernières années. Notamment, l'allongement des périodes de températures favorables à la faune et la flore (printemps précoce et automne plutôt doux)

explique certaines évolutions biologiques constatées sur plusieurs compartiments (développement précoce des individus, taille plus importante...). Dans ces chroniques, les canicules ne correspondent pas nécessairement à des épisodes de rupture ou à des points atypiques.

Sur le Rhône, les peuplements d'invertébrés ont fortement évolué entre 2003 et 2004 et dans une moindre mesure entre 2006 et 2007. Cependant, ces évolutions, correspondant principalement à l'arrivée de nouvelles espèces exogènes ne sont pas totalement imputables aux températures élevées des étés 2003 et 2006 puisque d'une part, les débits ont également été faibles pendant ces étés et d'autre part, l'hiver 2003-2004 a connu des crues exceptionnelles sur le Rhône. Les crues, au travers de la connexion des bassins versants du Rhône et du Danube (par les canaux de navigation) ont favorisé la dispersion et l'implantation de ces espèces qui ont alors trouvé des conditions favorables à leur maintien dans le Rhône (principalement en aval de Lyon) en raison de l'augmentation de sa température moyenne.

Pour les poissons du Rhône, les plus fortes ruptures sont concomitantes aux fortes crues, notamment pour le bas-Rhône (à l'aval de Lyon). Les crues de 1994 et 1995 ont amené des changements nets dans la dynamique des peuplements piscicoles tout particulièrement chez les juvéniles (effectifs en nette augmentation). On note également que pour certaines années caniculaires les forts effectifs de juvéniles en fin d'années caniculaires ne sont pas suivis par des années à plus d'effectifs dans les classes d'âge supérieures. Cette forte abondance de juvéniles ne semble donc pas se transmettre d'une année à l'autre (ou même quelques années plus tard).

5.2.3 Conclusion sur les réponses biologiques

Quel que soit le paramètre ou le compartiment considéré, l'effet du rejet d'eau chaude n'a pas été plus marqué pendant les épisodes caniculaires de 2003 à 2019 par rapport aux années précédentes : aucune différence biologique entre les stations amont et aval des surveillances hydroécologiques n'a pu être mise en évidence.

En ce qui concerne l'année 2022, les résultats du suivi renforcé mis en œuvre à Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Golfech ne mettent pas en évidence d'influence notable du fonctionnement des CNPE sur la physico-chimie. Si des différences temporaires ont pu être observées entre l'amont et l'aval des CNPE pour certains paramètres décrivant les peuplements du phytoplancton, du zooplancton ou des diatomées benthiques, ces paramètres étaient de nouveau similaires entre stations à l'automne. Ainsi, ces résultats ne mettent pas en évidence d'influence notable du fonctionnement des CNPE concernés sur ces compartiments. De même, des différences temporaires ont pu être observées concernant l'état sanitaire ou la structure du peuplement des poissons pour le CNPE du Bugey, avant un retour à des situations comparables entre stations amont et aval à l'automne. Pour les CNPE de Golfech et Tricastin, aucune différence notable n'a été constatée concernant les poissons. Le fonctionnement de ces trois CNPE n'a donc pas eu d'influence notable sur le compartiment piscicole. Pour le CNPE de Saint-Alban, aucune influence notable sur l'état sanitaire des poissons n'a été mise en évidence. Les résultats du suivi de la structure du

peuplement piscicole indiquent une différence, persistante à l'automne, entre les stations amont et aval, pouvant s'expliquer par un comportement d'évitement de certaines espèces vis-à-vis de la zone échauffée, couplée à des conditions défavorables d'habitat et de courantologie dans le canal de fuite (station aval). Enfin, l'évolution de la structure du peuplement s'apprécie à un pas de temps pluriannuel. Les résultats des prochaines années apporteront des éléments de compréhension sur les potentiels effets de la canicule 2022 sur la communauté de poissons.

Les liens directs entre température et réponse biologique ne sont pas aisés à établir étant donnée la nature multifactorielle du contrôle du fonctionnement des communautés biologiques. Les dernières études scientifiques sur les liens entre température et biologie (cf. Annexe) ont principalement permis de confirmer le rôle fondamental de tout un ensemble de paramètres du milieu, dont la température, sur les peuplements aquatiques, leur fonctionnement et les processus écologiques auxquels ils contribuent. Les résultats de ces études sont cohérents avec les résultats clés des programmes de recherche précédents, et les complètent, notamment concernant les déterminants environnementaux des processus migratoires des poissons et les échanges trophiques au sein des écosystèmes aquatiques.

De manière attendue, les observations lors des canicules et les analyses long-termes confirment la sensibilité des espèces d'eau froide aux canicules. Parmi les espèces piscicoles, les espèces migratrices sont les espèces les plus sensibles au moment des épisodes caniculaires.

De manière systématique, les études à long terme (cf. Annexe 2) ont montré qu'aucune différence significative dans les tendances biologiques n'est observable entre les stations localisées à l'amont des CNPE et celles localisées à l'aval, que ce soit pour le phytoplancton, les invertébrés benthiques ou les poissons (migrateurs compris). Les changements globaux sont les déterminants principaux des évolutions biotiques constatées.

5.3 BILAN DES REPONSES MICROBIOLOGIQUES

L'échauffement des cours d'eau lié à un épisode caniculaire peut entraîner des modifications structurelles et fonctionnelles du compartiment microbien aquatique. Au sein de ce compartiment, certains micro-organismes peuvent être potentiellement pathogènes pour l'Homme ou peuvent être indicateurs d'un risque sanitaire ou environnemental. Ils peuvent alors nécessiter une surveillance du milieu, d'une part au regard des activités nautiques et de baignade et d'autre part au regard du risque d'eutrophisation.

5.3.1 Bactéries indicatrices d'une contamination fécale (*Escherichia coli* et entérocoques)

Les agents pathogènes d'origine fécale peuvent être présents dans l'eau, principalement via les rejets des stations d'épurations d'eaux usées et le lessivage de matières fécales animales (en lien avec les activités

d'élevage) par les eaux de pluie. La contamination de l'eau de surface par des matières fécales est un facteur de risque sanitaire pour les usages anthropiques de l'eau (potabilisation d'eau, baignade). Les espèces pathogènes étant très variées, potentiellement présentes en très faibles quantités et complexes à détecter, des indicateurs de la contamination de l'eau par des matières fécales ont été définis. Ainsi, pour les eaux de surface utilisées pour la baignade et pour les eaux utilisées pour la production d'eau potable, la réglementation applicable en France impose la surveillance de deux indicateurs : la bactérie *Escherichia coli* et le groupe des entérocoques intestinaux (ensemble d'espèces bactériennes). Ce suivi est réglementaire pour EDF en conditions climatiques exceptionnelles pour les sites concernés par ce dossier.

Les bactéries pathogènes d'origine fécale et les indicateurs associés ne sont généralement pas des bactéries libres, mais des espèces dont le développement dépend d'un hôte (humain ou animal par exemple). Les cours d'eau ou circuits de refroidissement ne sont ainsi pas les biotopes naturels des espèces pathogènes et des indicateurs d'origine fécale. Dans l'eau de surface et dans les circuits de refroidissement, ces espèces ne se développent pas. Leur survie dépend de différents paramètres (température, luminosité, qualité de l'eau, présence d'espèces prédatrices)¹⁹. La surveillance n'est donc pertinente qu'au point d'usage (site de baignade, captage d'eau potable), et est de la responsabilité du gestionnaire de ce site.

De manière générale, la température est un facteur affectant négativement la survie de ces espèces dans l'eau de surface¹⁹ à l'inverse de ce qui est observé dans leur biotope naturel ou dans des conditions de laboratoires. Ainsi, les conditions de canicule ne représentent pas des conditions favorables au développement des espèces pathogènes d'origine fécale (et des indicateurs associés) dans l'environnement. L'élévation de température à l'aval des CNPE n'est donc pas de nature à augmenter le risque sanitaire lié à la présence d'espèces pathogènes d'origine fécale dans les eaux de surface.

Les concentrations mesurées dans l'environnement des CNPE lors des été 2003, 2006, 2015, 2018, 2019 et 2022 sont du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées lors des autres étés (dans les deux cas de l'ordre de 100 UFC/100mL et 10 UFC/100mL pour *Escherichia coli* et les entérocoques intestinaux, respectivement). De plus, les résultats ne montrent pas, en moyenne, de différences significatives entre les concentrations amont et aval lors de ces périodes. Des variations ponctuelles ont parfois été constatées, le plus souvent associées à des épisodes pluvio-orageux (apport par lessivage de sols agricoles et saturation de la capacité de traitement des stations d'épuration).

Ainsi le REX ne permet pas d'identifier d'impact du fonctionnement des CNPE en condition de canicule sur les concentrations en flores indicatrices d'une contamination fécale.

A noter qu'en 2019, des mesures ont été réalisées dans l'environnement du CNPE de Golfech, en période de canicule, hors période de fonctionnement du CNPE. Les concentrations en *Escherichia coli* et entérocoques intestinaux mesurées à 7 stations étaient toutes inférieures à 100 UFC/100mL. Les analyses

¹⁹ OMS, *Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif*, ISBN 978-92-4-254995-9, 2017

des bactéries indicatrices de contamination fécale n'ont ainsi pas mis en évidence de concentrations élevées liées à cet épisode, indépendamment du fonctionnement du CNPE.

5.3.2 Cyanobactéries

Les cyanobactéries sont des bactéries photosynthétiques dont certaines espèces peuvent produire des cyanotoxines, potentiellement toxiques pour l'Homme. Leur prolifération peut être favorisée par l'échauffement des milieux, en conditions nutritives et hydrauliques favorables (stabilité de la masse d'eau)^{20,21}. Ces proliférations font l'objet d'une surveillance par les gestionnaires des sites d'eaux de baignade²², de zone de pêche et de captages d'eau pour potabilisation, selon les recommandations de la Direction Générale de la Santé. Enfin, leur surveillance contribue au suivi de l'eutrophisation des milieux aquatiques.

Ce suivi est réglementaire pour EDF en conditions climatiques exceptionnelles pour les sites concernés par le présent dossier.

Les résultats disponibles pour Bugey, Saint-Alban et Tricastin montrent que le Rhône, dans l'environnement de ces sites, n'est pas favorable à la présence de cyanobactéries. Cela s'explique notamment par l'absence de zones lenticques (absence de stabilité de la masse d'eau) et par la turbidité importante (absence de pénétration de la lumière). Les résultats disponibles pour les étés 2003 et 2022 montrent des concentrations (exprimées en cellules par mL) toujours très faibles, très inférieures à 20 000 cell./mL, valeur retenue pour informer l'OFB en cas de canicule, et correspondant à un seuil de gestion pour les sites de baignade jusqu'en 2021.

Pour le CNPE de Golfech, les résultats disponibles pour les étés 2003 et 2022 montrent aussi des concentrations faibles (toujours inférieures à 500 cell./mL) au regard du seuil d'information de l'OFB. Le milieu semble toutefois légèrement plus favorable à la présence de cyanobactéries. La présence de la retenue de Malause favorise notamment le développement des cyanobactéries (milieu lentique), influençant notablement les résultats obtenus à l'aval de la retenue et du CNPE.

Ainsi, le REX des canicules de 2003 à 2022 ne met pas en évidence d'impact du fonctionnement des CNPE concernés par ce dossier, en période de canicule, sur les cyanobactéries.

²⁰ Avis de l'Anses, Saisines n° 2016-SA-0165 et 2015-SA-0207 ; *Évaluation des risques liés aux cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux douces*, 2020

²¹ OMS, *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*, 1999

²² Instruction DGS/EA4/EA3/2021/76 du 6 avril 2021 relative à la gestion en cas de prolifération de cyanobactéries dans les eaux douces de baignade et de pêche récréative.

5.3.3 Amibes *Naegleria fowleri*

L'amibe *Naegleria fowleri* est naturellement présente dans les eaux de surface, en concentration très faibles. Elle peut trouver des conditions de développement favorable (la température élevée et la recirculation d'eau brute) dans les circuits de refroidissement fermés des CNPE de bord de rivière., dans les circuits de refroidissement. Les sites concernés par le présent dossier et présentant un risque de rejet de *Naegleria fowleri* dans l'environnement sont donc Bugey et Golfech.

La décision ASN « Risques Microbiologiques » n°2016-DC-0578 cadre pour ces deux CNPE les modalités de surveillance à l'aval des sites : la fréquence d'analyse est *a minima* mensuelle. La concentration est toutefois mesurée quotidiennement dans l'installation en fonctionnement, entre le 15 avril et le 15 octobre. Ces résultats d'analyses permettent de calculer quotidiennement la concentration en amibes à l'aval du site. L'ensemble de ces dispositions et le respect de la concentration seuil de 100 Nf/L permet de maîtriser le risque sanitaire.

L'ANSES²³ a évalué le risque lié à la présence de *N. fowleri* dans les eaux de baignade²⁴. Les conclusions du groupe de Travail de l'ANSES sont que :

- La température du milieu est un facteur influençant positivement la détection de *N. fowleri* dans l'environnement.
- La détection de *N. fowleri* est plus fréquente pour des températures supérieures à 25-27°C.
- Une température supérieure à 25-27°C n'est pas un paramètre suffisant à la détection de *N. fowleri*.

Pour les CNPE de Bugey et Golfech, en Situation Exceptionnelle, la température après mélange dépasse 25-27°C. Pour ces sites, dont des circuits de refroidissement peuvent rejeter des amibes *N. fowleri*, la température à l'aval du site en Situation Exceptionnelle serait donc plus à risque.

Des mesures d'amibes *Naegleria fowleri* ont été réalisées lors des périodes caniculaires de 200 ,à 2022 dans l'environnement des CNPE de Golfech et Bugey. *Naegleria fowleri* est détectée dans moins de 50% des échantillons à l'aval des CNPE, avec des concentrations toujours inférieures à la limite réglementaire de 100 Nf/ (2 à 15 Nf/L à l'aval des CNPE)L.

Ainsi, le REX des canicules entre 2003 et 2022 ne met pas en évidence d'impact du fonctionnement des CNPE concernés par ce dossier, en période de canicule, sur les amibes *N. fowleri*.

²³ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

²⁴ Avis de l'Anses, Saisine n°2011-SA-0190, Analyse des risques sanitaires liés à la présence d'amibes *Naegleria fowleri* dans les eaux de baignade. 2014

6 OBSERVATIONS BIOLOGIQUES AU REGARD DES TEMPERATURES MAXIMALES RENCONTREES

L'objectif de ce paragraphe est de donner des éléments concernant la réponse des compartiments biologiques en période de canicule au regard des températures maximales déjà rencontrées au droit des CNPE et des épisodes prolongés à une température de l'eau supérieure à 25°C. La valeur de 25°C a été retenue car c'est une valeur communément admise dans la littérature scientifique comme décrivant des températures élevées pour le milieu aquatique d'eau douce (par exemple : température optimale maximale de juvéniles et adultes de nombreuses espèces de poissons²⁵). L'annexe 1 illustre, à l'aide d'un schéma, les différentes valeurs retenues pour contextualiser les campagnes de surveillance renforcée.

Les situations retenues correspondent aux périodes de canicules pendant lesquelles les températures maximales observées ont dépassé les limites thermiques applicables en CCN et pour lesquelles des données fiabilisées, comprenant la surveillance biologique, sont disponibles. Pour le CNPE de Saint-Alban en particulier, il n'y a pas de retour d'expérience quant à l'incidence des températures au-delà des limites de température aval en CCN. En effet, la limite de 28°C a été dépassée de manière très limitée en valeur et dans le temps en 2022, avec 28,04°C calculé à l'aval pendant 1 journée, ce qui n'est pas significatif au sens de la perception par l'écosystème. C'est pourquoi il n'est pas retenu d'épisodes de canicules sur le site de Saint-Alban dans le présent paragraphe.

6.1 RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA GARONNE AU DROIT DE GOLFECH EN 2019 ET 2022

Depuis 2006, les épisodes de canicule estivale les plus importants se sont traduits par des dépassements durables de la température de 28°C en amont comme en aval du CNPE de Golfech durant les étés 2019²⁶ et 2022. Durant chacun de ces épisodes, une surveillance complémentaire de l'environnement a été mise en œuvre.

L'épisode de canicule de l'été 2018 n'est pas retenu car le CNPE de Golfech n'a dépassé la limite de 28°C en aval que très ponctuellement (valeur maximale de 28,2°C et dépassement de 28°C durant 36h sur 2 jours).

²⁵ L. Tissot, Y. Souchon. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. Hydroécologie Appliquée, EDP Sciences, 2011, 17, p. 17 - p. 76.

²⁶ Durant l'été 2019, la température aval après mélange a dépassé la valeur limite de 28°C durant une journée (le 23 juillet 2019), puis le CNPE a été mis à l'arrêt compte-tenu de l'absence de requis RTE (le 23 juillet à 17h). La température amont de la Garonne a dépassé 28°C durant 4 jours consécutifs (température maximale de 29,2°C en moyenne journalière), les 2 tranches du CNPE étant entièrement à l'arrêt durant cette période. Durant cet épisode de chaleur, un programme renforcé de surveillance (surveillance volontaire) a été mis en œuvre à partir du 25 juillet.

6.1.1 Conditions hydrométéorologiques de l'été 2019

L'étiage 2019 s'est installé à la mi-juin, avec un épisode caniculaire dès la fin du mois du juin. L'hydrologie est restée globalement déficitaire en juin (débit moyen mensuel de 225 m³/s pour un débit mensuel interannuel de 393 m³/s sur la période [1967-2019]) et a poursuivi sa dégradation jusqu'en septembre. En juillet, le débit moyen mensuel de la Garonne a été inférieur de moitié au débit mensuel interannuel (95 m³/s contre 186 m³/s).

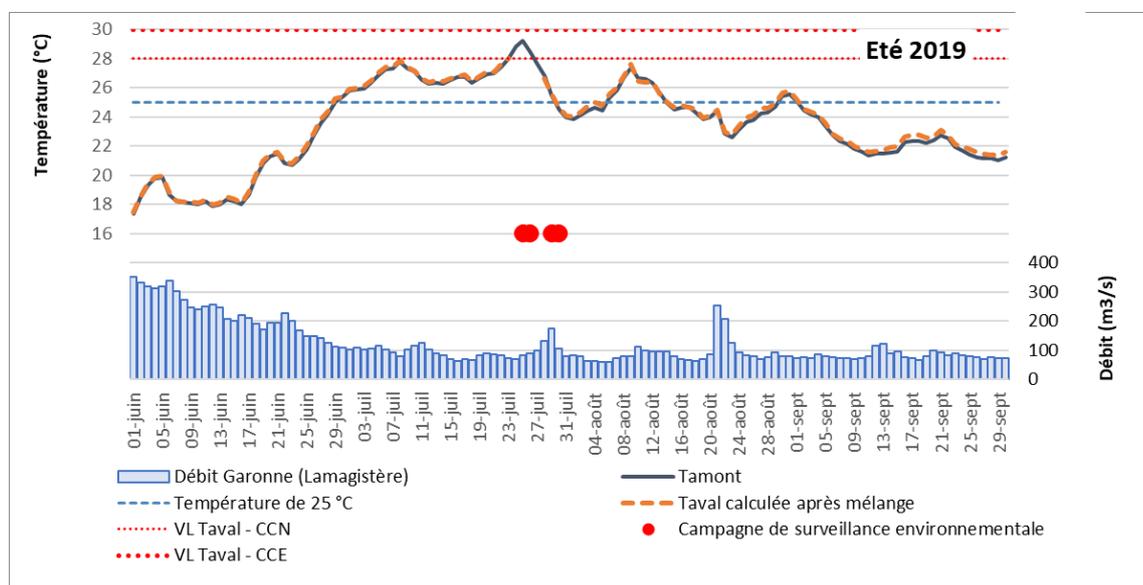


Figure 23 : Caractéristiques de l'été 2019 de la Garonne au CNPE de Golfech

La Garonne (en amont comme en aval du CNPE) a atteint une température l'ordre de 29°C (valeur maximale 29,2°C en moyenne journalière enregistrée le 25 juillet 2019), alors que le CNPE était à l'arrêt.

Lors de la période précédant le dépassement de la température de 28°C dans la Garonne (température aval de 28,3°C atteinte le 23 juillet 2019), la température amont et la température aval étaient supérieures à 25°C depuis 24 jours.

Entre le 1er juin et le 30 septembre, la valeur de 25°C a été atteinte ou dépassée durant :

- 42 jours dont un épisode de 31 jours consécutifs en amont du CNPE,

- 39 jours dont un épisode de 25 jours consécutifs en aval du CNPE.

En 2019, la température de la Garonne a dépassé 28°C durant 4 jours (dont uniquement un jour avec le CNPE en fonctionnement).

L'été 2019 permet d'analyser l'effet des températures élevées de la Garonne sur la biologie en amont et en aval du CNPE de Golfech (températures des eaux de la Garonne de l'ordre de 29°C), ces températures amont et aval étant très proches compte-tenu du faible échauffement induit par le fonctionnement CNPE (hors période d'arrêt).

6.1.2 Résultats de la surveillance hydroécologique renforcée en 2019

En 2019, malgré l'absence de requis RTE, EDF a réalisé de manière volontaire un suivi renforcé. La température a dépassé les 28°C le 23/07 et les campagnes de surveillance renforcée ont été menées entre le 24 et le 30 juillet. Les prélèvements de diatomées et les échantillonnages de l'ichtyofaune ont été effectués une seule fois au cours de l'épisode caniculaire (ayant duré moins d'une semaine). Les prélèvements d'eau ont été effectués 2 fois.

Le suivi des paramètres physico-chimiques (DCO, DBO5, ammonium) et microbiologiques (paramètres « eau de baignade ») ne mettent pas en évidence de différence entre les stations amont et aval.

L'analyse des peuplements de diatomées benthiques montre que l'ensemble de la zone d'étude (de l'amont à l'aval éloigné) est eutrophisée et indiquent la richesse en nutriments du cours d'eau au niveau des quatre stations suivies. Les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en évidence une influence du CNPE en période de canicule sur les peuplements de diatomées à l'aval du CNPE de Golfech.

L'examen sanitaire des poissons indique la présence de lésions diverses sur l'ensemble de la communauté de poissons, avec peu d'individus diagnostiqués quelle que soit la station et sans que cela ne présente un risque pour la survie des individus et pour les populations de poissons.

La richesse spécifique des peuplements de poissons est globalement similaire entre l'amont et l'aval du CNPE, avec des espèces dominantes différentes entre les stations. Les valeurs de l'IPR n'indiquent pas de changement notable de qualité entre l'épisode caniculaire de 2019 et les campagnes en situation climatique normale de 2017 et 2018, ni entre les stations amont et aval du CNPE. L'étude de l'ichtyofaune avec calcul de l'IPR ne permet donc pas de mettre en évidence l'effet de l'épisode caniculaire sur les populations de poissons.

6.1.3 Conditions hydrométéorologiques de l'été 2022

L'étiage 2022 s'est installé dès le début mois de juin avec des débits très bas dès le printemps (entre le quantile 10% et les minimas historiques dès le mois de mai 2022 - période de 1967 à 2010). Au 1^{er} juin, le débit de la Garonne était de l'ordre de 200 m³/s. Compte-tenu du déficit de précipitations (aussi bien au printemps que lors de la période estivale), l'étiage 2022 a été particulièrement marqué. La période de retour du débit minimal enregistré pendant 30 jours consécutifs (VCN 30) à Lamagistère est estimé à environ 40 à 50 ans. Le soutien d'étiage par les aménagements hydrauliques situés en amont a permis de maintenir le débit de la Garonne au-dessus de 50 m³/s à Lamagistère.

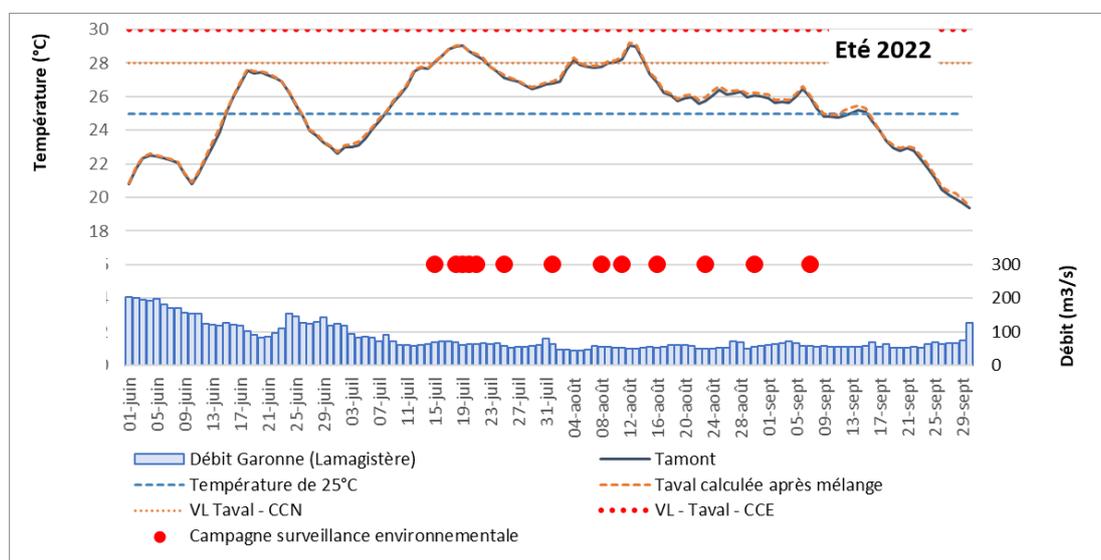


Figure 24 : Caractéristiques de l'été 2022 de la Garonne au CNPE de Golfech

Durant le mois d'août 2022, la température de la Garonne à la prise d'eau du CNPE a atteint 29°C (valeur maximale de 29,1°C - en moyenne journalière - les 12 et 13 août).

Lors de la période précédant le premier dépassement de la température de 28°C dans la Garonne, le 15 juillet 2022 (température aval maximale de 29,1°C atteinte le 19 juillet 2022), et la mise en œuvre de la surveillance environnementale en CCE (le jour même), les températures en amont et en aval du CNPE ont dépassé 25°C durant 7 jours consécutifs.

Le fonctionnement du CNPE en CCE puis en SE durant le mois d'août s'inscrit dans une période chaude dans la poursuite de l'épisode de canicule débuté en juillet avec une température de la Garonne (en amont comme en aval du CNPE) supérieure à 25°C depuis le 8 juillet. Les températures de l'eau ont

ponctuellement été supérieures à 29°C en amont comme en aval (température aval maximale de 29,2°C enregistrée le 12 août).

Ainsi, entre le 1^{er} juin et le 30 septembre, les températures de la Garonne en amont et en aval du CNPE ont été supérieures :

- à 25°C durant respectivement 77 et 78 jours, dont un épisode de 63 jours entre le 8 juillet et le 8 septembre.
- à 28°C durant deux épisodes d'une durée respective de 8 jours (juillet) et 7 jours (août) consécutifs.

Avec la succession de trois vagues de canicule, l'été 2022 constitue un été caniculaire de référence pour analyser l'effet des températures élevées sur les communautés aquatiques en amont comme en aval du CNPE. Les rejets thermiques du CNPE n'ont pas d'effets notables sur les températures de la Garonne en aval du CNPE avec un échauffement aval après mélange très faible (de l'ordre de 0,1°C en moyenne).

6.1.4 Résultats de la surveillance hydroécologique renforcée en 2022

En 2022, le CNPE de Golfech était en conditions climatiques exceptionnelles ou situation exceptionnelle du 15 au 22/07, le 4/08 et entre le 9 et le 14/08. Une surveillance renforcée de l'environnement a été mise en œuvre entre le 15 juillet et le 11 septembre.

Les résultats de la surveillance renforcée mise en œuvre sont détaillés aux paragraphes 5.1.2 pour la physico-chimie, pour chaque sous-paragraphe par compartiment biologique du paragraphe 5.2.1 et au paragraphe 5.3 pour la microbiologie.

Le suivi des paramètres physico-chimiques renforcés pendant l'été 2022 (DBO5, DCO, MES, NH4⁺/NH3 ; pH, de l'oxygène dissous et de la conductivité en continu) et des paramètres microbiologiques (*Escherichia coli*, des entérocoques intestinaux, des amibes de l'espèce *Naegleria fowleri*) ne montrent pas de différence notable entre l'amont et l'aval du CNPE.

Les résultats du suivi du zooplancton, des examens sanitaires piscicoles et de la structure du peuplement piscicole n'ont pas mis en évidence de différence entre l'amont et l'aval du CNPE.

La surveillance du phytoplancton montre une production algale plus élevée à l'aval du CNPE, et présentant un maximum fin août. La richesse du peuplement était aussi plus élevée à l'aval. Ces observations pourraient être liées à la présence aménagement hydraulique (la dérivation de Golfech/Maulause) entre la

station amont et la station aval, particulière à ce site (en termes de positionnement des stations vis-à-vis de l'aménagement), sans lien avec le fonctionnement du CNPE.

La richesse des diatomées benthiques était temporairement plus faible en août sur le secteur d'étude. L'IBD calculée à l'aval immédiat des rejets du CNPE était aussi plus faible en août avant de retrouver des valeurs comparables aux autres stations en septembre. Les résultats traduisent un peuplement riche et stable notamment à la station aval éloignée.

6.1.5 Conclusion sur les observations biologiques au regard des températures maximales rencontrées sur la Garonne au droit du CNPE de Golfech

Le tableau ci-dessous résume les conditions thermiques rencontrées à Golfech lors des épisodes caniculaires de 2019 et 2022.

Tableau 8 : résumé des conditions thermiques rencontrées à l'aval du CNPE de Golfech en 2019 et 2022

Année	Nombre de jours consécutifs avec une température aval > 25°C	Conditions précédant la période avec une température aval > 28°C	Conditions pendant la période avec une température aval > 28°C	
		Nombre de jours consécutifs précédant la période où la température aval après mélange était supérieure à 25°C	Température maximale calculée en aval après mélange (°C)	Durée du dépassement du seuil de 28°C (en aval après mélange)
2019	31 jours ²⁷	24 jours	29,2°C ²⁷	4 jours ²⁷
2022 : du 15 au 22/07	63 jours	7 jours	29,1°C	8 jours
2022 : du 9 au 14/08		33 jours	29,2°C	6 jours

Les résultats des suivis hydroécologiques menés dans l'environnement du CNPE de Golfech en 2019 et 2022 montrent que dans les conditions hydrologiques et thermiques rencontrées :

- une température maximale de 29°C et ;
- des valeurs supérieures à 25°C pendant 78 jours en 2022 entre le 1^{er} juin et le 30 septembre (dont 63 jours consécutifs entre le 8 juillet et le 8 septembre, période qui couvre les semaines de surveillance renforcée) ;

il n'a pas été noté d'influence notable de l'échauffement lié au fonctionnement du CNPE en période caniculaire sur la physico-chimie, la microbiologie et les compartiments biologiques, à l'exception de quelques différences temporaires entre amont et aval (ex : diatomées benthiques à l'aval

²⁷ Les deux tranches du CNPE ont été entièrement à l'arrêt entre le 23 juillet (à 15h) jusqu'au 27 juillet, cependant la température amont (et donc aval) a dépassé 28°C durant plusieurs jours.

immédiat en 2022 au mois d'août) avec un retour à des valeurs comparables à l'automne.

6.2 RETOUR D'EXPERIENCE DU RHONE AU DROIT DE BUGEY SUITE A L'ETE 2022

6.2.1 Conditions hydrométéorologiques de l'été 2022

Les débits moyens journaliers du Rhône ont été très bas et ont oscillé autour du quantile 10% dès le mois d'avril 2022 pour atteindre les minimas historiques à la mi-juin. Les débits sont restés globalement bas jusqu'en septembre avec des variations de débits marquées à une échelle hebdomadaire (voire journalière) du fait de la gestion des ouvrages hydroélectriques sur le Rhône en amont du CNPE.

Durant les mois de juillet et d'août, le débit moyen du Rhône a été de 336 m³/s (avec des valeurs de débit moyen journalier comprises entre 187 m³/s et 472 m³/s – débit supérieur au module interannuel, Cf. Tableau 3).

La température du Rhône en amont du CNPE a atteint, le 5 août, une valeur maximale de 25,2°C (en moyenne journalière). Durant l'été, la température du Rhône en amont du CNPE a été supérieure à 25 °C durant 4 jours consécutifs entre le 4 et 7 août.

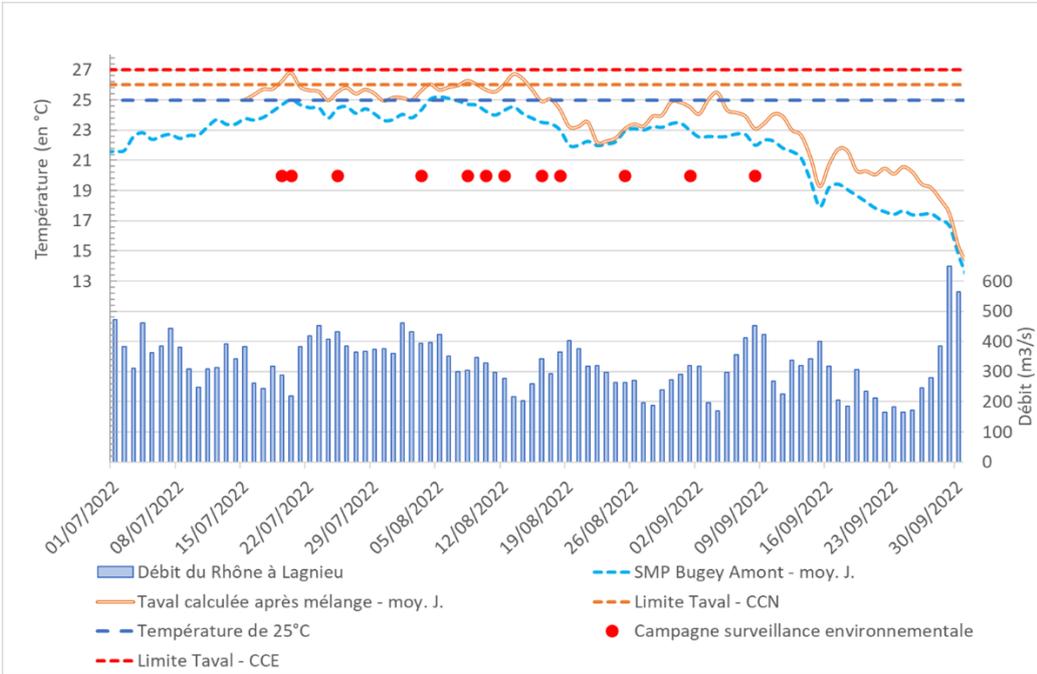


Figure 25 : Caractéristiques de l'été 2022 du Rhône au CNPE de Bugey

Durant l'été 2022, le maintien en puissance de deux réacteurs (dont un en circuit ouvert) a conduit à des températures aval après mélange supérieures à 25°C durant 32 jours consécutifs entre le 14 juillet et le 15 août 2022.

La température maximale du Rhône atteinte en 2022 en amont du CNPE est restée inférieure aux valeurs maximales historiques (notamment en 2003 et 2006), mais le maintien en puissance d'une tranche en circuit ouvert a conduit à dépasser les températures maximales historiques calculées en aval après mélange au-delà de 26°C.

L'été 2022 constitue un été de référence pour analyser l'effet des températures élevées sur les communautés aquatiques.

6.2.2 Résultats de la surveillance hydroécologique renforcée en 2022

En 2022, le CNPE du Bugey était en situation exceptionnelle du 19 au 20/07, le 4/08, du 8 au 9/08 et du 12 au 14/08. Une surveillance renforcée de l'environnement a été mise en œuvre entre le 15 juillet et le 11 septembre.

Les paramètres physico-chimiques renforcés pendant l'été 2022 (MES et NH₄⁺/NH₃ ; pH, oxygène dissous et conductivité en continu), ainsi que la surveillance renforcée des paramètres microbiologiques (*Escherichia coli*, entérocoques intestinaux, amibes de l'espèce *Naegleria fowleri* et cyanobactéries) ne montrent pas de différence notable entre l'amont et l'aval du CNPE.

Les résultats de la surveillance biologique de la chlorophylle a, des densités du phytoplancton et du zooplancton, des diatomées benthiques et des examens sanitaires piscicoles sont similaires entre l'amont et l'aval du CNPE.

Seuls les effectifs de poissons sont plus faibles à l'aval qu'à l'amont pendant la période de canicule, contrairement à ce qui est habituellement observé. Ce résultat peut être lié à des comportements d'évitement de la zone échauffée. Toutefois les résultats obtenus lors des campagnes automnales montrent un retour à des peuplement habituels pour les stations amont et aval soulignant la résilience de l'écosystème.

Le tableau ci-dessous résume les conditions thermiques rencontrées à Bugey lors des épisodes caniculaires de 2022.

Tableau 9 : résumé des conditions thermiques les plus défavorables rencontrées au droit du CNPE du Bugey en 2022

Jour / période avec le CNPE en SE	Conditions précédant la période avec une température aval > 26°C		Conditions pendant la période avec une température aval > 26°C°	
	Température amont	Température aval	Température maximale calculée en aval après mélange (°C)	Durée du dépassement du seuil de 26°C (en aval après mélange)
	<i>Nb. de jours avec une température sup. ou égale à 25°C</i>			
19 et 20 juillet	-	4 jours	26,8°C	2 jours
Du 12 au 14 août	4 jours (du 4 au 7 août)	28 jours	26,7°C	3 jours

Les résultats des suivis hydroécologiques menés dans l'environnement du CNPE du Bugey en 2022 montrent que dans les conditions hydrologiques et thermiques rencontrées :

- une température maximale de l'ordre de 27°C à l'aval et ;
- des valeurs supérieures à 25°C à l'aval pendant 32 jours consécutifs entre le 14 juillet et le 15 août 2022 ;

il n'a pas été noté d'influence notable de l'échauffement lié au fonctionnement du CNPE en période caniculaire sur la physico-chimie, la microbiologie, le phyto- et le zooplancton, les diatomées benthiques et les peuplements piscicoles.

6.3 RETOUR D'EXPERIENCE DU RHONE AU DROIT DE TRICASTIN EN 2022

6.3.1 Conditions hydrométéorologiques de l'été 2022

Les débits moyens journaliers du Rhône à Pont de Viviers ont été très bas et sont passés sous le quantile 10% dès la fin du mois de mai 2022 pour atteindre les minimas historiques à la mi-juin et début septembre.

Les débits moyens mensuels des mois de juillet et d'août du canal de Donzère ont été relativement bas avec des valeurs respectives de 500 m³/s et de 400 m³/s et des débits moyens journaliers compris entre 250 m³/s (correspondant à un débit d'une période de retour supérieure à 20 ans) et 830 m³/s.

Durant l'été 2022, la température maximale du Rhône mesurée en amont du CNPE s'est approchée de 26°C durant 2 jours consécutifs (25,7°C en moyenne journalière durant 2 jours consécutifs - les 15 et le 16 août).

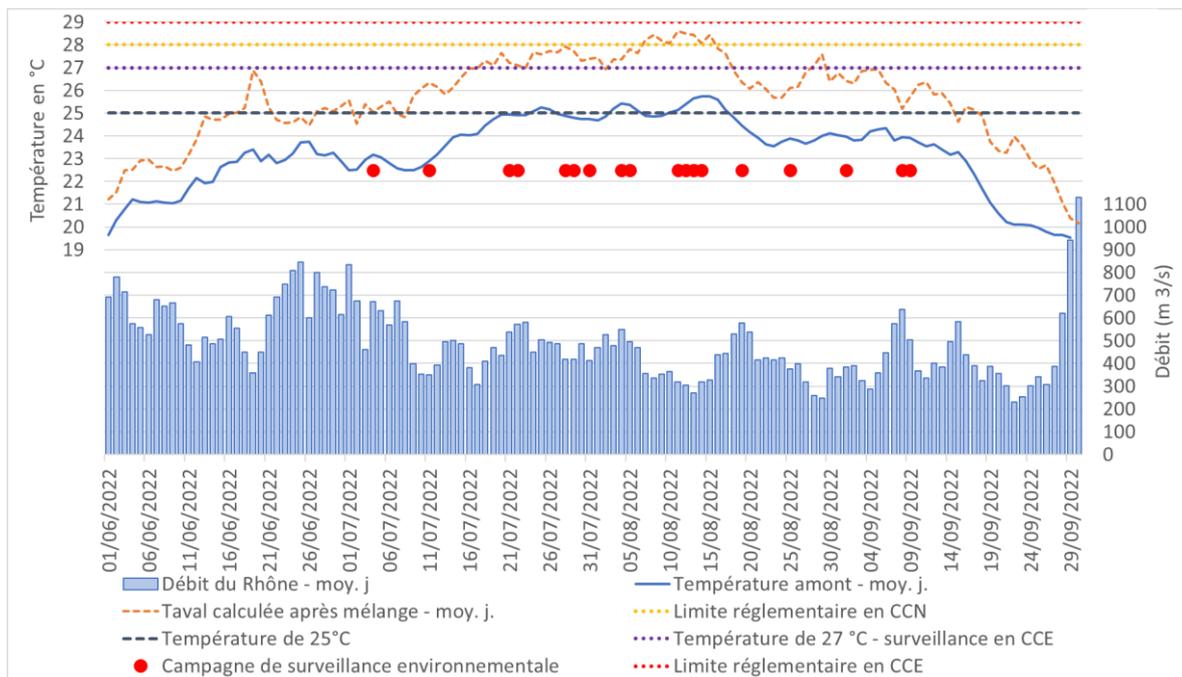


Figure 26 : Caractéristiques de l'été 2022 du Rhône au CNPE de Tricastin

Lors de la période précédant le dépassement de la température de 28°C dans le Rhône (aval CNPE), la température du Rhône en amont du CNPE a été supérieure à 25°C durant trois jours consécutifs. Entre le 1^{er} juillet et le 31 août, cette température de 25°C a été dépassé durant 16 jours répartis en trois épisodes d'une durée comprise entre 4 et 8 jours.

La température du Rhône en aval du CNPE a été supérieure à 25°C en continu depuis le 9 juillet soit 29 jours consécutifs. Cette température a été atteinte ou dépassée à plusieurs reprises entre le 17 juin et le 17 septembre (84 jours cumulés) dont un épisode de 68 jours consécutifs (entre le 9 juillet et le 14 septembre).

La température de 27°C, déclenchant la surveillance environnementale en CCE (décision « modalités »), a été atteinte dès le 18 juillet, soit 20 jours avant le passage en SE²⁸.

La température en amont du CNPE est restée inférieure aux valeurs maximales historiques, Toutefois le maintien en puissance des tranches a conduit à s'approcher des températures aval historiques.

L'été 2022 constitue un épisode de référence pour observer l'effet des températures sur les communautés aquatiques.

6.3.2 Résultats de la surveillance hydroécologique renforcée en 2022

En 2022, le CNPE du Tricastin était en situation exceptionnelle (ou température aval > 27°C) entre le 18 juillet et le 17 août, puis les 28 et 29 août. Une surveillance renforcée de l'environnement a été mise en œuvre entre le 18 juillet et le 11 septembre.

Les paramètres physico-chimiques dont la surveillance a été renforcée (DCO, DBO5, MES, NH₄⁺/NH₃; oxygène, pH et conductivité en continu), la surveillance renforcée des paramètres microbiologiques (amibes, légionelles, *Escherichia coli*, entérocoques intestinaux, cyanobactéries), la surveillance du phyto- et du zooplancton, des diatomées benthiques et du peuplement piscicole ne mettent pas en évidence de différence notable entre l'amont et l'aval du CNPE.

Seul l'état sanitaire piscicole était légèrement meilleur à l'amont en juillet et août, sans présenter de risque pour la survie des individus concernés. De plus, les résultats étaient similaires entre l'amont et l'aval en septembre.

Les résultats des suivis hydroécologiques menés dans l'environnement du CNPE du Tricastin en 2022 montrent que dans les conditions hydrologiques et thermiques rencontrées :

- **une température maximale de l'ordre de 28,5°C à l'aval et ;**
- **des valeurs supérieures à 25°C à l'aval pendant un épisode de 68 jours consécutifs entre le 9 juillet et le 14 septembre ;**

il n'a pas été noté d'influence notable de l'échauffement lié au fonctionnement du CNPE en période caniculaire sur la physico-chimie, la microbiologie, le phyto- et le zooplancton, les diatomées benthiques et les peuplements piscicoles.

²⁸ La température aval est passée sous le seuil de 27°C le 2 août (26,9°C).

6.4 CONCLUSION SUR LES OBSERVATIONS BIOLOGIQUES AU REGARD DES TEMPERATURES MAXIMALES RENCONTREES

Le tableau ci-dessous résume les conditions les plus défavorables rencontrées pour les CNPE de Bugey, Tricastin et Golfech et pour lesquelles aucune évolution biologique notable n'a été mise en évidence dans le cadre de la surveillance renforcée mise en œuvre en période estivale.

Tableau 10 : résumé des conditions thermiques les plus défavorables (année 2022), sans influence constatée sur l'environnement aquatique au travers de la surveillance renforcée

Site	Température aval calculée maximale ²⁹	Nombre de jours consécutifs avec une température aval supérieure à 25°C (intégralité de la période estivale)	Limite de T°aval après mélange en CCN	Durée de dépassement de la limite thermique en CCN
Golfech	29°C	63 jours (entre le 8/7 et 8/9)	28°C	6 jours
Bugey	27°C	32 jours (entre le 14/7 et le 15/8)	26°C	8 jours (2 en juillet et 6 en août)
Tricastin	28,5°C	68 jours (entre le 9/07 et le 14/09)	28°C	9 jours

7 CONCLUSION

Les programmes de surveillance et les études mis en place notamment pendant et après les canicules de 2003 et 2006 ont permis d'appréhender les répercussions biologiques de ces épisodes climatiques exceptionnels. Depuis, les mesures réalisées lors des épisodes caniculaires plus récents (2015, 2018, 2019) ainsi que les mesures réalisées lors des CCE et SE rencontrées en 2022 (à Bugey, Saint-Alban, Tricastin et Golfech) sont venues compléter et renforcer les observations de 2003 et 2006. Les données acquises montrent une modification structurelle (proportion des espèces) de certains compartiments à l'amont et à l'aval des CNPE, sans que l'équilibre biologique global du peuplement ne soit remis en cause. D'autre part, aucune différence significative durable, entre l'amont et l'aval des CNPE, n'a été mise en évidence, excepté pour le compartiment poissons à Saint-Alban (faibles effectifs et proportions de juvéniles à l'aval en août à l'automne 2022), sans toutefois que cette différence ne puisse être attribuée au fonctionnement du CNPE en période de canicule. L'évolution de la structure du peuplement piscicole s'appréciant à un pas de temps

²⁹ Pour laquelle une surveillance renforcée a été mise en œuvre

pluriannuel, les résultats des prochaines années apporteront des éléments de compréhension sur les potentiels effets de la canicule 2022 sur la communauté de poissons à l'aval du CNPE de Saint-Alban.

Ainsi, les éléments disponibles à ce jour ne permettent pas de mettre en évidence un effet supplémentaire des rejets thermiques des CNPE par rapport aux effets occasionnés par les événements climatiques exceptionnels.

ANNEXE 1 : CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES, VALEURS PRESENTEES ET CLEF DE LECTURE

Le paragraphe 6 du document s'attache à confronter les observations biologiques issues de différentes campagnes de surveillance renforcée avec les températures maximales rencontrées durant les différents épisodes retenus.

Des données relatives aux conditions hydrométéorologiques sont présentées pour contextualiser chacune de ces campagnes.

Ainsi, les données présentées pour décrire le contexte thermique de chacun des étés, présentées dans les paragraphes 6.1.1, 6.1.3, 6.2.1 et 6.3.1, s'appuient sur les valeurs de températures rencontrées en amont et en aval du CNPE :

- avant la période de SE et notamment le nombre de jours consécutifs avec une température supérieure à 25°C (Cf. indications en bleu, Figure 27),
- lors de la période de SE et notamment le nombre de jours et la valeur maximale atteinte (Cf. indications en rouge, Figure 27),
- durant l'été avec le nombre maximum de jours consécutifs (Cf. indications en jaune, Figure 27), et le nombre de jours cumulés (Cf. indications en violet, Figure 27), avec une température supérieure à 25°C

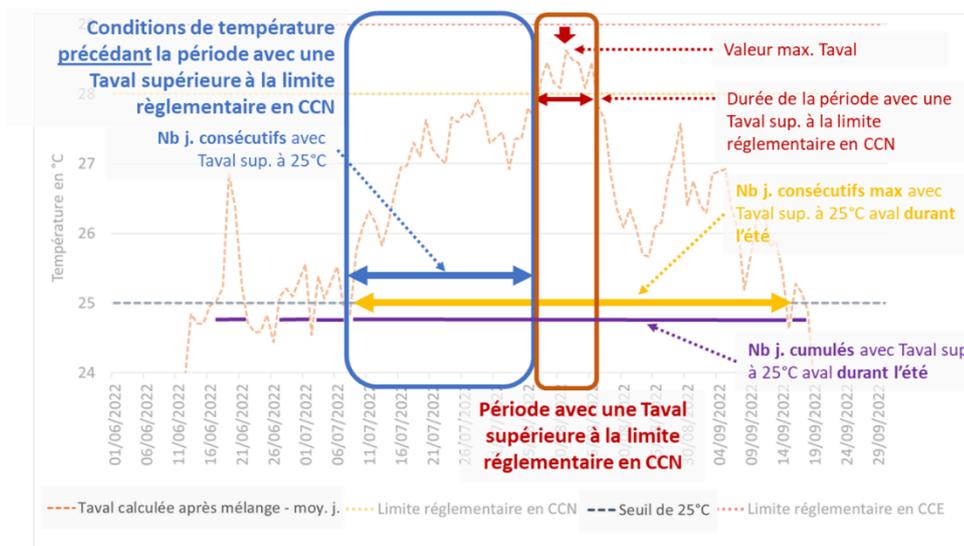


Figure 27 : Conditions de température avant et pendant le passage en SE – clef de lecture

**ANNEXE 2 : « SYNTHÈSE DU PROGRAMME DE RECHERCHE THERMIE-HYDROBIOLOGIE
(2016-2020) »**

Ce programme de recherche a fait l'objet d'une journée de restitution le 17 novembre 2002. Les actes et la synthèse sont disponibles en ligne sur le site internet <https://www.colloque-thermie.fr/presentation>