

DOCUMENT DE RÉFÉRENCE MÉTHODOLOGIQUE ET VALIDATION

Thermie des cours d'eau sans sonde et aide à la décision pour les gestionnaires de rivières

Reconstitution, prévision et projection de la température de l'eau à partir des données publiques et des mesures du gestionnaire, par un modèle de fondation ajusté à chaque point ; exploitation des sondes ; refuges thermiques, continuité, calendrier de chantier, assecs. Méthodes, précision mesurée, statut et limites.

Destinataires Syndicats de rivière, EPAGE, EPTB, intercommunalités exerçant la GEMAPI

Date, version 26 octobre 2026 — version 2.1 (remplace la version 2.0 du 25 octobre 2026)

Auteur Lucas Monnier — modélisation hydro-environnementale

Contact contact@thermofluvia.fr — thermofluvia.fr

Ce document décrit les méthodes, les données et les validations sur lesquelles reposent les chiffres de la présentation ThermoFluvia destinée aux syndicats de rivière (octobre 2026). Il est écrit pour être lu par une personne comme par un assistant d'intelligence artificielle : chaque chiffre est daté, rattaché à une population et à un statut (en production, ou validé en étude et à construire), et les questions fréquentes sont regroupées au § 18. Il n'a pas de valeur réglementaire et ne se substitue ni aux données officielles (Vigicrues, ONDE, ROE) ni à l'avis des services de l'État.

Sommaire

	Synthèse	4
	Lire ce document	5
	Journal des versions	6
	Les questions du gestionnaire	7
1	Contexte et constat	8
2	Méthode générale	9
3	Température de l'eau sans sonde	16
4	Exploitation des sondes existantes	26
5	Mesurer peu, mesurer juste : relevés de tournée, enregistreurs et calendrier	32
6	Rejeu du passé et scénarios de réchauffement	37
7	Jours au-dessus des seuils, par espèce et par portion	40
8	Prévision à 48 heures et à 7 jours	43
9	Refuges thermiques	48
10	Continuité écologique et accès aux refuges	50
11	Hauteur de chute des ouvrages	51
12	Frayères et calendrier de chantier	52
13	Assecs et nappes	53
14	Ripisylve et suivi des travaux	54
15	Livrables, données et droits d'accès	55
16	Domaine de validité	57
17	Mise en œuvre proposée	61
18	Questions fréquentes	63
A	Glossaire	65
B	Références	66
C	Stations écartées de la comparaison TIGRE	68

Liste des figures

1	Chaîne de calcul : des données d'entrée aux produits	9
2	Architecture du modèle de fondation	10
3	Erreur médiane sur le maximum journalier d'été sans sonde : référence naïve, production et modèle de fondation	16
4	Aveyron à Floirac (Monteils), température maximale journalière, juin à septembre 2024	21
5	Le Tarnon en amont de Rousses (Lozère), température maximale journalière, juin à septembre 2024	22
6	Le Loir à Lézigné (Maine-et-Loire), température maximale journalière, juin à septembre 2019	25
7	L'Evel à Guénin (Morbihan), septembre 2021 : trou de trois semaines comblé	27
8	Le Sornin à Saint-Maurice-lès-Châteauneuf (Saône-et-Loire), juin 2013 : trou de trois semaines comblé	30
9	Erreur médiane sur le maximum journalier d'été des années sans mesure, selon la mesure locale disponible (modèle de fondation)	32
10	Nombre de jours où l'eau dépasse 19 °C en été moyen selon le niveau de réchauffement (moyenne de 10 384 stations ; barres : centiles 5 à 95 des 17 simulations)	38
11	Affichage du nombre de jours au-dessus d'un seuil selon le nombre de jours attendus, et résultat de la vérification	40
12	Erreur moyenne de la prévision à 7 jours selon l'évolution réelle de l'eau dans la semaine, comparée à deux références	43
13	Oxygène : erreur selon le moment de la journée	44
14	L'Orge à Morsang, 10-12 avril 2023 : débit prévu, pluie observée	46
15	La Livenne à Saint-Aubin-de-Blaye (Gironde), août 2024 : prévision du lendemain émise chaque jour, et même modèle avec l'air observé	47
16	Trois situations d'accès à un refuge sur des rivières à truite de Haute-Alsace (écart du refuge les jours chauds ; jours de stress par été où il reste sous 19 °C)	50
17	Principe de la mesure de chute sur le LiDAR HD (schéma)	51
18	La Cuisance à Mesnay (Jura), 2024-2025 : période estimée et période du département	52
19	Gros Caillou à Saint-Éman (Eure-et-Loir) : risque d'assec estimé pour la campagne du 27 juillet 2026, recalculé chaque semaine, et relevés de l'OFB	53
20	Faux effets observés sans travaux (intervalle à 95 %, maximum journalier de juillet-août, été suivant) et probabilité de détecter un refroidissement réel	54

Liste des tableaux

1 Statut des fonctions au 24 octobre 2026	5	20 Exemples de déclin de truite coïncidant avec un réchauffement	37
2 Disponibilité de l'information thermique selon le lieu et l'horizon, sans outil	8	21 Marne amont : jours au-dessus des seuils de la truite par station (été moyen 2010-2025)	39
3 Bornes et unités par paramètre	11	22 Fiabilité de l'affichage	40
4 Facteur d'élargissement de la marge selon la durée du trou de météo observée	12	23 Indicateurs des études thermiques, sans sonde (641 stations de qualité, années jamais vues)	41
5 Indicateurs de précision	14	24 Autres résultats de la validation de l'oxygène	45
6 « Tableau A » : erreur médiane entre stations par situation et par horizon, été, années jamais vues (°C, à toute heure / au pic du jour)	15	25 Refuges thermiques par niveau de preuve et validation	48
7 Références naïves mesurées pour chaque situation (études de la v1.9, modèles de production)	15	26 Scénarios de restauration de la continuité simulés	50
8 Erreur médiane sur le maximum journalier d'été selon le nombre de relevés de la station	17	27 Performance de la mesure LiDAR	51
9 Petites stations : erreur médiane sur le maximum journalier d'été avec les vrais relevés de la station	17	28 Exemples	51
10 Autres indicateurs de la reconstitution sans sonde	18	29 Bases du calcul par espèce	52
11 Erreur moyenne sur le maximum journalier (juin à septembre), trois stations de l'Aveyron	21	30 Usages retenus pour les assècs	53
12 Indicateur TIGRE (30 jours les plus chauds) aux stations de qualité, selon les contrôles appliqués aux sondes	23	31 Livrables	55
13 Deux approches complémentaires du pic thermique d'été	24	32 Fonctions de l'espace syndicat	56
14 Comblement d'un trou de sonde selon sa durée (maximum journalier d'été)	26	33 Rôles des utilisateurs	56
15 Sonde nouvelle : erreur médiane selon les mesures disponibles (2024-2026, °C)	28	34 Ce que l'outil ne produit pas	58
16 Hiver et reproduction : erreur médiane selon ce que vous mesurez (double calage dès qu'il y a été et hiver)	31	35 Étapes de l'étude	61
17 Calendrier de mesure recommandé	33	36 Éléments demandés au gestionnaire pour l'étude initiale	62
18 Ce que vous mesurez sur un point : erreur médiane sur les autres étés du point (°C)	34	37 Stations écartées (1/2)	68
19 Prévion d'un point calé sur des relevés d'été : erreur médiane à toute heure (au pic du jour), °C	35	38 Stations écartées (2/2)	69

Synthèse

Objet. Pour repérer les zones refuges, choisir où restaurer la ripisylve ou quel ouvrage traiter en premier, monter un dossier d'aide ou caler un chantier, un gestionnaire doit savoir où et quand l'eau devient trop chaude pour les espèces présentes. Les mesures existent mais sont dispersées : prélèvements ponctuels (par exemple ceux des stations de qualité, environ une fois par mois), sondes publiques rares et publiées en retard, sondes des gestionnaires peu exploitées. Ce document décrit comment ThermoFluvia reconstitue, prévoit et projette la température de l'eau à partir de ces données, avec le protocole de validation, la référence à laquelle chaque chiffre est comparé, son statut et ses limites.

0,86 °C	Erreur médiane sur le maximum journalier d'été là où seule une station de qualité existe : modèle de fondation ajusté sur ses relevés (654 sites, années jamais vues ; validé en étude, à construire).	Production actuelle : 0,97 °C ; température habituelle tirée des relevés : 1,72 °C
0,77 °C	Même erreur, heure par heure sur tout l'été (« à toute heure », 360 sites) ; 0,82 °C au pic du jour.	Production : 0,90 et 0,94 °C ; habituelle, à l'heure : 1,46 °C
0,60 °C	Erreur médiane sur le maximum d'été là où une sonde existe (238 sondes ; modèle appris jusqu'en 2023, jugé sur 2024-2026).	Recette de station calée sur la même sonde : 0,80 °C
≈ 1 °C	Petites stations : dès trois relevés d'été, le maximum d'été est donné à environ 1 °C, quel que soit le nombre total de relevés (§ 3.3).	Sans aucune mesure du point : 1,44 °C
0,93 °C	Écart quadratique sur l'indicateur de la référence nationale TIGRE (30 jours consécutifs les plus chauds), aux stations de qualité, après des contrôles physiques des sondes fixés à l'avance (§ 3.10).	TIGRE : moins de 1,5 °C publiés, sur tout le réseau, sans mesure locale
9 sur 10	Zones refuges candidates sans aucune station : sur 113 affluents sondés, 46 des 50 désignés sont confirmés, et tous ceux annoncés à plus de 3 °C ; affluents surtout moyens à grands (§ 9.2).	Sonde de chaque côté : 16 / 16 ; sonde sur l'affluent : 68 / 72 confirmés

Principaux résultats.

- **Deux niveaux de modèle.** En production, chaque station de qualité a son modèle, calé sur ses prélèvements (10 783 stations). Validé en étude et à construire en service, un modèle de fondation appris sur 42,5 millions de mesures horaires de 655 sondes françaises, puis ajusté à chaque point sur ses propres mesures, réduit l'erreur d'environ 0,1 °C (§ 2.1-2.2, 3.1).
- **Jugé sans fuite.** Bassin du point exclu de l'apprentissage, années jamais vues, sondes juges jamais apprises, réglages choisis avant de regarder les résultats (§ 2.8) ; indicateurs définis au § 2.9 ; précision par situation et par horizon au tableau A (§ 2.10).
- **Mesurer peu.** Six relevés au thermomètre l'été, à l'heure de la tournée, donnent 0,92 °C ; un mois d'enregistreur en juillet, 0,84 °C ; l'heure du relevé ne compte presque plus (§ 5). Une sonde nouvelle est utilisable pour l'été après un été de mesures ; le calendrier de reproduction demande une année complète (§ 4.5).
- **Prévoir.** Demain, à toute heure : 0,88 °C avec des relevés seuls, 0,68 °C avec une sonde, 0,47 °C avec une sonde qui transmet ; à 7 jours, 0,96, 0,86 et 0,77 °C (§ 2.10). Ces chiffres supposent un correctif de l'air prévu, validé en étude (§ 2.7). L'oxygène minimal de la nuit reste estimé par le modèle actuel, à 0,86 mg/L près contre 1,47 mg/L pour le relevé du mois (§ 8.2).
- **Données contrôlées.** Bornes et unités par paramètre, âge du relevé, trous de météo ; depuis le 24 octobre 2026, les 643 stations de plans d'eau et prises d'eau ne reçoivent plus de modèle de rivière (§ 2.5-2.6).
- **Limites connues :** sources froides, aval de barrages et de plans d'eau, jours de montée brusque de l'eau, et environ 6 % des jours d'été à plus de 3 °C d'erreur sur le maximum (§ 16.2). Les questions fréquentes, réponses chiffrées et renvois, sont au § 18.

Lire ce document

Chaque chiffre est donné avec sa population (nombre de stations ou de sondes), sa période, l'indicateur exact (§ 2.9) et la référence à laquelle il est comparé : ce qu'un gestionnaire ferait sans l'outil, dans sa situation. Le registre joint (reference_v2_1_promesses.csv) donne pour chacun le fichier de résultats d'étude d'où il vient, le chiffre exact et son statut. Le texte est rédigé au présent ; le tableau ci-dessous dit ce qui tourne aujourd'hui.

Tableau 1 — Statut des fonctions au 24 octobre 2026

Fonction	Statut	Sections
Modèle de chaque station de qualité : température du jour, passé rejoué, courbe heure par heure à 48 h	en production (10 783 stations ; 4 calculs par jour sur le périmètre inscrit)	2.4, 8.1
Contrôle des données (bornes, unités, âge du relevé, trous de météo)	en production	2.5, 2.6
Exclusion des plans d'eau et prises d'eau des modèles de rivière (643 stations)	en production depuis le 24/10/2026	2.5
Modèle de fondation ajusté à chaque station, sonde ou point de relevé ; tableau A	validé en étude, à construire	2.2, 2.10, 3, 4
Correctif de l'air prévu (journée locale, vrais extrêmes)	validé en étude, à construire	2.7
Petites stations (dès 3 relevés), sondes nouvelles, campagne de mesure guidée	validé en étude, à construire	3.3, 4.5, 5
Tendance à 7 jours	validé en étude, à construire (aucune source ECMWF en service)	2.10, 8.1
Oxygène, modèle de chaque station	en production (48 h) ; précision validée en étude	8.2
Débit prévu	en production (horaire) ; chiffres de la cible validés en étude	8.3
Refuges, continuité, hauteurs LiDAR, frayères, assecs, ripisylve, témoin de travaux	validé en étude, à construire	9 à 14
Espace syndicat, atlas, annexes, exports	à construire (maquette)	15

Source : registre reference_v2_1_promesses.csv (colonne statut) ; v3 (code de production, lecture seule).

Le journal des versions est à la page suivante. La plaquette syndicats v10 (octobre 2026) est contrôlée chiffre par chiffre contre ce document : CONTROLE_PLAQUETTE.md (sources de la v2.1).

Journal des versions

2.1 26 octobre 2026 : chaque chiffre de la plaquette documenté

- Chaque chiffre de la plaquette syndicats v10 est rattaché à une section de ce document, avec sa valeur exacte au registre ; les chiffres introuvables ou divergents sont listés à part.
- **Recalcul avec le modèle de fondation** (25/10/2026) des chiffres d'usage : refuges et cas d'application (§ 9, 9.1), niveaux de la TRACC (§ 6.2), déclins de truite (§ 6.1), prévision à 7 jours (§ 8.1), affichage des seuils (§ 7.2), comblement (§ 4.3), entrée en ponte (§ 12.2), Aveyron et Tarnon (§ 3.7-3.8). L'oxygène reste donné avec le modèle de production (§ 8.2).
- **Floirac 2024 n'est plus le cas médian** : avec le modèle de fondation, il passe au 86^e centile ; son biais de fin d'été est propre à cet été-là (§ 3.7).
- **Nouvelles sous-sections**. Exemple du Loir à Léznigné (§ 3.11) ; comblement du Sornin (§ 4.7) ; double calage été / hiver et date d'émergence (§ 4.8) ; tableau « ce que vous mesurez » (§ 5.6) ; prévision d'un point calé sur six relevés (§ 5.7) ; tenue d'un modèle de point dans le temps (§ 5.8) ; indicateurs des études thermiques (§ 7.3) ; fourchettes, précocité et 25 °C (§ 7.4) ; exemple de prévision de la Livenne (§ 8.4) ; règle des zones refuges sans station, jugée hors bloc (§ 9.2) ; limites connues et pistes (§ 16.4) ; ce qui n'est pas promis (§ 16.5) ; qui est derrière ThermoFluvia (§ 17.4).
- **Modifiés** : synthèse (zones refuges), contexte (§ 1.2, sources des citations), autres résultats sans sonde (§ 3.4), ripisylve (§ 14.1, renvoi à l'exemple illustratif du § 16.5), domaine de validité (§ 16.3), suivi des travaux (§ 14.2), mise en œuvre en quatre étapes sans abonnement (§ 17), questions fréquentes (§ 18).
- **Emplacement réservé** : l'étude de détection automatique des défauts de sonde n'avait pas de rapport au 26/10/2026 (§ 4.1).

2.0 25 octobre 2026 : depuis la version 1.9

- Le modèle de fondation (§ 2.2) remplace, dans les chiffres de précision, le réseau de neurones des sondes de la v1.9 ; le tableau A est recalculé avec lui (§ 2.10).
- Protocole contre les fuites détaillé (§ 2.8) et définitions des indicateurs (§ 2.9) ; correctif de l'air prévu (§ 2.7) ; plans d'eau exclus (§ 2.5).
- Précision sans sonde, selon le nombre de relevés et sur les petites stations (§ 3.1-3.3) ; Tarnon refait avec le nouveau modèle (§ 3.8).
- Comparaison à TIGRE corrigée : validation de TIGRE décrite d'après son rapport final, contrôles des sondes fixés à l'avance, liste des stations écartées en annexe C (§ 3.10).
- « Mesurer peu » refait avec le nouveau modèle : le conseil de mesurer vers 16 h est retiré (§ 5) ; sondes nouvelles (§ 4.5).
- Limites connues regroupées (§ 16.2) et questions fréquentes (§ 18).
- Retirés : l'exemple du Chéran à Rumilly (pêches et jours chauds sur des périodes différentes) et la précision « 0,2 °C en bain d'étalonnage » des sondes (non sourcée).

Les questions du questionnaire

Le document répond à quatre questions qu'un syndicat se pose. Chaque résultat est donné avec l'échantillon sur lequel il a été vérifié et la référence à laquelle il est comparé ; les conditions d'usage sont regroupées au § 16.

Q1 Où investir en priorité dans le programme pluriannuel ?

Quels ouvrages traiter, quels tronçons restaurer ou planter, pour quel gain écologique ? L'outil classe les ouvrages qui coupent l'accès des tronçons en stress thermique à un refuge frais, en jours de stress potentiellement évitables, et compare des scénarios de restauration de la continuité (suppression d'ouvrage, abaissement partiel, ouverture estivale des vannes). Il désigne aussi les petits cours d'eau où une ripisylve a le plus de chances d'être utile. **Sections 7, 9, 10, 11 et 14.**

Q2 Comment sécuriser le calendrier des chantiers en rivière ?

Le critère réglementaire est biologique (« de la ponte au stade alevin nageant ») et les dates départementales sont fixes. L'outil estime la période de reproduction de l'année, portion par portion, face à la période par défaut du département, et prévient à 48 h et 7 jours des coups de chaleur qui compromettraient un chantier ou une pêche de sauvegarde. **Sections 4.5, 8 et 12.**

Q3 Comment connaître la thermie de tout le bassin sans instrumenter chaque affluent ?

En s'appuyant sur les stations de qualité existantes (22 par syndicat en médiane), y compris les petites stations de quelques relevés, en tirant le meilleur parti des sondes déjà posées, et en complétant par quelques relevés d'été au thermomètre pendant les tournées ou un mois d'enregistreur. **Sections 2 à 6.**

Q4 Comment étayer les dossiers (DIG, Loi sur l'eau, Agence de l'eau) ?

Par une annexe thermo-écologique datée, sans valeur réglementaire (état thermique reconstitué, refuges et connectivité, gains potentiels, calendrier de reproduction, méthode, sources et niveau d'incertitude), un atlas versionné et un export SIG en Lambert-93, adossés aux validations de ce document. **Sections 15 et 16.**

1 Contexte et constat

1.1 Les données disponibles

Stations de qualité de l'eau. En France, **8 007 stations** de cours d'eau ont au moins 24 mesures de température depuis leur création et sont encore suivies depuis 2021. Environ une mesure par mois, le plus souvent en fin de matinée, rarement au moment le plus chaud.

Sondes publiques. **274 sondes** publient encore sur Hub'Eau depuis 2025, avec souvent un an de retard. Sur le territoire d'un syndicat, il n'y en a aucune dans près de deux cas sur trois.

Sondes des gestionnaires. Souvent posées pour un projet, relevées une à deux fois par an, rarement exploitées au-delà du rapport du projet. Sur l'Orge, on compte des dizaines de sondes, selon l'affichage du syndicat, et aucune n'est publiée sur Hub'Eau.

Autres réseaux. Assecs relevés par l'OFB une fois par mois l'été (ONDE), nappes (ADES), débits (Hydroportail), pêches électriques, ouvrages (ROE), relief LiDAR HD de l'IGN : tous publics, rarement croisés entre eux.

1.2 Ce qui manque au gestionnaire

Tableau 2 — Disponibilité de l'information thermique selon le lieu et l'horizon, sans outil

Lieu	Passé	Aujourd'hui	2 à 7 jours	Horizon 2050
Point équipé d'une sonde	oui, après relève	si la sonde transmet	non	non
Station de qualité seule	une mesure par mois	non	non	non
Reste du réseau	non	non	non	non

Source : inventaire Hub'Eau, Naïades ; analyse de l'auteur.

Aujourd'hui, il faut soit poser une sonde un an à l'avance, alors que chaque été est différent, soit se contenter de prélèvements ponctuels (par exemple ceux des stations de qualité) : une mesure par mois, le plus souvent en fin de matinée, rarement au pic de l'après-midi. Les décisions concernées sont connues : priorités d'un programme pluriannuel, dossiers d'aide, argumentaire d'une restauration de la continuité, date d'un chantier en lit mineur ou d'une pêche de sauvegarde, préparation des comités ressource en eau, bilan annuel.

Constats cités dans la présentation aux syndicats : EP Loire, étude des températures de l'eau du bassin (2022) ; PNR du Haut-Jura, thermie de la Bienne (2024) ; Stratégie nationale thermie, ministère et OFB (2024) ; Allondon, habitats thermiques de l'ombre et de la truite (2023) ; Observatoire des rivières du Beaujolais (2024) : six enregistreurs en défaut sur seize sondes posées.

OBJET DU DOCUMENT

Décrire comment ThermoFluvia reconstitue, prévoit et projette la température sur près de 11 000 stations de qualité, exploite les sondes existantes, et en tire des classements d'actions chiffrés (refuges, ouvrages, chantiers, plantations), avec leur incertitude, sans nouvelle sonde au départ. Chaque fonction de la présentation aux syndicats y est reprise avec ses données, son modèle, sa validation, sa référence et ses limites.

CE QUE LE SERVICE RECALCULE

Toutes les 6 heures, à chaque nouvelle prévision météorologique, le service recalcule pour chaque station la température de l'eau et l'oxygène heure par heure à 48 h. Chaque jour, il relit les observations météorologiques, recalcule la température du jour, la tendance à 7 jours et, là où une station de débit ou un point ONDE le permet, le débit prévu et le risque d'assec ; les séries passées, les refuges, les ouvrages et les scénarios de réchauffement sont recalculés à chaque nouvelle version des modèles.

2 Méthode générale

2.1 Principe

La température d'une rivière suit celle de l'air avec un retard et une amplitude propres à chaque site (nappe, ombrage, taille, retenues). Deux niveaux de modèle traduisent la météo en température de l'eau. **En production**, chaque station de qualité a son propre modèle statistique, calé sur ses seuls prélèvements (§ 2.4). **Validé en étude et à construire en service**, un modèle de fondation apprend une fois, sur toutes les sondes françaises, comment l'eau des rivières répond à la météo ; il est ensuite ajusté à chaque point à partir de ses propres mesures (§ 2.2). Une fois calés, ni l'un ni l'autre n'a besoin d'une mesure du jour : la météo observée donne l'été passé et la journée en cours, la météo prévue les jours suivants, une météo réchauffée les étés à venir.

Près de 11 000 stations de qualité ont leur modèle de température en production : 10 783 depuis le 24 octobre 2026, date à laquelle les 349 modèles de plans d'eau ont été retirés (11 132 auparavant : toutes les stations d'au moins 12 prélèvements). La précision annoncée vaut pour les stations de cours d'eau exploitables (8 007 stations d'au moins 24 prélèvements, suivies depuis 2021, § 1.1) ; les sondes, les assecs ONDE et le débit ont leurs propres modèles (§ 4, 8.3, 13).

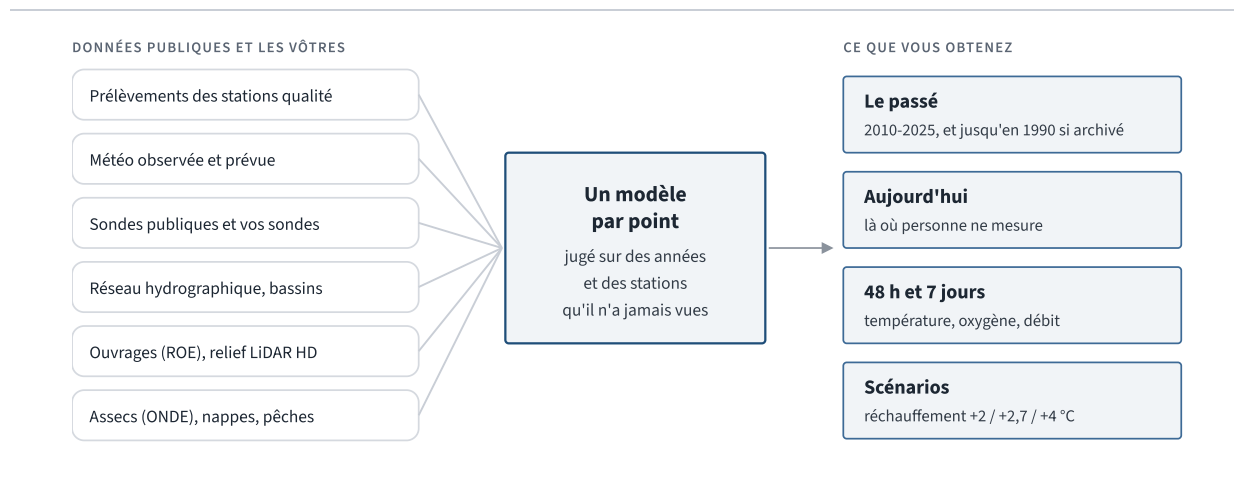


Figure 1 — Chaîne de calcul : des données d'entrée aux produits. Source : schéma de l'auteur.

2.2 Le modèle de fondation

Un réseau de neurones récurrent (LSTM, 96 unités) est appris en une fois sur les maxima et moyennes journaliers de 655 sondes françaises, soit 6 143 années-sonde et 42,5 millions de mesures horaires (2006-2026). Les modèles jugés dans ce document ont été appris sans les années 2024-2026 : 653 sondes, 5 533 années-sonde, 39,0 millions de mesures horaires (2006-2023). « Modèle de fondation » désigne ici ce réseau commun, appris sur beaucoup de rivières, puis adapté à chacune avec peu de mesures.

Ce qu'il lit. Pour chaque jour, il lit les 270 jours précédents : moyenne, vrai maximum et amplitude de l'air au poste Météo-France, jour de l'année et indicateur de jour d'air manquant ; onze caractéristiques fixes du point (altitude, position, classe de largeur, facteur d'amplitude journalière, résumés de ses relevés) ; et huit valeurs propres au point, son « plongement », qui résume ce qui le distingue des autres rivières. Il donne le maximum et la moyenne du jour sous forme de onze quantiles, de 5 à 95 % ; la courbe heure par heure s'en déduit avec la forme de la journée (§ 3.6). Le résultat est la moyenne de trois apprentissages indépendants de 20 passes.

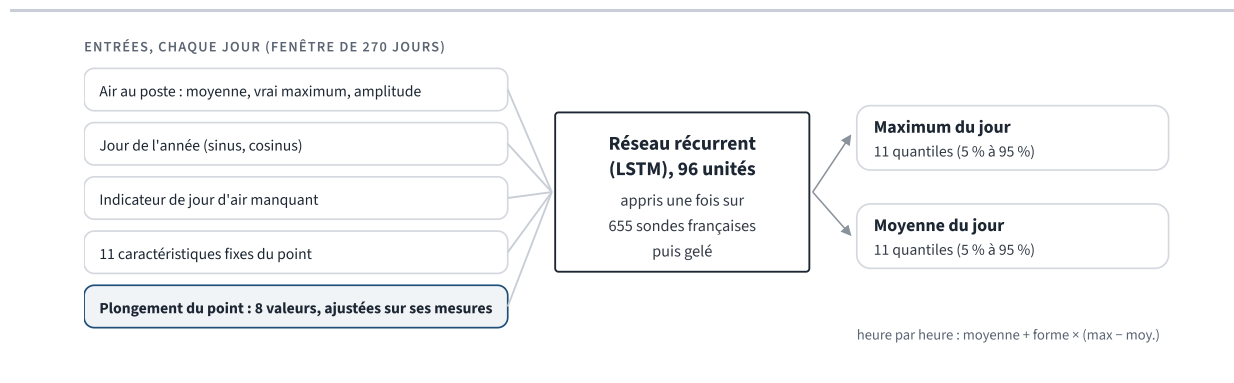


Figure 2 — Architecture du modèle de fondation. Source : schéma de l'auteur, d'après le code de l'étude (modele_base_final/scripts/base.py).

Ajustement à un point. Le réseau est gelé ; seules les huit valeurs du point sont estimées à partir de ses mesures : relevés ponctuels comparés à leur heure exacte, enregistreur ou sonde, avec un rappel vers les valeurs des rivières apprises quand les mesures sont peu nombreuses. L'estimation prend environ 2 secondes par point. C'est ce qui permet de donner un modèle à une petite station (§ 3.3) ou à une sonde nouvelle (§ 4.5) sans réapprendre le réseau.

Recette choisie avant le test. Le nombre de passes et les entrées d'air ont été choisis sur une année de validation (apprentissage avant 2023, jugement sur 2023, 240 sondes), avant de regarder les années de test : l'entrée « moyenne, vrai maximum et amplitude » bat la moyenne seule d'environ 0,04 °C au critère, et 20 passes sont retenues. Sur les années 2024-2026, elle gagne 0,04 à 0,06 °C sur la moyenne seule jusqu'à deux jours d'échéance ; à 7 jours, elle perd au pic (0,89 contre 0,84 °C) parce que le maximum d'air des prévisions européennes à 7 jours est biaisé : cet horizon garde la moyenne d'air seule (§ 2.10).

Ce qui n'apporte rien. Ajoutés aux caractéristiques fixes, des indicateurs de nappe (IDPR, débit d'étiage QMNA5 et son rapport au module, type d'aquifère) et la surface des plans d'eau dans les 10 km en amont ne changent pas l'erreur d'une sonde connue (écarts de 0,006 °C au plus, effacés par une troisième graine) et dégradent ou égalent celle d'une sonde nouvelle ; une correction d'amplitude propre à chaque sonde ne gagne rien au pic ni à toute heure. Ils ne sont pas retenus.

2.3 Données utilisées

Prélèvements des réseaux de qualité de l'eau (Naiades, Hub'Eau), sondes de température publiques (Hub'Eau), postes Météo-France, prévisions Météo-France (AROME) et du Centre européen (ECMWF), pluie radar (COMEPHORE), réseau hydrographique BD TOPO et référentiel TOPAGE, ouvrages du ROE (OFB), LiDAR HD de l'IGN, observations des assecs ONDE (OFB), piézomètres (ADES), débits (Hydroportail), pêches électriques (Hub'Eau Poissons), communes membres (BANATIC). Les sondes d'un gestionnaire s'y ajoutent s'il les confie, sous convention : elles ne sont ni publiées ni réutilisées sans son accord.

2.4 Le modèle de chaque station, en production

Ce qu'il apprend. Chaque prélèvement de température est d'abord ramené à une heure de référence (midi), grâce à la forme du cycle journalier de la station (§ 3.6) ; le modèle apprend ensuite la relation entre cette valeur et la météo du poste Météo-France le plus proche, figé une fois pour toutes pour que l'apprentissage et le calcul quotidien lisent le même poste. La courbe de la journée et son maximum sont reconstruits à partir de ce niveau et de l'amplitude du jour.

Deux estimations mélangées. Le modèle de la station combine deux estimations : un modèle choisi pour la station parmi plusieurs familles (régression sur l'air du jour, l'air lissé sur sept jours et la saison ; relation en S de type Mohseni ; polynôme), et une simple régression sur la moyenne de l'air des k derniers jours. Leurs erreurs sont peu corrélées : jugés en validation croisée imbriquée par année laissée de côté sur 843 stations de quatre départements (Corrèze, Essonne, Loire-Atlantique, Nord), le modèle choisi fait 1,205 °C, la régression 1,093 °C, et leur moyenne 0,991 °C, meilleure dans les six classes de rivière. Choisir la meilleure famille sur ses propres données de validation est optimiste ; le mélange corrige cet optimisme.

Poids du mélange, choisi sans fuite. Le poids donné à la régression sur l'air a été choisi par validation croisée imbriquée : le choix est fait sur la seule partie apprentissage de chaque pli, puis jugé sur sa partie test (10 870 stations). Avec un poids fixe de 0,5, l'erreur moyenne de la flotte est de 1,018 °C ; avec 0,75, de 1,006 °C ; la règle retenue (0,75, sauf gain de plus de 0,5 °C d'un autre poids sur la station) donne 1,005 °C. Le poids de 0,75 est choisi à l'identique sur chacune des deux moitiés des départements et gagne sur l'autre.

UNE FUITE ÉVITÉE

Une première analyse choisissait le poids sur les plis mêmes qui servaient à le juger : elle annonçait un gain (1,018 → 1,009 °C) pour la règle « poids nul quand le mélange perd sur la station ». Rejouée sans fuite, cette règle dégrade (1,024 °C) ; c'est le poids uniforme de 0,75 qui gagne. Les chiffres de précision du § 3 ont été mesurés avec le poids de 0,5 : ils sont conservés tels quels, le poids de 0,75 abaissant l'erreur moyenne de la flotte d'environ 0,01 °C.

2.5 Contrôle des données

Avant tout calcul, chaque analyse lue est confrontée à des bornes physiques et aux unités admises pour son paramètre : une valeur hors unité ou hors borne n'est pas une mesure et n'entre dans aucun modèle. L'inventaire de la base avait trouvé des températures jusqu'à 867 °C, de l'oxygène à 9 086 mg/L, des saturations à 9 326 % et des unités mélangées sous un même code (oxygène en %, nitrates en mg(N)/L à côté de mg(NO₃)/L). Les règles ci-dessous écartent 1 328 analyses, en plus des 185 températures déjà marquées.

Tableau 3 — Bornes et unités par paramètre

Paramètre	Unités admises	Valeurs retenues	Motif de la borne
Température de l'eau	°C	0 à 40 °C	aucune rivière française n'atteint 40 °C, même en canicule
Oxygène dissous	mg(O ₂)/L, mg/L	0 à 25 mg/L	environ 250 % de saturation à 15 °C, au-delà de la plus forte sursaturation
Saturation en oxygène	%	0 à 250 %	même limite physique, exprimée en saturation
Turbidité	NFU, NTU	0 à 2 000 NFU	au-delà, mesure ou saisie impossible
Conductivité à 25 °C	µS/cm	0 à 80 000 µS/cm	une fois et demie l'eau de mer ; les estuaires montent à 50-60 000
Nitrates	mg(NO ₃)/L ; mg(N)/L converti ×4,43	0 à 500 mg(NO ₃)/L	dix fois la limite de potabilité ; la conversion récupère les valeurs exprimées en azote

Source : spécification du contrôle (qc_analyses.py) ; inventaire de la base du 18 octobre 2026.

Âge du relevé. La date et l'âge du dernier prélèvement sont affichés pour chaque station ; un relevé de plus de 18 mois est signalé comme ancien. Ce délai dépasse la latence habituelle de publication (4 à 12 mois le plus souvent, jusqu'à 2 ans pour les plus tardifs) : il signale le plus souvent une station qui n'est plus suivie ou plus publiée (§ 3.9). Les séries de sondes ont leur propre contrôle (sauts, sonde hors d'eau, eau plus chaude que l'air), décrit au § 4.1.

Plans d'eau et prises d'eau. Un modèle de rivière (air → eau) n'est pas valable pour un lac stratifié ou une retenue. Depuis le 24 octobre 2026, 643 stations de qualité ne reçoivent plus de modèle de température ni d'oxygène, à l'apprentissage comme au service : 522 plans d'eau au sens du SANDRE, 7 stations situées dans un lac ou une retenue de la BD TOPO d'au moins un hectare, et 114 prises d'eau ou ouvrages. Cela retire 349 modèles de température et 412 d'oxygène ; les stations restent sur la carte avec leurs mesures, et les rivières canalisées (Somme, Lys, Sambre, Scarpe) sont gardées. Aucune des 654 stations des études de précision n'était concernée. Exemple : la Diège à Saint-Exupéry-les-Roches, dans la retenue des Chaumettes, mesurait 21,6 °C en moyenne en juillet-août, contre 15,9 °C pour la Diège 3 km en amont.

Relevés aberrants (validé en étude, à construire). Un relevé qui s'écarte de plus de quatre fois la dispersion habituelle de la station (et d'au moins 3 °C) de ce que donne le modèle de fondation ajusté est signalé, sans être supprimé : sur 654 stations, 0,5 % des relevés sont signalés, dont 61 % sont confirmés faux par la sonde voisine (contre 38 % pour la règle de contrôle actuelle à taux égal). Le signalement n'est fait qu'à partir d'environ 24 relevés ; les écarter du calage ne gagne que quelques centièmes de degré. Un relevé chaud d'été confirmé par la sonde est un vrai épisode chaud que le modèle manque : c'est pourquoi rien n'est supprimé automatiquement.

2.6 Quand la météo observée manque

Le calcul du jour repose sur la météo observée des jours précédents. Si un poste cesse de publier, le retard est calculé avant tout comblement et affiché ; jusqu'à 3 jours, l'air manquant est complété normalement ; au-delà, le service passe en mode dégradé, avec un message et une marge élargie d'un facteur mesuré ; au-delà de 14 jours, la prédiction n'est plus fondée sur la météo et seule la normale de saison est donnée, présentée comme telle.

Les facteurs ont été mesurés en jouant 300 stations tirées au hasard (6 910 prélèvements de température, 6 070 d'oxygène) : on ne change que l'air des derniers jours, figé à la dernière observation (valeur du jour) ou interpolé vers la prévision (courbe). Avec la marge élargie, la part des prélèvements couverts reste au niveau nominal (58 %), contre 30 % sans élargissement à 12 jours de trou.

Tableau 4 — Facteur d'élargissement de la marge selon la durée du trou de météo observée

Jours sans observation	1	2	3	5	7	10	12	14
Température du jour (air figé)	1,04	1,21	1,38	1,65	1,80	2,03	2,12	2,19
Courbe à 48 h (air interpolé vers la prévision)	1,00	1,03	1,06	1,10	1,13	1,17	1,18	1,18
Oxygène (air figé)	1,00	1,03	1,07	1,13	1,16	1,25	1,27	1,29

Source : rejeu sur 300 stations, 2012-2026 ; rapport des erreurs moyennes ; erreurs en échantillon, donc facteur légèrement majorant ; traitement de l'auteur.

Exemple : après 12 jours sans observation, la marge de la courbe à 48 h est multipliée par 1,18 ; celle de la température du jour, où l'air est figé, par 2,12. Sur la valeur du jour, l'air figé ne bat la normale de saison que pendant deux jours environ : c'est pourquoi le mode dégradé est signalé dès le 4^e jour.

2.7 L'air prévu : un correctif validé en étude

En production, la prévision agrège l'air AROME par journée UTC et reprend pour les extrêmes d'air ceux du dernier jour observé, trois jours plus tôt ; selon le run lu, la moyenne d'air du jour est faussée (jusqu'à +0,24 °C sur le maximum de l'eau du jour même avec le run de 12 h). Le correctif agrège l'air par journée locale et lit les vrais minimum et maximum prévus. Rejoué sur 120 sites (2024-2026, années jamais vues), il ramène l'erreur du modèle de station sur le maximum d'été du lendemain de 1,28 à 1,19 °C et son biais de +0,39 à +0,17 °C, celle de la recette calée sur une sonde de 1,04 à 0,97 °C, et l'oxygène de 0,578 à 0,549 mg/L. Pour une sonde qui transmet, le recalage absorbe déjà le biais d'air : effet nul jusqu'à 24 h. Les prévisions du tableau A (§ 2.10) sont mesurées avec cet air corrigé ; en service, le correctif reste à construire.

L'air heure par heure (profil de la journée, pluie, insolation, rayonnement) n'apporte rien de mesurable au-delà du vrai minimum et du vrai maximum, ni en moyenne ni sur les fortes erreurs.

2.8 Protocole de validation et garde-fous contre les fuites

Une fuite fait paraître un modèle meilleur qu'il ne le sera en service, parce qu'il a vu, d'une manière ou d'une autre, ce qui le juge. Les règles suivantes valent pour tous les chiffres du modèle de fondation.

- **Années jamais vues.** Le réseau commun est appris sur 2006-2023 et jugé sur 2024-2026 ; pour une station de qualité, les années jugées sont retirées du calage de son plongement.
- **Bassin exclu.** Pour juger un point, le réseau est appris sans aucune sonde de son bloc de régions hydrographiques : la France est découpée en cinq blocs de 130 à 133 sites, et un contrôle automatique vérifie qu'aucune sonde du bloc n'a servi. Le modèle ne peut donc pas s'appuyer sur une sonde voisine de la même rivière pour la même année.
- **Juge jamais appris.** La sonde voisine d'une station de qualité sert seulement à la juger ; elle n'entre ni dans l'apprentissage du réseau (bassin exclu) ni dans le calage de la station.
- **Choix faits avant les résultats.** La recette (entrées d'air, nombre de passes) est choisie sur l'année 2023 avant le test ; les règles d'exclusion des sondes défaillantes de la comparaison TIGRE sont écrites avant le calcul de l'indicateur ; les exemples sont désignés par un critère écrit (centile de difficulté), pas pour leur résultat.
- **Prévision réelle.** Les prévisions sont jugées avec les prévisions météorologiques réellement émises (archives AROME et ECMWF), à l'heure d'émission, pas avec la météo observée.
- **Hasard de l'apprentissage.** Trois apprentissages indépendants sont moyennés : l'écart entre deux apprentissages est de 0,002 à 0,004 °C, et l'ensemble des trois vaut environ 0,02 °C de mieux qu'un seul. Un écart entre deux variantes plus petit que ce bruit n'est pas présenté comme un gain.
- **Référence simple, selon la situation.** Chaque chiffre est comparé à ce que le gestionnaire ferait sans modèle, dans sa situation : sans sonde, la température habituelle à cette date tirée des relevés tels quels (normale de saison brute) ; avec une sonde, la température habituelle tirée de l'historique de la sonde ; avec une mesure du jour, cette mesure reportée au lendemain (« comme aujourd'hui ») ; pour l'oxygène, le dernier relevé lu tel quel. La normale ajustée par notre propre correction de la journée n'est qu'un test plus exigeant. Une fonction qui ne fait pas mieux que sa référence n'est pas présentée comme fiable : pas de comptage en heures, pas de chiffre central au-dessus de 25 °C, pas d'alerte d'oxygène sous 5 mg/L ; un modèle de station qui ne bat pas la normale reste servi avec un indice de confiance faible (ci-dessous), et l'air figé d'un trou de météo est signalé comme mode dégradé (§ 2.6).
- **Station par station.** Un modèle de station qui ne bat pas la normale sur ses propres prélèvements n'est pas remplacé par la normale : il reste servi, avec un badge de confiance faible et un message. Il n'y a pas de bascule vers la normale : une normale mensuelle ne réagit ni à la météo ni à l'heure, et basculer station par station vers la normale dégrade l'erreur de l'ensemble (1,024 contre 1,005 °C).
- **Juge indépendant.** Les mesures qui servent de juge viennent de sondes indépendantes des données d'apprentissage. Les conditions d'usage sont regroupées au § 16.

2.9 Définition des indicateurs

Tous les chiffres de précision de ce document sont des erreurs mesurées contre une mesure indépendante, sur des données que le modèle n'a pas vues. Sauf mention contraire, ils portent sur l'été (1^{er} juin-30 septembre) et sont exprimés en °C.

Tableau 5 — Indicateurs de précision

Terme	Définition
Erreur d'une station	moyenne, sur les jours ou les heures jugés de la station, de l'écart absolu entre l'estimation et la mesure
Erreur médiane	médiane, entre stations, de l'erreur de chaque station : une station sur deux fait mieux. Ce n'est pas la moyenne de tous les écarts mis ensemble (« erreur groupée »), plus élevée parce que tirée par les stations difficiles : sur la prévision du lendemain avec des relevés seuls, 0,88 °C en médiane, 1,13 °C en erreur groupée
Maximum journalier	écart entre le maximum estimé et le maximum mesuré du jour (sonde)
Moyenne du jour	écart entre la moyenne journalière estimée et mesurée
À toute heure	écart heure par heure, sur toutes les heures où la sonde mesure (chroniques horaires Hub'Eau) ; c'est l'indicateur le plus proche de la courbe affichée
Au pic du jour	écart entre le maximum estimé et le maximum des mesures horaires du jour ; un jour n'est compté que s'il a au moins 20 heures mesurées
Années jamais vues	années retirées de tout apprentissage et de tout calage du point jugé (§ 2.8)
Écart quadratique (RMSE)	racine de la moyenne des carrés des écarts ; il pèse beaucoup les grands écarts. Il sert ici à la comparaison avec TIGRE, entre stations, sur l'indicateur moyen de chaque station (§ 3.10)
Intervalle à 95 %	fourchette obtenue en tirant au hasard, avec remise, les stations (1 000 ou 2 000 tirages selon l'étude)
Écart apparié, sites gagnés	différence entre deux méthodes calculée station par station sur les mêmes jours, puis résumée par sa médiane ; part des stations où une méthode fait mieux
Queue des erreurs	part des jours à plus de 2 ou 3 °C d'erreur, toutes stations confondues, et centiles 95 et 99 des écarts

Source : définitions communes aux études (indicateurs_v5.py, indicateurs_v6.py, evaluer.py des études du modèle de fondation).

Un même modèle donne des chiffres différents selon l'indicateur : sur les mêmes 654 stations, le modèle de fondation ajusté fait 0,86 °C sur le maximum d'été et 0,66 °C sur la moyenne du jour d'été ; 0,77 °C à toute heure (360 stations). Les chiffres ne se comparent qu'à l'indicateur, population et période égaux ; le registre les précise pour chacun.

2.10 Précision par situation et par horizon (tableau A)

Le tableau A résume, pour les trois situations d'un gestionnaire, l'erreur médiane du modèle de fondation selon l'horizon, au même indicateur (été, années jamais vues, erreur par sonde puis médiane entre sondes) : à toute heure, puis au pic du jour.

Tableau 6 — « Tableau A » : erreur médiane entre stations par situation et par horizon, été, années jamais vues (°C, à toute heure / au pic du jour)

Votre situation	Passé (air observé)	Aujourd'hui	Demain	Dans 7 jours
1. Relevés ponctuels seulement (station de qualité, relevés de vos agents)	0,77 / 0,82	0,88 / 0,90	0,88 / 0,90	0,96 / 1,04
2. Une sonde , relevée de temps en temps	0,64 / 0,60	0,67 / 0,67	0,68 / 0,68	0,86 / 0,84
3. Une sonde qui transmet chaque jour	—	0,31 / 0,31	0,47 / 0,51	0,77 / 0,78

Source : Hub'Eau (sondes horaires), Naiades, Météo-France (postes, AROME), ECMWF (AIFS) ; modèle de fondation, validé en étude, à construire ; traitement de l'auteur.

- **Horizons.** Aujourd'hui : prévision émise à 6 h (AROME), heures de 7 h à 23 h. Demain : même émission, les 24 heures du lendemain. Dans 7 jours : émission de 12 h (ECMWF, AIFS), les 24 heures du 7^e jour. Passé : air observé au poste.
- **Populations.** Ligne 1 : stations de qualité dotées d'une sonde voisine qui ne sert que de juge ; pour la prévision, le modèle est calé sur les seuls relevés antérieurs à 2024. Lignes 2 et 3 : sondes publiques, réseau appris jusqu'en 2023. Les populations diffèrent d'une colonne à l'autre (indiquées au registre).
- **Recettes.** Jusqu'à demain, l'entrée « moyenne, vrai maximum et amplitude de l'air » ; à 7 jours, la moyenne d'air seule, meilleure mesurée à cet horizon (§ 2.2). L'air prévu est calculé avec le correctif du § 2.7.
- **Production actuelle.** Sur le passé, le modèle de chaque station fait 0,90 / 0,94 °C sur les mêmes 360 stations (ligne 1) ; ses prévisions sont décrites au § 8.1.

Tableau 7 — Références naïves mesurées pour chaque situation (études de la v1.9, modèles de production)

Situation	Référence simple	Erreur	Population
Relevés seuls, maximum d'été	température habituelle à cette date tirée des relevés (normale brute)	1,72 °C	630 sites
Relevés seuls, à toute heure	la même, à l'heure	1,46 °C	359 sites
Une sonde, maximum d'été du lendemain	température habituelle tirée de la sonde ; mesure du jour reportée	1,37 °C ; 0,89 °C	106 sites
Une sonde, reconstitution du maximum d'été	température habituelle tirée de la sonde	1,51 °C	630 sites

Source : études références brutes et barres sonde (v1.9) ; registre.

3 Température de l'eau sans sonde

3.1 Validation sur 654 sites

Sur **654 sites** où une station de qualité et une sonde sont au même point, le modèle de fondation, ajusté sur les seuls relevés de la station, est jugé par la sonde sur des années qu'il n'a jamais vues, avec un réseau appris sans aucune sonde du bassin (§ 2.8). Erreur sur le maximum journalier d'été : **0,86 °C en médiane** (intervalle à 95 % : 0,83-0,90), contre 0,97 °C pour le modèle de la station en production ; il fait mieux sur 70 % des sites. Sur toute l'année : 0,74 contre 0,92 °C (meilleur sur 84 % des sites).

Mélange. La moyenne à parts égales du modèle de fondation et du modèle de production fait 0,87 °C sur le maximum d'été : un peu moins bien en médiane, elle est plus régulière. Elle fait mieux que la production sur 81 % des sites (contre 70 %) et a la queue d'erreurs la plus courte : 5,6 % des jours d'été à plus de 3 °C d'erreur, contre 5,8 % pour le modèle de fondation seul et 6,3 % pour la production. Le choix entre les deux pour le service reste à faire (§ 16.2).

Sans mesure du point. Sans aucune mesure de la station (plongement moyen des rivières apprises), le même réseau fait 1,44 °C : tout le gain vient de l'ajustement sur les relevés.

Point de comparaison (étude de la v1.9, modèle de production, 630 sites). Sans modèle, la meilleure estimation qu'un gestionnaire puisse construire seul est la température habituelle à cette date tirée des mêmes relevés, pris tels quels : une normale de saison (deux harmoniques annuelles) ajustée sur les valeurs brutes des années d'apprentissage. Elle se trompe de **1,72 °C [1,66-1,79]** sur le maximum journalier et le sous-estime de 1,1 °C : les relevés se font vers 11 h 30, pas au pic de l'après-midi. Le modèle de production fait mieux qu'elle sur 90 % des sites, et l'écart se creuse les étés chauds (2022, 92 sites : 1,01 contre 2,43 °C ; 2023 : 0,95 contre 2,22 °C). Relier les relevés d'une date à l'autre fait moins bien (1,88 °C, 587 sites), et suppose des relevés postérieurs, publiés 4 à 24 mois plus tard ; reprendre le dernier relevé connu, moins bien encore (2,56 °C).

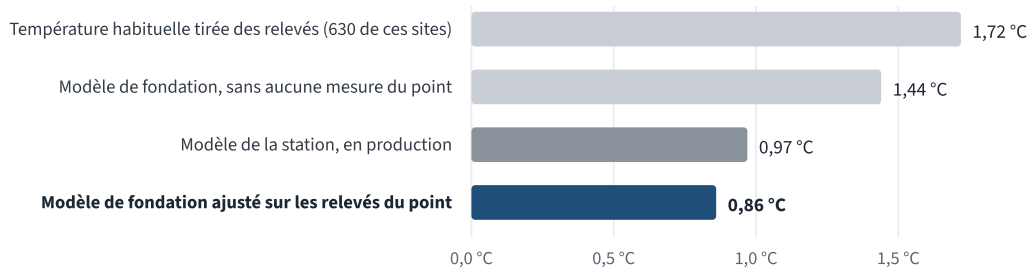


Figure 3 — Erreur médiane sur le maximum journalier d'été sans sonde : référence naïve, production et modèle de fondation.

Source : Hub'Eau (sondes, prélèvements), Météo-France ; années jamais vues ; modèle de fondation : 654 sites, validé en étude ; température habituelle : 630 de ces sites, étude des références de la v1.9 ; traitement de l'auteur.

3.2 Selon le nombre de relevés

Sur les 292 sites d'au moins 80 relevés, on ne garde au hasard que 12, 24, 36 ou 72 relevés (trois tirages), on ajuste le modèle sur ces seuls relevés et on le juge comme au § 3.1. Calé sur 12 relevés, le modèle de fondation (0,96 °C) vaut la production calée sur tous les relevés (0,95 °C).

Tableau 8 — Erreur médiane sur le maximum journalier d'été selon le nombre de relevés de la station

Relevés	12	24	36	72	tous
Modèle de fondation ajusté	0,96	0,95	0,87	0,86	0,84
Modèle de la station, en production	1,16	1,09	1,06	1,00	0,95
Modèle de fondation, à toute heure	0,87	0,82	0,79	0,77	0,76

Source : Hub'Eau, Météo-France ; 292 sites d'au moins 80 relevés, trois tirages par nombre de relevés, années jamais vues ; la production a été sous-échantillonnée par d'autres tirages ; traitement de l'auteur.

3.3 Petites stations : quelques relevés suffisent

Plus de 4 000 stations de qualité n'ont aujourd'hui que 3 à 11 jours de mesure de température, et aucun modèle : le service en production en exige 12. La petite station type est une campagne d'une seule année, souvent six relevés bimestriels faits vers 11 h, dont deux ou trois en été.

L'étude a repris, sur les 655 sites à sonde, les vrais relevés de chaque station, répartis comme ceux des vraies petites stations (mêmes mois, mêmes heures, une seule année), puis ajusté le modèle de fondation sur ces seuls relevés. Ce qui compte est la saison, pas le nombre : avec au moins trois relevés d'été, le maximum d'été est donné à environ 1 °C (0,98 à 1,00 °C), que la station ait 3, 6 ou 11 relevés ; chaque relevé d'été manquant coûte de 0,05 à 0,20 °C. Sans aucun relevé d'été, le gain est presque nul.

Tableau 9 — Petites stations : erreur médiane sur le maximum journalier d'été avec les vrais relevés de la station

Relevés de la station	3	6	11	23
Tous tirages confondus	1,20	1,07	1,06	0,99
dont au moins 3 relevés d'été	0,98	1,00	1,00	0,96
Modèle de production forcé sous 12 relevés (mêmes tirages)	2,80	1,31	1,23	1,09

Source : 655 sites à sonde (juge), 6 tirages par site et par nombre de relevés ; aucune donnée locale : 1,44 °C ; tous les relevés : 0,86 °C.

Environ 46 % des 4 060 stations à 3-11 relevés seraient à 1 °C ou mieux, contre 30 % sans donnée locale. Seuil proposé : publier une station dès trois relevés dont au moins un en été, avec un indice de confiance faible ; ne la qualifier « à environ 1 °C » qu'avec au moins trois relevés d'été (1 385 stations à 3-11 relevés aujourd'hui). Limite : les sites de l'étude sont des stations à sonde, souvent sur de plus grandes rivières ; la difficulté propre aux petits cours d'eau n'est pas mesurée.

3.4 Autres résultats, mesurés avec le modèle de production

Les résultats de cette sous-section viennent des études de la version 1.9 et portent sur le modèle de chaque station en production. Trois d'entre eux (épisodes chauds, semaine la plus chaude, pics de saison) ont été recalculés le 25 octobre 2026 avec le modèle de fondation, même population et même code ; ils sont donnés à la suite.

À l'heure même du relevé. Sur 1 128 stations sans sonde tirées au hasard (97 départements, 28 491 relevés d'été), chaque année étant retirée à son tour de l'apprentissage, le modèle se trompe de 0,93 °C sur le relevé, contre 1,52 °C pour la normale brute, et fait mieux sur 91 % des stations. À cette heure, la normale brute n'a pas de biais (+0,01 °C) : sa sous-estimation du maximum vient de l'heure des relevés, et l'avance du modèle vient de la météo.

Été 2026. Sur 93 sondes publiques situées sur une station de qualité, le modèle réentraîné sans juin-septembre 2026 se trompe de 1,21 °C, contre 3,22 °C pour la normale brute (meilleur sur 87 % des sites). Réserves : il a vu les prélèvements antérieurs à juin 2026 (2 en médiane par station), l'échantillon est petit et la moyenne (1,89 °C) est tirée par quelques sites très faux.

Test plus exigeant. Ajustée sur les prélèvements ramenés à midi, puis corrigée du cycle journalier par notre propre méthode (§ 3.6), la normale est portée au mieux de ce qu'elle peut faire : 1,52 °C [1,48-1,58]. Elle n'est pas à la portée d'un gestionnaire ; même face à elle, le modèle fait mieux sur 92 % des sites. Sur le maximum journalier d'été, le modèle a un biais médian de -0,03 °C, mais un site sur deux s'en écarte de plus de 0,5 °C et les pics de saison sont sous-estimés d'environ 0,7 °C. Avec le modèle de fondation : biais médian -0,02 °C et pics de saison sous-estimés d'environ 0,4 °C ; épisodes chauds retrouvés à 91 % (10 % de fausses alertes) ; semaine la plus chaude à ± 1 jour en médiane.

Tableau 10 — Autres indicateurs de la reconstitution sans sonde

Indicateur	Résultat	Référence : normale ajustée (test plus exigeant)
Épisodes chauds (≥ 3 jours au-dessus du 90 ^e centile de la station) retrouvés	87 %, 12 % de fausses alertes	normale : 45 %, 44 % de fausses alertes
Date de la semaine la plus chaude	± 2 j (médiane)	normale : 16 jours
Moyenne journalière d'été (630 sites)	0,80 °C	normale : 1,35 °C
Température heure par heure, juin à septembre (356 sites avec données horaires)	0,90 °C	normale : 1,37 °C
Nombre minimal de prélèvements par station	24 (36 confortable)	surcoût médian +0,10 °C à 24

Source : Hub'Eau, Météo-France ; étés exclus de l'apprentissage ; traitement de l'auteur.

NOTE DE MÉTHODE

Les erreurs sont des erreurs absolues moyennes (en °C ou mg/L) calculées par site, puis résumées par leur médiane entre sites, sauf mention contraire. Les intervalles à 95 % sont obtenus par rééchantillonnage des sites (2 000 tirages). Quand deux méthodes sont comparées, elles le sont sur les mêmes sites et les mêmes jours, et l'écart est calculé site par site. Familles de modèles, variables d'entrée et réglages sont décrits section par section (§ 2.4, 3.6, 4.4).

USAGE POUR LE GESTIONNAIRE

Savoir quand surviennent les coups de chaleur, quelles stations chauffent le plus, où la température limite une espèce, et comment un été se place par rapport aux autres, sur toutes les stations de qualité du bassin.

3.5 Précision réelle d'une sonde en rivière

Dans la rivière, comparée au thermomètre de l'agent préleveur au même point et à la même heure, une sonde s'en écarte de 0,37 °C en médiane l'été et de 0,66 °C en moyenne (12 608 relevés d'été, environ 650 stations), et de 0,30 °C en médiane sur l'année (35 224 relevés, 653 stations) ; c'est un majorant, puisque l'écart cumule l'erreur des deux instruments. Une sonde mesure aussi un point du lit : d'un point à l'autre d'une même station, l'écart permanent dépasse 0,3 °C sur un site sur quatre (et 0,5 °C sur un sur dix ; écart-type 0,46 °C de mai à octobre).

Cet écart de 0,37 °C ne vient pas d'une erreur d'horloge : Hub'Eau ne documente pas le fuseau des sondes, mais sous la meilleure hypothèse d'horloge testée l'écart d'été reste de 0,37 °C (et passe à 0,44 ou 0,53 °C sous les autres) ; les relevés des préleveurs sont bien en heure légale, pour les neuf grands producteurs de données. Les précisions de ce document n'en dépendent pas (0,768 °C à toute heure avec ou sans correction d'horloge).

Le décalage d'un été à l'autre d'environ 0,8 °C entre la température mesurée et celle que l'air laisse prévoir (290 sondes suivies au moins huit étés) n'est pas, pour l'essentiel, un défaut de sonde : le thermomètre indépendant le voit aussi. Aucun facteur hydrologique ou météorologique testé ne l'explique (un changement propre à la sonde ou au point de mesure en porte au plus 20 à 30 %), et seule une mesure de l'année le retire. La reconstitution sans sonde (≈ 1 °C) reste deux à trois fois moins précise qu'une sonde : elle sert là où il n'y en a pas, et une sonde sert d'abord à mesurer l'année en cours.

3.6 La forme de la journée : une amplitude propre à chaque station

Le maximum du jour et la courbe heure par heure se déduisent du niveau du jour et de l'amplitude jour/nuit. Une table nationale donne cette amplitude selon le mois et l'écart d'air entre le jour et la nuit ; elle est corrigée, station par station, de trois façons.

- **Les prélèvements à heures variées.** Une station prélevée tantôt à 9 h, tantôt à 15 h « voit » son propre cycle : l'écart entre ses relevés, ramenés au même mois, donne un facteur propre à la station, pondéré par sa précision.
- **La table air ré-ajustée.** La table nationale avait été ajustée entre stations sans facteur propre : la dispersion entre rivières écrasait la pente. Ré-ajustée avec le facteur de station, la pente par degré d'écart d'air passe de 0,063 à 0,109 °C en juillet.
- **Les caractéristiques du réseau et la pluie.** Une correction apprise sur des variables disponibles partout (surface du bassin, largeur du cours d'eau, altitude, rang du cours d'eau, affluents et ouvrages dans les 5 km en amont, climat d'été) ajuste le facteur de station ; la pluie du jour et le cumul des trois derniers jours et la variation de l'air d'un jour à l'autre modulent l'amplitude du jour.

Jugée sur 801 sondes horaires d'avril à octobre, sur des stations jamais vues (validation croisée par blocs de départements, calages emboîtés), l'erreur sur l'amplitude journalière passe de 0,95 à 0,80 °C ; le gain vaut dans toutes les familles de rivières (torrents, eaux de nappe, karst, grandes rivières, plaine), et elle fait mieux que le facteur de station seul sur 79 % des stations.

Sur le niveau du jour, l'effet est faible et les chiffres du § 3.1 ne bougent pas : c'est l'erreur de niveau qui domine. Il est net en revanche sur les rivières à fort battement (le dixième des stations dont l'amplitude d'été dépasse 3,4 °C) : erreur médiane sur le maximum d'été de 1,59 à 1,40 °C, et sur le pic de 14 à 18 h de 1,48 à 1,25 °C. Les stations sans prélèvements horodatés (60 % du pays) reçoivent un facteur prédit par leurs seules caractéristiques : 0,95 → 0,84 °C, sans dégrader les torrents.

Ce qui n'apporte rien. Le débit du jour, le rayonnement, le vent et l'humidité quotidiens (SAFRAN), le couvert boisé mesuré au LiDAR, la nappe et le karst, et les plans d'eau en amont ont été testés : aucun gain mesurable une fois la pluie et les caractéristiques connues. L'heure du pic, entre 16 h et 19 h selon les rivières, n'est pas prévisible par ces variables. Une résurgence très stable comme la Fontaine-de-Vaucluse garde son amplitude quasi nulle ; la Touvre, où le point de prélèvement ne représente pas la sonde, reste mal décrite.

3.7 Cas d'application : l'Aveyron en aval de Rodez

Sur l'Aveyron en aval de Rodez, trois sondes publiques (Lugans, Druelle, Floirac) mesurent depuis 2009 au même point que trois stations de qualité. Deux étés de chaque station ont été retirés du calcul et reconstitués à partir des seuls prélèvements des autres années, puis comparés aux sondes.

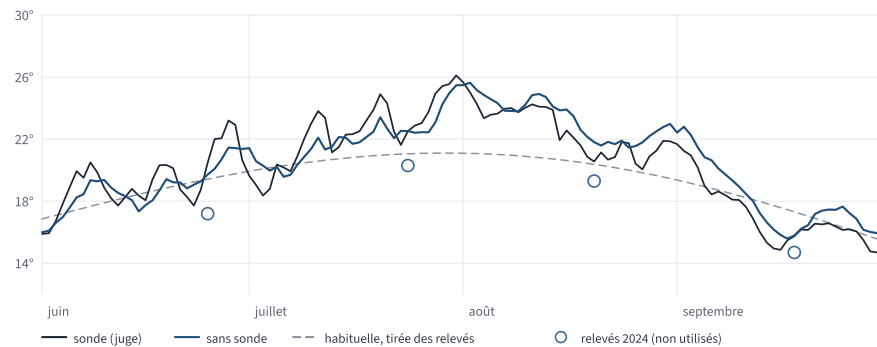


Figure 4 — Aveyron à Floirac (Monteils), température maximale journalière, juin à septembre 2024. Source : Hub'Eau (sonde 05126000 et prélèvements), Météo-France ; été 2024 exclu de l'apprentissage ; la sonde sert seulement de juge ; courbe « sans sonde » : modèle de production ; traitement de l'auteur.

Été 2024 jamais vu par le modèle : erreur moyenne de 0,94 °C sur le maximum journalier, contre 1,58 °C pour la température habituelle à cette date tirée des relevés (normale ajustée, test plus exigeant : 1,44 °C). Les prélèvements, faits vers 11 h, sont sous le maximum du jour. Avec le modèle de production, Floirac est un cas médian : 51^e centile des 1 358 étés testés (recalcul du 19/10 sur jours_A0.parquet ; 51^e aussi des 1 391 étés de l'étude initiale).

Avec le modèle de fondation ajusté sur les mêmes relevés, l'été 2024 de Floirac est reconstitué à 0,46 °C près : c'est alors un bon cas (86^e centile des 1 356 étés-sites), et le cas médian de l'Aveyron devient Lugans en 2023 (0,88 °C, 45^e centile, contre 1,73 °C pour la température habituelle tirée des relevés). Le modèle de fondation bat la température habituelle sur les six étés (Lugans 0,88 · 0,63 ; Druelle 1,37 · 1,72 ; Floirac 0,59 · 0,46 °C) ; Druelle 2019 se dégrade (trop froid, biais -1,7 °C). La remontée de Floirac en août 2024 (+0,55 puis +0,97 °C sur les deux quinzaines d'août) est propre à cet été-là : sur 654 sites, le biais médian par quinzaine reste entre -0,13 et +0,02 °C, août ne monte pas sur juin (+0,04 [-0,05 ; +0,13]), le niveau propre à chaque été-site porte 74 % de la variance des biais de quinzaine, et aucune correction saisonnière apprise sans fuite ne gagne. Floirac 2023 ne remonte pas ; le débit n'explique rien (1 % de la variance, de signe opposé).

Tableau 11 — Erreur moyenne sur le maximum journalier (juin à septembre), trois stations de l'Aveyron

Station (amont → aval)	Été test	Notre modèle	Habituelle, tirée des relevés	Relevés reliés	Mesure de la sonde
Lugans (Gaillac-d'Aveyron)	2023 · 2024	1,29 · 1,28 °C	1,73 · 1,22 °C	1,87 °C	12 à 23 jours au-dessus de 19 °C
Druelle (aval de Rodez)	2018 · 2019	1,44 · 1,46 °C	2,73 · 3,17 °C	2,53 °C	62 et 66 jours au-dessus de 21,5 °C ; pics à 28 °C
Floirac (Monteils)	2023 · 2024	0,96 · 0,94 °C	2,99 · 1,58 °C	2,29 °C	48 à 75 jours au-dessus de 21,5 °C

Source : Hub'Eau, Météo-France ; traitement de l'auteur. Erreur moyenne sur le maximum journalier, juin à septembre ; relevés reliés : moyenne des deux étés. Notre modèle fait mieux que les relevés reliés sur les trois stations, et mieux que la température habituelle tirée des relevés sur cinq des six étés (pas à Lugans en 2024 : 1,28 contre 1,22) ; face à la normale ajustée (test plus exigeant : 1,24 · 1,68 ; 1,82 · 2,25 ; 1,66 · 1,44), sur cinq des six aussi.

USAGE POUR LE GESTIONNAIRE

Le modèle place nettement la limite thermique entre Lugans, frais, et Druelle, où l'eau dépasse 21,5 °C de trois semaines à plus de deux mois selon l'été : c'est là que la truite devient résiduelle dans les pêches électriques. Aveyron amont : 20 stations exploitables, 3 sondes publiques actives. Druelle et Floirac sont en 2^e catégorie piscicole : l'exemple illustre la précision, pas une rivière à truite.

3.8 Exemple complémentaire : le Tarnon, un des meilleurs cas

Le Tarnon en amont de Rousses (Lozère, 899 m), été 2024. Le modèle de fondation, ajusté sur les seuls 147 relevés de la station antérieurs à 2024, retrace le maximum de chaque jour de l'été à 0,41 °C près (121 jours), sans biais notable (-0,06 °C) ; le modèle de production, calé sans 2023 ni 2024, faisait 0,53 °C sur les mêmes jours. La sonde sert seulement à vérifier : aucun modèle ne l'a vue. La température habituelle tirée des relevés se trompe de 1,37 °C et plafonne à 15,3 °C quand la rivière atteint 19,5 °C. Il avait été retenu, avec le modèle de production, parmi 141 étés d'eau fraîche avec une vague de chaleur nette : c'est un des meilleurs cas (93^e centile des 1 358 étés testés de l'étude des références avec le modèle de production ; 94^e avec le modèle de fondation, recalcul du 25/10). Il montre ce que la méthode atteint dans de bonnes conditions, pas l'erreur typique (0,86 °C, § 3.1) ; l'Aveyron à Floirac (§ 3.7) est le cas médian du modèle de production, Lugans 2023 celui du modèle de fondation.

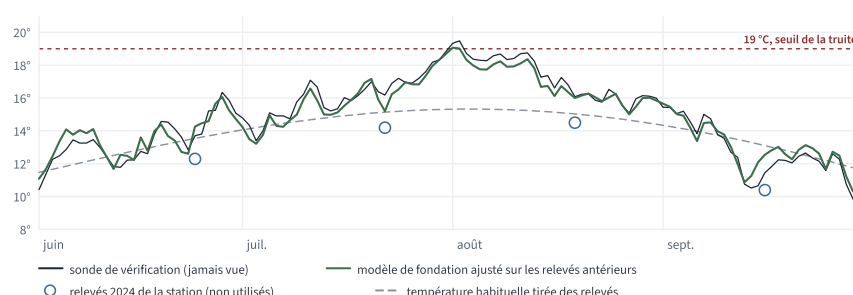


Figure 5 — Le Tarnon en amont de Rousses (Lozère), température maximale journalière, juin à septembre 2024. Source : Hub'Eau (sonde 05151100 et prélèvements), Météo-France ; modèle de fondation ajusté sur les relevés antérieurs à 2024 (validé en étude) ; sonde de vérification jamais vue ; un des meilleurs cas ; traitement de l'auteur.

3.9 Bassins dont les relevés ne sont plus publiés

Depuis janvier 2025, aucun prélèvement de température n'est publié sur Hub'Eau pour les bassins Adour-Garonne et Rhin-Meuse, et presque plus pour Artois-Picardie (9 stations sur 227 en 2025). Le service continue d'y donner la température d'aujourd'hui : chaque modèle a été calé sur des années de prélèvements et sur la météo qui les accompagnait ; il transpose cette relation à la météo du jour, sans avoir besoin du dernier relevé. Le dernier relevé compte d'ailleurs très peu : sur 655 sites (321 stations de jugement), recalculer le modèle sur les prélèvements les plus récents ne réduit l'erreur que de 1,6 %, et plus du tout au-delà de 30 jours ; la précision vient de la météo et des années d'apprentissage. L'âge du dernier relevé est affiché (§ 2.5).

Un modèle calé sur des relevés anciens reste pertinent : sur les années test, la précision ne dépend pas de l'époque jugée (erreur médiane sur le maximum d'été de 0,96 °C en 2008-2012, 0,95 en 2013-2016, 1,03 en 2017-2020 et 0,91 en 2021-2026). Les travaux courants modifient trop peu la température d'un cours d'eau pour qu'un témoin les détecte (§ 14.2), donc trop peu pour dérégler un modèle. Un relevé saisi le jour même par vos agents recalc la prévision des jours suivants : environ 10 % d'erreur en moins sur les trois jours qui suivent (-10 à -11 % sur la moyenne et l'heure par heure d'été, -7 % sur le maximum), puis l'effet s'efface.

3.10 Comparaison à la référence nationale TIGRE

Le projet TIGRE (INRAE – Université de Tours, avec l'OFB) a rassemblé 2 701 stations de mesure de la température (OFB, fédérations de pêche, DREAL, INRAE, EDF...), reconstitué leurs chroniques d'été, puis extrapolé à environ 105 800 tronçons du réseau hydrographique théorique deux indicateurs du pic thermique d'été : la moyenne des 30 et des 7 jours consécutifs les plus chauds de chaque année, moyennée sur 2009-2017. La carte est produite par des modèles d'apprentissage (forêt aléatoire, réseau de neurones, régression et leur combinaison) à partir de caractéristiques des bassins, sans mesure au point estimé.

Validation publiée (rapport final, p. 29) : 1 700 stations ; chaque modèle est calé sur 80 % des stations tirées au hasard et jugé sur les 20 % restantes, 150 fois. La forêt aléatoire obtient un écart quadratique inférieur à 1,5 °C sur l'indicateur à 30 jours ; la régression et le réseau de neurones, supérieur à 1,5 °C ; la température de l'air seule, plus de 3 °C. Le rapport ne dit pas si ce chiffre est la médiane ou la moyenne des 150 tirages. Les 272 stations fortement influencées (barrages, rejets) avaient été retirées avant la validation. La version 1.9 de ce document décrivait à tort un écart quadratique « médian » sur « 100 validations croisées ».

Ce que nous mesurons. Nous calculons le même indicateur (moyenne, sur les étés mesurés par la sonde entre 2009 et 2018, du maximum annuel de la température moyenne sur 30 jours consécutifs) au point de nos stations de qualité, avec le modèle de fondation ajusté sur les seuls relevés de chaque station, réseau appris sans aucune sonde de son bassin, et le confrontons aux sondes Hub'Eau situées au même point : 584 des 621 sondes ayant au moins un été complet sur la période (les 37 autres n'ont qu'une année de sonde et pas de données d'entrée exportées pour le modèle). Contrairement au reste du document, les relevés des années jugées servent au calage, comme en service : la comparaison porte sur le passé d'une station suivie, pas sur une année jamais vue.

Tableau 12 — Indicateur TIGRE (30 jours les plus chauds) aux stations de qualité, selon les contrôles appliqués aux sondes

Sondes retenues	Stations	Écart quadratique [IC 95 %]	Écart médian	Corrélation de rang	Production
Toutes	584	1,17 [0,97-1,39]	0,48	0,94	1,14
Contrôles antérieurs (R1-R5, S1)	568	1,03 [0,90-1,16]	0,46	0,95	1,00
+ contrôles physiques fixés à l'avance (R7, R8)	507	0,93 [0,79-1,08]	0,43	0,95	0,95
+ cohérence sonde-relevés (R6)	503	0,84 [0,75-0,93]	0,43	0,95	0,86

Source : Hub'Eau (sondes et prélèvements), Météo-France ; modèle de fondation ajusté sur les relevés (validé en étude) ; « Production » : écart quadratique du modèle de chaque station sur les mêmes stations ; intervalle par rééchantillonnage des stations (2 000 tirages) ; traitement de l'auteur.

Les contrôles. Les règles R1 à R5 ne lisent que la sonde et l'air : rupture d'une année à l'autre de l'écart eau-air de juillet-août de plus de 3 °C (R1), eau plus chaude que l'air de plus de 5 °C (R2), au moins deux sauts de plus de 4 °C (R3), plus de 10 % de jours d'amplitude supérieure à 6 °C (R4), moins de 58 jours mesurés sur 62 en juillet-août (R5) ; elles retirent des années, et une station entière quand toutes ses années sont touchées. S1 n'apparie une sonde qu'à la station de qualité de même code, à moins de 1 km. Les contrôles physiques R7 et R8 ont été écrits avant tout calcul de l'indicateur et ne lisent que la sonde : R7 écarte une sonde dont un été complet varie de moins de 3 °C (sonde de nappe ou de source, pas l'eau de la rivière) ; R8, une sonde dont plus de 20 % des jours d'été ont une amplitude de plus de 5 °C (sonde hors de l'eau ou cours d'eau à sec). Ils retirent 61 stations de plus.

La cohérence sonde-relevés et sa limite. La règle R6 écarte une sonde dont l'écart médian aux relevés du même jour dépasse 2 °C (sur au moins 10 jours communs) : la sonde et les relevés ne mesurent pas la même eau. Elle ne retire que 4 stations de plus mais fait passer l'écart quadratique de 0,93 à 0,84 °C. Sa limite : elle juge la sonde avec les relevés qui calent le modèle, et favorise donc tout modèle calé sur ces relevés ; le chiffre de référence reste 0,93 °C, et 0,84 °C n'est donné qu'à titre d'information.

Ce que portent ces chiffres. L'écart quadratique est dominé par quelques stations : 1 % des stations porte 32 à 34 % de la somme des carrés avant contrôles. Le modèle de fondation améliore l'écart médian (0,43 contre 0,50 °C pour la production, après contrôles physiques) et le biais (−0,15 contre −0,30 °C), mais pas l'écart quadratique de façon sûre (−0,016 °C, intervalle −0,05 à +0,02). L'écart médian, 0,43 °C, décrit la station typique : il se lit à part et ne se compare pas au seuil de 1,5 °C de TIGRE, qui est un écart quadratique. La liste des 81 stations écartées et leur motif est en annexe C.

Tableau 13 — Deux approches complémentaires du pic thermique d'été

	TIGRE (INRAE)	ThermoFluvia
Couverture	environ 105 800 tronçons, y compris sans aucune mesure	stations de qualité, sondes et points de mesure du gestionnaire
Précision publiée sur le pic d'été	écart quadratique inférieur à 1,5 °C (forêt aléatoire, 80 % des stations pour caler, 20 % pour juger, 150 tirages)	écart quadratique 0,93 °C [0,79-1,08], écart médian 0,43 °C (507 stations de qualité, modèle ajusté sur leurs relevés, sondes contrôlées)
Période	2009-2017	rejouable jusqu'aux années 1990 là où la météo est archivée (série calculée 2010-2025) → aujourd'hui → 7 jours → niveaux TRACC
Pas de temps	indicateurs interannuels	horaire et journalier, chaque année
Ce qui est fourni	deux indicateurs de pic d'été : cartes et fiches par station	température, jours au-dessus des seuils, oxygène, débit, assecs, refuges et ouvrages

Source : rapport final TIGRE (2020) ; Beaufort et al. (2022) ; thermie-rivieres.inrae.fr ; Hub'Eau, Météo-France ; traitement de l'auteur.

CE QUE CETTE COMPARAISON NE DIT PAS

Les deux chiffres ne mesurent pas la même chose. TIGRE estime le pic d'été de tronçons sans aucune mesure, à partir de leurs caractéristiques, et sa validation tire les stations au hasard : des stations de la même rivière restent dans l'échantillon de calage. Nos chiffres portent sur des points dotés d'une station de qualité, dont les relevés calent le modèle. Notre précision sur un tronçon sans aucune mesure n'est pas annoncée (§ 16.2). Les contenus du portail TIGRE (cartes, fiches) sont la propriété de l'INRAE : ils ne sont ni reproduits ni réutilisés ici ; seuls les chiffres publiés du rapport final et de l'article sont cités.

3.11 Exemple de la plaquette : le Loir à Lézigné, été 2019

À Lézigné (Maine-et-Loire), une station de qualité et une sonde mesurent au même point. Le modèle de fondation, ajusté sur les seuls relevés de la station hors années test, avec un réseau appris sans aucune sonde de son bloc de bassins (§ 2.8), reconstitue le maximum de chaque jour de l'été 2019, jamais vu, à **0,48 °C** près, contre 1,48 °C pour la température habituelle tirée des relevés. La sonde, qui atteint 27,5 °C pendant la canicule de juin, ne sert que de juge.

Critère de choix. Écrit avant de tracer les courbes : été complet (au moins 120 jours sur 122), centile de réussite entre 60 et 85, maximum mesuré au-dessus de 21 °C, épisode chaud d'au moins trois jours à 2 °C au-dessus de la normale, normale au moins deux fois plus fausse que le modèle (et d'au moins 1,2 °C), aucune quinzaine décalée de plus de 0,60 °C. Ce dernier seuil a été amendé avant toute courbe : la règle initiale (0,35 °C) ne laissait aucun été, la meilleure « pire quinzaine » valant 0,37 °C. Cinq étés passent ; la Petite Baïse à Puntous 2016 (rivière à truite, 0,52 °C, centile 79) arrivait en tête du classement fixé d'avance ; le Loir 2019, plus parlant (canicule suivie), a été préféré pour la plaquette.

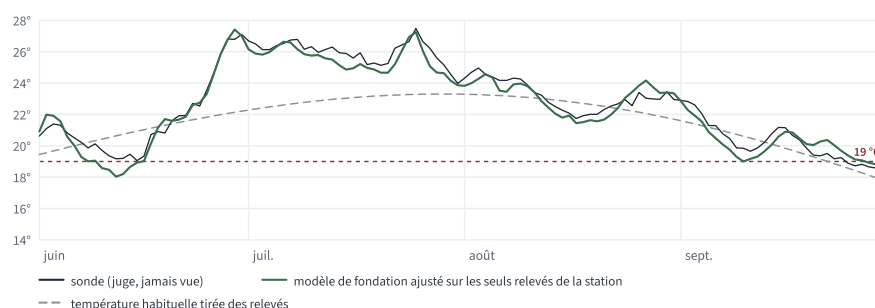


Figure 6 — Le Loir à Lézigné (Maine-et-Loire), température maximale journalière, juin à septembre 2019. Source : Hub'Eau (sonde et prélèvements), Météo-France ; modèle de fondation ajusté sur les relevés hors années test (validé en étude) ; 2019 jamais vu ; bon cas, 84^e centile ; traitement de l'auteur.

Limites. C'est un bon cas (84^e centile), pas l'erreur typique (0,86 °C, § 3.1). Le Loir n'est pas une rivière à truite (aucune truite dans les 22 pêches du même cours d'eau à moins de 15 km). Même ici, des quinzaines restent décalées d'environ 0,5 °C (de -0,58 à +0,40 °C) : c'est le régime normal du décalage lent propre à chaque été et à chaque site (§ 3.5, 7.4), pas un défaut corrigible. Floirac 2024, exemple des versions précédentes, est au § 3.7 (0,46 °C, 86^e centile).

4 Exploitation des sondes existantes

Une sonde sortie de l'eau, envasée ou en panne fausse ou coupe la mesure sans que rien ne le signale : 13 % des étés de sonde contiennent au moins une journée d'amplitude supérieure à 8 °C (exondation probable), et 21 % sont incomplets. Les fichiers déposés (HOBO, Tidbit, CSV) sont contrôlés, complétés et rattachés au reste du bassin.

4.1 Contrôle automatique

Sauts de plus de 3 °C en un jour, amplitude de plus de 8 °C (sonde hors d'eau), maximum au-dessus de 32 °C, eau plus chaude que l'air : ces règles, appliquées aux sondes publiques (9 424 étés), ont écarté les sondes exondées et des écarts allant jusqu'à -14 °C ; 430 sondes ont été conservées. Sur une sonde qui transmet, les anomalies d'un jour (saut, amplitude, maximum, eau plus chaude que l'air) sont signalées le jour même.

Emplacement réservé : détection automatique des défauts de sonde (étude sans rapport au 26/10/2026).

4.2 Alerte de pose

« Comportement de sonde changé, vérifier la pose » : quand l'amplitude jour/nuit saute de 0,8 °C ou plus d'une année à l'autre, l'écart entre sonde et modèle change en moyenne 2,5 fois plus (1,3 contre 0,5 °C) : changement de pose ou du milieu, à vérifier sur le terrain.

4.3 Comblement des lacunes et comparaison à l'attendu

Les jours manquants sont comblés en s'appuyant sur la mesure de part et d'autre du trou : le modèle calé sur la sonde est recollé aux deux bords, avec plus de poids sur les jours proches, puis moyenné avec une sonde voisine ajustée hors du trou. Sur 642 sondes et environ 30 000 trous simulés, un trou de trois semaines en été est comblé à 0,47 °C près en médiane sur le maximum journalier, contre 0,89 °C pour le modèle seul ; la méthode fait mieux que lui sur 95 à 98 % des sondes, sans biais.

Ancré sur le réseau de neurones. Le même comblement, appuyé sur le réseau de neurones du § 4.4 (version à moyenne d'air de la v1.9) au lieu de la recette de station, descend à 0,43 °C pour trois semaines (contre 0,47), 0,38 °C pour une semaine et 0,52 °C pour deux mois, et fait mieux sur 73 % des sondes à trois semaines ; le gain est significatif à toutes les durées, de 1 à 60 jours, faible près des bords du trou, net en son cœur (0,71 → 0,67 °C entre 15 et 30 jours du bord en été, 0,59 → 0,51 en hiver). En hiver, trois semaines sont comblées à 0,36 °C (contre 0,41) ; sans sonde voisine, 0,61 → 0,51 °C à 21 jours en été. **Ancré sur le modèle de fondation** (recalcul du 25/10/2026, 638 sondes) : 0,26, 0,37, **0,42** et 0,52 °C pour 1, 7, 21 et 60 jours (tableau ci-dessous), meilleur que le socle station sur 74 % des sondes à 21 jours. Les jours comblés sont marqués « reconstitué », avec une fourchette. L'été mesuré est comparé à l'été attendu avec la météo réelle, pour distinguer un été anormal d'une dérive de la sonde.

Tableau 14 — Comblement d'un trou de sonde selon sa durée (maximum journalier d'été)

Méthode	1 jour	7 jours	21 jours	60 jours
Modèle seul, calé sur la sonde	0,87 °C	0,88 °C	0,89 °C	0,87 °C
Interpolation linéaire entre les deux bords	0,35 °C	0,80 °C	1,15 °C	1,51 °C
Comblement ancré, socle recette de station	0,27 °C	0,40 °C	0,47 °C	0,57 °C
Comblement ancré, socle modèle de fondation	0,26 °C	0,37 °C	0,42 °C	0,52 °C

Source : Hub'Eau (642 sondes, années test ; socle modèle de fondation : 638 sondes), Météo-France ; traitement de l'auteur. Socle réseau v1.9 : 0,26 / 0,38 / 0,43 / 0,52 °C. Hiver, 21 jours : 0,35 °C (socle fondation), 0,36 (réseau v1.9), 0,41 (station), contre 0,73 pour le modèle seul ; sans voisine : 0,49 °C.

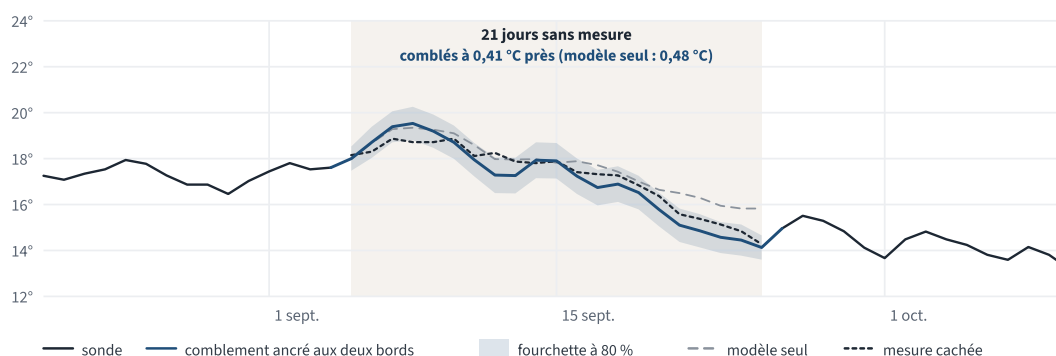


Figure 7 — L'Evel à Guénin (Morbihan), septembre 2021 : trou de trois semaines comblé. Source : Hub'Eau (sonde 04192830), Météo-France ; 2021 est une année de test du site ; traitement de l'auteur. Trou de difficulté médiane (50^e centile de 2 764 trous de trois semaines testés), désigné par un critère écrit avant de voir les résultats (année de test du site, 45^e à 55^e centile, sonde voisine disponible). Du 5 au 25 septembre 2021, la mesure cachée est retrouvée avec 0,41 °C d'écart moyen sur le maximum journalier (comblement ancré sur le réseau de neurones, version à moyenne d'air), contre 0,48 °C pour le modèle seul calé sur les prélèvements (courbe « modèle seul »), 0,56 °C pour le même modèle calé sur la sonde et 1,09 °C pour l'interpolation linéaire ; 0,23 °C sur la moyenne du jour. La mesure tombe dans la fourchette à 80 % 9 jours sur 10.

4.4 Le modèle de fondation sur une sonde

Là où une sonde existe, le plongement du modèle de fondation est appris sur la sonde elle-même. Appris jusqu'en 2023 et jugé sur 2024-2026, il fait **0,60 °C** sur le maximum journalier d'été (238 sondes), 0,48 °C sur la moyenne du jour, 0,64 °C à toute heure et 0,60 °C au pic du jour ; sur toute l'année, 0,57 °C sur le maximum (262 sondes). Sur les mêmes sondes, la recette de station calée sur la sonde, servie aujourd'hui pour 258 sondes, fait 0,80 °C sur le maximum d'été et 0,83 °C à toute heure.

C'est la suite du réseau de neurones des sondes de la version 1.9 : même architecture, mais nourri du vrai maximum et de l'amplitude de l'air en plus de la moyenne, appris en 20 passes au lieu de 10. Dans le même protocole (appris jusqu'en 2023, jugé sur 2024-2026), le maximum d'été passe de 0,64 à 0,60 °C, et la part des jours d'été à plus de 2 °C d'erreur de 8,8 à 8,2 %. Référence naïve : la température habituelle tirée de l'historique de la sonde se trompe de 1,51 °C sur le maximum d'été (630 sites) et de 1,37 °C en prévision du lendemain (106 sites).

LIMITES DU MODÈLE SUR UNE SONDE

- **Journées chaudes.** Sur les jours où l'air est le plus chaud (moyenne de trois jours au-dessus du 90^e centile d'été), le maximum est sous-estimé de 0,12 °C en médiane ; la sous-estimation d'environ 0,5 °C citée jusqu'ici venait surtout du choix des jours sur l'eau observée.
- **Amplitude de la journée.** Sur le cinquième des rivières au battement le plus faible, l'amplitude prévue vaut 1,27 fois l'amplitude mesurée (environ +0,15 °C sur le maximum du jour) ; sur les plus forts battements, 0,97 fois.
- **Grands cours d'eau.** L'erreur croît avec la taille, sans biais : 0,49 °C sur le maximum d'été pour les rangs de Strahler 3-4, 0,60 pour 5-6, 0,81 pour 7 et plus ; les rivières de craie sont les plus faciles (0,40 °C).
- **Froid extrême.** Constat de la version 1.9, non refait avec la nouvelle recette : sous 1 °C, le réseau comptait moins bien les jours de gel que la recette de station ; il n'est pas utilisé pour un usage « gel ».
- **Station par station.** La règle de service (le modèle de fondation n'est servi pour une sonde que s'il bat la recette de station sur sa dernière année réservée) reste à coder.

4.5 Une sonde nouvelle : un été pour l'été, une année pour l'hiver

Une sonde nouvelle, par exemple une sonde du syndicat, n'a pas servi à apprendre le réseau. On estime seulement ses huit valeurs propres à partir de ses mesures, réseau gelé, puis on la juge sur 2024-2026 ; le réseau a été appris sans aucune sonde de son bassin, et la sonde « vue » à l'apprentissage sert de référence haute.

Tableau 15 — Sonde nouvelle : erreur médiane selon les mesures disponibles (2024-2026, °C)

Mesures de la sonde	Maximum d'été	À toute heure, été	Maximum, année	Émergence de la truite : écart médian ; plus de 2 semaines
Sonde vue à l'apprentissage (référence haute)	0,66	0,70	0,62	3 j ; 2 %
Tout son historique	0,71	0,75	0,64	3 j ; 2 %
Deux ans	0,75	0,77	0,66	—
Une année complète	0,74	0,78	0,69	4 j ; 4 %
Un été (juin-septembre)	0,76	0,78	0,78	6 j ; 13 %
Un mois d'été	0,80	0,81	0,79	6 j ; 11 %
Caractéristiques du site seules, sans mesure	1,09	0,98	0,90	—
Recette de station calée sur tout l'historique (S)	0,79	0,82	0,77	4 j ; 5 %

Source : Hub'Eau (sondes), Météo-France ; modèle de fondation, validé en étude ; mêmes sondes et mêmes cas dans chaque colonne (222, 223 et 246 sondes ; émergence : 246 cas sur 172 sondes, ponté au 15 novembre, hivers 2024-25 et 2025-26) ; traitement de l'auteur.

Un été de mesures suffit pour l'été : 0,78 °C à toute heure, au niveau de la recette de station calée sur tout l'historique de la sonde (0,82 °C). Il ne suffit pas pour l'hiver : calées sur un seul été, 37 % des sondes se trompent de plus de 0,5 °C sur la température moyenne d'octobre à mai, dans un sens ou dans l'autre, et la date d'émergence de la truite est fautive de plus de deux semaines dans 13 % des cas. Une année complète, hiver compris, ramène l'écart médian à 4 jours (plus de deux semaines dans 4 % des cas). Règle d'affichage : le calendrier de reproduction d'un point n'est donné qu'après un hiver mesuré ; avant, la plage est élargie et marquée « calage d'été seulement » (à construire).

4.6 Sondes télétransmises

Avec le modèle de fondation, une sonde qui transmet chaque jour recalcule la prévision sur ses dernières mesures : erreur à toute heure de 0,31 °C le jour même, 0,47 °C le lendemain et 0,77 °C le 7^e jour, contre 0,67, 0,68 et 0,86 °C sans ce recalage (tableau A). Deux études antérieures (v1.9, modèles de production) l'avaient chiffré autrement :

Une sonde qui transmet chaque jour permet de corriger le modèle avec son écart récent à la mesure. Deux études l'ont chiffré, avec deux méthodes et sur deux grandeurs différentes : leurs chiffres ne se comparent pas entre eux.

Correction quotidienne du résidu, moyenne journalière. L'écart du jour au modèle est prolongé avec un amortissement appris (autorégression d'ordre 1 autour de l'écart moyen des 30 derniers jours). Sur la moyenne journalière d'été, l'erreur du lendemain passe de 0,94 à 0,38 °C (−60 %, intervalle à 95 % : 57-62 % ; la mesure du jour reportée au lendemain : 0,48 °C), puis 0,52 °C à deux jours et 0,67 °C à une semaine ; la part des jours à ± 1 °C passe de 66 à 94 % le lendemain (472 stations, paramètres choisis sur 2008-2015, testés sur 2016-2025). Sur le maximum journalier, la même correction donne 1,14 → 0,48 °C.

Recalage sur les 7 derniers jours, maximum journalier. On retire au modèle son écart moyen à la sonde sur la semaine écoulée. L'erreur du lendemain sur le maximum journalier d'été passe de 1,15 à 0,64 °C, et reste à 0,82 °C une semaine plus tard (290 sites suivis au moins huit étés).

Dans les deux cas, la météo des jours suivants est la météo observée (prévision parfaite) : en prévision réelle, l'erreur météo s'y ajoute. La sonde seule, recopiée telle quelle, ne bat le modèle corrigé à aucun horizon : il faut les deux. C'est l'argument principal pour équiper de sondes télétransmises les rivières suivies de près.

EXEMPLE : OÙ POSER UNE SONDE

Sur l'Orge, le modèle d'une station de qualité à Saint-Chéron est plus frais que l'ancienne sonde de Sermaise, 8 km en amont : apport de nappe réel ou modèle trop froid, la question reste ouverte. C'est là qu'une sonde d'été changerait la décision.

4.7 Exemple de la plaquette : le Sornin, juin 2013

Le Sornin à Saint-Maurice-lès-Châteauneuf (Saône-et-Loire), juin 2013, année test du site : trois semaines de mesures cachées (10-30 juin), puis reconstituées à **0,31 °C** près sur le maximum journalier par le comblement ancré aux deux bords (socle réseau « moyenne d'air » de la v1.9, comme l'Evel), contre **2,02 °C** en reliant les deux bords et 0,46 °C pour le modèle seul calé sur les prélèvements ; 95 % des jours tombent dans la fourchette à 80 %.

Critère de choix. Neuf règles écrites avant de tracer les courbes, sur les mêmes 2 764 trous de trois semaines que l'Evel : trou entièrement en juin-septembre d'une année test, sonde mesurée la veille et le lendemain, voisine disponible chaque jour, donnée propre, centile de réussite entre 50 et 85, épisode chaud d'au moins 3 °C dans le trou, interpolation linéaire visiblement fautive (au moins 1,5 °C et 2,5 fois l'erreur du comblement). 68 trous passent ; le Sornin arrive en tête au classement fixé d'avance (épisode le plus marqué).

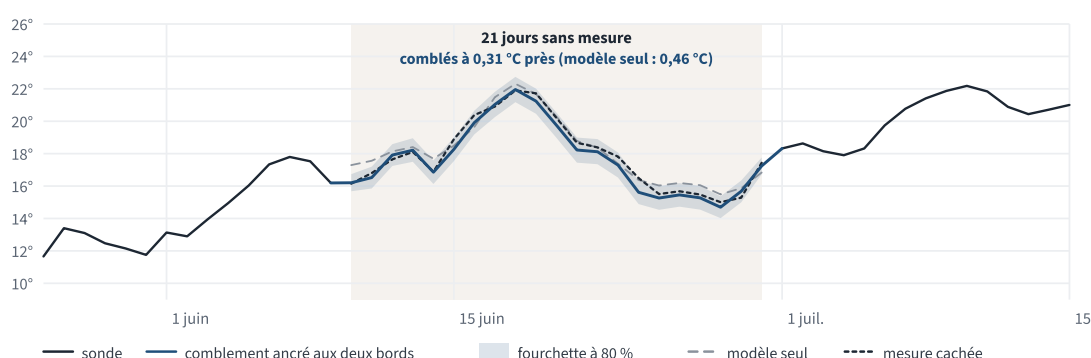


Figure 8 — Le Sornin à Saint-Maurice-lès-Châteauneuf (Saône-et-Loire), juin 2013 : trou de trois semaines comblé. Source : Hub'Eau (sonde 04015050), Météo-France ; 2013 est une année de test du site ; bon cas (70^e centile), désigné par un critère écrit avant les courbes ; traitement de l'auteur.

Limites. C'est un bon cas, pas le cas typique : le chiffre général est celui du § 4.3 (0,42 °C contre 1,15 °C à trois semaines), et l'Evel (§ 4.3, figure de l'Evel) reste le trou de difficulté médiane. Sur ce trou, le comblement ancré sur la recette de station fait même un peu mieux (0,26 °C) que celui ancré sur le réseau.

4.8 Double calage été / hiver : la date d'émergence

Pour la reproduction de la truite, le point peut être calé deux fois : un jeu de huit valeurs sur ses mesures de juin à septembre, qui sert pour tous les indicateurs d'été, et un jeu sur ses mesures hors été, qui sert pour l'hiver et le calendrier de reproduction (jamais pour l'été). Sur les sondes de l'étude « mesurer peu » (réseau sans le bloc de bassins, hivers et étés jugés jamais utilisés au calage, ponte au 15 novembre), l'écart médian sur la date d'émergence tombe à **5 jours** avec un été d'enregistreur et six relevés d'hiver, contre 9 jours avec l'été seul ; l'été n'est pas dégradé.

Tableau 16 — Hiver et reproduction : erreur médiane selon ce que vous mesurez (double calage dès qu'il y a été et hiver)

Ce que vous mesurez	Hiver, moyenne du jour	Émergence : écart médian	Plus de 14 jours
Rien (modèle seul)	1,05 °C	12 j	43 %
L'été seul (un été d'enregistreur)	0,82 °C	9 j	33 %
L'été + 3 relevés d'hiver	0,77 °C	7 j	16 %
L'été + 6 relevés d'hiver	0,75 °C	5 j	15 %
Un mois d'enregistreur en janvier	0,73 °C	5 j	13 %
Une année d'enregistreur	0,63 °C	5 j	14 %

Source : Hub'Eau (sondes), Météo-France ; modèle de fondation, validé en étude ; hiver = octobre à mai des hivers jugés, 305 sites ; émergence : 1 464 cas sur 302 sites, ponte au 15 novembre ; traitement de l'auteur.

Limites. La moyenne d'hiver bouge peu (0 à -0,03 °C) : le gain porte sur le niveau, donc sur la date. Un site sur cinq fait pire de plus de 2 jours avec le double calage. Pondérer les saisons dans un calage unique n'apporte rien. Le raccord des deux jeux en octobre et en mai n'est pas testé : une règle de fondu reste à écrire avant la mise en service. Les chiffres diffèrent de ceux du § 4.5 (une année : 4 jours), mesurés sur d'autres années (2024-2026) et une autre variante du modèle commun.

5 Mesurer peu, mesurer juste : relevés de tournée, enregistreurs et calendrier

Une rivière sans station de qualité n'est pas condamnée à rester inconnue : quelques relevés au thermomètre pendant les tournées d'été, ou quelques semaines d'enregistreur, suffisent à ajuster le modèle de fondation au point. Ces résultats viennent d'un protocole sur 321 sondes Hub'Eau : chaque dispositif de mesure est simulé sur une année du site, le modèle est ajusté sur ces seules mesures (réseau appris sans aucune sonde du bassin), puis jugé sur tous les autres étés du site, jamais utilisés.

5.1 Ce que donne chaque dispositif

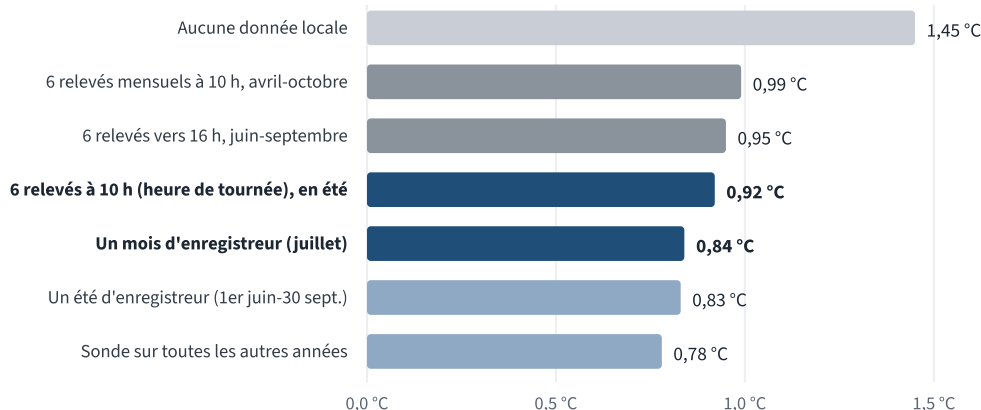


Figure 9 — Erreur médiane sur le maximum journalier d'été des années sans mesure, selon la mesure locale disponible (modèle de fondation). Source : Hub'Eau (321 sondes), Météo-France ; validé en étude, à construire ; traitement de l'auteur.

Avec le modèle de fondation, six relevés au thermomètre l'été font 0,92 °C (le modèle de production faisait 1,49 °C avec les mêmes relevés), six relevés mensuels d'avril à octobre 0,99 °C (1,31), un mois d'enregistreur en juillet 0,84 °C (1,30), un été d'enregistreur 0,83 °C (0,93) et une sonde sur toutes les autres années 0,78 °C (0,85). Sans aucune donnée locale, il ne fait pas mieux de façon sûre (1,45 contre 1,61 °C, intervalle de l'écart -0,16 à +0,09). La version 1.9 imprimait 1,45 et 1,27 °C pour les deux premiers dispositifs avec le modèle de production : ces valeurs venaient d'une passe antérieure de l'étude, les fichiers donnent 1,49 et 1,31 °C.

5.2 Mesurez en été, à l'heure de votre tournée

L'heure du relevé ne compte presque plus : six relevés à 10 h font 0,92 °C sur le maximum d'été, six relevés vers 16 h 0,95 °C ; heure par heure, les relevés de 10 h font même mieux (0,78 contre 0,90 °C, 96 sites). Le modèle de fondation remplace lui-même le relevé dans le cycle de la journée. Le conseil de la version 1.9, mesurer vers 16 h plutôt qu'à 10 h, venait du modèle de production ; il est retiré. Ces relevés simulés sont les valeurs exactes de la sonde, sans erreur de thermomètre : avec les vrais relevés éparpillés des petites stations, l'erreur est plus forte de 0,1 à 0,3 °C (§ 3.3).

5.3 Rotation d'enregistreurs

Mesuré avec le modèle de production (version 1.9) ; la rotation d'un seul enregistreur, avec le modèle de fondation, est au § 5.6.

Cinq enregistreurs déplacés chaque année sur vingt sites voisins sans station de qualité ramènent l'erreur moyenne de 1,67 °C la première année à 1,08 °C la quatrième : la rotation dépasse cinq sondes fixes (1,44 °C sur l'ensemble des vingt sites) dès la troisième année. Ce résultat vaut là où il n'y a pas de station de qualité ; là où il y en a une, cinq sondes fixes restent préférables (0,93 °C contre 1,08 °C au bout de quatre ans). Les sondes fixes donnent en outre la mesure de l'année et la prévision recalée chaque jour (§ 4.6).

5.4 Refuges thermiques

Sur 389 paires de sondes distantes de moins de 30 km, une saison de mesure retrouve 94 à 96 % des écarts durables d'au moins 1 °C. Une deuxième saison concordante, ou un écart d'au moins 1,5 °C, ramène les faux refuges d'environ 15 % à environ 5 %.

Tableau 17 — Calendrier de mesure recommandé

Objectif	Dispositif	Résultat attendu
Rivière sans donnée	six relevés au thermomètre de juin à septembre, à l'heure des tournées ; ou un mois d'enregistreur en juillet, à l'ombre, dans le courant, immergé à l'étiage	maximum d'été à environ 0,9 °C (0,92 ; 0,84)
Station à quelques relevés	au moins trois relevés d'été, quel que soit le reste	environ 1 °C (0,98 à 1,00)
Valeurs d'hiver (reproduction de la truite)	un été et six relevés d'hiver, ou un mois d'enregistreur en janvier, calés à part (§ 4.8)	date d'émergence à 5 jours près en médiane
Refuge ou effet de travaux	deux saisons de mesure, ou une sonde fixe	refuge confirmé (environ 5 % de faux restants) ; effet mesurable s'il atteint environ 2 °C sur trois étés (2,4 à 2,8 °C l'été suivant)

Source : études mesure minimale v2, petites stations, sonde nouvelle (octobre 2026) ; témoin de travaux.

COUPLAGE AVEC « OÙ POSER UNE SONDE »

L'outil indique où un enregistreur ou une tournée de relevés apporte le plus : stations sans sonde dont le nombre de jours au-dessus du seuil est le plus incertain, refuges candidats à confirmer, sites de travaux à venir (qui demandent des étés de mesure avant les travaux), et désaccords entre modèle et mesure, comme sur l'Orge (§ 4). Le calendrier ci-dessus dit ensuite comment mesurer : un été d'enregistreur par site, puis rotation vers les sites suivants.

5.5 Campagne de mesure sur mesure

Pour connaître la thermie d'un affluent sans station ni sonde, le gestionnaire crée une campagne dans son espace : le point, et ce qu'il veut connaître (le pic d'été, l'hiver pour la fraie, ou les deux). L'outil fixe les dates des relevés, en été pour le pic, sur une année pour l'hiver ; le technicien saisit chaque relevé avec son heure exacte, et à la fin de la campagne le modèle du point est ajusté. Il a ensuite, comme une station de qualité, sa température du jour, sa prévision, son passé rejoué et sa place dans le calcul des refuges. Les relevés saisis dans l'espace ont une heure et un fuseau exacts ; leur effet sur la précision, comparé aux relevés des stations de qualité, n'est pas encore mesuré.

5.6 Ce que vous mesurez, et la précision obtenue l'été

Le protocole du § 5 est repris tel quel sur 321 sondes Hub'Eau (réseau appris sans aucune sonde du bloc de bassins du site, huit valeurs du point ajustées sur les seules mesures simulées d'une année, tous les autres étés complets du site jugés, jamais utilisés au calage) pour chaque dispositif de la campagne guidée : relevés au thermomètre, poses d'enregistreur de 3 jours à un an. Les relevés simulés sont la valeur exacte de la sonde à l'heure dite.

Tableau 18 — Ce que vous mesurez sur un point : erreur médiane sur les autres étés du point (°C)

Ce que vous mesurez	Maximum du jour	À toute heure	Population, étude
Rien (modèle seul)	1,45	1,22	320 / 209 sondes, duree_pose
[référence naïve] l'été mesuré, recopié	1,69	1,60	idem
3 relevés d'été à 10 h	0,98	0,89	idem
6 relevés d'été à 10 h	0,93	0,84	idem
6 relevés d'été, heure de tournée (8-17 h)	0,95	0,89	idem
Une semaine d'enregistreur	0,95	0,90	idem
Un mois d'enregistreur (30 jours)	0,88	0,84	idem
Un été d'enregistreur	0,84	0,81	idem
Une année d'enregistreur, double calage (§ 4.8)	0,84	0,81	310 / 203 sondes, calage_saison
6 relevés chaque été, trois étés de suite	0,86	0,79	190 sondes, combine_relevés_pose
Une sonde suivie plusieurs années	0,60	0,64	238 sondes, 2024-2026 (§ 4.4)
Tous les relevés d'une station de qualité	0,86	0,77	654 / 360 sites (§ 3.1)

Source : Hub'Eau, Météo-France ; modèle de fondation, validé en étude ; relevés simulés par la valeur exacte de la sonde ; populations différentes selon les lignes (colonne de droite) ; traitement de l'auteur.

Lecture. L'heure de la tournée, entre 8 h et 17 h, ne change presque rien sur le maximum (0,95 contre 0,93 °C) ; à toute heure, l'écart est de 0,05 °C. Une semaine d'enregistreur vaut à peu près six relevés sur le maximum (0,95 contre 0,93 °C), mais moins bien à toute heure (0,90 contre 0,84) et avec une queue plus lourde : P90 entre sites 2,0 contre 1,8 °C ; 22 % des poses de 7 jours sont à plus de 1,5 °C ; une pose de 7 jours ne bat six relevés que sur 37 % des sites. La météo de la pose compte peu (une semaine chaude vaut 0,03 à 0,05 °C de mieux qu'une semaine fraîche, environ 0,1 °C sur les jours chauds) et aucune règle de pose choisie sans fuite ne tient d'une moitié des bassins à l'autre : la seule consigne robuste est la durée, au moins 7 à 10 jours, de préférence de fin juin à fin août.

Un enregistreur qui tourne. Un seul enregistreur déplacé chaque semaine de juin à septembre cale 17 points dans l'été, dont 9,5 en médiane à moins de 1 °C (de 7 à 12 selon l'été) : autant que six relevés sur chacun des 17 points (9,4), pour 17 poses au lieu de 102 visites ; sans mesure, 5,8. Début juin et fin septembre sont un peu moins bons.

Plusieurs étés de relevés. Chaque été de relevés de plus affine le point, de moins en moins : sur 190 sondes ayant au moins six étés horaires, six relevés par été pendant trois ans donnent 0,86 °C sur le maximum et 0,79 °C à toute heure, à peu près un été d'enregistreur (0,81 et 0,79) ; pendant cinq ans, 0,82 et 0,77. Une sonde calée sur tout son historique reste devant (0,74 et 0,76).

5.7 Prévoir avec six relevés : le tableau de la page 3

Un point calé sur six relevés d'été (pris à 10 h sur l'été le plus récent avant 2024) est rejoué en prévision réelle sur les étés 2024-2026, jamais vus : même chaîne que le tableau A (§ 2.10), air AROME émis à 6 h pour aujourd'hui (7 h-23 h) et demain (24 heures), ECMWF AIFS émis à 12 h pour les 24 heures du 7^e jour, correctif de l'air prévu (§ 2.7), réseau sans le bloc de bassins du site, aucun recalage ni mesure du jour. Erreur à toute heure : **0,85 °C aujourd'hui, 0,85 °C demain, 1,05 °C dans 7 jours**, au niveau de « tous les relevés de la station » jusqu'à demain.

Tableau 19 — Prévision d'un point calé sur des relevés d'été : erreur médiane à toute heure (au pic du jour), °C

Calé sur	Aujourd'hui	Demain	Dans 7 jours
Tous les relevés de la station antérieurs à 2024	0,87 (0,88)	0,87 (0,90)	0,99 (1,05)
6 relevés d'été à 10 h	0,85 (0,90)	0,85 (0,92)	1,05 (1,14)
3 relevés d'été à 10 h	0,93 (0,91)	0,92 (0,94)	1,08 (1,14)
[référence naïve] les 6 relevés reliés par date	1,67 (1,86)	1,62 (1,87)	1,54 (1,85)
[référence naïve] normale brute des prélèvements	1,56 (1,94)	1,48 (1,93)	1,47 (1,89)

Source : Hub'Eau (sondes horaires 2024-2026, juge), Naïades, Météo-France (AROME), ECMWF (AIFS) ; 83 / 83 / 81 sites à toute heure, 81 au pic ; modèle de fondation, validé en étude ; traitement de l'auteur.

Ce qu'imprime la plaquette. « À 0,9 °C près aujourd'hui et demain, à 1,1 °C dans 7 jours » arrondit deux calages : sur l'été le plus récent (0,85 / 0,85 / 1,05) et en moyenne sur un à trois étés antérieurs à 2024 (0,92 / 0,89 / 1,09). La première colonne, « le 15 juillet 2010 à 16 h : à 0,84 °C près », est l'erreur à toute heure d'un point calé sur six relevés d'été, sur tous ses autres étés jugés, avec l'air observé (§ 5.6, 209 sondes) ; la date et l'heure sont une illustration : le chiffre est une médiane sur toutes les heures d'été, et la précision ne dépend pas de l'époque jugée (§ 3.9). Sur les sites de cette sous-section, le passé fait 0,81 °C.

Limites. Effectif modeste (81 à 83 sites dotés à la fois de prévisions archivées, d'un été horaire avant 2024 et de prélèvements) : les intervalles (± 0,1 °C) ne séparent pas six relevés de tous les relevés jusqu'à demain. Les relevés sont simulés par la sonde elle-même (pas d'erreur de thermomètre ni de lieu) : un vrai technicien fera un peu moins bien. Au pic du jour, à 7 jours, l'erreur dépasse 1,1 °C.

5.8 Combien de temps tient le modèle d'un point

Sur 235 sondes suivies au moins huit étés, chaque été complet sert à son tour de campagne et tous les autres étés sont jugés. En médiane, la précision tient au moins dix ans : sur le maximum du jour, un point calé sur six relevés d'été fait 0,91 °C l'année suivante et 0,97 °C sept à dix ans plus tard ; calé sur un été d'enregistreur, 0,83 puis 0,90 °C. La dérive médiane est petite (+0,05 à +0,09 °C par dix ans) et le seuil fixé d'avance pour « recalage nécessaire » (+0,10 °C) n'est jamais atteint en dix ans sur le maximum.

La queue, elle, s'abîme : le P90 entre sites passe de 1,84 à 2,32 °C (six relevés) après sept à dix ans, environ un point sur cinq perd plus de 0,3 °C, et le décalage propre au point grandit (0,19 à 0,44 °C en valeur absolue, été d'enregistreur), sans lien avec les travaux connus. Ce n'est pas la sonde qui dérive (l'écart sonde – thermomètre ne bouge pas), c'est la rivière au point de mesure. Trois relevés de contrôle à 10 h dans l'été jugé ramènent un point « six relevés » vieux de six à dix ans au niveau de la première année (0,93 → 0,89 °C) ; d'où le conseil : rien les cinq premières années, puis trois relevés de contrôle un été tous les cinq ans environ (± 2 ans).

Limites. Sur un point calé par un été d'enregistreur, un à trois relevés de contrôle n'apportent rien dans ce calage joint (-0,00 °C) : le conseil « trois relevés tous les cinq ans » est démontré pour un point calé sur des relevés. Les relevés simulés sont la valeur exacte de la sonde. Le réseau commun a vu les autres sondes sur toutes les années 2006-2026 (pas le site jugé), comme en service, où il est réappris chaque année. Sur les jours au-dessus de 19 °C, la référence naïve est proche (10,9 jours contre 9,5) et la dérive y est nette (+1,3 à +1,5 jour par dix ans).

6 Rejeu du passé et scénarios de réchauffement

6.1 Rejeu des étés passés

Avec la météo observée, le modèle rejoue les étés passés à chaque station. La série déjà calculée couvre 2010-2025 et l'été en cours, avec la même précision que la reconstitution, quelle que soit l'époque (0,91 à 1,03 °C, § 3.9). Les étés antérieurs, jusqu'en 1990, sont rejouables là où le poste Météo-France de la station (ou un poste voisin) existait déjà, à partir de ses archives quotidiennes ; les prélèvements anciens des réseaux de qualité servent à en vérifier la précision. Un premier test sur l'été 2003 en Essonne (17 stations, modèles rejoués avec l'air réel, jugés sur 348 prélèvements de 2003-2004) donne 1,05 °C d'écart aux prélèvements (contre 0,90 °C sur les prélèvements 2010-2025 ayant servi au calage) : une perte d'environ 0,1 à 0,2 °C, jusqu'à 0,3 °C avec un biais chaud pendant la canicule d'août 2003. Usages : état initial d'un dossier, bilan d'un été, comparaison à un été moyen, mise en regard des inventaires piscicoles.

L'outil distingue les déclinis où la chaleur est une cause plausible : sur 113 déclinis de truite ou d'ombre jugés fiables en France, 51 touchent des stations chaudes (33 nettement : au moins 15 jours au-dessus de 19 °C par été en moyenne), 44 des stations restées fraîches (jours reconstitués par le modèle de fondation ; 48, 27 et 46 avec le modèle de production). Le tableau suivant en donne des exemples.

Tableau 20 — Exemples de déclinis de truite coïncidant avec un réchauffement

Station	Truites par pêche (avant → après)	Jours > 19 °C par été (2010-17 → 2018-25)
L'Elle à Lavilledieu (24)	23 → 0	16 → 39
Vègre à Épineu-le-Chevreuil (72)	51 → 1,3	20 → 39
Braye à Sougé (41)	23 → 1	26 → 46
Thouet à Secondigny (79), « possible »	67 → 0	9 → 18

Source : Hub'Eau Poissons, Hub'Eau, Météo-France ; traitement de l'auteur. Pêches : trois premières contre trois dernières opérations. Jours au-dessus de 19 °C : modèle de fondation.

Limite. Une coïncidence n'est pas une cause : les déclinis sont classés par le niveau de chaleur de la station, pas par une tendance démontrée. Pour la Vègre et la Braye, les pêches anciennes (1993-1995, 1989-1994) précèdent la période reconstituée (2010-2017) ; c'est la raison pour laquelle l'exemple du Chéran avait été retiré de la v2.0. L'Elle (pêches 2007-2011) est l'exemple le plus cohérent dans le temps.

USAGE POUR LE GESTIONNAIRE

Le rejeu fournit, station par station, la série des étés passés et de l'été en cours : état initial d'un dossier d'aide, comparaison d'un été à la série, mise en regard des inventaires piscicoles pour repérer les populations exposées à la chaleur.

6.2 Niveaux de réchauffement de la TRACC

La trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) retient pour la France trois niveaux : +2 °C (repère 2030), +2,7 °C (2050) et +4 °C (2100). L'outil rejoue les étés 2010-2025 avec l'air réchauffé de chaque niveau (médiane et fourchette 5-95 % de 17 simulations climatiques), poste par poste, puis recalcule la température de l'eau à chaque station.

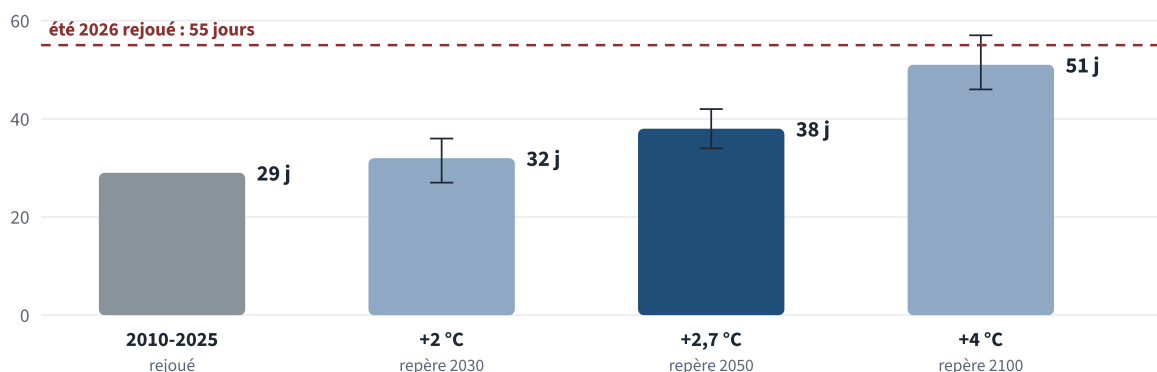


Figure 10 — Nombre de jours où l'eau dépasse 19 °C en été moyen selon le niveau de réchauffement (moyenne de 10 384 stations ; barres : centiles 5 à 95 des 17 simulations). Source : Météo-France (postes), Climadiag Commune, simulations Explore2 ; valeurs du modèle de production (v2.0) ; recalcul avec le modèle de fondation dans le texte ; traitement de l'auteur.

Avec le modèle de fondation, à +2,7 °C, l'eau dépasserait 19 °C environ **40 jours par été (36 à 44)**, contre 31 en 2010-2025 (moyenne des stations françaises), et environ une station aujourd'hui fraîche sur cinq (20 %) verrait la moyenne de ses 30 jours les plus chauds passer au-dessus de 19 °C. Le modèle de production donnait 38 (34 à 42) contre 29 : la hausse vient du niveau (le modèle de fondation est un peu plus chaud l'été, +1,3 jour en 2010-2025), l'effet du réchauffement est le même (+8,9 contre +9,2 jours). Le repère +2 °C n'a pas été recalculé. L'été 2026, rejoué, a déjà compté 54 jours au-dessus de 19 °C en moyenne (55 avec le modèle de production) : plus qu'un été moyen à +4 °C.

CAS D'APPLICATION : LA MARNE AMONT, DE LANGRES À SAINT-DIZIER

En été moyen 2010-2025, la Marne passe 19 °C de 32 à 50 jours par été selon la station (Langres, Vecqueville, Bayard ; modèle de fondation) ; en 2026, de 73 à 84 jours. Le bassin compte 51 stations exploitables et aucune sonde publique active. Pour un programme pluriannuel, l'outil distingue les tronçons déjà en stress, ceux qui le deviennent dès +2 °C, et ceux qui restent frais dans tous les scénarios.

CAS D'APPLICATION : LA HAUTE-ALSACE, SANS UNE SEULE SONDÉ

Sur le bassin de l'Ill en amont de Colmar, 55 stations de qualité ont leur nombre de jours au-dessus de 19 °C en été moyen, reconstitué à partir des seuls prélèvements et de la météo. 32 stations dépassent aujourd'hui 15 jours par été ; elles seraient 40 à +2,7 °C (modèle de fondation ; 27 et 37 avec le modèle de production). 10 stations ne dépassent jamais ou presque 19 °C (Thur, Doller amont), quand l'Ill de plaine le dépasse jusqu'à 110 jours.

Tableau 21 — Marne amont : jours au-dessus des seuils de la truite par station (été moyen 2010-2025)

Station	Jours où l'eau dépasse 19 °C	Jours avec un pic à 21,5 °C ou plus
Langres	32 à 38	—
Marnay	non joué (production : 40)	(17)
Vecqueville	35	13
Bayard	50	25

Source : Météo-France, Naïades ; reconstitution sans sonde ; traitement de l'auteur. Jours : modèle de fondation (recalcul du 25/10/2026).

7 Jours au-dessus des seuils, par espèce et par portion

7.1 Seuils

Chaque portion de rivière reçoit l'espèce et les seuils de son zonage piscicole ; vous les ajustez portion par portion, et tous les chiffres se recalculent aussitôt. Pour la truite, les seuils proposés par défaut sont 19 °C, une marge de prudence, et 21,5 °C, la limite que la directive 78/659/CEE fixait aux eaux salmonicoles en aval d'un rejet thermique (reprise au code de l'environnement), employée ici comme seuil de stress. Un dépassement de seuil ne signifie pas une mortalité.

7.2 Règle d'affichage

Plutôt que d'afficher un faux chiffre précis, l'outil choisit son affichage selon le nombre de jours attendus, connu d'avance ; cette règle a été vérifiée sur les 655 sites, et se comporte de la même façon à 19 et à 21,5 °C.

NOMBRE DE JOURS ATTENDUS AU-DESSUS DU SEUIL, CONNU SANS SONDE

moins de 2 jours	2 à 15 jours	15 à 60 jours	plus de 60 jours
« Dépassement improbable »	« Quelques jours, entre 0 et X »	« Environ N jours, entre A et B »	« Environ N jours (±25 %) »
aucun jour observé : 92 %	fourchette juste : 93-95 %	fourchette juste : 78-81 %	juste à ±25 % : 83 %

seuil de plus en plus souvent franchi →

Figure 11 — Affichage du nombre de jours au-dessus d'un seuil selon le nombre de jours attendus, et résultat de la vérification.
Source : Hub'Eau, Météo-France ; 655 sites, étés exclus de l'apprentissage ; traitement de l'auteur.

Tableau 22 — Fiabilité de l'affichage

Affichage	Résultat	Échantillon
« Dépassement improbable »	92 % des cas sans aucun jour observé (fondation : 92 %)	1 509 cas (site-été × seuil)
« Environ N jours (±25 %) »	83 % justes à ±25 % (fondation : 82 %)	658 cas (site-été × seuil)
« Scénario chaud » (borne haute)	86 % des étés très chauds couverts (fondation : 87 %) ; l'estimation centrale les sous-estime de 6,5 jours (4,0)	étés à ≥ 10 jours au-dessus de 21,5 °C

Source : études internes qualité/sonde et extrêmes, octobre 2026.

« Environ 20 jours au-dessus de 21,5 °C cet été, entre 5 et 45 dans 8 cas sur 10 » : la fourchette affichée est celle que la vérification a confirmée, sans biais sur le nombre moyen de jours. Au-dessus de 25 °C (cyprinidés), seul un verdict est donné : probable, possible ou improbable, car seule la moitié environ des jours à plus de 25 °C est détectée (44 % avec le modèle de production, 52 % avec le modèle de fondation, 28 % de fausses alertes) ; la probabilité qu'au moins un jour dépasse 25 °C dans l'été est décrite au § 7.4.

Sur la Haute-Alsace, la même règle s'applique à des situations opposées : la Thur et la Doller amont ne dépassent jamais 19 °C en été moyen, quand l'Ill entre Mulhouse et Colmar le dépasse 82 à 91 jours par été. Les seuils de la truite valent en tête de bassin, ceux des cyprinidés et du brochet sur l'Ill de plaine.

7.3 Les indicateurs des études thermiques

Les indicateurs que calculent les études thermiques des syndicats ont été jugés un par un dans la situation sans sonde du § 3.1 : 641 des 654 sites (1 256 station-années ; 316 en horaire), modèle de fondation ajusté sur les seuls prélèvements des années non jugées, réseau sans aucune sonde du bloc de bassins, sonde au même point comme juge, années jugées 2009-2025 (dont 2022 : 90 station-années, 2025 : 100). Référence naïve : la normale brute des relevés.

Tableau 23 — Indicateurs des études thermiques, sans sonde (641 stations de qualité, années jamais vues)

Indicateur	Erreur médiane ou exactitude	Référence naïve	Verdict
Risque de maladie rénale (PKD) : plus de 15 jours à 15 °C	exact 96 % (2022 : 94 % ; 2025 : 95 %)	92 %	fiable
PKD : plus de 30 jours à 15 °C	exact 94 % (2022 : 96 % ; 2025 : 93 %)	92 %	fiable
Jours de moyenne au-dessus de 15 °C	à ± 25 % : 82 %	74 %	fiable
Tmoy30j (30 jours les plus chauds)	0,56 °C (P90 1,74 ; biais -0,09)	0,98 °C	avec fourchette
Minimum journalier d'été (nuit)	0,68 °C ; gagne sur 92 % des stations	1,49 °C	avec fourchette
Jours de maximum au-dessus de 19 °C	7 jours sur 49 ; à ± 25 % : 59 %	15 jours ; 33 %	avec fourchette
Premier jour au-dessus de 19 °C (date)	4 jours (P90 34 jours)	la normale n'atteint 19 °C que 46 % des années	avec fourchette
Au moins un jour au-dessus de 25 °C	exact 89 % ; repéré 65 % ; 15 % de fausses alertes	77 % ; repéré 6 %	verdict seulement
Date d'émergence de la truite (ponte au 15/11)	5 jours (P90 15 ; 528 hivers)	7 jours	avec fourchette

Source : Hub'Eau (sondes juges, prélèvements), Météo-France ; modèle de fondation, validé en étude ; traitement de l'auteur.

Ce qu'il faut en lire. Les critères de maladie rénale sont classés justes 19 fois sur 20 (94 à 96 %), y compris en 2022, mais la normale des relevés fait déjà 92 % : l'avance tient sur les années limites. La Tmoy30j est donnée à 0,56 °C près (0,98 °C pour la normale) et le classement des stations entre elles est très sûr (corrélation de rang 0,94). Les jours au-dessus de 19 °C ne sont justes à ± 25 % que 6 fois sur 10 : ils sont donnés avec une fourchette (§ 7.4). Au-dessus de 25 °C, le modèle ne bat pas la référence sur les comptages et ne repère que 65 % des années qui franchissent le seuil : verdict seulement. La date du premier jour à 19 °C a une queue lourde (un printemps tiède qui frôle le seuil la décale d'un mois).

7.4 Fourchettes, année en avance ou en retard, 25 °C

Sur 637 de ces stations, l'erreur du modèle a été décrite comme un processus : un décalage lent (89 % de la variance du jour, mémoire d'environ cinq semaines), un biais permanent du point (environ 30 %) et un bruit rapide, sans décalage d'été constant. Tirer 500 étés corrélés de ce processus ne change presque pas l'estimation centrale, mais donne des fourchettes justes : la fourchette « 8 fois sur 10 » contient la mesure 79 à 87 % du temps selon l'indicateur (hors maximum de l'année ; en 2022, de 72 à 90 %), contre 20 à 46 % pour une somme de jours supposés indépendants.

Année en avance ou en retard. À 19 °C, l'outil ne répond que si la probabilité est nette (seuil choisi sans fuite sur les autres blocs) : il répond sur 64 % des années franches (date à plus de 5 jours de l'habitude) et a alors raison 89 fois sur 100 (11 % de sens opposé ; 2022 : 93 % ; 2025 : 75 %). Répondre toujours ne donnait que 61 % de bon sens. À 15 °C, il répond trop rarement (20 % des années) pour être utile. **Au moins un jour au-dessus de 25 °C.** Quand la probabilité dépasse une chance sur deux, l'année a franchi 25 °C 8 fois sur 10 en moyenne (6 fois sur 10 entre 50 et 70 %) ; l'outil repère 3 années sur 4 qui le franchissent, avec 21 % de fausses alertes.

Limites. Calibrées ne veut pas dire étroites : 47 jours pour la date à 19 °C, 39 jours pour les jours au-dessus de 19 °C, 2,6 °C pour la Tmoy30j. Le maximum de l'année reste mal couvert (60 % en 2022) et la méthode n'y fait pas mieux qu'une fourchette empirique. Annoncer un sens se paie : un sens est annoncé dans 47 % des années « comme d'habitude » au seuil retenu (12 % au seuil 0,7, qui ne répond plus qu'une année franche sur trois). La variante retenue (marges empiriques) a été ajoutée après avoir vu la forme prévue d'avance, qui donne la même précocité. Un bloc de bassins (sur cinq) est mal reproduit : ses fourchettes sont trop étroites.

8 Prédiction à 48 heures et à 7 jours

8.1 Température

Avec le modèle de fondation (validé en étude, à construire). La prédiction donne, à toute heure, 0,88 °C le lendemain avec des relevés seuls, 0,68 °C avec une sonde et 0,47 °C avec une sonde qui transmet ; au 7^e jour, 0,96, 0,86 et 0,77 °C (tableau A, § 2.10). Les chiffres du modèle en production, ci-dessous, portent sur d'autres sondes et d'autres indicateurs.

En production. Pour près de 11 000 stations en France (§ 2.1), la météo prévue est traduite en **température de l'eau heure par heure jusqu'à 48 h**. Rejouée avec la météo observée sur 380 sondes (étés 2015-2025), la courbe horaire a 0,9 °C d'erreur médiane par station, et 93 % des heures sont bien classées autour de 19 °C (81 % en répondant toujours « sous 19 °C »). Sur 72 sondes publiques, avec la météo prévue par le Centre européen (ECMWF, modèle AIFS) pour des prévisions émises de mars 2025 à septembre 2026, jamais vues à l'apprentissage, l'erreur sur la moyenne journalière est de 0,80 °C à un jour, contre 1,22 °C pour la normale ; mais là où une mesure du jour existe, « comme aujourd'hui » fait 0,72 °C : l'outil l'affiche alors comme référence. Avec la météo observée (une météo parfaite), la même chaîne fait 0,80 °C à un jour et 0,81 °C à deux : jusqu'à 48 h, la météo prévue n'ajoute presque rien (0,80 et 0,82 °C). À 7 jours, l'erreur moyenne est de 0,94 °C, contre 1,22 °C pour la normale et 1,32 °C pour « comme aujourd'hui ». Avec une sonde qui transmet, la prédiction du lendemain descend à 0,51 °C, contre 0,72 °C pour « comme aujourd'hui ».



Figure 12 — Erreur moyenne de la prédiction à 7 jours selon l'évolution réelle de l'eau dans la semaine, comparée à deux références. Source : Hub'Eau (72 sondes, prévisions émises de mars 2025 à septembre 2026), prévisions ECMWF (modèle AIFS) ; barres « la prévision » : modèle de production (fondation : 1,0 °C quand l'eau change) ; traitement de l'auteur.

Quand l'eau change de plus de 2 °C en une semaine, la prédiction à 7 jours se trompe de 1,1 °C avec le modèle de production et de 1,0 °C avec le modèle de fondation, contre 3,1 °C pour « comme aujourd'hui » et 1,9 °C pour la normale : c'est là, quand une vague de chaleur arrive, que la prédiction apporte le plus. Ce sont des erreurs moyennes sur tous les cas (2 245 cas sur 72 sondes, moyenne journalière), pas des médianes entre stations. Avec le modèle de fondation, la moyenne journalière fait 0,76 °C à un jour (0,73 avec l'entrée minimum-maximum) et 0,92 °C à 7 jours, contre 0,80 et 0,93 pour la production ; à un jour, « comme aujourd'hui » reste meilleur là où une mesure existe (0,72 °C). Exemple : le 15 juin 2026, la prédiction donnait 77 à 86 % de chances que le ruisseau de Mésangueville (Seine-Maritime) dépasse 19 °C du 20 au 22 juin, contre 11 % d'habitude ; il a passé 19 °C le 18 et atteint 23 °C le 22. Avec une sonde, voir le tableau A (§ 2.10) ; quand la météo observée manque, la marge est élargie comme au § 2.6.

8.2 Oxygène dissous

Presque aucune rivière n'a de sonde d'oxygène : la seule information est le prélèvement de la station de qualité, fait en journée, une fois par mois, alors que l'oxygène est au plus bas en fin de nuit. Chaque station a son modèle d'oxygène, appris sur ses prélèvements et sur la température de l'eau prédite pour la station (11 458 modèles au registre depuis l'exclusion des plans d'eau ; un modèle d'oxygène n'est servi que si la station a aussi un modèle de température) : il donne la courbe heure par heure, dont le minimum de la nuit, moment critique pour le poisson. 7 938 stations de qualité ont au moins 24 mesures d'oxygène ; 21 en médiane sur le territoire d'un syndicat.

Le modèle a été jugé sur 21 sondes continues françaises (Seine, Forez, Sélune), sur 4 042 jours d'été d'années qu'il n'avait pas vues, face à ce dont dispose un gestionnaire sans sonde : **le relevé du mois**, c'est-à-dire le dernier prélèvement antérieur au jour (62 jours au plus), lu tel quel. Sur le minimum de la nuit, l'erreur est de **0,86 mg/L contre 1,47 mg/L**, environ 40 % de moins ; sur les heures de 0 à 6 h, 0,83 contre 1,35 (normale de saison de la station : 1,20 et 1,05). Sur la journée entière, heure par heure, il ne fait pas mieux que la normale de saison de la station (1,00 contre 0,96 ; relevé du mois 1,23).

L'après-midi, le relevé, fait en journée, reste plus proche : 1,12 contre 1,27 mg/L, et 1,06 contre 1,18 sur le maximum de l'après-midi ; et la normale de saison de la station fait mieux que les deux (0,89 et 0,87 mg/L) : l'après-midi n'est pas un point fort de l'outil.

Les chiffres de l'oxygène sont ceux du modèle de production. Nourri de la température du modèle de fondation, le même modèle d'oxygène fait 0,89 mg/L sur le minimum de la nuit (contre 0,86), 0,85 sur 0 à 6 h, et bat le relevé du mois sur 19 sites sur 21 (contre 20) : une légère dégradation, alors que la température à 11 h est meilleure (0,94 contre 1,03 °C). La présentation aux syndicats garde le chiffre de production, 0,86 mg/L.

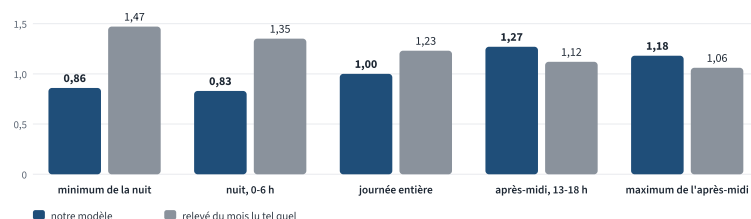


Figure 13 — Oxygène : erreur selon le moment de la journée. Source : sondes continues publiques (Seine, Forez, Sélune), Naïades, Météo-France ; 21 sites, 4 042 jours d'été, années exclues de l'apprentissage ; traitement de l'auteur.

Tableau 24 — Autres résultats de la validation de l'oxygène

Indicateur	Résultat	Référence
Minimum de la nuit, par site	0,80 mg/L en médiane ; meilleur que le relevé sur 20 sites sur 21	relevé du mois
Petits cours d'eau du Forez (15 sites)	1,10 mg/L sur le minimum de la nuit	relevé du mois : 2,03 mg/L
156 sondes américaines (USGS), relevé mensuel simulé dans la sonde	0,78 mg/L sur le minimum de la nuit	relevé du mois : 1,24 mg/L
Marge affichée par station	0,57 à 1,25 mg/L d'erreur réelle, du cinquième des stations le mieux noté au moins bien noté (USGS)	—
Prévision à 7 jours	0,09 mg/L d'écart seulement avec une météo parfaite, sur le minimum de la nuit ; l'erreur ne bouge presque pas (0,956 → 0,964)	même calcul avec la météo observée
Nuits sous 5 mg/L (France)	aucune détectée sur 200 observées : aucune alerte n'est donnée sous ce seuil	relevé du mois : aucune non plus

Source : sondes continues publiques françaises et USGS, Nâïades, Météo-France ; étude interne oxygène, octobre 2026.

La nuit, l'essentiel du gain vient de la forme du cycle jour/nuit : un prélèvement de fin de matinée surestime l'oxygène de la nuit d'environ 1 mg/L, et le modèle retire l'essentiel de cet écart. Une part de l'erreur restante ne vient pas du modèle : un prélèvement et une sonde au même point et à la même heure s'écartent déjà de 0,6 à 0,7 mg/L. Sur les sites les plus dégradés, le relevé lui-même ne représente pas le point le plus critique (Toranche aval, Forez : relevé 7,9 mg/L à 11 h, sonde 5,6) ; aucun modèle appris sur ces relevés ne peut corriger cet écart.

Marge affichée en France. La marge de chaque station vient de l'erreur de son modèle sur ses prélèvements : elle ne voit pas l'écart entre un prélèvement et l'eau au même point et à la même heure. Cet écart indépendant, 0,80 mg/L (la valeur qui cale les marges sur les 21 sondes françaises), lui est ajouté en quadrature (racine de la somme des carrés) : la part des nuits sous la borne basse à 10 % passe de 20,5 à 11,5 %, et l'erreur réelle heure par heure de 1,74 à 1,08 fois la marge affichée.

Usage. Vos prélèvements d'oxygène sont remis à l'heure de la nuit, et chaque station affiche sa propre marge. Les nuits où l'oxygène risque de passer sous 6 mg/L sont dépistées par la borne basse de la fourchette : 68 % des nuits concernées sont repérées (582 nuits, 21 sites), avec 7 fausses alertes sur 10 ; c'est un dépistage à confirmer par une mesure de terrain, pas une alerte.

POURQUOI LE RELEVÉ DU MOIS COMME RÉFÉRENCE

Sans sonde, le gestionnaire ne dispose que du dernier prélèvement publié : c'est donc lui qui sert de référence, lu tel quel et constant sur toutes les heures, jamais un prélèvement postérieur au jour jugé. Une référence qui interpole entre les prélèvements de l'année utiliserait une information que le gestionnaire n'a pas au moment voulu ; avec elle, le gain de la nuit reste du même sens (0,87 contre 1,24 mg/L sur les mêmes nuits, 23 sondes, version du modèle du 16/10).

8.3 Débit, à titre complémentaire

Pour 78 % des stations hydrométriques en temps réel de métropole (1 653 sur 2 113), Vigicrues ne publie aucune prévision : notre débit prévu y est souvent la seule information disponible. Là où Vigicrues existe, son état du tronçon est toujours affiché en premier, tel quel. Notre débit prévu est une information complémentaire, non officielle : à 24 h (10 stations testées avec la pluie prévue, 2025), il est à moins de 20 % du débit réel dans 81 % des cas, contre 74 % en supposant que la rivière ne bouge pas. À 48 h : 73 % des cas, contre 60 % ; en hautes eaux, l'erreur typique est de 30 %, contre 91 %.

Quand la pluie est connue (pluie observée, années 2022-2025 jamais vues à l'apprentissage), sur 70 rivières de toute la France sans prévision Vigicrues ni barrage (bassin médian d'environ 180 km²), le modèle situe le pic d'une montée à 6 h près dans **7 cas sur 10** (72 %), contre moins de 1 sur 10 pour la persistance, et donne sa hauteur à ± 30 % dans **6 cas sur 10** (62 %), contre aucun pour la persistance. Sur ces rivières, l'efficacité de Nash à 24 h est de 0,92 en médiane, contre 0,63 pour la persistance. Sur les 107 stations du banc national, les 9 rivières les plus manœuvrées (barrages, retenues) ont une erreur en montée environ double de celle des 83 rivières sans signe de pilotage, et un badge les signale.

En conditions réelles (10 stations, 2025), la pluie annoncée explique un quart à un tiers de l'erreur à 24-48 h (le reste existe déjà avec une pluie parfaite), et les orages mal prévus restent hors de portée ; les chiffres de pic ci-dessus, mesurés avec la pluie observée, n'ont pas été refaits avec la pluie prévue sur ces 70 rivières.

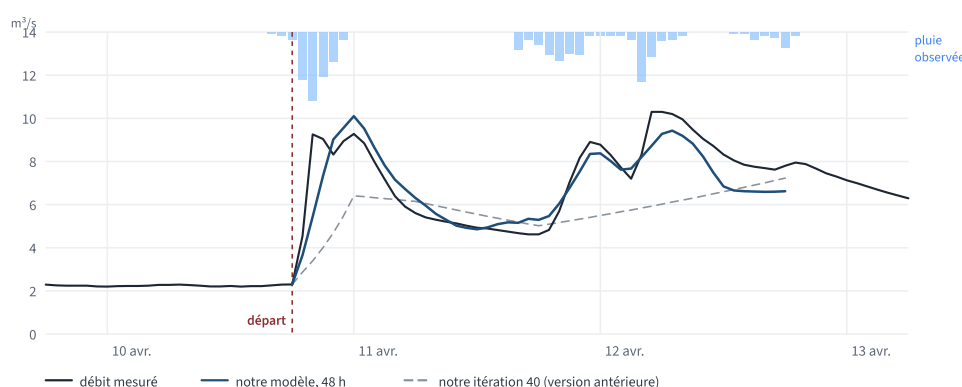


Figure 14 — L'Orge à Morsang, 10-12 avril 2023 : débit prévu, pluie observée. Source : Hydroportail, COMEPHORE (Météo-France) ; 2023 année de test ; épisode de qualité médiane (57^e centile de 8 410 montées) sur une des meilleures stations de l'Essonne ; traitement de l'auteur.

Prévision lancée le 10 avril 2023 à 18 h, au tout début de la montée (le débit passe de 2,3 à 9,3 m³/s en deux heures), pour les 48 heures suivantes. Pics observés : 9,3 (20 h puis minuit), 8,9 et 10,3 m³/s ; le modèle actuel donne 10,1 à minuit, puis 8,4 et 9,4 à une ou deux heures près, mais monte plus lentement que la première pointe. La courbe de l'itération 40 (version antérieure de notre modèle), montrée pour comparaison, n'en reproduit aucun. Épisode de qualité médiane : 57^e centile de l'efficacité de Nash sur 48 h parmi 8 410 montées (37^e parmi les 1 018 montées de la station). Entre nos premiers modèles (août 2026) et le modèle actuel (itérations 68 et 69), le journal de recherche compte 69 itérations numérotées, dont une dizaine consacrées à d'autres sujets (qualité de l'eau, assècs), et de nombreuses sous-itérations ; les variantes de modèle y sont comparées sur des années de test non vues à l'apprentissage.

8.4 Exemple de la plaquette : la Livenne, août 2024

La Livenne à Saint-Aubin-de-Blaye (Gironde), sonde 05025600, août 2024, année jamais vue. Le point est calé sur sa sonde jusqu'en 2023 (situation « une sonde » du tableau A) ; chaque jour, la prévision du lendemain est émise à 6 h avec l'air AROME, sans recalage ni mesure du jour, et les prévisions sont mises bout à bout. Erreur à toute heure sur le mois : **0,55 °C**, contre **0,79 °C** pour « comme aujourd'hui » (même heure du dernier jour mesuré avant l'émission) et **1,11 °C** pour la normale de la sonde.

Critère de choix (air prévu). Écrit avant toute courbe : unité = sonde × mois civil d'été 2024-2026 ; mois complet (prévision chaque jour, sonde à au moins 95 % des heures) ; centile de qualité entre 50 et 85 dans la population des mois complets de la même situation, le plus proche de 67,5 ; variation d'au moins 3 °C ou épisode chaud ; septembre d'abord, puis août ; trois cas par situation, sondes et cours d'eau tous différents. La Livenne est le troisième cas de la situation « une sonde ».

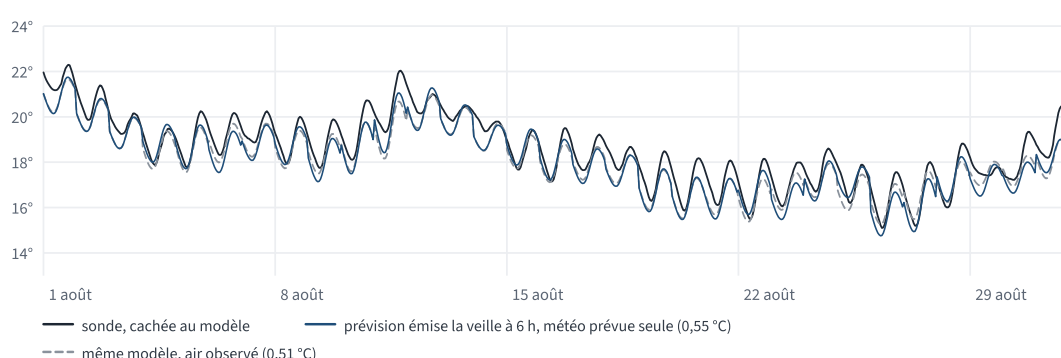


Figure 15 — La Livenne à Saint-Aubin-de-Blaye (Gironde), août 2024 : prévision du lendemain émise chaque jour, et même modèle avec l'air observé. Source : Hub'Eau (sonde 05025600, cachée au modèle), Météo-France (AROME, postes) ; modèle de fondation calé sur la sonde jusqu'en 2023 (validé en étude) ; cas au 68^e centile ; traitement de l'auteur.

Variante sur air observé (choix en cours). Nourri de l'air observé au lieu de l'air prévu, le même modèle fait 0,51 °C sur ce mois (68^e centile des mois complets de la même situation, normale de la sonde 1,11 °C). Avec les règles écrites pour l'air observé (mêmes critères, août et septembre ensemble), les trois cas retenus pour « un point calé sur sa sonde » sont l'Aron à Grand-Fougeray (août 2025), le Sédon à Guégon (août 2025) et l'Yvel à Loyalat (août 2026), tous à 0,51 °C ; la Livenne n'y figure que comme ancien candidat, pour comparaison. Le choix entre la courbe sur air prévu et la courbe sur air observé pour la plaquette n'est pas arrêté.

Limites. Un mois d'une seule sonde, cas un peu meilleur que la médiane (68^e centile ; l'erreur médiane de la situation est 0,68 °C, tableau A). « Comme aujourd'hui » suppose une mesure du jour, que n'a pas une sonde relevée de temps en temps : pour elle, la référence réaliste est la normale de la sonde (1,11 °C).

9 Refuges thermiques

Quand la rivière chauffe, les salmonidés cherchent un affluent alimenté par la nappe ou une source. L'outil repère les affluents et les tronçons de nappe plus frais que la rivière les jours chauds : 5 608 refuges en France avec le modèle de fondation (5 219 avec le modèle de production), dont 3 269 candidats sans station à confirmer (2 830) ; ce dernier nombre dépend de la règle (§ 9.2). Chaque refuge porte un niveau de preuve (tableau ci-dessous).

Tableau 25 — Refuges thermiques par niveau de preuve et validation

Niveau de preuve	Nombre (France)	Validation
Mesuré ou semi-mesuré (au moins une sonde)	486	écart observé
Modèle des deux côtés	1 495	16 / 16 confirmés avec une sonde de chaque côté ; 68 / 72 au moins 1 °C plus frais avec une sonde sur l'affluent
Candidat sans station (petit affluent permanent)	3 269	règle à 2 °C : 46 / 50 confirmés à au moins 1 °C, jugée hors bloc (§ 9.2)
Tronçon froid de nappe sur le cours d'eau lui-même	351	anomalie froide repérée avec une précision de 74 % ($r = 0,80$ sur 664 sondes ; 82 % et 0,88 avec le modèle de production)

Source : Hub'Eau, BD TOPO, TOPAGE ; modèle de fondation (recalcul du 25/10/2026) ; traitement de l'auteur. +3,0 °C : écart médian des refuges retenus les jours chauds.

9.1 Cas d'application

Aveyron amont. Le Lenne et la Maresque sont environ 5 °C plus frais que l'Aveyron à Druelle les jours chauds (+4,6 et +5,1 °C avec le modèle de fondation, +5,4 et +5,1 avec la production ; sonde de Druelle côté rivière) et accessibles : environ 60 jours de stress par été où ils restent sous 19 °C (jours non recalculés). Le Riou Nègre (+4,6 °C) est un écart de modèle des deux côtés : une sonde d'un été suffirait à le confirmer.

Haute-Alsace. Sur le bassin de l'Ill en amont de Colmar, sans une seule sonde publique, le modèle désigne 11 affluents au moins 1 °C plus frais que la rivière les jours chauds (plus un ruisseau frais sur le canal du Rhône au Rhin), dont le Dollerbaechlein (+4,8 °C), le Feldbach (+3,6 °C) et le Spechbach (+3,3 °C), et 5 candidats sans station à confirmer. Le § 10 montre ce que ces refuges deviennent quand un ouvrage s'interpose.

Marne amont. Les affluents de plateau calcaire de la Marne amont sont nettement plus frais qu'elle : Chevillon +6,0 °C, Osne +4,4, le Mont +4,1, le Rongeant +3,6 et le Ru +3,3 ; environ 30 jours de stress évitables par refuge à Vecqueville (jours non recalculés).

NOTE DE MÉTHODE

Les « jours de stress » d'un refuge comptent les jours où la rivière dépasse 19 °C alors que le refuge reste en dessous. C'est un gain potentiel si le poisson rejoint le refuge, pas une mesure de survie.

9.2 Zones refuges sans station : la règle, jugée hors bloc

Un affluent sans aucune station est désigné comme zone refuge candidate quand l'écart annoncé avec la rivière principale, les jours chauds, atteint 2 °C ; l'écart vient d'une régression de la température des 30 jours les plus chauds (air, surface du bassin, altitude) apprise sur les modèles des stations. La règle est jugée sur 113 affluents équipés d'une sonde : vérité = modèle de la rivière principale moins sonde de l'affluent, les jours où la principale dépasse 19 °C ; refuge réel si l'écart mesuré atteint 1 °C (78 refuges réels). Jugée hors bloc (la régression réapprise sans le bloc de bassins de la jonction), elle désigne 50 affluents, dont **46 sont confirmés (92 %)**, et **tous ceux annoncés à plus de 3 °C (34 sur 34)** ; elle en manque 32 (rappel 59 %).

Trois classes. Chaque zone refuge est classée selon l'écart annoncé et son niveau de preuve : « quasi sûre » à partir de 3 °C quel que soit le niveau (confirmée à 100 %), ou de 2 °C si le modèle est des deux côtés ou si l'affluent est sondé ; « probable » entre 1,5 et 3 °C (entre 1 et 2 °C pour le modèle des deux côtés ; candidats sans station entre 2 et 3 °C, 75 à 80 % confirmés) ; « possible » en dessous (40 à 60 %). Avec six relevés d'été sur l'affluent au lieu de tous les prélèvements, la classe au-dessus de 3 °C reste confirmée à 100 % (18 cas), mais 1,5 à 3 °C tombe à 50-71 % : « quasi sûr » exige alors 3 °C.

Limite : la tête de bassin. Les 113 affluents sondés sont surtout moyens à grands (186 km² en médiane, 18 seulement de rang de Strahler 3 ou moins), alors que les candidats de France sont petits (6 km² en médiane, 76 % de rang 3 ou moins). Sur les 18 petits affluents, la règle confirme 8 des 9 désignés mais manque 6 des 14 refuges réels et sous-estime l'écart de 1,08 °C en moyenne : elle est prudente, elle rate des petits affluents frais. Le rang de Strahler, la longueur, la pente ou une régression apprise directement sur les sondes ne font pas mieux de façon sûre ; ils reviennent à abaisser le seuil d'environ 0,25 °C. Trois confluences nouvelles tirées de sondes ouvertes hors Hub'Eau ne changent rien (46 sur 50 ; deux refuges réels de plus, tous deux manqués : l'Oir, mesuré +2,0 °C pour +0,9 annoncé, et le Trautbach). La règle à 2 °C est gardée.

Le biais chaud de +1,45 °C cité un temps sur les petits cours d'eau venait surtout de sondes de nappe ou de source (règle R7 du § 3.10) : après contrôle des sondes, il est de +0,86 °C entre 10 et 100 km² et d'environ -0,2 °C sous 10 km². Il n'est plus cité. Le nombre national de candidats n'est pas robuste : de 3 275 avec la règle actuelle à 3 514, 4 052 ou plus de 6 000 avec des variantes aussi bonnes en validation ; il n'est pas annoncé sans cette réserve. Ce qui manque est une mesure : une campagne de 20 à 30 sondes d'été sur de petits affluents de tête de bassin (une dizaine de candidats actuels, une dizaine de nouveaux candidats, une dizaine de témoins non désignés). En attendant, en tête de bassin, l'écart annoncé est une piste que quelques mesures d'été sur l'affluent doivent confirmer.

10 Continuité écologique et accès aux refuges

Pour chaque ouvrage du référentiel des obstacles (ROE), l'outil calcule combien de kilomètres de rivière en stress thermique regagneraient un refuge à moins de 5 km si l'accès était rouvert, et combien de jours de stress cela permettrait d'éviter ; il tient compte des bras, des refuges déjà accessibles et des ouvrages en série, et signale le « dernier verrou ». Le classement tient compte de l'ensemble : il ne ressemble guère à un tri ouvrage par ouvrage (corrélation 0,30, mesurée avec le modèle de production et non recalculée), et un gros seuil n'est pas forcément prioritaire. Rejoué avec le modèle de fondation sur l'Essonne et les Yvelines, le classement change peu (corrélation de rang 0,85 avec l'ancien ; 7 des 10 premiers ouvrages communs).

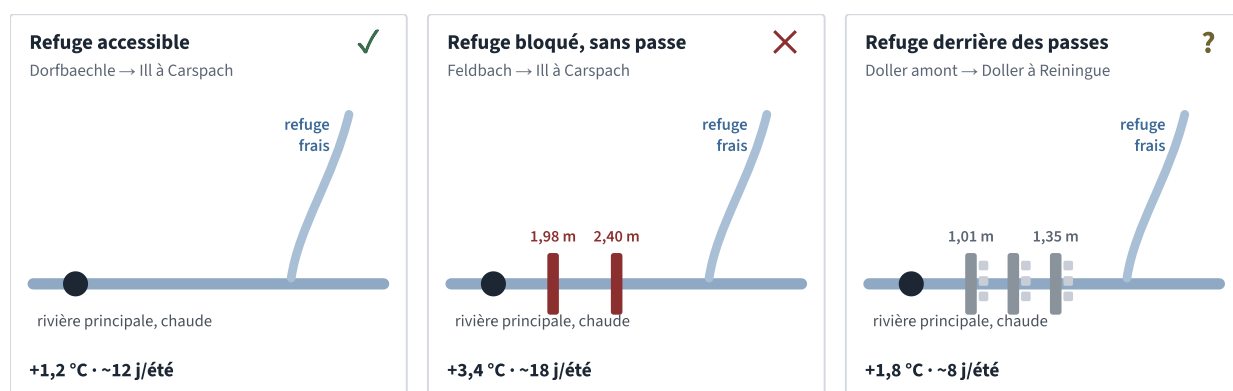


Figure 16 — Trois situations d'accès à un refuge sur des rivières à truite de Haute-Alsace (écart du refuge les jours chauds ; jours de stress par été où il reste sous 19 °C). Source : ROE (OFB), LiDAR HD (IGN), Hub'Eau, Météo-France ; traitement de l'auteur. Écarts estimés par le modèle, sans sonde. Ill à Carspach (Sundgau) : le Feldbach (+3,4 °C sur le schéma, modèle de production ; +3,6 °C avec le modèle de fondation, § 9.1) est séparé de la station par deux seuils sans passe de 1,98 et 2,40 m. Doller à Reiningue : le refuge de la Doller amont est derrière trois seuils équipés de passes ; la bonne question est leur efficacité en étiage chaud.

Tableau 26 — Scénarios de restauration de la continuité simulés

Mode	Hypothèse de calcul	Résultat produit
Suppression d'ouvrage	ouvrage franchissable toute l'année	gain d'accès aux refuges
Abaissement partiel	hauteur choisie ; franchissabilité recalculée par groupe d'espèces (classes ICE)	gain d'accès aux refuges
Ouverture estivale des vannes	franchissable de juin à septembre	Gain d'accès calculé ; effet sur la température non démontré, donc non affiché.

Les ouvrages peuvent être marqués « non négociables » (patrimoine, refus du propriétaire, usage) ou « protégeant une population » (écrevisses autochtones, frein aux espèces invasives) ; ils sortent alors du classement. Une simulation n'est jamais enregistrée par défaut, n'est visible que des membres de votre structure, et rien n'est publié sans votre accord.

11 Hauteur de chute des ouvrages

Le classement des ouvrages suppose une hauteur de chute pour chacun ; le ROE en est souvent dépourvu. La chute est mesurée sur le relief LiDAR HD de l'IGN, le long du lit, de part et d'autre de chaque ouvrage, avec des filtres contre les faux positifs (remblais, ponts, eau non visible) et un indice de confiance.

Le ROE donne la chute à l'étiage, mesurée sur place ; le LiDAR donne la chute un jour d'hiver, souvent à un autre débit, vannes ouvertes ou fermées. Les deux ne se comparent qu'avec prudence.

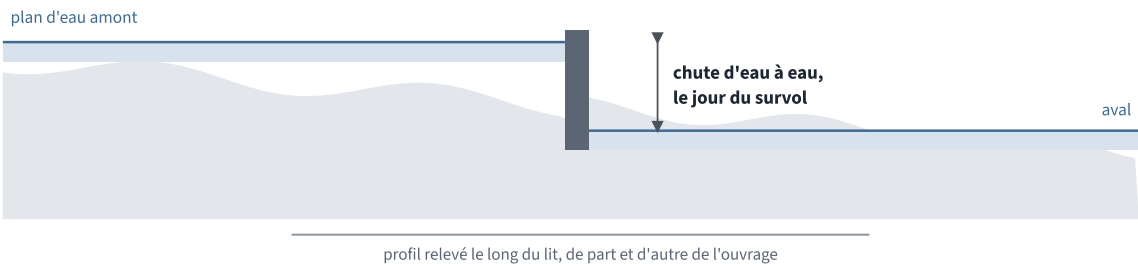


Figure 17 — Principe de la mesure de chute sur le LiDAR HD (schéma). Source : schéma de l'auteur.

Règle de choix. Quand le ROE et le LiDAR sont du même ordre, la valeur du ROE est retenue ; le LiDAR ne la remplace que si le ROE manque, ou s'il est nettement plus faible (« à vérifier »). La valeur LiDAR reste toujours affichée, et votre relevé de terrain prime sur les deux.

Tableau 27 — Performance de la mesure LiDAR

Indicateur	Résultat	Référence
Hauteurs fiables ajoutées aux ouvrages existants sans hauteur au ROE	12 260 sur 57 846	—
Part de vraies chutes ; hauteur juste (± 20 cm ou ± 30 %)	92 % ; 55 à 63 %	jeu de test mis de côté
Accord entre deux relevés de terrain indépendants	62 %	ROE et étude de terrain

Source : ROE (OFB), LiDAR HD (IGN) ; traitement de l'auteur.

Tableau 28 — Exemples

Ouvrage	Constat
Moulin des Muses, Orge (91)	ROE 1,9 m, chute mesurée 1,95 m (janvier 2024).
Seuil Lozère, Yvette (91)	pas de hauteur au ROE, chute mesurée 2,19 m (avril 2023).
Moulin d'Aulnay (91)	ROE 0,8 m à l'étiage, LiDAR 1,27 m en avril 2023, avec clapet et vannes : le ROE est gardé, marqué « à vérifier ».
Moulin de Fans, Aveyron (12)	classe ROE de 5 à 10 m, LiDAR $2,34 \pm 0,23$ m : à vérifier sur place, le LiDAR ne voit peut-être que le seuil.

137 ouvrages sans chute visible au LiDAR sont signalés « à vérifier » pour la mise à jour du ROE ; d'après une lecture d'orthophotos à l'aveugle, une partie seulement a réellement disparu (environ 30 %, estimation très incertaine). Les vérifications de terrain du gestionnaire peuvent, avec son accord, être transmises à l'OFB.

12 Frayères et calendrier de chantier

12.1 Cadre réglementaire

La règle nationale n'est pas une date : l'arrêté du 30 septembre 2014 (rubrique 3.1.5.0, art. 5) interdit les interventions dans le lit mineur pouvant toucher des frayères pendant la reproduction, définie pour les poissons « de la ponte au stade alevin nageant ». Les préfectures la traduisent en périodes par défaut très différentes : pour la truite, la fin va du 15 février (Ariège) au 30 avril (Isère, « sauf argumentaire »).

12.2 Période estimée

Pour chaque portion et chaque espèce, la période de la ponte à l'alevin nageant, qui dépend de la température de l'hiver, est calculée pour la saison, avec une fourchette au plus tôt et au plus tard, à partir de la température reconstituée jusqu'à la veille puis prévue, et placée face à la période par défaut du département. C'est une estimation indicative, sans valeur réglementaire : elle ne remplace ni l'avis de l'OFB ni l'inventaire des frayères, et l'outil ne recommande jamais de date de démarrage.

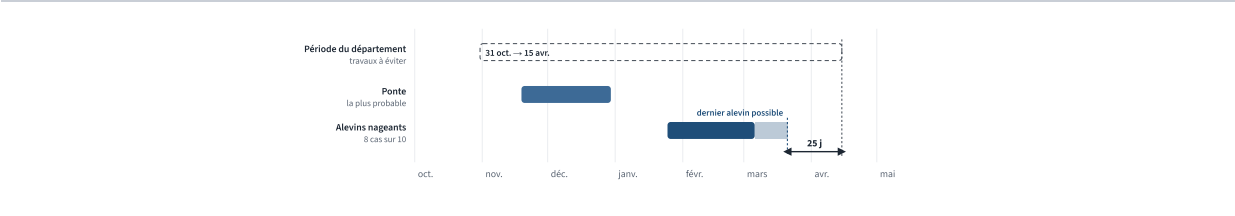


Figure 18 — La Cuisance à Mesnay (Jura), 2024-2025 : période estimée et période du département. Source : Hub'Eau, Météo-France ; période du Jura : récépissés de la DDT 39. Ponte probable du 19 novembre au 30 décembre ; alevins nageants du 25 janvier au 6 mars (8 cas sur 10), le dernier possible le 21 mars, 25 jours avant la fin de la période du département.

L'estimation peut finir avant comme après la période du département : sur 5 779 stations-saisons de six départements (dont l'Ain, d'après un arrêté de chantier), toutes rivières confondues (2015-2024), elle finit avant dans 52 % des cas et après dans 46 %, avec de forts écarts selon le département (Isère 94 % avant, Ariège 0 %). Sur la Cuisance à Mesnay, elle finit avant le 15 avril sur les 10 saisons rejouées (environ 30 jours plus tôt en médiane). Un écart dans un sens ou dans l'autre est un élément à soumettre à l'OFB et à la DDT, à confirmer par observation ou par sonde.

Tableau 29 — Bases du calcul par espèce

Espèce	Calcul	Fondement et validation
Truite fario	ponte, éclosion, émergence, par cumul de température journalière	Lois de développement publiées ; la courbe de ponte est calée sur des comptages de frayères publiés (24 à 29 séries) et aucune variante testée ne fait mieux ; aucun comptage français daté pour la valider.
Ombre, sandre, black-bass	ponte au-delà d'un seuil thermique, incubation, nids gardés	lois et suivis publiés ; fenêtres larges ; black-bass en confiance « approximative »
Chabot	Période typique : février à avril en plaine ou en eau de nappe, fin avril à mai en eau froide ; garde du nid par le mâle sur toute l'incubation (20 à 30 jours).	La date de ponte du chabot ne peut pas être calculée : les températures de ponte publiées sont très dispersées, et il n'existe qu'une seule observation française datée.

Source : littérature citée en annexe B ; études internes phénologie réglementaire et chabot, octobre 2026.

Pour la truite, l'arrivée de l'eau froide à l'automne (passage durable sous 10 °C), qui ouvre la ponte, est datée à moins d'une semaine près dans 8 cas sur 10, sans aucune sonde (modèle de fondation, 607 stations, 3 792 années). Des comptages de frayères datés sur le bassin permettraient de caler le calendrier localement.

13 Assecs et nappes

Les agents de l'OFB relèvent l'écoulement des stations ONDE environ une fois par mois l'été. Entre deux relevés, le modèle tient compte de la pluie tombée depuis ; quatre usages se dégagent nettement.

Tableau 30 — Usages retenus pour les assecs

Usage	Résultat	Référence
Retours en eau d'automne	Pour une station vue à sec, la probabilité qu'elle soit revenue en eau : le modèle distingue les stations revenues des autres 9 fois sur 10 (AUC 0,90), contre presque au hasard (0,58) en supposant que rien n'a changé.	dernier relevé
Stations sentinelles	« Quand A est à sec, B suit environ N jours plus tard » : 226 stations sentinelles en France ; en 2026, quand la sentinelle a basculé, sa voisine a aussi basculé dans la saison 92 fois sur 100, après elle ou le même jour 87 fois sur 100.	ordre « A avant B » : 60 %, contre 32 % pour des voisines ordinaires
Préalerte départementale	La part des stations du département sans écoulement visible ou à sec, aujourd'hui, à 14 et à 28 jours : le seuil de 20 % est signalé 7 jours avant le constat en médiane, avec peu de fausses alertes (14 années sur 99 sans besoin), et une préalerte 21 à 31 jours avant, avec moitié moins de fausses alertes que la fréquence historique.	constat en campagne
Risque d'assec à 2-6 semaines	Sur les stations ONDE : à 4 semaines, 23 % d'erreur en moins que la fréquence historique de la station ; en 2026, 93 % des stations annoncées à sec un mois avant l'étaient.	fréquence historique

Source : ONDE (OFB), Météo-France ; campagnes 2012-2026 ; traitement de l'auteur.

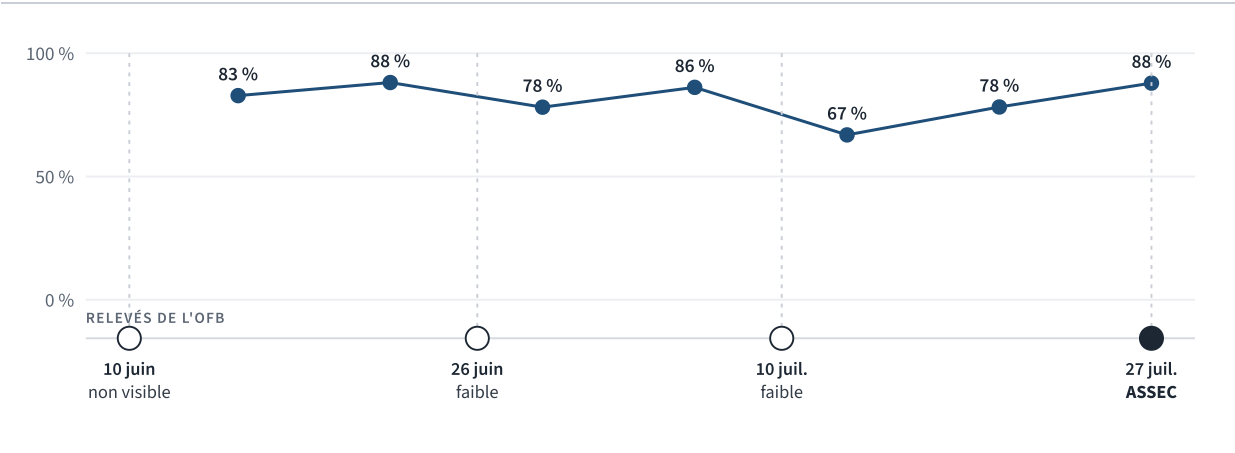


Figure 19 — Gros Caillou à Saint-Éman (Eure-et-Loir) : risque d'assec estimé pour la campagne du 27 juillet 2026, recalculé chaque semaine, et relevés de l'OFB. Source : ONDE (OFB), Météo-France ; traitement de l'auteur. Modèle entraîné sans les étés 2024 à 2026 : le risque dépassait 80 % dès mi-juin ; la station était à sec le 27 juillet. Station intermittente, cas favorable choisi pour illustrer.

Nappes. Niveau de chaque piézomètre prévu de 1 semaine à 6 mois : erreur médiane de 5 cm à une semaine, 29 cm à six mois ; score probabiliste 7 à 16 % meilleur que la meilleure référence ; à six mois, l'avance ne tient qu'en craie, calcaires, sables et nappes captives, pas en socle ni en alluvions ; les étés très secs restent sous-estimés (2026).

14 Ripisylve et suivi des travaux

14.1 Ripisylve : classement indicatif

Sur les petits cours d'eau, les tronçons de 2 à 4 km boisés à 80 % se réchauffent d'environ 1 °C de moins que ceux boisés à 20 % (−1,0 °C, entre −1,6 et −0,45). Mais l'essentiel de cet écart existe déjà en mars-avril, sans feuilles : la part due à l'ombre est de quelques dixièmes de degré à 1 °C (prélèvements d'été de fin de matinée ; le pic de l'après-midi n'est pas mesuré). Sur des tronçons plus courts, de 1 à 2 km, l'écart est du même ordre mais plus incertain (−1,0 °C, entre −2,1 et −0,1) ; sous 1 km, il n'est pas détectable : c'est pourquoi l'étude parle d'un effet « sur 1 à 4 km », et nous retenons le chiffre le plus solide, celui de 2 à 4 km. Au-delà de 100 km² de bassin, l'effet n'est pas mesurable dans nos données.

Le classement porte donc sur les tronçons ouverts et chauds des petits cours d'eau proches du seuil de leur espèce, et signale surtout ceux où une plantation n'aurait pas d'effet thermique (rivières de nappe déjà fraîches). Il rappelle le délai d'effet d'après un modèle publié (Davies-Colley et al. 2009, Nouvelle-Zélande, chenaux de 1,3 à 14 m) : l'ombrage et la température se rétablissent en quelques décennies, plus vite sur les petits cours d'eau et avec une plantation active ; aucun degré ni aucun jour gagné par chantier n'est affiché ; un exemple illustratif et l'étude de la sensibilité au soleil sont au § 16.5.

14.2 Témoin modélisé avant/après

Pour juger l'effet d'un aménagement sur la température, le modèle calé sur la sonde avant travaux dit ce qu'elle aurait mesuré « sans travaux, avec la météo de cet été ». C'est 20 à 25 % plus précis qu'un avant/après simple, et 30 à 40 % plus précis qu'une comparaison à une rivière voisine.

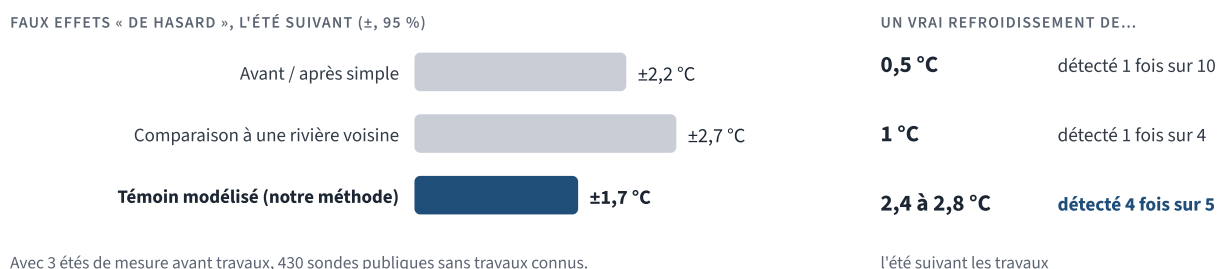


Figure 20 — Faux effets observés sans travaux (intervalle à 95 %, maximum journalier de juillet-août, été suivant) et probabilité de détecter un refroidissement réel. Source : Hub'Eau (430 sondes, 9 424 station-années sans travaux connus), Météo-France ; traitement de l'auteur.

Avec trois étés de mesure avant les travaux, le témoin détecte de façon fiable un changement d'au moins 2,4 à 2,8 °C l'été suivant, ou d'environ 2 °C en moyenne sur les trois étés suivants. Seul un très gros changement l'atteint : sur la Sélune, la suppression de deux grands barrages n'a donné aucun effet détectable sur le maximum, et environ 1 °C sur les minimums nocturnes.

USAGE POUR LE GESTIONNAIRE

Pour chaque projet saisi, l'outil vérifie trois conditions : un gros changement (étang, grande retenue), une sonde à l'aval immédiat avec au moins trois étés de mesure avant les travaux, et un effet attendu d'au moins 2 °C (jugé sur trois étés après travaux ; environ 2,5 °C pour le seul été suivant). Sinon, il dit pourquoi l'effet ne sera pas mesurable et ce qu'il faudrait. Les sondes nécessaires doivent donc être posées plusieurs étés avant les travaux ; un seul été avant et un été après ne suffisent pas (§ 16.5).

15 Livrables, données et droits d'accès

Tableau 31 — Livrables

Livrable	Contenu
Atlas de l'étude	Un PDF daté et versionné (« diagnostic au JJ/MM/AAAA, modèle vX ») : méthode et précision, couverture des données, thermie, refuges et continuité, frayères, ouvrages à vérifier, sondes. Il reste consultable à côté des calculs du jour, avec un bouton pour comparer.
Annexe thermo-écologique	Pour un tronçon, une portion ou un projet : état thermique reconstitué avec ses incertitudes, refuges et connectivité, gains potentiels en jours de stress, calendrier de reproduction, méthode et sources. Document technique d'aide à la décision, sans valeur réglementaire, à joindre à un dossier de DIG ou Loi sur l'eau. La DIG et le dossier Loi sur l'eau ne sont pas rédigés par nous.
Export SIG	GeoPackage et Shapefile zippé des tronçons, stations, refuges et ouvrages de votre périmètre, avec leurs attributs (seuils, jours au-dessus du seuil et fourchette, niveau de preuve, hauteur retenue et sa source), reprojetés en Lambert-93 (EPSG:2154), avec un dictionnaire des champs.
Tableaux et cartes	CSV de chaque tableau, avec les paramètres actifs et les versions des modèles ; PNG de chaque carte et graphique ; date de calcul et mention « document technique, sans valeur réglementaire ».
Synthèse d'une page	Indicateurs clés du bassin comparés à un été moyen, pour le bureau syndical ou la commission locale de l'eau.

Données du gestionnaire. Vos sondes et vos relevés de terrain sont couverts par une convention : pas de publication sans votre accord, export complet à tout moment.

Continuité du service. Le code source, les données, les poids des modèles et la documentation sont déposés sous séquestre : en cas de cessation d'activité, la structure récupère l'ensemble et peut en confier l'exploitation à ses services ou à un prestataire de son choix.

Périmètre. Le périmètre est celui de vos communes membres croisé avec les bassins versants ; au droit de 93 % des 4 165 stations contrôlées, la surface de bassin calculée concorde avec la surface publiée (à -33 % / +50 % près) : le réseau est juste à l'échelle de la rivière.

15.1 L'espace syndicat

Ce que voit l'équipe d'un syndicat, chaque matin, et ce qu'elle peut y faire. Les écrans de la plaquette (page 11) viennent de la maquette de l'outil, sur le réseau réel de la Haute-Alsace, avec des valeurs fictives ; la précision de chaque grandeur affichée est celle des sections citées.

Tableau 32 — Fonctions de l'espace syndicat

Fonction	Ce que fait l'espace
Accès	Un espace web, sans installation, pour toute l'équipe, avec des comptes par rôle (tableau 33).
Carte du bassin	Chaque station colorée selon la probabilité de dépasser, d'ici 48 h, le seuil de stress de l'espèce de sa portion.
Fiche d'une station	Température prévue heure par heure à 48 h et tendance à 7 jours, avec leur fourchette à 80 %, seuils de la portion, creux d'oxygène estimé à l'aube (§ 8).
Recalcul	Courbes à 48 h et alertes recalculées toutes les 6 heures, à chaque nouvelle prévision météorologique (AROME de 0, 6, 12 et 18 h UTC).
Alertes par portion	Seuils préremplis selon le zonage piscicole (truite, ombre, cyprinidés), réglés portion par portion (§ 7.1) ; probabilité de dépassement à 48 h et à 7 jours, pic prévu et son heure.
Campagnes de mesure	Le point, l'objectif, le calendrier de relevés calculé pour ce point, chaque relevé saisi avec son heure exacte ; le modèle du point est créé à la clôture (§ 5.5).
Vos sondes	Dépôt des fichiers (HOBO, Tidbit, CSV), contrôle automatique (§ 4.1), alertes de pose (§ 4.2), trous comblés (§ 4.3), courbe de chaque sonde face à son modèle.
Votre terrain	Relevés de campagne saisis avec leur heure ; vérifications d'ouvrages (hauteur de chute, état, passe, éléments mobiles), qui priment sur le ROE et le LiDAR (§ 11).
Vos exports	CSV de chaque tableau, PNG de chaque carte et graphique, rapport PDF daté (atlas), couches SIG en GeoPackage ou Shapefile, en Lambert-93 (tableau 31).
Simulations et journal	Les simulations se recalculent en direct et ne sont pas enregistrées par défaut ; les modifications de paramètres (seuils, portions, périmètre, sondes) sont journalisées.

Source : spécification fonctionnelle de l'espace syndicat (octobre 2026).

Tableau 33 — Rôles des utilisateurs

Rôle	Droits
Élu, direction	consultation de la synthèse et de l'atlas ; simulations sans enregistrement ; exports
Technicien, chargé de mission	réglage des seuils par portion, dépôt des sondes, vérifications d'ouvrages, enregistrement des simulations, génération de l'atlas et des annexes
Administrateur	gestion des utilisateurs, demandes de correction du périmètre ; journal des modifications de paramètres
Invité extérieur	fédération, DDT, OFB, bureau d'études, Agence : vues figées partagées uniquement, jamais les simulations

Source : spécification fonctionnelle de l'espace syndicat (octobre 2026).

16 Domaine de validité

16.1 Conditions d'usage

- **Extrêmes.** Comme tout modèle air-eau, la reconstitution lisse les extrêmes : le pic de l'été est sous-estimé de 0,7 °C en médiane, d'où l'affichage d'un « scénario chaud » et d'un verdict qualitatif au-dessus de 25 °C (§ 7).
- **Échelle.** Les résultats sont validés à l'échelle de la rivière ; le stress d'un tronçon est celui de la station la plus proche, et un gain d'accès à un refuge n'est calculé que si la hauteur de l'ouvrage est connue.
- **Refuges.** Les refuges non mesurés sont présentés comme potentiels ; le refroidissement le long d'un même cours d'eau et les bras secondaires (+0,3 °C) ne sont pas retenus comme refuges.
- **Projections.** Un niveau de réchauffement n'est pas une date ; le débit et la nappe n'y sont pas modélisés, et sur les jours inédits de 2026 le modèle était légèrement trop chaud (+0,2 à +0,6 °C). La bascule d'une station se lit sur un ensemble de stations.
- **Prévision et oxygène.** Sur les rivières de nappe, très stables (9 stations testées), le modèle ne bat pas les références simples à 7 jours : la normale de la station, ou la dernière mesure quand une sonde transmet, est plus juste. L'oxygène est validé sur 21 sondes françaises, pour la nuit : l'après-midi, le relevé du mois et la normale de saison restent plus justes ; aucune nuit sous 5 mg/L n'est détectée (pas d'alerte).
- **Assecs.** Les prévisions d'assec portent sur les stations ONDE ; l'alerte « été à risque » d'après la nappe est fiable à partir de mai-juin.
- **Ouvrages.** Le LiDAR mesure la chute d'eau à eau le jour du survol : au-dessus de 2 % de pente, c'est un ordre de grandeur, et environ un tiers des ouvrages ne sont pas visibles au LiDAR.
- **Travaux.** Le témoin modélisé s'adresse aux changements d'au moins 2,4 à 2,8 °C l'été suivant (environ 2 °C sur trois étés) ; l'effet d'un petit seuil ou d'une plantation relève d'un suivi par paires de sondes.
- **Sondes et modèle de fondation.** Le modèle de fondation est validé en étude et reste à construire en service ; sur une sonde, il ne sera servi que s'il bat la recette de station sur sa dernière année réservée, et le calendrier de reproduction d'une sonde nouvelle ne sera donné qu'après un hiver mesuré (§ 4.4-4.5).
- **Relevés anciens.** Là où les prélèvements ne sont plus publiés, le modèle reste calé sur les années passées, dont la précision est la même que celle des années récentes (§ 3.9, 6.1).

16.2 Limites connues

- **Queue des erreurs.** L'erreur médiane cache une queue : avec le modèle de fondation ajusté sur les relevés, 13,3 % des jours d'été sont à plus de 2 °C d'erreur sur le maximum et 5,8 % à plus de 3 °C, et 1 % des jours dépasse 5,9 °C (production : 15,8 % et 6,3 %). Sur une sonde, 8,2 % des jours d'été dépassent 2 °C d'erreur et 3,7 % dépassent 3 °C.
- **Sources froides et résurgences.** Pour une sonde nouvelle, les rivières fraîches (sources, nappe, montagne : 90^e centile du maximum d'été sous 17,6 °C) sont prévues trop chaudes de 0,2 à 0,4 °C. Sans aucune mesure du point, les sources froides sont surestimées de près de 2 °C, même avec des indicateurs de débit d'étiage : une résurgence ponctuelle ne se lit pas dans les caractéristiques du bassin.
- **Aval de barrages, retenues et plans d'eau ; sondes d'une autre eau.** Parmi les 35 stations qui pèsent le plus dans l'écart quadratique de la comparaison TIGRE, 13 ont une sonde défaillante, 11 une sonde qui ne mesure pas la même eau que les relevés (nappe, source, aval de lac) et 7 sont des cas physiques difficiles (thermalisme, centrale nucléaire, aval de retenue, karst). Un modèle air-eau ne voit ni les lâchers ni la stratification ; les plans d'eau eux-mêmes sont exclus (§ 2.5).
- **Jours de montée brusque.** Quand l'eau monte de 2 °C ou plus d'un jour à l'autre, le maximum est sous-estimé : de 0,6 °C pour le modèle commun des sondes et de 1,15 °C pour le modèle de station en production ; après une chute brutale, il est surestimé (+0,2 à +0,3 °C et +0,35 °C). Aucune entrée d'air testée ne corrige ce retard.

- **Grands cours d'eau et faibles battements.** L'erreur croît avec la taille de la rivière (0,81 °C au rang de Strahler 7 et plus, contre 0,49 aux rangs 3-4), probablement par les lâchers et les rejets, absents des entrées ; l'amplitude de la journée est surestimée sur les rivières au battement faible (§ 4.4).
- **Tronçon sans aucune mesure.** La précision n'y est pas annoncée : le service montre la station la plus proche du même cours d'eau (§ 16.1) ; trois relevés dont au moins un en été suffisent à donner au point son propre modèle, et trois relevés d'été le portent à environ 1 °C (§ 3.3).
- **Heure affichée.** Hub'Eau ne documente pas l'horloge des sondes ; le maximum du jour, prévu directement, n'en dépend pas, mais l'heure affichée du pic et des fenêtres horaires peut être décalée d'environ une heure selon la saison.
- **Choix à faire.** Pour les stations de qualité, le modèle de fondation seul a la meilleure erreur médiane, le mélange à parts égales avec la production la plus grande régularité (§ 3.1) ; le choix pour le service n'est pas arrêté. La prévision des relevés ponctuels gagne peu sur le passé (0,88 °C demain contre 0,77 °C reconstitué).

16.3 Hors du champ de l'outil

Tableau 34 — Ce que l'outil ne produit pas

Exclusion	Motif
Annonce des crues	rôle de Vigicrues et des services de l'État ; le débit prévu reste une information complémentaire
Gain en degrés promis pour une plantation	l'essentiel de l'écart entre tronçons boisés et dégagés existe déjà sans feuilles
Mesure de l'effet d'un petit seuil ou d'une plantation	effet minimal détectable de 2,4 à 2,8 °C l'été suivant (environ 2 °C sur trois étés)
Effet thermique de l'ouverture des vannes	non démontré ; seul le gain d'accès aux refuges est calculé
Ouvrage déclaré disparu d'après le seul LiDAR	une chute invisible au survol se vérifie sur place
Refuge « l'eau se refroidit ici » le long d'un même cours d'eau	non validé
Chiffre central au-dessus de 25 °C ; comptage en heures	Au-dessus de 25 °C, la moitié environ des jours seulement est retrouvée (44 à 52 %, verdict qualitatif) ; les heures sont moins justes que les jours.
Prévision d'assec sans station ONDE ; alerte « été à risque » dès mars	non fiable
Rédaction d'une DIG ou d'un dossier Loi sur l'eau	seule une annexe technique d'aide à la décision est fournie
Date de chantier recommandée	la période estimée est montrée ; l'OFB et la DDT valident
Variables supplémentaires sans gain	Rayonnement, air maillé SAFRAN, débit et nappe ont été testés dans le modèle de température : aucun gain utile (au plus 0,01 à 0,03 °C sur l'erreur journalière, rien sur les jours chauds).

16.4 Limites connues et pistes (études du 26 octobre 2026)

Ces études décrivent où et pourquoi le modèle se trompe. Aucune ne change un chiffre de la présentation aux syndicats ; elles orientent le prochain réapprentissage.

- **Le niveau domine les pires cas.** Dans le dixième des sites les plus mal décrits, le niveau du jour porte 77 à 86 % de l'erreur quadratique, et surtout un niveau qui dure plus de deux semaines (63 % pour une sonde), dont un biais permanent du site (environ 20 %) ; les pires jours tombent de juin à août, par chaleur et étiage, pas les jours d'orage, et 22 à 25 % du pire centième sont des défauts de sonde. Un niveau parfait gagnerait 0,27 °C à toute heure, une forme de journée parfaite 0,13 °C (plafond 0,63 °C, sondes). Là où une sonde transmet, reporter l'erreur des jours passés gagnerait 0,04 à 0,11 °C selon le délai de publication : à valider en vraie prévision.
- **La forme de la journée.** La courbe horaire est tracée avec une forme nationale symétrique : le creux de nuit réel ne vaut que 0,88 fois le pic, d'où une nuit trop basse d'environ 12 % ; sur le cinquième des rivières au battement le plus faible (canaux, sources, rivières amorties), l'amplitude est surestimée de 1,4 à 1,7 fois. Le coût à toute heure est faible (une amplitude parfaite ne gagnerait que 0,012 à 0,015 °C), et sans mesure on ne sait pas repérer une rivière amortie. Exemple : la Lèze en août 2024, pic prévu trop chaud de 1,3 °C, dont 0,4 °C viennent de l'air AROME prévu trop chaud et le reste du site (26 km en aval d'un barrage, soutien d'étiage non vérifié).
- **Piste : un modèle « minimum, moyenne, maximum ».** Apprendre aussi le minimum du jour et une courbe asymétrique gagne 0,020 °C à toute heure l'été là où une sonde existe (minimum -0,052 °C, maximum inchangé), mais rien pour une station calée sur ses relevés (-0,007, non significatif) ni pour la prévision du lendemain (-0,009, non significatif), avec une queue un peu plus lourde. À intégrer au prochain réapprentissage ; ce n'est pas un gain annoncé.
- **L'air heure par heure n'apporte rien.** À moyenne journalière, vrai maximum et amplitude de l'air égaux, la forme horaire de l'air n'explique presque rien de l'erreur au-delà de placebos (0,003 à 0,004 °C à toute heure, sous le bruit entre deux apprentissages) ; le seul signal porte sur l'amplitude (moins de 0,005 °C). Le réseau ne sera pas réappris avec l'air horaire.
- **Un relevé saisi en direct.** Pris par temps chaud sur un point déjà sondé par le passé, il baisse l'erreur sur le maximum des jours chauds d'environ 20 % la première semaine et d'environ 10 % à deux ou trois semaines, puis l'effet s'éteint en un à deux mois ; sur l'année, il n'aide guère que le lendemain (-11 %). Une tournée tous les quinze jours l'été réduit l'erreur de 9 % à toute heure et de 15 % les jours chauds. Pour une station calée sur ses seuls relevés : environ 15 % la première semaine, à peine au-delà. Une sonde voisine qui transmet ne corrige pas un point sans sonde (gain nul, placebo à zéro) : une sonde ne sert que son propre point.

16.5 Ce qui n'est pas promis, et pourquoi

- **Un gain chiffré par plantation.** Sur 430 sondes, les sites boisés réagissent moins au soleil du jour que les sites dégagés, mais l'écart est le même avant et après le débourrement, et les placebos de date font autant que la vraie date : la part propre aux feuilles est nulle aux erreurs près (au plus 0,1 °C sur le maximum d'un jour de plein soleil). La ripisylve est priorisée par la proximité du seuil (§ 14.1), sans gain chiffré. L'exemple de la Vienne à Saint-Setiers n'illustre que ce que vaudrait un demi-degré : la sonde mesure environ 9 jours au-dessus de 19 °C par été moyen (11 étés) ; un pic abaissé de 0,5 °C en laisserait environ 5. Critère : sondes d'au moins trois étés sur une rivière à truite (moins de 100 km² ou plus de 300 m), 5 à 25 jours au-dessus de 19 °C, pic moyen de 19 à 21 °C, couvert boisé de moins de 30 % sur le premier kilomètre. Réserve : cette sonde est écartée de la comparaison TIGRE (annexe C, règle R4 : amplitudes fréquentes de plus de 6 °C).
- **L'effet de travaux avec un été avant et un été après.** La météo ne fait qu'environ la moitié du bruit d'une année sur l'autre ; le reste est un décalage d'été propre au site : sans aucun travaux, 95 % des faux effets restent dans $\pm 2,0$ °C sur le maximum, et un cas sur cinq bouge de plus de 1 °C. Un témoin pris sur la même sonde à une autre saison ne marche pas (le décalage d'été n'est pas partagé). L'outil n'en dit rien ; une évaluation moyenne d'un type de travaux sur beaucoup de sites reste une piste.
- **Relevés et courte pose d'enregistreur combinés.** Trois ou six relevés plus une à deux semaines de pose font 0,89 à 0,90 °C sur le maximum, contre 0,93 pour six relevés seuls : gain nul sur la moyenne et à toute heure, et une pose qui dégrade de 0,2 °C ou plus un site sur dix. Ce n'est pas proposé.
- **Autres retraits.** « Plus tôt que d'habitude » au seuil de 15 °C (réponse trop rare, § 7.4) ; un nombre de jours au-dessus de 25 °C (§ 7.3) ; une alerte d'oxygène sous 5 mg/L (§ 8.2) ; un nombre national de zones refuges candidates sans sa réserve (§ 9.2) ; une correction du « biais de fin d'été » (§ 3.7) ; le recalage d'un point sans sonde par ses voisines (§ 16.4).

17 Mise en œuvre proposée

Tableau 35 — Étapes de l'étude

Étape	Contenu	Financement
1. État des lieux (hiver-printemps)	stations de qualité du territoire (22 en médiane par syndicat), sondes et relevés du syndicat contrôlés et complétés ; première vue thermique du bassin en quelques semaines ; zones refuges et ouvrages candidats ; plan de mesure par point, selon l'usage (§ 5.6, 4.8)	selon les programmes de l'Agence de l'eau ; demande avant la commande
2. Campagne guidée (été, et hiver si besoin)	relevés des techniciens pendant leurs tournées, ou enregistreurs, selon les campagnes de leur espace web ; saisie de l'heure, dépôt des fichiers (HOBO, Tidbit, CSV)	incluse dans l'étude
3. Diagnostic (automne)	modèles recalés sur la campagne ; atlas thermique daté, zones refuges confirmées, classement des ouvrages, priorités pour le contrat, annexe pour les DIG, couches SIG, présentation en comité syndical ou en CLE	inclus dans l'étude
4. Suivi pluriannuel , 3 ans inclus, renouvelable	observatoire du bassin dès l'étape 1 (chaque point à toute heure, passé, 48 h, 7 jours, 2050, exports ; alertes recalculées toutes les 6 heures ; bilan de chaque été ; nouvelles versions des modèles) ; questions thermiques traitées sur demande, sans surcoût, pendant les trois ans	inclus 3 ans, puis suivi annuel ; éligibilité à confirmer

Le financement de l'étude se monte selon les programmes d'intervention de votre Agence de l'eau ; la demande d'aide doit être déposée avant la commande. Taux, éligibilité et montage sont **à confirmer avec votre Agence de l'eau**. Les budgets se préparent généralement à l'automne et sont votés de décembre à avril. Aucun prix n'est fixé à l'avance : le contenu de l'étude dépend du bassin et des données disponibles. Il n'y a pas d'abonnement : après les trois ans de suivi inclus, le suivi se renouvelle à l'année. Le code source, les données, les poids des modèles et la documentation sont déposés sous séquestre : en cas de cessation d'activité, la structure récupère l'ensemble et peut en confier l'exploitation à ses services ou à un prestataire de son choix.

17.1 Démonstration sur votre bassin versant

En 45 minutes, nous regardons ensemble ce que l'outil donne déjà sur votre périmètre : stations exploitables, été 2026 reconstitué, refuges candidats et ouvrages sur leur chemin. La préparation demande quelques jours ; un fichier de sonde peut être transmis au préalable pour être soumis au contrôle décrit au § 4.1.

17.2 Données utiles au démarrage

Tableau 36 — Éléments demandés au gestionnaire pour l'étude initiale

Élément	Usage dans l'étude
Communes et bassins de compétence (indispensable)	définition du périmètre
Fichiers des sondes de température, position et dates de pose	contrôle, comblement, modèle entraîné sur les sondes
Relevés de terrain sur les ouvrages ; projets de travaux prévus	hauteur retenue, classement ; éligibilité au témoin
Espèces et seuils par portion ; comptages de frayères ; période par défaut du département	jours au-dessus des seuils ; calendrier de chantier

17.3 Contact

Lucas Monnier — modélisation hydro-environnementale
contact@thermoFluvia.fr — thermoFluvia.fr

17.4 Qui est derrière ThermoFluvia

ThermoFluvia est une marque de Fishing Booking, la société qui édite aussi la plateforme de gestion des flux de pêche du même nom. En 2026, année pilote, les fédérations de pêche du Var et du Rhône s'en sont servies pour réguler la pêche de la carpe ; de nouvelles fédérations rejoignent le pilote en 2027.

DÉMONSTRATION DE 45 MINUTES SUR VOTRE PROPRE BASSIN VERSANT

Sur simple demande à contact@thermoFluvia.fr (thermoFluvia.fr).

18 Questions fréquentes

Réponses courtes, chacune renvoyant à la section où le chiffre est détaillé. Sauf mention, une erreur est une erreur médiane entre stations, l'été, sur des années que le modèle n'a jamais vues (§ 2.9) ; « validé en étude » signifie mesuré dans une étude, pas encore servi en production (page « Lire ce document »).

Quelle précision sans sonde, là où il n'y a qu'une station de qualité ?

0,86 °C sur le maximum journalier d'été avec le modèle de fondation ajusté sur les relevés (654 sites, validé en étude) ; 0,97 °C avec le modèle de production ; 1,72 °C pour la température habituelle tirée des relevés. § 3.1.

Et heure par heure ?

0,77 °C à toute heure et 0,82 °C au pic du jour (360 sites), contre 0,90 et 0,94 °C pour la production. § 2.10, tableau A.

Et là où une sonde existe ?

0,60 °C sur le maximum d'été et 0,64 °C à toute heure (238 sondes, 2024-2026), contre 0,80 °C pour la recette de station calée sur la même sonde. § 4.4.

Quelle précision de prévision pour demain et à 7 jours ?

À toute heure, demain : 0,88 °C avec des relevés seuls, 0,68 °C avec une sonde, 0,47 °C avec une sonde qui transmet ; au 7^e jour : 0,96, 0,86 et 0,77 °C. Mesuré avec l'air prévu corrigé (§ 2.7). § 2.10, tableau A.

Qu'est-ce que le modèle de fondation ?

Un réseau de neurones appris une fois sur 42,5 millions de mesures horaires de 655 sondes françaises (2006-2026), puis ajusté à chaque point en estimant huit valeurs à partir de ses propres mesures, en 2 secondes environ. Validé en étude, à construire en service. § 2.2.

Le modèle a-t-il vu les données qui le jugent ?

Non. Le réseau est appris sans aucune sonde du bassin du point jugé (cinq blocs de régions hydrographiques), sur des années antérieures à celles du jugement, et la sonde qui juge une station de qualité n'entre jamais dans son calage. Les réglages ont été choisis sur l'année 2023 avant le test. § 2.8.

Combien de relevés faut-il pour une station ou un point nouveau ?

Trois relevés d'été suffisent pour environ 1 °C sur le maximum d'été (0,98 à 1,00 °C, vrais relevés) ; six relevés d'été donnent 0,92 °C en conditions idéales, un mois d'enregistreur en juillet 0,84 °C. § 3.3 et 5.1.

À quelle heure faut-il mesurer ?

En été, à l'heure de la tournée : six relevés à 10 h font 0,92 °C, six relevés vers 16 h 0,95 °C. Le conseil de mesurer vers 16 h est retiré. § 5.2.

Combien de temps faut-il mesurer avec une sonde nouvelle ?

Un été suffit pour l'été (0,78 °C à toute heure). Pour le calendrier de reproduction, il faut une année complète : date d'émergence de la truite à 4 jours près en médiane, contre 13 % d'erreurs de plus de deux semaines avec un été seul. Avec un été et six relevés d'hiver calés à part, 5 jours. § 4.5, 4.8.

Nos petites stations, avec quelques relevés, sont-elles utilisables ?

Oui, dès trois relevés dont au moins un en été, avec un indice de confiance faible ; à environ 1 °C avec trois relevés d'été. Environ 46 % des 4 060 stations à 3-11 relevés seraient à 1 °C ou mieux. Validé en étude ; la production exige aujourd'hui 12 relevés. § 3.3.

Comment se situe-t-on par rapport à TIGRE ?

Sur l'indicateur de TIGRE (30 jours consécutifs les plus chauds), notre écart quadratique est de 0,93 °C aux stations de qualité (507 stations, après contrôles physiques des sondes fixés à l'avance), contre moins de 1,5 °C publiés pour TIGRE sur tout le réseau, sans mesure locale. Ce ne sont pas les mêmes situations. § 3.10.

Pourquoi deux autres chiffres, 0,84 et 0,43 °C ?

0,84 °C ajoute une règle de cohérence entre la sonde et les relevés, qui favorise un modèle calé sur ces relevés : donné à titre d'information. 0,43 °C est l'écart médian, la station typique ; il ne se compare pas à l'écart quadratique de TIGRE. § 3.10.

Quelles stations ont été écartées de la comparaison TIGRE, et pourquoi ?

81 des 584 stations : 16 par les contrôles antérieurs (toutes leurs années touchées), 61 par les contrôles physiques (30 sondes de nappe ou de source, 31 sondes hors de l'eau ou cours d'eau à sec), 4 par la cohérence sonde-relevés. Liste en annexe C.

Qu'est-ce qui est en production aujourd'hui ?

Le modèle de chaque station de qualité (10 783 stations), la courbe à 48 h recalculée quatre fois par jour, l'oxygène, le débit prévu, le contrôle des données et l'exclusion des plans d'eau. Le modèle de fondation, le correctif de l'air prévu, la tendance à 7 jours, les petites stations et l'espace syndicat sont validés en étude ou à construire. Tableau de statut, « Lire ce document ».

Et les lacs, étangs et retenues ?

Ils sont exclus des modèles de rivière depuis le 24 octobre 2026 : 643 stations, soit 349 modèles de température et 412 d'oxygène retirés ; leurs mesures restent affichées. § 2.5.

Où le modèle se trompe-t-il le plus ?

Sur les sources froides, à l'aval des barrages et des plans d'eau, sur les grands cours d'eau et les jours où l'eau monte brusquement (sous-estimation de 0,6 °C pour le modèle commun des sondes). Environ 6 % des jours d'été sont à plus de 3 °C d'erreur sur le maximum. § 16.2.

Le modèle remplace-t-il une sonde ?

Là où il n'y en a pas, il en tient lieu à environ 0,9 °C près sur le maximum d'été (0,86 °C) ; une sonde mesure l'année en cours, et l'écart entre une sonde et le thermomètre du préleveur est déjà de 0,37 °C l'été. § 3.1 et 3.5.

Et un tronçon sans aucune mesure ?

La précision n'y est pas annoncée : le service montre la station la plus proche du même cours d'eau, et quelques relevés d'été donnent au point son propre modèle. § 16.2 et 3.3.

Les relevés ne sont plus publiés dans notre bassin : l'outil fonctionne-t-il ?

Oui : chaque modèle est calé sur des années de relevés et sur la météo qui les accompagnait ; recalculer sur les relevés les plus récents ne réduit l'erreur que de 1,6 %. § 3.9.

Et l'oxygène ?

Le minimum de la nuit est estimé à 0,86 mg/L près, contre 1,47 mg/L pour le relevé du mois (21 sondes françaises) ; l'après-midi, la normale de saison fait mieux ; aucune alerte n'est donnée sous 5 mg/L. § 8.2.

Les zones refuges désignées par le modèle sont-elles réelles ?

Sans aucune station sur l'affluent, 46 des 50 désignées sur 113 affluents sondés sont au moins 1 °C plus fraîches les jours chauds, et toutes celles annoncées à plus de 3 °C ; mais ces affluents sont surtout moyens à grands, et la règle est prudente en tête de bassin. Avec une sonde sur l'affluent, 68 sur 72 ; avec une sonde de chaque côté, 16 sur 16. § 9, 9.2.

Combien de temps reste valable le modèle d'un point ?

En médiane, au moins dix ans : calé sur six relevés d'été, 0,91 °C sur le maximum l'année suivante et 0,97 °C sept à dix ans plus tard ; mais un point sur cinq dérive de plus de 0,3 °C. Trois relevés de contrôle un été tous les cinq ans environ le ramènent au niveau de départ. § 5.8.

Quelle précision pour un point calé sur six relevés ?

Sur ses autres étés, 0,93 °C sur le maximum et 0,84 °C à toute heure ; en prévision, environ 0,9 °C aujourd'hui et demain, 1,1 °C dans 7 jours. § 5.6, 5.7.

Que vaut le débit prévu ?

Sur 70 rivières sans prévision Vigicrues ni barrage, pluie connue, le pic d'une montée est situé à 6 heures près dans 72 % des cas et sa hauteur à 30 % près dans 62 % des cas, contre 5 % et 0 % pour la persistance. Information complémentaire, non officielle. § 8.3.

A Glossaire

AUC

Aire sous la courbe ROC : probabilité qu'un cas positif reçoive un score plus élevé qu'un cas négatif ; 0,5 = hasard, 1 = parfait.

Erreur absolue moyenne

Moyenne des écarts, en valeur absolue, entre valeur estimée et mesure ; exprimée en °C ou en mg/L.

Intervalle à 95 % (rééchantillonnage)

Fourchette d'un résultat obtenue en retirant au hasard, 2 000 fois, des sites avec remise ; elle dit si un écart entre deux méthodes est sûr.

Intervalle à 80 %

Fourchette qui doit contenir la valeur observée 8 fois sur 10 ; sa couverture réelle est vérifiée sur des données non vues.

Température habituelle, normale ajustée

Température habituelle à cette date (normale de saison brute) : moyenne lissée des relevés, ou de la sonde, des autres années à la même date, prise telle quelle ; c'est la référence naïve. Normale ajustée : la même, ramenée à midi et corrigée du cycle journalier par notre méthode ; test plus exigeant.

Persistance, dernier relevé

Références simples : « comme aujourd'hui » (mesure du jour reportée) ; « comme lors du dernier relevé ».

Refuge mesuré, semi-mesuré

Écart de température observé par une sonde de chaque côté de la confluence (mesuré) ou d'un seul côté (semi-mesuré).

ROE, ICE

Référentiel des obstacles à l'écoulement (OFB) ; protocole d'information sur la continuité écologique, qui classe la franchissabilité par groupe d'espèces.

ONDE

Observatoire national des étiages (OFB) : observation visuelle de l'écoulement, de mai à septembre.

LSTM, quantiles

Réseau de neurones récurrent à mémoire longue, qui lit une suite de jours ; un quantile à 10 % est une valeur que la mesure dépasse 9 fois sur 10.

Validation croisée imbriquée

Un réglage est choisi sur la seule partie apprentissage de chaque pli, puis jugé sur sa partie test : le réglage ne voit jamais les données qui le jugent.

LiDAR HD

Relevé altimétrique aérien haute densité de l'IGN, couvrant la France.

TRACC

Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique.

DIG, GEMAPI

Déclaration d'intérêt général (art. R.214-99 C. env.) ; compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations.

Modèle de fondation, plongement

Réseau de neurones appris une fois sur de nombreuses rivières, puis adapté à chacune avec peu de mesures ; le plongement est l'ensemble des huit valeurs propres à un point, seules estimées lors de l'ajustement (§ 2.2).

Erreur médiane, erreur groupée, à toute heure, au pic

Voir les définitions du § 2.9.

Écart quadratique (RMSE)

Racine de la moyenne des carrés des écarts ; il pèse beaucoup les grands écarts (§ 2.9, 3.10).

Indicateur des 30 jours les plus chauds

Maximum annuel de la température moyenne sur 30 jours consécutifs, moyenné sur plusieurs étés (MTw30J ou MT30jmax chez TIGRE, souvent noté Tmoy30 dans les études thermiques).

Bloc de bassins

Un des cinq groupes de régions hydrographiques utilisés pour exclure de l'apprentissage toutes les sondes du bassin du point jugé (§ 2.8).

B Références

Textes réglementaires

- Arrêté du 30 septembre 2014 fixant les prescriptions techniques générales applicables aux installations, ouvrages, travaux et activités soumis à autorisation ou à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 3.1.5.0 de la nomenclature, NOR DEVL1404546A, art. 4, 5 et 7 (art. 5 : « de la ponte au stade alevin nageant »).
- Arrêté du 28 novembre 2007 fixant les prescriptions générales applicables aux installations, ouvrages, travaux ou activités soumis à déclaration et relevant de la rubrique 3.1.2.0 (2°), NOR DEVO0770062A, art. 5.
- Code de l'environnement, art. L.432-3, R.432-1 à R.432-1-5 (inventaires des frayères), R.214-99 (DIG).
- Directive 78/659/CEE du 18 juillet 1978 concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons, annexe I (température en aval d'un rejet thermique : 21,5 °C pour les eaux salmonicoles, 28 °C pour les eaux cyprinicoles) ; codifiée par la directive 2006/44/CE, abrogée avec effet au 22 décembre 2013 par la directive-cadre sur l'eau (art. 22).

Publications

- Beaufort A., Diamond J. S., Sauquet E., Moatar F. (2022). Spatial extrapolation of stream thermal peaks using heterogeneous time series at a national scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(13), 3477-3495. doi 10.5194/hess-26-3477-2022. Projet TIGRE (INRAE, Université de Tours, OFB) : portail thermie-rivieres.inrae.fr (consulté le 19/10/2026).
- Beaufort A., Moatar F., Sauquet E. (2020). *Thermie en rivière : analyse géostatistique et description de régime. Application à l'échelle de la France*. Rapport final du projet TIGRE, INRAE UR RiverLy et Université de Tours (GÉHCO), avec l'OFB, 63 p. et 53 p. d'annexes (validation croisée : p. 29).
- Hochreiter S., Schmidhuber J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. doi 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- Kratzert F., Klotz D., Shalev G., Klambauer G., Hochreiter S., Nearing G. (2019). Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(12), 5089-5110. doi 10.5194/hess-23-5089-2019.
- Toffolon M., Piccolroaz S. (2015). A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environmental Research Letters*, 10(11), 114011. doi 10.1088/1748-9326/10/11/114011.
- Rahmani F., Lawson K., Ouyang W., Appling A., Oliver S., Shen C. (2021). Exploring the exceptional performance of a deep learning stream temperature model and the value of streamflow data. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024025. doi 10.1088/1748-9326/abd501.
- Feigl M., Lebedzinski K., Herrnegger M., Schulz K. (2021). Machine-learning methods for stream water temperature prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2951-2977. doi 10.5194/hess-25-2951-2021.
- Mohseni O., Stefan H. G., Erickson T. R. (1998). A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research*, 34(10), 2685-2692. doi 10.1029/98WR01877.

- Davies-Colley R. J., Meleason M. A., Hall G. M. J., Rutherford J. C. (2009). Modelling the time course of shade, temperature, and wood recovery in streams with riparian forest restoration. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 43(3), 673-688. doi 10.1080/00288330909510033.
- Lois de développement de la truite : Crisp D. T. (1981). A desk study of the relationship between temperature and hatching time for the eggs of five species of salmonid fishes. *Freshwater Biology*, 11(4), 361-368. doi 10.1111/j.1365-2427.1981.tb01267.x ; Crisp D. T. (1988). Prediction, from temperature, of eyeing, hatching and 'swim-up' times for salmonid embryos. *Freshwater Biology*, 19(1), 41-48. doi 10.1111/j.1365-2427.1988.tb00325.x.
- Comptages de frayères de truite utilisés pour caler la courbe de ponte : Morgan J. L. (2020). *Brown trout spawning activity and recruitment: the influence of temperature and discharge in Alpine headwater streams*. Mémoire de master, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) ; Gortázar J., García de Jalón D., Alonso-González C., Vizcaíno P., Baeza D., Marchamalo M. (2007). Spawning period of a southern brown trout population in a highly unpredictable stream. *Ecology of Freshwater Fish*, 16(4), 515-527. doi 10.1111/j.1600-0633.2007.00246.x ; Skoog M. L. (2013). Brown trout spawning location and relationship to suitable winter habitat. *Journal of Earth and Life Science*, Bemidji State University (rivière Straight, Minnesota) ; Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Division, rapports d'avancement Federal Aid in Sport Fish Restoration, études 654 (Hunt Creek) et 665 (rivière Au Sable ; Nuhfer A. J., Zorn T. G.).
- Lois de développement des autres espèces : Jungwirth M., Winkler H. (1984). The temperature dependence of embryonic development of grayling (*Thymallus thymallus*), Danube salmon (*Hucho hucho*), Arctic char (*Salvelinus alpinus*) and brown trout (*Salmo trutta fario*). *Aquaculture*, 38(4), 315-327. doi 10.1016/0044-8486(84)90336-3 ; d'Hulstère D., Philippart J.-C. (1982). Observations sur le comportement d'éclosion et de post-éclosion chez l'ombre commun, *Thymallus thymallus* (L.). *Cahiers d'Éthologie*, 2(1), 63-80 (ombre) ; Lappalainen J., Dörner H., Wysujack K. (2003). Reproduction biology of pikeperch (*Sander lucioperca* (L.)) – a review. *Ecology of Freshwater Fish*, 12(2), 95-106. doi 10.1034/j.1600-0633.2003.00005.x (sandre) ; Hanson K. C., Cooke S. J., Suski C. D., Philipp D. P. (2007). Effects of different angling practices on post-release behaviour of nest-guarding male black bass, *Micropterus* spp. *Fisheries Management and Ecology*, 14(2), 141-148. doi 10.1111/j.1365-2400.2007.00534.x ; Philipp D. P., Zolderdo A., Lawrence M. J., Claussen J. E., Nowell L., Holder P., Cooke S. J. (2023). COVID-19 reduced recreational fishing effort during the black bass spawning season, resulting in increases in black bass reproductive success and annual recruitment. *Fisheries Research*, 259, 106580. doi 10.1016/j.fishres.2022.106580 (black-bass : seuil de nidification, étalement des pontes, durée de garde).
- Tomlinson M. L., Perrow M. R. (2003). *Ecology of the Bullhead*. Conserving Natura 2000 Rivers, Ecology Series n° 4, English Nature, Peterborough.
- Bensettiti F., Gaudillat V. (coord.). *Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire*, tome 7 : Espèces animales. MEDD, MAAPAR, MNHN ; La Documentation française, Paris. Fiche 1163 : le Chabot (*Cottus gobio*).

Données

- Hub'Eau (Température, Qualité des cours d'eau, Poissons, Hydrométrie, Piézométrie) ; Naïades ; ONDE et ROE (OFB) ; LiDAR HD, BD TOPO (IGN) ; TOPAGE ; Météo-France ; ECMWF ; Climadiag Commune, Explore2 ; BANATIC.

Études internes citées (octobre 2026) : modèle de fondation (recette, calage des stations de qualité, comparaison TIGRE), mesure minimale v2, petites stations, sonde nouvelle, règles d'exclusion de la comparaison TIGRE, stations aberrantes, méthode TIGRE, erreur par type de rivière, contrôles du modèle, correctif de l'air prévu, air horaire, fuseau horaire, plans d'eau, relevés aberrants ; qualité contre sonde (655 sites), modèle de station contre modèle de sonde, réseau de neurones des sondes, amplitude journalière par station, poids du mélange, contrôle des données et trous de météo, recalage sur les prélèvements, comblement des sondes, représentativité des sondes, extrêmes et état de l'art, refuges thermiques, hauteurs LiDAR, témoin de travaux, ombrage par tronçons, phénologie et réglementation, chabot, assecs ONDE, nappes, débit et Vigicrues, climat 2050. Disponibles sur demande.

DÉMONSTRATION DE 45 MINUTES SUR VOTRE PROPRE BASSIN VERSANT

Sur simple demande à contact@thermoFluvia.fr (thermoFluvia.fr).

C Stations écartées de la comparaison TIGRE

Sur les 584 stations de la comparaison (§ 3.10), 81 sont écartées : 16 par les contrôles antérieurs R1-R5 (toutes leurs années de sonde touchées), 61 par les contrôles physiques fixés à l'avance (R7 : 30 ; R8 : 31) et 4 par la cohérence sonde-relevés (R6, chiffre d'information seulement). Par ailleurs, 85 stations gardées perdent 124 années de sonde par R1-R5. R1 : rupture de l'écart eau-air ; R2 : eau plus chaude que l'air de plus de 5 °C ; R4 : plus de 10 % de jours d'amplitude supérieure à 6 °C ; R5 : juillet-août incomplet.

Tableau 37 — Stations écartées (1/2)

Code	Station	Motif
01045000	LA MARCHE NAVIRE À TORTEQUESNE (62)	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
01097000	LA TERNOISE À AUCHY LES HESDIN (62)	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
01101000	L'AA RIVIÈRE À WIZERNES (62)	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
01140500	AIRAINES (RIVIÈRE D') À LONGPRE LES CORPS SAINTS (80)	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
01141100	LA MAYE À RUE (80) CENTRE VILLE	R4 sur toutes ses années de sonde
02022650	LE RIEDBRUNNEN A COLMAR (LINDEN MATTEN)	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
02081000	LA SEILLE A MULCEY	R4 sur toutes ses années de sonde
02115762	LE DORLON A CHARENCY-VEZIN	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
02116000	LA CHIERS A CARIGNAN	R1 sur toutes ses années de sonde
03008505	LA BARSE A MONTREUIL-SUR-BARSE 1	R6 : sonde et relevés incohérents
03013660	L'AUXENCE A VIMPELLES 2	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
03029530	LE VRIN A LA FERTE-LOUPIERE 2	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03033240	LE CHALAUX A OUROUX-EN-MORVAN 2	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
03138390	L'ESCHES A BORNEL 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03162240	LA BRÈCHE A ETOUY 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03205000	LA RANÇON A SAINT-WANDRILLE-RANCON 2	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03222780	LA GUIEL A VERNEUSSES 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03231065	LA MUANCE A MOULT 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
03234215	L'HOUAY A MOULINS-SUR-ORNE 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
03248401	LA VIRE A TRUTTEMER-LE-GRAND 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
03269438	LA SÉE ROUSSE A SOURDEVAL 2	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
04023450	ALENE À LUZY	R4 sur toutes ses années de sonde
04029050	ALAGNON À BEAULIEU	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
04030020	COUZE CHAMBON À CHAMBON-SUR-LAC	R6 : sonde et relevés incohérents
04034650	BEDAT À SAINT-LAURE	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
04039000	DORE À DORAT	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
04057200	TARDES À SAINT-ORADOUX-PRES-CROCQ	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
04075700	VIENNE À SAINT-SETIERS	R4 sur toutes ses années de sonde
04076100	TAURION À GENTIOUX-PIGEROLLES	R4+R5 sur toutes ses années de sonde
04099400	THOUET À SAINT-LOUP-LAMAIRE	R6 : sonde et relevés incohérents
04433002	R SIOULE A CHOUVIGNY	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
05056900	Le Bradascou à Meilhards	R1+R4 sur toutes ses années de sonde
05068640	La Sumène en amont de Valette	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
05083700	L'Ourbise à Caubeyres	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05098850	La Truyère en amont de La Villedieu	R4 sur toutes ses années de sonde
05125000	Le Viaur à Lagarde Viaur	R1 sur toutes ses années de sonde
05148200	La Dourbie en amont de Dourbies	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
05151050	Le Baumale en amont de Vebron	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05180295	Le Nert en aval de Rivèrenert	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05181600	Le Ger à Boutx	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05192014	La Petite Leyre à Belhade	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05192320	L'Onesse en amont du R. d'Hossegor	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
05234290	L'Echez en amont des Angles	R4 sur toutes ses années de sonde
06001000	SAONE A JUSSEY 1	R6 : sonde et relevés incohérents

Tableau 38 — Stations écartées (2/2)

Code	Station	Motif
06057200	TURDINE A L'ARBRESLE	R4 sur toutes ses années de sonde
06061000	ARVE A MAGLAND	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06086100	ANGE A BRION	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06115080	IBIE A LAGORCE 1	R4+R5 sur toutes ses années de sonde
06116625	ESTABLET A LA-CHARCE	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06119950	SEGUISSOUS A BOUQUET	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06123700	SORGUE DES CAPUCINS A FONTAINE-DE-VAUCLUSE	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06128720	GARDON DE ST JEAN A THOIRAS	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06141520	RUISSEAU DE CROP A LAVAL	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06142450	DRAC BLANC A CHAMPOLEON	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06147840	BOURNE A CHORANCHE 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06149900	CLAREE A VAL-DES-PRES 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06150790	GUIL A EYGLIERS	R4 sur toutes ses années de sonde
06154250	BONNE A VALBONNAIS	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06156230	MEOUGE A ANTONAVES 1	R4 sur toutes ses années de sonde
06157750	BES A BARLES 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06159930	VERDON A COLMARS	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06160500	VERDON A CASTELLANE 2	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06161400	COLOSTRE A ST-MARTIN-DE-BROMES 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06165050	COULON A OPPEDE	R4 sur toutes ses années de sonde
06175400	AUDE A LES-ANGLES 2	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06175517	GALBE A FRONTRABIOUSE	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06177959	LAMPY A ALZONNE	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06181945	VIS A BLANDAS	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06182062	BUEGES A PEGAIROLLES-DE-BUEGES	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06202750	ARGENS A CHATEAUVERT 2	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06205480	NARTUBY A TRANS-EN-PROVENCE 3	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06209970	BRAGUE A BIOT 3	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06215540	TAVIGNANO A ALTIANI	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06215585	TAVIGNANO A ANTISANTI 1	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06217000	PRUNELLI A BASTELICACCIA	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06222600	FANGO A MANSO	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06300121	ARGENS A LE-THORONET 4	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06458450	AUTRUCHE A FONTENELLE 1	R2 sur toutes ses années de sonde
06580789	BIEVRE A LES-AVENIERES 1	R7 : été trop stable (sonde de nappe ou de source)
06580884	EBRON A PREBOIS 3	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)
06710039	TOULOUSENC A ST-LEGER-DU-VENTOUX	R8 : amplitudes > 5 °C (sonde hors de l'eau ou à sec)

Source : regles_exclusion_tigre (exclues.csv, regles_r678_621.csv), rmse_aberrants (drapeaux station-année), modele_base_final (population des 584) ; recalcul annexe_tigre.py ; traitement de l'auteur.