

# PROJET ESTERON

## INVENTAIRE DES INVERTEBRES AQUATIQUES & CARACTERISATION DU CADRE BIOCLIMATIQUE DE LA RIVIERE ESTERON

Programme Opérationnel Interrégional FEDER du Massif des Alpes



Décembre 2022

Version 1



## Fiche Qualité du document

Libellé de la mission : Projet Estéron – Inventaire des invertébrés aquatiques & caractérisation du cadre bioclimatique de la rivière Estéron.  
Programme Opérationnel Interrégional FEDER du Massif des Alpes

Maître d'ouvrage : Parc Naturel Régional des Préalpes d'Azur

Référence du document : Projet\_ESTERON\_rapport\_dec2022\_MRE\_VDef

Rédacteur(s) : Adrien MOREL, Gwenole LEGUELLEC, Pierre MILESI

Vérificateurs : Bernard DUMONT, Ana Elena SANCHEZ,  
Christophe GARRONE, Georges OLIVARI

Crédit photo : Maison Régionale de l'Eau, Gwenole LEGUELLEC

Date : 21/12/2022

### Contrôle qualité

Version	Rédigé par	Date	Visé par	Le
V1	Adrien MOREL	21/12/2022	Christophe GARRONE	22/12/2022

### Thématique

Localisation : Estéron

Mots-clés : Invertébrés aquatiques, régime thermique, inventaire spécifique, indicateur thermique

**SOMMAIRE**

1.	Introduction .....	11
2.	Présentation de l'Estéron .....	12
2.1.	Localisation .....	12
2.2.	Géologie.....	14
2.3.	Hydrogéologie .....	17
2.4.	Topographie et exposition des sous-bassins versants.....	18
2.4.1.	Partie amont du bassin versant de l'Estéron .....	18
2.4.2.	Partie médiane du bassin versant et affluents de rive gauche .....	19
2.4.3.	Partie médiane du bassin versant et affluents de rive droite.....	19
2.4.4.	Partie aval du bassin de l'Estéron .....	19
2.5.	Hydrologie.....	20
2.5.1.	Les périodes d'étiage ou basses eaux .....	22
2.5.2.	Les crues .....	22
2.6.	Stations de traitement des eaux usées.....	23
3.	Méthodologie.....	25
3.1.	Prélèvements quantitatifs sur le cours principal de l'Estéron .....	25
3.1.1.	Stations suivies .....	25
3.1.2.	Matériel de prélèvement.....	28
3.1.3.	Plan d'échantillonnage .....	29
3.1.4.	Déroulement des campagnes de prélèvement .....	30
3.2.	Prélèvements qualitatifs sur le cours principal de l'Estéron et ses affluents.....	30
3.2.1.	Stations suivies .....	30
3.2.2.	Protocole de prélèvement .....	35
3.2.3.	Déroulement des campagnes de prélèvement .....	36
3.3.	Enregistrement des températures et pressions de l'eau .....	38
3.4.	Autres paramètres mesurés .....	42
3.4.1.	Jaugeages des débits instantanés .....	42
3.4.2.	Analyses physico-chimiques des eaux .....	42
3.5.	Traitement de données .....	42
4.	Résultats .....	45
4.1.	Contexte hydrologique .....	45
4.1.1.	Données des stations limnimétriques de l'Hydro Portail .....	45
4.1.2.	Débits instantanés.....	48
4.2.	Physico-chimie des eaux.....	49

---

4.2.1.	Evolution de la conductivité .....	49
4.2.2.	Evolution de l'oxygène .....	50
4.3.	Régimes thermiques .....	52
4.3.1.	Etendue temporelle des enregistrements .....	52
4.3.2.	Bilan global des températures .....	55
4.3.2.1.	Cours principal de l'Estéron .....	55
4.3.2.2.	Affluents en rive droite de l'Estéron .....	57
4.3.2.3.	Affluents en rive gauche de l'Estéron .....	59
4.3.3.	Evolution temporelle des températures .....	61
4.3.3.1.	Stations du cours principal de l'Estéron .....	61
►	Station EST01 .....	63
►	Station EST02 .....	64
►	Station EST03 .....	66
►	Station EST04 .....	68
►	Station EST05 .....	69
►	Station EST06 .....	71
►	Station EST08 .....	72
4.3.3.2.	Stations des affluents de rive droite de l'Estéron .....	73
►	Ruisseau de la Faye .....	75
►	Ruisseau du Vegay .....	76
►	Source de la Bouisse .....	77
►	Le Bouyon dans sa partie amont .....	78
4.3.3.3.	Stations des affluents de rive gauche de l'Estéron .....	78
4.3.4.	Métriques synthétiques des régimes thermiques .....	80
4.3.5.	Synthèse des résultats sur les régimes thermiques .....	80
4.4.	Structuration des peuplements et relation aux variables environnementales .....	82
4.4.1.	Communautés benthiques du cours principal de l'Estéron .....	83
4.4.1.1.	Bilan global .....	83
4.4.1.2.	Bilan stationnel .....	84
4.4.1.3.	Evolution saisonnière des peuplements .....	86
4.4.1.4.	Recherche des variables environnementales structurantes des peuplements du cours principal de l'Estéron .....	90
4.4.2.	Inventaire spécifique des populations d'invertébrés sur le cours principal de l'Estéron et ses affluents .....	98
4.4.2.1.	Bilan global .....	98
4.4.2.2.	Bilan stationnel .....	99
4.4.2.1.	Recherche des variables environnementales structurantes des peuplements de l'ensemble des stations .....	105

---

---

4.4.3. Synthèse sur la structuration des peuplements en relation aux variables environnementales .....	113
► Sur le cours principal de l'Estéron .....	113
► Affluents de l'Estéron .....	113
4.5. Espèces remarquables et sites à enjeux .....	115
4.5.1. Espèces remarquables.....	115
4.5.1.1. Trichoptères .....	117
4.5.1.2. Plécoptères .....	121
4.5.1.3. Ephéméroptères.....	124
4.5.1.4. Odonates .....	126
4.5.1.5. Diptères .....	127
4.5.1.6. Crustacés.....	127
4.5.2. Sites à enjeux .....	128
5. Conclusions.....	133
Annexe 1 : Fiches de présentation des stations du cours principal de l'Estéron .....	137
Annexe 2.1 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations du cours principal .....	146
Annexe 2.2 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations des affluents de rive droite.....	155
Annexe 2.3 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations des affluents de rive gauche .....	161
Annexe 3 : Liste faunistique quantitative agrégées par campagne des stations du cours principal de l'Estéron. Les chiffres correspondent à des densités (ind./m <sup>2</sup> ). ....	168
Annexe 4 : Liste faunistique en présence / absence des prélèvements qualitatifs sur l'ensemble des stations d'étude.....	170
Annexe 5 : Projection des taxons dans la NMDS basée sur les distances de Jaccard des prélèvements qualitatifs.....	173

---

**TABLE DES ILLUSTRATIONS**

Figure 1 : Débit moyen mensuel de l'Estéron à la station de la Clappe (Le Broc) ; données calculées sur 107 ans (source : banque Hydro).....	21
Figure 2 : Débit instantané maximal (QIX) et débit moyen journalier maximal (QJ) pour les différents types de crue (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 106 ans (source : banque Hydro).....	22
Figure 3 : Profil en long du cours principal de l'Estéron au niveau des stations suivies et rang de Strahler correspondant. ....	27
Figure 4 : Pentes moyennes des tronçons du cours principal de l'Estéron entre les stations d'étude. ..	28
Figure 5 Filet de type Surber (d'après CABINET GAY, 2000).....	29
Figure 6 : Evolution des débits moyens journaliers de l'Estéron au pont du Coude à Sigale au cours des années 2020 et 2021 et comparaison aux valeurs mensuelles des moyennes interannuelles, des quinquennales sèches et humide. L'échelle des ordonnées est ici logarithmique.....	46
Figure 7 : Evolution des débits moyens journaliers de l'Estéron au Broc au lieu-dit de la Clave au cours des années 2020 et 2021. L'échelle des ordonnées est ici logarithmique. Les lignes verticales rouge représentent des « discontinuités fortes » dans les données fournies par l'Hydro Portail.....	47
Figure 8 : Débits instantanés mesurés sur les stations du cours principal de l'Estéron en 2020 et 2021.....	48
Figure 9 : Différence de débit entre stations successives, au cours de la période d'étiage de septembre 2020. ....	48
Figure 10 : Evolution de la conductivité de l'amont vers l'aval sur l'Estéron.....	49
Figure 11 : Evolution des concentrations en oxygène dissous de l'amont vers l'aval sur l'Estéron au cours des campagnes de prélèvement. ....	50
Figure 12 : Evolution des taux de saturation en oxygène dissous des stations d'étude au cours des campagnes de prélèvement.....	50
Figure 13 : Etendue temporelle des données de températures et qualité associées.....	53
Figure 14 : Diagramme en violon, boites à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station du cours principal de l'Estéron. La durée exprimée en nombre de jours des chroniques de chaque station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations.....	56
Figure 15 : Diagramme en violon, boites à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station des affluents en rive droite de l'Estéron. La durée de la chronique disponible par station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations. ....	58
Figure 16 : Diagramme en violon, boites à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station des affluents en rive gauche de l'Estéron. La durée de la chronique disponible par station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations. ....	60
Figure 17 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations du cours principal de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021. ....	62
Figure 18 : Evolution des températures sur la station EST01. ....	63
Figure 19 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST02.....	64

---

Figure 20 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours des densités estimées pour la station EST02.....	65
Figure 21 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST03.....	66
Figure 22 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours des densités estimées pour la station EST03.....	67
Figure 23 : Evolution des températures sur la station EST04. ....	68
Figure 24 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST05.....	69
Figure 25 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours des densités estimées pour la station EST05.....	70
Figure 26: Evolution des températures sur la station EST06. ....	71
Figure 27 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST08.....	72
Figure 28 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations des affluents de rive droite de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021.....	74
Figure 29 : Evolution des températures sur la station AFF_D002_FAYE.....	75
Figure 30 : Evolution des températures sur la station AFF_D07_VEGAY.....	76
Figure 31 : Evolution des températures sur la station AFF_D11_BOUISSE .....	77
Figure 32 : Evolution des températures sur la station AFF_D12_BOUYON_AMT .....	78
Figure 33 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations des affluents de rive gauche de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021.....	79
Figure 34 : Répartition des richesses taxonomiques sur la figure de gauche et des densités sur la figure de droite au sein des groupes faunistiques. ....	83
Figure 35 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques par station du cours principal de l'Estéron (prélèvements quantitatifs). ....	84
Figure 36 : Répartition des densités par station au sein des groupes faunistiques. ....	85
Figure 37 : Indices de diversité de Shannon-Wiener (figure de gauche) et indice d'équitabilité de Piélou (figure de droite) par station et par campagne. Les campagnes sont codées en « 0520 » pour mai 2020 et « 0920 » pour septembre 2020. ....	86
Figure 38 : Dendrogramme des distances de Bray calculées sur les listes faunistiques agrégées par campagne et par station. ....	88
Figure 39 : Représentation de la NMDS montrant les différences de structuration des communautés des 7 stations du cours principal de l'Estéron avec la projection des variables environnementales et leur degré de structuration ( $R^2$ et p-value de la PERMANOVA). Les communautés de la campagne de mai 2020 (ronds bleus) et celles de la campagne de septembre 2020 (triangles verts) sont regroupées par des ellipses. Les barycentres des stations sont figurés par leurs codes écrits en gris. ....	91
Figure 40 : Projection des taxons dans le plan de la NMDS. Seules les étiquettes des taxons les plus contributifs sont affichés. ....	93
Figure 41 : Relation entre la moyenne des richesses taxonomiques d'invertébrés par station et la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds. La ligne grise représente la droite de régression significative, les lignes grises verticales quantifient l'erreur standard de la moyenne.....	94

---

---

Figure 42 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j_max des taxons appartenant aux ordres des PET et présents dans plus de 3% des échantillons .....	96
Figure 43 : Nombre de taxons par groupe faunistique rencontrés dans le bassin versant de l'Estéron.....	98
Figure 44 : Relation entre la richesse taxonomique et le nombre de campagne par station pour les prélèvements qualitatifs .....	99
Figure 45 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques par station du cours principal de l'Estéron (prélèvements qualitatifs). Les codes se terminant par « QUALI » indiquent les stations prélevées uniquement en qualitatif, les autres sur le cours principal ont été prélevées selon les deux méthodes.....	101
Figure 46 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques pour les stations des affluents de rive gauche.....	102
Figure 47 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques pour les stations des affluents de rive droite. ....	103
Figure 48 : Dendrogramme des distances de Jaccard calculées sur les listes faunistiques en présence-absence des stations ayant fait l'objet d'au moins trois campagnes de prélèvement. ....	104
Figure 49 : Représentation de la NMDS montrant les différences de composition des communautés des 20 stations étudiées avec la projection des variables environnementales et leur degré de structuration ( $R^2$ et p-value de la PERMANOVA). Les communautés des stations du cours principal (ronds rouges), celles des affluents de rive droite (triangles bleus vers le haut) et celles des affluents de rive gauche (triangles verts vers le bas) sont regroupées par des ellipses. ....	107
Figure 50 : Projection des individus (stations) de la NMDS. ....	108
Figure 51 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j_max des taxons appartenant aux ordres des PET et présents dans plus de 10% des échantillons .....	110
Figure 52 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j_max des taxons appartenant aux groupes faunistiques différents des PET et présents dans plus de 10% des échantillons .....	111
Tableau 1 : Bilan des campagnes de prélèvement qualitatif.....	37
Tableau 2 : Métriques synthétiques des enregistrements de températures. ....	41
Tableau 3 : Statistiques de base des températures des stations du cours principal de l'Estéron. ....	55
Tableau 4 : Statistiques de base des températures des stations des affluents de rive droite. ....	57
Tableau 5 : Statistiques de base des températures des stations des affluents de rive gauche. ....	59
Tableau 6 : Résultats de la PERMANOVA entre la matrice de distance faunistique des 7 stations du cours principal de l'Estéron et un jeu de variables environnementales présélectionnées. Les abréviations des noms de colonnes correspondent à « Df » pour degré de liberté, « SumOfSqr » pour somme des carrés, $R^2$ pour le R-carré, « F » pour la statistique de Fisher et « Pr(>F) » pour la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle à tort. ....	90
Tableau 7 : Résultats de la PERMANOVA entre la matrice de distance faunistique des 20 et un jeu de variables environnementales présélectionnées. Les abréviations des noms de	

---

---

colonnes correspondent à « Df » pour degré de liberté, « SumOfSqr » pour somme des carrés, R <sup>2</sup> pour le R-carré, « F » pour la statistique de Fisher et « Pr(>F) » pour la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle à tort.....	105
Tableau 8 : Liste des espèces d'invertébrés aquatiques remarquables recensées sur le bassin versant de l'Estéron et critères retenus pour chacune d'elle.....	116
Tableau 9 : Bilan des captures des espèces considérées comme remarquables dans les stations étudiées. ....	130
Photo 1 : L'Estéron en aval de la clue de Mujouls avec les massifs calcaires de l'unité de ST-Antonin.....	16
Photo 2 : Prélèvements quantitatifs à l'aide du filet Surber.....	29
Photo 3 : Larve d'Ephémères (phase aquatique) et imaginaire ou adulte (phase aérienne)...	35
Photo 4 : Prélèvements qualitatifs à l'aide d'une pince (phase aquatique) et d'un filet à papillons (phase terrestre). ....	35
Photo 5 Réalisation de chasses de nuit à l'aide d'un piège lumineux. ....	36
Photo 6 : Système de fixation permettant de maintenir le capteur de température et de pression solidement immergé. ....	38
Photo 7 : La Gironde, affluent de l'Estéron après la crue du 2 octobre 2020. ....	47
Photo 8: Radier à la station EST03 le 29 septembre 2020 montrant un développement algal relativement important. ....	51
Photo 9 : Thermographe du Riou de Pierrefeu retrouvé exondé à la suite de la torsion de l'arrimage en septembre 2021. ....	54
Photo 10 : L'Estéron au niveau de la station EST03 le 7 juillet 2020. ....	55
Photo 11 : Le ruisseau du Vegay en aval de la cascade le 24 juin 2020.....	76
Photo 12 : Filet de larve de Polycentropus sp dans le lit du Vallon de St Pierre à l'aide duquel elle capte la nourriture apportée par le courant. ....	118
Photos 13 : A gauche : Cascade de Vegay, site où a été découverte l'espèce Hydroptila ruffoi (Trichoptère) première citation en France ; A droite : l'Estéron à Aiglun, une des stations où a été redécouvert le Trichoptère Polycentropus pirisinui .....	119
Photo 14 : Adulte mâle de Sericostoma galeatum (Trichoptère, Sericostomatiae).....	120
Photo 15 : Source du Fontanil à Soleilhas, où a été observée une espèce particulière de Drusus sp (groupe euphorion) .....	121
Photo 16 : Adulte de Leuctra sp observé au bord du ruisseau de Vegay.....	121
Photo 17 : Larve de Besdolus ravizzarum (Perlodidae), espèce typique des Alpes du sud	123
Photos 18 : A gauche : larve du Plécoptère Dinocras ferreri (Perlidae), espèce endémique recensée en France uniquement dans les Alpes-Maritimes, bien présent dans certains affluents de l'Estéron (Vegay, Fontanier...) ; A droite : ruisseau de Fontanier, affluent de la Gironde, abritant une belle population de Dinocras ferreri. ....	123
Photo 19 : Adulte de Siphonoperla sp. ....	124
Photo 20 : Larve de Baetis pasquetorum de la Gironde (affluent de l'Estéron) .....	124
Photo 21 : L'Ephéméroptère Electrogena grandiae (Heptageniidae), espèce localisée en France à l'extrême sud-est .....	125

---

---

Photo 22 : L’Odonate <i>Cordulegaster bidentata</i> , une espèce inféodée aux sources forestières et suintements .....	126
Photo 23 : Source encroûtante en bordure de la piste des Eigages à Aiglun, abritant une population de <i>Cordulegaster bidentata</i> (Odonate) .....	126
Photo 24 : Source de la Bouisse, sites abritant de nombreuses espèces remarquables.....	132
Photo 25 : Cascade du Vegay et ruisseau du Vegay en aval de la cascade.....	132
Photo 26 : Gironde amont (à gauche), le Bouyon (au milieu) et le ruisselet du Fontanier (à droite).....	132
Carte 1 : Bassin versant de l’Estéron.....	13
Carte 2 : Géologie du bassin versant de l’Estéron .....	15
Carte 3 : Masses d’eau souterraines du bassin versant de l’Estéron.....	17
Carte 4 : Localisation, capacités nominales et conformités en équipement et en performance des stations de traitements des eaux usées recensées dans le bassin de l’Estéron.....	24
Carte 5 : Localisation des neuf stations prélevées quantitativement sur le cours principal de l’Estéron. ....	26
Carte 6 : Localisation des stations échantillonnées qualitativement dans la partie amont du bassin versant de l’Estéron. ....	32
Carte 7 : Localisation des stations échantillonnées qualitativement dans la partie médiane du bassin versant de l’Estéron. ....	33
Carte 8 : Localisation des stations échantillonnées qualitativement dans la partie aval du bassin versant de l’Estéron. ....	34
Carte 9 : Localisation des stations instrumentées en sondes de températures et en sonde de pression. ....	39
Carte 10 : Richesses taxonomiques estimées à partir des prélèvements qualitatifs sur le bassin de l’Estéron. ....	100
Carte 11 : Nombre d’espèces considérées comme remarquables dans les stations étudiées. ....	129

## 1. INTRODUCTION

L'Estéron a obtenu le label « rivière sauvage » avec une des meilleures notes de naturalité hydrographique. Cependant, hormis pour les poissons et l'écrevisse à pattes blanches, l'identité des espèces aquatiques présentes est mal connue. Les lacunes de connaissances sur les populations d'invertébrés aquatiques en place et sur leur statut biogéographique, constituent un point faible du territoire : elles handicapent l'investissement dans des programmes opérationnels orientés vers la protection et la valorisation de la diversité biologique. Conscient de ce manque, la structure gestionnaire du bassin de l'Estéron cherche par ce projet à combler ce déficit de connaissances.

Dans le cadre d'un Programme Opérationnel Interrégional FEDER du Massif des Alpes, le Parc naturel régional des Préalpes d'Azur a ainsi mandaté la Maison régionale de l'eau afin de réaliser **l'inventaire des invertébrés aquatiques de l'Estéron et d'en caractériser le cadre bioclimatique**.

Au-delà de la connaissance naturaliste, les objectifs attendus sont de :

- **Réaliser un état zéro de la biodiversité** de la rivière et des assemblages faunistiques qui servira de base à toutes actions engagées sur le territoire.
- Trouver **des indicateurs biologiques pertinents** aux changements climatiques.
- Prendre l'Estéron comme **bassin type vulnérable** (interfaces entre climat alpin et méditerranéen) et pouvoir transposer les acquis sur d'autres bassins.

Le premier objectif affiché est donc de caractériser les populations aquatiques présentes ainsi que le niveau d'expression biogéographique local dans les tendances climatiques actuelles sur les Alpes du Sud. Comment sont structurées les populations emblématiques d'un passé climatique ? Que peut-on dire des continuités écologiques intra-alpines ?

L'originalité de l'étude réside dans l'association du cadre annuel de variabilité hydroclimatique aux analyses des communautés d'invertébrés. Le croisement du régime thermique et du régime d'écoulement permet une meilleure compréhension des assemblages de faune observé, la mise en relation avec les facteurs environnementaux structurants et de pouvoir adapter les recommandations de gestion selon ce cadre hydroclimatique.

Ce rapport constitue le bilan des actions réalisées sur le bassin-versant entre 2020 et 2021. Une **phase d'acquisition des données** de deux ans avait démarré en 2020 pour la caractérisation des communautés benthiques en parallèle des contextes thermique et hydrologique de ces milieux. Ce rapport présente l'ensemble des méthodes d'acquisition de données qui ont été utilisées dans cette étude, présente le contexte hydrologique dans lequel l'étude a été menée, les résultats des enregistrements de températures et de hauteurs d'eau puis la caractérisation des peuplements d'invertébrés benthiques. L'influence des variables environnementales structurantes de ces communautés est discutée. Enfin, un bilan de la diversité observée est proposé en focalisant sur certaines espèces jugées remarquables et trouvées au sein du bassin versant de l'Estéron.

---

## 2. PRÉSENTATION DE L'ESTERON

---

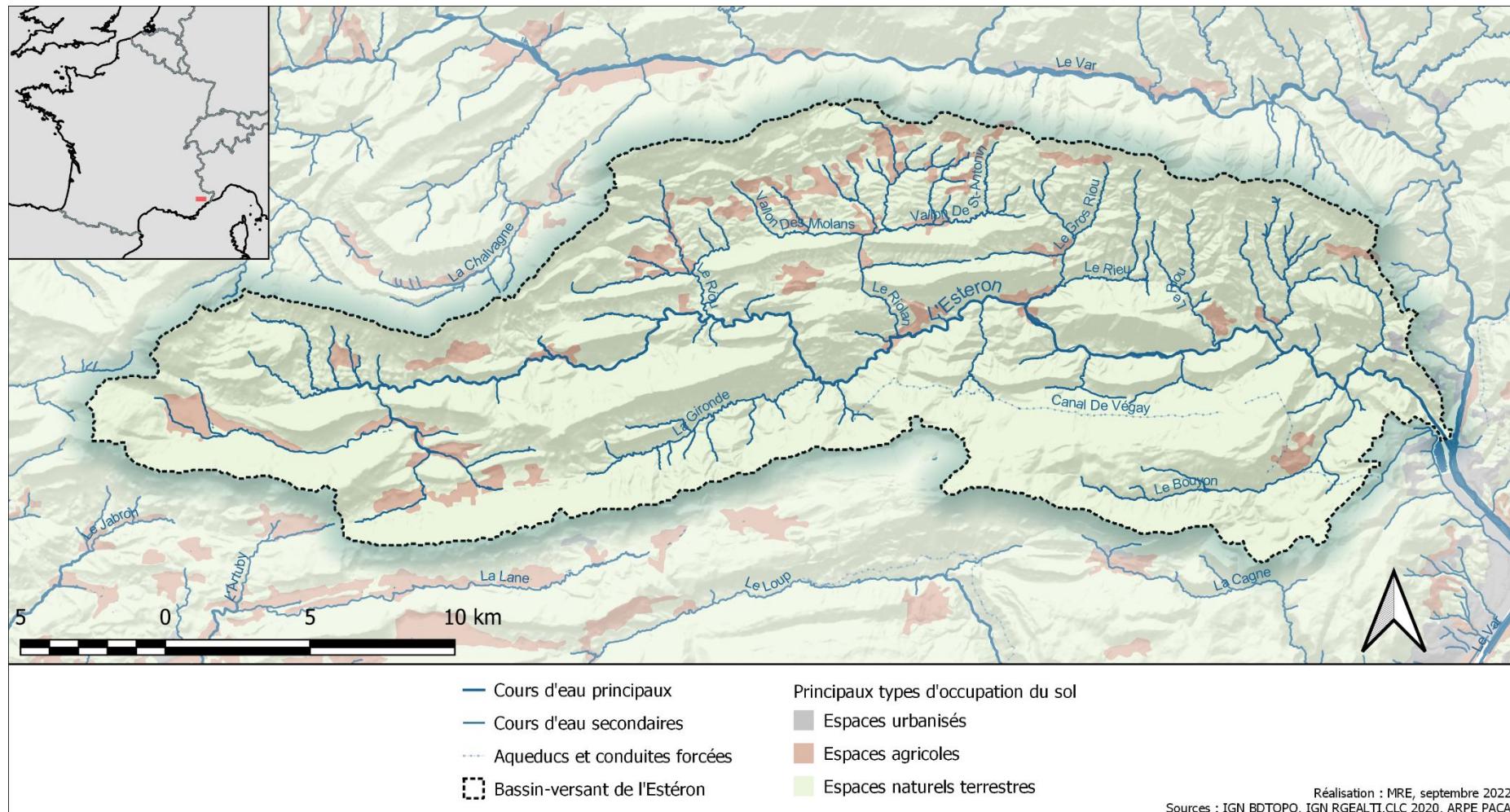
### 2.1. Localisation

L'Estéron est un affluent de la rive droite du fleuve Var, le troisième plus important après la Tinée et la Vésubie en termes de débit. L'Estéron prend sa source dans les Alpes-de-Haute-Provence, vers 1150 m d'altitude, sur la commune de Soleilhas, au pied de la Montagne du Teillon (1892 m), à l'est de Castellane, et entame un cheminement de près de **63 km** vers l'est, le long de plusieurs grands synclinaux parallèles, passant de l'un à l'autre en empruntant des clues spectaculaires. Il draine ainsi un **bassin versant d'une surface de 451 km<sup>2</sup>** qui traverse 20 communes.

De longues chaînes de massifs orientées est-ouest délimitent son bassin versant :

- Au nord avec la vallée du Var
- Au sud avec les hautes vallées du Loup, de la Lane et du Jabron, via la longue chaîne du Cheiron, culminant à 1 778 m

L'Estéron et ses affluents sont alimentés par plusieurs sources issues de massifs calcaires karstiques et sont peu impactés par les activités humaines. Les espaces naturels boisés prédominent largement la superficie du bassin-versant de l'Estéron.

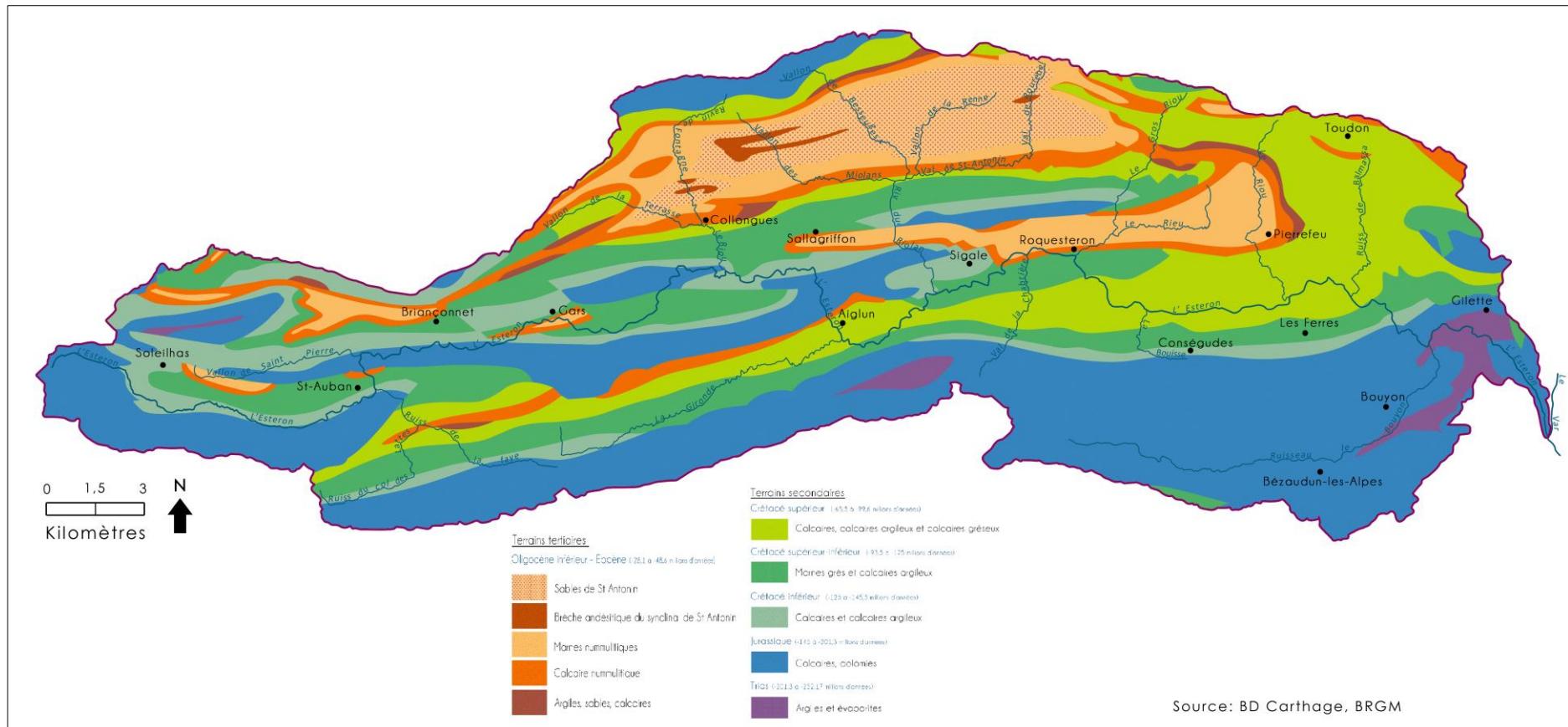


Carte 1 : Bassin versant de l'Estéron.

## 2.2. Géologie

L'ensemble du bassin versant de l'Estéron, aux chaînons et aux reliefs allongés d'est en ouest, s'insère dans la partie orientale de l'arc plissé de Castellane.

Cette configuration des plis de l'Estéron et du Var moyen résulte de chevauchements dans la zone des plateaux calcaires et est attribuée à la phase bartonienne (-41,2 à -37,8 millions d'années) de la fin de l'éocène (étude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques du Sud-Est de la France-BRGM 1969).



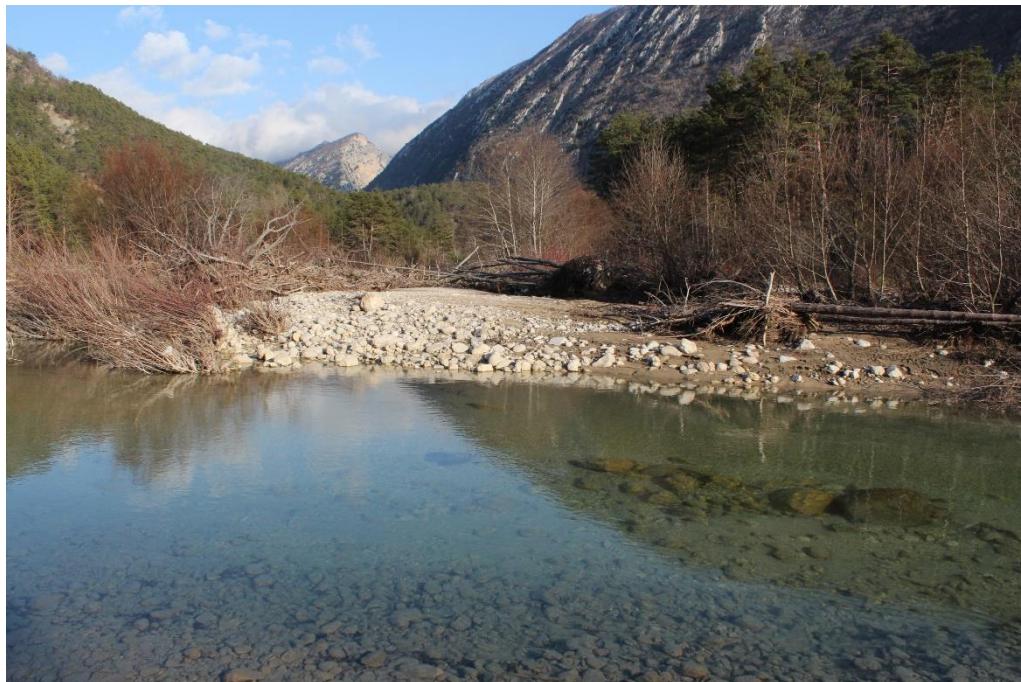
## **Carte 2 : Géologie du bassin versant de l'Estéron**

Les principales caractéristiques géologiques du bassin-versant de l'Estéron sont les suivantes :

- L'extrême ouest du bassin versant appartient à **l'unité géologique d'Entrevaux** qui s'étend de Saint-Auban jusqu'à Puget-Théniers au dôme de Barrot au nord. Cette unité recouvre une région complexe comportant des séries allant du jurassique à l'éocène (-200 à -34 millions d'années). Les intenses plissements dans ce secteur sont à l'origine d'une zone de serrage intense et de la formation d'écaillles chevauchantes. Ces formations se chevauchent en tuilage. La géologie de ces écailles demeure complexe dans le détail (source : BRGM, 1969).
- La majeure partie du bassin versant depuis sa limite au nord et jusqu'au massif du Cheiron au sud, constitue **l'unité de Saint-Antonin**.

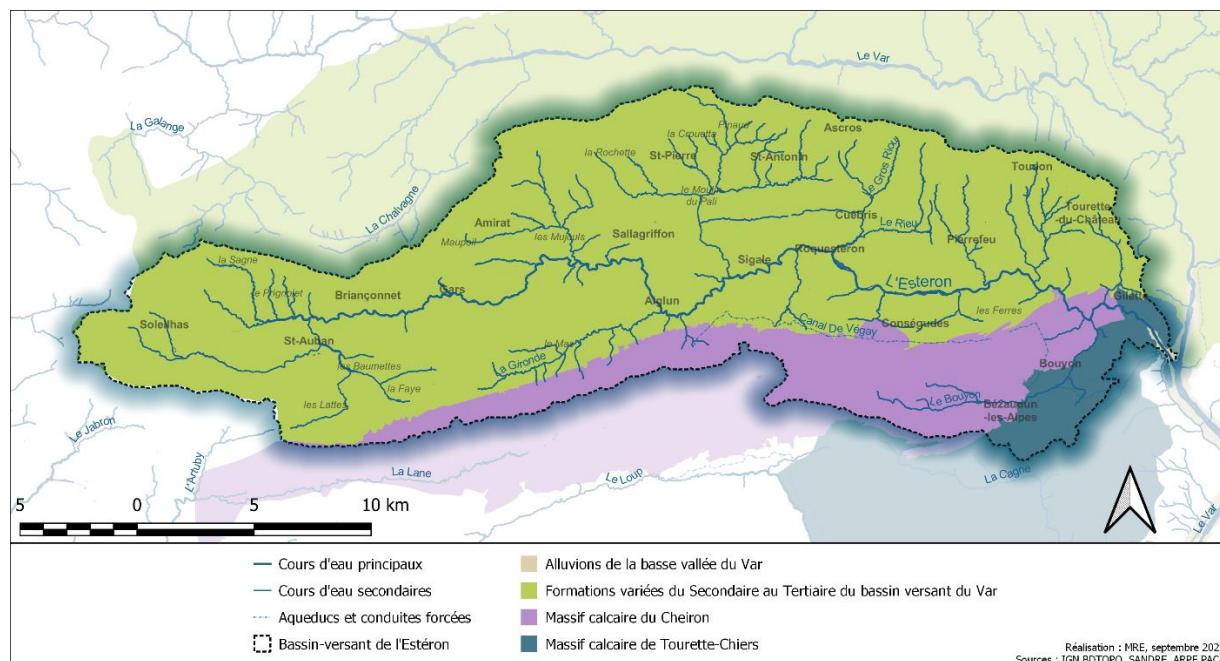
Cette unité est principalement constituée par les calcaires du crétacé supérieur (-96 à -65 millions d'années) et par le Tertiaire détritique (-48.6 à -28.1 millions d'années). Elle couvre l'aire synclinale de l'Estéron dont la plus importante cuvette constitue le bassin de St-Antonin. On rencontre dans cette aire synclinale quelques autres synclinaux de même nature géologique, comme celui de Roquesteron.

- **L'unité du Cheiron**, délimitant la partie sud du bassin versant, correspond à l'anticlinal du même nom ainsi qu'aux formations chevauchantes du bois de Chiers. L'ensemble des roches affleurantes de cet anticlinal sont principalement des calcaires et dolomies du jurassique, mais également du crétacé inférieur (Berriasiens) et du trias supérieur qui en constituent le cœur. Ce massif s'étire sur un axe est-ouest de plus de 40 kilomètres, sur une largeur de 4 à 5 kilomètres et une altitude élevée puisque la cime du Cheiron culmine à 1 778 mètres (source : BRGM).



*Photo 1 : L'Estéron en aval de la clue de Mujouls avec les massifs calcaires de l'unité de ST-Antonin.*

## 2.3. Hydrogéologie



**Carte 3 : Masses d'eau souterraines du bassin versant de l'Estéron.**

Afin de mieux appréhender l'hydrogéologie sur le bassin versant de l'Estéron, il est nécessaire de distinguer trois grandes unités géologiques auxquelles il se rattache :

- A l'ouest : dans ce secteur géologique, appartenant à l'unité d'Entrevaux, les nombreux plissements ont conduit à des **massifs en écailles** avec une géologie complexe mais à dominance calcaire. Les nombreuses failles et fractures de ces roches ont donné lieu à des phénomènes d'infiltration et de dissolution à l'origine de réseaux karstiques. Ces karsts alimentent ainsi de nombreuses sources dont les principales dans ce secteur sont la source de Teillette à Soleilhas, la source Viviers (50 l/s) à Saint-Auban et la source Rastigné.

Dans sa partie amont, sous le village de Soleilhas, les eaux de l'Estéron sont issues d'un système de sources réparties dans une plaine d'alluvions récentes, recouvrant des dépôts de calcaires du crétacé, au cœur d'une cuvette synclinale de roches calcaires datant du jurassique.

- Au nord : depuis la limite nord du bassin versant et jusqu'au massif du Cheiron au sud, l'unité de Saint-Antonin couvre l'aire synclinale de l'Estéron dont la plus importante cuvette constitue le bassin topographique de St-Antonin.

Ces synclinaux, orientés est-ouest, sont essentiellement constitués de dépôts éocènes et oligocènes recouvrant des calcaires du crétacé, reposant eux-mêmes sur des calcaires du jurassique. Si l'ensemble de **ces roches favorise l'infiltration des eaux atmosphériques**, seul le calcaire à Nummulites (fossiles) présente une porosité et une perméabilité au sein des dépôts éocènes et oligocènes. On remarque ainsi de **nombreuses sources dans les zones de contact** entre les différents étages géologiques de cette unité.

Les sources les plus importantes de l'unité de Saint Antonin sont :

- La source du village de Gars (42 l/s) ;
  - La source le Barlet (12.5 l/s) sur la commune des Mujouls ;
  - La source Cianet (35 l/s) à Roquesteron ;
  - La source Crovetta ;
  - Les sources Clouetta, Debourret (13 l/s), Camagnan (20 l/s) et la source du Moulin (34l/s) à Saint Antonin.
- Au sud : l'unité géologique constituée par l'anticlinal du Cheiron est essentiellement composée de calcaire du jurassique et du crétacé reposant sur des roches plus anciennes d'âge triasique qui en sont le cœur. Très kartsifié, ce massif n'est parcouru que par quelques écoulements superficiels, rarement pérennes, dans des fonds de vallons secs.

La karstification très développée sur le massif, **favorise l'infiltration des eaux de précipitation et leur circulation** à l'intérieur des calcaires et dolomies dont l'épaisseur est estimée entre 500 et 600 mètres.

On trouve dans ce secteur les sources qui alimentent les principaux affluents en rive droite de l'Estéron : la Gironde et affluents, le Vegay, la Bouisse...

## 2.4. Topographie et exposition des sous-bassins versants

Afin de lier les informations géologiques et topographiques et leurs influences sur la thermie des cours d'eau du bassin de l'Estéron, ce chapitre met en évidence les principales caractéristiques des sous bassins versants. Les influences pressenties de ces caractéristiques sur les régimes thermiques et hydrologiques sont indiquées entre parenthèse et en italique.

### 2.4.1. Partie amont du bassin versant de l'Estéron

Depuis sa source et jusqu'à la clue de St Auban, l'Estéron draine des eaux de sources karstiques le long d'une vallée synclinale dont le point le plus bas dépasse les 1000 mètres d'altitude (*karst d'altitude + altitude + fonte de neige*).

Le ruisseau de la Faye constitue le premier affluent en rive droite de l'Estéron. Il collecte également les eaux d'un synclinal situé à plus de 1000 mètres d'altitude, sans source karstique majeure, mais avec de nombreux terrains drainant à dominance calcaire (*altitude + fonte de neige*).

Le lit de l'Estéron s'encaisse alors dans la Clue de Saint Auban, avant de parcourir un nouveau synclinal vers l'est. (*Ombre, encaissement*).

Le torrent de Saint Pierre conflue avec l'Estéron à l'altitude de 890 m et en aval immédiat de la clue en rive gauche. En dépit de son étendue, le bassin versant du torrent de Saint Pierre n'assure pas un écoulement pérenne dans le cours d'eau (*faibles débits estivaux et réchauffements de la masse d'eau*).

Jusqu'à Briançonnet, le lit de l'Estéron est dans un ubac (*ombre, encaissement*).

Depuis Briançonnet, jusqu'à la clue des Mujouls (altitude 664 m) à l'est de Gars, l'Estéron s'écoule au pied de grands adrets (adreh de Gras, adreh de Bouvaut) dans une vallée plus ouverte vers le sud (*ensoleillement*).

Dans ce secteur, l'Estéron ne reçoit les apports que de quelques petits affluents à écoulements intermittents, à l'exception peut-être du Vallon de Praconi en amont de Gars (*faibles débits estivaux et réchauffements de la masse d'eau*).

Le lit de l'Estéron s'encaisse alors dans la Clue des Mujouls (*ombre, encaissement*), avant de parcourir un nouveau synclinal vers l'est dans l'ubac de la forêt domaniale du Mont Mal jusqu'à l'entrée de la clue d'Aiglun, au Sud de Sallagriffon (*ombre, encaissement*).

#### 2.4.2. Partie médiane du bassin versant et affluents de rive gauche

Le Riou de Collongues conflue avec l'Estéron en aval de la clue des Mujouls, sur sa rive gauche. Ce Riou collecte les eaux d'un grand bassin versant dont le réseau hydrographique évoque la silhouette d'un pin parasol dont les ramifications drainent la partie ouest d'un grand synclinal. Ce réseau est alimenté par quelques sources karstiques issus des terrains calcaires au Nord, et collecte principalement les eaux de terrains de nature majoritairement marneuse. (*MES, colmatage, faible débit, réchauffement*). Toute la partie développée du réseau amont présente une exposition maximum au rayonnement solaire, jusqu'à l'étranglement de Collonges où un lit unique s'encaisse au Sud jusqu'à l'Estéron.

On retrouve une configuration similaire avec le bassin versant du Riolan qui draine les eaux de la partie est de ce même grand synclinal, mais sur une surface deux fois supérieure. Le Riolan conflue avec l'Estéron en amont de Sigale en empruntant un lit étroit qui traverse une clue et des gorges à qui il a donné son nom.

Depuis la clue d'Aiglun jusqu'à Roquesteron à l'est, le lit de l'Estéron méandre dans une vallée de plus en plus ouverte.

#### 2.4.3. Partie médiane du bassin versant et affluents de rive droite

En aval de la clue d'Aiglun, l'Estéron reçoit les eaux de la Gironde (altitude 570 m), un affluent de sa rive droite. Le lit de la Gironde s'écoule dans l'axe d'un long synclinal dont il collecte tant les eaux de fonte (crêtes du bassin versant à 1600 m d'altitude) et de ruissellement, que celles issues de nombreuses sources karstiques.

Les sources du Vegay (altitude 880 m) (captées en partie pour l'AEP - prélèvement max autorisé : 190l/s<sup>1</sup>) au sud d'Aiglun, constituent la principale alimentation en eau de l'Estéron sur sa rive droite jusqu'à Roquesteron. Les eaux fraîches (voir le chapitre 4.3.2.3) du système de sources karstiques s'écoulent dans un lit encaissé et accidenté du sud vers le nord. En aval de la spectaculaire cascade du Vegay, à l'ubac de la montagne du Cheiron, les eaux dévalent jusqu'à l'Estéron (altitude 420 m) dans un vallon encaissé et très boisé.

#### 2.4.4. Partie aval du bassin de l'Estéron

Sur sa rive gauche, l'Estéron reçoit les eaux de plusieurs affluents encaissés dans de profondes vallées et vallons orientés nord-sud. On citera les principaux, de l'amont vers l'aval : le Riou de Cuébris draine de nombreux terrains marneux, le Riou de Pierrefeu très encaissé et se terminant en canyon et le ruisseau de Ciavarlina dont le débit, parfois très faible, ne semble pas être soutenu par des apports de sources.

<sup>1</sup> Article du 11/10/2001 tiré du journal "L'Agriculteur"

Sur sa rive droite, l'Estéron bénéficie de l'apport de deux affluents majeurs, dont le débit est assuré par deux puissantes sources karstiques alimentées par l'unité géologique du massif du Cheiron :

- La source de la Bouisse, à l'ouest de Conségudes, assure un écoulement pérenne et frais dans le Malvallon. Si toute la partie amont (écoulements intermittents) du réseau draine un synclinal orienté est-ouest, la partie aval, depuis les sources jusqu'à l'Estéron, s'encaisse dans une clue du sud vers le Nord.
- Le Bouyon conflue avec l'Estéron en aval des gorges, au sud-ouest de Gilette. Ce cours d'eau est alimenté par un système de puissantes sources karstiques (exploitées pour l'AEP – prélèvement max autorisé : 150l/s<sup>1</sup> à 766 m d'altitude sur la commune de Bézaudun-les-Alpes. Son lit s'encaisse sur près de 10 kilomètres dans une vallée dont il a profondément incisé la base. La nature karstique de son alimentation, son encaissement et la couverture végétale de la vallée entretiennent le rafraîchissement de la masse d'eau.

Jusqu'à la confluence avec le Riou de Pierrefeu, l'Estéron s'écoule dans une vallée synclinale très ouverte. Le lit est très large et présente des formations en tresse (*ensoleillement*).

Le lit oblique ensuite vers le sud-est et dans un relief très accidenté à partir du Pont de la Cerise. Dès la sortie des gorges de l'Estéron, ce dernier reçoit les eaux fraîches du Bouyon (en rive droite) puis celles des sources karstiques dites « Fontaines » en aval de la Clave, sur la commune de Gilette (*rafraîchissement*).

L'Estéron méandre jusqu'à sa confluence avec le fleuve Var (altitude 100m). Le lit s'élargit progressivement dans une basse vallée plus ouverte et présente à nouveau une configuration d'écoulement en tresse sur un épais matériel alluvial (*réchauffement*).

## 2.5. Hydrologie

Deux stations de mesures hydrologiques, gérées par la DREAL PACA, sont présentes sur le cours principal de l'Estéron : à Sigale et au Broc. Les données présentées ci-dessous concernent celle du Broc, localisée juste en amont de sa confluence avec le Var, permettant ainsi de mesurer les eaux superficielles sortant de son bassin versant.

Le module (moyenne des débits moyens annuels calculée sur 107 ans) de la rivière au Broc est de **7,02 m<sup>3</sup>/s**.

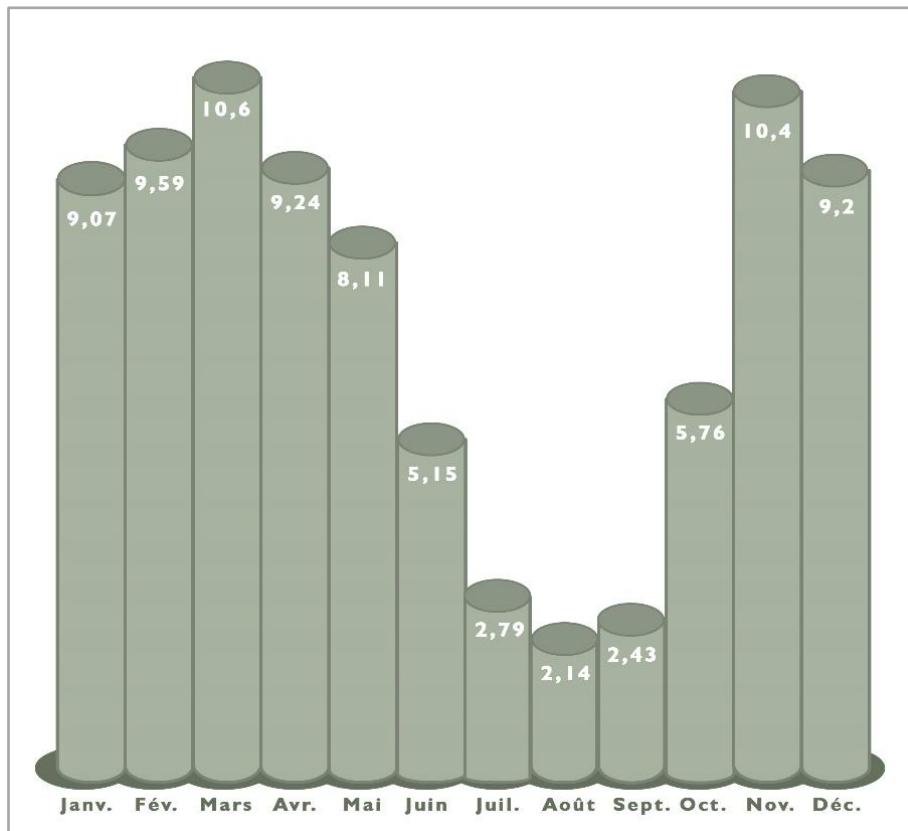


Figure 1 : Débit moyen mensuel de l'Estéron à la station de la Clappe (Le Broc) ; données calculées sur 107 ans (source : banque Hydro)

Les variations saisonnières de débits sont ici caractéristiques du régime pluvial méditerranéen, où les **hautes eaux sont rencontrées au printemps et en automne** présentant deux maxima de débits mensuels moyens de  $10,6 \text{ m}^3/\text{s}$  en mars et  $10,4 \text{ m}^3/\text{s}$  en novembre ; et les plus **basses eaux correspondent à la période estivale**, atteignant un minima en août avec un débit mensuel moyen de  $2,14 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La baisse progressive des débits mensuels depuis le printemps jusqu'à l'été est à attribuer à la **décharge lente des karsts** : l'ensemble des massifs calcaires du bassin versant est karstifié ; les eaux atmosphériques s'y infiltrent en grande partie et y circulent des mois avant de sourdre par les multiples sources qui alimentent l'Estéron et ses affluents.

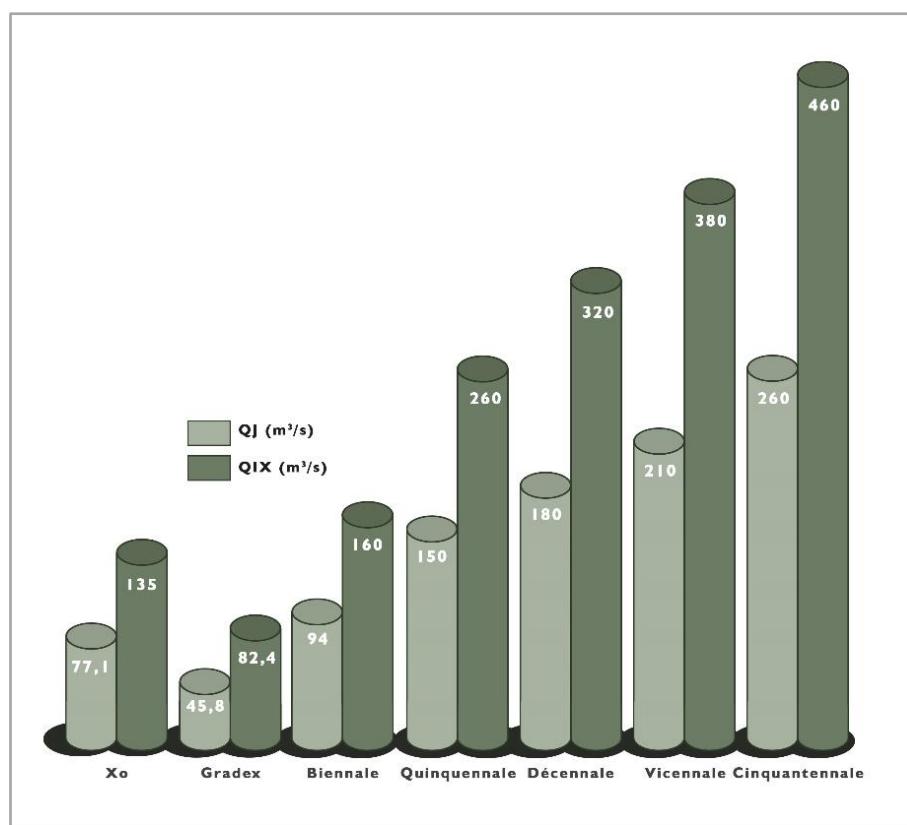
### 2.5.1. Les périodes d'étiage ou basses eaux

Le soutien d'étiage est assuré par les apports karstiques : en cas de période quinquennale sèche, le VCN3, qui permet de caractériser une situation d'étiage sévère sur une courte période, indique un débit de 1,1 m<sup>3</sup>/s. Ce débit, très inférieur au module annuel de 7,02 m<sup>3</sup>/s, assure la continuité hydraulique du cours principal de l'Estéron.

### 2.5.2. Les crues

Avec un bassin versant de 451 km<sup>2</sup>, l'Estéron présente des débits de crue importants, que l'on peut imputer à deux facteurs :

- La topographie globale est constituée par de longs et hauts massifs, aux versants abrupts et délimitant de vastes cuvettes, comme le bassin de Saint-Antonin. Le réseau hydrographique constitué par l'Estéron et ses affluents collecte ainsi rapidement de grandes quantités d'eau de ruissellement.
- La nature karstique des massifs ne favorise pas le ruissellement des eaux. En revanche, lors de longs épisodes pluvieux ou d'épisodes pluvieux à répétition, les karsts se saturent en eau et n'absorbent plus efficacement les eaux précipitées. Le ruissellement devient alors important et son influence dans le cours d'eau se cumule à celui des sources qui donnent à leur maximum : c'est la crue.



**Figure 2 : Débit instantané maximal (QIX) et débit moyen journalier maximal (QJ) pour les différents types de crue (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 106 ans (source : banque Hydro)**

La date du 20 décembre 1997, avec un débit instantané maximal de 464 m<sup>3</sup>/s, est demeurée longtemps comme celle du pic de crue le plus important mesuré pour l'Estéron. La fréquence

de cette crue, plus importante que vicennale, est sans doute d'ordre d'une quarantaine d'années, et peut donc être considérée comme relativement rare.

Le 02 octobre 2020, un débit instantané de 472 m<sup>3</sup>/s a été enregistré, surpassant l'ancien *maxima* enregistré pour cette station.

## 2.6. Stations de traitement des eaux usées

A partir des données diffusées sur le portail de l'assainissement collectif<sup>2</sup>, la carte des unités de traitement des eaux usées présentes dans le bassin de l'Estéron permet d'estimer le degré de pression s'exerçant sur les milieux aquatiques.

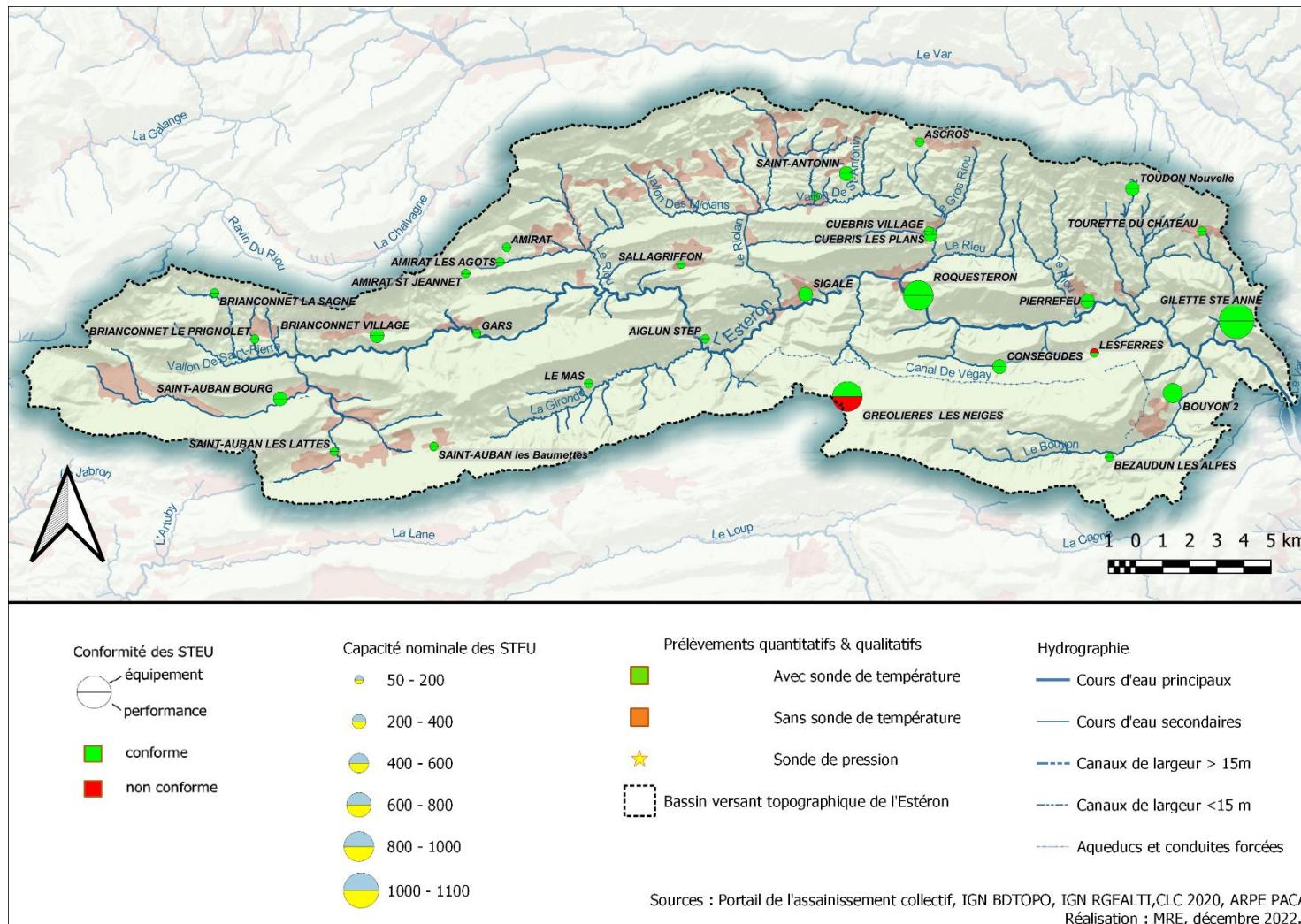
Globalement, 29 stations sont recensées sur ce territoire. La majorité d'entre elles ont des capacités de traitement limitées puisque 26 ont une capacité nominale inférieure à 500 EH. Trois stations ont des capacités comprises entre 1000 et 1100 EH : Roquesteron, « Gillette Ste-Anne » et celle de Gréolières-les-Neiges. Cette dernière est déclarée non conforme en performance en 2020 mais le milieu récepteur déclaré étant le sol, l'impact sur les milieux aquatiques est certainement limité par le ruissellement direct. Toutefois, ce rejet se situant sur la face nord du massif calcaire du Cheiron dont les deux principales émergences sont le Vegay et la Gravière (alimentant le ruisseau du même nom, lui-même affluent du Bouyon), une éventuelle influence sur les biocénoses de ces milieux pourrait être décelée.

Une autre station de traitement apparaît en non-conformité en termes d'équipement, il s'agit de celle du village des Serres pour une capacité nominale de 100 EH. Les rejets se font en tête d'un petit affluent de l'Estéron nommé le Vallon des Roubines confluant en amont de la station EST08.

D'après les données diffusées sur le portail de l'assainissement collectif, les rejets de stations d'épuration restent globalement limités en terme d'importance des flux et leur qualité apparaît conformes aux normes.

Au-delà des données fournies par ce portail d'information, des variations de charge entrante dans les stations d'épuration sont parfois considérables dans les secteurs touristiques et peuvent engendrer des phénomènes de proliférations massives algales lors des périodes de basses eaux.

<sup>2</sup> <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/>



**Carte 4 : Localisation, capacités nominales et conformités en équipement et en performance des stations de traitements des eaux usées recensées dans le bassin de l'Estéron.**

### 3. MÉTHODOLOGIE

---

Dans le cadre de cette étude, la faune ainsi que les températures et pressions ont été recueillies sur des stations ciblées du bassin versant. D'abord, les invertébrés benthiques ont été échantillonnés selon deux protocoles présentés dans ce chapitre :

- Des prélèvements quantitatifs - où les individus de chaque taxon sont dénombrés - ont été réalisés sur 9 stations du cours principal de l'Estéron au cours de deux campagnes de l'année 2020. Le niveau de détermination reste variable selon les groupes faunistiques mais le niveau du genre est souvent atteint pour les trois ordres d'insectes les plus bio-indicateurs que sont les plécoptères, les éphéméroptères et les trichoptères. Ce type de prélèvement quantitatif permet d'étudier la structure des communautés d'invertébrés benthiques et d'interpréter les facteurs explicatifs de cette structuration.
- Des prélèvements qualitatifs - où les individus sont identifiés au niveau de l'espèce - ont été réalisés sur le cours principal de l'Estéron et sur un grand nombre d'affluents. Ce type de prélèvement permet d'inventorier le plus exhaustivement possible la diversité en invertébrés aquatiques présente dans le bassin versant.

En parallèle des échantillonnages de faune, des tronçons de cours d'eau ont été instrumentés en enregistreurs de températures et, parfois, de pressions. Ces données permettent la caractérisation des contextes hydroclimatiques rencontrés dans le bassin de l'Estéron.

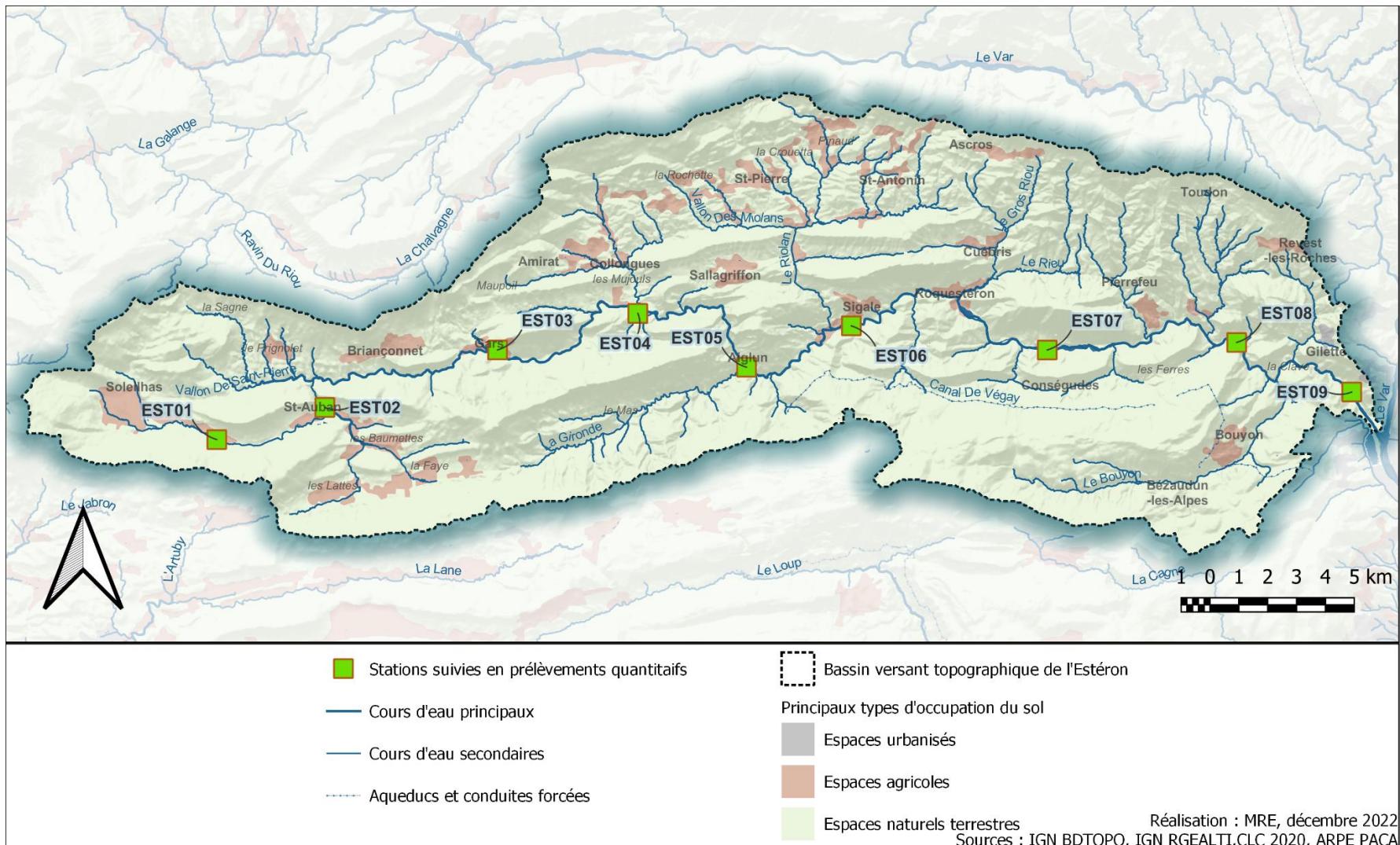
Ce chapitre détaille les diverses approches qui ont été mises en œuvre dans le cadre de cette étude.

#### 3.1. Prélèvements quantitatifs sur le cours principal de l'Estéron

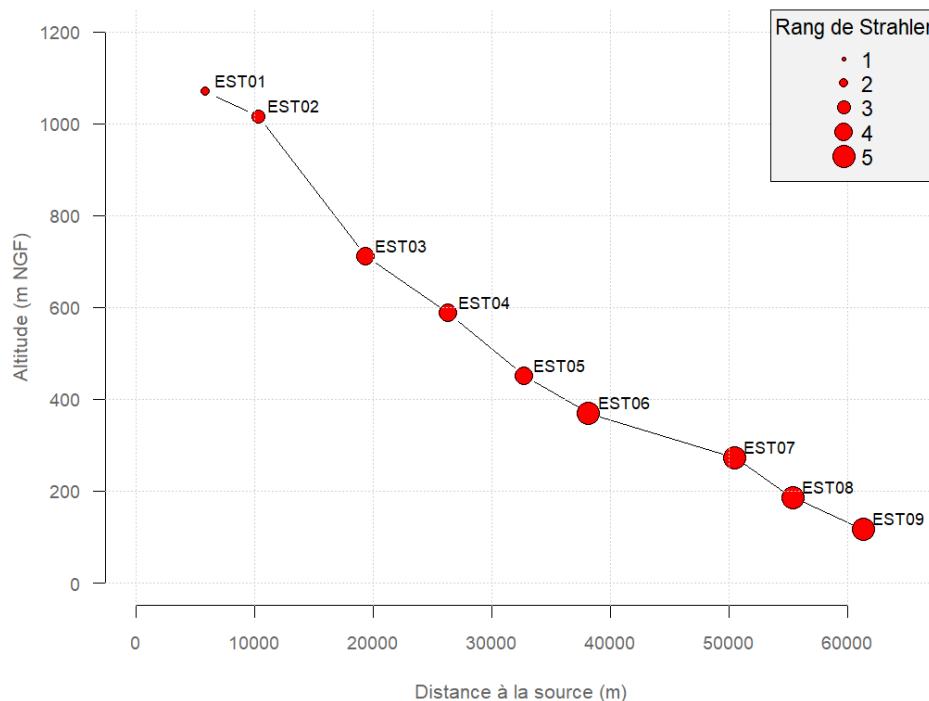
##### 3.1.1. Stations suivies

Neuf stations sont concernées par ce type de prélèvement. Elles sont toutes situées sur le cours principal de l'Estéron. Elles sont codées depuis l'amont vers l'aval de *EST01* à *EST09* (« EST » pour Estéron).

La carte suivante présente leur localisation sur le cours principal.



Réparties tout au long des 62 km du linéaire de l'Estéron, la plus haute station EST01 se trouve à 1069 m NGF d'altitude et la plus basse à 102 m NGF. Le graphique suivant présente le profil en long au niveau des stations du cours principal de l'Estéron ainsi que le rang de Strahler du tronçon de cours d'eau. Pour rappel, cette valeur est une mesure de la complexité des confluences d'affluents et de sous-affluents au sein d'un réseau hydrographique. La valeur de ce rang peut être mise en lien avec la taille relative des cours d'eau.

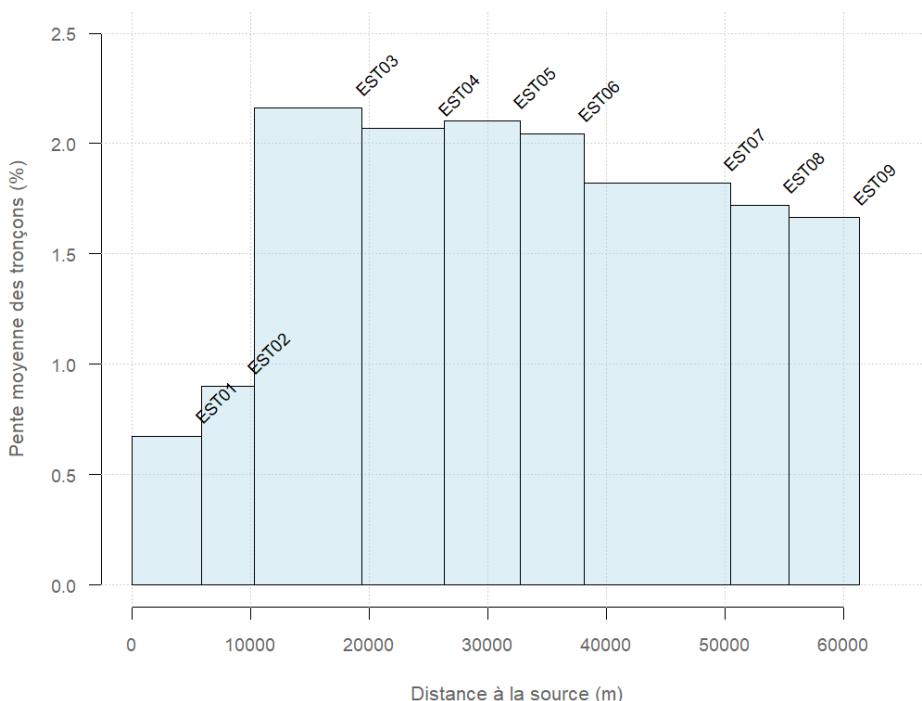


**Figure 3 : Profil en long du cours principal de l'Estéron au niveau des stations suivies et rang de Strahler correspondant.**

La déclivité de l'Estéron montre plusieurs ruptures de pente à l'échelle du linéaire :

- Le tronçon au niveau des deux premières stations EST01 et EST02 se situe au-dessus des 1000 m d'altitude. Les rangs de Strahler y sont de 2 pour EST01 caractérisant un « très petit cours d'eau » et de 3 pour EST02 caractérisant un « petit cours d'eau » ;
- Les quatre stations suivantes, depuis EST03 à EST06, sont situées dans un tronçon apparaissant homogène en termes de pente et dont l'altitude varie entre 711 et 367 m NGF. Les rangs de Strahler sont de 4 pour les trois premières stations caractérisant des cours d'eau « moyens » et de 5 pour EST06 (« grands » cours d'eau) ;
- Enfin, les altitudes des trois stations situées en aval du cours principal sont comprises entre 273 et 115 m NGF. Les rangs de Strahler y sont constants et égaux à 5 caractérisant cette partie aval comme un « grand cours d'eau ».

Le graphique suivant illustre les variations de la pente moyenne du linéaire entre deux stations consécutives. Ces pentes moyennes, exprimées en pourcentage, sont obtenues par la division de la différence altitudinale et de l'éloignement entre deux stations consécutives. Pour la première station, EST01, la valeur représente la pente moyenne du tronçon de la source à la station.



**Figure 4 : Pentes moyennes des tronçons du cours principal de l'Estéron entre les stations d'étude.**

Sur l'ensemble de son linéaire, l'Estéron présente une pente moyenne de 1,62 %.

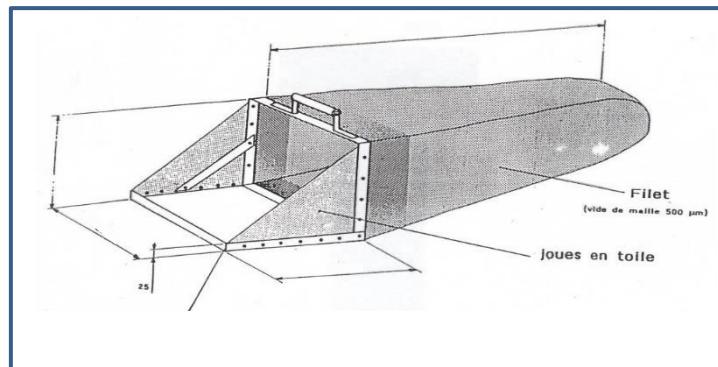
Les pentes moyennes des tronçons délimités par les stations suivies montrent clairement deux situations : le tronçon le plus apical dans lequel se trouvent les stations EST01 et EST02 et où la pente est la plus faible ; et le tronçon depuis EST02 jusqu'à la confluence avec le Var où les pentes moyennes sont plus élevées et décroissent plus ou moins régulièrement.

Sur l'ensemble de ces stations, les eaux de l'Estéron sont dominées par un **caractère calcaire** du fait des strates géologiques rencontrées dans le bassin versant topographique et géologique. Pour autant, **aucun phénomène d'encroûtement des substrats** n'a été observé au cours de cette étude. La présence de **limons colmatant** les substrats a été régulièrement relevée sur les stations suivies à l'exception d'EST01 et d'EST09.

Neuf fiches présentant le positionnement des neuf stations du cours principal ainsi que d'autres informations sont présentées en annexe 1 de ce rapport.

### 3.1.2. Matériel de prélèvement

Les prélèvements quantitatifs ont été réalisés à l'aide d'un filet Surber classiquement utilisé en cours d'eau peu profond dans les protocoles de bio-indication basés sur les macro-invertébrés benthiques. La surface des prélèvements est normalisée et correspond à 1/20<sup>ème</sup> de m<sup>2</sup> et la taille de vide de maille du filet est de 500 µm. Ce type de prélèvements permet d'estimer la richesse et la densité en individus pour une surface donnée.



**Figure 5 Filet de type Surber (d'après CABINET GAY, 2000)**

### 3.1.3. Plan d'échantillonnage

Sur chaque station, le plan d'échantillonnage a consisté à viser **trois types d'habitats** et à réaliser **deux répliques** dans chacun de ces habitats. Les habitats ciblés correspondent aux combinaisons de substrat et de vitesse d'écoulement suivant :

- **Habitats A** : substrats minéraux de grande taille (pierres et galets) dans des gammes de vitesse d'écoulement rapides. Ces habitats sont souvent rencontrés dans les zones de radier.
- **Habitats B** : substrats minéraux de grande taille (pierres et galets) dans des gammes de vitesse d'écoulement modérées. Ces habitats sont souvent rencontrés dans les radiers mais en bordure du chenal ou alors dans des plats courants.
- **Habitats C** : substrats les plus biogènes possibles rencontrés dans la station comme des bryophytes, des spermaphytes, des litières végétales ou des chevelus racinaires.

Au total, ce sont donc **six échantillons qui ont été prélevés par station lors de chaque campagne de prélèvement**.



**Photo 2 : Prélèvements quantitatifs à l'aide du filet Surber.**

### 3.1.4. Déroulement des campagnes de prélèvement

Sur les neuf stations du cours principal de l'Estéron, deux campagnes de prélèvements ont été réalisées en 2020 afin d'intégrer le cycle annuel des invertébrés :

- **Une campagne printanière** a été réalisée au mois de **mai 2020** ;
- **Une campagne estivale** a été réalisée en **septembre 2020**.

En complément de ces deux campagnes de prélèvements quantitatifs, des captures des stades larvaires aquatiques et des imagos aériens ont également été réalisées lors de plusieurs campagnes sur certaines de ces stations du cours principal. La méthodologie pour ce type de prospection de la faune est présentée dans le chapitre 3.2.

## 3.2. Prélèvements qualitatifs sur le cours principal de l'Estéron et ses affluents

Les prélèvements qualitatifs sont plus ciblés que ceux décrits précédemment. Ils consistent à **rechercher des larves, des nymphes ou des adultes, qui peuvent être déterminés à l'espèce**. Il s'agit par exemple des nymphes mûres de trichoptères ou de diptères Simuliidae. L'ensemble des habitats présents dans la station est prospecté pour estimer le plus efficacement la diversité locale.

Les prélèvements qualitatifs ont pour but d'estimer au mieux la richesse en invertébrés aquatiques de l'ensemble du bassin versant de l'Estéron et en particulier, d'évaluer **l'intérêt patrimonial de ces communautés** en recherchant la présence **d'espèces endémiques, rares, ou localisées**.

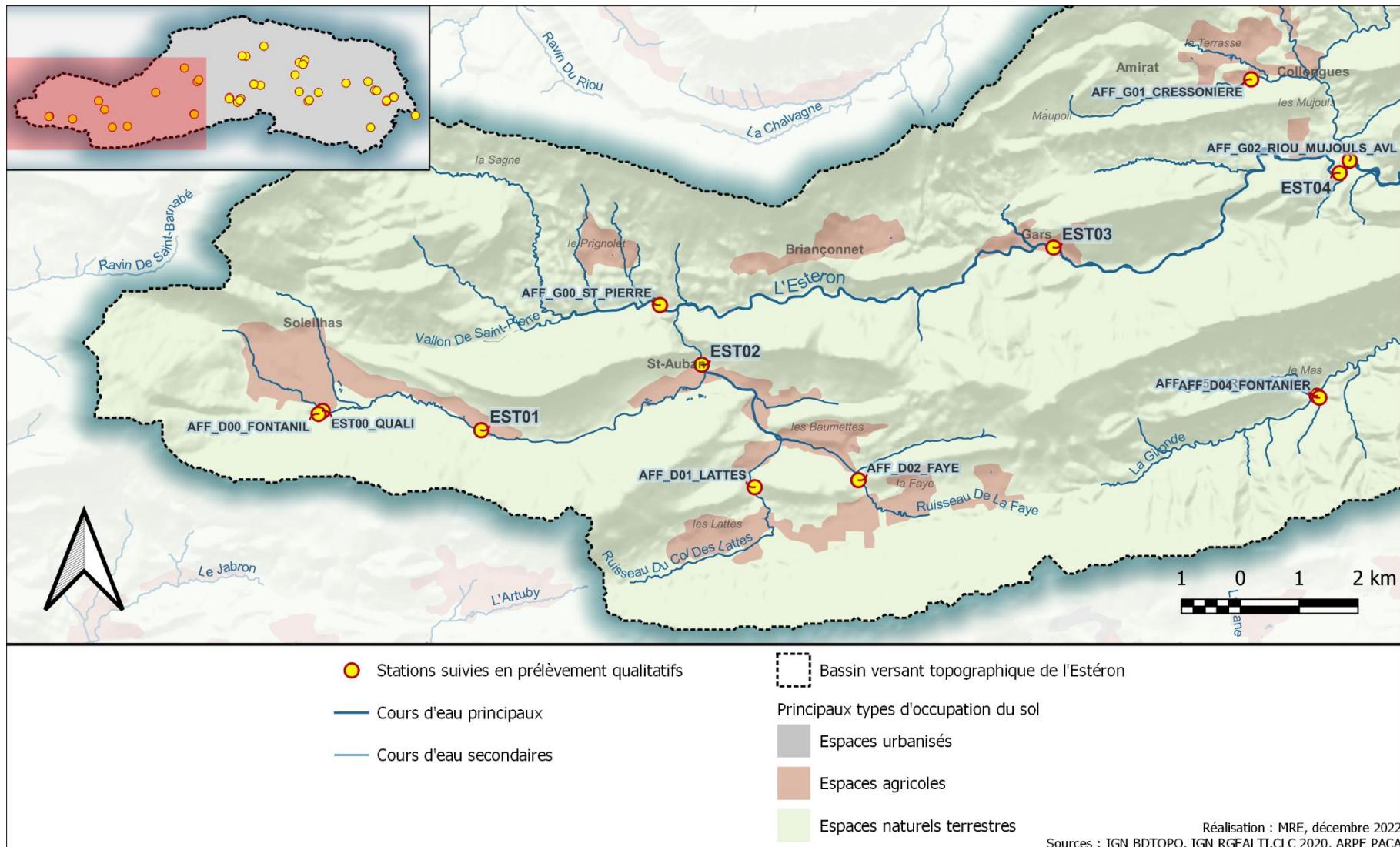
### 3.2.1. Stations suivies

Au total, 42 stations de cours d'eau ont été prospectées dans le bassin versant de l'Estéron. Ces sites se répartissent de la manière suivante :

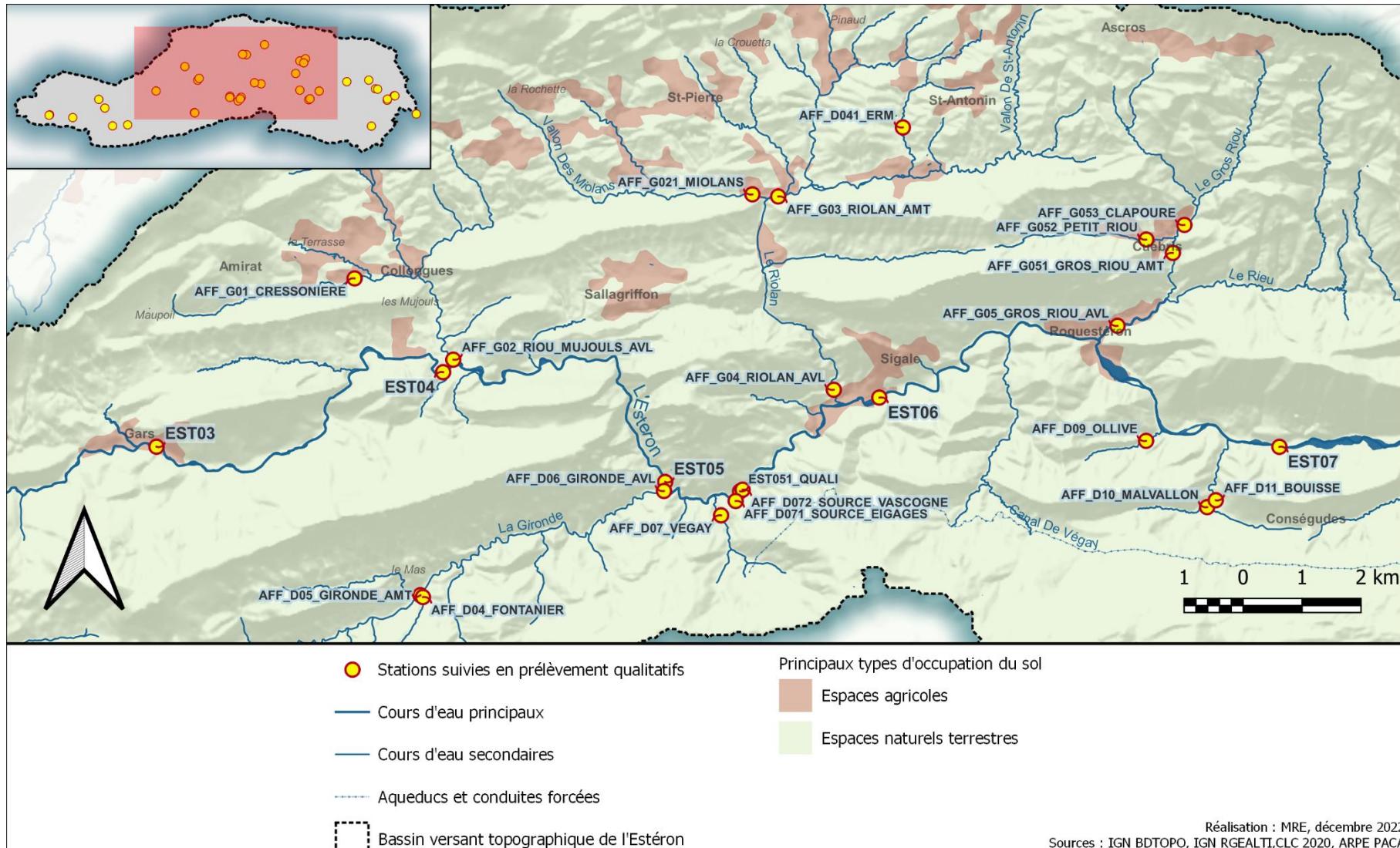
- **14 stations sur le cours principal de l'Estéron** dont celles suivies avec les prélèvements quantitatifs sauf EST09. Le code de ces stations commence par « **EST** ». Dans l'ensemble des huit stations du cours principal de l'Estéron qui ont fait l'objet de prélèvements quantitatifs comme décrits au chapitre précédent, les prélèvements qualitatifs ont eu pour objectif de compléter la liste faunistique afin d'estimer au plus près la diversité présente. Sur ce cours principal de l'Estéron, des stations supplémentaires ont été prospectées qualitativement lorsqu'un intérêt faunistique était pressenti dans un secteur singulier. ;
- **15 stations sur les affluents de rive droite**. Le code de ces stations commence par « **AFF\_D** » ;
- **14 stations sur les affluents de rive gauche**. Le code de ces stations commence par « **AFF\_G** ».

Pour distinguer ces stations, des codes sont utilisés dans ce rapport. Ils se composent de la situation du cours d'eau (EST / AFF\_D/ AFF\_G), un numéro croissant de l'amont vers l'aval et le nom du cours d'eau accompagné, s'il y a lieu, d'une précision (par exemple : « **AFF\_G04\_RIOLAN\_AMT** » pour *station située sur un affluent de rive droite en quatrième*

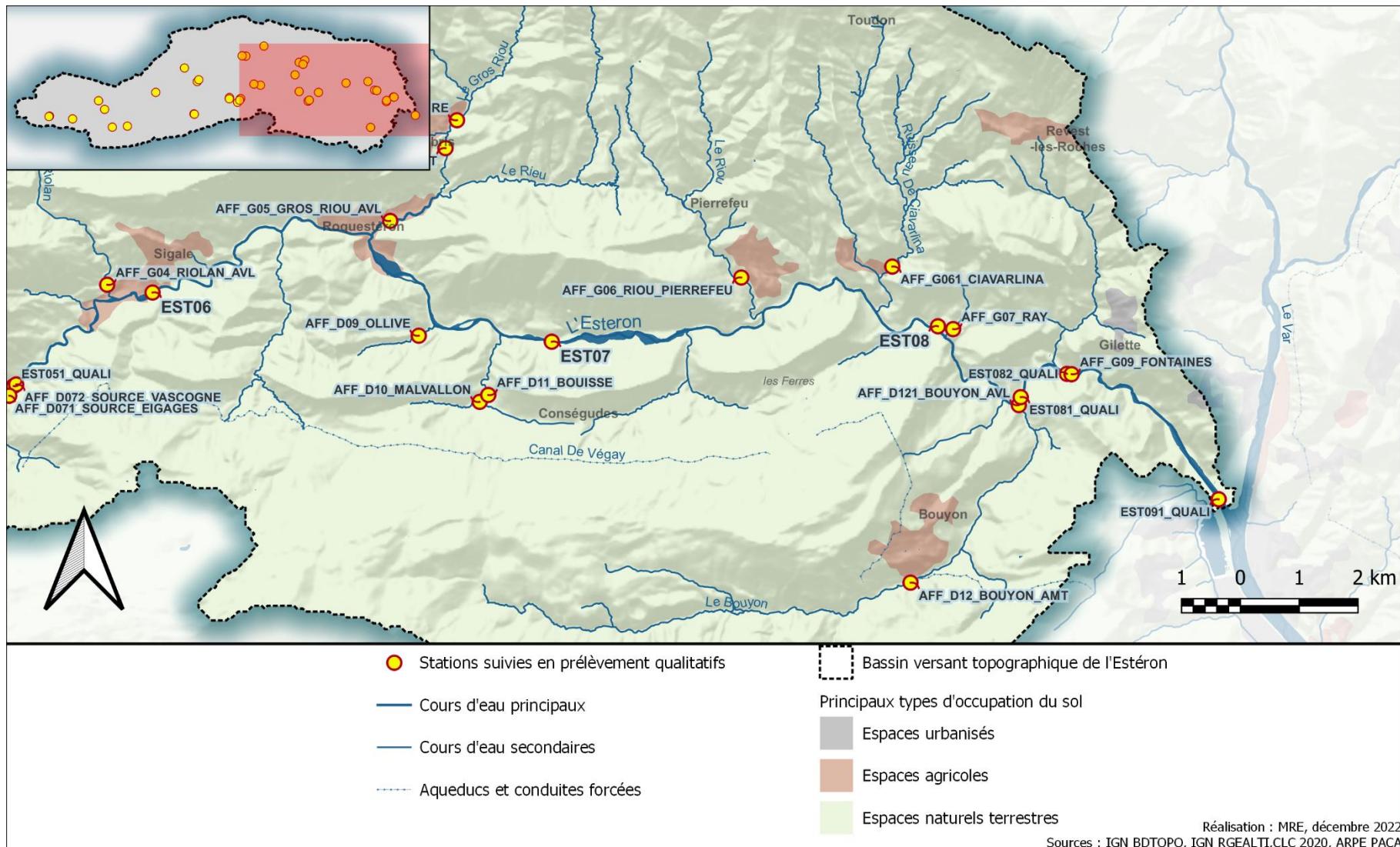
*position depuis l'amont du bassin, sur le Riolan dans sa partie amont). Les cartes suivantes présentent la répartition des stations échantillonnées qualitativement.*



Carte 6 : Localisation des stations échantillonnées qualitativement dans la partie amont du bassin versant de l'Estéron.



**Carte 7 : Localisation des stations échantillonnées qualitativement dans la partie médiane du bassin versant de l'Estéron.**



### 3.2.2. Protocole de prélèvement

Dans une station, les prélèvements qualitatifs ciblent particulièrement les stades d'invertébrés aquatiques permettant une détermination au niveau de l'espèce. Les stades ainsi visés peuvent correspondre aux larves aquatiques, aux nymphes aquatiques et aux imagos aériens. Il s'agit par exemple des nymphes mûres de trichoptères ou de diptères Simuliidae. L'ensemble des habitats présents dans la station est prospecté pour estimer la richesse de manière la plus exhaustive que possible.



*Photo 3 : Larve d'Ephémères (phase aquatique) et imaginaire ou adulte (phase aérienne).*

Pour la **phase aquatique**, la prospection se fait en soulevant les éléments du substrat et en recherchant à vue les invertébrés aquatiques qui sont alors précautionneusement capturés à l'aide d'une pince et fixés aussitôt à l'alcool à 80°. Pour la **phase terrestre** qui concerne uniquement les formes adultes de certains ordres d'insectes (Trichoptères, Plécoptères, Ephéméroptères, Odonates), les prélèvements se font à vue ou en fauchant la végétation rivulaire à l'aide d'un filet à papillons.



*Photo 4 : Prélèvements qualitatifs à l'aide d'une pince (phase aquatique) et d'un filet à papillons (phase terrestre).*

Dans un objectif d'exhaustivité et afin de permettre une comparaison entre les stations, ces deux types de capture des phases aquatique et aérienne d'invertébrés ont été effectués selon une méthodologie fixe. **Deux opérateurs ont prospecté chaque station en un temps fixé à 1 heure**, le premier se concentrant sur la phase aquatique et le second sur la phase terrestre.

Les stations suivies en prélèvement qualitatif ont également fait l'objet **de chasses de nuit au piège lumineux**, afin de capturer des adultes nocturnes de Trichoptères, Plécoptères ou Ephéméroptères.



**Photo 5 Réalisation de chasses de nuit à l'aide d'un piège lumineux.**

Les invertébrés aquatiques capturés à l'aide de ces méthodes ont ensuite été conservés dans de l'alcool à 80°. Le tri et la détermination ont été réalisés au laboratoire. Actuellement, il n'existe pas en France de guide complet sur cette faune aquatique. De nombreuses publications en langues étrangères et ouvrages spécialisés ont donc été consultés pour la détermination des organismes étudiés, dans la mesure où les clefs de déterminations existent. Ces identifications réalisées à la Maison Régionale de l'Eau<sup>3</sup> ont pu être validées si besoin par des taxonomistes reconnus comme Gennaro COPPA (OPIE), ou Michel BRULIN (OPIE). Les résultats échangés permettent également de compléter l'inventaire actuellement réalisé par l'OPIE sur le territoire français<sup>4</sup>.

### 3.2.3. Déroulement des campagnes de prélèvement

Au cours de l'année 2020, les prélèvements ont surtout concerné les affluents de rive droite de l'Estéron. En 2021, les affluents situés en rive gauche de l'Estéron ont été ciblés. Les stations du cours principal ont fait l'objet de prospections en 2020 et lors de la première campagne de 2021.

Le tableau suivant synthétise ces informations.

<sup>3</sup> <https://www.maisonregionaledeleau.org/>

<sup>4</sup> <https://www.opie-benthos.fr/opie/monde-des-insectes.html>

Tableau 1 : Bilan des campagnes de prélèvement qualitatif.

	Station	Rivière	C1 mai 2020	C2 juin/juill. 2020	C3 sept./oct. 2020	C4 mars 2021	C5 mai 2021	C6 juin 2021	C7 sept. 2021	Nbre de campagnes
Cours principal	EST00_QUALI	Estéron						X	X	2
	EST01		X	X	X	X				4
	EST02		X	X	X	X				4
	EST03		X	X	X	X				4
	EST04		X	X	X	X				4
	EST05		X	X	X	X				4
	EST051_QUALI		X	X	X	X				4
	EST06		X	X	X	X				4
	EST07		X	X	X	X				4
	EST08		X	X	X	X				4
	EST081_QUALI		X	X	X	X				4
	EST082_QUALI		X	X	X	X				4
	EST09									0
	EST091_QUALI		X	X	X	X				4
Affluents rive droite	AFF_D00_FONTANIL	Sources de Fontanil						X	X	2
	AFF_D01_LATTES	Ruisseau du Col des Lattes	X	X	X					3
	AFF_D02_FAYE	Ruisseau de la Faye	X	X	X					3
	AFF_D04 FONTANIER	Vallon de Pra Clapier	X	X	X		X			4
	AFF_D041_ERM	Ruisseau de l'Erm						X		1
	AFF_D05_GIRONDE_AMT	La Gironde	X	X	X		X			4
	AFF_D06_GIRONDE_AVL		X	X	X	X	X			5
	AFF_D07_VEGAY	Vallon de Vegay	X	X	X	X				4
	AFF_D071_SOURCE_EIGAGES	Source des Eigages	X	X	X					3
	AFF_D072_SOURCE_VASCOGNE	Source en RD de l'Estéron	X							1
	AFF_D09_OLLIVE	Vallon de l'Ollive	X	X						2
	AFF_D10_MALVALLON	Ruisseau de Malvallon	X							1
	AFF_D11_BOUISSSE	Vallon de la Bouisse	X	X	X	X	X		X	6
	AFF_D12_BOUYON_AMT	Bouyon		X			X			3
	AFF_D121_BOUYON_AVL				X		X	X		3
Affluents rive gauche	AFF_G00_ST_PIERRE	Vallon de St Pierre				X	X	X	X	4
	AFF_G01_CRESSIONIERE	La Cressionière						X	X	2
	AFF_G02_RIOU_MUJOULS_AVL	Le Riou				X	X	X	X	4
	AFF_G021_MIOLANS	Vallon des Miolans						X	X	2
	AFF_G03_RIOLAN_AMT	Le Riolan		X			X	X		3
	AFF_G04_RIOLAN_AVL		X	X		X			X	4
	AFF_G051_GROS_RIOU_AMT	Gros Riou					X			1
	AFF_G05_GROS_RIOU_AVL		X	X		X	X			4
	AFF_G052_PETIT_RIOU	Sources de Fontanil						X		1
	AFF_G053_CLAPOURE	Ruisseau de Clapoure						X		1
	AFF_G06_RIOU_PIERREFEU	Riou de Pierrefeu				X	X			2
	AFF_G061_CIAVARLINA	Ruisseau de Ciavarlina						X		1
	AFF_G07_RAY	Ravin du Ray				X	X	X		3
	AFF_G09 FONTAINES	Source de Fontaines					X	X		2

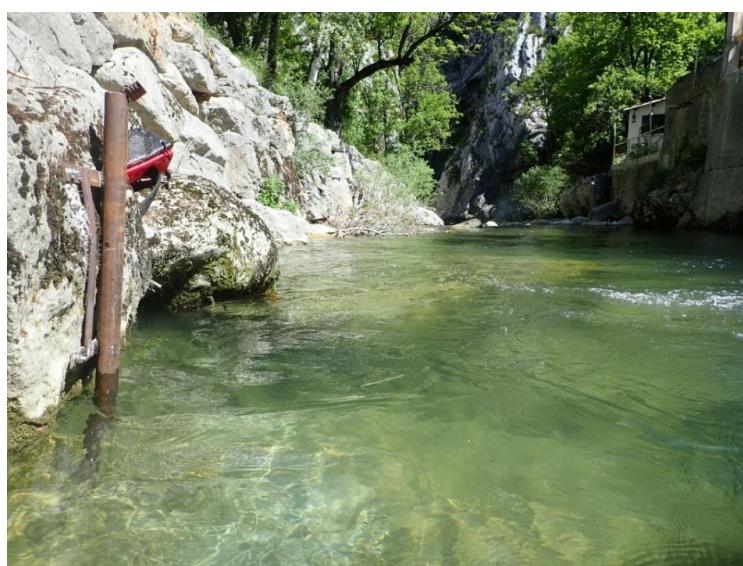
### 3.3. Enregistrement des températures et pressions de l'eau

Dans le but de caractériser le contexte hydroclimatique du cours principal de l'Estéron et les contextes thermiques de certains affluents, des sondes d'enregistrements des températures et des pressions ont été disposées dans plusieurs stations du bassin versant. La Carte 9 présente la localisation de ces sondes.

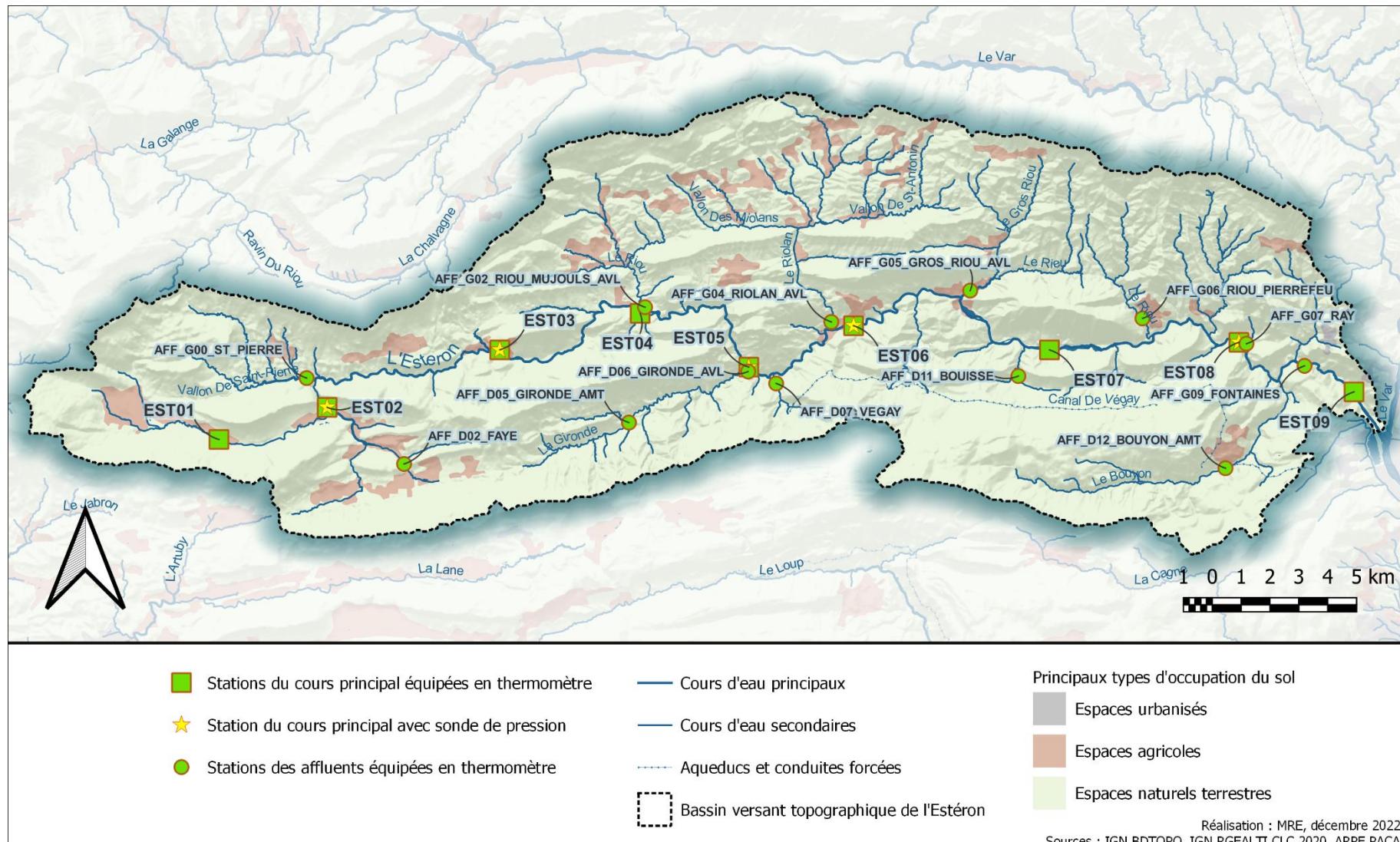
Au total, 22 enregistreurs thermiques ont permis de suivre la thermie aquatique de certaines stations étudiées. Cinq sondes de pression aquatique ou limnimètres ont été installées sur certaines stations du cours principal de l'Estéron.

Le suivi de la pression de l'eau sur un site permet d'approximer les variations de hauteurs d'eau et de suivre les tendances des variations hydrologiques. L'impossibilité de multiplier des jaugeages des débits au droit de ces limnimètres limite la transformation des hauteurs en débits. Les pressions aquatiques ont été corrigées en retirant la pression atmosphérique enregistrée au niveau de la station EST01. Cette étape de compensation atmosphérique a été réalisée en tenant compte des différences altitudinales des stations. Ce n'est qu'après cela, que les valeurs de pression (en kPa) ont pu être converties en hauteurs d'eau exprimées en cm.

Dans cinq stations du cours principal (EST02, EST03, EST05, EST06, EST08), des capteurs de pression et de température de marque *Prosensor* ont été installés. Le capteur de pression aquatique sur la station EST01 a subi un dysfonctionnement ce qui a empêché l'exploitation de ses données. Un second capteur également placé au niveau de la station EST01, a enregistré les variations de pression atmosphérique afin de pouvoir effectuer une compensation barométrique des pressions aquatiques sur les autres stations en tenant compte des différences altitudinales des stations. Le limnimètre disposé sur la station EST06 a subi également un dysfonctionnement. Cette chronique n'est donc pas exploitable. Ces capteurs de pressions ont été solidement fixés à des éléments stables et dans des zones profondes choisies pour rester immergées durant les étiages. La photo ci-dessous illustre ce type de dispositif.



**Photo 6 : Système de fixation permettant de maintenir le capteur de température et de pression solidement immergé.**



Les cadences d'enregistrement des thermographes et limnimètres ont été fixés à 15 minutes, parfois 30 minutes sur certaines stations.

Pour les stations où seules les températures ont été mesurées, les sondes utilisées sont des thermographes de marque HOBO de type data logger Pendant UA Temp/Alarm. Les thermographes sont positionnés dans le cours d'eau à environ 50 cm de la surface, à l'abri de l'ensoleillement direct. Ils sont fixés dans un tube de protection en PVC ou aluminium, vissés dans un support solide de type rocher ou attachés à l'aide de fil de fer épais (pour les supports de type racine). Pour éviter le vol ou les détériorations volontaires, les thermographes sont camouflés et placés dans des secteurs peu ou pas fréquentés. Les relevés des enregistrements ont été réalisés le plus régulièrement possible au cours de la période d'étude, dans la mesure où les conditions hydrologiques le permettaient.

Pour traiter ces données, la Maison Régionale de l'Eau a développé un script d'analyse sous le logiciel R<sup>5</sup> permettant, à partir des données brutes des thermographes et limnimètres, de réaliser les étapes suivantes :

- Découpage du début et de la fin de chaque chronique en fonction des connaissances de terrain et de l'analyse visuelle des amplitudes thermiques ;
- Si des lacunes sur de courtes périodes (< 2 h) sont détectées, celles-ci peuvent être reconstituées à partir des valeurs qui encadrent les lacunes ;
- Harmonisation des formats temporels entre les différentes chroniques ;
- Compensation barométrique des pressions aquatiques à partir des enregistrements atmosphériques ;
- Qualification de la donnée (valide, douteuse, inconnue, reconstituée) en se basant entre autres sur une détection automatique de variations « anormales » ou soudaines des données ou bien de l'absence de variation (les données dont la qualité est qualifiée de douteuse sont écartées de l'ensemble des analyses postérieures) ;
- Concaténation des données des différentes chroniques d'un même site selon une séquence temporelle cohérente et adapté à la cadence d'enregistrement disponible la plus fine lorsque plusieurs chroniques sont concaténées sur un même site ;
- Exportation des données à la cadence la plus précise possible et sous format Excel, ainsi que des statistiques de base (moyenne, maxima, minima, amplitude) journalières et mensuelles ;
- Représentations graphiques des données permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle des températures et de comparer les différents sites d'enregistrement ;
- Calcul de métriques synthétiques des régimes thermiques inspirées par l'outil MACMA SALMO développé en 2010 par la FPPMA de Haute Savoie et l'INRA UMR CARRTEL<sup>6</sup> ainsi que d'autres métriques développées en interne par la MRE.

<sup>5</sup> R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

<sup>6</sup> <https://www.pechahutesavoie.com/telechargement/etude-et-publications/outils-et-methodologies>

Les métriques synthétiques calculées sur les données thermiques des stations instrumentées sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2 : Métriques synthétiques des enregistrements de températures.**

Code	Description
Dd	Date de début de la période étudiée
Df	Date de fin de la période étudiée
Duree	Durée de la période en jours
Ti_min	Température instantanée minimale
Ti_max	Température instantanée maximale
ATi	Amplitude thermique sur la période étudiée
Ajmax_Ti	Amplitude thermique journalière maximale
D_Ajmax_Ti	Date à laquelle l'amplitude thermique journalière maximale a été observée
Tmj_min	T° moyenne journalière minimale
Tmj_max	T° moyenne journalière maximale
ATmj	Amplitude thermique des moyennes journalières
D_Tmj_max	Date à laquelle T° instantanée maximale a été observée
Tmp	T° moyenne de la période
Tm30j_max	T° moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds
Dd_Tm30j_max	Date de début de la période correspondante aux 30 jours consécutifs les plus chauds
Df_Tm30j_max	Date de fin de la période correspondante aux 30 jours consécutifs les plus chauds
Nbj_Tmj_4a19	Nombre total de jours durant lesquels la T° est compris entre 4 et 19°C
pourcJ_Tmj_4a19	Pourcentage de jours où la T° moy journalière est comprise entre 4 et 19°C
Dd_Tmj_inf4	Date à laquelle la T° moy journalière est pour la première fois < 4°C
Df_Tmj_inf4	Date à laquelle la T° moy journalière est pour la dernière fois < 4°C
pourJ_Tmj_inf4	Pourcentage de jours où la T° moy journalière est < 4°C
pourJ_Tmj_sup19	Pourcentage de jours où la T° moy journalière est > 19°C
Nb_Ti_sup19	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est > 19°C
Nb_sq_Ti_sup19	Nombre de séquences durant lesquelles les T° restent > 19°C
Nbmax_Ti_csf_sup19	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles les T° restent > 19°C
Nb_Ti_supEg25	Nombre d'heures totales où la T° est ≥ 25°C
Nb_sq_Ti_supEg25	Nombre de séquences durant lesquelles les T° restent ≥ 25°C
Nbmax_Ti_csf_supEg25	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles les T° restent ≥ 25°C
Nb_Ti_supEg15	Nombre d'heures totales où la T° est ≥ 15°C
Nb_sq_Ti_supEg15	Nombre de séquences durant lesquelles les T° restent ≥ 15°C
Nbmax_Ti_csf_supEg15	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles les T° restent ≥ 15°C
Vit_deg_j_TMJ	Vitesse d'échauffement (en °C/j) des T° moy journalière pendant la période printanière
Vit_deg_j_Max	Vitesse d'échauffement (en °C/j) des T° max journalière pendant la période printanière
Vit_deg_j_Min	Vitesse d'échauffement (en °C/j) des T° min journalière pendant la période printanière

Pour les trois dernières métriques de cette liste qui concernent des vitesses d'échauffement des moyennes, maximas et minimas journaliers durant la période printanière, le principe est de délimiter des périodes où l'échauffement apparaît linéaire et de calculer les pentes des droites de régression linéaire. Ces valeurs sont ensuite exprimées en °C/j sur la période considérée. Le calcul de ces variables a pour objectif de traduire quantitativement la dynamique d'échauffement des eaux. Cette notion étant attendue comme influente sur les

tendances populationnelles de certains invertébrés (rapidité de réalisation des cycles aquatiques, possibilité de réaliser plusieurs générations au cours d'une saison).

### 3.4. Autres paramètres mesurés

En complément des prélèvements de faune benthique et de l'instrumentation sur certaines stations en thermographes et limnimètres, des mesures ponctuelles de jaugeages et de physico-chimie ont été réalisées.

#### 3.4.1. Jaugeages des débits instantanés

Des estimations de débits instantanés ont été réalisées sur l'ensemble du cours principal de l'Estéron à partir de mesures des vitesses d'écoulement régulièrement espacées le long d'un transect et à différentes profondeurs. Cinq stations ont été régulièrement jaugées : EST02, EST03, EST05, EST06, EST08. Au total, quatre campagnes de mesures ont été réalisées au cours de la période d'étude. Lorsque des particularités locales le justifiaient, des mesures complémentaires ont pu être réalisées.

Le protocole de mesures des débits tient compte des disparités spatiales mais également de l'évolution temporelle de l'hydrologie du cours d'eau à l'échelle du bassin versant. Ainsi, les campagnes de mesures sont réparties tout au long de l'année d'étude afin de rendre compte des évolutions saisonnières. Lorsque les conditions d'écoulement ne permettaient pas aux opérateurs de travailler de manière sécurisée dans le cours d'eau, les jaugeages n'ont pas pu être réalisés. Dans ces cas-là, les débits disponibles aux différentes stations de suivis de la banque Hydro seront intégrés à l'étude.

#### 3.4.2. Analyses physico-chimiques des eaux

Des mesures ponctuelles des principaux paramètres physico-chimiques des eaux ont été réalisées lors des campagnes de prélèvements biologiques. Les paramètres étudiés sont le pH, la conductivité, la salinité, la concentration en oxygène, la saturation en oxygène et la température. Ces paramètres sont mesurés *in situ* l'aide d'une sonde multi-paramètre de marque *Hach Lange*.

Ces mesures visent d'abord à caractériser l'état chimique du cours d'eau au niveau des stations retenues sur le cours principal. Au total, quatre campagnes de mesures ont été réalisées au cours de la période d'étude.

Les résultats permettent d'estimer l'influence du contexte géologique et anthropique. Les mesures de la minéralisation des eaux au travers de la conductivité renseignent par exemple sur le degré d'influence des sources sur le bassin. Les mesures d'oxygène permettront également de connaître les éventuelles sursaturations ou sous-saturation en oxygène dissous.

### 3.5. Traitement de données

La plupart des traitements statistiques ont été réalisés avec le logiciel R<sup>5</sup>.

Les représentations en boites à moustache utilisées dans ce rapport reprennent les statistiques conventionnellement utilisées pour ce type de graphique : la médiane au milieu de la boîte, le 1er quartile et 3ème quartile en limites basse et haute de la boîte, les moustaches

correspondent au produit des 1er et 3ème quartiles par 1,5 fois l'espace interquartile, les points représentent les « outliers » dont les valeurs dépassent les moustaches.

Pour visualiser les variations conjointes de températures et de hauteurs d'eau sur les stations qui ont été équipés pour cela, un type de graphique présente les températures instantanées en fonction des hauteurs d'eau instantanées. Chaque valeur enregistrée dans la chronique à une cadence de 15 ou de 30 minutes est ainsi représentées sur ce plan. Afin de mettre en évidence les modes les plus fréquents parmi ces couples {Ti ; Hi}, les contours de densités estimés par méthode des noyaux (*two dimensional kernel density estimation* en anglais) sont représentés sur ce plan. Ces graphiques ne sont présentés que lorsque les chroniques de températures et de hauteurs couvrent des années hydrologiques complètes.

Pour la mise en évidence de l'influence des variables abiotiques sur la structuration des peuplements, notre méthodologie d'analyse s'est largement inspirée du travail d'une équipe de chercheurs autrichiens : Georg H. Niedrist et Leopold Füreder publiée en 2020 dans le journal *River Research and Applications*<sup>7</sup>.

Pour l'application à notre étude et dans l'optique de focaliser nos analyses sur la relation entre la structure des communautés d'invertébrés et les régimes thermiques, nous avons été contraints de sélectionner les stations sur lesquelles les chroniques de températures sont suffisamment longues pour être représentatives d'un cycle hydrologique complet et ce particulièrement dans les périodes d'extrêmes. Même si les chroniques de thermie et de hauteurs d'eau ne débutent au mieux que lors de la première campagne de prélèvements quantitatifs de mai 2020 ; que ces chroniques présentent parfois des lacunes importantes et qu'elles ne couvrent qu'une seule année n'étant pas forcément représentative des conditions climatiques du bassin versant, nous avons sélectionné parmi les métriques celles qui paraissent moins dépendantes de la temporalité saisonnière comme la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds.

Ainsi, sur les stations du cours principal dont la faune a été étudiée avec des prélèvements quantitatifs (chapitre 4.4.1.4), les stations EST07 et EST09 ont dû être retirées de l'analyse décrite ci-dessous en raison des lacunes des chroniques de températures dans ces tronçons (voir la Figure 13). Pour le traitement des stations des affluents et du cours principal dont la faune a été échantillonnée qualitativement, l'ensemble des chroniques de températures a pu être conservé.

Nous avons appliqué une *nonmetric multidimensional scaling* (NMDS) sur les données agrégées par campagne et par station pour les prélèvements quantitatifs (les six échantillons d'une station lors d'une campagne) et sur les données agrégées par station pour les données qualitatives. Cette méthode statistique d'ordination permet de visualiser les relations entre les éléments d'un jeu de données sur un nombre restreint d'axes. Pour la NMDS sur ces données quantitatives, la matrice de distance utilisée repose sur les distances de Bray. Pour les données qualitatives, les distances de Jaccard ont été utilisées en tant que matrice d'entrée de la NMDS.

Les variations de structuration des communautés en fonction de métriques thermiques et de caractéristiques morphologiques ont ensuite été testées en appliquant une PERMANOVA (*permutational multivariate analysis of variance*) avec 999 permutations sur la matrice de

<sup>7</sup> Niedrist GH, Füreder L. Real-time warming of alpine streams: (re)defining invertebrates' temperature preferences. River Res Applic. 2020;1–11. <https://doi.org/10.1002/rra.3638>

distance de Bray ou celle de Jaccard. L'évaluation de l'importance des variables abiotiques a ensuite été estimée sur la base du R<sup>2</sup> partiel et de la p-value des résultats des PERMANOVA. Les variables environnementales significatives ( $p < 0.05$ ) ont ensuite été projetées dans l'espace de l'ordination de la NMDS (fonction *envfit* du package *vegan*). Les variables environnementales sont considérées dans ce processus comme les variables dépendantes qui sont expliquées par les scores de l'ordination et chaque variable dépendante est analysée séparément. La significativité et la qualité de l'ajustement des variables environnementales à cet espace de la NMDS ont été évaluées en réalisant 999 permutations du jeu de données.

Pour les données quantitatives des stations du cours principal de l'Estéron, la relation entre la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (Tm\_30j\_max) et la richesse taxonomique a été testée et décrite en utilisant un modèle linéaire simple sur les données de chaque campagne à chaque site et en faisant également figurer les déviations.

Des modèles de régression des moyennes pondérées ont été utilisés pour quantifier les optima et les tolérances basées sur la liste faunistique et les Tm\_30j\_max de chaque site. Ces optima indiquent la Tm\_30j\_max optimale pour un taxon, c'est-à-dire la Tm\_30j\_max pour laquelle l'abondance du taxon est attendue la plus forte, alors que les tolérances reflètent la plage d'occurrence du taxon sur une gamme de températures. Ces préférences modélisées ont été représentées sur des graphiques univariés pour les taxons retrouvés dans plus de 3 % des échantillons.

## 4. RESULTATS

### 4.1. Contexte hydrologique

#### 4.1.1. Données des stations limnimétriques de l'Hydro Portail

L'Estéron bénéficie de la présence de **deux stations de mesure de débit** en continu, suivies par la DREAL PACA. Les données sont diffusées sur l'Hydro Portail du SCHAPI<sup>8</sup>. La station la plus en amont est située au pont du Coude sur la commune de Sigale, ce qui équivaut dans la présente étude à la station EST06. La seconde est située en fermeture de bassin, sur la commune du Broc au niveau du lieu-dit de La Clave, ce qui équivaut à la station étudiée EST09.

**Pour la station du Pont du Coude à Sigale** (Figure 6), située à environ 36 km de la source et à plus de la moitié du linéaire de l'Estéron, le débit moyen interannuel (module) est de 4,4 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Pour l'année 2020, la moyenne annuelle est de 3 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Bien que cette valeur soit inférieure au module, elle reste supérieure à la quinquennale sèche (2,7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). La valeur maximale de débit moyen journalier sur cette station date du 23 novembre 2019 lorsqu'un important épisode de crue s'est produit avec un débit instantané le plus élevé jamais enregistré atteignant 127 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

En début d'année 2020, le débit décroît progressivement jusqu'à fin février. Hormis un coup d'eau au début du mois de mars, la fin d'hiver et le début du printemps 2020 sont caractérisés par des débits faibles pour la saison.

Le débit mensuel d'avril 2020 est d'ailleurs proche de la quinquennale sèche. Les précipitations de mai et juin participent à réalimenter le cours d'eau durablement et les débits estivaux restent relativement soutenus. L'étiage est atteint à la fin du mois de septembre. Il est suivi par une crue importante lié au passage de la tempête Alex qui a touché la région le 02 octobre 2020. Le débit moyen journalier atteint ici 59 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

À la suite de cette montée des eaux de forte intensité, le débit décroît et le reste de l'automne est marqué par l'absence de précipitation significative, en particulier au cours du mois de novembre. Le débit du début du mois de décembre est alors proche de celui observé au cours de l'étiage estival. Il faut attendre le 20 décembre 2020 pour que les précipitations réalimentent de manière efficace le cours d'eau.

Des débits proches des moyennes interannuelles sont observés jusqu'à la mi-février 2021 avant une diminution marquée des débits dont les valeurs chutent sous les quinquennales sèches durant la seconde moitié du mois de mars. Des précipitations au début du mois d'avril et de mai permettent de retrouver un niveau entre moyennes interannuelles et quinquennales sèches.

La période estivale de juin à la fin de septembre 2021 est marquée par une faible hydraulité de l'Estéron à ce niveau : les débits y sont restés au niveau des quinquennales sèches. La fin de l'année 2021 reste marquée par des valeurs faibles ponctuées par quelques pics de réaction aux précipitations. Globalement, l'année 2021 se caractérise par une hydrologie déficitaire.

<sup>8</sup> <https://hydro.eaufrance.fr/>

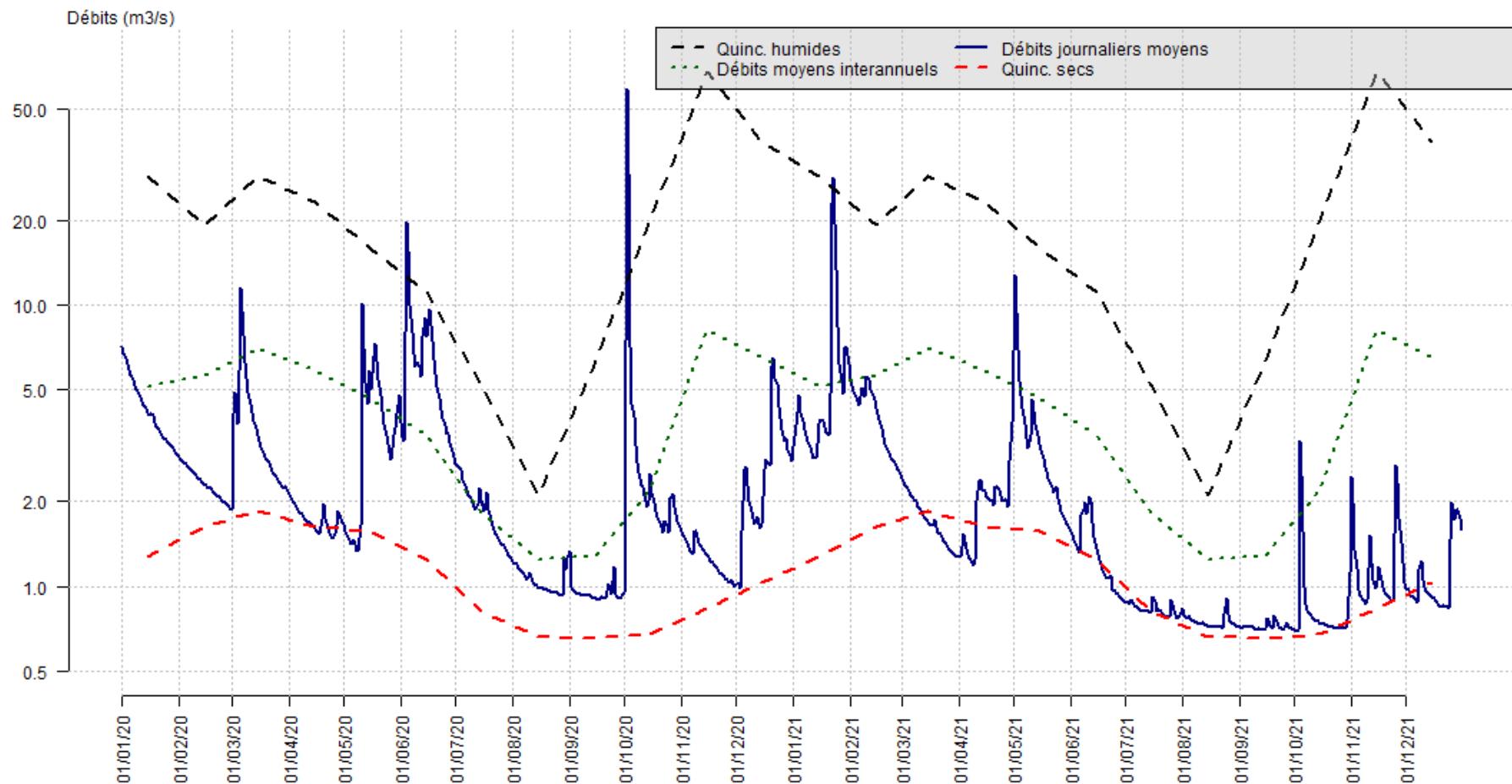


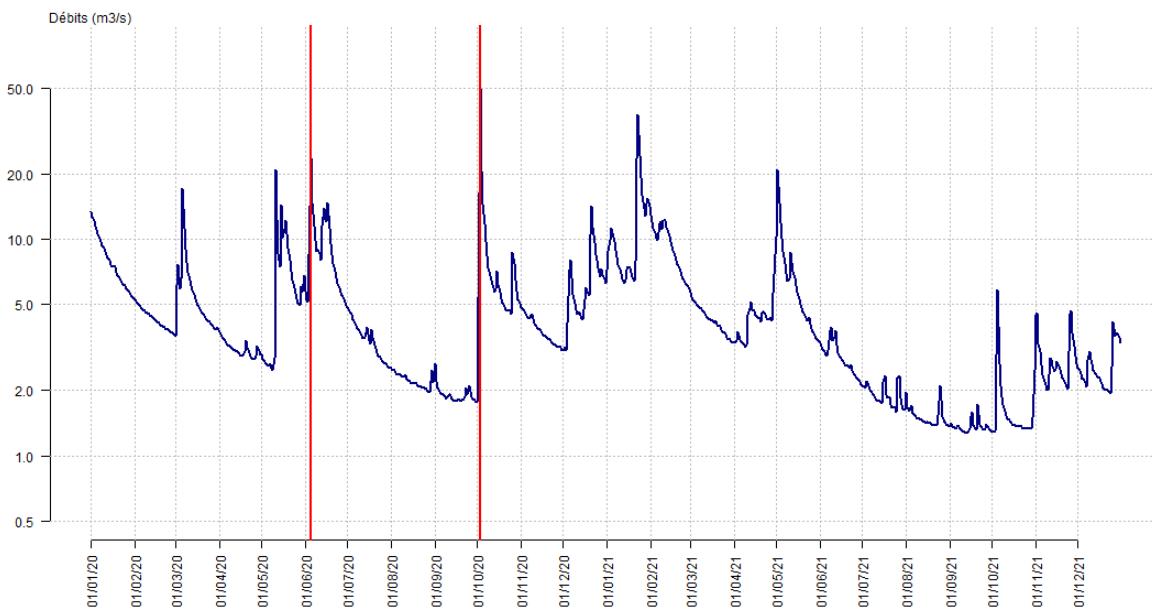
Figure 6 : Evolution des débits moyens journaliers de l'Estéron au pont du Coude à Sigale au cours des années 2020 et 2021 et comparaison aux valeurs mensuelles des moyennes interannuelles, des quinquennales sèches et humide. L'échelle des ordonnées est ici logarithmique.



*Photo 7 : La Gironde, affluent de l'Estéron après la crue du 2 octobre 2020.*

**Au niveau de la station limnimétrique située sur la commune du Broc au lieu-dit de la Clave** (Figure 7), les valeurs de quinquennales sèches, humides et des moyennes mensuelles interannuelles ne sont pas disponibles. Le graphique suivant présente donc uniquement les débits moyens journaliers de l'Estéron.

Globalement, les variations des débits au Broc sont très semblables à celles au niveau de Sigale. La valeur de la crue du 2 octobre 2020 apparaît ici inférieure à l'intensité enregistrée en amont mais cet événement a entraîné une discontinuité forte dans les données empêchant la comparaison avec le pic de crue sur la station du Pont de Sigale.



*Figure 7 : Evolution des débits moyens journaliers de l'Estéron au Broc au lieu-dit de la Clave au cours des années 2020 et 2021. L'échelle des ordonnées est ici logarithmique. Les lignes verticales rouge représentent des « discontinuités fortes » dans les données fournies par l'Hydro Portail.*

#### 4.1.2. Débits instantanés

Les débits ont été mesurés régulièrement lors des quatre campagnes réalisées en 2020 et 2021 sur le linéaire de l'Estéron (Figure 8). La comparaison entre les différentes périodes montre des valeurs en légère diminution entre les données de mai et juillet. En septembre, les valeurs correspondent à celles de l'étiage estival.

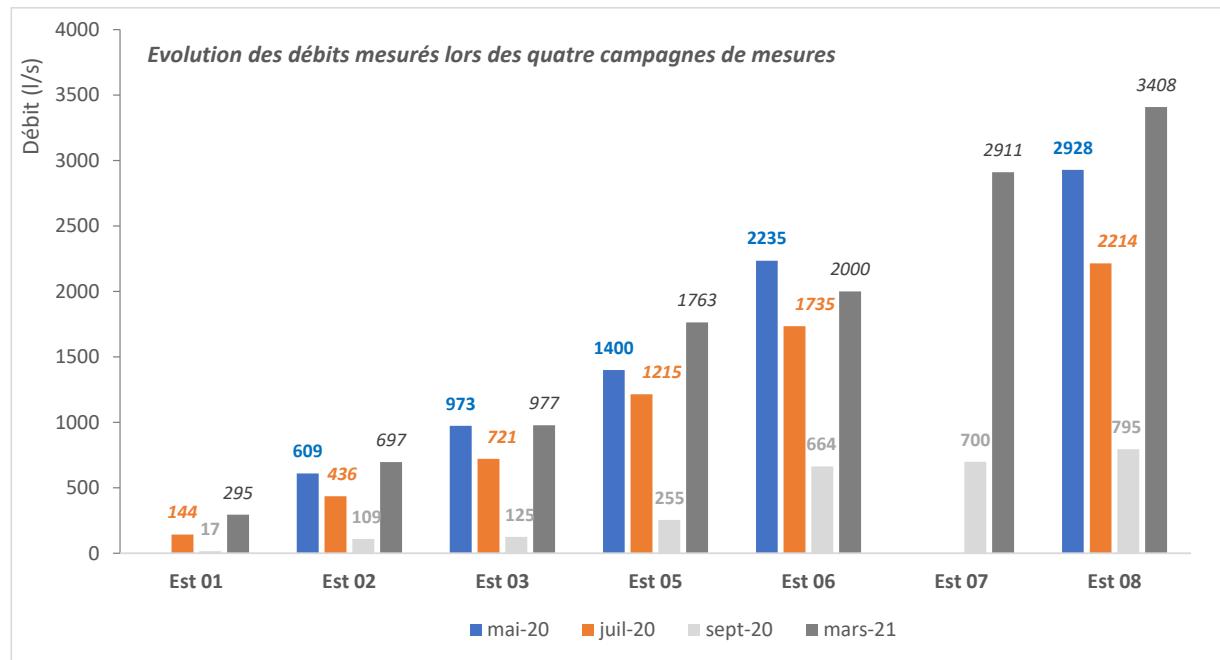


Figure 8 : Débits instantanés mesurés sur les stations du cours principal de l'Estéron en 2020 et 2021.

Pour cette campagne de septembre 2020, les différences de débits entre deux stations consécutives ont été calculées afin d'estimer l'importance des apports intermédiaires ou d'éventuelles soustractions des eaux.

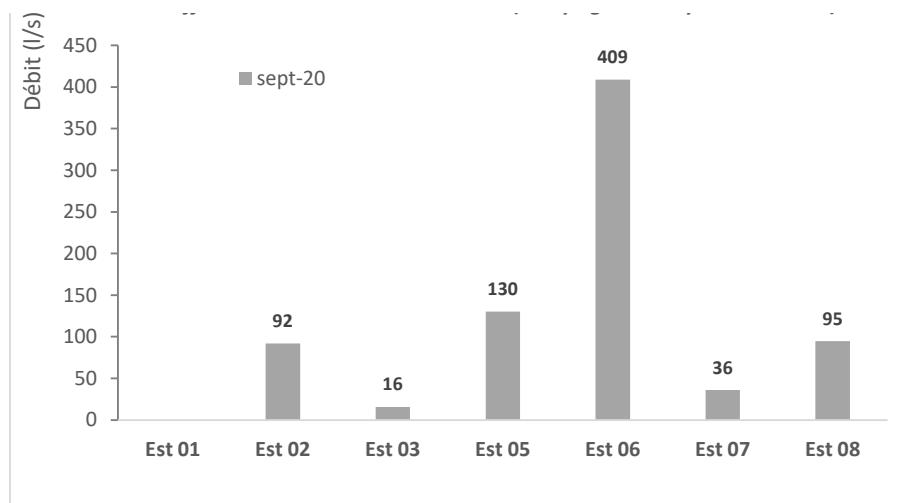


Figure 9 : Différence de débit entre stations successives, au cours de la période d'étiage de septembre 2020.

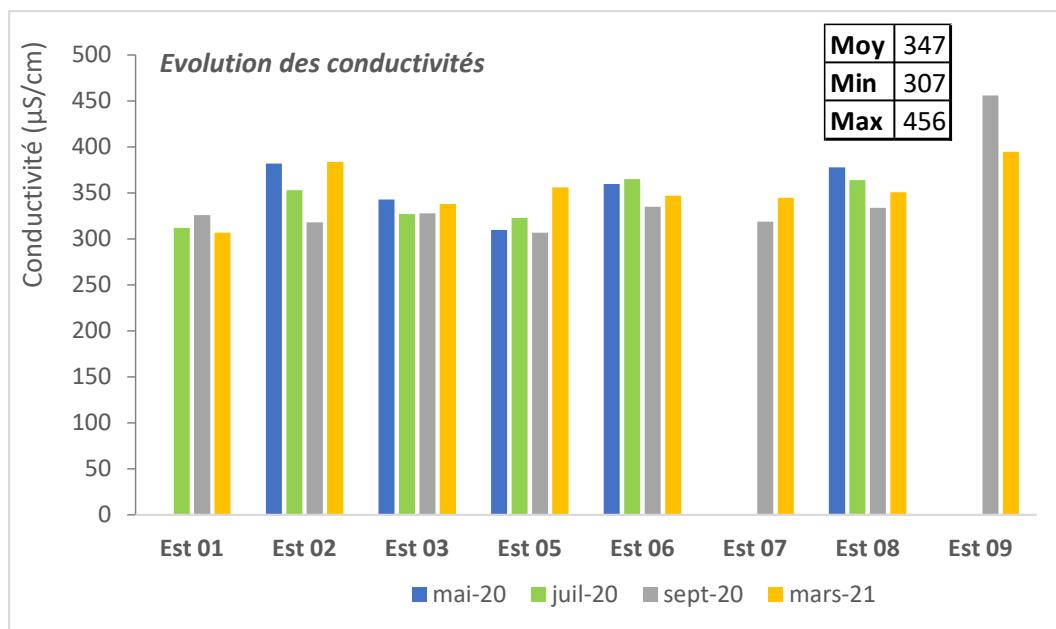
L'étude des différences entre stations, et en l'absence de prélèvements conséquents répertoriés sur le linéaire étudié, permet d'estimer que les apports les plus importants en période estivale ont lieu entre la station EST05 et EST06. Ils correspondent aux **apports des affluents de la Gironde, du Vegay et du Riolan**. Dans une moindre mesure, un apport de 130 l/s est calculé entre la station EST03 et EST05. Cet exercice est limité dans la mesure où certains apports peuvent être masqués par les infiltrations dans les alluvions dans les secteurs à morphologie en tresse, en particulier entre EST06 et EST09.

## 4.2. Physico-chimie des eaux

Dans ce rapport, seules les évolutions de la conductivité et de l'oxygène sont présentées.

### 4.2.1. Evolution de la conductivité

La figure présentée ci-dessous illustre les évolutions de la minéralisation des eaux (évaluée par la conductivité) de l'amont vers l'aval.



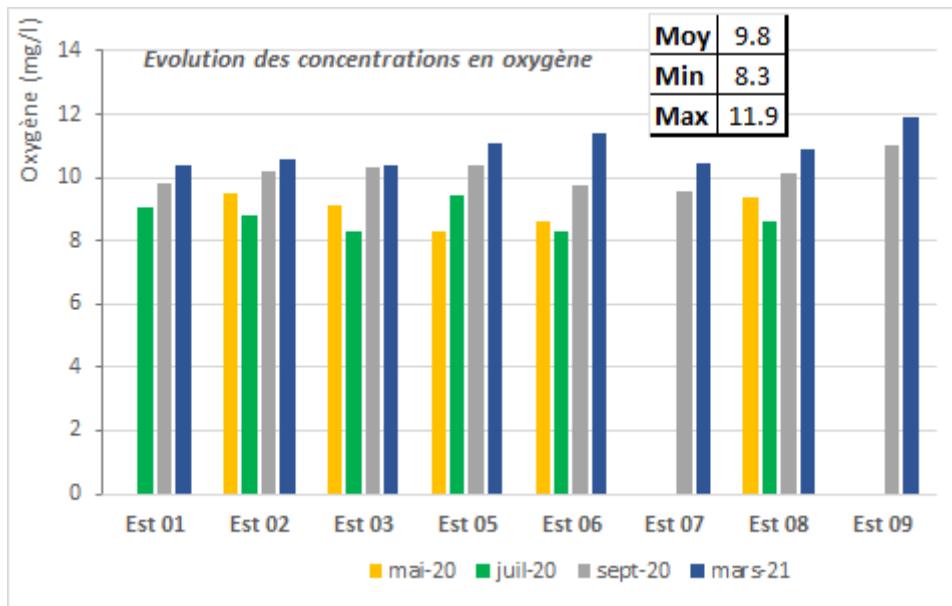
*Figure 10 : Evolution de la conductivité de l'amont vers l'aval sur l'Estéron*

La conductivité des eaux mesurée est comprise entre 307 et 456 µS/cm. Hormis la mesure de la station EST09 en septembre 2020 qui dépasse 400 µS/cm, tous les résultats montrent une conductivité relativement homogène de l'amont vers l'aval, et d'une campagne à l'autre. La valeur moyenne de 347 µS/cm est typique des cours d'eau s'écoulant sur substrat à dominance calcaire (voir chapitre géologie). Ces valeurs ne témoignent pas d'éventuels rejets chimiques ou de l'existence de sources sulfatées fortement minéralisées.

La conductivité plus élevée constatée à la station EST09 lors de la campagne de septembre 2020 serait à relier à celle de l'affluent le Bouyon qui apporte des eaux plus minéralisées (519 µS/cm), ainsi qu'à celle de la source située à La Clave, traduisant un contexte géologique différent (eau légèrement sulfatée calcique du fait de la présence de gypse dans les couches géologiques du Trias affleurant par endroit au niveau de La Clave).

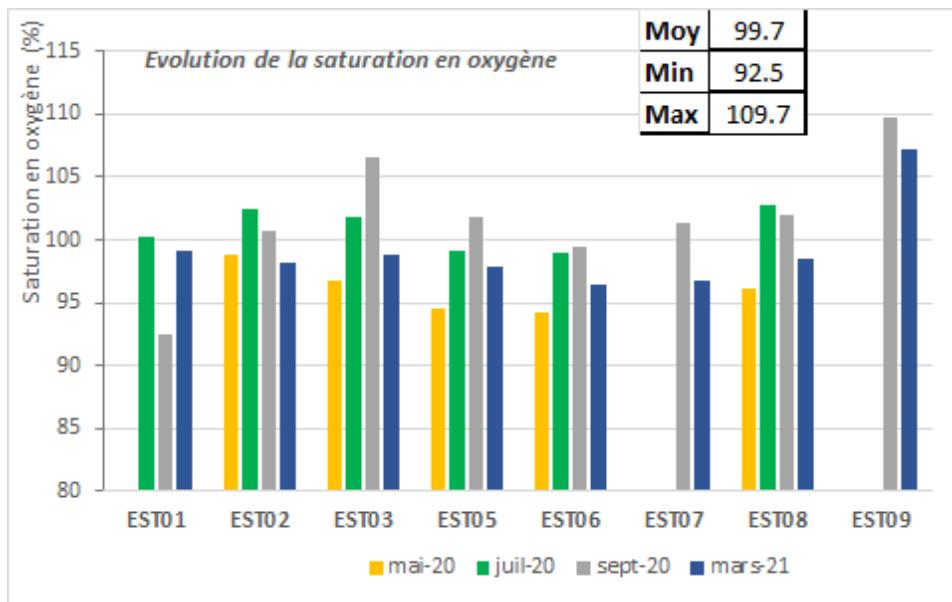
#### 4.2.2. Evolution de l'oxygène

La Figure 11 ci-dessous illustre les valeurs ponctuelles de concentration en oxygène de l'amont vers l'aval mesurées lors des campagnes de prélèvement.



**Figure 11 : Evolution des concentrations en oxygène dissous de l'amont vers l'aval sur l'Estéron au cours des campagnes de prélèvement.**

Les teneurs en oxygène apparaissent homogènes d'une station à l'autre au cours des trois campagnes de mesures. Avec une moyenne de  $9,8 \text{ mg.l}^{-1}$  et une valeur minimale de  $8,3 \text{ mg.l}^{-1}$ , les teneurs sont relativement élevées, typiques d'un milieu d'eau courante de bonne qualité.



**Figure 12 : Evolution des taux de saturation en oxygène dissous des stations d'étude au cours des campagnes de prélèvement.**

Les valeurs de saturation en oxygène dissous mesurées ponctuellement au cours des campagnes de prélèvement traduisent une saturation toujours élevée des eaux et ne mettent pas en évidence de phénomènes de désoxygénéation du milieu (Figure 12).



**Photo 8: Radier à la station EST03 le 29 septembre 2020 montrant un développement algal relativement important.**

Le développement généralisé du biofilm et des algues à la fin du mois de septembre 2020 sur la partie terminale de l'Estéron explique les plus fortes teneurs en oxygène mesurées en journée.

## 4.3. Régimes thermiques

Dans ce chapitre les principaux résultats des analyses sur les données de températures et de pressions aquatiques converties en hauteurs d'eau sont présentés.

Comme évoqué au chapitre 3.3, les données de pressions aquatiques, même converties en hauteurs d'eau, n'ont pas vocation à être transformées en valeurs de débits ; cela exigerait de disposer de courbes d'étalonnage pour chaque station nécessitant les résultats de nombreux jaugeages et la stabilité des sections en travers au niveau des limnimètres. Dans cette étude, ces données de pressions, qui ont été converties en hauteurs d'eau, sont donc à considérer de manière relative à l'intérieur d'une chronique donnée : les grandes tendances de variations de hauteurs d'eau sont ainsi visualisables et permettent d'affiner les diagnostics des régimes thermiques.

### 4.3.1. Etendue temporelle des enregistrements

La Figure 13 présente les étendues temporelles des chroniques de thermie et la qualité des données. Les interruptions de l'ordre d'une journée sont dues aux périodes de relève des données. Les données de ces journées de relève sont en effet systématiquement coupées et retirées des analyses afin d'éviter d'éventuelles incohérences (valeurs enregistrées lors de l'exondation du capteur et lors du temps d'acclimatation à la remise en eau). Les interruptions de durée plus longue peuvent avoir de nombreuses justifications : depuis la simple perte des sondes à la suite d'un épisode de crue ou de détérioration volontaire, jusqu'à un dysfonctionnement interne des sondes.

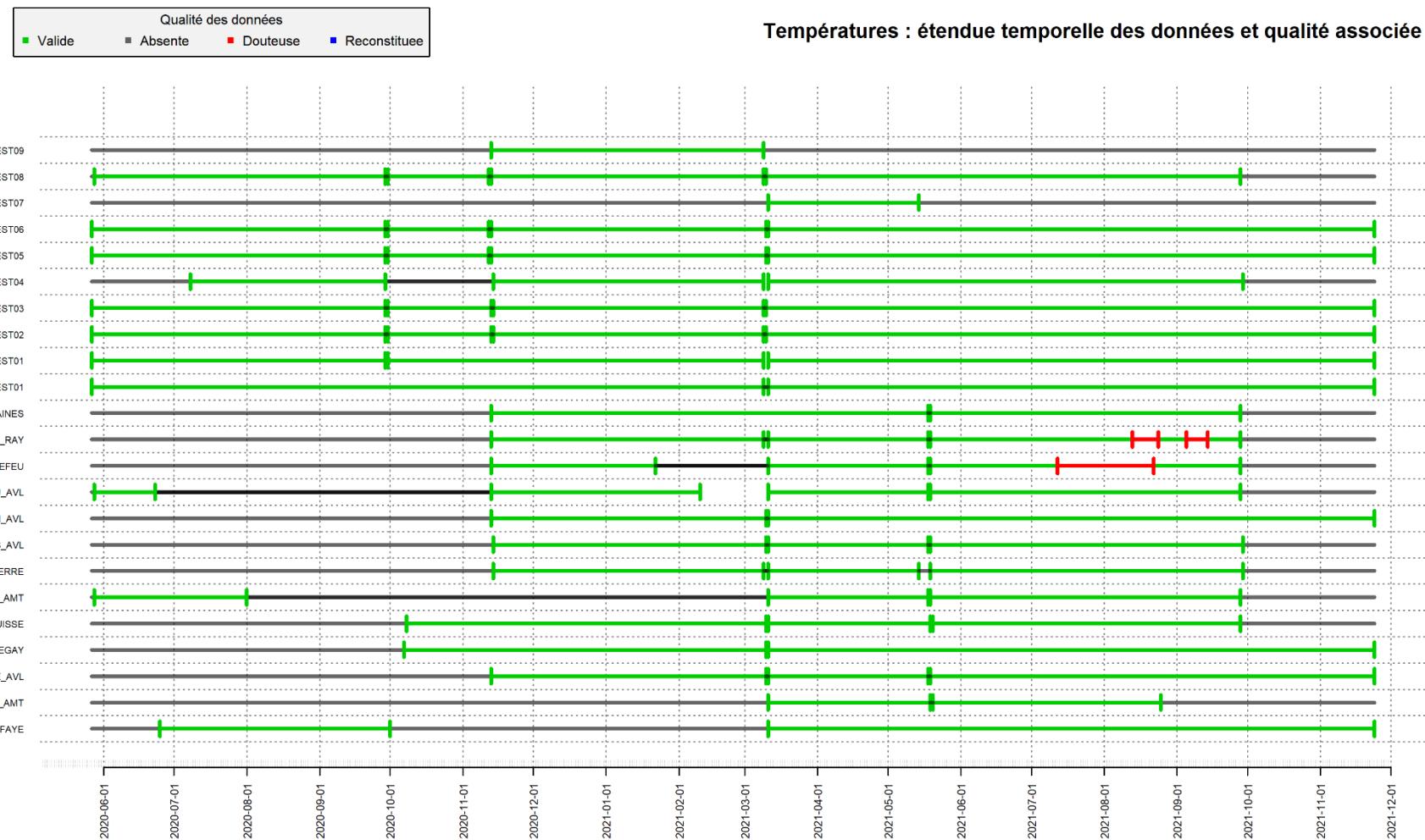


Figure 13 : Etendue temporelle des données de températures et qualité associées.

Les étendues des données de thermie disponibles varient considérablement entre les stations.

Sur les stations du cours principal de l'Estéron, les chroniques où les données sont qualifiées de valides apparaissent les plus longues avec 545 jours d'enregistrement pour les stations EST01, EST02, EST03, EST05 et EST06 ; et autour de 450 jours pour EST04 et EST08. Pour deux stations, les chroniques apparaissent trop courtes et incomplètes pour refléter les variations saisonnières : il s'agit de la station EST07 et EST09.

Les données du limnimètre atmosphérique nommé « AIR\_EST01 » couvrent l'ensemble de la période d'étude et ont permis la compensation atmosphérique de l'ensemble des données des limnimètres aquatiques.

Sur les affluents de rive gauche de l'Estéron, les chroniques de données valides couvrent la période débutant à la mi-novembre 2020 jusqu'à la fin septembre 2021 soit environ 320 jours. La chronique de la station « AFF\_G05\_GROS\_RIOU\_AVL » (sur le Gros Riou à Roquesteron) a débuté en juin 2020 et a duré environ un mois avant une longue interruption de près de 5 mois, le nombre de jour de données valides pour l'ensemble de la période d'étude atteint ici 487 jours.

Les données de deux stations présentent des valeurs qualifiées de douteuses, celles-ci ont donc été écartées pour l'ensemble des étapes de traitement de données : il s'agit de AFF\_G06\_RIOU\_PIERREFEU (sur le Riou de Pierrefeu) et de AFF\_G07\_RAY (sur le vallon de Ray en amont de Gilette). La raison de ces valeurs incohérentes est souvent une exondation des thermographes à la suite d'une baisse de la ligne d'eau dans le cours d'eau ou d'un acte de détérioration volontaire comme cela a été le cas sur le Riou de Pierrefeu.

Sur les affluents de rive droite de l'Estéron, les chroniques de la Bouisse, du Vegay et de la Gironde aval couvrent des périodes d'environ une année entre les automnes 2020 et 2021. Les chroniques de ces trois stations apparaissent les plus complètes pour cette partie du bassin-versant.



**Photo 9 : Thermographe du Riou de Pierrefeu retrouvé exondé à la suite de la torsion de l'arrimage en septembre 2021.**

### 4.3.2. Bilan global des températures

#### 4.3.2.1. Cours principal de l'Estéron

Le Tableau 3 fournit les statistiques de base sur les températures enregistrées pour les stations du cours principal. La Figure 14 suivante présente les diagrammes en violon, représentant les densités en miroir, les boites à moustaches ainsi que les moyennes des températures instantanées sur les neuf stations du cours principal de l'Estéron.

**Tableau 3 : Statistiques de base des températures des stations du cours principal de l'Estéron.**

		EST01	EST02	EST03	EST04	EST05	EST06	EST07	EST08	EST09
Date de début		2020-05-27	2020-05-27	2020-05-27	2020-07-08	2020-05-27	2020-05-27	2021-03-11	2020-05-28	2020-11-13
Date de fin		2021-11-23	2021-11-23	2021-11-23	2021-09-28	2021-11-23	2021-11-23	2021-05-13	2021-09-27	2021-03-08
Durée (nb j.)		545	545	545	447	545	545	63	487	115
T moyenne sur la chronique		9.1	9.2	11.3	11.7	12.4	12.5	11.0	14.8	7.8
T Instantanée	Minimale	0.0	0.9	1.1	0.9	1.7	2.6	4.7	2.7	4.3
	Maximale	17.4	16.2	27.4	24.0	22.2	23.4	17.4	26.8	12.2
	Amplitude sur la chronique	17.4	15.3	26.3	23.1	20.5	20.8	12.7	24.1	7.9
	Amplitude maximale sur 1 j	5.8	5.3	15.8	8.8	6.4	7.0	6.7	8.0	2.9
T moyenne journalière	Minimale	0.3	1.4	1.4	1.5	2.2	2.9	7.1	3.4	4.9
	Maximale	15.2	14.3	19.9	20.6	20.7	20.3	14.4	24.0	11.7
	Amplitude sur la chronique	14.8	12.9	18.5	19.1	18.6	17.3	7.3	20.6	6.8

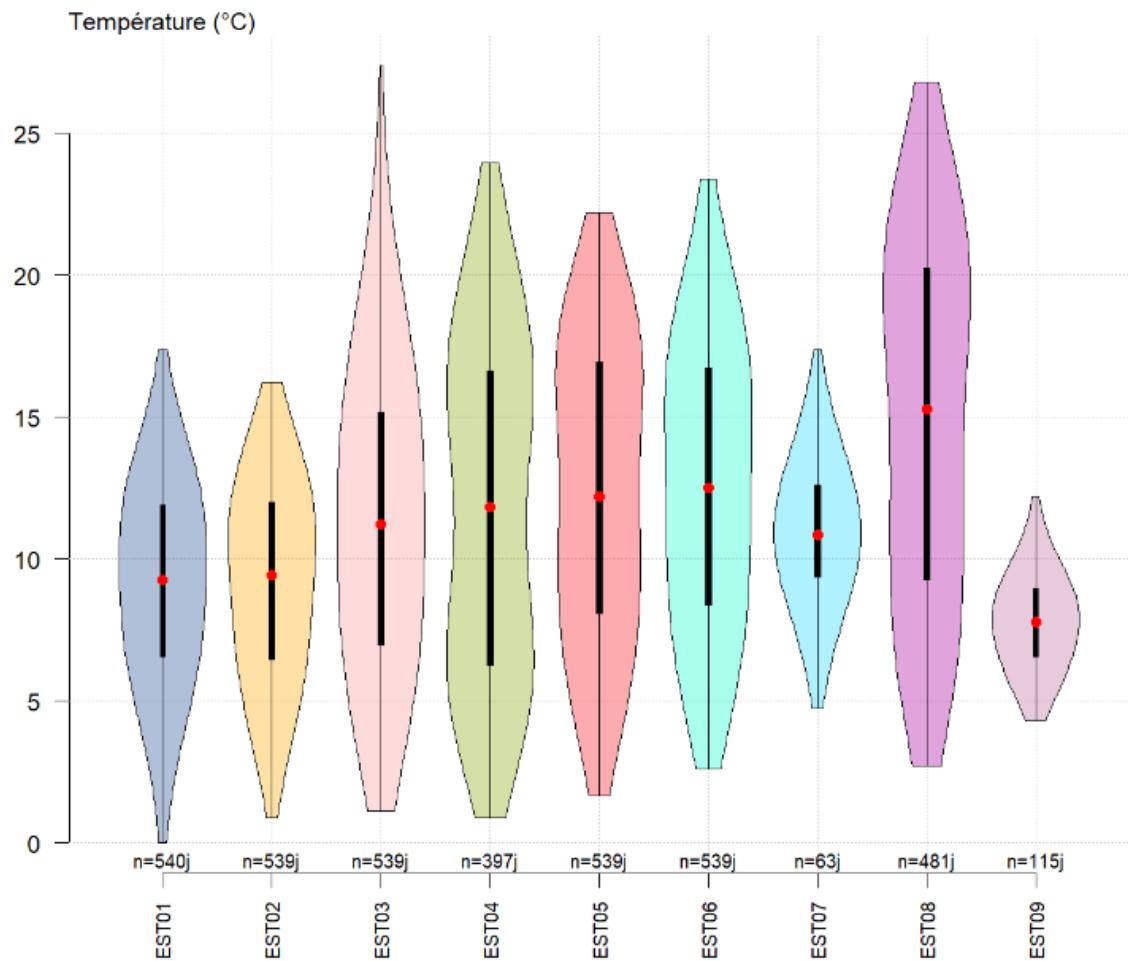
A l'exception des deux stations pour lesquelles les chroniques de thermie sont tronquées : EST07 et EST09, une augmentation régulière des températures est observée depuis l'amont vers l'aval que ce soit par les moyennes ou par les boites à moustaches de la Figure 14.

Les températures des deux stations les plus apicales, EST01 et EST02, restent fraîches avec des moyennes autour de 9,1 °C et des maxima ne dépassant pas 15,2°C.

L'amplitude thermique observée au niveau d'EST03 apparaît maximale avec plus de 26 °C d'écart entre les valeurs extrêmes. Les amplitudes des températures instantanées et les maxima sont supérieurs à celles observées dans la station la plus en aval sur laquelle l'étendue temporelle des chroniques est comparable : EST08. La station EST03 apparaît singulière dans la zonation amont-aval sur le cours principal. L'inclinaison est-ouest de la vallée ainsi que la morphologie du cours d'eau dans ce tronçon pourraient favoriser une relation plus étroite entre températures des eaux et atmosphériques.



**Photo 10 : L'Estéron au niveau de la station EST03 le 7 juillet 2020.**



**Figure 14 : Diagramme en violon, boîtes à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station du cours principal de l'Estéron. La durée exprimée en nombre de jours des chroniques de chaque station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations.**

Les données de la station EST04 montrent deux modes plus fréquents au regard des densités figurées sur le diagramme en violon, l'absence d'enregistrement autour du mois d'octobre 2020 explique ce déséquilibre.

La distribution des températures des stations EST05 et EST06 apparaissent semblables, ce sont surtout les minima et maxima qui augmentent légèrement.

Les trop courtes chroniques d'enregistrement sur EST07 et EST09 ne permettent pas une comparaison de la distribution des valeurs avec les autres stations.

Les valeurs observées au niveau d'EST08 illustrent un réel changement d'univers thermique avec les tronçons plus en amont. La température moyenne journalière maximale y atteint 24 °C avec une amplitude des moyennes journalières de plus de 20 °C. La distribution des valeurs apparaît plus étendue et dans une gamme plus chaude que la station EST06.

#### 4.3.2.2. Affluents en rive droite de l'Estéron

De la même manière, les principales caractéristiques des chroniques de températures sont présentées dans le tableau suivant et représentées dans le diagramme en violon en fin de chapitre.

**Tableau 4 : Statistiques de base des températures des stations des affluents de rive droite.**

		AFF_D02_FAYE	AFF_D05_GIRONDE_AMT	AFF_D06_GIRONDE_AVL	AFF_D07_VEGAY	AFF_D11_BOUISSSE	AFF_D12_BOUYON_AMT
Date de début		2020-06-25	2021-03-11	2020-11-13	2020-10-07	2020-10-08	2020-05-28
Date de fin		2021-11-23	2021-08-24	2021-11-23	2021-11-23	2021-09-27	2021-09-27
Durée		516	166	375	412	354	487
T moyenne sur la chronique		11.2	12.4	10.4	13.7	9.8	12.3
T Instantanée	Minimale	0.7	4.1	2.2	4.6	6.6	7.3
	Maximale	24.8	23.0	22.1	20.9	13.0	16.5
	Amplitude sur la chronique	24.2	18.9	19.9	16.3	6.4	9.2
	Amplitude maximale sur 1 j	13.4	8.1	7.1	3.2	3.0	3.0
T moyenne journalière	Minimale	2.7	5.4	2.9	5.2	8.3	8.1
	Maximale	18.7	18.3	18.9	19.9	10.7	15.2
	Amplitude sur la chronique	16.0	12.9	16.0	14.7	2.4	7.1

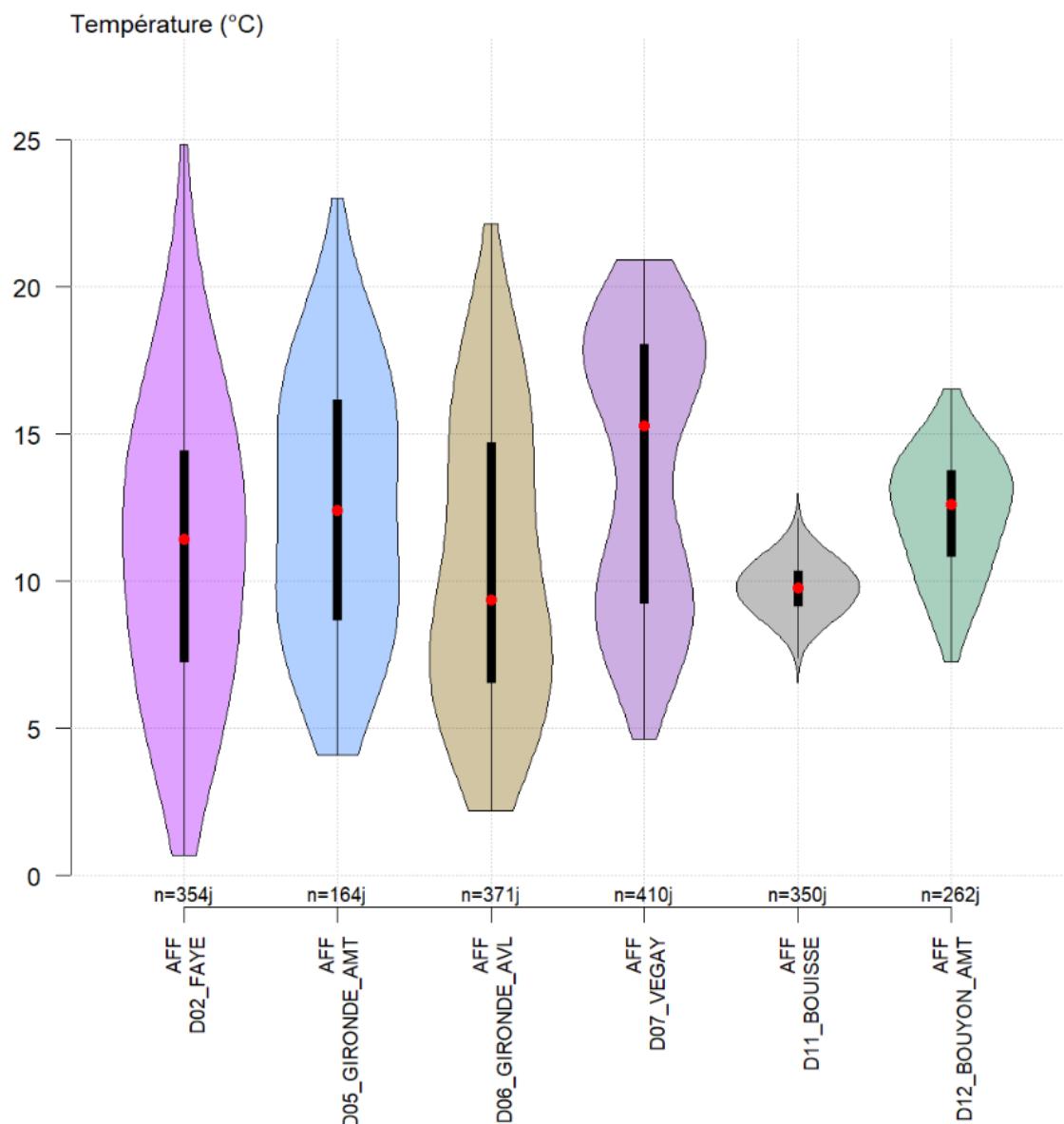
La station positionnée sur la Faye présente les amplitudes thermiques les plus importantes parmi ces affluents de rive droite. En comparaison, les amplitudes de températures des autres stations apparaissent limitées. Sur cet affluent où l'influence du climat alpin est marquée, les périodes d'étiage hivernaux ou estivaux exacerbent les températures extrêmes, minimale comme maximale.

La chronique obtenue sur la Gironde amont apparaît incomplète pour décrire correctement les minima puisque la période hivernale est manquante. Les amplitudes ne doivent pas être comparées à celles des autres stations. La maximale des températures instantanées représente la seconde valeur la plus élevée parmi ces stations.

Les trois affluents bénéficiant d'apports karstiques conséquents : le Vegay, la Bouisse et la partie amont du Bouyon montrent des situations thermiques différentes :

- Les amplitudes sont nettement tamponnées sur la Bouisse signe de la forte influence des apports karstiques, 75% des valeurs sont comprises entre 8 et 11°C ; la valeur minimale des températures moyennes journalières y reste fraîche voir froide ;
- Sur le Bouyon amont, le manque d'enregistrement durant une période hivernale limite la comparaison avec les autres stations mais les températures constatées en été sont également fraîches signe d'une certaine influence karstique ;

- Sur la station du Vegay, deux modes apparaissant plus fréquents sont observés sur le diagramme en violon : le premier autour de 17.5 °C, le second autour de 8°C. Les températures maximales, autour de 20°C que ce soit pour les valeurs instantanées ou les moyennes journalières, apparaissent élevées pour un cours d'eau alimenté par des résurgences. Cela pourrait refléter l'influence de la chute des eaux dans l'imposante cascade du Vegay, phénomène augmentant les échanges thermiques avec l'atmosphère. L'amplitude thermique des températures instantanées au cours d'une journée est toutefois faible, cela indique un échauffement limité des eaux par l'ensoleillement dû à l'orientation de la vallée ou reflète une certaine influence des sources karstiques jouant le rôle de tampon. Le captage pour l'alimentation en eau potable d'une partie non négligeable des eaux souterraines alimentant le système de résurgence du Vegay peut ainsi exacerber ce phénomène d'échauffement des eaux.



*Figure 15 : Diagramme en violon, boîtes à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station des affluents en rive droite de l'Estéron. La durée de la chronique disponible par station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations.*

#### 4.3.2.3. Affluents en rive gauche de l'Estéron

Le tableau et la figure suivants présentent de la même façon les bilans des températures enregistrées sur les sept affluents de rive gauche de l'Estéron instrumentés en thermographes.

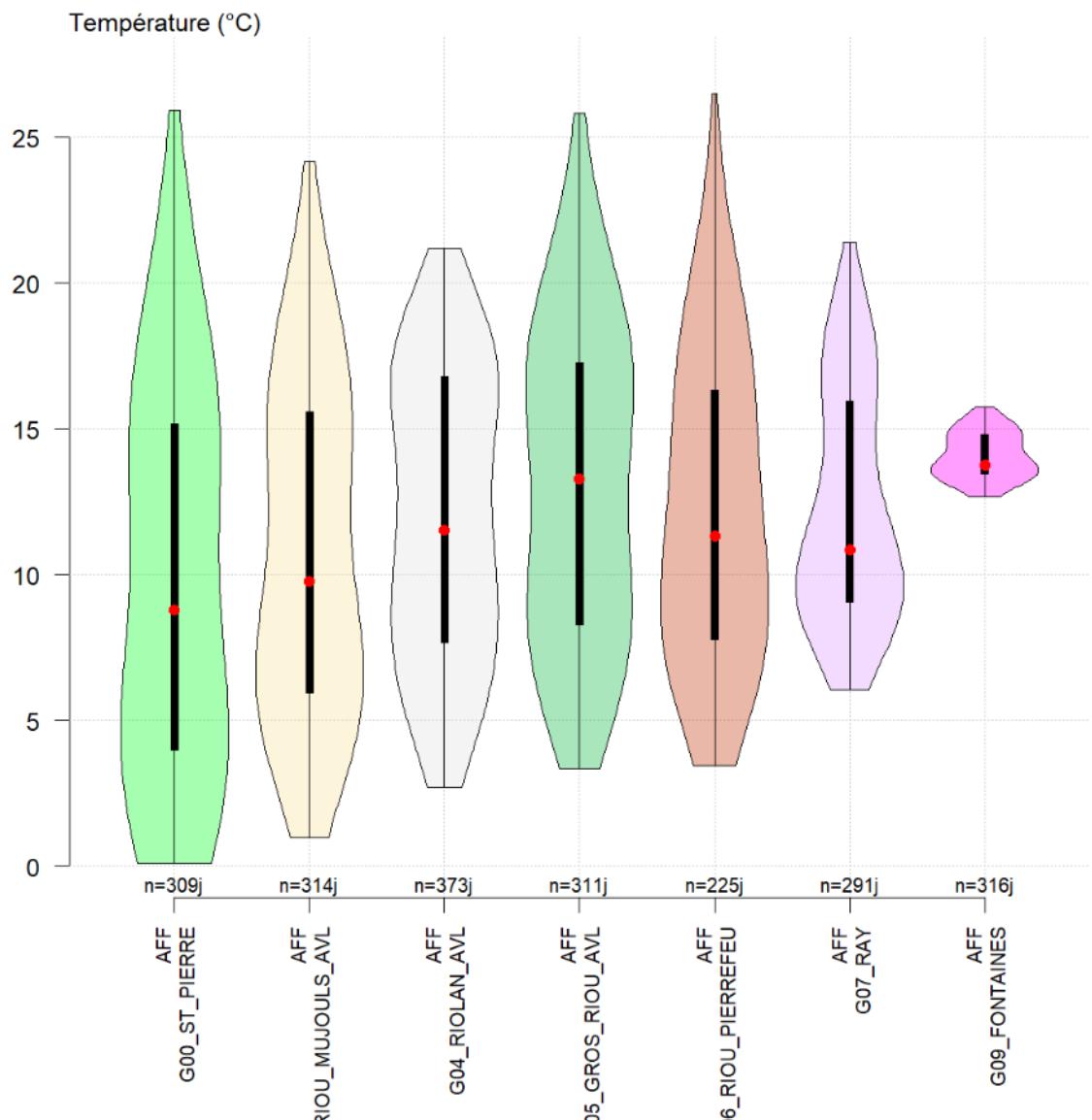
**Tableau 5 : Statistiques de base des températures des stations des affluents de rive gauche.**

		AFF_G00_ST_PIERRE	AFF_G02_RIOU_MUJOULS_AVL	AFF_G04_RIOLAN_AVL	AFF_G05_GROS_RIOU_AVL	AFF_G06_RIOU_PIERREFEU	AFF_G07_RAY	AFF_G09_FONTAINES
Date de début	2020-11-14	2020-11-14	2020-11-13	2020-05-28	2020-11-13	2020-11-13	2020-11-13	2020-11-13
Date de fin	2021-09-28	2021-09-28	2021-11-23	2021-09-27	2021-09-27	2021-09-27	2021-09-27	2021-09-27
Durée	318	318	375	487	318	318	318	318
T moyenne sur la chronique	9.6	10.8	12.0	13.1	12.2	12.2	12.2	14.1
T Instantanée	Minimale	0.1	1.0	2.7	3.4	3.5	6.1	12.7
	Maximale	25.9	24.2	21.2	25.8	26.5	21.7	15.8
	Amplitude sur la chronique	25.8	23.2	18.5	22.4	23.0	15.6	3.1
	Amplitude maximale sur 1 j	13.1	8.9	5.4	9.9	11.1	6.3	0.7
T moyenne journalière	Minimale	0.1	2.1	3.2	4.6	4.8	7.1	12.7
	Maximale	20.0	19.0	18.9	20.9	20.7	19.7	15.7
	Amplitude sur la chronique	19.9	16.8	15.7	16.4	15.8	12.6	3.0

A l'exception de la dernière station : la source de Fontaines, les stations en rive gauche de l'Estéron présentent pour la majorité des amplitudes élevées et des températures instantanées supérieures au seuil de 20°C. Le nombre de jour et les saisons des chroniques étant relativement comparables entre ces stations, les valeurs de températures croissent depuis l'amont du bassin versant vers la partie médiane du bassin, soit depuis St-Pierre jusqu'au Gros Riou aval. L'influence de l'atmosphère apparaît particulièrement pesant sur les températures enregistrées ici. Les faibles débits en période chaude exacerbent certainement ces maxima.

Les températures du Riou de Pierrefeu et du vallon du Ray sont légèrement plus fraîches et tamponnées que celles des stations précédentes. La distribution des valeurs de ces deux sites montre une diminution relativement aux quatre stations précédentes.

Seule la station de la source de Fontaines, dont la stabilité thermique apparaît ici remarquable, ne présente pas de valeurs supérieures à 20°C comme les autres affluents de rive gauche. L'amplitude maximale sur une journée étant très faible (0,7 °C) et la température moyenne de la chronique autour de 14 °C, cette source présente un comportement thermique typique de ce type de milieu.



**Figure 16 : Diagramme en violon, boîtes à moustache et moyennes (points rouges) des températures instantanées par station des affluents en rive gauche de l'Estéron. La durée de la chronique disponible par station est indiquée au-dessus des étiquettes des stations.**

### 4.3.3. Evolution temporelle des températures

A partir des températures moyennes journalières ainsi que des minima et maxima de chaque journée, les graphiques suivants présentent les évolutions temporelles des températures et des hauteurs d'eau seulement pour les stations instrumentées. Sur l'ensemble des graphiques d'évolution temporelle des températures présentées dans ce chapitre, les axes des abscisses et des ordonnées sont identiques afin de faciliter les comparaisons visuelles.

#### 4.3.3.1. *Stations du cours principal de l'Estéron*

La Figure 17 compare les températures moyennes journalières disponibles sur les 9 stations du cours principal de l'Estéron sur le même graphique. Des graphiques stationnels sont présentés dans les chapitres suivants afin de pouvoir visualiser les amplitudes journalières et les variations de hauteurs d'eau lorsqu'elles sont disponibles. Les données des stations EST07 et EST09 ne sont pas présentées de manière individuelle en raison des lacunes dans les chroniques.

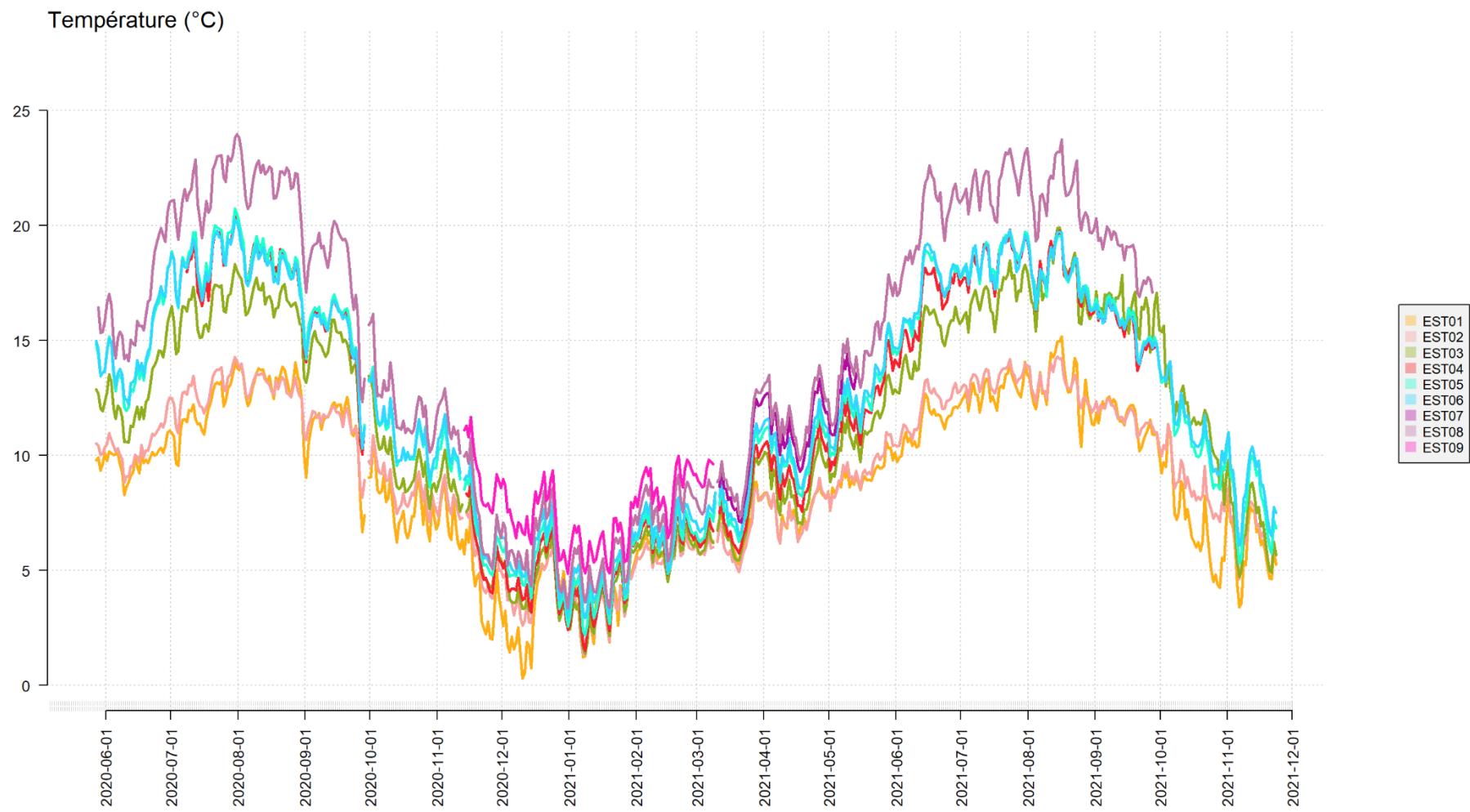


Figure 17 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations du cours principal de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021.

Les variations saisonnières des températures moyennes journalières mettent en évidence trois groupes de stations sur le cours principal :

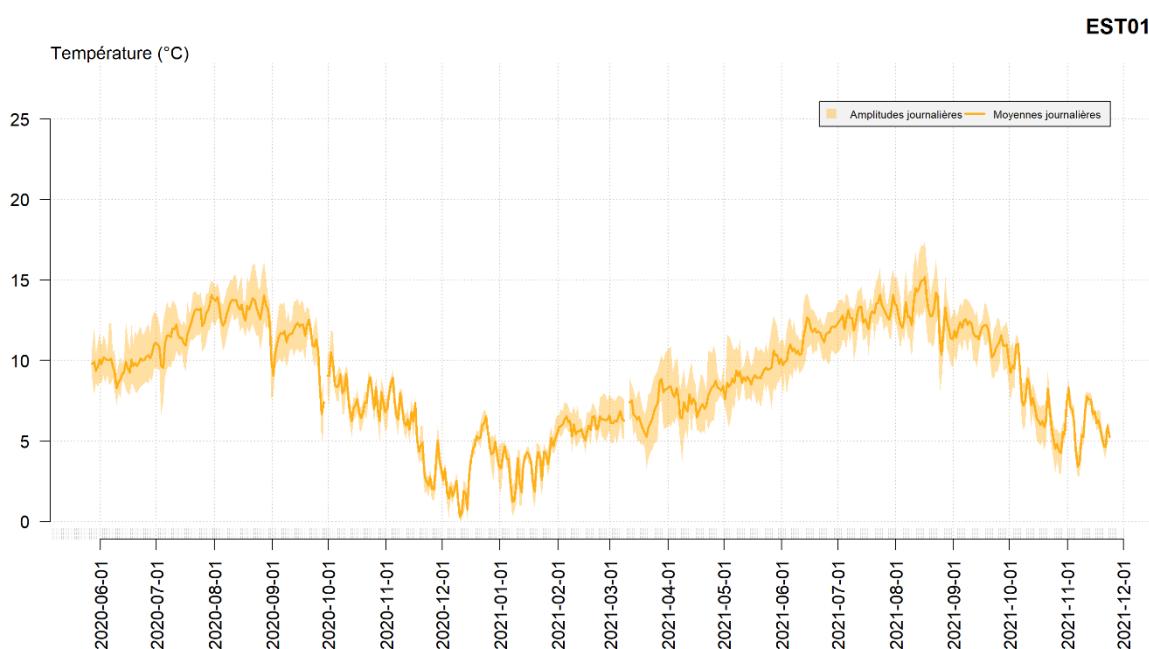
- Les stations EST01 et EST02 présentent des températures estivales fraîches, des températures hivernales proches de 0°C ;
- Les stations EST03, EST04, EST05 et EST06 où les maxima estivaux sont compris entre 15 et 20°C, les fluctuations des stations 4 à 6 apparaissent très proches ;
- La station EST08 où les températures estivales dépassent les 20 °C pendant près de deux mois consécutifs en été 2021.

Les fluctuations de température sur chacune de ces stations apparaissent synchrones lorsqu'un épisode de refroidissement est observé à la suite de précipitations par exemple.

Le patron de variation de la station EST03 diverge des autres stations au cours du mois de septembre 2021 où les eaux apparaissent plus chaudes.

#### ► Station EST01

Les données des hauteurs d'eau n'étant pas exploitables pour cette station, seule l'évolution des températures est présentée ici.

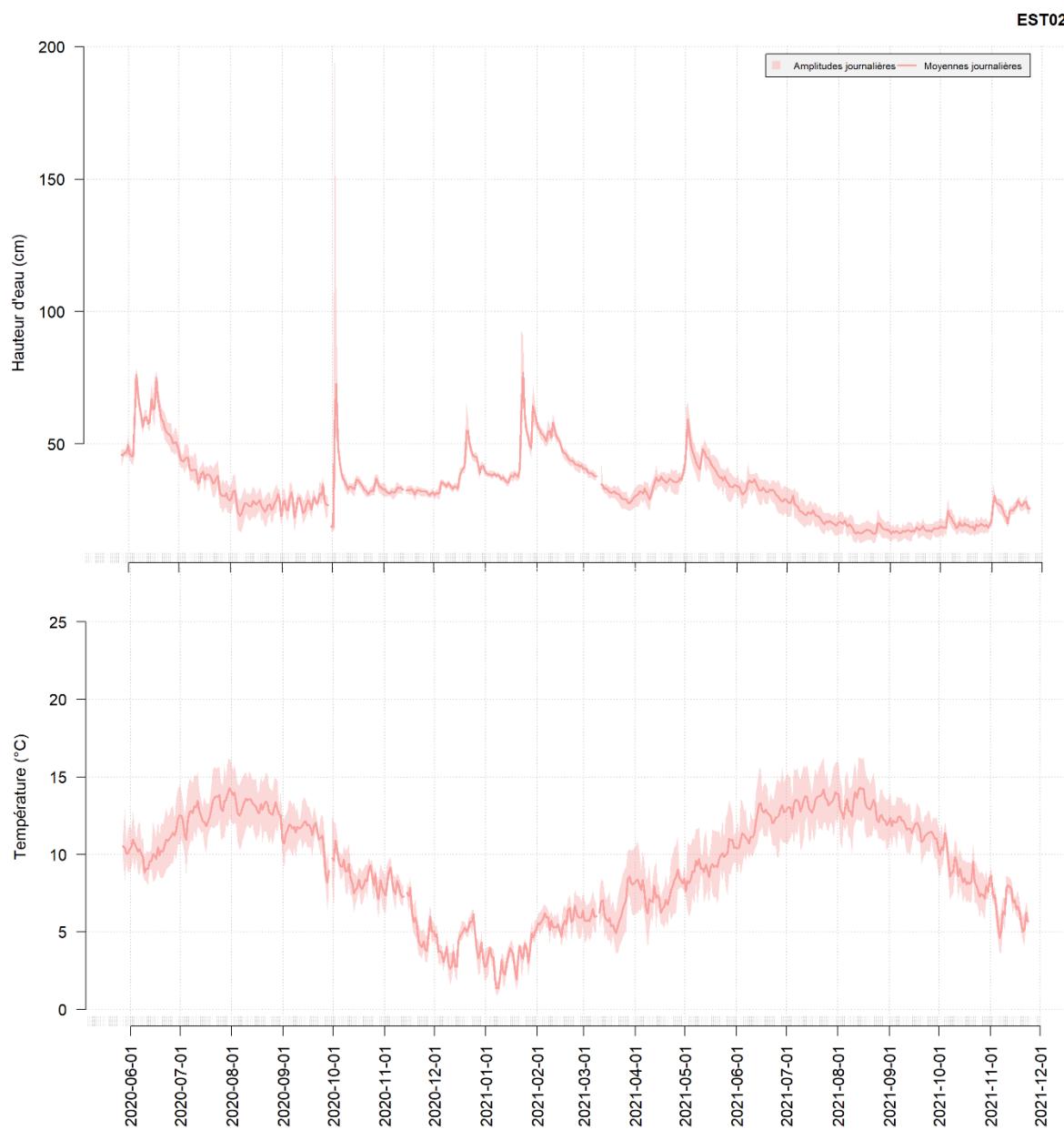


**Figure 18 : Evolution des températures sur la station EST01.**

Au niveau d'EST01, les températures moyennes journalières atteignent à peine les 15°C durant l'été 2021 et sont comprises entre 0 et 5°C au cours de l'hiver 2020-2021. Les amplitudes restent toujours limitées avec des plus fortes valeurs au printemps et en été.

Ces variations saisonnières laissent transparaître un régime thermique frais à influence montagnarde, typique du rhithral.

## ► Station EST02



**Figure 19 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST02.**

Tout comme la station précédente, le régime thermique est ici relativement frais. Les températures et les amplitudes maximales sont observées en été lorsque les hauteurs d'eau sont les plus basses.

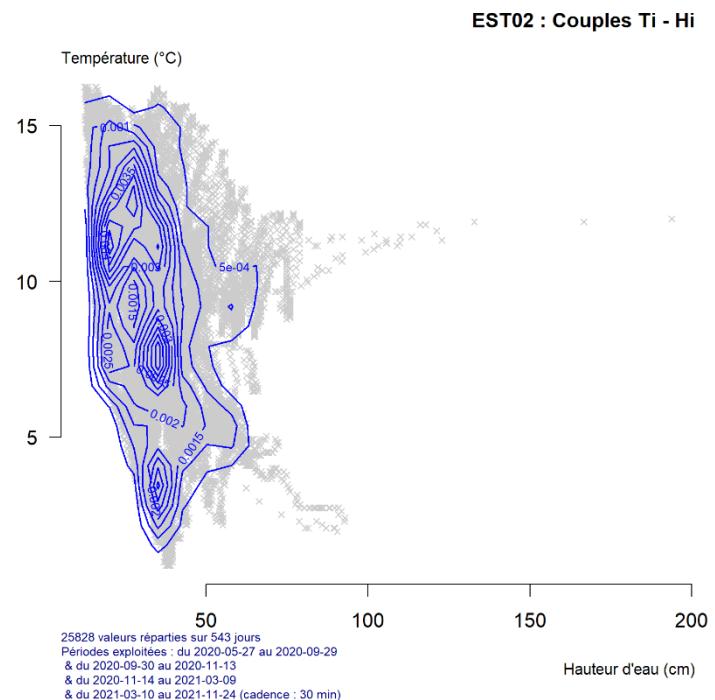
L'épisode de crue de la tempête Alex le 2 octobre 2020 a induit une forte augmentation de hauteur sur cette station de l'ordre de 1,5 m de hauteur d'eau. Cette valeur est à considérer avec précaution puisque l'enregistrement de hauteurs importante est complexe en cours d'eau.

La figure ci-contre permet d'observer la relation liant températures instantanées et hauteurs d'eau instantanées dans la station EST02 (voir le chapitre 3.5 pour l'explication de sa conception).

Un mode apparaît fréquent avec des hauteurs autour de 40 cm et des températures inférieures à 5°C reflet des conditions hivernales sur ce tronçon apical de l'Estéron.

Les autres modes les plus fréquents se rencontrent autour de 7,5°C pour le premier et de 12,5°C pour le second. Les hauteurs d'eau associées à ces deux modes sont plus faibles mais aucune rupture linéaire ne se dégage visuellement dans cette gamme.

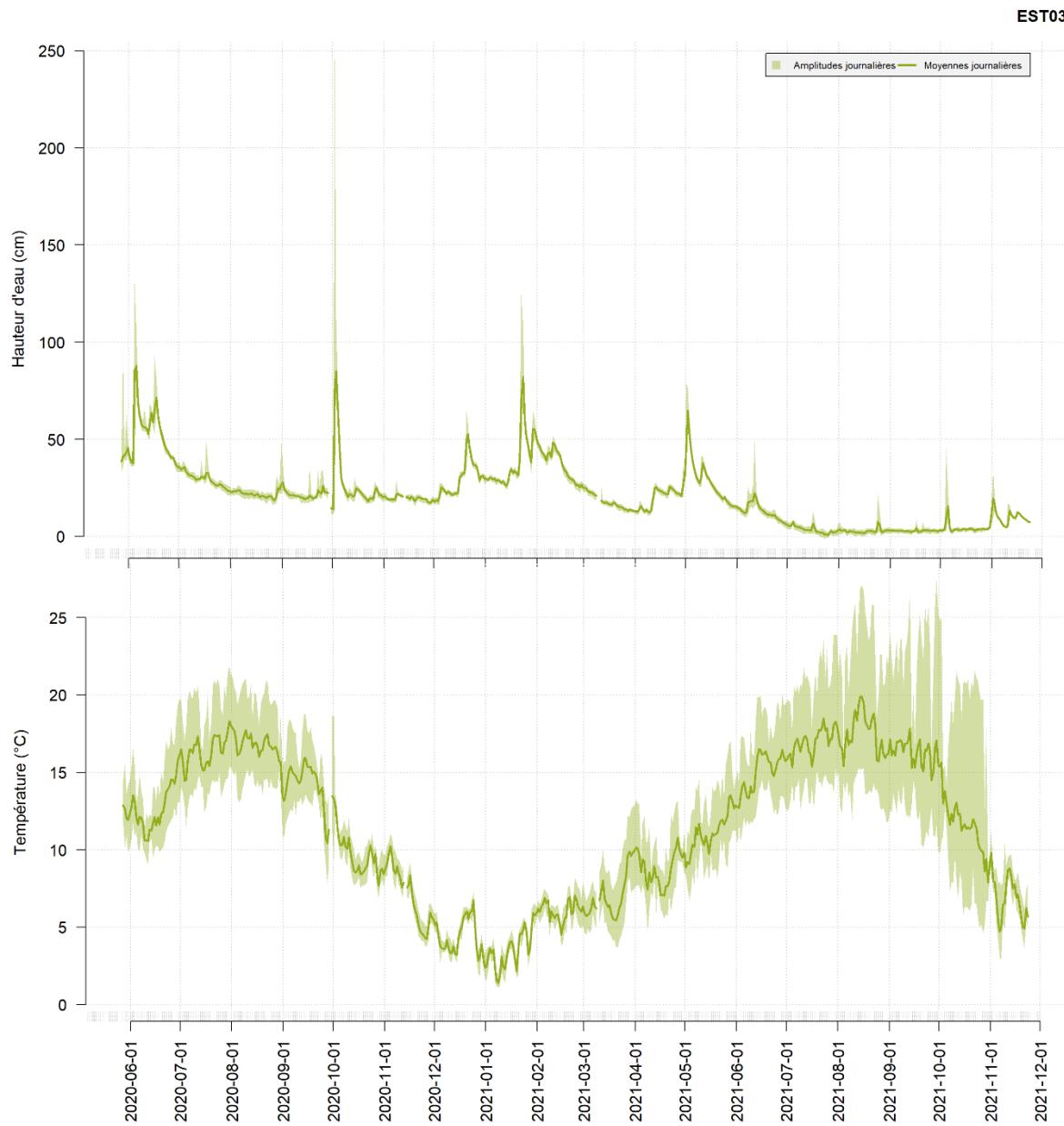
Les périodes de basses eaux doivent être régulières dans ce tronçon de l'Estéron et se produire lors des étiages estivaux et hivernaux, ce qui induit une variabilité importante des températures observées dans cette gamme de hauteurs.



**Figure 20 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours des densités estimées pour la station EST02.**

### ► Station EST03

Cette station ayant été instrumentée avec un limnimètre enregistrant également les températures, les évolutions de ces deux métriques sont représentées sur un même axe temporel.



**Figure 21 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST03.**

Sur cette station, les températures montrent un niveau d'échauffement supérieur par rapport au tronçon amont. Les températures estivales dépassent les 15°C en moyennes journalières et les maxima sont régulièrement au-delà des 20°C, et plus rarement au-delà des 25°C au cours de l'été 2021.

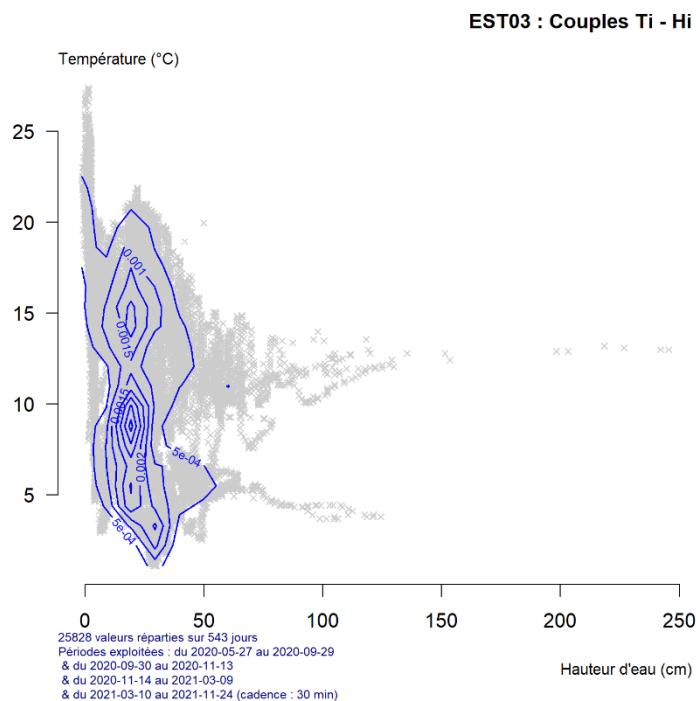
De la même manière que pour la station EST02, la Figure 22 représente les températures instantanées en fonction des hauteurs d'eau.

Les principaux modes sont observés pour des températures inférieures à 10 °C et des hauteurs d'eau de 25 cm et pour des températures autour de 15 °C dans la même gamme de hauteur.

Dans la gamme des plus faibles hauteurs, une forte variabilité de températures est observée avec des valeurs s'étalant entre 8°C et plus de 25 °C. Même si ces couples ne sont pas assez représentés pour que la méthode d'estimation des densités ne les mette en évidence graphiquement, cela reflète certaines conditions d'écoulement locales dans ce tronçon de l'Estéron.

La morphologie fluviale de ce tronçon de rivière, avec un large lit et un faible nombre de faciès de type radier, entraîne une prédominance des phénomènes d'infiltration dans les échanges entre l'écoulement de surface et la zone hyporhéique. Cela peut diminuer les débits et donc contribuer à augmenter le réchauffement des écoulements superficiels, mais également limiter le rafraîchissement des eaux de surface par les apports provenant du sous-écoulement.

L'orientation de la vallée de ce tronçon de rivière, selon un axe est-ouest, constitue également un facteur explicatif à un réchauffement des eaux exacerbé.



**Figure 22 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours des densités estimées pour la station EST03.**

### ► Station EST04

Les hauteurs d'eau n'ont pas été mesurées sur cette station. La figure suivante ne présente donc que les températures. Une interruption de la chronique d'enregistrement s'est produite autour du mois d'octobre. L'absence de ces valeurs autour de 10 °C explique l'observation d'une distribution bimodale discutée dans le chapitre 4.3.2.1.

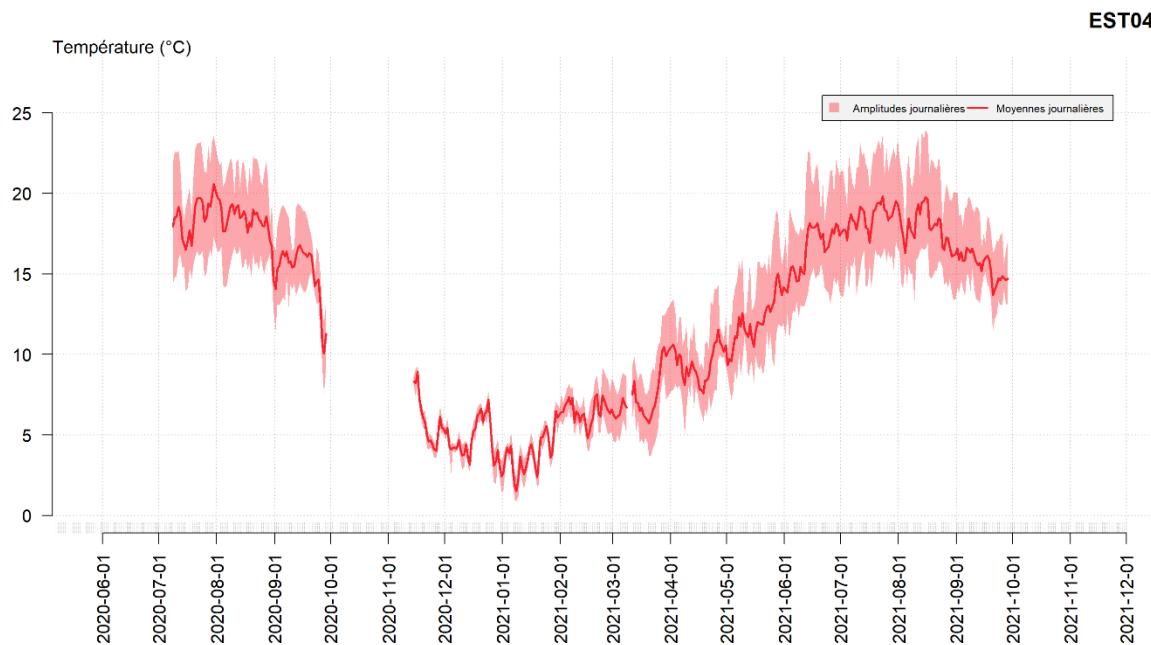
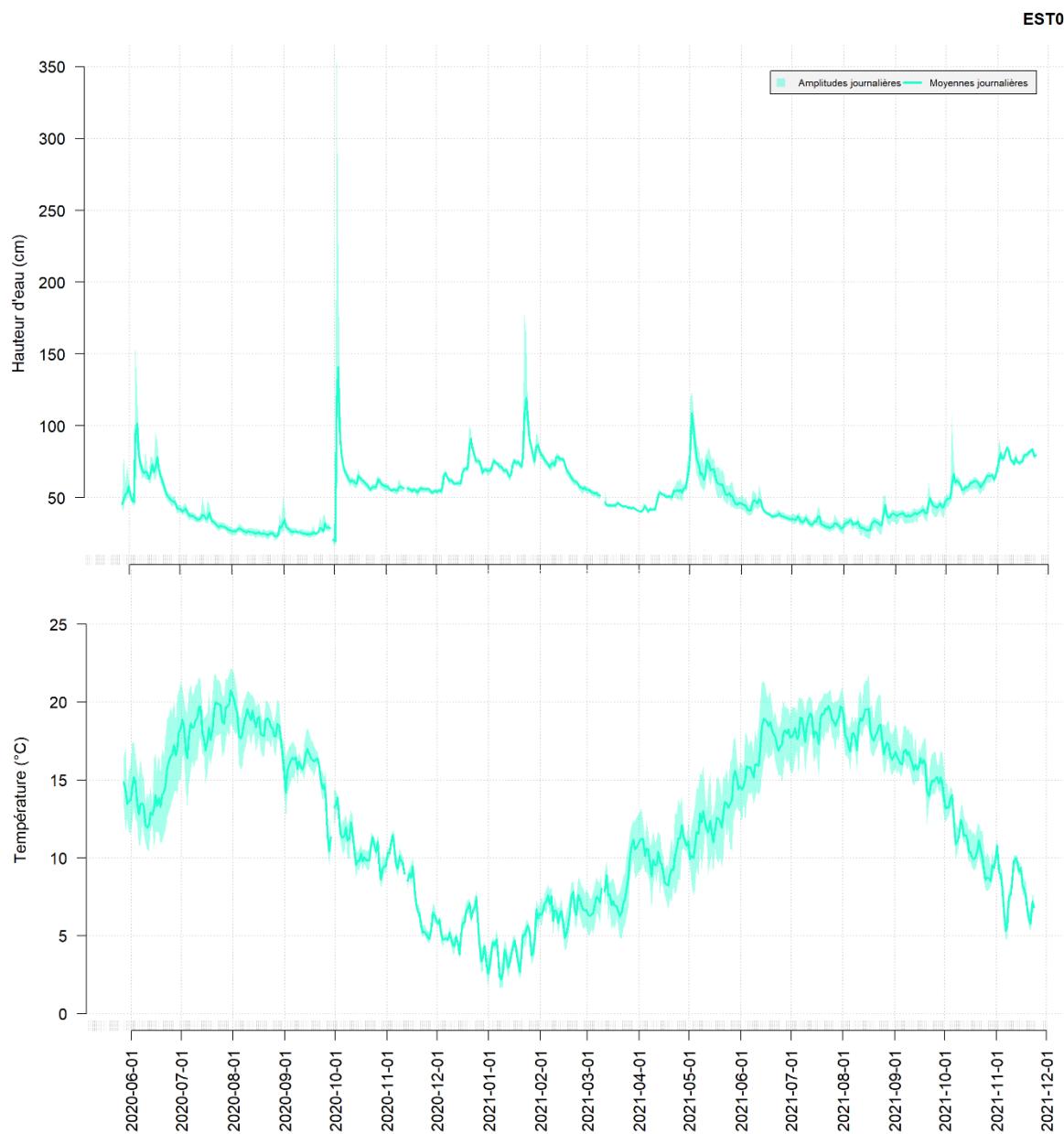


Figure 23 : Evolution des températures sur la station EST04.

Les températures instantanées estivales de la station EST04 montrent des maximales comprises entre 20 et 25 et des minimales inférieures à 5°C pouvant être qualifiées de froides. Ce régime thermique caractérise un tronçon de piedmont toujours influencé par une rudesse du climat montagnard pendant les périodes froides mais dont les températures estivales s'échauffent fortement.

### ► Station EST05

Les hauteurs d'eau et les températures ont été enregistrées sur cette station. L'évolution temporelle de ces variables est représentée sur la figure ci-dessous.



**Figure 24 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST05.**

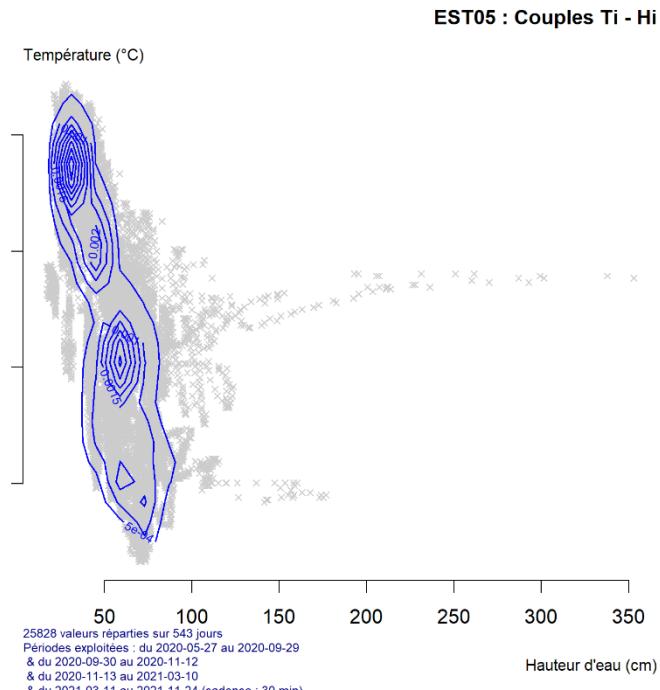
La station EST05 est située en aval de la clue d'Aiglun et en amont de la confluence de la Gironde. Les températures instantanées estivales y apparaissent légèrement plus fraîches qu'à la station précédente puisqu'elles ne dépassent la limite des 20 °C que lors de rares épisodes. Les minimales enregistrées en hiver apparaissent dans la même gamme qu'à la station précédente.

Ces observations laissent transparaître l'influence que peut avoir la topographie de la vallée d'un tronçon de rivière comme les gorges d'Aiglun sur la thermie. L'orientation des gorges et l'encaissement limitent ici l'échauffement des eaux de l'Estéron.

Les fluctuations de hauteurs d'eau permettent d'identifier les principaux épisodes de crue dont celui de la tempête Alex du 2 octobre 2020 ayant entraîné une élévation estimée de plus de 3 mètres d'eau. Le second épisode s'est produit à la fin du mois de janvier 2021 où une montée de eaux d'environ 175 cm a été enregistrée.

La relation observée sur cette station entre températures et hauteurs instantanées présente une tendance de linéarité. Cela reflète le fait que les températures sont d'avantage reliées aux débits que dans les autres secteurs étudiés et que les débits exprimés y sont suffisamment conséquents pour que l'influence atmosphérique ne prédomine pas. Cela peut aussi traduire l'absence d'échange entre les écoulements de surface de l'Estéron et le sous-écoulement dans un secteur de gorge où la roche-mère constitue le substrat dominant.

Deux principaux modes se dégagent sur cette figure en termes de fréquence : le premier pour des températures autour de 10°C et des hauteurs supérieures à 50 cm représente les périodes de transition printanière et automnale et les épisodes de crue intermédiaire ; le second mode est observé pour des températures autour de 18°C et des hauteurs inférieures à 50 cm, il correspond aux périodes d'étiage estival.



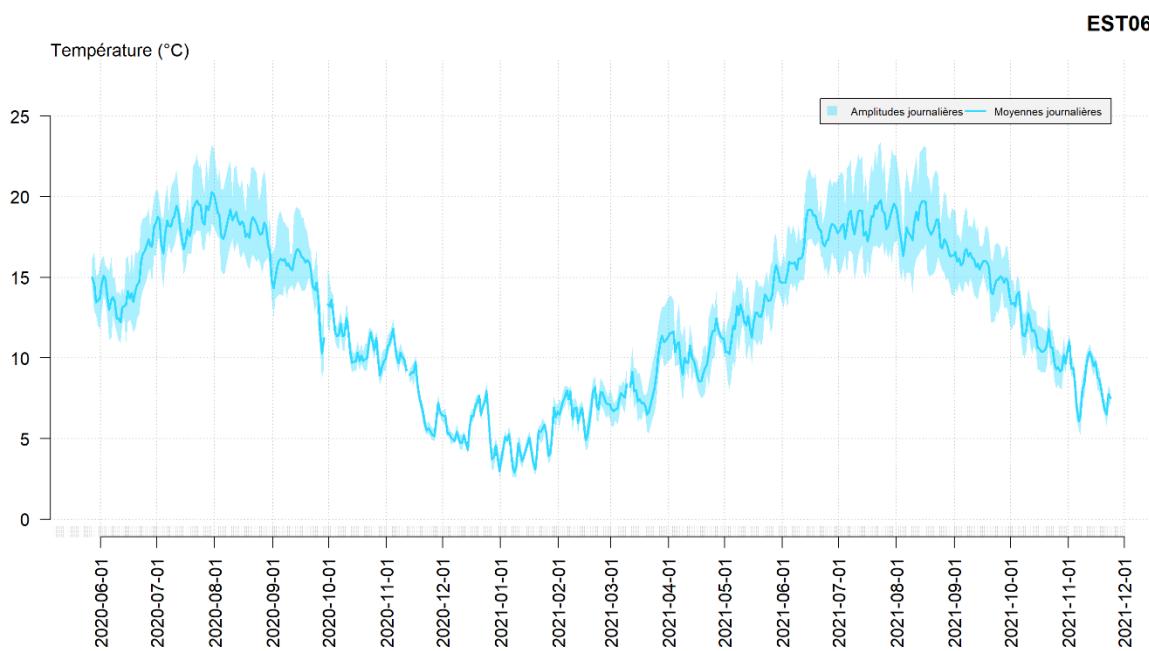
**Figure 25 : Représentation des 25828 couples {températures instantanées ; hauteurs d'eau instantanées} et des contours de densité estimées pour la station EST05.**

### ► Station EST06

Sur cette station, les limnimètres ont subi plusieurs problèmes au cours de la période d'étude rendant inexploitables les données. Seules les températures sont figurées.

Cette station est positionnée en aval de la confluence du Vegay, affluent alimenté par des résurgences karstiques fraîches mais dont une grande partie des débits est captée pour l'alimentation en eau des agglomérations des Alpes-Maritimes. Le Riolan conflue également dans l'Estéron environ 700 m en amont de la station EST06.

L'échauffement estival apparaît encore limité sur cette station, il est cependant légèrement supérieur par comparaison à la station précédente tout en restant modéré. Les maxima dépassent régulièrement le seuil de 20°C. Les amplitudes augmentent en période d'étiage. L'influence des affluents karstiques proches tamponne l'échauffement des eaux.

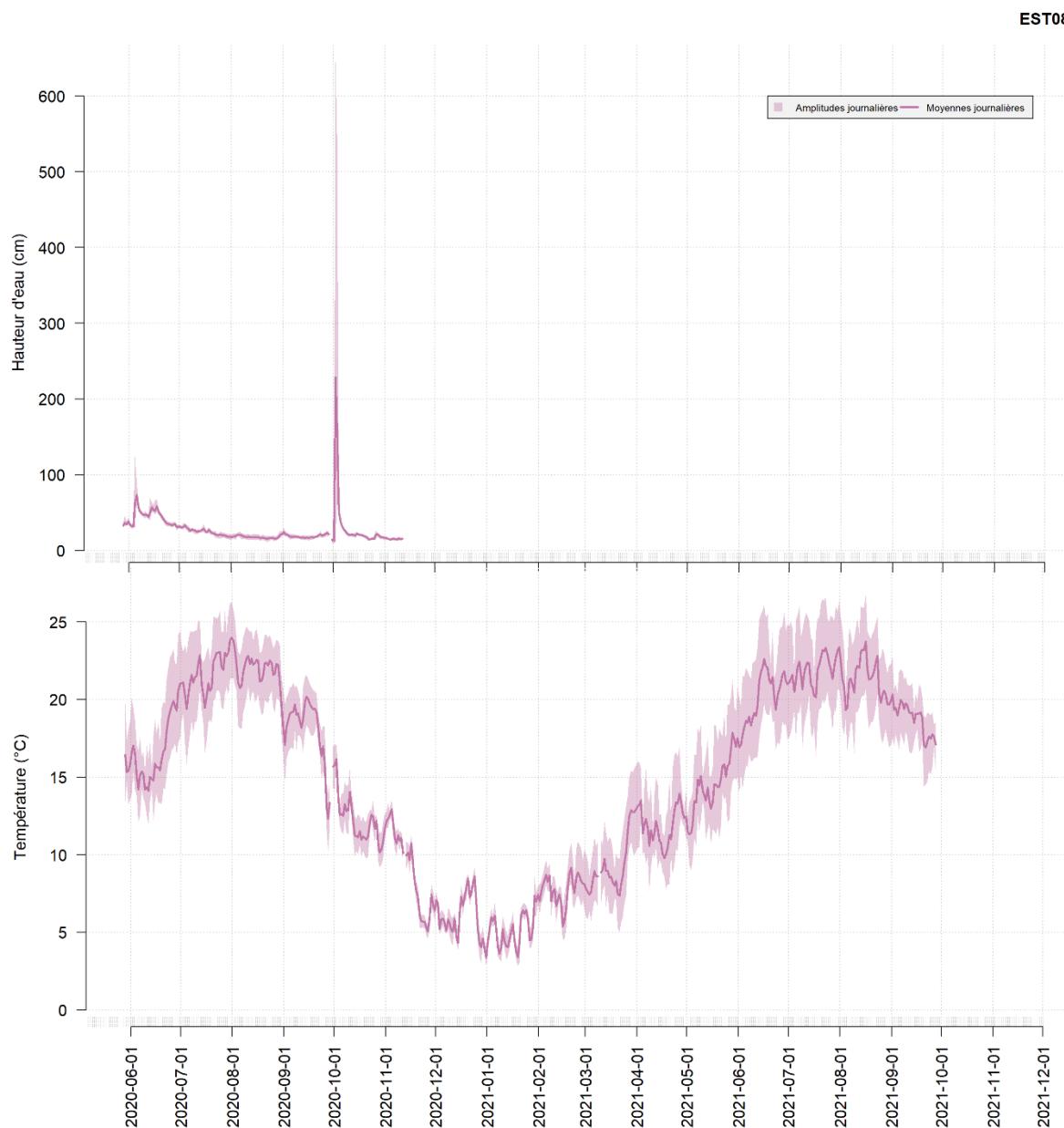


**Figure 26: Evolution des températures sur la station EST06.**

### ► Station EST08

Sur cette station, les données de hauteurs d'eau ne sont disponibles qu'en début de période d'étude. La représentation des températures en fonction des hauteurs n'est donc pas présentée.

Seule station du cours principal située dans la partie aval de l'Estéron et pour laquelle les chroniques de thermie couvrent un cycle hydrologique complet, la station EST08 est située au Pont de la Cerise, en amont des gorges de l'Estéron et dans un secteur où la vallée est relativement large.



**Figure 27 : Evolution des hauteurs d'eau sur la figure du haut et des températures sur la figure du bas sur la station EST08.**

Les températures maximales enregistrées ici mettent en évidence l'influence méditerranéenne sur ce tronçon aval de l'Estéron. Les moyennes journalières ont été comprises entre 20 et 25°C durant près de deux mois au cours de l'été 2021. Certaines maximales dépassent les 25°C. Les minimales enregistrées en hiver sont toujours inférieures à 5°C. Le régime thermique peut donc être considéré comme plus chaud par rapport aux tronçons amont.

Les hauteurs d'eau enregistrées estiment le pic de crue de la tempête Alex à plus de 6 m de hauteur. Les enregistreurs utilisés dans le cadre de cette étude étant conçus pour avoir une fiabilité de réponse hydrostatique dans un intervalle de pression plus restreint, il faut considérer ces valeurs maximales en crue avec précaution. On sait par exemple, que dans des conditions de pluviométrie très violente, les caractéristiques transitoires d'un écoulement torrentiel peuvent être localement très différentes en raison, d'une géométrie rétrécie, par suite du passage d'un embâcle, ou d'une charge considérable dans le transport de matières en suspension. Dans ce cas, seul un contrôle local de laisses de crue peut valider la donnée enregistrée.

#### **4.3.3.2. *Stations des affluents de rive droite de l'Estéron***

Sur ces affluents, les variations de hauteurs d'eau n'ont pas été suivies. Seules les températures sont disponibles. Comme discuté dans le chapitre 4.3.1, l'étendue temporelle des chroniques sur les affluents est plus variable que dans les stations du cours principal.

La Figure 28 présente les températures moyennes journalières des stations de rive droite.

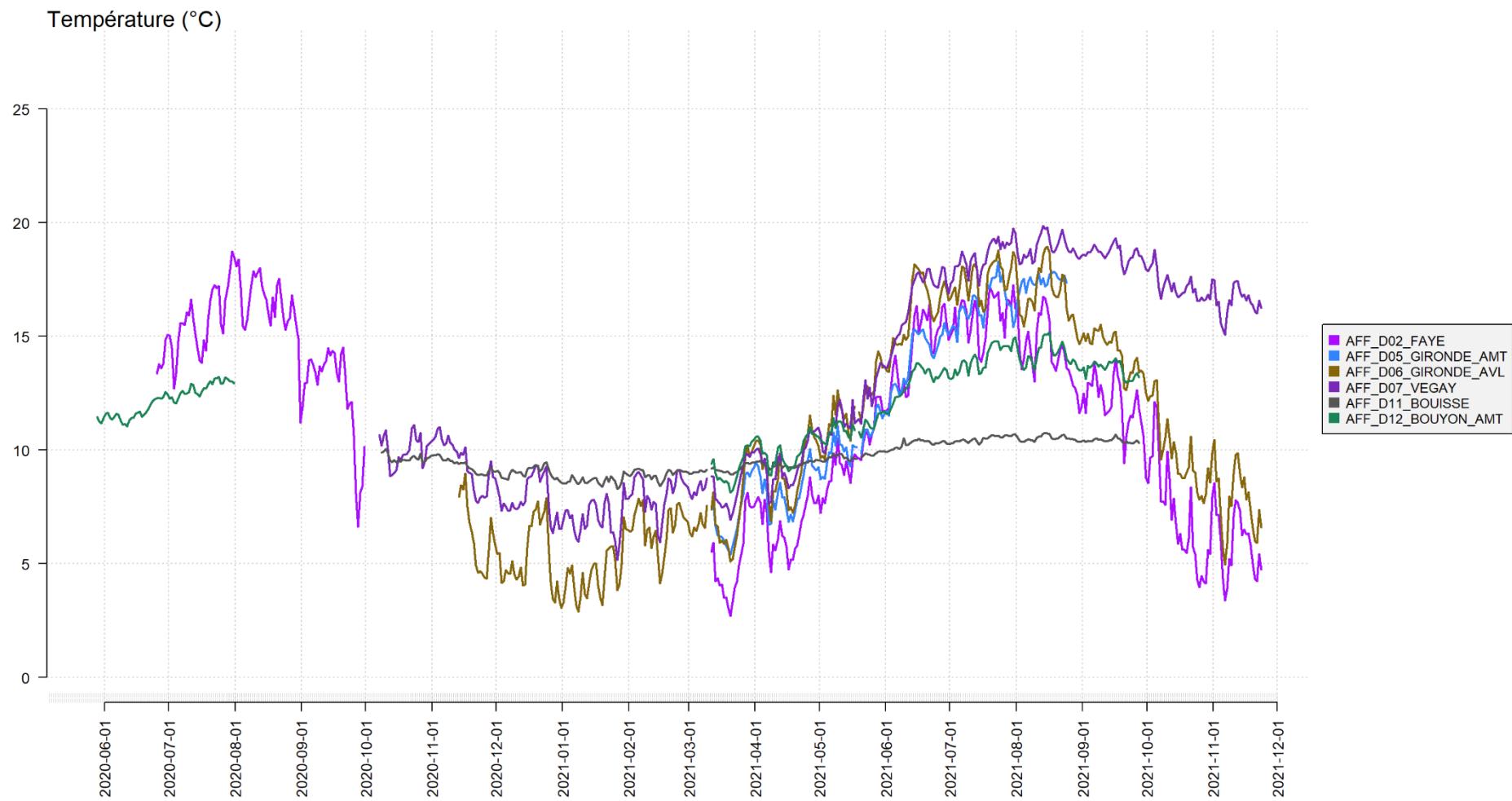
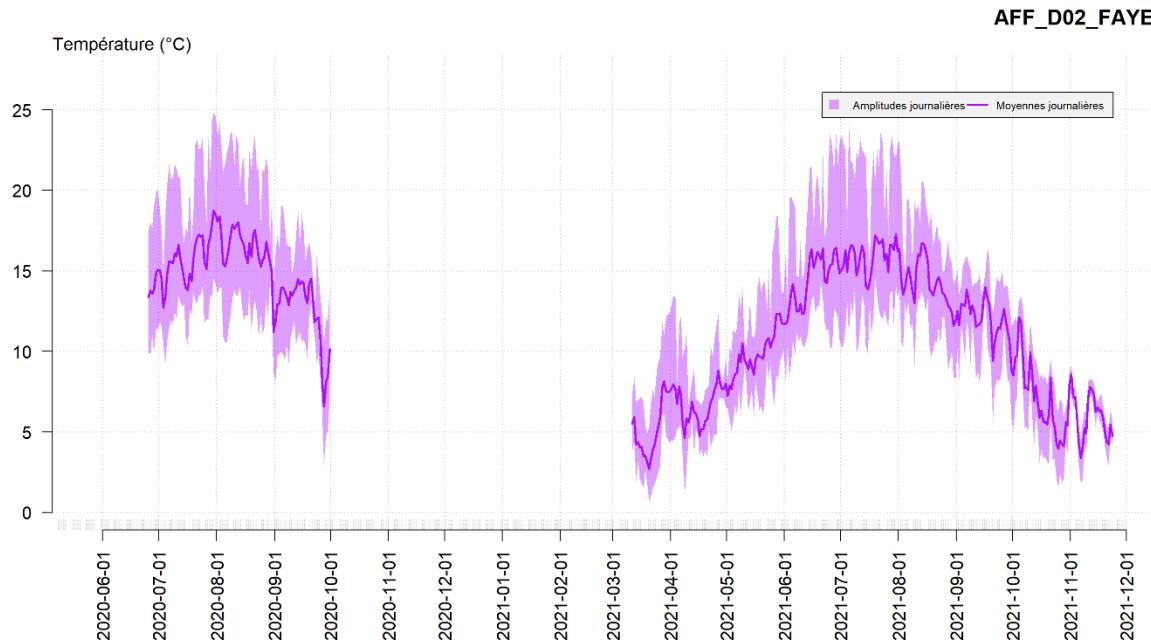


Figure 28 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations des affluents de rive droite de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021.

A l'exception des fortes divergences dans les données disponibles par station, les températures de ces affluents montrent des patrons de variation comparables à l'exception de deux stations : le Vegay et la Bousse. Les variations de températures sur 4 stations sélectionnées pour leur caractère commun (Faye) ou bien pour leur singularités (Vegay, Bousse et Bouyon Amont) sont détaillés dans les chapitres suivants.

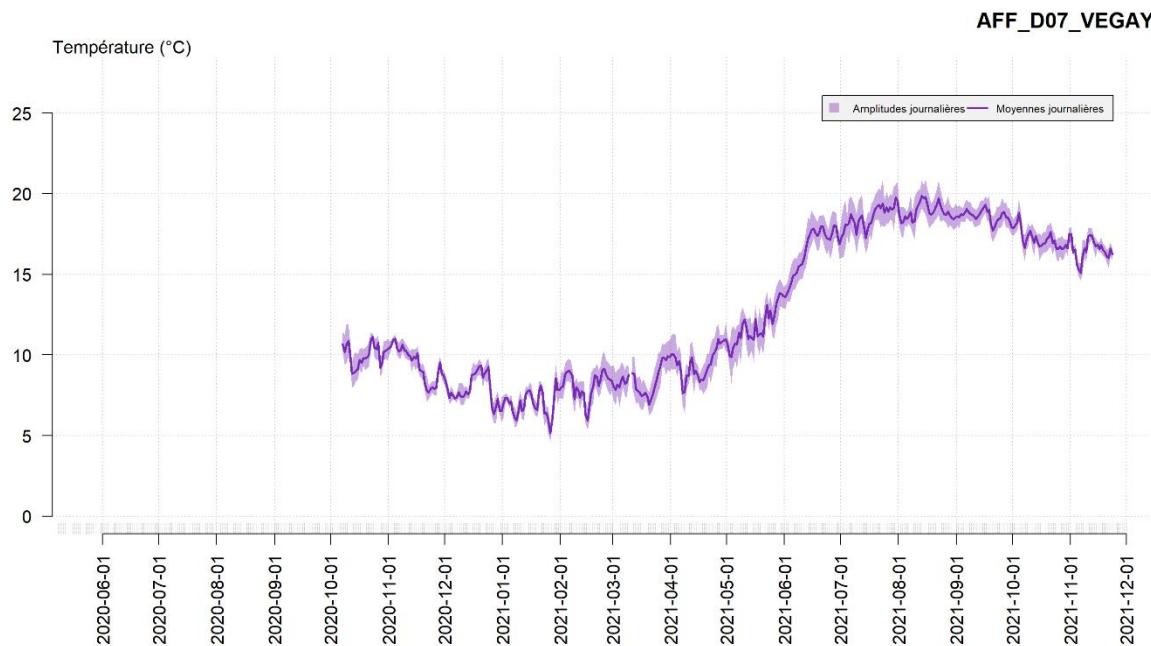
### ► Ruisseau de la Faye



**Figure 29 : Evolution des températures sur la station AFF\_D002\_FAYE.**

Le régime thermique de ce ruisseau apparaît similaire à celui de la Gironde (AFF\_D06\_GIRONDE\_AVL) dont le graphique n'est pas présenté ici. Les variations de températures de l'eau apparaissent en étroite relation avec les températures atmosphériques. Les amplitudes journalières sont maximales en été, elles atteignent ici 13,4°C au cours d'une journée de l'été 2021. Ce type de régime thermique peut être qualifié de représentatif de petits ruisseaux à régime hydrologique à dominance pluviale avec des étiages estivaux bien marqués et soumis à une influence hivernale marquée qui induit des températures froides (< 5°C).

## ► Ruisseau du Vegay



**Figure 30 : Evolution des températures sur la station AFF\_D07\_VEGAY.**

Sur le Vegay, le thermographe a été placé en aval de la cascade (voir la Carte 9). Les températures enregistrées présentent deux singularités :

- La première réside dans les très faibles amplitudes journalières observées. Ce fait est certainement dû à la combinaison du régime hydrologique de cet affluent qui bénéficie des résurgences karstiques au nord du massif du Cheiron, et de l'encaissement et de l'orientation de ce vallon en ubac sur un axe nord-sud (ce qui limite l'ensoleillement direct). Les amplitudes, qu'elles soient saisonnières ou journalières, y sont tamponnées par les apports des résurgences : des minimales hivernales à peine inférieures à 5°C, des maximales estivales atteignant à peine 20,9°C et une amplitude journalière maximale de 3,2°C.
- La seconde singularité observée ici réside dans le fait que les températures sont restées relativement élevées durant l'automne 2021 en comparaison aux autres stations. Cela est particulièrement observable sur la Figure 28.

Il en résulte que le régime thermique du Vegay n'apparaît pas, à part entière, typique d'une zone de résurgence puisque la saisonnalité y est marquée (voir les données enregistrées au niveau de la source de la Bouisse ou à la source de Fontaines pour comparaison).

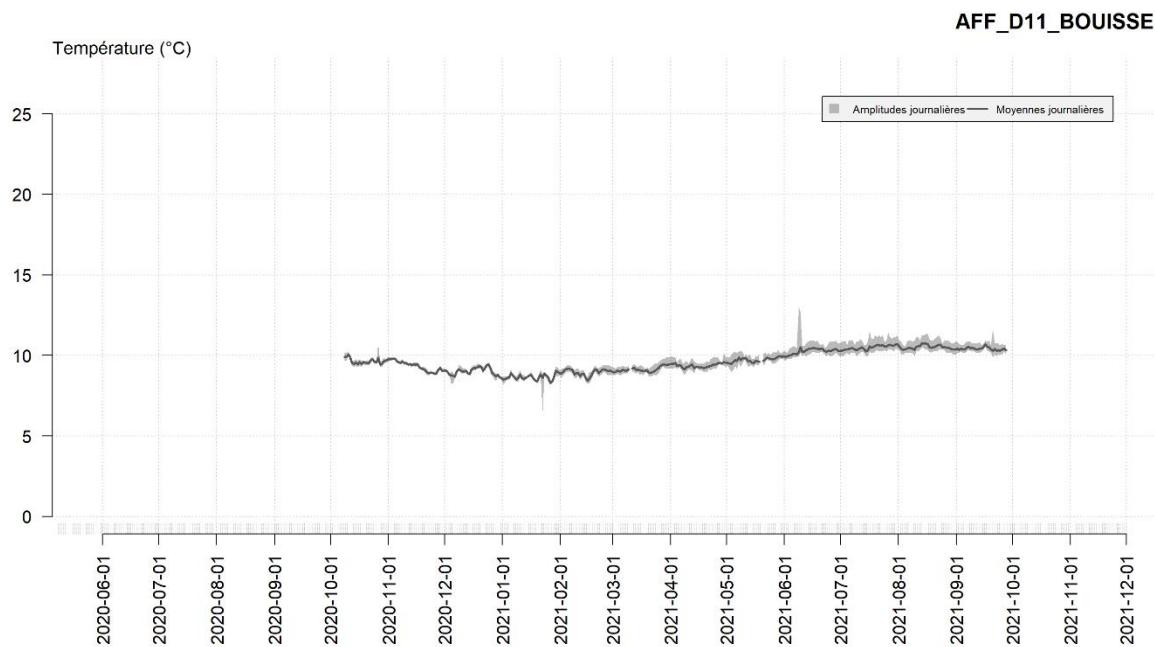
L'influence de la cascade du Vegay sur la thermie est à interroger du fait de l'augmentation des échanges calorifiques entre l'eau et l'atmosphère dans une écoulement très turbulent. Ce



**Photo 11 : Le ruisseau du Vegay en aval de la cascade le 24 juin 2020.**

constat pourrait être également mis en relation avec les prélèvements pour l'alimentation en eau potable dans la partie haute du Vegay qui, en diminuant les débits du ruisseau, augmente sa relation avec la température atmosphérique. En l'absence de données sur les débits des résurgences alimentant ce ruisseau en partie haute, les débits captés pour l'AEP parfois dans le massif calcaire même en amont des résurgences et les débits transitant dans le ruisseau, l'influence de l'hydrologie sur la thermie est ici difficilement distinguable.

### ► Source de la Bouisse

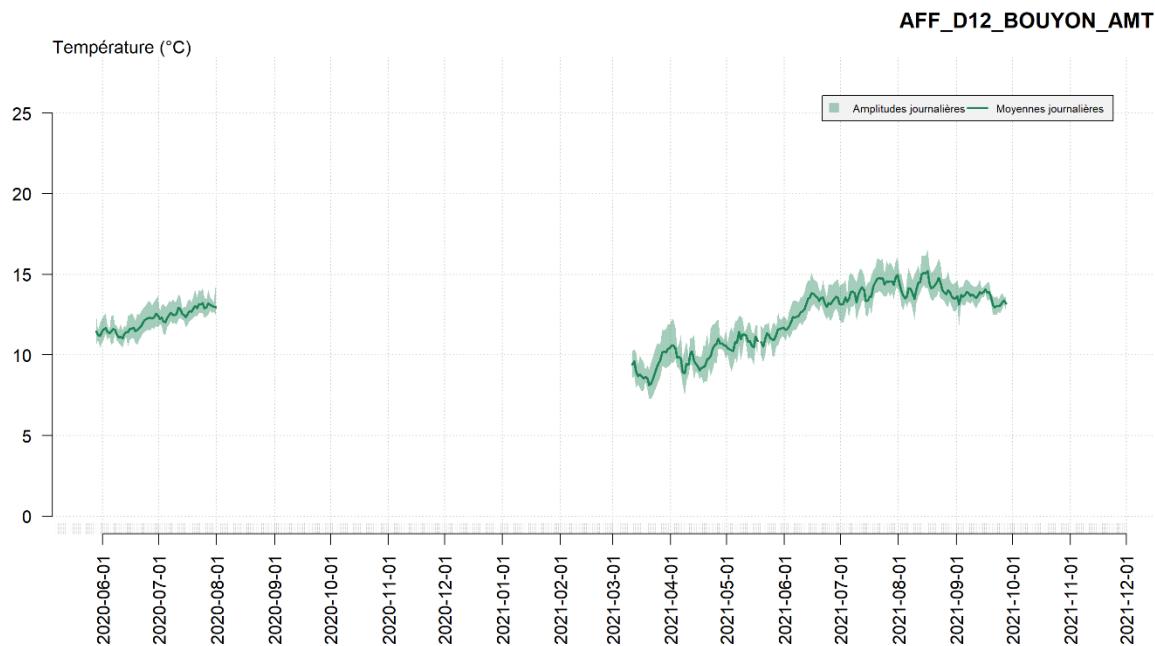


*Figure 31 : Evolution des températures sur la station AFF\_D11\_BOUISSSE*

Les températures sur la Bouisse ont été enregistrées environ 250 m en aval des sources et 150 m en aval de la confluence du ruisseau le Malvallon dont le régime hydrologique apparaît nettement plus lié aux précipitations et plus lié aux températures atmosphériques. Le régime thermique de la Bouisse apparaît clairement singulier avec une stabilité des températures enregistrées : toutes les moyennes journalières sont comprises entre 8 et 11°C, l'amplitude maximale journalière est de 3°C et apparaît anecdotique (un problème de l'enregistreur est soupçonné).

L'influence des apports karstiques profonds du massif du Cheiron se manifeste donc pleinement sur le régime thermique de la Bouisse.

### ► Le Bouyon dans sa partie amont



**Figure 32 : Evolution des températures sur la station AFF\_D12\_BOUYON\_AMT**

Tout comme le Vegay ou la source de la Buisse, la partie apicale du Bouyon est également alimentée par des résurgences karstiques en provenance du massif du Cheiron : la source de la Gravière est constituée par un groupe d'émergences dans les alluvions du Bouyon en amont de Bézaudun-les-Alpes.

Même si la chronique des températures enregistrées apparaît très disparate en raison de difficultés techniques, l'observation des températures durant la saison estivale de 2021 permet d'observer, au moins, les maxima sur ce tronçon du Bouyon. Les températures y sont restées fraîches ne dépassant que rarement les 16°C. L'influence karstique sur le régime thermique est donc là aussi sensible mais moins marquée que sur la Buisse puisque l'amplitude y est plus élevée.

#### 4.3.3.3. Stations des affluents de rive gauche de l'Estéron

La Figure 33 permet de comparer les variations des températures moyennes journalières des affluents de rive gauche instrumentés.

D'une manière générale, ces affluents présentent deux types de régimes thermiques :

- Le premier caractérisé par **une saisonnalité marquée** avec des amplitudes variables entre les cours d'eau et observées sur l'ensemble des stations à l'exception de celle mentionnée dans le point suivant. L'influence du climat alpin y est parfois marquée comme sur le ruisseau de Saint-Pierre lors de l'étiage hivernal ;
- Le second régime est celui observé au niveau de la source de Fontaines (AFF\_G09\_FONTAINES) qui se caractérise par une extrême **stabilité saisonnière** et qui apparaît typique d'une résurgence d'eau profonde.

Les évolutions temporelles ne sont pas d'avantage discutées ici. Ces graphiques sont disponibles en annexe 2.3.



Figure 33 : Evolution des températures moyennes journalières sur les stations des affluents de rive gauche de l'Estéron entre mai 2020 et novembre 2021.

#### 4.3.4. Métriques synthétiques des régimes thermiques

Afin de permettre des comparaisons quantitatives des différentes chroniques de températures et de tenter de dégager les caractéristiques des régimes thermiques les plus influentes sur la structuration des communautés d'invertébrés aquatiques, un certain nombre de métriques ont été calculées comme expliqué dans le chapitre 3.3.

Ces métriques ne sont pas présentées dans leur intégralité mais sont utilisées en tant que variables environnementales pour être confrontées aux structures des communautés benthiques dans les chapitres suivants.

Une partie de ces métriques sont représentées directement ou dans les légendes des graphiques présentés dans les annexes 2.1, 2.2 et 2.3. Certaines d'entre elles sont utilisées afin de pondérer l'influence des régimes thermiques sur la structuration des peuplements benthiques (chapitres 4.4.1.4 et 4.4.2.1).

#### 4.3.5. Synthèse des résultats sur les régimes thermiques

**Sur le cours principal de l'Estéron, un gradient longitudinal d'influence du climat alpin vers un climat méditerranéen** est observé. Les températures des deux premières stations sont clairement fraîches. Un changement de régime est déjà observé au niveau de la station EST03. Les régimes thermiques des stations EST04 à EST06 ne montrent pas de franche continuité dans un gradient de réchauffement amont-aval. L'encaissement et l'exposition de la vallée, les relations entre surface et sous-écoulement et les apports frais de certains affluents expliquent localement ces observations. A partir de la station EST07 et jusqu'à la confluence avec le Var, et même si les chroniques de températures sont très courtes sur certaines stations, un net réchauffement des eaux est mesuré et l'influence du climat méditerranéen s'exprime alors.

Les régimes thermiques des affluents de l'Estéron alimentés par des **résurgences karstiques** apparaissent tous **tamponnés** mais à des degrés divers. Cette influence karstique semble varier selon l'importance des apports des résurgences dans les régimes hydrologiques des cours d'eau et l'éloignement des lieux d'enregistrement par rapport aux résurgences :

- La source de Fontaines et celle de la Bouisse présentent des **amplitudes saisonnières nulles**, l'essentiel des eaux de ces cours d'eau provient du karst et les points d'instrumentation sont proches de ces résurgences ;
- Les températures enregistrées sur le Bouyon dans sa partie amont apparaissent plus variables selon la saison mais avec une influence karstique importante, le lieu d'instrumentation étant situé bien en aval des principales résurgences ;
- Le Vegay, en aval de la cascade, montre un régime thermique original : une relation étroite des températures des eaux et avec les températures atmosphériques est observée surtout en fin d'automne 2021. Cette relation entre température de l'eau et atmosphérique laisse transparaître une accentuation des échanges thermiques au niveau de la cascade – ce phénomène pourrait être exacerbé par les captages pour l'alimentation en eau potable dans le karst.

Ces cours d'eau alimentés par des apports karstiques constituent des **enclaves froides** au sein du bassin de l'Estéron et assurent également un **rôle de soutien hydrologique** non négligeable.

Enfin, les affluents de l'Estéron ne bénéficiant pas de résurgence karstique importante présentent des régimes thermiques en relation étroite avec les températures atmosphériques. La saisonnalité est marquée. L'influence du climat alpin dans la partie haute du bassin apparaît d'autant plus clairement que les niveaux des basses eaux sont faibles.

#### **4.4. Structuration des peuplements et relation aux variables environnementales**

Les communautés d'invertébrés benthiques des stations étudiées ont été échantillonnées selon deux protocoles.

Les prélèvements quantitatifs permettent d'obtenir des densités par taxons. Le niveau de détermination est souvent celui du genre pour les ordres des Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères. Une détermination à l'espèce est parfois atteinte uniquement pour les taxons identifiables de manière fiable au stade larvaire. Ces prélèvements concernent les neuf stations du cours principal de l'Estéron. Les détails de la méthodologie sont fournis dans le chapitre 3.1.

Les prélèvements qualitatifs ont pour objectif de recenser le plus exhaustivement possible le nombre d'espèces présentes dans le bassin versant en focalisant principalement sur les trois ordres particulièrement porteurs d'informations pour la bioindication en cours d'eau que sont les Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères. Les niveaux de détermination sont majoritairement poussés à l'espèce, quelques individus ont été identifiés au niveau générique. Ces prélèvements concernent les neuf stations du cours principal de l'Estéron, mais également des stations complémentaires sur ce cours d'eau et de nombreuses stations positionnées sur les affluents. Les détails de la méthodologie pour ce type de prélèvement sont fournis dans le chapitre 3.2.

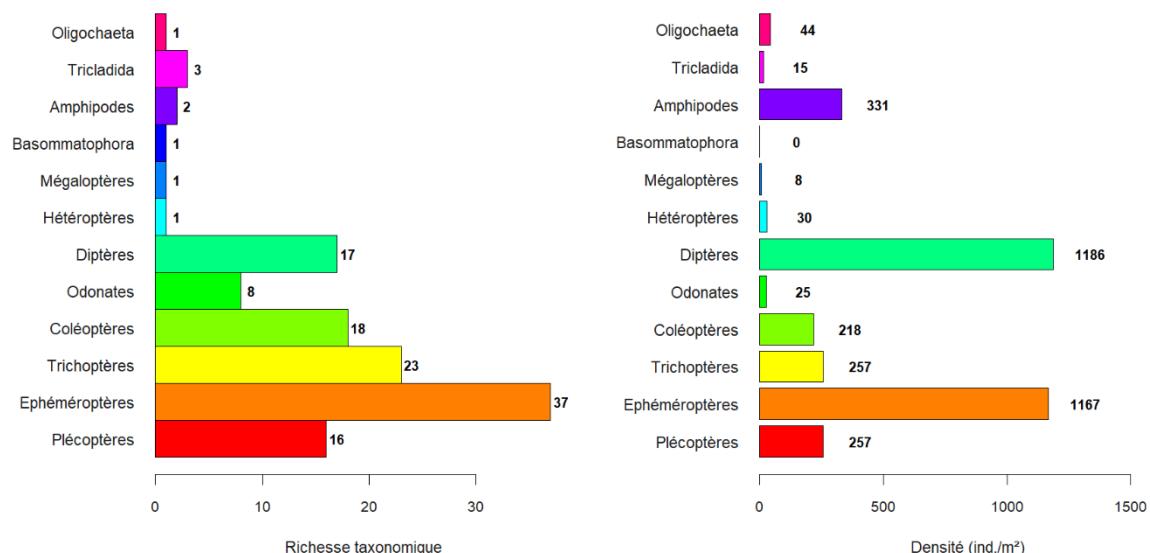
#### 4.4.1. Communautés benthiques du cours principal de l'Estéron

Pour rappel, deux campagnes de prélèvements ont été menées en mai et septembre 2020 afin d'obtenir des images des populations se succédant entre les saisons. Six surbers (d'une surface de 0.05 m<sup>2</sup>) ont été prélevés par station à chaque campagne en visant trois types d'habitats. Tous les détails sont fournis dans le chapitre 3.1.

La liste faunistique agrégée par campagne de prélèvement est présentée en annexe 3 de ce rapport.

##### 4.4.1.1. Bilan global

Sur les neuf stations du cours principal de l'Estéron, plus de 190000 individus ont été identifiés parmi 128 taxons. Les figures suivantes représentent la répartition des richesses et des densités entre les principaux groupes faunistiques. Les effectifs sont exprimés en densités représentant le nombre d'individu trouvé par m<sup>2</sup>.



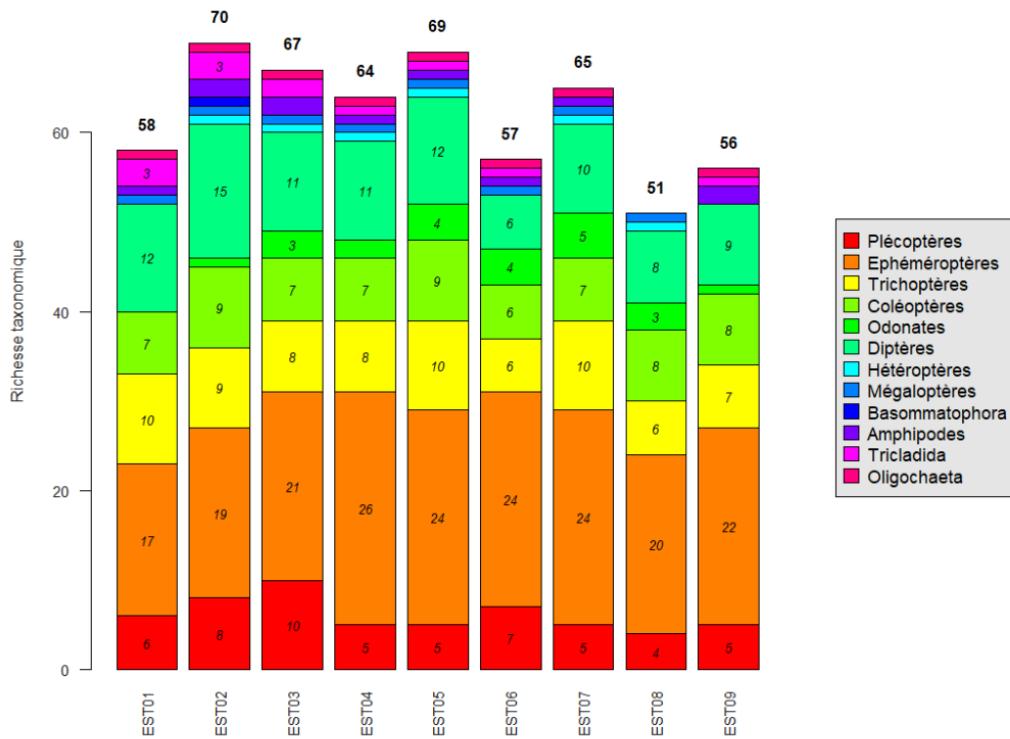
**Figure 34 : Répartition des richesses taxonomiques sur la figure de gauche et des densités sur la figure de droite au sein des groupes faunistiques.**

L'ordre des Ephéméroptères apparaît ici le plus représenté en richesse et se situe en seconde position en termes de densité. L'ordre des Diptères est le plus abondant. Les richesses les plus élevées sont ensuite rencontrées chez les Trichoptères, les Coléoptères les Diptères et les Plécoptères. Le troisième ordre le plus abondant est celui des crustacés amphipodes.

Comme évoqué dans les chapitres traitant de la méthodologie, les efforts de détermination dans l'étude des communautés benthiques en cours d'eau sont d'avantage poussés pour la classe des Insectes et plus particulièrement les trois ordres des PET (Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères). Les valeurs de richesses observées dans ces données sont donc nettement dépendantes de ces choix méthodologiques. La comparaison entre les stations demeure néanmoins possible lorsqu'un même effort a été porté sur les différents sites, ce qui est le cas de la présente étude.

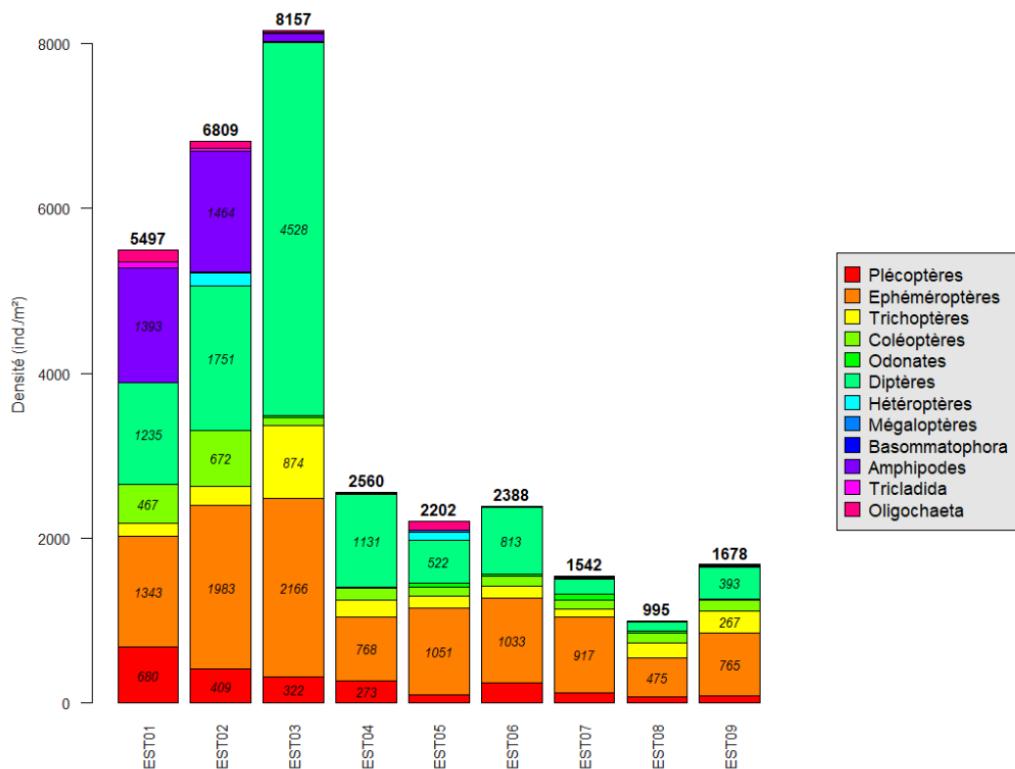
#### 4.4.1.2. Bilan stationnel

Les graphiques suivants présentent de la même manière la décomposition des richesses et des densités par groupe faunistique en agrégeant les données par station.



**Figure 35 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques par station du cours principal de l'Estéron (prélèvements quantitatifs).**

Au niveau des variations entre les stations, la richesse taxonomique varie entre 51 taxons en EST08 et 70 taxons en EST02. A l'exception de cette valeur minimale en EST08, les richesses apparaissent relativement homogènes. La richesse en Ephéméroptères est minimale dans les deux stations les plus amont et apparaît homogène sur les autres stations avec des valeurs comprises entre 20 et 26 taxons. Celle en Plécoptères est maximale en EST03, les Diptères y sont également bien représentés.



**Figure 36 : Répartition des densités par station au sein des groupes faunistiques.**

Au regard des densités, les trois stations situées en amont affichent des niveaux largement supérieurs au reste de la rivière. Ces densités élevées sont principalement dues aux effectifs de trois ordres : les Diptères (surtout sur EST03), les Ephéméroptères et les Amphipodes. Ces groupes sont ici principalement représentés ici par des organismes se nourrissant de débris organiques fins et par des racleurs de diatomées qui constituent le principal type de production primaire. Parmi ces taxons les plus abondants dans les trois stations apicales, se trouvent des diptères : *Simuliidae* et *Chironomidae*, des amphipodes : *Gammarus* et différents genres des éphéméroptères appartenant à la famille des *Baetidae*.

De telles variations de densités de ce type d'organismes le long du gradient longitudinal de l'Estéron, peuvent trouver leurs explications dans plusieurs phénomènes :

- Un enrichissement en matière organique dans la partie amont. Bien que les données d'épuration ne montrent pas de pression particulière de ce type sur l'amont du bassin, des éventuels rejets diffus provenant d'autres sources ne sont pas à exclure, tels que ceux provenant d'activités de pâturage ;
- Une offre d'habitats diversifiée pour la macrofaune benthique dans la partie amont (les conditions géomorphologiques pourraient soutenir une production primaire accrue en amont de l'Estéron et s'avérer limitantes dans les tronçons plus en aval davantage soumis à des pulses hydrologiques fréquents) ;
- Un niveau de stabilité du lit accru dans la partie amont du bassin versant. Dans la partie aval, l'instabilité hydrologique, accentuée par les apports des affluents et la mise en contrainte du lit par la morphologie de la vallée et la présence d'infrastructures, limite certainement la mise en place de réseaux trophiques complexes.

Les plus faibles valeurs de richesses taxonomiques (Figure 35) et de densités (Figure 36) sont observées à la station EST08. Cette station située en amont du pont de Cerise au début des gorges de l'Estéron est un secteur particulièrement fréquenté par des baigneurs. Durant chaque campagne de prélèvement, une forte affluence a très souvent été observée. L'impact de cette fréquentation sur la structure des communautés benthiques se fait ressentir via le piétinement et la modification des habitats comme la construction de seuils.

L'indice de Sorenson mesurant classiquement la diversité bêta entre l'ensemble des stations du cours principal est égal à 0,34. Cela reflète la proportion de taxons communs le long du gradient amont-aval de l'Estéron. Cette précision est apportée ici afin de pouvoir servir de comparaison avec des inventaires réalisés à des niveaux de détermination similaires.

#### 4.4.1.3. Evolution saisonnière des peuplements

A partir des listes faunistiques agrégées par station et par campagne, la comparaison des différences stationnelles observées permet de dégager l'effet saisonnier sur la structuration des peuplements. Les graphiques suivants présentent les variations de l'indice de diversité de Shannon-Wiener et de l'indice d'équitabilité de Piélou entre stations pour les deux campagnes réalisées. Le premier indice tient compte des abondances relatives des taxons et permet de mesurer la diversité locale. La comparaison relative de ces valeurs indicielles entre les campagnes et entre les stations n'est possible que si l'effort de détermination et la méthodologie de prélèvement ont été constants. Ces conditions sont remplies pour les données exploitées ici.

En complément du premier indice, l'indice d'équitabilité permet de pondérer la répartition des effectifs au sein des taxons présents. Il est défini comme le ratio entre l'indice de Shannon-Wiener observé et la valeur maximale de ce même indice correspondant à un peuplement hétérogène. Il varie entre 0 pour une distribution inégale des effectifs au sein des taxons présents, à 1 pour une équirépartition des effectifs.

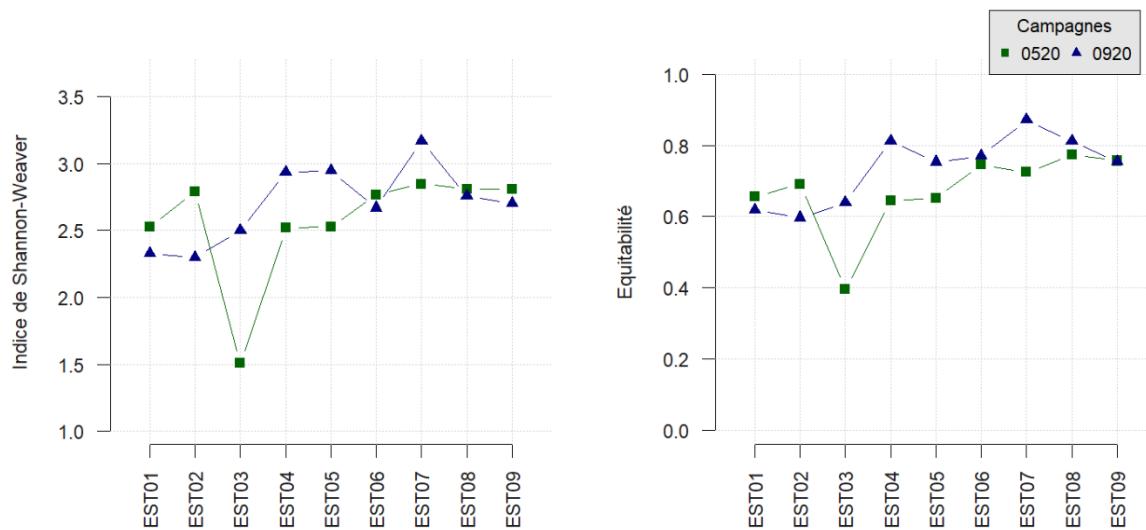


Figure 37 : Indices de diversité de Shannon-Wiener (figure de gauche) et indice d'équitabilité de Piélou (figure de droite) par station et par campagne. Les campagnes sont codées en « 0520 » pour mai 2020 et « 0920 » pour septembre 2020.

Au regard des valeurs d'indice de diversité obtenues sur le linéaire de l'Estéron, il ne semble pas se dégager de gradient longitudinal entre ces stations. Les fluctuations d'indice de Shannon sont certainement dépendantes des spécificités locales des stations d'étude.

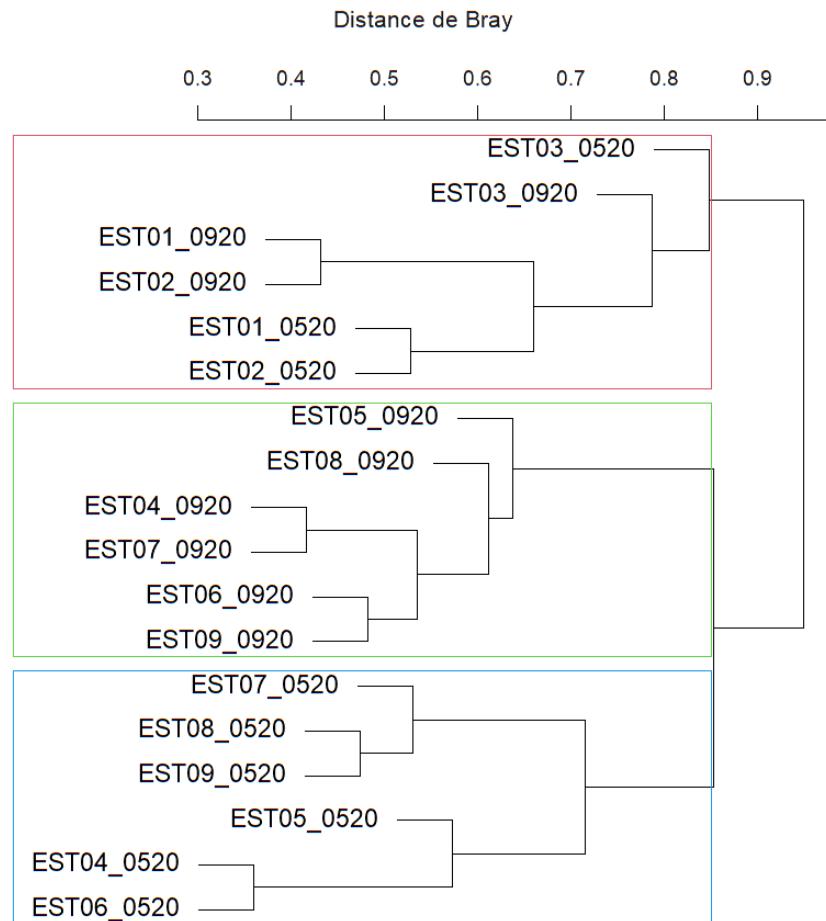
Les peuplements des stations les plus apicales, EST01 et EST02, présentent des valeurs d'indice de diversité dans la moyenne en mai mais des valeurs indicielles relativement basse dans la gamme basse en septembre. L'étiage estival y est d'avantage marqué sur ce tronçon de l'Estéron que sur les stations en aval, les débits mesurés en septembre étaient respectivement de 17 et de 109 L/s (voir chapitre 4.1.2). L'influence d'une période de faible débit exacerbant, entre autre effet, les effets d'un enrichissement en matière organique dans ce secteur, est donc ressentie sur la structuration des communautés benthiques observées en septembre.

En mai 2020, la station EST03 apparaît en net décalage dans la zonation amont-aval et plus particulièrement au regard des valeurs de diversité. L'équitableté y est également minimale reflétant un fort déséquilibre dans la répartition des effectifs, la tribu des Simuliini (Diptère) y représente près de 65% des effectifs rencontrés. L'échauffement des eaux relativement élevé sur cette station au regard de son positionnement dans le gradient amont-aval (voir chapitre 4.3.3) est certainement un facteur favorisant la dominance d'organismes à cycle vital court et dont la dynamique populationnelle profite de périodes printanières précoces.

Toujours lors de cette campagne de mai 2020, une augmentation des valeurs indicielles de Shannon est observée entre EST04 jusqu'à EST07 sans pour autant que cette hausse ne se soit poursuivie sur les deux stations les plus en aval : EST08 et EST09. Ce constat pourrait indiquer l'atteinte d'une limite dans la capacité d'accueil des stations les plus en aval en lien avec la thermie ou la morphologie du lit.

Pour la campagne de septembre 2020, une augmentation de la diversité est observée depuis EST01 jusqu'à EST04 et EST05. Les valeurs chutent en EST06 pour atteindre les maxima en EST07. C'est donc sur la station située au plus près de la confluence d'un affluent notable à régime karstique, EST07, que les valeurs de diversité et d'équitableté les plus élevées sont observées en septembre 2020. Le soutien d'étiage et le maintien de températures fraîches en période estivale par ce type d'affluents sont des phénomènes favorables pour la diversité observée ponctuellement dans le cours principal.

La Figure 38 est un dendrogramme établi à partir d'une matrice de distances de Bray calculées entre chaque couple des listes faunistiques agrégées par campagnes et par station. La distance de Bray entre deux peuplements compare la composition et les effectifs et permet de déceler correctement les gradients écologiques sous-jacents. Les rectangles figurés sur ce dendrogramme sont isolés sur une base arbitraire d'un nombre de groupe fixé ici à 3.



**Figure 38 : Dendrogramme des distances de Bray calculées sur les listes faunistiques agrégées par campagne et par station.**

Sur la base de la comparaison des structures de population, ce dendrogramme permet de distinguer trois groupes :

- Le premier constitué des peuplements échantillonnés sur les **3 stations les plus amont** que ce soit lors de la campagne de mai ou celle de septembre (rectangle rouge). Les structures des peuplements du couple EST01 et EST02 apparaissent donc très proches avec des similitudes plus marquées au regard de la saisonnalité. Les peuplements d'EST03 sont plus singuliers relativement dans ce groupe et ce, indépendamment de la saison ;
- Un second groupe constitué des peuplements des stations EST04 à EST09 lors de la campagne de **septembre 2020** (rectangle vert). Trois sous-groupes apparaissent (EST05 avec EST08, EST04 avec EST07, et EST06 avec EST09) sans pour autant refléter la succession des stations dans la zonation amont-aval ;

- Un dernier groupe constitué des peuplements observés aux mêmes stations mais lors de la campagne de **mai 2020** (rectangle bleu). Deux sous-groupes peuvent être dégager dans ce rectangle bleu : les trois stations du cours intermédiaire de l'Estéron (EST04, EST05 et EST06) opposées aux trois stations les plus aval (EST07, EST08 et EST09).

Ces résultats montrent que les **communautés des trois stations les plus amont apparaissent nettement singulières par rapport au reste du cours principal et, cela, quelle que soit la saison.**

A l'inverse, la **saisonnalité apparaît d'avantage influente dans la structuration des peuplements des stations aval**, depuis EST04 jusqu'à EST09. Les effets stationnels sont donc ici relégués au second plan. Cela est particulièrement vrai pour la campagne de fin de saison estivale, la période d'étiage estival pouvant induire une certaine homogénéisation des peuplements.

Ces premiers résultats sur les seules données faunistiques du cours principal de l'Estéron trouvent une résonance dans la description des régimes thermiques de ces mêmes stations présentée dans le chapitre 4.3.5.

#### 4.4.1.4. Recherche des variables environnementales structurantes des peuplements du cours principal de l'Estéron

Sur la base de la méthodologie analytique présentée dans le chapitre 3.5, les résultats concernant les prélèvements quantitatifs sont figurés et commentés ici. Les données d'entrée de ces analyses sont les listes faunistiques agrégées par campagne et par station sur sept stations du cours principal de l'Estéron, les stations EST07 et EST09 ayant dû être retirées car les données de températures présentaient des lacunes.

Deux variables environnementales parmi d'autres ont été sélectionnées comme particulièrement influentes (F) et cela, de manière significative ( $Pr(>F)$ ), à l'aide de la PERMANOVA entre matrice de distance des assemblages faunistiques et un jeu de variables abiotiques présélectionnées. Ces résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 6 : Résultats de la PERMANOVA entre la matrice de distance faunistique des 7 stations du cours principal de l'Estéron et un jeu de variables environnementales présélectionnées. Les abréviations des noms de colonnes correspondent à « Df » pour degré de liberté, « SumOfSqs » pour somme des carrés,  $R^2$  pour le R-carré, « F » pour la statistique de Fisher et « Pr(>F) » pour la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle à tort.**

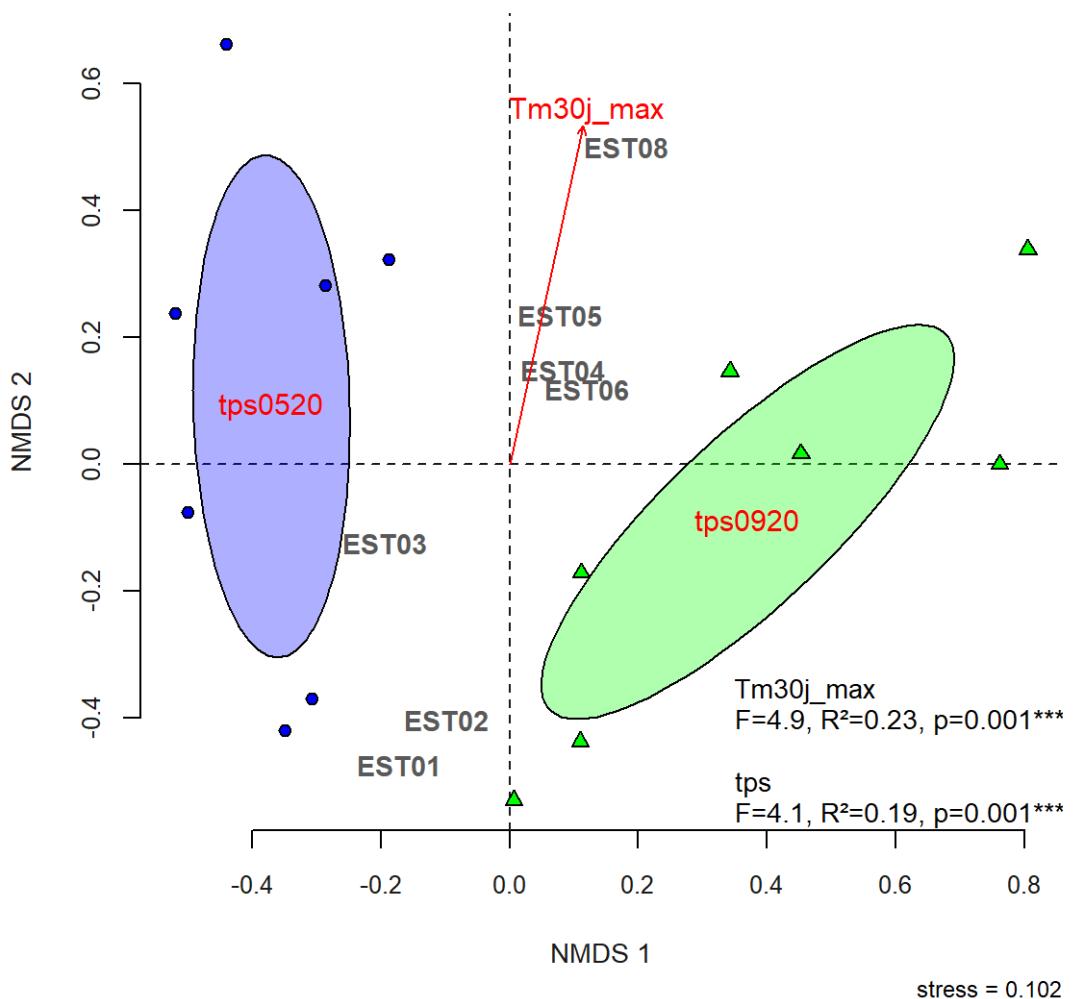
Code variables	Type variables	Description variable	Df	SumOfSqs	$R^2$	F	Pr(>F)
Tm30j_max	Thermie	T° moy. des 30 j. les + chauds	1	0.8337	0.2278	4.9293	0.001
Vit_deg_j_TMJ	Thermie	Vitesse d'échauffement printanier	1	0.2712	0.0741	1.6033	0.120
pourJ_Tmj_inf4	Thermie	% de j. où $Tmj < 4$	1	0.1387	0.0379	0.8203	0.592
pourcJ_Tmj_4a19	Thermie	% de j. où $4 < Tmj < 19$	1	0.1812	0.0495	1.0714	0.374
tps	Saison	Mois d'échantillonnage	1	0.6987	0.1909	4.1310	0.001
pente_Cp	Station	Pente moyenne du tronçon	1	0.3132	0.0856	1.8522	0.067
Alt	Station	Altitude de la station	1	0.2091	0.0571	1.2361	0.238
Residual			6	1.0148	0.2772		
Total			13	3.6605	1		

En dehors de la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds et du mois d'échantillonnage (tps), les résultats de la PERMANOVA montrent que les autres variables abiotiques présélectionnées n'ont pas d'influence significative sur la composition des communautés des stations étudiées. Ainsi, les variables suivantes ne sont pas projetées sur le plan de la NMDS : la pente moyenne du tronçon de la station (pente\_Cp), l'altitude des stations (Alt), la vitesse d'échauffement printanier des températures moyennes journalières (Vit\_deg\_j\_TMJ), le pourcentage de jours où la température moyenne journalière est inférieure à 4°C (pourJ\_Tmj\_inf4) ou bien encore le pourcentage de jours où la température moyenne journalière est comprise entre 4 et 19°C (pourcJ\_Tmj\_4a19)

La NMDS de la composition des communautés d'invertébrés du cours principal de l'Estéron a convergé sur une solution à deux axes avec un stress de 0,102 reflétant une adéquation du modèle jugée correcte. Les deux variables environnementales sélectionnées à l'aide de la PERMANOVA sont bien et significativement ajustées à l'ordination de la NMDS : le **température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds** (« Tm\_30jmax »), avec un  $R^2=0,94$ , et la variable relative au **mois d'échantillonnage** (« tps »), avec un  $R^2=0,47$ .

Les communautés de ces stations apparaissent liées à la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds sur chaque station et au mois d'échantillonnage (PERMANOVA,  $p = 0,001$ ).

La Figure 39 présente le plan de la NMDS, la projection des variables environnementales et leurs degrés de structuration de la faune ainsi que les barycentres des sept stations étudiées.



**Figure 39 : Représentation de la NMDS montrant les différences de structuration des communautés des 7 stations du cours principal de l'Estéron avec la projection des variables environnementales et leur degré de structuration ( $R^2$  et  $p$ -value de la PERMANOVA). Les communautés de la campagne de mai 2020 (ronds bleus) et celles de la campagne de septembre 2020 (triangles verts) sont regroupées par des ellipses. Les barycentres des stations sont figurés par leurs codes écrits en gris.**

D'après les résultats de la NMDS, la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds explique une part légèrement supérieure de variance des structures des communautés que les mois d'échantillonnage dans les sept stations du cours principal de l'Estéron. Le plan factoriel se structure avec une opposition des deux campagnes de prélèvement sur le premier axe : la campagne de mai dans la partie négative et celle de septembre dans la partie positive ; et avec un gradient longitudinal des stations sur le second axe avec les stations amont dans la partie négative de l'axe et les stations aval dans la partie positive.

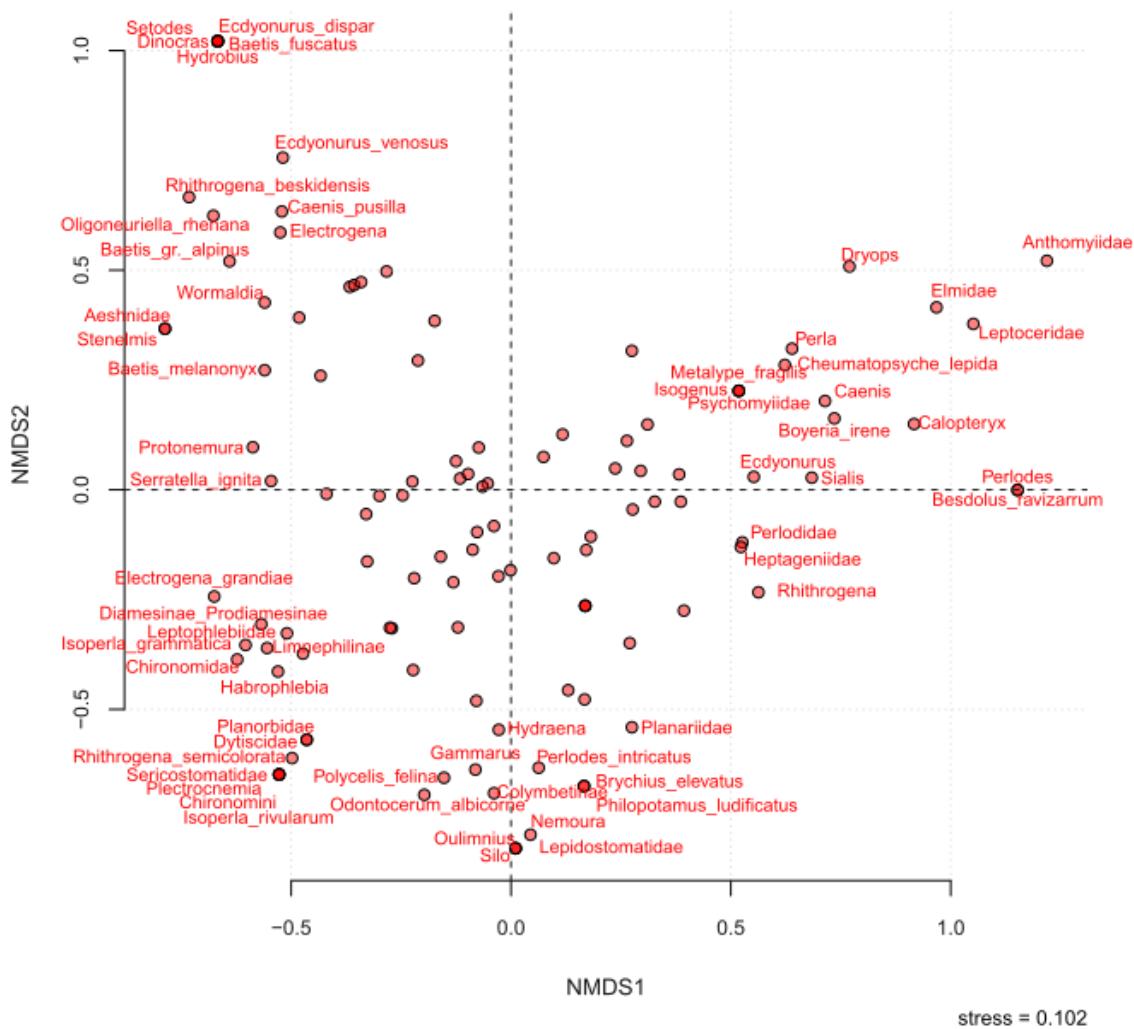
La position haute de la station EST08 sur le second axe de l'ordination apparaît en lien avec une température moyenne élevée du mois le plus chaud. Cependant, les perturbations

observées sur cette station en lien avec la surfréquentation touristique expliquent probablement les faibles densités et donc le résultat observé sur l'ordination. L'étude de la résilience de la communauté benthique en absence de piétinement massif permettrait de distinguer l'influence des perturbations anthropiques directes de celle jouée par l'augmentation des températures. Le rôle des réservoirs biologiques en amont de cette station dans les processus de résilience suite à l'arrêt du piétinement devrait être considéré.

La Figure 39 montre également la singularité des communautés observées dans les deux stations les plus apicales relativement aux peuplements des autres stations. Les peuplements des stations dont les températures de mois le plus chaud apparaissent les plus élevées, présentent des différences saisonnières de structuration plus marquées d'après ces résultats.

Enfin, cette ordination illustre la rupture observée dans la structuration des communautés le long du gradient longitudinal entre les stations EST03 et EST04. En plus des caractéristiques thermiques déjà discutées dans cette étude, cette observation doit être mise en relation avec la mise en contrainte du lit de l'Estéron à partir de la station EST03 : contraintes d'origine naturelle, telles que la succession des clues et l'engorgement du lit, ou anthropiques, avec la présence d'infrastructures dans le lit du cours d'eau (digues et routes). Dans le tronçon en aval d'EST03, ces contraintes entraînent une accélération des écoulements, les perturbations des populations lors d'épisodes de crues s'en trouvant maximisées.

La figure suivante présente la dispersion des taxons dans le plan de l'ordination.



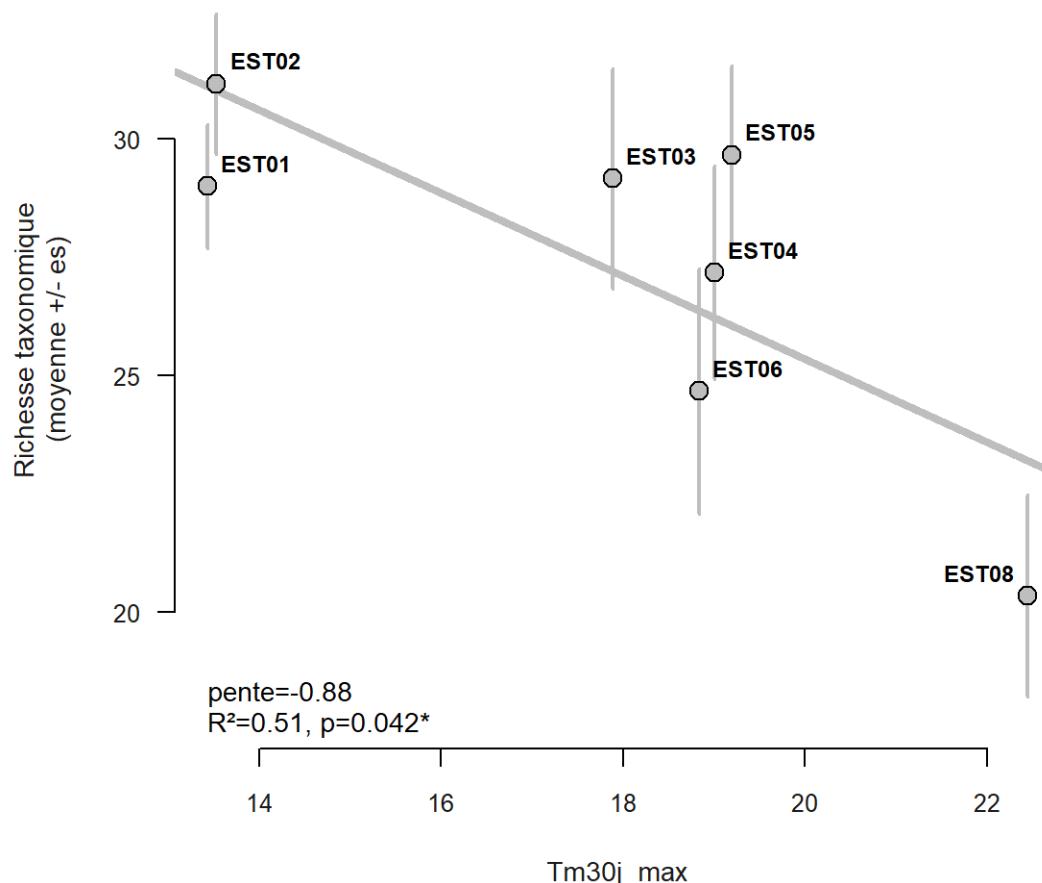
**Figure 40 : Projection des taxons dans le plan de la NMDS. Seules les étiquettes des taxons les plus contributifs sont affichés.**

Au regard de la dispersion des taxons sur le premier axe de la NMDS (Figure 40), il est possible de déterminer les taxons dont les densités marquent d'avantage la saison printanière (Stenelmis, Aechnidae, ou *Baetis melanonyx* par exemple), de ceux rencontrés d'avantage en fin d'été (Anthomyiidae, Leptoceridae, Perlodes ou *Besdolus ravizarrum*).

De manière identique, en observant la dispersion des taxons le long du deuxième axe de la NMDS, les peuplements des stations où les valeurs de Tm30j\_max sont faibles apparaissent caractérisés par des taxons tels que : Silo, Lepidostomatidae, Oulimnius, Nemoura, *Odontocerum albicone* ou *Philopotamus ludificatus*. Les peuplements soumis aux températures moyennes les plus chaudes sur 30 jours consécutifs sont quant à eux caractérisés par les occurrences de taxons comme *Ecdyonurus dispar*, Setodes, Dinocras, Hydrobius, et *Baetis fuscatus*.

Les enseignements tirés des résultats de la NMDS sont évidemment relatifs à des communautés présentes dans un bassin-versant soumis à une gamme de conditions environnementales proches de celles observées dans le cours principal de l'Estéron.

La figure suivante présente la relation entre les moyennes de richesse taxonomique par station et les températures moyennes des 30 jours consécutifs les plus chauds.



**Figure 41 : Relation entre la moyenne des richesses taxonomique d'invertébrés par station et la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds. La ligne grise représente la droite de régression significative, les lignes grises verticales quantifient l'erreur standard de la moyenne.**

**La richesse taxonomique des sept stations considérées du cours principal de l'Estéron apparaît significativement et négativement reliée à la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds sur chaque station** (statistique de Fisher = 7,345 et p-value = 0,042).

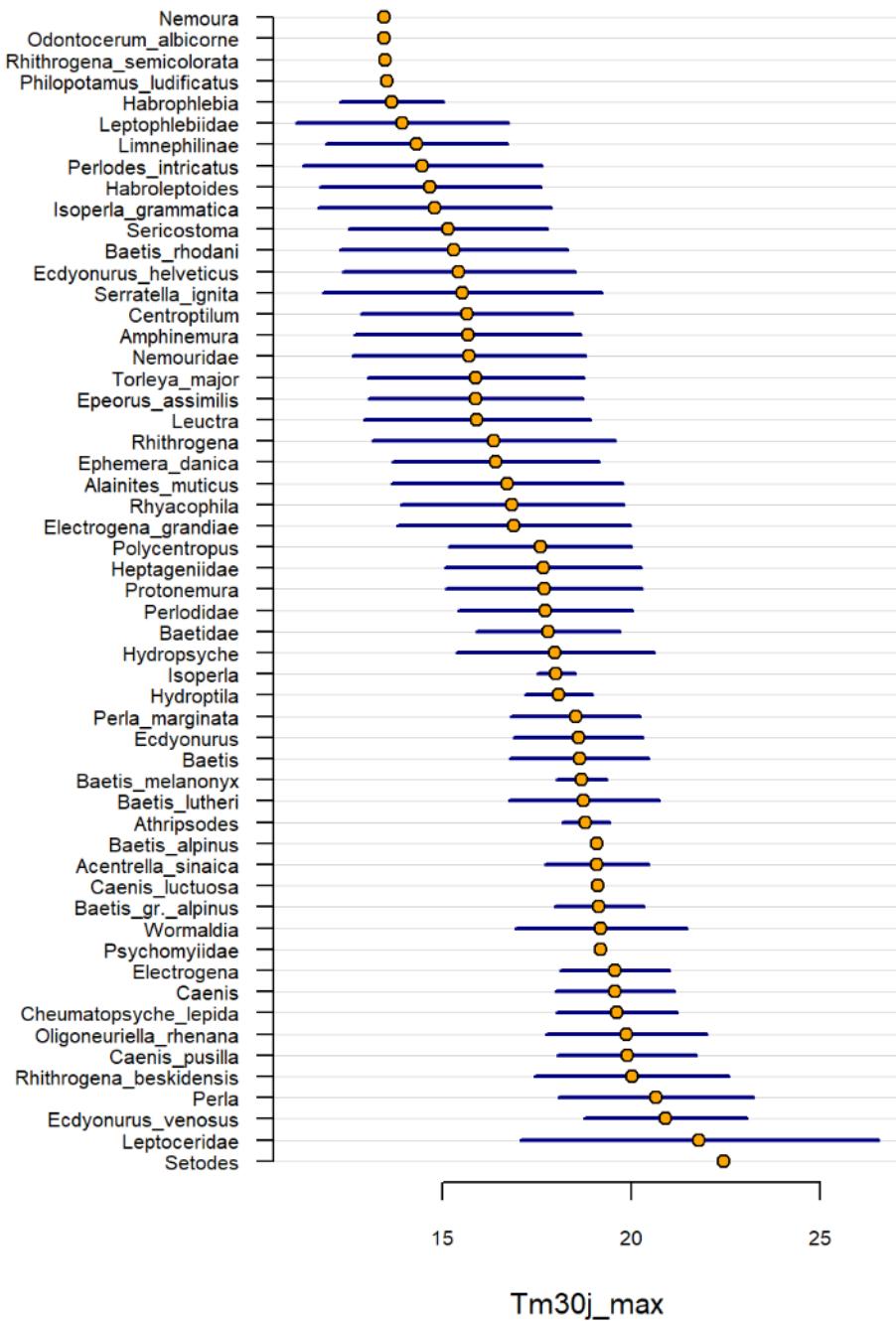
La densité d'invertébrés moyenne par station n'est pas significativement reliée à la Tm30j\_max, ni la richesse taxonomique des PET<sup>9</sup> ni même l'indice de diversité de Shannon-Wiener.

**Ce résultat illustre donc que pour un bassin versant tel que l'Estéron dans un héritage bio-géologique à l'interface entre climat alpin et méditerranéen, l'augmentation des températures estivales maximales sur une période de l'ordre d'un mois affecte directement la richesse taxonomique. Ce type de relation constitue une alerte pour la gestion de la diversité aquatique de ces milieux.**

<sup>9</sup> PET : ordres des Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères.

Du fait des singularités de l'Estéron et particulièrement de la divergence des conditions abiotiques entre la partie amont et celle aval, ces résultats n'apparaissent pas extrapolables directement à l'échelle d'autres bassins versant. La pertinence de l'approche présentée ici est surtout méthodologique et, en étant reproductible sur d'autres territoires, elle permettra d'appréhender l'influence de changements dans le régime thermique d'un cours d'eau sur la diversité aquatique.

La figure suivante présente les optima et les plages de tolérance des taxons appartenant aux ordres des PET modélisés en fonction de la Tm30j\_max pour une gamme de températures comprise entre 13 et 22.5°C. Ces modèles sont basés sur les données densitaires des stations considérées. Les optima modélisés ne dépassent donc pas cette plage de Tm30j\_max. Seuls les taxons présents dans au moins 3% des échantillons sont considérés ici.



**Figure 42 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j\_max des taxons appartenant aux ordres des PET et présents dans plus de 3% des échantillons.**

Des taxons comme le genre Nemoura *Odontecrum albicorne*, *Rhithrogena semicolorata*, *Philopotamus ludificatus* ou *Habrophlebia* présentent des optima thermiques les plus faibles

vis-à-vis des températures moyennes les plus chaudes. De nombreux taxons des PET présentent une gamme de tolérance relativement importante de Tm30j\_max.

Ces résultats illustrent en partie la **plasticité environnementale de certaines espèces** comme *Seratella ignita* qui présente une plage de tolérance importante. L'affinité décrite dans la littérature pour des températures élevées d'espèces comme *Oligoneuriella rhenana* est visualisables dans ces résultats.

Les mêmes résultats pour les taxons qui n'appartiennent pas aux ordres des PET ne sont pas montrés ici. Les niveaux de détermination de ces groupes faunistiques qui sont souvent au-delà du genre limitent les interprétations.

Le tableau suivant synthétise les principaux résultats des analyses présentées ci-dessus. Des groupes de taxons sont proposés selon leurs affinités avec les variables thermiques dans un contexte préalpin.

Taxons qui marquent d'avantage la saison printanière	<i>Stenelmis, Aechnidae, ou Baetis melanonyx</i>
Taxons qui marquent d'avantage la saison estivale	<i>Anthomyiidae, Leptoceridae</i>
Taxons associés aux faibles valeurs de Tm30j_max	<i>Silo, Lepidostomatidae, Oulimnius, Nemoura, Odontocerum albicorne ou Philopotamus lidificatus</i>
Taxons associés aux fortes valeurs de Tm30j_max	<i>Ecdyonurus dispar, Setodes, Dinocras, Hydrobius, et Baetis fuscatus</i>
Taxons associés à des optima thermiques les plus faibles vis-à-vis des températures moyennes les plus chaudes.	<i>Nemoura Odontecrum albicorne, Rhithrogena semicolorata, Philopotamus lidificatus ou Habrophlebia</i>

L'exercice analytique réalisé ici sur les données des prélèvements quantitatifs des sept stations du cours principal a permis une évaluation densitaire de la structuration des peuplements. Ce type de données apporte une certaine assise dans les analyses statistiques mais les déterminations y sont souvent limitées au rang taxonomique du genre. Or, les affinités environnementales peuvent fortement varier au sein d'un même genre et encore plus pour des niveaux taxonomiques supérieurs. Aussi, une analyse comparable des données qualitatives est proposée dans le chapitre 4.4.2.1 : elle porte sur les mêmes stations du cours principal de l'Estéron et comprend également les stations des affluents sur lesquelles les températures ont été suivies. Les niveaux de détermination y sont poussés plus souvent à l'espèce mais la nature de ces données reste sur de la présence / absence.

#### 4.4.2. Inventaire spécifique des populations d'invertébrés sur le cours principal de l'Estéron et ses affluents.

Pour rappel, les résultats présentés ici ont été obtenus en capturant les invertébrés au stade larvaire aquatique et au stade aérien lors de campagnes où l'effort d'échantillonnage a été constant entre campagnes et stations. Le nombre de campagne de prélèvement a varié entre les stations.

La liste faunistique obtenue à partir de cette méthode est présentée en annexe 4 de ce rapport.

##### 4.4.2.1. Bilan global

Au total, 226 taxons ont été déterminés dans les 44 stations du bassin versant de l'Estéron (15 stations sur les affluents de rive droite, 14 sur ceux de rive gauche et 13 sur le cours principal). Ces invertébrés aquatiques appartiennent à quatorze groupes faunistiques différents. La répartition de ces taxons au sein des groupes faunistiques est présentée dans la figure ci-contre.

Avec plus de 92 % de la richesse taxonomique globale, les insectes représentent la plus grande part des taxons identifiés.

Parmi eux, les Trichoptères sont les plus nombreux avec 34 % des taxons déterminés. Suivent les ordres des Plécoptères avec 39 espèces et des Ephéméroptères avec 34 espèces.

Pour ces trois ordres, ces valeurs de richesses sont relativement élevées pour un inventaire local. A titre de comparaison, elles correspondent respectivement à 13, 18 et 24% de la richesse nationale. Ces valeurs reflètent la diversité des habitats sur le bassin et les caractéristiques biogéographiques de la faune de l'Estéron, marquée par un mélange d'espèces endémiques de ce territoire alpin et d'autres à plus large répartition.

Il faut toutefois souligner que l'effort de détermination a été particulièrement porté sur ces groupes faunistiques au dépend d'autres ordres, comme les Coléoptères et les Diptères, dont le nombre d'espèces recensé a pu être sous-évalué dans cette étude. Cela s'explique par le fait que les Plécoptères, les Ephéméroptères et les Trichoptères sont des ordres bien connus de la littérature scientifique et leur caractère bio-indicateur est d'avantage marqué que d'autres ordres d'insectes aquatiques. Ils sont donc particulièrement recherchés. Toutefois la même méthodologie de recherche et de détermination ayant été appliquée entre les stations et les campagnes, ces résultats demeurent comparables entre les stations d'études.

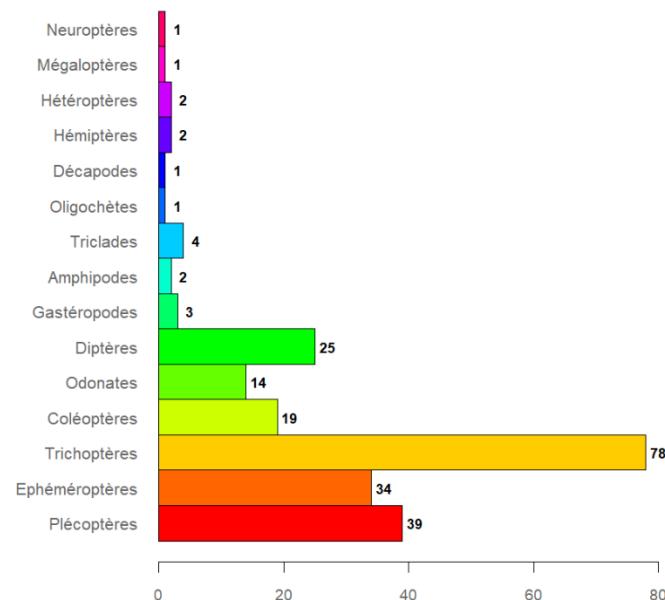


Figure 43 : Nombre de taxons par groupe faunistique rencontrés dans le bassin versant de l'Estéron.

#### 4.4.2.2. Bilan stationnel

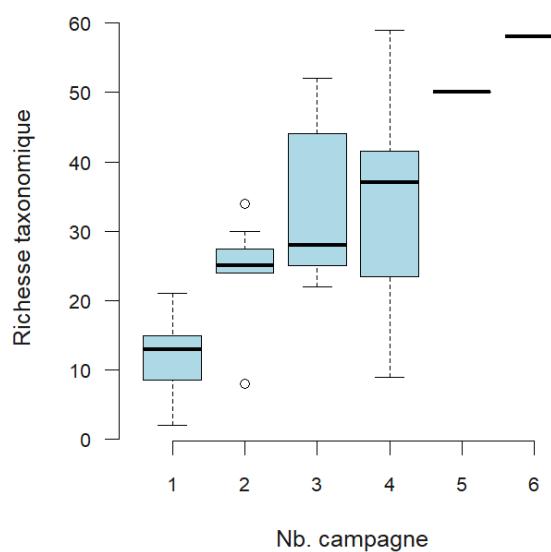
La Carte 10 présente les classes de richesses taxonomiques par station échantillonnée de manière qualitative.

Les stations EST03 et celle de la Bouisse (AFF\_D11\_BOUISSSE) présentent les valeurs de richesses maximales avec 59 et 58 taxons respectivement recensés. Sur les 42 stations étudiées dans le bassin-versant, les valeurs de richesses atteignent au moins 40 taxons sur 11 stations : dont 4 stations sur le cours principal (EST02, EST03, EST04 et EST05), 6 stations sur les affluents en rive droite (AFF\_D01\_LATTES, AFF\_D02\_FAYE, AFF\_D05\_GIRONDE\_AMT, AFF\_D06\_GIRONDE\_AVL, AFF\_D07\_VEGAY et AFF\_D11\_BOUISSSE) et seulement une station en rive gauche : AFF\_G03\_RIOLAN\_AMT.

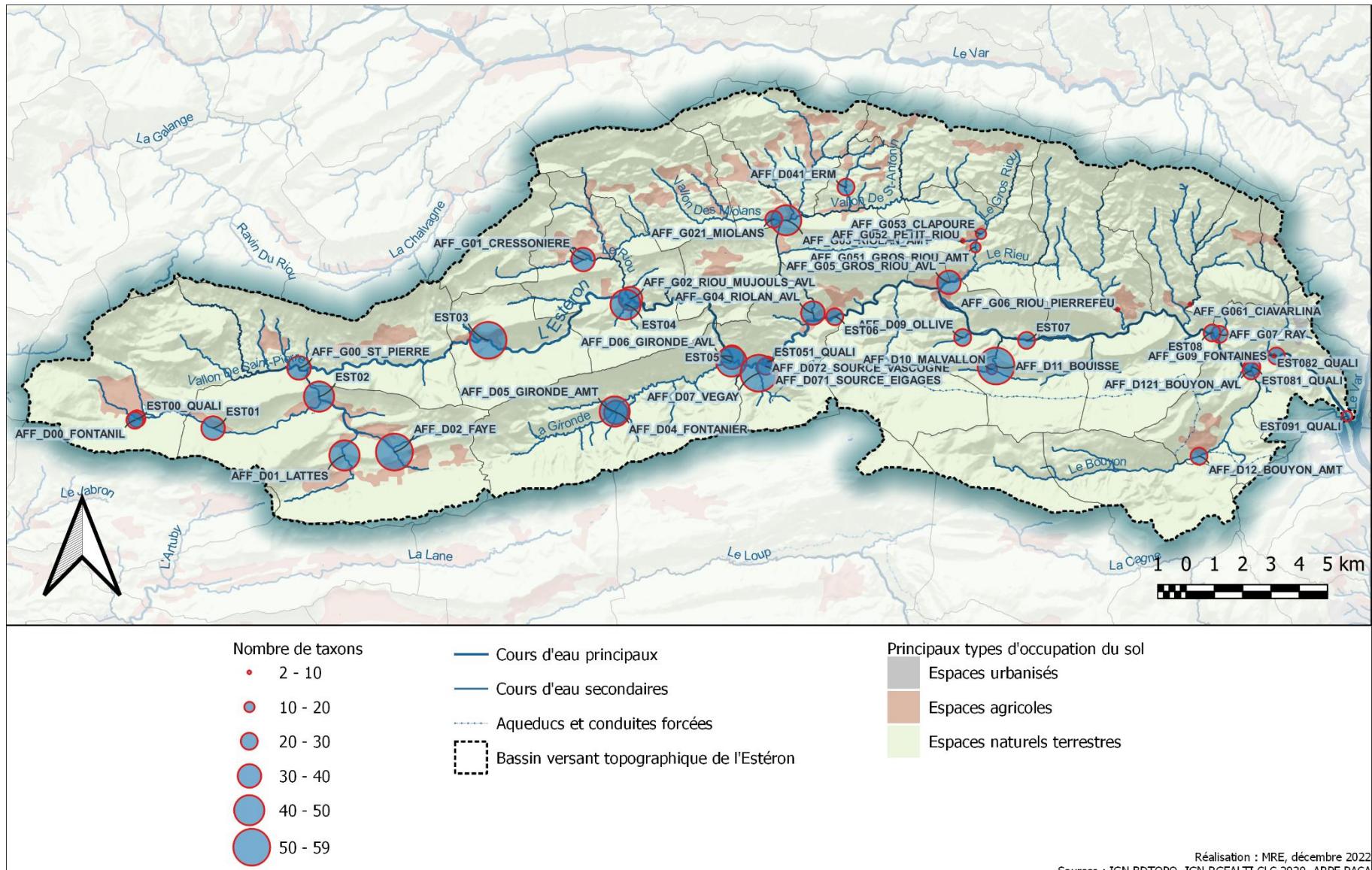
Comme l'illustre la Figure 44, le nombre de taxons recensés sur une station dépend fortement du nombre de campagnes de prélèvement qui y ont été réalisées. Les valeurs observées sur les 7 stations prélevées lors d'une seule campagne varient entre 2 et 21 taxons. Les investigations n'y ont pas été poussées d'avantage soit en raison du faible potentiel biologique estimé, soit des difficultés d'accès sur certains sites mais aussi également en raison de l'ampleur des stations à prélever. Pour ces stations, le nombre de taxons recensé y est certainement sous-estimé.

Pour les stations prélevées lors de 2 à 4 campagnes, les richesses taxonomiques ne varient pas de manière significative à la vue de la représentation ci-contre.

Enfin, seules deux stations ont été échantillonnées avec un effort supérieur : la Gironde aval (AFF\_D06\_GIRONDE\_AVL) lors de 5 campagnes et la Bouisse (AFF\_D11\_BOUISSSE) lors de 6 campagnes. Elles font parties des stations sur lesquelles le nombre d'espèce recensé est le plus élevé.

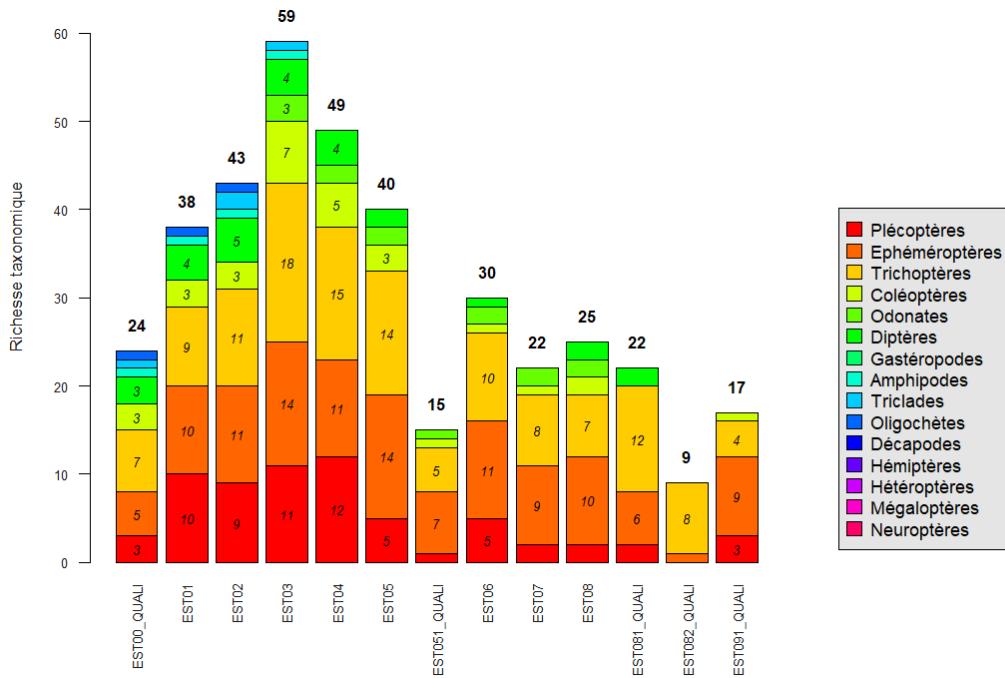


**Figure 44 : Relation entre la richesse taxonomique et le nombre de campagne par station pour les prélèvements qualitatifs.**



Carte 10 : Richesses taxonomiques estimées à partir des prélèvements qualitatifs sur le bassin de l'Estéron.

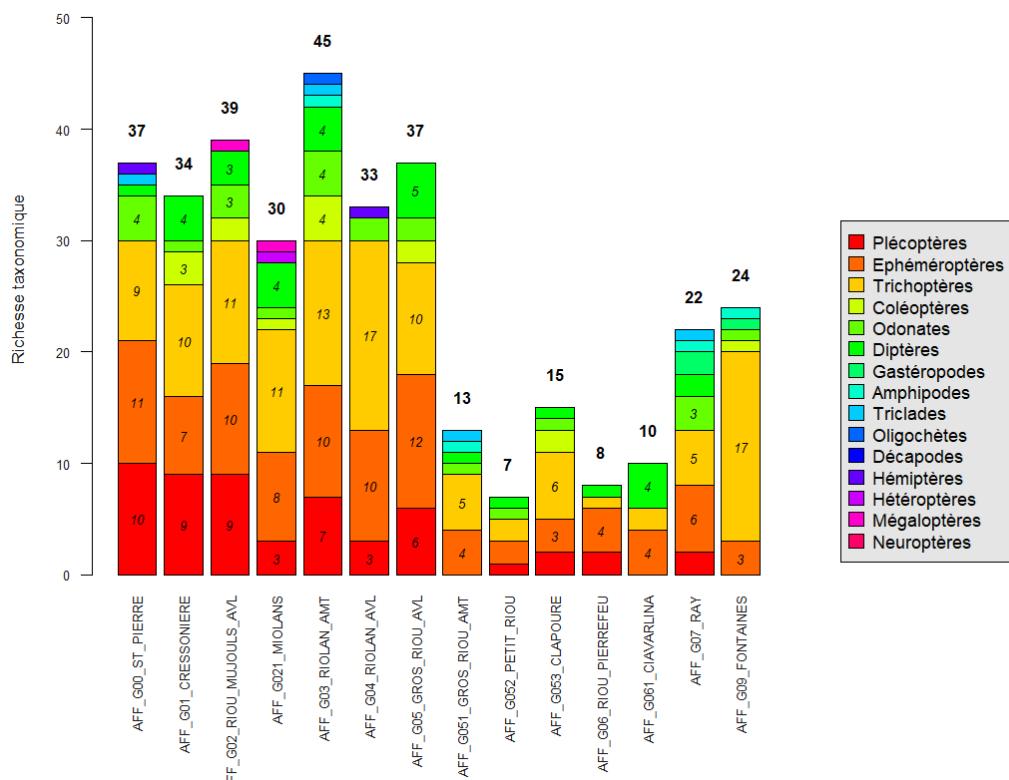
Les figures suivantes présentent le nombre de taxons par groupe faunistique et par station en distinguant les stations du cours principal et celles des affluents.



**Figure 45 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques par station du cours principal de l'Estéron (prélèvements qualitatifs). Les codes se terminant par « QUALI » indiquent les stations prélevées uniquement en qualitatif, les autres sur le cours principal ont été prélevées selon les deux méthodes.**

Sur les stations du cours principal de l'Estéron, les richesses taxonomiques les plus élevées sont rencontrées entre EST01 et EST05. Dans ces peuplements, l'ordre des Plécoptères est souvent mieux représenté que sur les autres stations. Le nombre de taxons en Ephéméroptères et en Trichoptères y est également supérieur.

A partir d'EST06 jusqu'aux dernières stations les plus en aval, le nombre d'espèces recensées apparaît bien moindre.

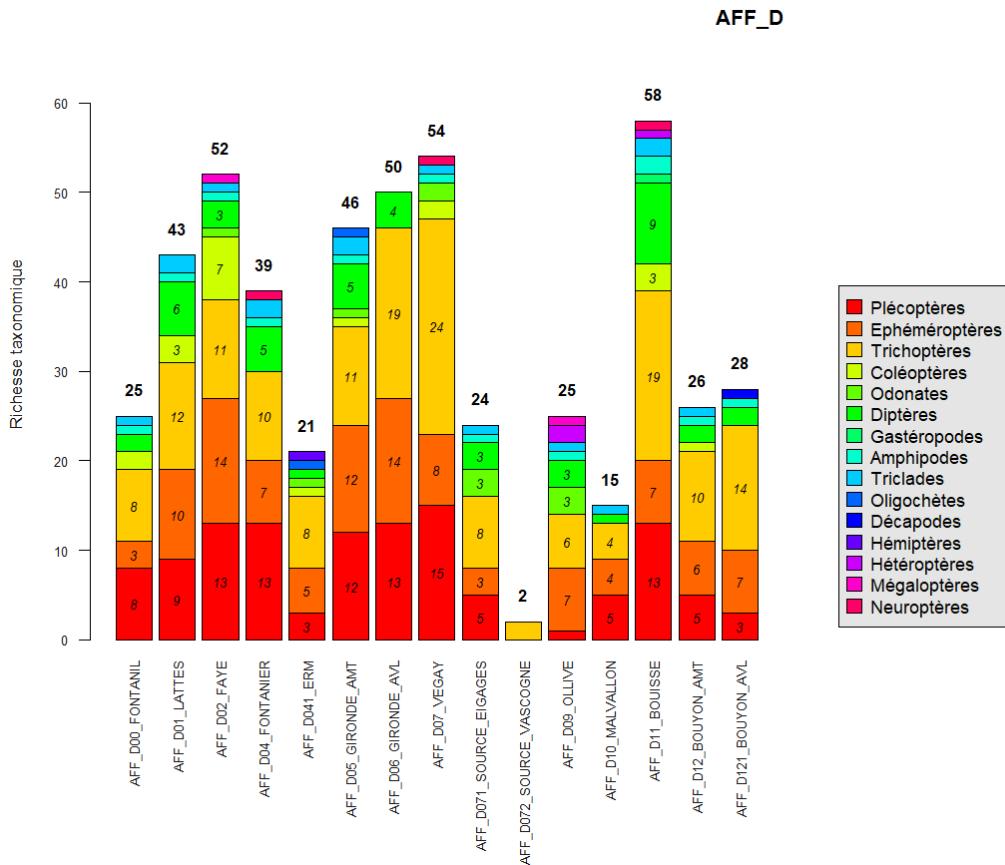


**Figure 46 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques pour les stations des affluents de rive gauche.**

Les affluents de rive gauche présentant les richesses taxonomiques les plus importantes sont situés dans la partie amont du bassin-versant : depuis le vallon de Saint-Pierre jusqu'au Gros Riou de Roquesteron. Ce constat est à mettre en relation avec les structures géomorphologiques des sous-bassins de ces affluents (voir chapitre 2.4.2) drainant d'importantes surfaces fortement exposées au rayonnement dans leur partie amont et s'écoulant dans des passages étroits, clues ou gorges, avant de confluer dans l'Estéron.

En aval de Roquesteron, l'ordre des Plécoptères n'est représenté tout au plus que par 1 à 2 taxons.

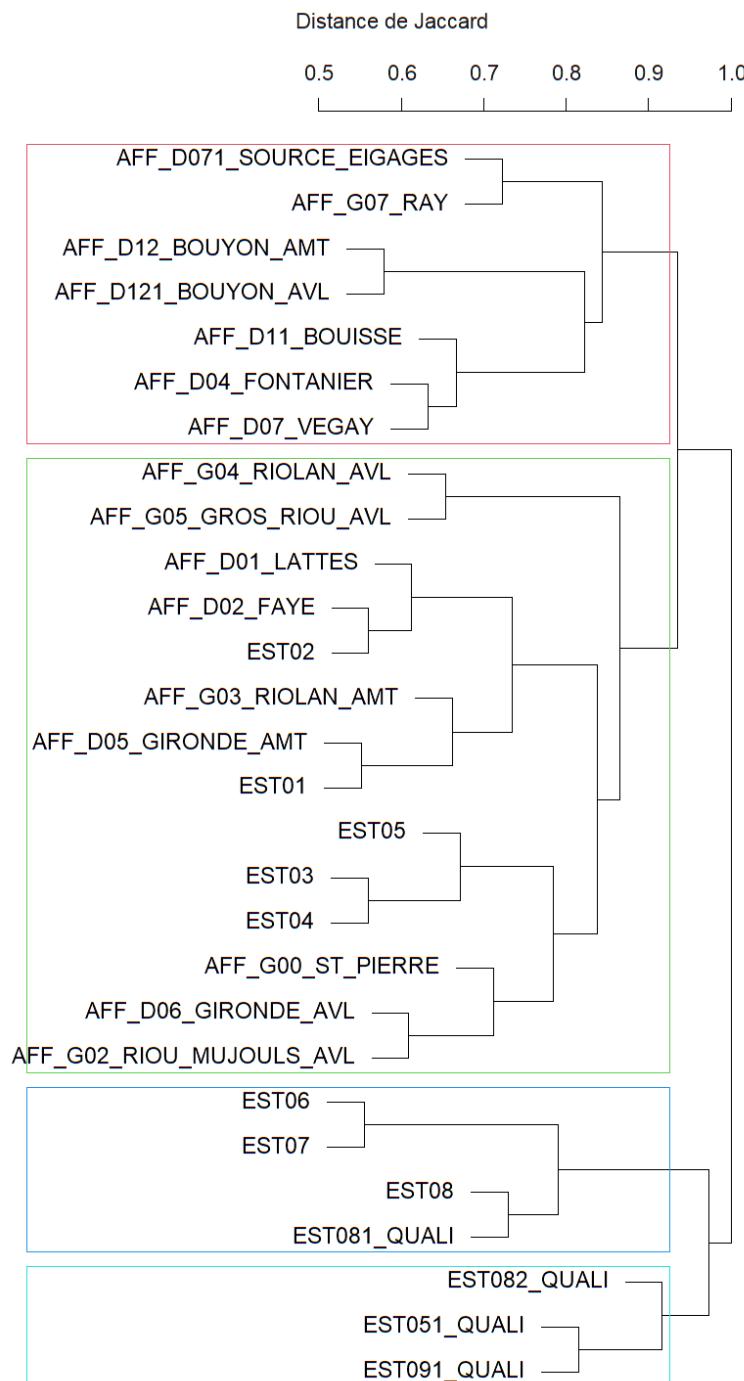
Au niveau de la source de Fontaines (AFF\_G09\_FONTAINES), la richesse en trichoptères constitue l'essentiel des captures.



**Figure 47 : Répartition des richesses par station au sein des groupes faunistiques pour les stations des affluents de rive droite.**

La composition des peuplements des affluents en rive droite apparaît plus diversifiée lorsque les bassins sont sous influence du climat alpin ou bien lorsque des résurgences karstiques sont présentes dans les sous-bassins : les Lattes ou la Faye en lien avec le climat alpin ; les trois stations de la Gironde (Fontanier, Gironde amont et aval) sur la conjugaison climat et dans une moindre mesure des résurgences ; Vegay et Bousse liées principalement aux résurgences karstiques. Pour ces stations, la richesse en Plécoptères et Ephéméroptères y est souvent plus importante qu'ailleurs.

Afin de s'affranchir des efforts d'échantillonnage jugés insuffisants sur certaines stations, le dendrogramme présenté sur la figure suivante est basé sur les distances de Jaccard des stations prélevées au moins lors de trois campagnes. L'indice de Jaccard, calculé ici entre chaque couple de station et dont le dendrogramme représente la synthèse, permet la comparaison de la composition de deux peuplements. Il varie entre 0, quand aucun taxon n'est partagé entre les sites, et 1 lorsque toutes les espèces sont partagées.



**Figure 48 : Dendrogramme des distances de Jaccard calculées sur les listes faunistiques en présence-absence des stations ayant fait l'objet d'au moins trois campagnes de prélèvement.**

températures sont les plus chaudes.

A partir de la seule composition des peuplements, il est possible de dégager quatre groupes de stations :

- Les **affluents de rive droite caractérisés par des résurgences karstiques** (rectangle rouge) avec notamment un sous-groupe composé des stations du Vegay, du Fontanier et de la Bousse particulièrement proches, et les deux stations du Bouyon amont et aval. Les régimes thermiques tamponnés et le soutien d'étiage permet à un pool d'espèces de se maintenir dans ces poches de fraîcheur et à l'abri d'éventuels étiages sévères ;
- Un groupe constitué des affluents de rive gauche, des affluents de rive droite ne bénéficiant pas directement de résurgences karstiques et des stations de la partie amont de l'Estéron caractérisées par une largeur de leur lit modérée et des conditions thermiques encore sous influence alpine ;
- Les stations de l'Estéron entre EST06 (Sigale) et EST08 (pont de la Cerise) ;
- Les stations les plus en aval de l'Estéron et la station EST051 (située en amont de Vascogne).

A l'exception de EST051, ces deux derniers groupes représentent les stations où les

#### 4.4.2.1. Recherche des variables environnementales structurantes des peuplements de l'ensemble des stations

De manière identique aux résultats présentés concernant les prélèvements quantitatifs (chapitre 4.4.1.4), une méthodologie analytique comparable a été appliquée aux résultats des inventaires qualitatifs. Les précédents résultats avaient comme avantage de reposer sur des données quantitatives et intégraient donc les patrons de répartition des abondances entre les taxons, mais le nombre de stations concernées était très limité et le niveau de détermination des invertébrés souvent peu poussé. Les résultats présentés dans ce chapitre permettent d'étudier les communautés à l'échelle du bassin-versant de l'Estéron avec une précision taxonomique accrue.

L'influence sur la macrofaune benthique de variables environnementales a été recherché en utilisant une PERMANOVA. Une NMDS a permis de visualiser les gradients dans la composition des communautés et les préférendums des taxons vis-à-vis de variables thermiques ont été figurés sur des graphiques univariés. La principale différence avec le traitement des données densitaires repose donc sur la nature qualitative du jeu de données imposant l'utilisation des distances de Jaccard en tant que données d'entrée pour ces analyses et non des distances de Bray.

Les stations considérées ici sont celles pour lesquelles des données de thermie sont disponibles et présentées dans le chapitre 4.3 : soit 20 stations au total (7 sur le cours principal, 6 sur les affluents de rive droite et 7 en rive gauche).

L'influence de variables abiotiques présélectionnées (cinq métriques thermiques et trois variables descriptives des stations) a été testée par une analyse de variance utilisant la matrice de distance de Jaccard des peuplements (PERMANOVA). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

**Tableau 7 : Résultats de la PERMANOVA entre la matrice de distance faunistique des 20 et un jeu de variables environnementales présélectionnées. Les abréviations des noms de colonnes correspondent à « Df » pour degré de liberté, « SumOfSqr » pour somme des carrés, R<sup>2</sup> pour le R-carré, « F » pour la statistique de Fisher et « Pr(>F) » pour la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle à tort.**

Code variables	Type variables	Description variable	Df	SumOfSqr	R2	F	Pr(>F)
Tm30j_max	Thermie	T° moy. des 30 j. les + chauds	1	0.6287	0.1030	2.6336	0.001
Vit_deg_j_TMJ	Thermie	Vitesse d'échauffement printanier	1	0.5574	0.0913	2.3350	0.001
pourJ_Tmj_inf4	Thermie	% de j. où Tmj < 4	1	0.2857	0.0468	1.1969	0.207
pourcJ_Tmj_4a19	Thermie	% de j. où 4 < Tmj < 19	1	0.3944	0.0646	1.6520	0.018
Ajmax_Ti	Thermie	Amplitude thermique maximale sur une journée	1	0.2144	0.0351	0.8981	0.611
situa	Station	Situation de la station dans le BV (CP, AFF_D, AFF_G)	2	0.8851	0.1450	1.8539	0.002
dist_exut	Station	Distance de la station à l'exutoire du bassin	1	0.3464	0.0567	1.4512	0.062
Alt	Station	Altitude de la station	1	0.4065	0.0666	1.7030	0.009
Residual			10	2.3872	0.3910		
Total			19	6.1060	1.0000		

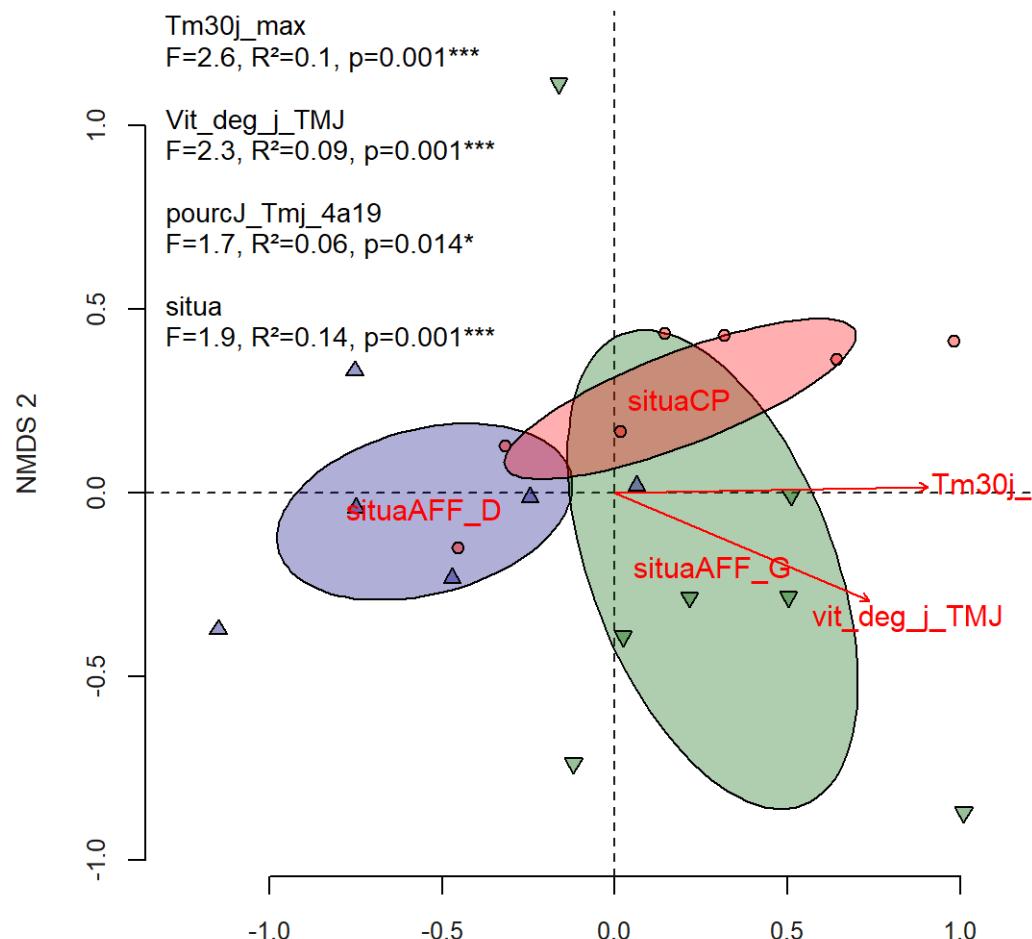
Parmi les cinq métriques thermiques dont l'influence a été pondérée et testée sur la matrice de distances qualitatifs entre les peuplements, trois d'entre elles apparaissent significativement influentes sur la composition des peuplements : la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (*Tm30j\_max*), la vitesse d'échauffement printanier

(*Vit\_deg\_j\_TMJ*) et le pourcentage de jours dans la chronique où les températures moyennes journalières ont été comprises entre 4 et 19°C (*pourJ\_Tmj\_inf4*). Ces métriques expliquent respectivement 10,3%, 9,1% et 6,4% de la variance de la matrice faunistique. L'amplitude thermique maximale sur une journée n'apparaît pas significativement influente, cette métrique étant certainement trop aléatoire dans les chroniques de températures au cours de certains épisodes particuliers.

Les métriques relatives aux conditions stationnelles et qui présentent une influence significative sur la faune sont la situation de la station dans le bassin (*situa*) et l'altitude des stations (*A/t*). La variable situation est une variable discrète dont les trois modalités sont : cours principal (CP), affluents de rive droite (AFF\_D) et affluents de rive gauche (AFF\_G). Elle explique 14,5 % de l'inertie des communautés d'invertébrés observées. L'altitude explique 6,6% de l'inertie.

La NMDS basée sur la matrice de distance de Jaccard entre les 20 stations du bassin versant de l'Estéron a convergé sur une solution à deux axes avec un stress de 0,165 reflétant une adéquation du modèle jugée correcte. Seules 3 variables abiotiques sont ajustées de manière adéquate et significative à cette ordination : la *Tm30j\_max* ( $R^2 = 0,59$ ), la *Vit\_deg\_j\_TMJ* ( $R^2 = 0,45$ ) et la *situa* ( $R^2 = 0,33$ ). Les ajustements dans ce plan factoriel de l'altitude de stations ( $p = 0,248$ ) et du pourcentage de jours où les températures étaient comprises entre 4 et 19°C ( $p = 0,057$ ) n'apparaissent pas significatives. Ces variables ne sont donc pas représentées sur la NMDS.

La Figure 49 présente les résultats de la NMDS et la projection des variables environnementales influentes dans cette ordination. La projection des taxons dans ce même plan est présentée dans quatre figures distinctes en annexe 4. Ces figures représentent le quart du plan.



**Figure 49 : Représentation de la NMDS montrant les différences de composition des communautés des 20 stations étudiées avec la projection des variables environnementales et leur degré de structuration ( $R^2$  et p-value de la PERMANOVA). Les communautés des stations du cours principal (ronds rouges), celles des affluents de rive droite (triangles bleus vers le haut) et celles des affluents de rive gauche (triangles verts vers le bas) sont regroupées par des ellipses.**

**Le premier axe de la NMDS est principalement en lien avec la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds.** De la même manière que pour les données quantitatives, ce paramètre apparaît le plus explicatif sur la composition des communautés benthiques parmi les variables abiotiques disponibles et testées. De nombreux auteurs ont considéré la température moyenne des mois les plus chauds comme l'une des variables expliquant au mieux les différences des communautés benthiques observées entre plusieurs sites. Cette observation sur les données de l'Estéron n'est donc pas surprenante. Les taxons apparaissant en lien avec cette métrique sont *Rhyacophila* sp., *Simulium bezzi*, Ceratopogonidae, *Onychogomphus* et *Baetis groupe alpinus*.

**Le premier axe de la NMDS met également en opposition les peuplements des stations en rive droite contre celles d'un groupe constitué par le cours principal, exception faite des stations EST01 et EST02, et les affluents de rive gauche.** Comme observé sur les niveaux bruts de richesses et sur la décomposition de celles-ci par groupe faunistique, la composition des peuplements de certaines stations des affluents de rive droite apparaît différente de celles des affluents de rive gauche et des stations sur les parties médiane et aval de l'Estéron. Les communautés des deux stations les plus amont du cours principal, EST01

et EST02, sont similaires à celles des affluents de rive droite Ces deux stations étant les plus soumises à l'influence du climat alpin sur le cours principal. Ce résultat est à mettre en relation avec les conditions thermiques et hydrologiques assurées par les résurgences karstiques. Les taxons caractéristiques de ces conditions sont : *Habroleptoides*, *Isoperla rivulorum*, *Liponeura cinerascens*, *Protoneura lupina*, *Plectronemia conspersa*, *Crenobia alpina*, *Micropterna fissa*, *Siphonoperla italicum*, les *Simulium cryophilum*, *dorieri* et *galloprovinciale*.

La projection dans l'ordination de la variable de situation des stations dans le bassin versant permet d'affirmer que :

- Les peuplements des affluents de rive droite sont significativement différents de ceux des affluents de rives gauche ;
- Les communautés du cours principal apparaissent plus proches de celles des affluents de rive gauche mais présentent également pour les deux stations amont (EST01 et EST02) des caractéristiques de composition communes aux affluents de rive droite.

Cette variable, la situation des stations dans le bassin-versant, est même celle expliquant la plus grande part de variance des compositions des communautés ( $R^2 = 0,14$ ). La Figure 50 montre que la seule station des affluents de rive gauche se retrouvant dans la partie supérieure du second axe de la NMDS est la résurgence de Fontaines à la Clave. Cela confirme le très fort caractère des communautés sous influence thermique des résurgences karstiques en opposition à celles des régimes pluviaux des autres affluents de rive gauche.

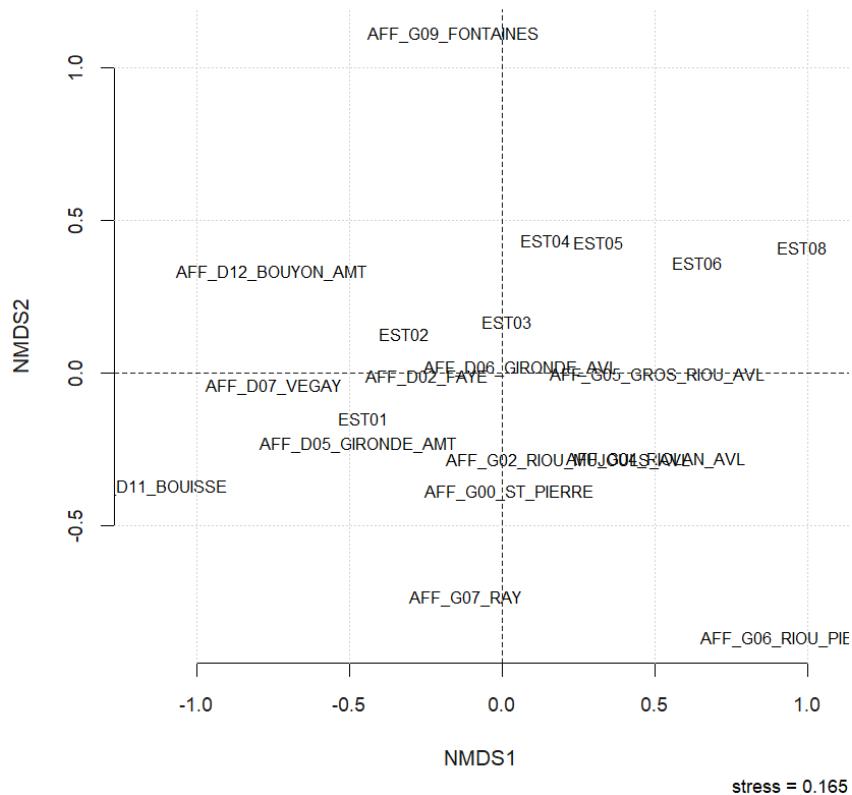


Figure 50 : Projection des individus (stations) de la NMDS.

**Le second axe de la NMDS apparaît également en partie lié à la vitesse d'échauffement printanière des eaux.** Celle-ci apparaît relativement plus importante dans les stations des affluents de rive gauche et plus faible dans les stations d'affluents en rive droite comme le

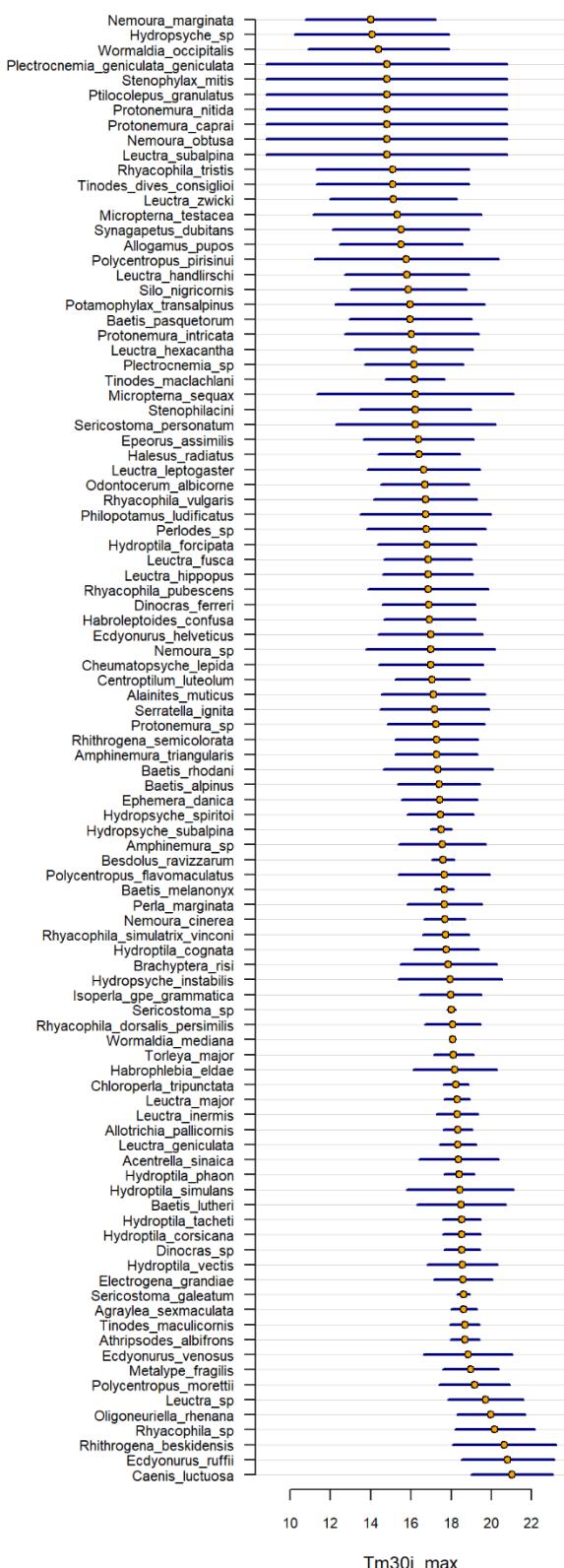
Bouyon amont, le Vegay et dans une moindre mesure EST02. En période printanière, la vitesse d'échauffement des eaux sur une station va être influencée par différents facteurs parmi lesquels il semble intéressant de dégager le débit (plus la masse d'eau transitant est importante et dynamique et plus la quantité d'énergie pour la réchauffer devra être conséquente), le rayonnement solaire sur le tronçon du cours d'eau (qui dépend de l'encaissement et de l'orientation de la vallée) et le type de régime hydrologique et plus précisément l'origine des eaux selon le type dominant nival, pluvial ou karstique.

Les taxons apparaissant liés à des vitesses élevées de réchauffement printanier sont les Leuctra, Caenis, Mystacides azurea, Micronecta, Orthetrum et *Wormaldia mediana*. A l'inverse, la présence des espèces suivantes marque des échauffements lents : *Silo nigricornis*, *Polycelis felina*, *Philopotamus ludificatus* ou *Tinodes macclachlani*.

**Enfin, la structuration de ce second axe est certainement influencée par un facteur supplémentaire et qui n'est pas suffisamment quantifié dans notre étude : il semble exister une opposition entre les peuplements du cours principal et ceux des affluents de rive gauche.** L'intensité des périodes de basses eaux, voir le degré de temporalité des écoulements, pourraient être des facteurs explicatifs opposant ces milieux. De nombreux affluents de rive gauche de l'Estéron sont de cours d'eau de petite taille soumis à des étiages marqués en lien avec la géologie des sous-bassin-versant (voir le chapitre 2.4), à l'inverse des stations du cours principal de l'Estéron. Les espèces apparaissant liée avec une période de basses eaux marquée sont : *Sympetrum meridionale*, *Nepa cinerea*, *Hydroptila lotensis*, *Aeschna cyanea* et *Siphonoperla* du groupe *torrentium* ou *italica*.

**La topographie des vallées et leurs expositions, l'importance relative des résurgences karstiques au sein des différents sous-bassins et la part d'influence du climat alpin apparaissent donc comme les facteurs les plus prégnants sur les structures faunistiques du bassin de l'Estéron :**

- Sur le cours principal de l'Estéron, le climat alpin structure les communautés des deux stations les plus en amont. Une influence plus méditerranéenne se met progressivement en place vers l'aval et se fait ressentir à partir d'un secteur délimité par les stations EST04 à EST06 ;
- Sur les affluents de rive droite bénéficiant d'apports karstiques, le régime thermique est tamponné saisonnièrement masquant ainsi l'influence alpine ;
- Sur les stations de rive gauche de l'Estéron étudiées, les populations apparaissent fortement liées aux faibles débits en période de basses eaux conjugués à une exposition solaire importante sur ces sous-bassins qui accélère les phases d'échauffement printanier.



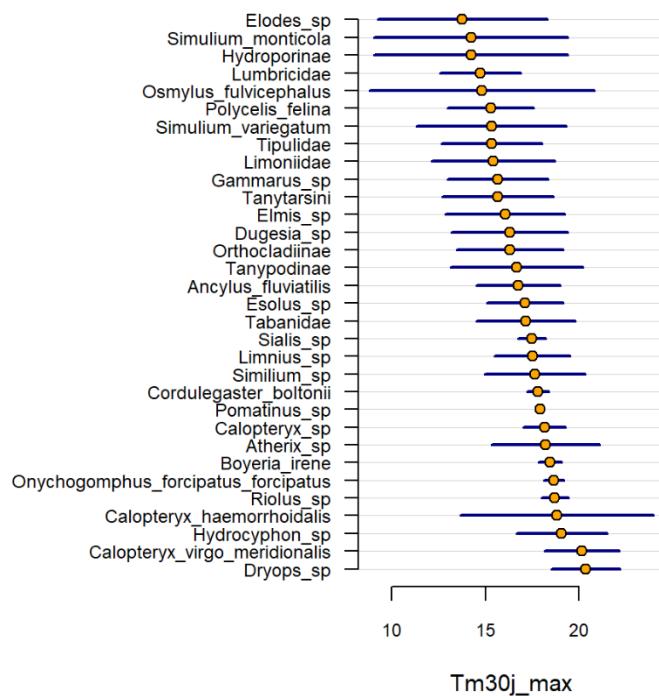
La figure ci-contre présente les optima et les amplitudes des taxons appartenant aux ordres des Plécoptères, Ephéméroptères et Trichoptères pour la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds. Seuls les taxons présents dans au moins 10% des stations sont considérés ici.

De nombreux taxons présentent une amplitude de préférendum relativement large vis-à-vis de la variable abiotique utilisée, notamment ceux qui ont leur préférendum dans la partie haute de la figure, la gamme la moins chaude. Ce constat montre simplement que ces taxons, régis par d'autres variables plus explicatives de leur cycle biologique, ne peuvent pas être utilisés, avec la méthode appliquée, pour caractériser les conditions thermiques les plus fraîches lors du mois le plus chaud de l'année.

A l'inverse, le groupe d'espèces représenté dans la partie basse de cette figure montre une nette cassure dans les optima avec des gammes de tolérance relativement étroites. Ce groupe peut donc être considéré comme révélateur d'un échauffement particulier des eaux durant le mois le plus chaud de l'année. Il se compose des espèces suivantes : *Polycentropus moretti*, *Oligoneuriella rhenana*, *Rhithrogena beskidensis*, *Ecdyonurus ruffii* et *Caenis luctuosa*.

Les taxons identifiés au niveau du genre et qui apparaissent dans cette même gamme d'optima (Leuctra sp et Rhyacophila sp) correspondent à des genres comprenant de très nombreuses espèces et il n'apparaît pas judicieux de lier leur présence à un préférendum thermique à partir de ce niveau de détermination.

**Figure 51 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j\_max des taxons appartenant aux ordres des PET et présents dans plus de 10% des échantillons**



**Figure 52 : Optima (points) et tolérance (lignes) pour la Tm30j\_max des taxons appartenant aux groupes faunistiques différents des PET et présents dans plus de 10% des échantillons**

Pour les taxons appartenant aux autres ordres que les PET, le même constat peut être dressé pour les valeurs basses de Tm30j\_max : les amplitudes de préférendum apparaissent importantes reflétant une large tolérance des invertébrés face à ce facteur. Les espèces présentant des tolérances larges mais des optima relatifs à des conditions fraîches sont *Simulium monticola*, *Osmylus fulvicephalus*, et *Polycelis felina*.

Dans des stations où les températures atteindraient environ 20°C durant le mois le plus chaud, les espèces d'Odonates suivantes peuvent refléter ces conditions : *Calopteryx virgo meridionalis*, *Calopteryx haemorrhoidalis*, *Onychogomphus forcipatus forcipatus*, et *Boyeria irene*.

Les résultats concernant les prélèvements qualitatifs permettent d'identifier que les communautés benthiques sur l'ensemble des cours d'eau du bassin versant de l'Estéron apparaissent fortement **structurées par des variables environnementales thermiques** comme la **température moyenne du mois le plus chaud**, mais aussi par la **vitesse d'échauffement des eaux en période printanière**.

Les **tronçons bénéficiant des apports de résurgences karstiques hébergent une diversité exceptionnelle**. Ces affluents participent ainsi au maintien d'une richesse élevée au sein du réseau hydrographique de l'Estéron en jouant le **rôle de réservoirs**.

Certaines espèces dont les **exigences peuvent être qualifiées de plus thermophiles** dans ce bassin versant ont pu être dégagées. Le suivi de ces populations pourrait permettre d'obtenir une indication de réchauffement des maxima thermiques sur ces cours d'eau.

Le tableau suivant synthétise les principaux résultats des analyses concernant les prélèvements qualitatifs et les identifications spécifiques. Des groupes de taxons sont proposés selon leurs affinités avec les variables thermiques dans un contexte préalpin. Ces affinités face à une variable donnée sont, bien évidemment, à relativiser puisque la présence de ces espèces est multifactorielle.

Taxons pouvant être associés à la Tm30j_max	<i>Rhyacophila sp, Simulium bezzi, Ceratopogonidae, Onychogomphus et Baetis groupe alpinus</i>
Taxons pouvant être associés à des conditions thermiques et hydrologiques assurées par les résurgences karstiques	<i>Habroleptoides, Isoperla rivulorum, Liponeura cinerascens, Protonemura lupina, Plectronemia conspersa, Crenobia alpina, Micropterna fissa, Siphonoperla italicum, les Simulium cryophilum, dorieri et galloprovinciale</i>
Taxons pouvant être associés à un réchauffement printanier rapide	<i>Leuctra, Caenis, Mystacides azurea, Micronecta, Orthetrum et Wormaldia mediana</i>
Taxons pouvant être associés à un réchauffement printanier lent	<i>Silo nigricornis, Polycelis felina, Philopotamus ludificatus ou Tinodes maclachlani</i>
Taxons pouvant être associés à un degré d'étiage marqué	<i>Sympetrum meridionale, Nepa cinerea, Hydroptila lotensis, Aeschna cyanea et Siphonoperla du groupe torrentium ou italicica</i>
Taxons pouvant être associés à un échauffement des eaux	<i>Polycentropus moretti, Oligoneuriella rhenana, Rhithrogena beskidensis, Ecdyonurus ruffii et Caenis luctuosa</i>

#### 4.4.3. Synthèse sur la structuration des peuplements en relation aux variables environnementales

##### ► Sur le cours principal de l'Estéron

Les trois stations situées en amont (EST01 à EST03) se distinguent par des abondances en invertébrés largement supérieures aux autres stations. Un enrichissement en matière organiques dans la partie amont du bassin-versant pourrait en être à l'origine. Cette influence se fait particulièrement ressentir en fin de saison estivale, lorsque les débits sont bas et les pollutions concentrées, avec un déséquilibre marqué de répartition des effectifs entre les taxons présents. Sur l'Estéron, ces stations sont également celles où le régime thermique est le plus frais en comparaison.

De plus, ce tronçon apical de l'Estéron bénéficie d'une plus grande stabilité hydrologique que les secteurs aval où l'encaissement du lit et les apports des affluents accentuent les perturbations des populations engendrées par les petites et moyennes crues. Les communautés observées en aval du cours principal sont souvent caractérisées par des densités relativement plus faibles. Cela apparaît particulièrement sur la station EST08, au pont de Cerise, secteur particulièrement prisé pour la baignade. Le piétinement des habitats perturbe les communautés benthiques similairement aux épisodes de crues dans les secteurs de gorges contraints hydrauliquement.

**Le soutien d'étiage et le maintien de températures fraîches en période estivale par certains affluents bénéficiant d'apports karstiques sont des caractéristiques favorables pour la diversité observée ponctuellement dans le cours principal.**

**Pour un bassin versant comme l'Estéron, dans un héritage bio-géologique à l'interface entre climat alpin et méditerranéen, l'augmentation des températures des eaux maximales sur 1 mois affecte directement la richesse taxonomique. Ce type de relation constitue une alerte pour la gestion de la diversité aquatique de ces milieux.**

La température moyenne de l'eau sur les 30 jours consécutifs les plus chauds de l'année apparaît comme un paramètre particulièrement explicatif de la composition des communautés benthiques du cours principal parmi les variables abiotiques disponibles et testées. De nombreux auteurs ont considéré la température moyenne des mois les plus chauds comme l'une des variables expliquant au mieux les différences des communautés benthiques observées entre plusieurs sites.

##### ► Affluents de l'Estéron

Les tronçons alimentés par des résurgences karstiques et présentant une diversité élevée en insectes aquatiques, comme la Bouisse et le Vegay, peuvent être considérés comme des **réservoirs de diversité** pour les secteurs proches.

La composition des peuplements des affluents en rive droite apparaît plus diversifiée lorsque les bassins sont sous influence du climat alpin ou bien lorsque des résurgences karstiques les

alimentent. Pour ces stations, la richesse en Plécoptères et Ephéméroptères y est souvent plus importante qu'ailleurs.

La topologie des vallées et leurs expositions, l'importance relative des résurgences karstiques au sein des différents sous-bassins sont donc très certainement les facteurs explicatifs les plus prégnants sur les structures faunistiques de l'Estéron.

Le suivi des espèces dont les exigences thermiques correspondent aux conditions les plus chaudes observées permettrait donc d'évaluer une tendance de réchauffement des maxima thermiques sur ces cours d'eau.

## 4.5. Espèces remarquables et sites à enjeux

A partir des identifications au niveau spécifique des invertébrés aquatiques capturés dans les stations du cours principal et des affluents de l'Estéron, une présentation de certaines espèces recensées dans le cadre de cette étude est proposée. Sur la base de ces résultats, certaines stations hébergeant une diversité particulière feront ensuite l'objet d'une présentation particulière.

### 4.5.1. Espèces remarquables

Une espèce est considérée ici comme remarquable lorsqu'elle répond à, au moins, l'un de ces critères : elle est rare, protégée, endémique ou retrouvée pour la première fois sur un territoire (région PACA, France). Pour les Ephéméroptères et les Odonates, seuls ordres d'insectes aquatiques à bénéficier d'une liste rouge, l'appartenance à la liste des espèces menacées (nationales ou régionales) est également un critère.

Au total, 24 espèces ont été retenues (soit 10% de la richesse globale) parce qu'elles présentent un caractère remarquable (Tableau 8). Elles appartiennent aux ordres des :

- Trichoptères : 12 espèces ;
- Plécoptères : 7 espèces ;
- Ephéméroptères : 2 espèces ;
- Odonates, Crustacés et Diptères : une espèce pour chacun de ces groupes.

Parmi ces espèces, le Plécoptère *Besdolus ravizzarum* est inféodé en France aux rivières de piedmont dans les Alpes-du-sud (de la Drôme aux Alpes-Maritimes<sup>10</sup>), où elle reste relativement rare. D'autres présentent une large répartition comme l'Odonate *Cordulegaster bidentata*, mais dans des habitats particuliers (suintements, sources pétrifiantes...), ce qui la rend sensible et localisée. Le Trichoptère *Sericostoma galeatum* n'est pas une espèce particulièrement menacée, mais il a été considéré ici car sa répartition en France est limitée au sud-est de la France. Il est également inscrit comme espèce déterminante dans la liste de désignation des ZNIEFF en région PACA.

La part la plus originale du peuplement est constituée d'espèces **endémiques liguro-alpines** qui trouvent sur ce bassin versant la limite occidentale de leur répartition. Elles sont pour beaucoup recensées dans le nord de l'Italie (Ligurie, Piémont). Pour la France, elles ne sont connues le plus souvent que du département des Alpes-Maritimes. C'est le cas par exemple du Plécoptère *Dinocras ferreri* ou du Trichoptère *Ernades botosaneanui*.

Enfin, l'inventaire a permis de recenser des espèces inconnues en France jusqu'à présent, simplement parce qu'elles n'y avaient jamais été recherchées. Parmi les Trichoptères, il s'agit des Hydroptilidae *Hydroptila ruffoi* et *Hydroptila insubrica*. Mentionné au début des années 2000 par Malicky, l'espèce *Polycentropus pirisinui* a été redécouverte dans le cadre de cette étude, confirmant sa présence en France. Parmi les Plécoptères, la nouvelle espèce *Protonemura lupina* a été décrite en 2021 à partir d'individus capturés sur la rivière le Loup et aussi sur l'Estéron, dans le cadre de cet inventaire. Chaque espèce remarquable fait l'objet d'une présentation dans les chapitres suivants.

<sup>10</sup> [www.opie-benthos.fr](http://www.opie-benthos.fr)

Tableau 8 : Liste des espèces d'invertébrés aquatiques remarquables recensées sur le bassin versant de l'Estéron et critères retenus pour chacune d'elle.

	Espèces	Rares en France	Localisées aux Alpes du Sud	Localisées aux Alpes-Maritimes	ZNIEFF esp déterminantes	ZNIEFF esp remarquables	Liste rouge des espèces menacées	Première citation en France
Plécoptères	<i>Besdolus ravizzarum</i> (Zwick & Weinzierl, 1995)		+		+			
	<i>Dinocras ferreri</i> (Pictet, 1841)			+		+		
	<i>Leuctra zwicki</i> (Ravizza & Vinçon, 1991)				+			
	<i>Protonemura lupina</i> (Vinçon & Reding, 2021)	+		+				
	<i>Protonemura caprai</i> (Aubert, 1954)		+		+			
	<i>Protonemura ausonia padana</i> (Vinçon & Ravizza, 2005)			+		+		
	<i>Siphonoperla italicica</i> (Aubert, 1953)	+		+				
Trichoptères	<i>Hydroptila ruffoi</i> (Moretti, 1981)	+						+
	<i>Hydroptila insubrica</i> (Ris, 1903)	+						+
	<i>Hydroptila corsicana</i> (Mosely, 1930)	+						
	<i>Hydroptila phaon</i> (Malicky, 1976)	+						
	<i>Agapetus cravensis</i> (Giudicelli, 1973)	+			+			
	<i>Polycentropus pirisinui</i> (Malicky, 1981)			+				
	<i>Polycentropus morettii</i> (Malicky, 1977)		+			+		
	<i>Allogamus pupos</i> (Oláh & Coppa, 2014)		+					
	<i>Sericostoma galeatum</i> (Rambur, 1842)				+			
	<i>Ernades botosaneanui</i> (Vaillant, 1982)	+		+				
Ephéméroptères	<i>Beraeomyia squamosa</i> (Mosely, 1930)	+						
	<i>Tinodes dives consiglioii</i> (Botosaneanu, 1980)	+						
Diptères	<i>Simulium galloprovinciale</i> (Giudicelli, 1963)	+						
Odonates	<i>Cordulegaster bidentata</i> (Selys, 1843)					+		
Crustacés	<i>Austropotamobius pallipes</i> (Lereboullet, 1858)						+	

#### 4.5.1.1. Trichoptères

L'espèce ***Hydroptila ruffoi*** (famille des Hydroptilidae) était connue dans les régions italiennes de Lombardie, Toscane, Ombrie, Basilicate et Calabre, où elle est trouvée dans des torrents riches en bryophytes. Dans l'Estéron, plusieurs mâles adultes ont été récoltés à Aiglun sur les rives du vallon de Vegay, à une altitude de 538 m. Cette station constitue la **première mention de cette espèce en France**.

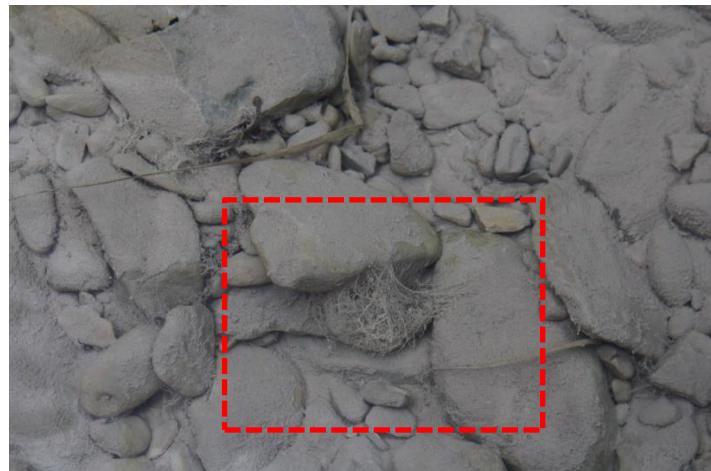
Le petit Trichoptère ***Hydroptila insubrica*** était jusqu'à présent connu uniquement d'Italie et d'Allemagne où il est extrêmement rare. Sa découverte sur le bassin de l'Estéron constitue la **première mention de l'espèce en France**. Un seul mâle a été observé sur la rivière Estéron en amont immédiat de la Clue de Saint-Auban. L'unique individu a été envoyé à Gennaro Coppa (Opie-Benthos) pour confirmation. Une note est en cours de rédaction pour signaler l'espèce.

Toujours dans la même famille, ***Hydroptila corsicana***, est une espèce rare. Elle est recensée en Corse et dans quelques départements de la façade méditerranéenne, essentiellement en Occitanie. Sa découverte dans deux stations de l'Estéron (EST03 et EST05) et dans le ruisseau des Lattes, constitue **une des premières citations en région PACA**.

Le Trichoptère ***Hydroptila phaon*** est une espèce peu commune en France, retrouvée dans quelques départements du sud-est (Var, Alpes-de-Haute-Provence, Alpes-Maritimes, Haute Savoie) (OPIE, 2020). Dans la vallée de l'Estéron, elle a été observée à plusieurs reprises sur le cours principal (EST03 et EST05), ainsi que sur la Gironde aval et le Riolan.

Le Trichoptère ***Polycentropus morettii*** (Polycentropodidae) est une espèce à localisation restreinte, présente en Italie du nord et en Suisse dans le Tessin<sup>11</sup>. En France, elle n'est connue que de quelques localités des Alpes-Maritimes, essentiellement dans le massif du Mercantour (affluents de la Bendola et la Bevera). Son type de milieu semble être les torrents et les rivières, à altitude moyenne. Dans l'Estéron, elle a été observée à de nombreuses reprises dans des habitats variés (source piste de Vegay, Estéron à Gars et Aiglun, Gironde aval...).

<sup>11</sup> [www.faunaeuropea.org](http://www.faunaeuropea.org)



**Photo 12 : Filet de larve de *Polycentropus sp* dans le lit du Vallon de St Pierre à l'aide duquel elle capte la nourriture apportée par le courant.**

Considérée comme une endémique italienne, l'espèce ***Polycentropus pirisinui*** (Polycentropodidae) était jusqu'alors **officiellement inconnue de France** (absente de la base de données OPIE), mais fortement suspectée dans l'extrême sud-est. Son observation dans le cadre de cette étude dans plusieurs stations (Estéron à Aiglun, le Bouyon, vallon de l'Olive, Gironde aval, source de Bouisse) constitue en fait sa deuxième citation en France. Elle a été découverte en France en 2004 par le spécialiste européen des Trichoptères, Hans Malicky, précisément dans l'Estéron. Ce bassin versant concentre pour l'instant les seules mentions de l'espèce dans notre pays.

Le Trichoptère ***Tinodes dives consiglioii*** (Psychomyiidae), est une sous-espèce considérée comme endémique d'Italie (Appenins, Ligurie)<sup>12</sup>. Sa répartition s'étend jusque dans le sud-est de la France (Alpes-Maritimes, Var) où elle est rare<sup>13</sup>. Elle est inscrite sur la liste des **espèces remarquables** dans le cadre de la désignation des ZNIEFF. Dans le massif du Mercantour tout proche, toutes les données proviennent d'affluents de la Roya. Sur le bassin de l'Estéron, elle est bien présente dans la partie amont de la Gironde ainsi que dans le ruisseau de Vegay et la source de la Bouisse.

Le Trichoptère ***Allogamus pupos*** a longtemps été confondu avec *Allogamus auricollis*. Il a été récemment séparé par Coppa et Ollah (2014) et sa détermination à partir des genitalia des mâles, ne pose aujourd'hui plus de problème. Sa répartition actuellement connue couvre en France trois départements du sud-est : le Vaucluse, le Var et les Alpes-Maritimes. Il a été observé régulièrement et parfois en nombre dans le cours supérieur de l'Estéron et de ces affluents (Estéron amont, source du Fontanil à Soleilhas, ruisseau du Col des Lattes...).

<sup>12</sup> <http://www.trichoptera.it>

<sup>13</sup> [www.opie-benthos.fr](http://www.opie-benthos.fr)



**Photos 13 : A gauche :**  
**Cascade de Vegay, site où a été découverte l'espèce**  
***Hydroptila ruffoi* (Trichoptère)**  
**première citation en France ;**  
**A droite : l'Estéron à Aiglun,**  
**une des stations où a été redécouvert le Trichoptère**  
***Polycentropus pirisinui***

Le Glossosomatidae ***Agapetus cravensis*** a été décrit en France (GIUDICELLI J., 1973) à partir d'exemplaires capturés dans une source de la plaine de la Crau. Il a depuis été retrouvé dans quelques stations des Bouches-du-Rhône, du Var et des Alpes-Maritimes, essentiellement dans de petits ruisseaux et en aval de résurgences. Dans l'état actuel de nos connaissances, sa distribution semble se limiter à la France<sup>14</sup>, où il est localisé à la Provence et à l'extrême sud-est. Sur le bassin de l'Estéron, deux mâles ont été capturés près de la source de Fontaines à la Clave (commune de Gilette).

La distribution de l'espèce ***Sericostoma galeatum*** (Sericostomatidae) est limitée au nord de l'Italie, la France et la Suisse. Dans ce dernier pays, elle est présente uniquement dans certains lacs oligotrophes et est classée en danger sur la liste rouge des espèces menacées. En France, elle n'est présente que dans un quart sud-est, et en particulier en Provence où elle n'est pas rare dans les cours moyens des fleuves et rivières. Dans la désignation des ZNIEFF, elle est considérée comme déterminante (Liste rouge des espèces déterminantes en PACA). Sur le bassin versant de l'Estéron, elle a été observée dans trois stations : le Riolan amont (Moulin de Pali), l'Estéron au Pont du Coude (Sigale) et le vallon de Saint-Pierre à Saint-Auban.

<sup>14</sup> [www.faunaeuropea.org](http://www.faunaeuropea.org)



Photo 14 : Adulte mâle de  
*Sericostoma galeatum*  
(Trichoptère, Sericostomatiae)

Gwenole Le Guellec ©

Le Trichoptère de la famille des Beraeidae ***Ernodes botsaneanui*** est une endémique rare, connue de quelques stations de Ligurie (Italie) et des Alpes-Maritimes, qui semble affectionner les suintements et les sources. Dans le Mercantour, elle a été jusqu'à présent observée dans quelques affluents de la Roya, le Caïros et la Bevera. Dans le bassin de l'Estéron, une seule observation a été réalisée dans une petite source calcaire avec suintements, en bordure de la piste de Vegay (commune d'Aiglun).

Appartenant à la même famille, ***Beraeamyia squamosa*** est une espèce peu fréquente, recensée uniquement en Italie, en Suisse et en France. Dans ce dernier pays, elle est retrouvée dans la partie inférieure des cours d'eau de piémont, à des altitudes relativement basses, du sud-ouest de la France à l'extrême sud-est. En PACA, elle est présente dans certains cours d'eau côtiers méditerranéens comme Le Loup et l'Estéron. Dans ce dernier, deux mâles ont été capturés au piège lumineux dans la partie basse, au niveau du hameau de La Clave. En Suisse, elle est classée en danger sur la liste rouge des espèces menacées. En France, aucune donnée ne permet de statuer sur la dynamique des populations de cette espèce relativement rare.

Enfin parmi les Trichoptères, notons la présence d'une espèce particulière de ***Drusus sp (du groupe euphorion)***. L'analyse descriptive des différentes espèces de *Drusus* appartenant au même groupe, semble indiquer qu'il s'agit d'une espèce non encore décrite. Dans l'état actuel de nos connaissances, il n'est pas possible de présenter son écologie ou sa répartition. Plusieurs exemplaires ont été capturés à la source du Fontanil, dans la partie amont de l'Estéron à Soleilhas (1095 m). Ils feront l'objet d'une description détaillée prochainement.



*Photo 15 : Source du Fontanil à Soleilhas, où a été observée une espèce particulière de Drusus sp (groupe euphorion)*

#### 4.5.1.2. Plécoptères

L'espèce *Leuctra zwicki* (Leuctridae) est une endémique de la bordure occidentale de l'arc alpin, présente essentiellement dans les Alpes Ligures italiennes et les Préalpes françaises. En France, elle est inscrite sur la liste des espèces déterminantes pour la désignation des ZNIEFF. Dans le massif du Mercantour, elle est relativement rare (base de données du PNM). Sur le bassin versant de l'Estéron, elle est retrouvée régulièrement à l'automne dans les sources et russelets de sources (Vegay, Bousse, sources de l'Estéron).



*Photo 16 : Adulte de Leuctra sp observé au bord du ruisseau de Vegay*

Le Pléoptère *Protonemura caprai* (Nemouridae) est une espèce endémique d'Italie et de France, où sa répartition se limite à quelques vallées dans les Alpes-Maritimes et les Alpes-de-Haute-Provence. Elle est considérée comme une espèce apennine<sup>15</sup> extensive qui trouve

<sup>15</sup> Espèce apennine : espèce présente en Italie dans le massif des Apennins

dans le sud des Alpes françaises, et en particulier dans le bassin du Var, sa limite nord-ouest de répartition (Vinçon, 1996). Elle est inscrite sur la liste des espèces déterminantes pour la désignation des ZNIEFF. Dans le massif du Mercantour tout proche, elle est présente sur le bassin de la Roya et de la Haute Tinée (Alpes-Maritimes), dans quelques sources et ruisselets. Elle est également connue du bassin de l'Ubaye, au niveau de sources qui jouxtent le lac du Lauzanier (Alpes de Haute Provence). Dans la vallée de l'Estéron, une belle population a été recensée à la source de la Bouisse, ainsi que sur le ruisseau du Vegay.

Le Nemouridae ***Protonemura ausonia padana*** n'est présent qu'en Italie et en France (extrême sud-est des Alpes). Dans le Mercantour, cette espèce considérée très rare a été récoltée dans des ruisselets pentus, s'écoulant en sous-bois entre 600 et 750 m d'altitude. Sur le bassin de l'Estéron, ce Plécoptère a été observé dans le ruisseau du Vegay, en aval de la cascade.

Le Plécoptère ***Protonemura lupina*** (Nemouridae) est une **nouvelle espèce pour la France** récemment décrite (Vinçon et al., 2021). Dans un premier temps, elle a été découverte sur le bassin du Loup. Parallèlement, des récoltes réalisées sur la source de la Bouisse ont confirmé sa présence dans le cadre de cette étude. Dans l'état actuel de nos connaissances, elle semble endémique des cours d'eau sous influence karstique prenant naissance sur le massif de Cheiron.

Le Plécoptère ***Besdolus ravizzarum*** est retrouvé dans les cours d'eau de piémont des Alpes du sud. Elle est régulière dans son biotope au sein de son aire de répartition, mais jamais en effectif important. Elle est à ce titre classée parmi les espèces déterminantes en PACA au titre de la désignation des ZNIEFF. Dans l'Estéron, elle a été observée à de rares occasions, essentiellement sur des affluents (la Gironde, Riou des Mujouls...).



Photo 17 : Larve de ***Besdolus ravizzarum*** (Perlodidae), espèce typique des Alpes du sud

Gwenole Le Guellec ©

Le Perlidae ***Dinocras ferreri*** présente une distribution restreinte au nord de l'Italie, à la France (Alpes-Maritimes) et à la Suisse (Tessin), où elle est considérée en danger. C'est une espèce apennine extensive (Vinçon, 1996) qui trouve en France sa limite nord-ouest de répartition (vallée du Var). Elle est inscrite sur la liste des **espèces remarquables pour la désignation des ZNIEFF**. Dans le Mercantour, sa répartition altitudinale s'étend de 700 m à 1260 m d'altitude. Sur le bassin de l'Estéron, elle est bien représentée dans les petits affluents alimentés par les eaux fraîches sous influence karstique : ruisseau du Fontanier (affluent de la Gironde), le ruisseau de Vegay (affluent de l'Estéron), vallon des Miollans (affluent du Riolan) et sur le vallon du Bouyon (affluent de l'Estéron en partie basse) où une belle population est présente.



Photos 18 : A gauche : larve du Plécoptère ***Dinocras ferreri*** (Perlidae), espèce endémique recensée en France uniquement dans les Alpes-Maritimes, bien présent dans certains affluents de l'Estéron (Vegay, Fontanier...) ; A droite : ruisseau de Fontanier, affluent de la Gironde, abritant une belle population de ***Dinocras ferreri***.



Gwenole Le Guellec ©

Photo 19 : Adulte de *Siphonoperla* sp.

#### 4.5.1.3. Ephéméroptères

L'Ephéméroptère ***Baetis pasquitorum*** (Baetidae) est une espèce relativement récente dans la faune française : elle a été découverte dans la rivière Loup (Alpes-Maritimes) en 2002 (RIGHETTI et THOMAS, 2002). Elle a depuis été observée dans plusieurs cours d'eau du département et une seule mention est à signaler en dehors des Alpes-Maritimes, le ruisseau du Baou (Moyen-Verdon) dans les Alpes-de-Haute-Provence. C'est donc une endémique stricte de l'extrême sud-est de la France, considérée **en danger sur la liste rouge des Ephémères de France** (IUCN, 2018). Sur le bassin de l'Estéron, elle est a été observée dans plusieurs stations : le cours principal de l'Estéron jusqu'à la Clave, le vallon de la Bouisse, la Gironde et le Bouyon où de belles populations sont présentes.



Photo 20 : Larve de *Baetis pasquitorum* de la Gironde (affluent de l'Estéron)

Comme l'espèce précédente, l'Ephéméroptère ***Electrogena grandiae*** (Heptageniidae) n'est connue en France que depuis une vingtaine d'années (RIGHETTI et BELFIORE, 1999). Cette espèce, considérée **en danger sur la liste rouge des Ephémères de France** (UICN, 2018), a d'abord été décrite d'un petit cours d'eau temporaire de l'est varois (Estérel), puis retrouvée dans des rivières plus torrentielles des Alpes-Maritimes (bassin de la Roya, de la Bevera). Dans les prélèvements réalisés sur le bassin de l'Estéron, elle a été observée à plusieurs reprises, dans des milieux variés : le vallon de l'Olive, le cours principal de l'Estéron (Le Ranc, Gars), le Riou de Cuébris ou le petit ruisseau de la Cressonière.



Gwenole Le Guellec ©

**Photo 21 : L'Ephéméroptère *Electrogena grandiae* (Heptageniidae), espèce localisée en France à l'extrême sud-est**

#### 4.5.1.4. Odonates

Une seule espèce remarquable d'Odonate a été observée : le **Cordulegastre bidenté** (*Cordulegaster bidentata*). C'est une espèce vivant dans les milieux faiblement courants des têtes de bassins, les zones de sources, les suintements, les petits ruisseaux où le flux d'eau reste faible (GRAND D., BOUDOT J-P., 2006). En France, elle est assez rare, disséminée des Pyrénées au Massif central et à toute la moitié Est du pays. Dans la région PACA, elle est présente dans les trois départements alpins. Elle est considérée en danger sur la liste rouge des Odonates de la région. Dans le massif du Mercantour tout proche, elle est localisée mais régulière dans son biotope. Sur le bassin de l'Estéron, une seule observation est à mentionner, dans une zone de suintement à proximité d'une source calcaire (source en bordure de la piste des Eigages à Aiglun).



Photo 22 : L'Odonate  
*Cordulegaster bidentata*, une espèce  
inféodée aux sources  
forestières et  
suintements



Photo 23 : Source  
encroûtante en bordure  
de la piste des Eigages  
à Aiglun, abritant une  
population de  
*Cordulegaster bidentata*  
(Odonate)

#### 4.5.1.5. Diptères

L'espèce ***Simulium galloprovinciale***, qui appartient à la famille des Simuliidae, est une espèce méditerranéenne, connue d'Italie, d'Espagne, de France et du Maghreb. La répartition sur le territoire français est cantonnée à quelques stations de Provence et du Mercantour, où elle semble affectionner les cascades, particulièrement en milieu calcaire. Elle est considérée comme **déterminante dans la liste des espèces prises en compte dans les ZNIEFF**. Sur le bassin de l'Estéron, elle a été observée dans une seule station, au niveau de la source de la Bouisse (Conségudes).

#### 4.5.1.6. Crustacés

L'écrevisse ***Austropotamobius pallipes*** (écrevisse à pattes blanches) est une **espèce protégée** en France (la seule parmi toutes les espèces remarquables recensées), classée vulnérable sur la liste rouge des Crustacés menacés en France. Espèce en fort déclin, elle a été observée dans un seul affluent de l'Estéron, le Bouyon. Il faut signaler que cette étude n'avait pas pour but de recenser les populations d'écrevisses, et hormis les captures fortuites réalisées au cours des prélèvements d'invertébrés aquatiques, aucune autre méthode spécifique à l'observation des écrevisses n'a été utilisée. Son absence dans les autres milieux étudiés ne constitue donc pas une donnée fiable.

Un bilan complet réalisé sur cette espèce et en parallèle de cette étude, est mené par la Fédération des Alpes-Maritimes pour la Pêche et la Protection des Milieux Aquatiques.

#### 4.5.2. Sites à enjeux

La Carte 11 représente ces stations et le nombre d'espèces retrouvées. Le Tableau 9 détaille les espèces rencontrées par station.

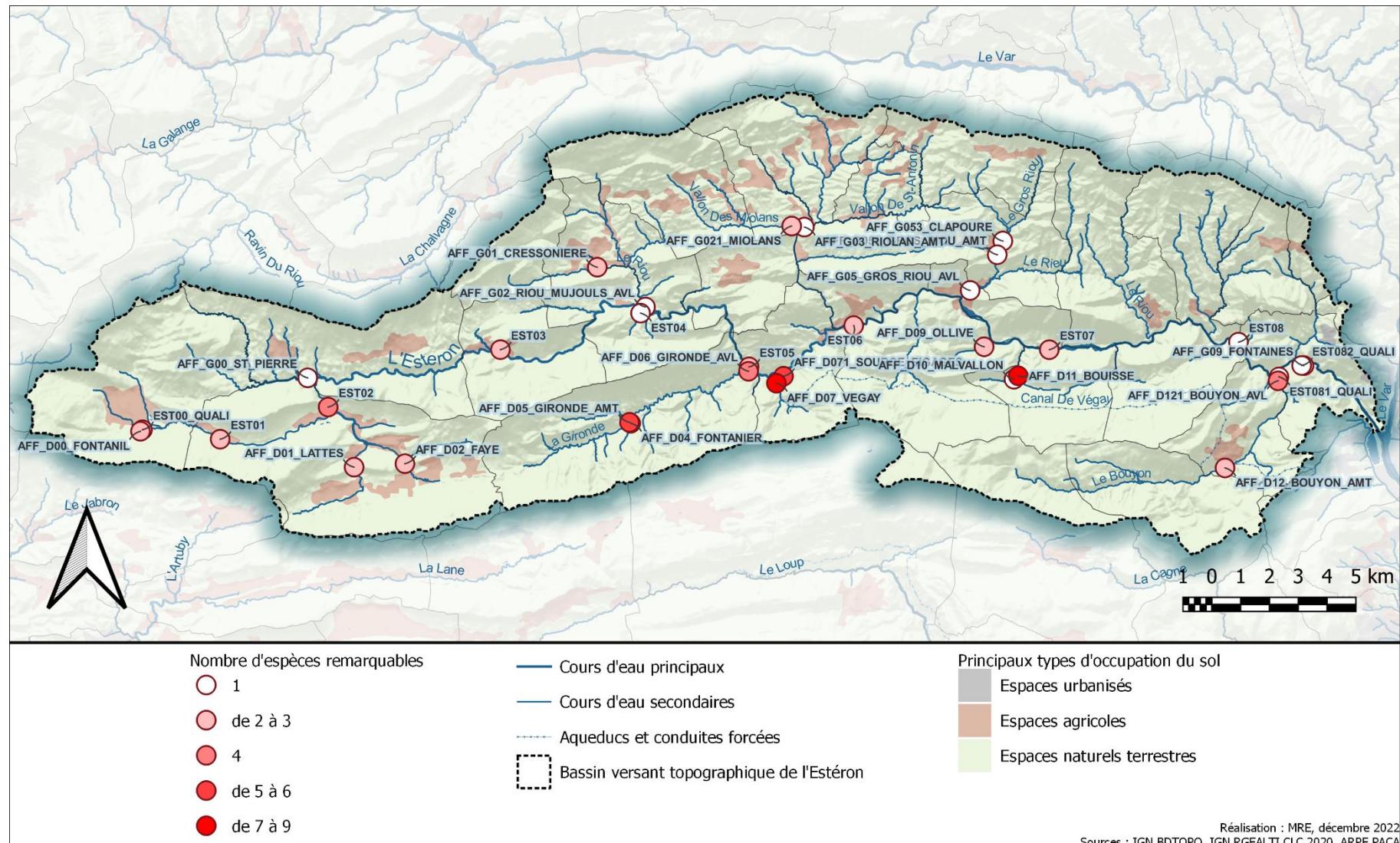
Dans **29 stations**, il est recensé au moins une espèce dite remarquable. Les stations où au moins 3 espèces remarquables sont recensées, sont pour la plupart :

- Des **sources ou ruisselets de source** : la Bouisse, le Riou de Vegay, la source des Eigages, la source du Fontanil, le vallon des Fontanier ;
- Des **ruisseaux torrentiels sous influence karstique** situés en rive droite : le Bouyon, la Gironde ;
- L'Estéron **dans son cours supérieur** : l'Estéron en aval des sources du Fontanil, l'Estéron de St Auban à Gars.

Parmi ces stations, certaines concentrent véritablement les espèces d'intérêt patrimonial. Ainsi, les **stations de la Bouisse et de Vegay**, en plus d'héberger une faune de milieux frais et/ou montagnards, rares à ces altitudes relativement basses, présentent de nombreuses espèces d'intérêt patrimonial. Au total, **9 espèces remarquables** sont recensées dans chacune de ces deux stations. A elles-seules, elles concentrent 57% des espèces remarquables recensées sur le bassin.

L'affluent la **Gironde dans sa partie amont** et la **source pétrifiante** de la piste des Eigages hébergent respectivement 6 et 5 espèces remarquables, suivis par le Bouyon, l'Estéron à St Auban et le vallon du Fontanier à Le Mas.

La majorité des stations hébergeant des espèces remarquables est concentrée dans le cours supérieur de l'Estéron, et plus particulièrement dans les affluents de la rive droite (Gironde, Vegay, Bouisse, Bouyon). Ces observations soulignent l'importance **des ruisselets et ruisseaux alimentés par des sources et résurgences** pour la diversité biologique du bassin de l'Estéron.

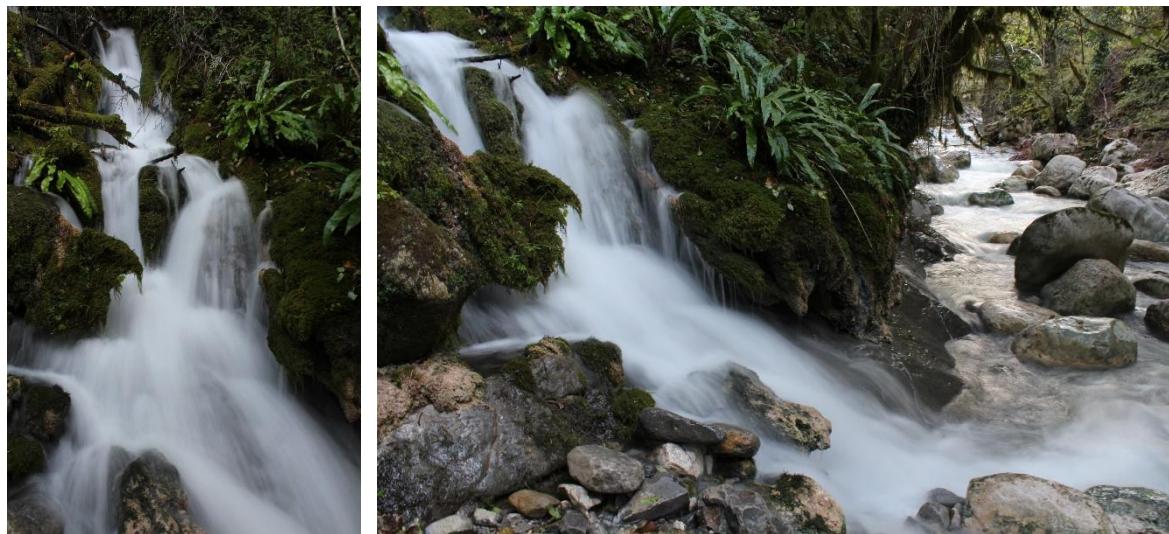


Carte 11 : Nombre d'espèces considérées comme remarquables dans les stations étudiées.

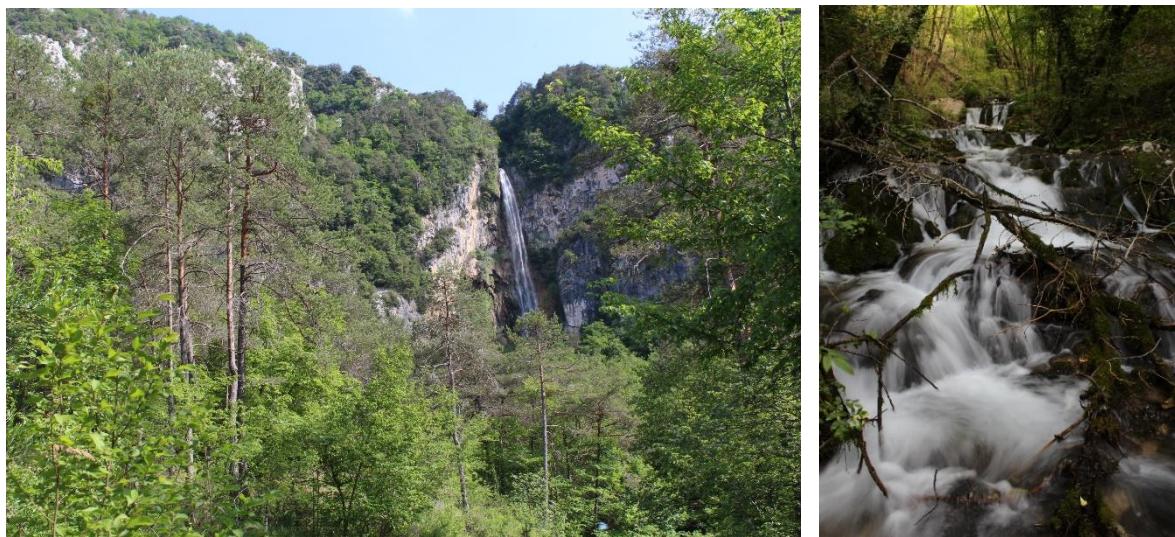
Tableau 9 : Bilan des captures des espèces considérées comme remarquables dans les stations étudiées.

	AFF_D11_BOUSSE	AFF_D07_VEGAY	AFF_D05_GIRONDE_AMT	AFF_D071_SOURCE_EGAGES	AFF_D121_BOUYON_AVL	EST02		AFF_D04_FONTANIER	AFF_D06_GIRONDE_AVL	EST00_QUALI	AFF_D00_FONTANIL	AFF_D01_LATTES	AFF_D02_FAYE	EST03	EST05	EST01	EST06	EST07	AFF_D12_BOUYON_AMT	AFF_D09_OLLIVE	EST081_QUALI	EST082_QUALI		Occurrence	
Allogamus pupos	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Leuctra zwicki	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Baetis pasquetorum	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	9
Polycentropus morettii	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Electrogena grandiae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	7
Dinocras ferreri	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	6
Polycentropus pirisinui	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5
Tinodes dives consiglioii	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Besdolus ravizzarum	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
Hydroptila corsicana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Sericostoma galeatum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3
Siphonoperla italicica	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Protonemura caprai	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Beraeamyia squamosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
Drusus sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Cordulegaster bidentata	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Protonemura ausonia padana	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Protonemura lupina	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ernades botosaneanui	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Hydroptila insubrica	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Hydroptila ruffoi	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Simulium galloprovinciale	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Austropotamobius pallipes	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>Nb d'espèces remarquables</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	

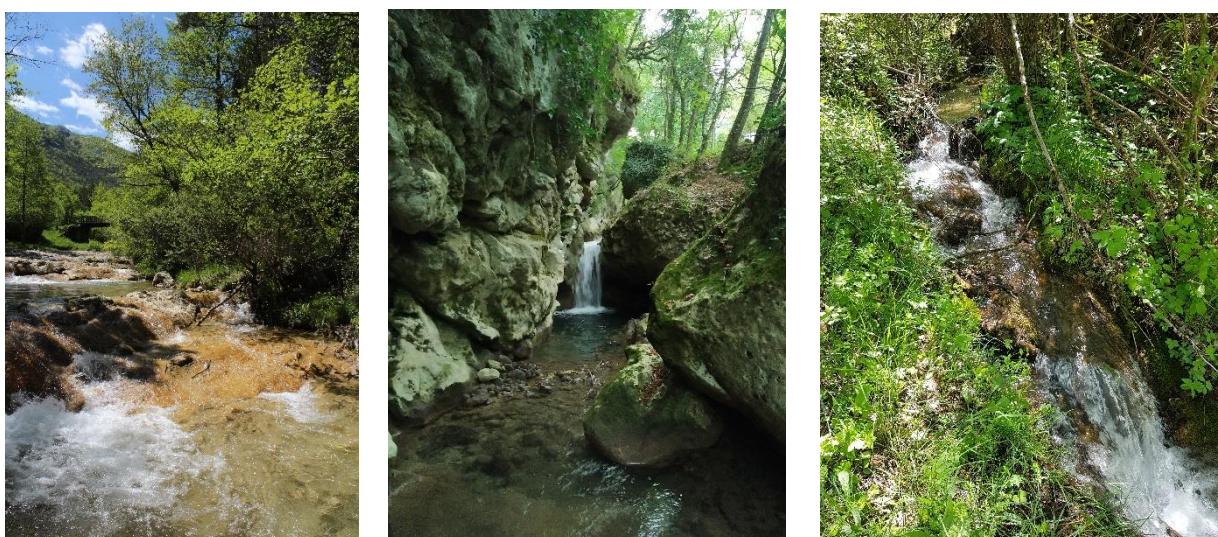




**Photo 24 : Source de la Bouisse, sites abritant de nombreuses espèces remarquables.**



**Photo 25 : Cascade du Vegay et ruisseau du Vegay en aval de la cascade.**



**Photo 26 : Gironde amont (à gauche), le Bouyon (au milieu) et le russelet du Fontanier (à droite)**

## 5. CONCLUSIONS

Après deux années de prélèvements faunistiques et l'exploitation des instrumentations en sondes de températures et de pression, cette étude permet de répondre aux objectifs attendus.

L'étude des **régimes thermiques** a permis de mettre en évidence un gradient longitudinal sur le cours principal avec une dominance d'un climat alpin dans la partie haute, une zone de transition dans laquelle les caractéristiques géomorphologiques masquent en partie les influences atmosphériques et une zone aval de l'Estéron où le climat méditerranéen s'exprime pleinement.

En parallèle, sur certains affluents alimentés par des résurgences karstiques, une stabilité thermique plus ou moins marquée a pu clairement être observée sur des secteurs comme la source de la Bouisse et la résurgence de Fontaines. D'autres secteurs alimentés par le karst présentent des régimes thermiques parfois plus liés aux variations atmosphériques comme le Bouyon dans sa partie amont ou le Vegay en aval la cascade. Pour ce dernier, nos résultats montrent que les prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau potable exacerbent très certainement le réchauffement de cet affluent de l'Estéron hébergeant une faune qui s'est avérée exceptionnelle en terme de richesse et d'intérêt patrimonial.

**Un bilan de la diversité en macroinvertébrés benthiques a été dressé avec une approche densitaire sur le cours principal de l'Estéron et de manière qualitative sur l'Estéron et un grand nombre d'affluents.**

Les structures des peuplements d'invertébrés, en terme de composition et d'effectifs, apparaissent en étroite relation avec les observations réalisées sur les contextes thermiques du cours principal de l'Estéron. Une nette distinction peut être dressée des populations du secteur le plus apical, d'une partie intermédiaire et de laval de l'Estéron.

Pour un bassin versant comme l'Estéron, dans un héritage bio-géologique à l'interface entre climat alpin et méditerranéen, l'**augmentation des températures maximales des eaux sur 1 mois affecte directement la richesse taxonomique mesurée. Ce type de relation constitue une alerte pour la gestion de la diversité aquatique de ces milieux.**

Les résultats faunistiques sur le cours principal de l'Estéron répondent donc directement aux conclusions réalisées sur les régimes thermiques.

Les inventaires spécifiques montrent que les communautés d'invertébrés aquatiques de l'Estéron présentent une richesse importante en Trichoptères, Plécoptères et Ephéméroptères principalement.

Parmi ces insectes, plusieurs espèces sont remarquables par leur rareté ou leur endémisme. Au total, **24 espèces ont été retenues pour leur intérêt patrimonial en raison de leur localisation restreinte et de leurs exigences vis-à-vis de leur habitat**, soit 11% des taxons recensés.

Parmi ces espèces, deux d'entre elles appartenant à l'ordre des Trichoptères n'avaient **jamais été rencontrées en France**. Une autre espèce a également été **redécouverte dans le cadre de cet inventaire**. Pour ces insectes, le bassin de l'Estéron constitue donc le **seul site connu en France** de présence avérée.

Ce cours d'eau est également la **limite occidentale de plusieurs espèces dites liguro-alpines**, endémiques d'un petit territoire des Alpes du sud, entre l'Italie, la Suisse et la France. Dans ce secteur, certaines étaient connues uniquement du massif du Mercantour, situé plus à l'est (exemple du Plécoptère *Dinocras ferreri*), mais aucune mention ne signalait ces espèces à l'ouest du fleuve Var. L'Estéron et ses affluents représentent **donc un territoire essentiel pour la préservation de ces populations localisées en France à quelques cours d'eau des Alpes-Maritimes**.

Au total, **29 sites étudiés comportent au moins une espèce remarquable**, soit près de 70% des stations étudiées. La diversité biologique la plus importante est observée dans des milieux relativement frais dans un contexte méditerranéen, alimentés par des résurgences karstiques, s'écoulant sous un couvert végétal dense. Ainsi, la source de la Bouisse et le ruisseau de Vegay concentrent à elles-seules 57% du nombre d'espèces remarquables du bassin. Bien que ces sites aient bénéficié d'un effort d'échantillonnage plus conséquent du fait de leur évidente capacité d'accueil pour la macrofaune benthique et de leur caractère exceptionnel particulièrement attractif, les résultats obtenus dans ces deux stations reflètent un **intérêt biologique majeur** pour le bassin de l'Estéron. **Ces milieux aquatiques sous influence karstique constituent de véritables réservoirs de diversité à l'échelle de l'Estéron.**

Nos résultats ont montré que, parmi les sites qui hébergent le plus d'espèces remarquables, d'autres secteurs que les résurgences karstiques se distinguent : **l'Estéron dans sa partie amont**, certains affluents en rive droite tels que la Gironde et le Bouyon, ainsi que des sources plus localisées comme celle de la piste des Eigages à Aiglun ou le vallon du Fontanier (affluent de la Gironde sur la commune du Mas).

Ces résultats révèlent également le **rôle essentiel des résurgences karstiques du nord du massif de Cheiron en tant que soutien hydrologique et tampon thermique dans un bassin sous influence méditerranéenne**. Dans un contexte de changements climatiques, la préservation de ces milieux, et de leurs conditions hydroclimatiques, **apparaît primordiale pour le maintien des peuplements faunistiques** en place et plus largement, pour l'intégrité biologique de l'ensemble du bassin de l'Estéron.

La température moyenne de l'eau sur les 30 jours consécutifs les plus chauds de l'année apparaît comme un paramètre particulièrement explicatif de la composition des communautés benthiques du cours principal parmi les variables abiotiques disponibles et testées. Les optima et les plages de tolérance des invertébrés ont pu être ainsi étudiés en lien avec cette variable thermique.

En reliant certains taxons à des variables thermiques, cette étude propose **une liste d'indicateurs biologiques à suivre pour évaluer les changements climatiques futurs** dans le bassin-versant de l'Estéron.

Ce travail et l'atteinte des objectifs fixés en début de programme laisse transparaître de **nombreuses perspectives à court et moyen termes pour la gestion de ces milieux d'eau courante**. Celles-ci sont d'autant plus pertinentes au lendemain d'une sécheresse estivale intense qui a touché l'ensemble des Alpes Maritimes et plus largement les bassins péréalpins. Le climat actuel nous rappelle donc la nécessité de mieux comprendre et appréhender les mécanismes associés aux changements globaux, améliorer la connaissance et progresser dans la métrologie en rivière pour mieux s'adapter et résister.

L'état zéro de la biodiversité de la rivière et des assemblages faunistiques du bassin versant constitue une **photographie à un instant t qui servira de référence pour les études futures**, y compris, les éventuelles études d'incidence. Peu de structures gestionnaires de bassin-versant ont en main une cartographie aussi complète de la biodiversité aquatique présente sur leur territoire. Même s'il est aujourd'hui certain que des changements se soient déjà produits et particulièrement ceux liés aux changements climatiques par rapport à l'ère préindustrielle, cet état des lieux pourra servir de référence pour un prochaine évaluation (par exemple cinq ou dix ans après) afin de tenter de reconstituer les **trajectoires d'évolution prises par ces milieux**. Des points de comparaison peuvent aussi être ponctuellement posés, par exemple à la suite d'épisodes critiques dans l'évolution de ces systèmes (assèchement, crue exceptionnelle, pollution, incendie, canicule, froid intense...).

Pour cette étude, le bassin de l'Estéron, de par sa position à l'interface entre climats alpin et méditerranéen, a été choisi comme reflet des changements climatiques attendus dans des secteurs plus septentrionaux. **La méthodologie utilisée ici pourra donc être transposée à d'autres secteurs d'étude.**

La prise en compte des divergences dans l'héritage biogéographique entre l'Estéron et un autre secteur d'étude, permettra de s'appuyer sur des indicateurs biologiques tels que ceux dégagés dans cette étude.

**L'instrumentation en capteurs** initié sur l'Estéron pourrait être pérennisée. Le suivi en continu de la température de l'eau associée au suivi des hauteurs d'eau en tant que proxy du débit, permettraient d'affiner la compréhension de l'hydroclimat des cours d'eau et de suivre leurs évolutions futures.

Les variations de débit des cours d'eau, est un des facteurs déterminants que nous n'avons pas pu appréhender pleinement dans ce programme. Dans un cadre hydroclimatique connu, **la mise en évidence de certains débit-seuils serait une avancée indéniable pour les gestionnaires** : débit-seuil de crue morphogène, débit de décolmatage des éléments fins comme le limon ou le sable, débit de mise en dérive forcée des invertébrés, débit d'expression du caractère de loticité dans un contexte géomorphologique donné, débit d'échauffement excessif des eaux et, enfin, débit minimum biologique.

Le traitement des données acquises sur les stations hydrométriques existantes pourrait permettre de mieux comprendre ces évolutions. Il serait aussi pertinent de mieux équilibrer spatialement les suivis hydrométriques pour évaluer les changements à venir, par exemple en équipant quelques sources ou affluents, probablement plus sensibles aux étiages. Le renforcement du suivi ONDE dans le temps et l'espace pourrait également fournir une

tendance d'évolution des écoulements superficiels à des échelles fines comme les réseaux de tête de bassin versant.

Enfin et dans la perspective des changements globaux, une étude relative au **transport solide**, matières fines comprises, permettrait de compléter la compréhension du fonctionnement de ces systèmes en intégrant ce facteur déterminant pour la faune : le substrat en tant support de vie. Ces éléments permettront également de mieux comprendre les phénomènes d'échanges entre surface et sous-écoulement qui, comme cela est pressenti dans la présente étude, paraissent primordiaux dans la régulation des températures de certains tronçons.

**Annexe 1 : Fiches de présentation des stations du cours principal de l'Estéron**

Bassin versant : Estéron

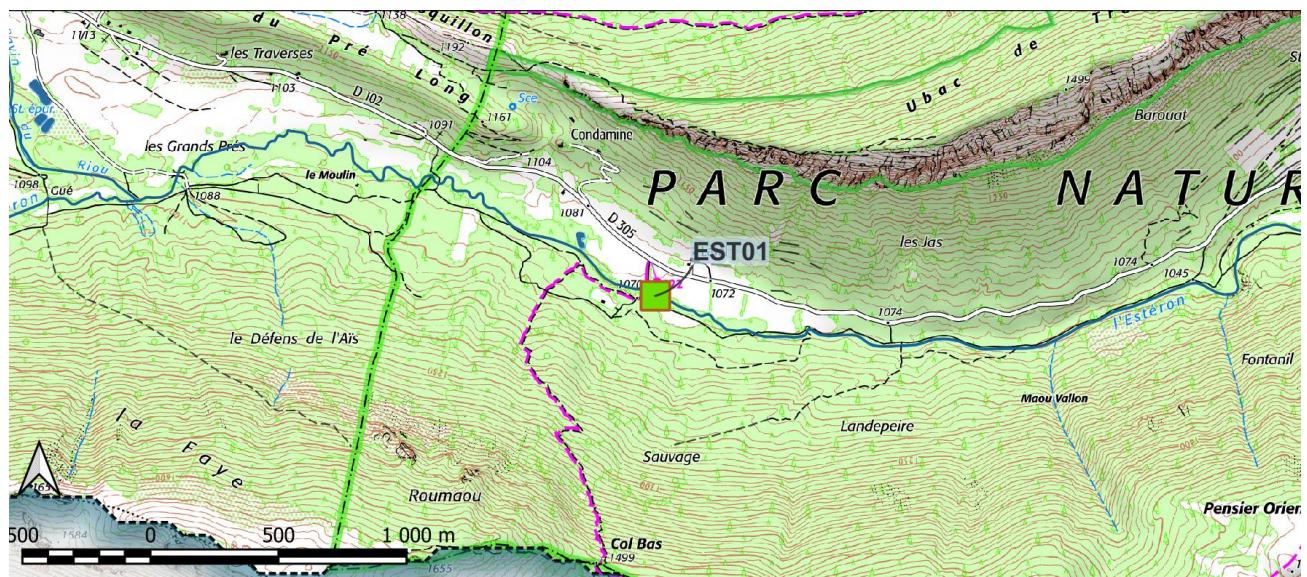
**EST01**

Commune de : St Auban (06116)

Longitude : 43,839642

Altitude : 1069 m

Latitude : 6,684284

**Dates campagnes de prélèvements** : 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021

Bassin versant : Estéron

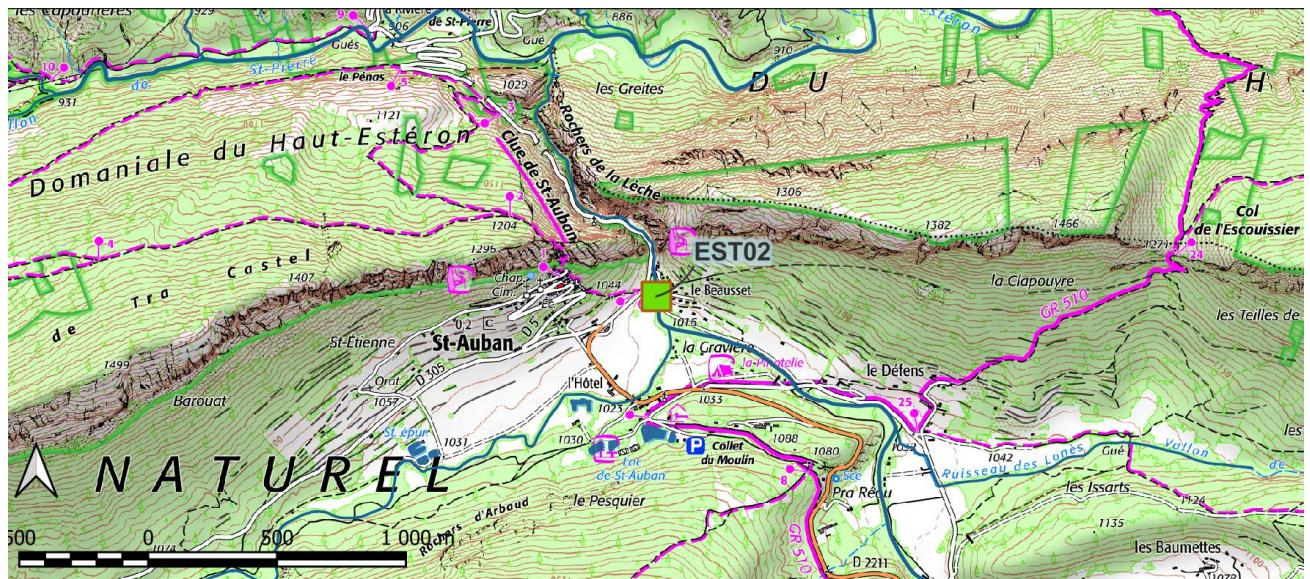
**EST02**

Commune de : St Auban (06116)

Longitude : 43,84729

Altitude : 1016 m

Latitude : 6,731398



**Dates campagnes de prélèvements :** 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



Bassin versant : Estéron

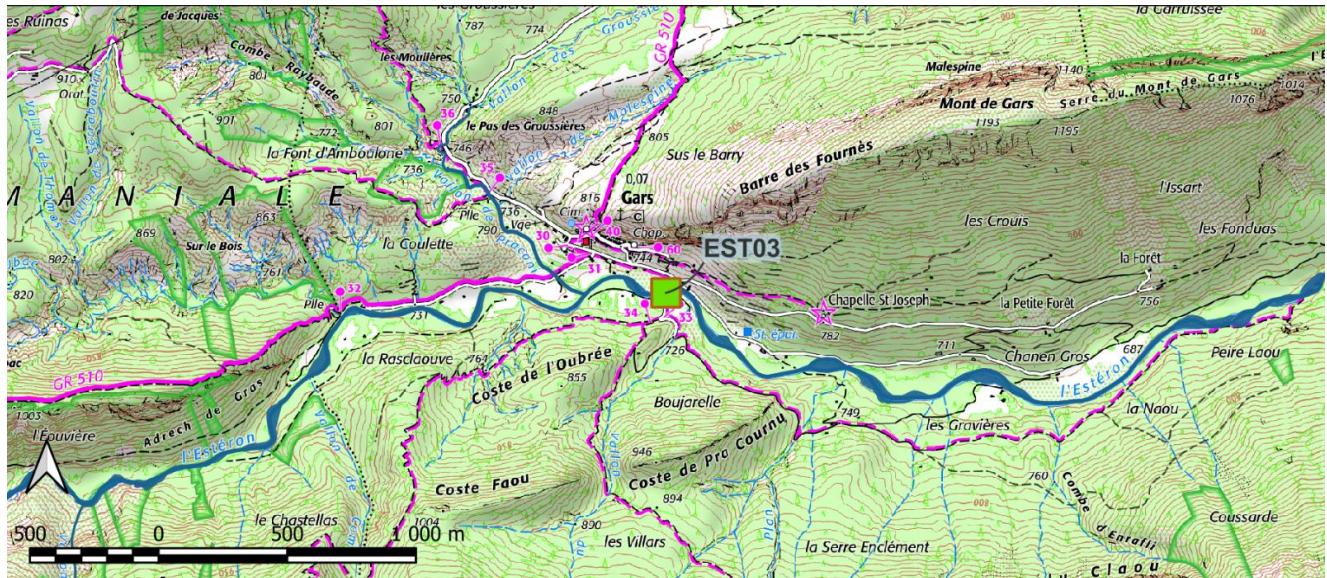
**EST03**

Commune de : Gars (06063)

Longitude : 43,863447

Altitude : 711 m

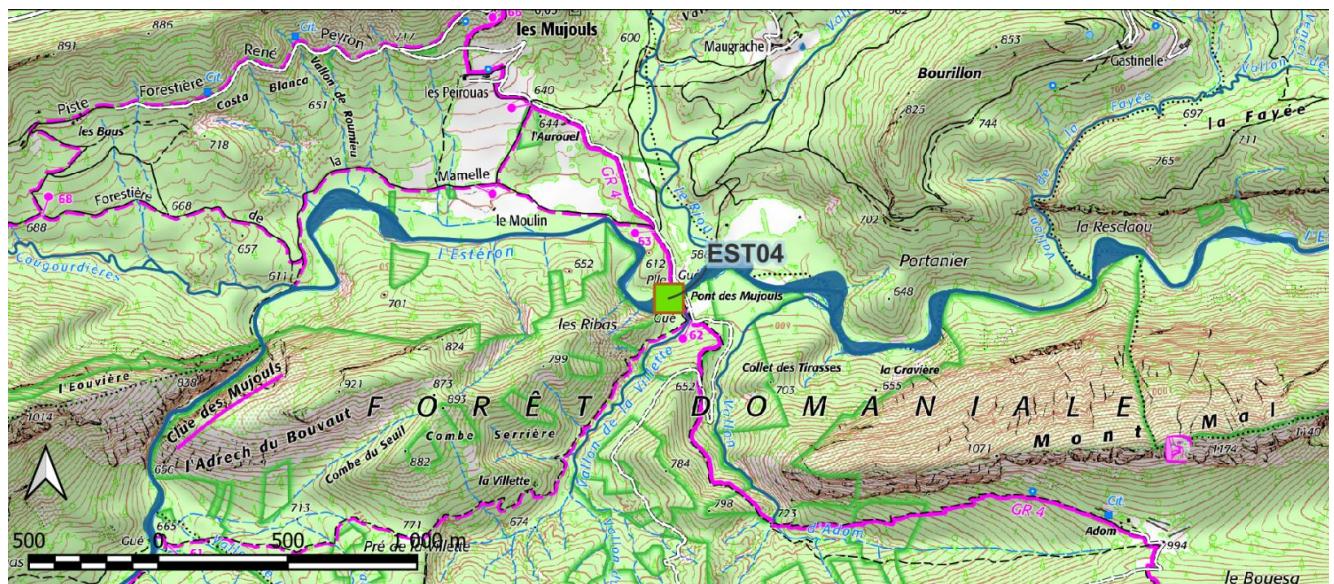
Latitude : 6,806859



Dates campagnes de prélèvements : 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



Bassin versant : Estéron

**EST04**Commune de : **Mujouls (06087)**Longitude : **43,873696**Altitude : **585 m**Latitude : **6,869794**

Dates campagnes de prélèvements : 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



Bassin versant : Estéron

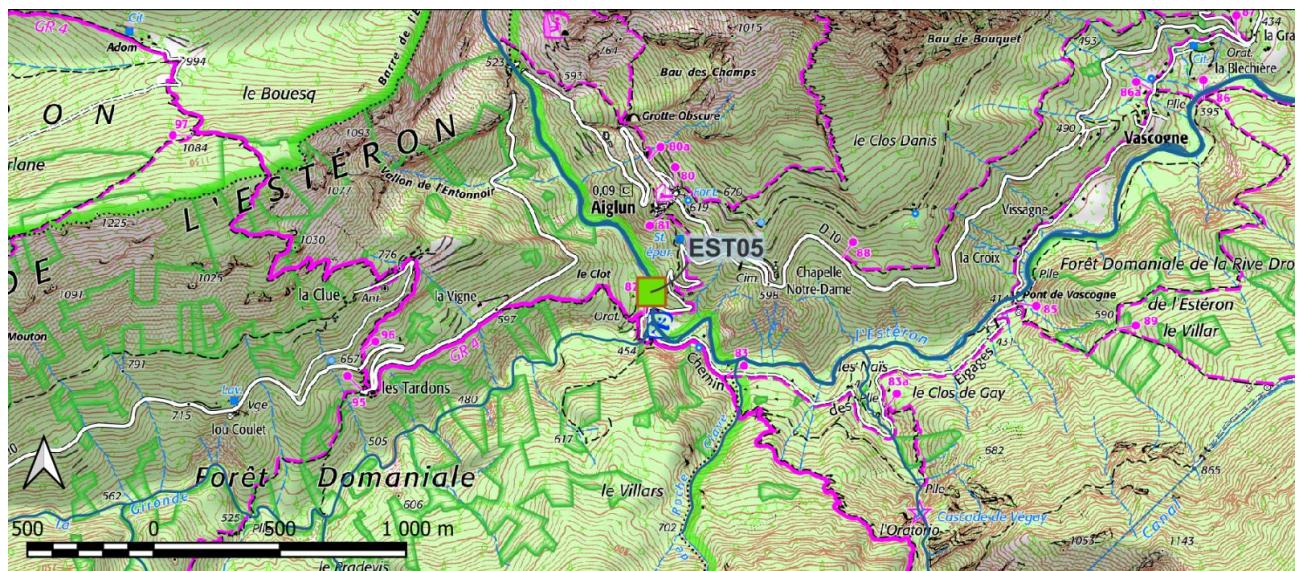
**EST05**

Commune de : Aiglun (06001)

Longitude : 43,854252

Altitude : 451 m

Latitude : 6,913653



**Dates campagnes de prélèvements :** 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



Bassin versant : Estéron

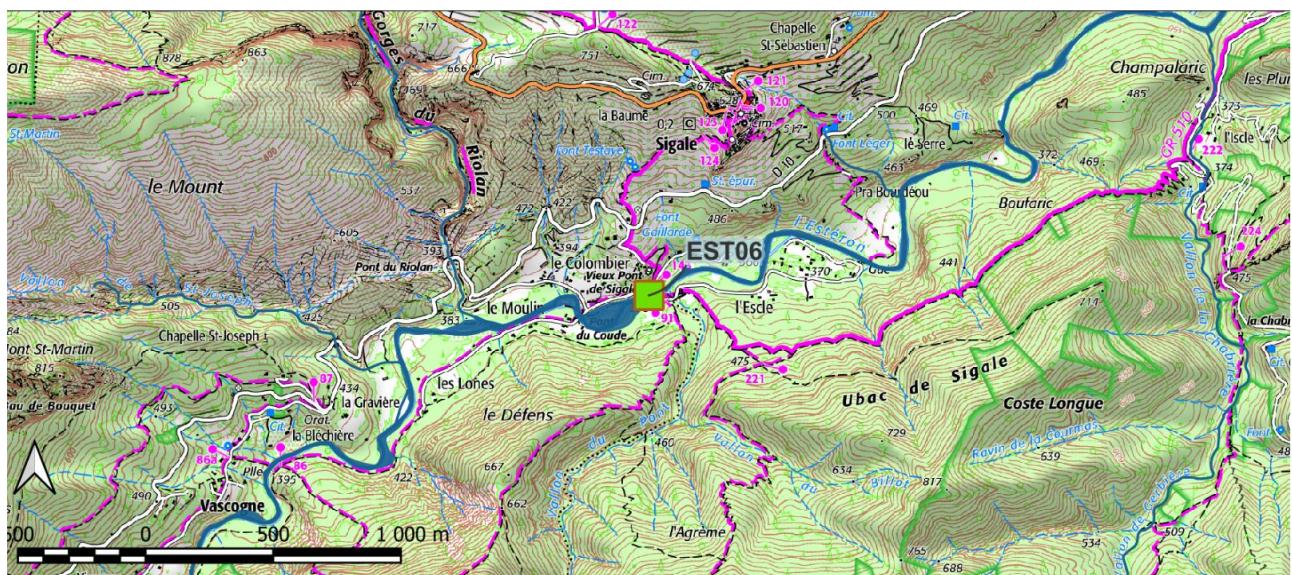
**EST06**

Commune de : Sigale (06135)

Longitude : 43,864501

Altitude : 367 m

Latitude : 6,957393



Dates campagnes de prélèvements : 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



## Bassin versant : Estéron

**EST07**

Commune de : Roquesteron (06106)

Longitude : 43,854839

Altitude : 273 m

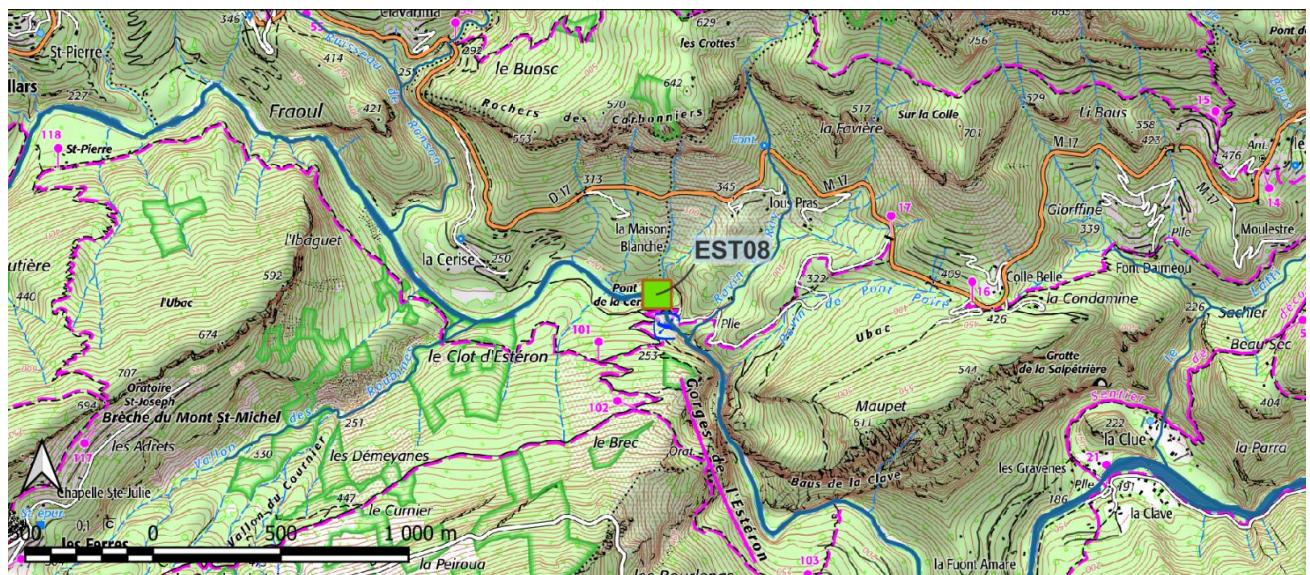
Latitude : 7,043451



**Dates campagnes de prélèvements :** 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



## Bassin versant : Estéron

**EST08**Commune de : **Gilette (06066)**Longitude : **43,854183**Altitude : **186 m**Latitude : **7,125222**

Dates campagnes de prélèvements : 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021



## Bassin versant : Estéron

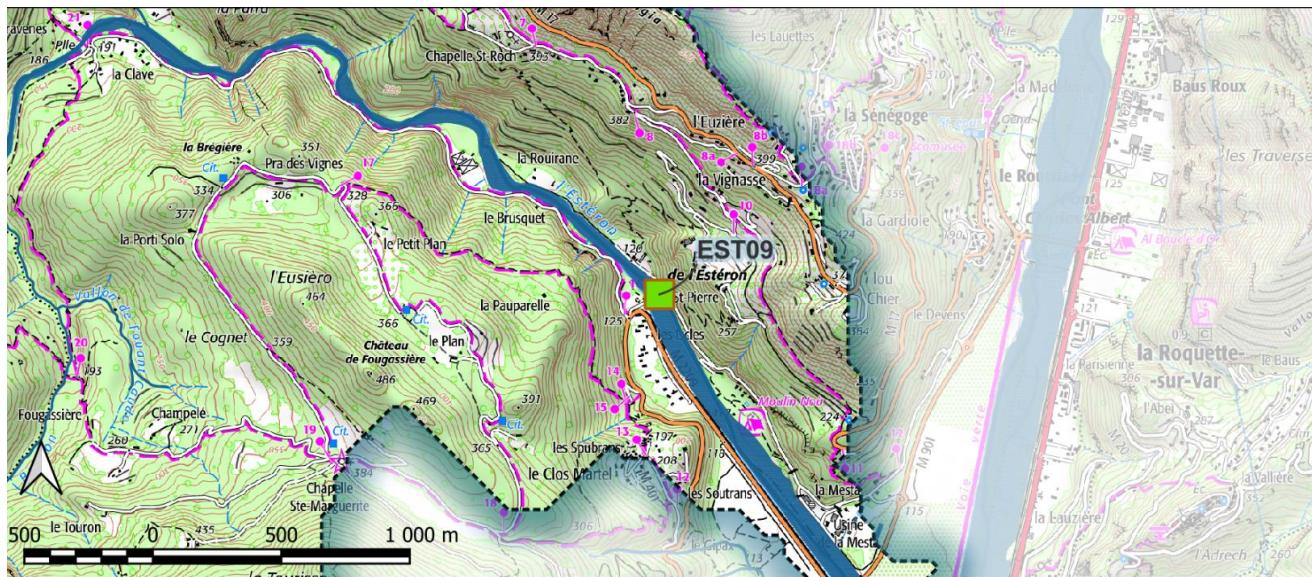
**EST09**

Commune de : Le Broc (06025)

Longitude : 43,836276

Altitude : 115 m

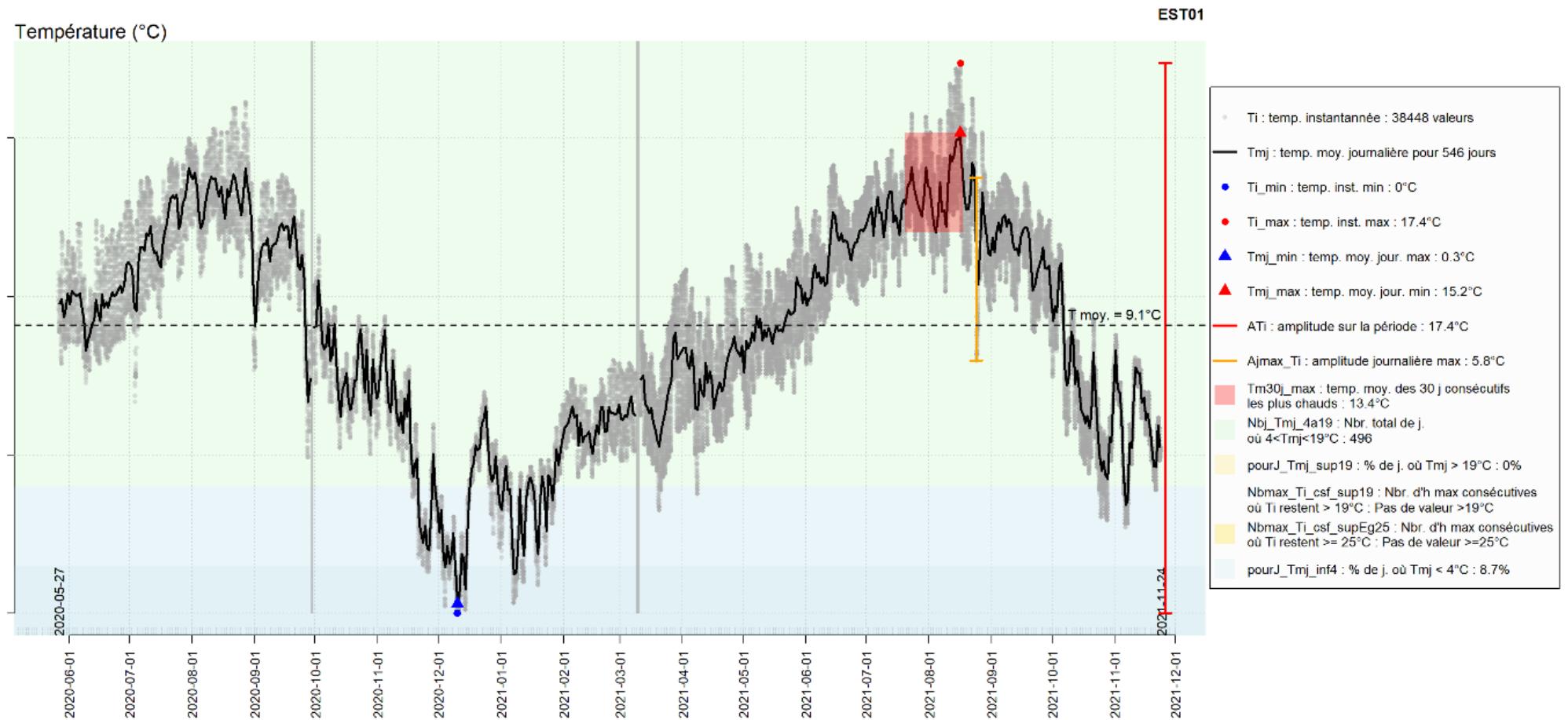
Latitude : 7,174115

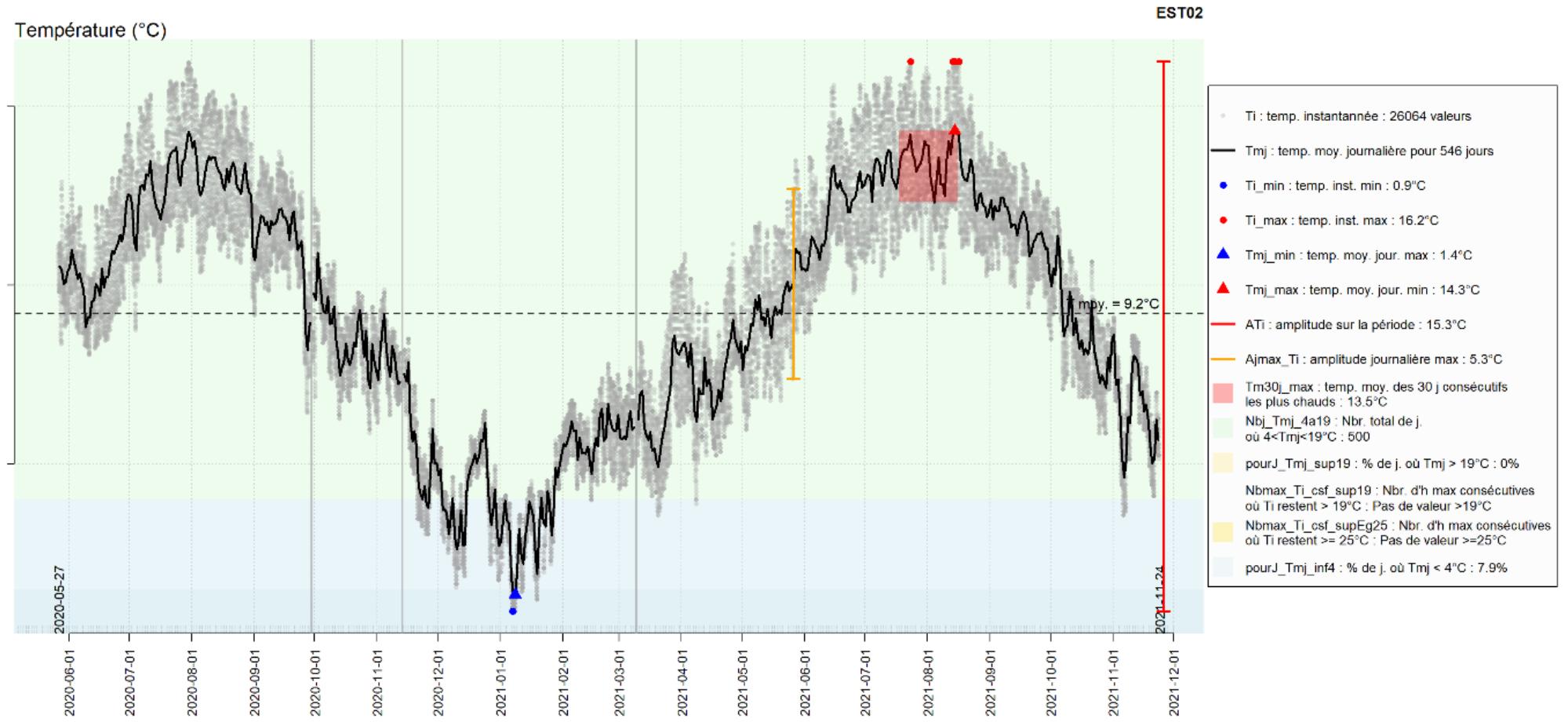


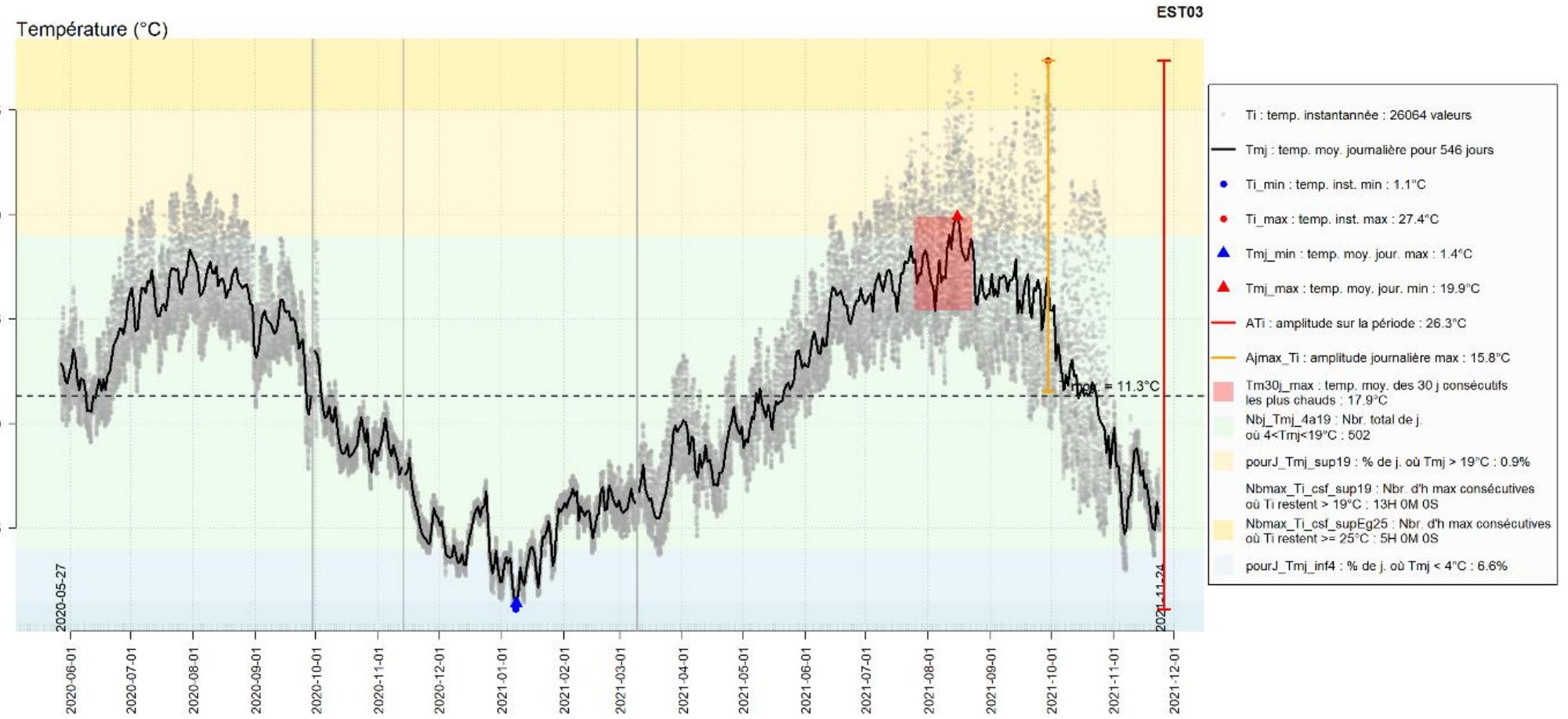
**Dates campagnes de prélèvements :** 26/05/20 ; 07/07/20 ; 29/09/2020 ; 09/03/2021 ; 15/06/2021

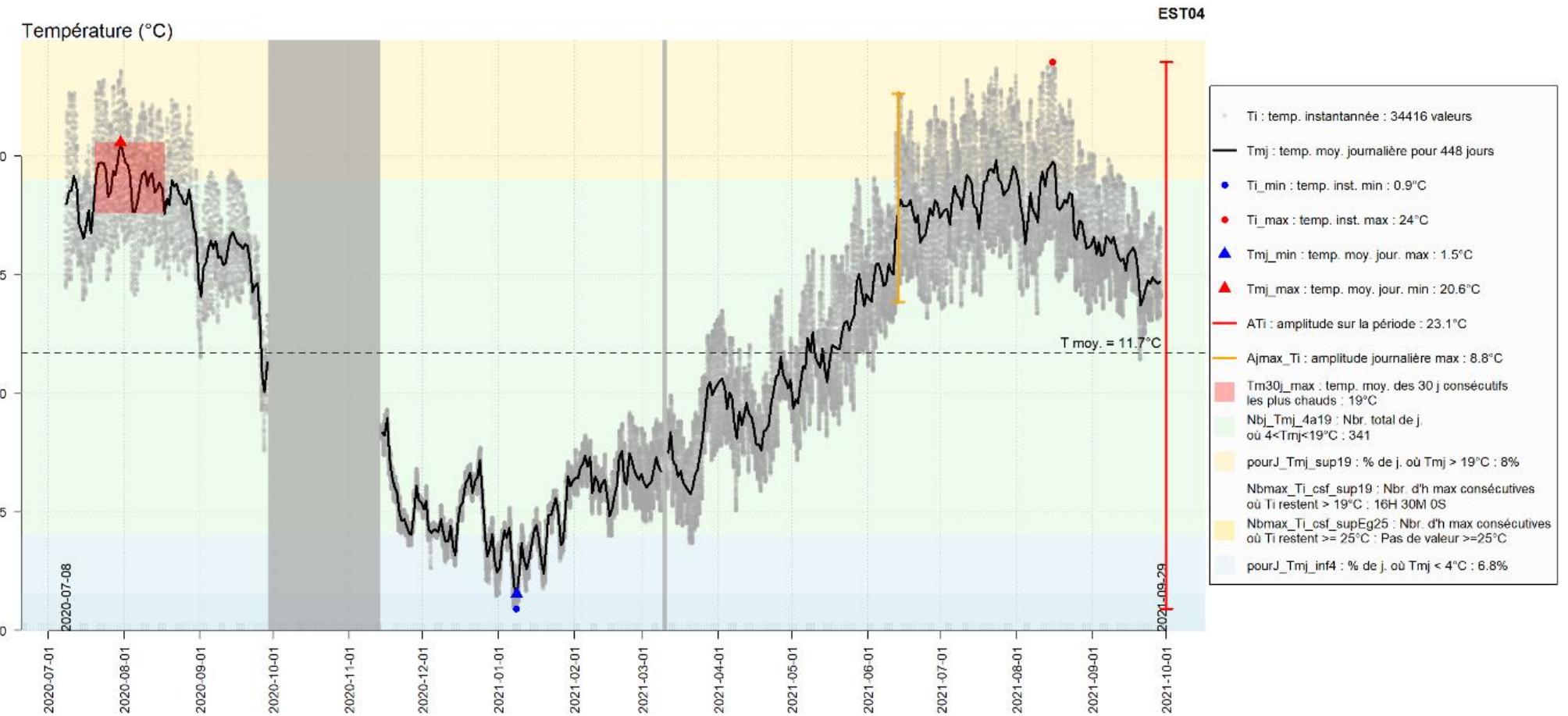


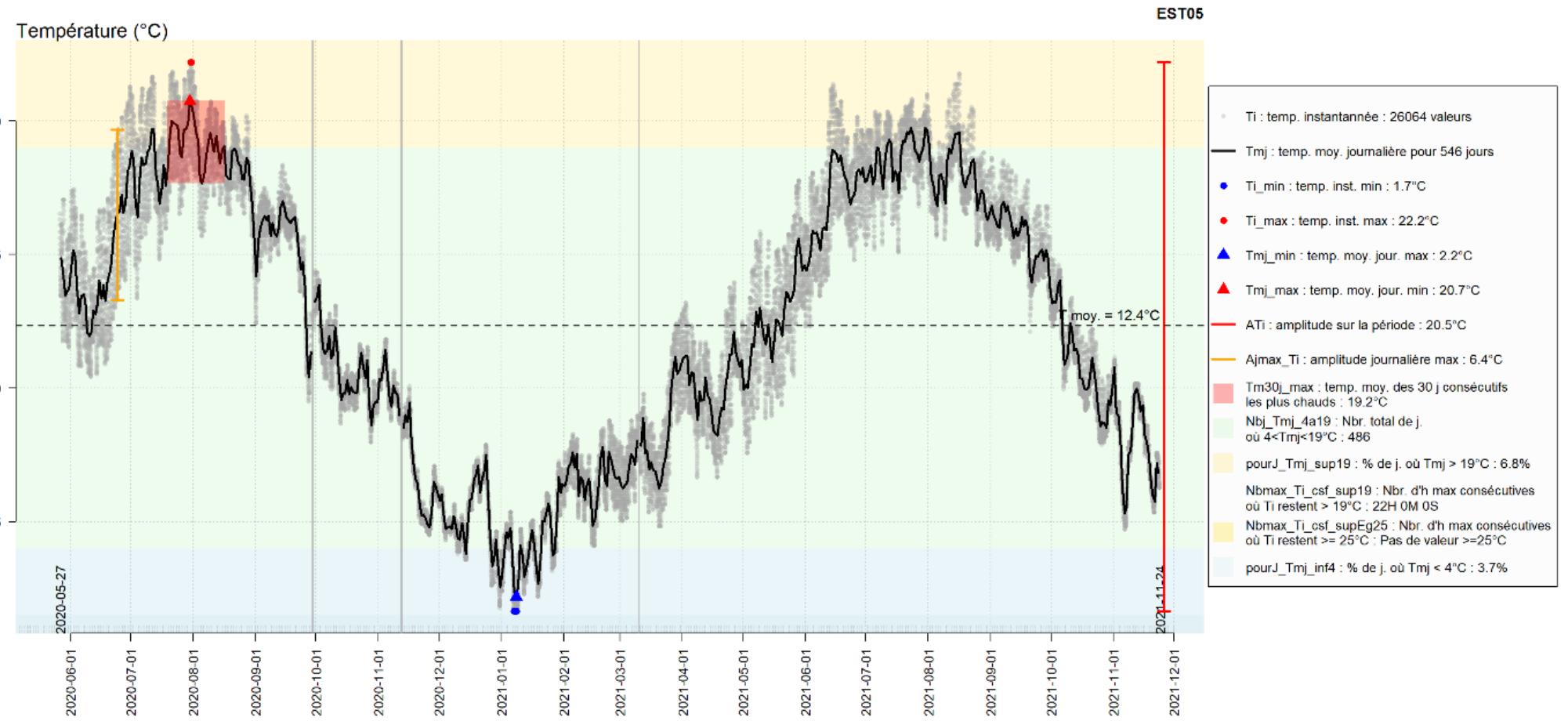
**Annexe 2.1 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations du cours principal**

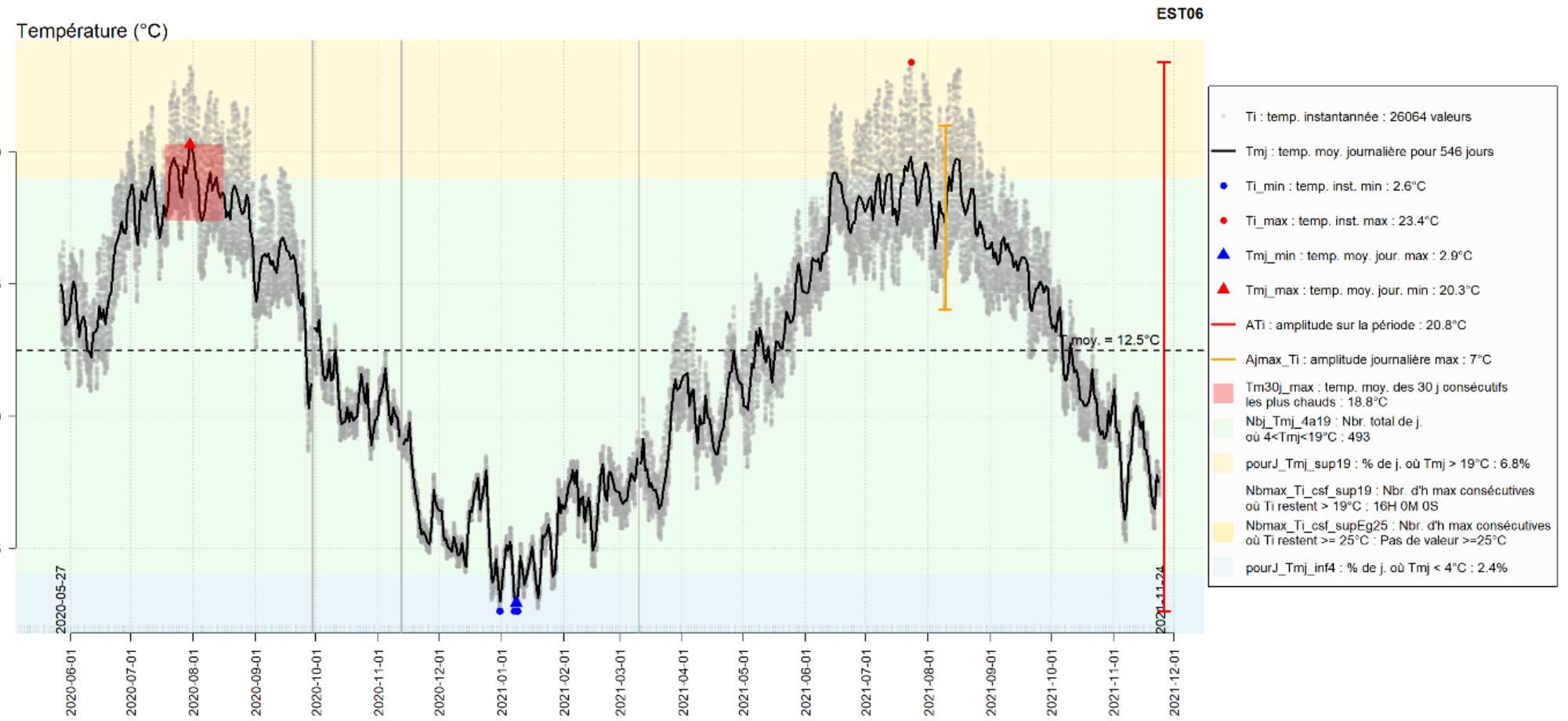


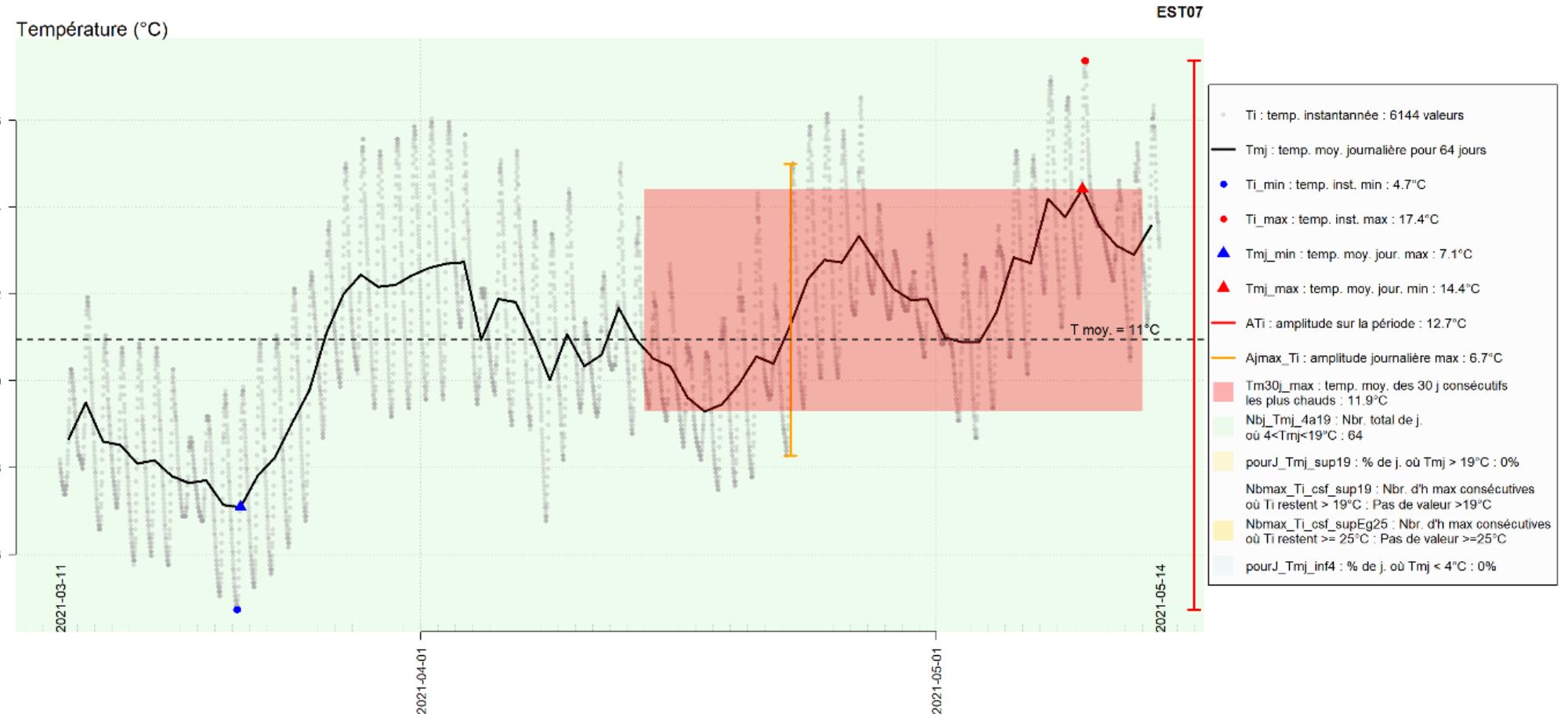


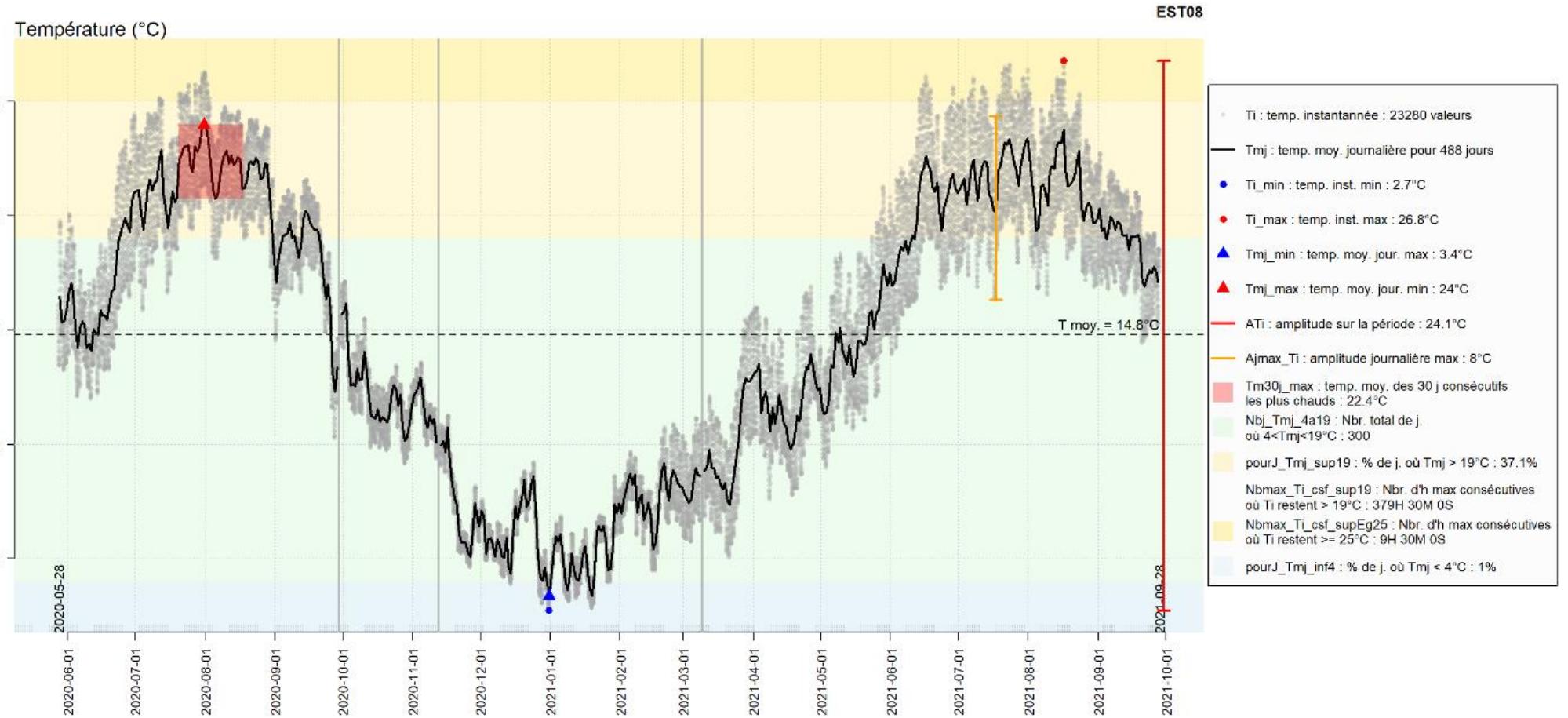


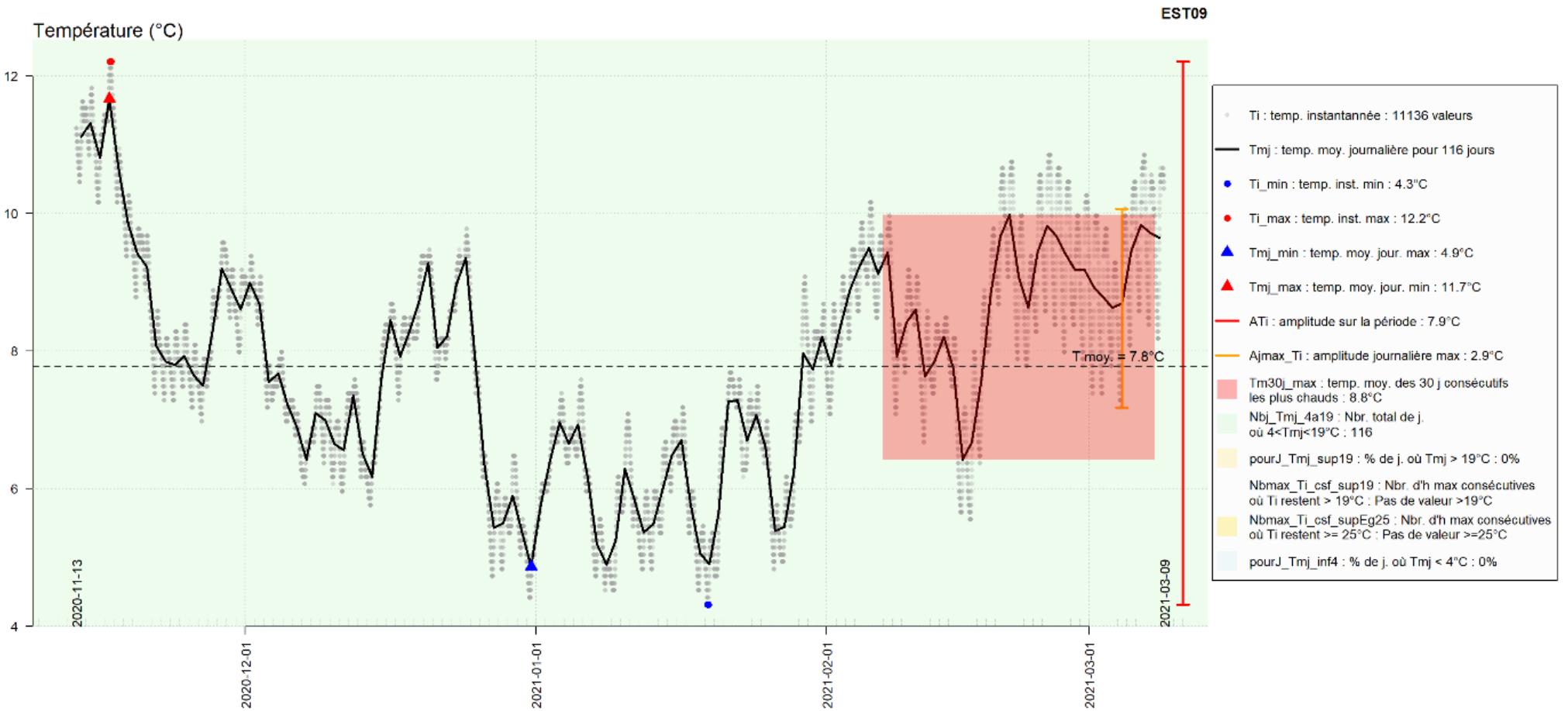




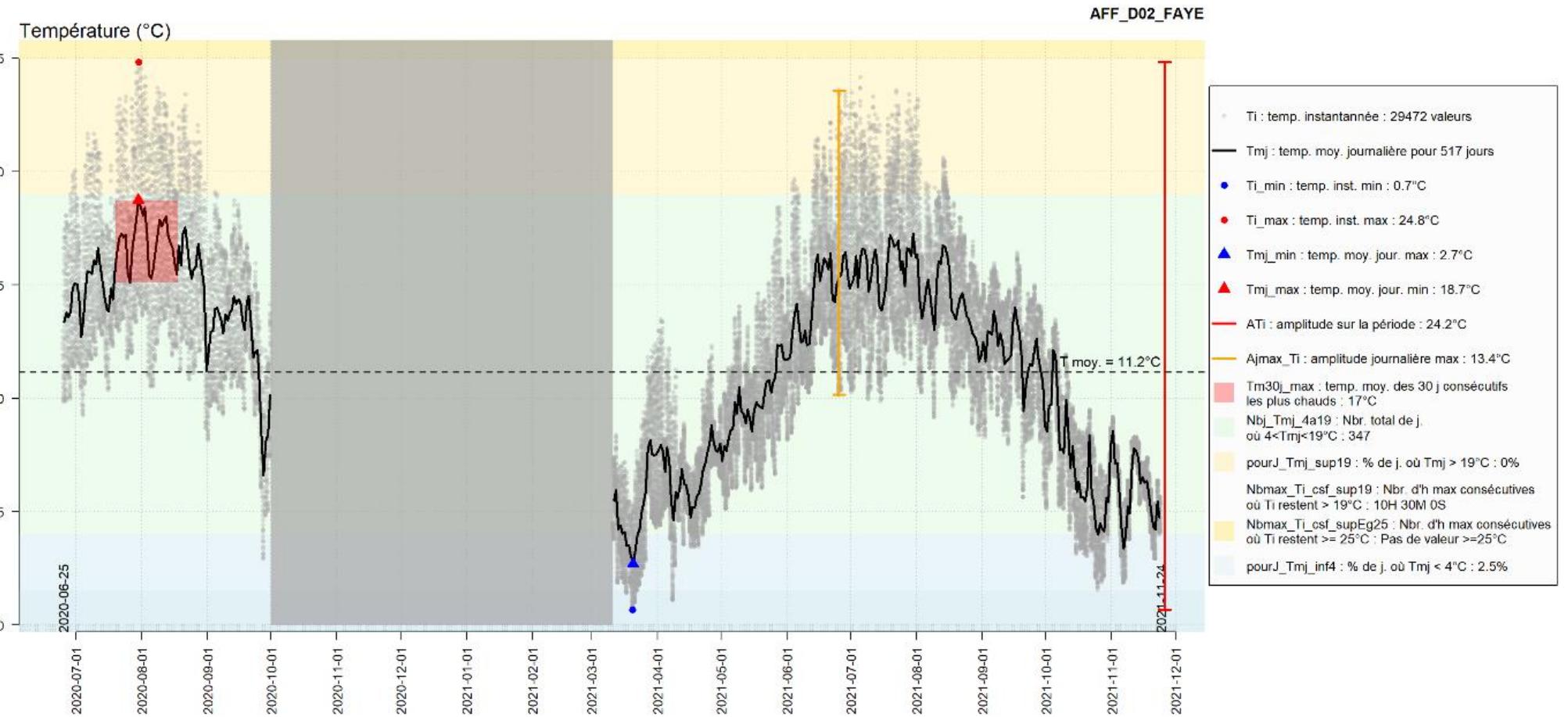


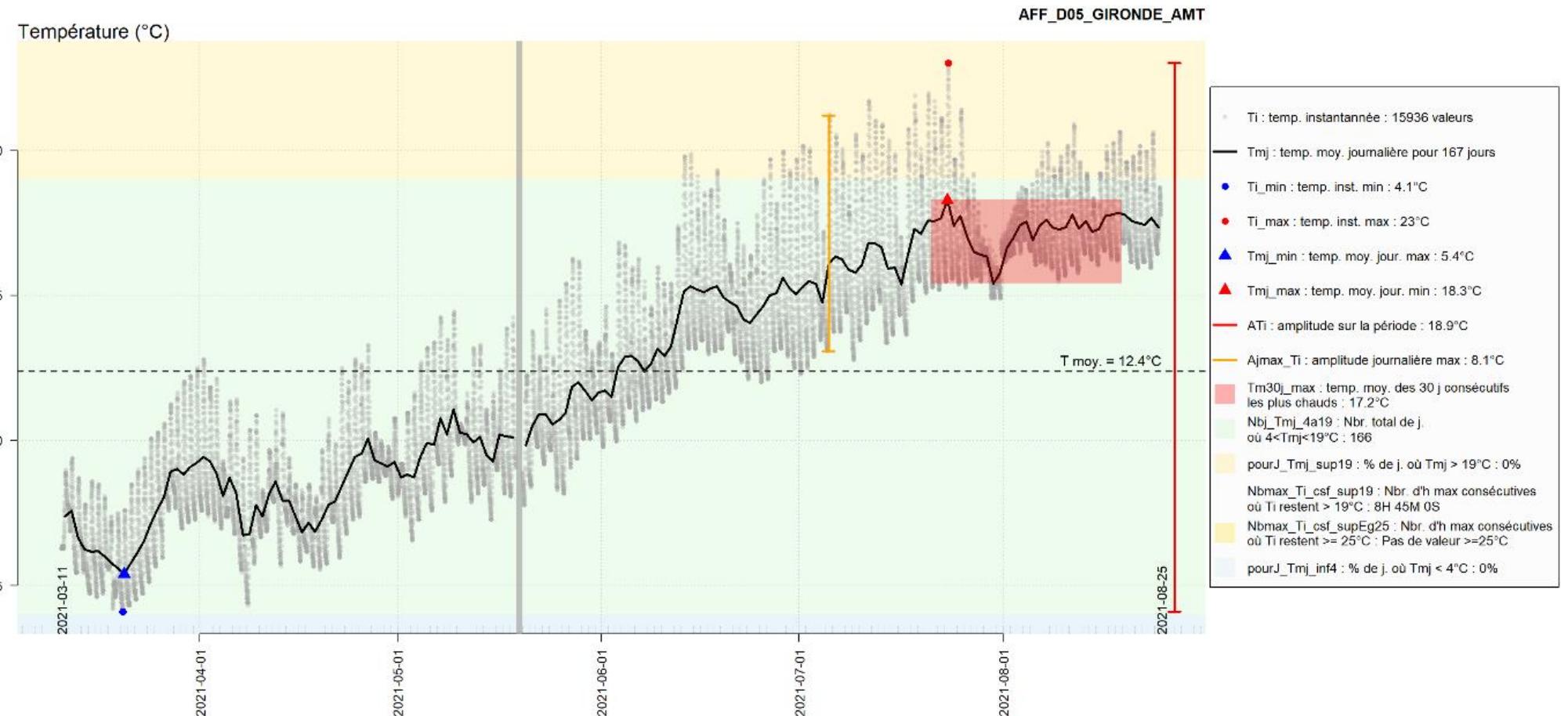


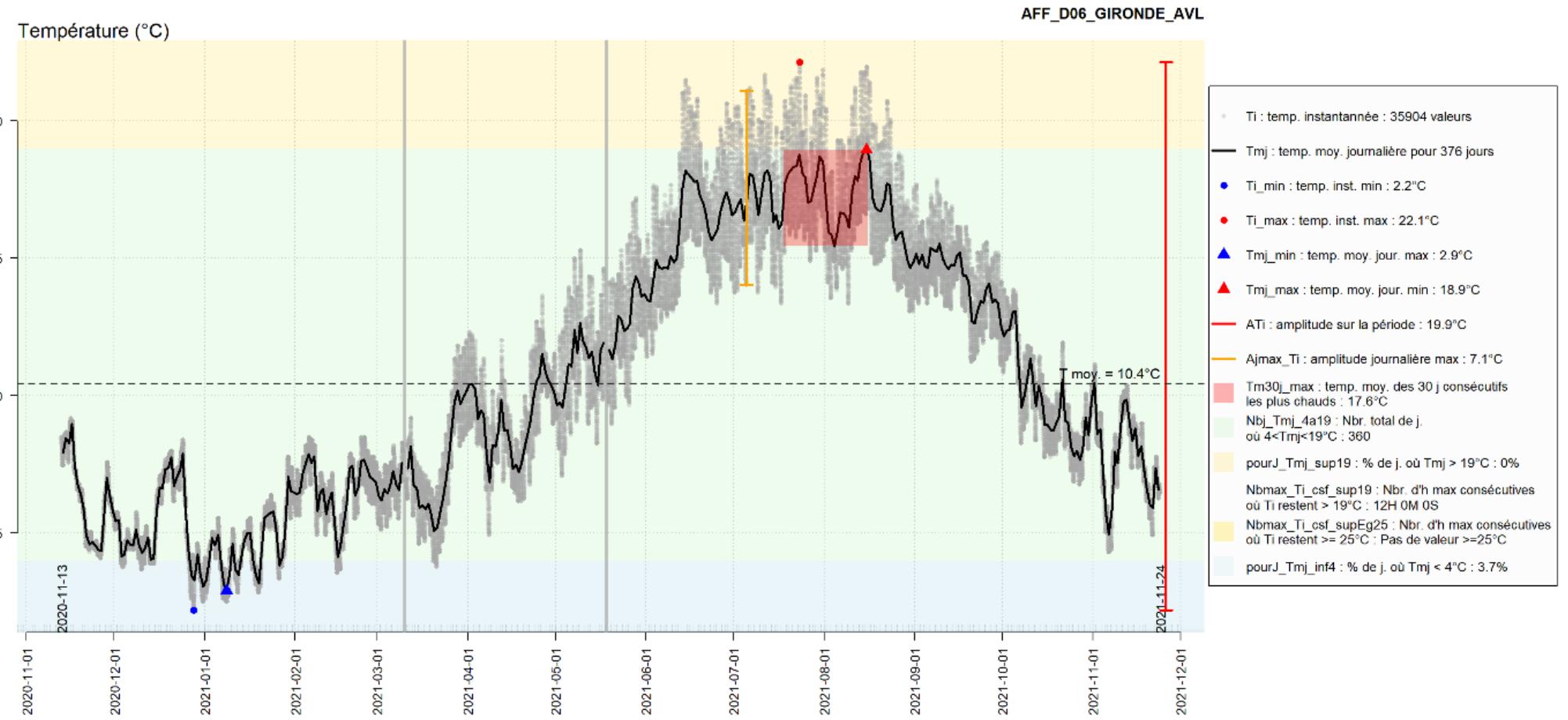


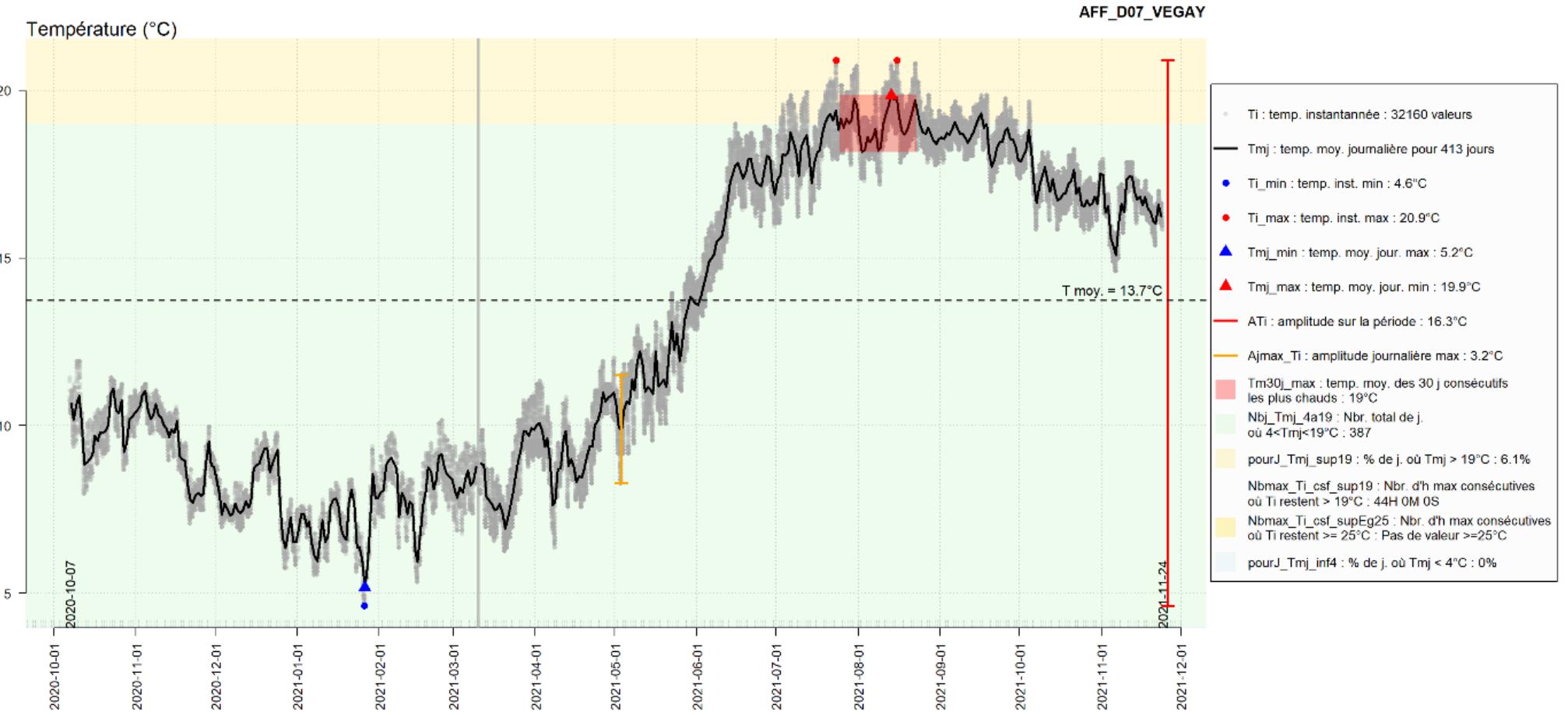


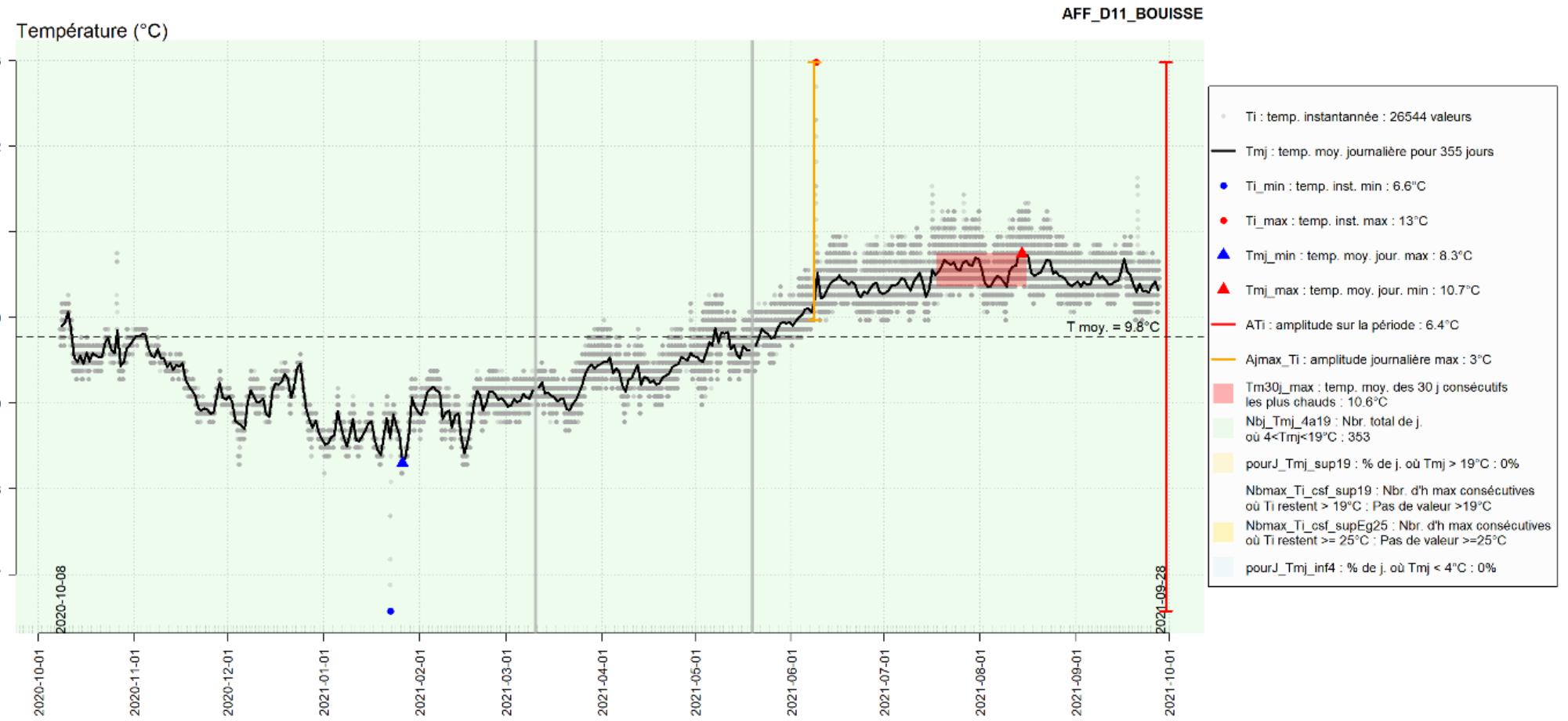
**Annexe 2.2 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations des affluents de rive droite**

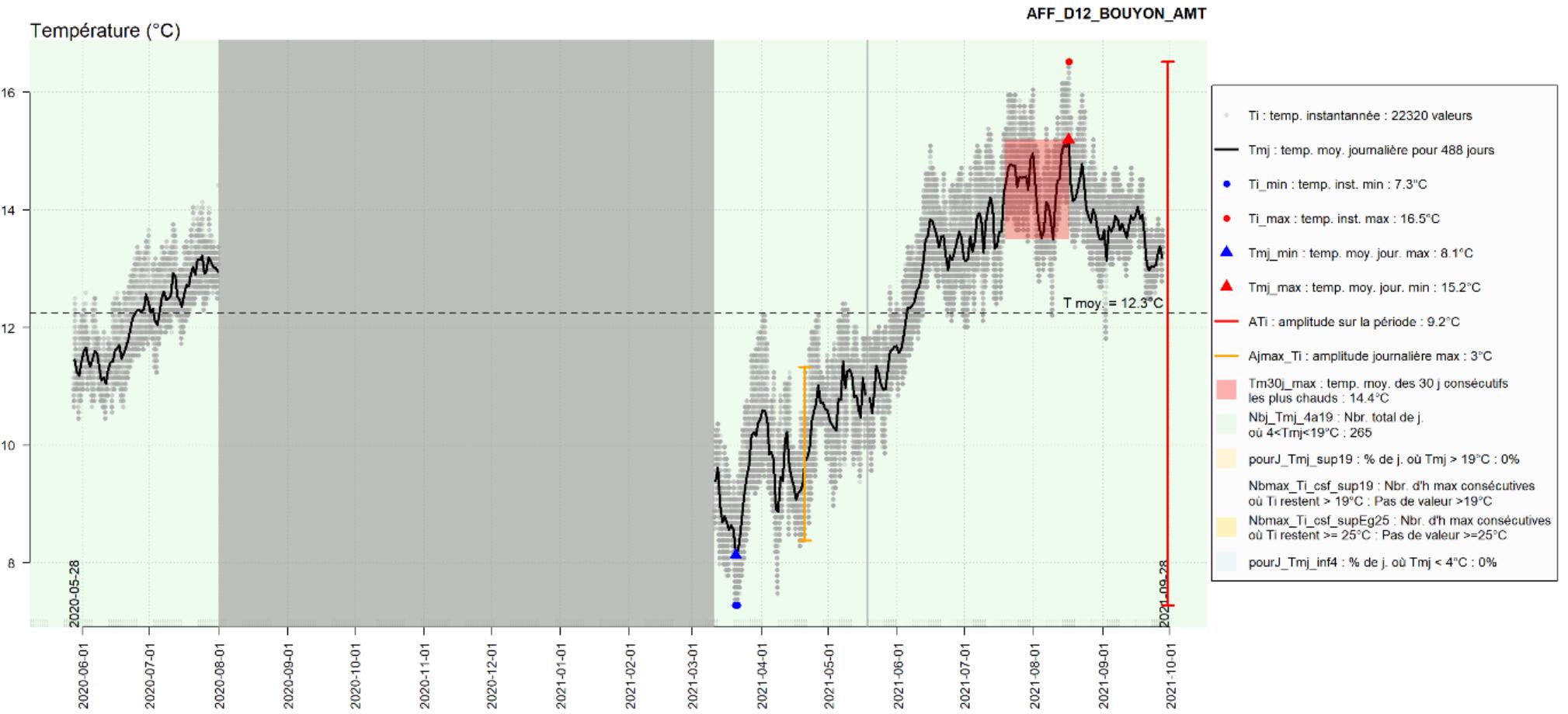




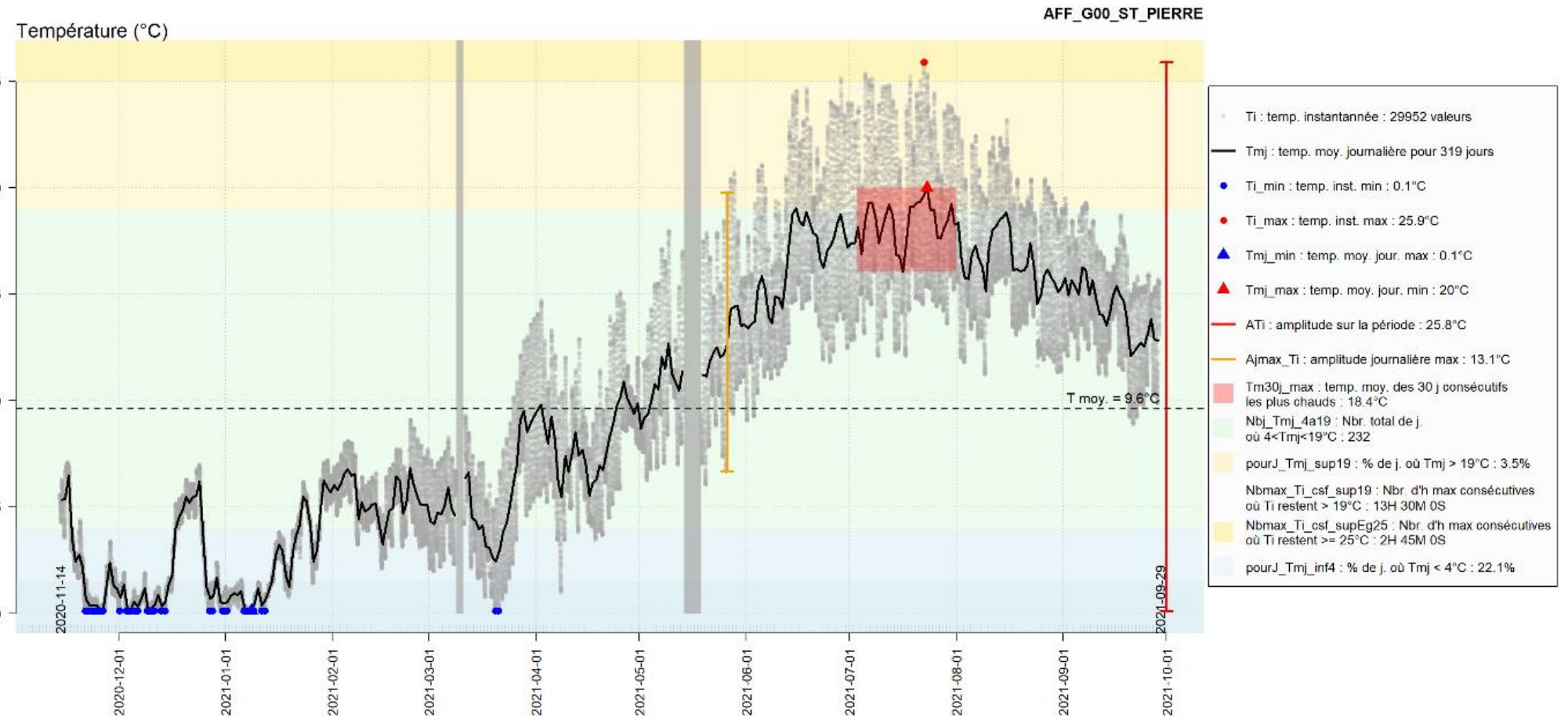


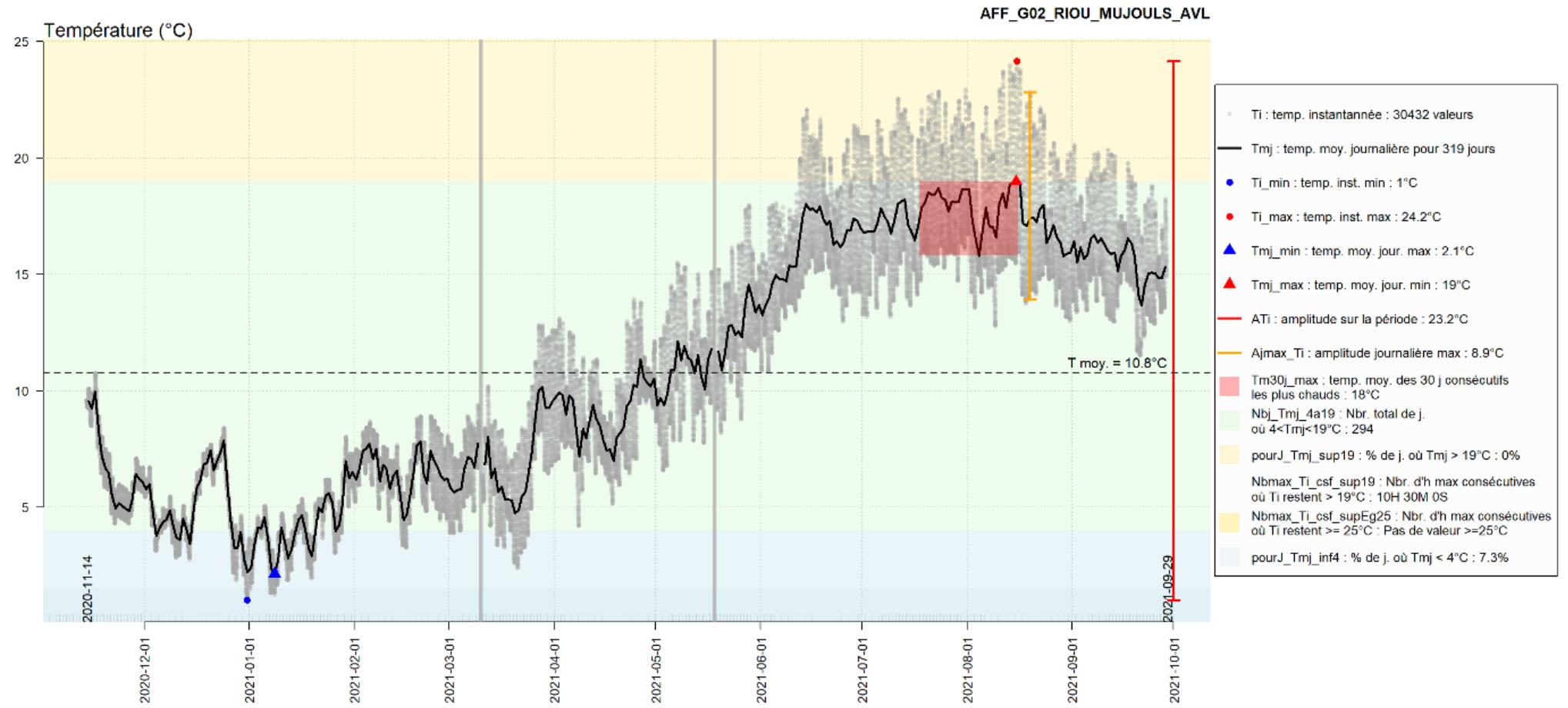


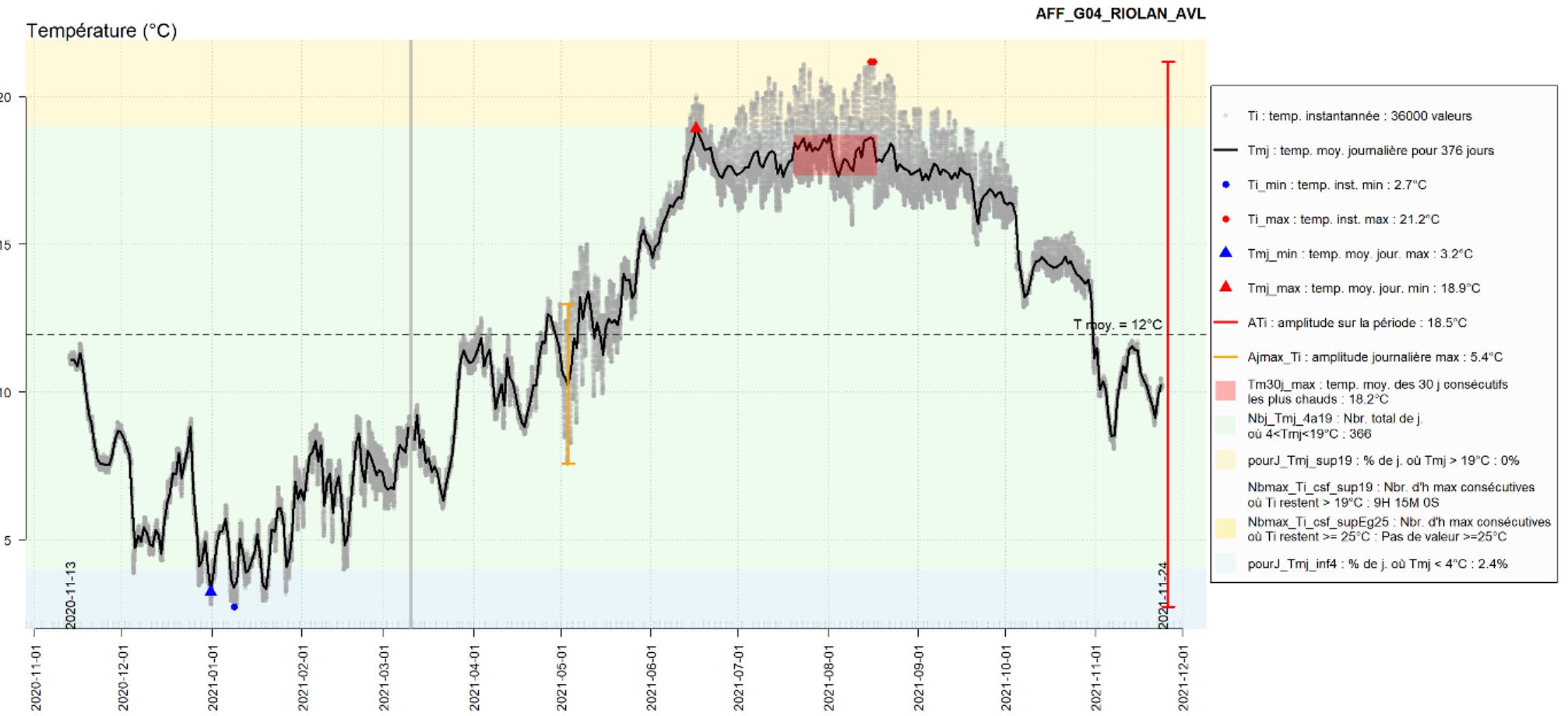


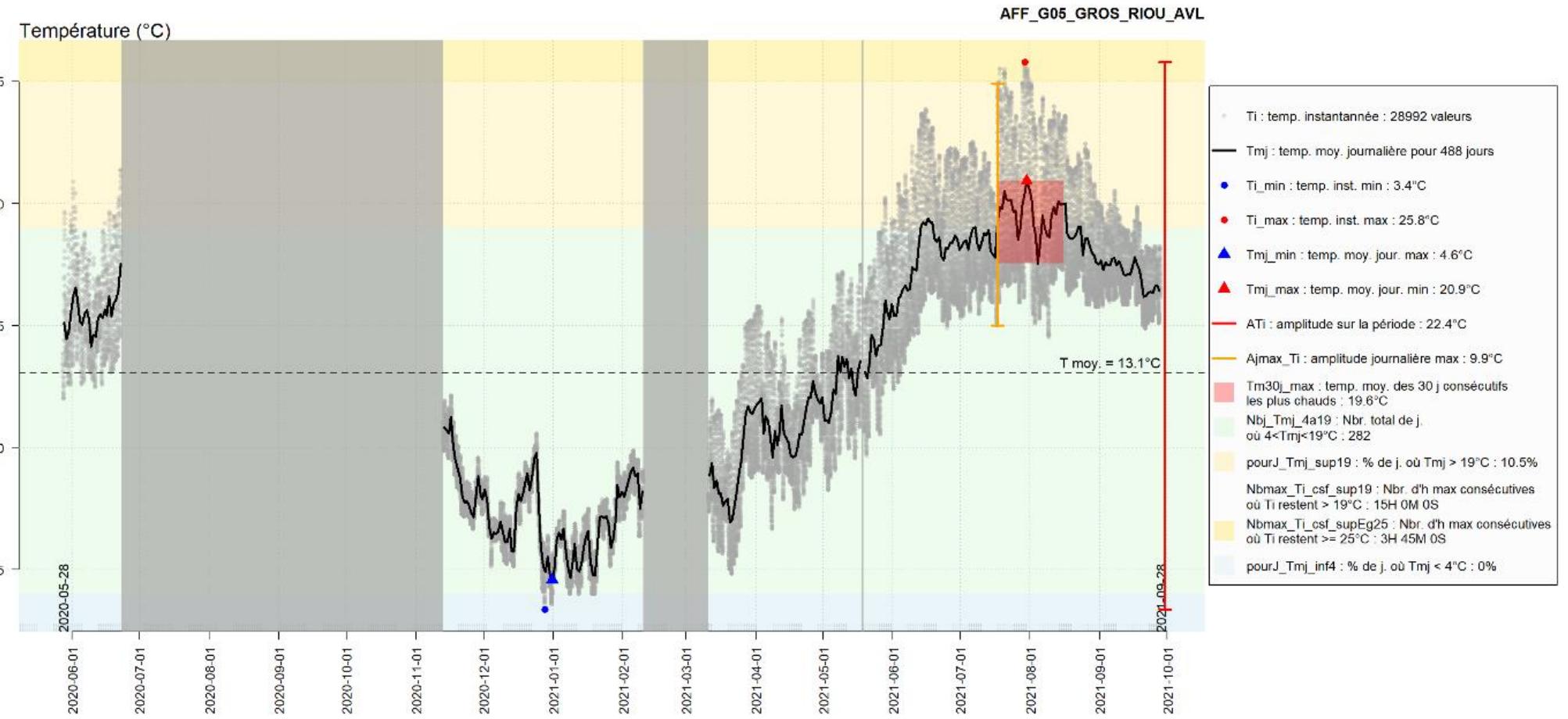


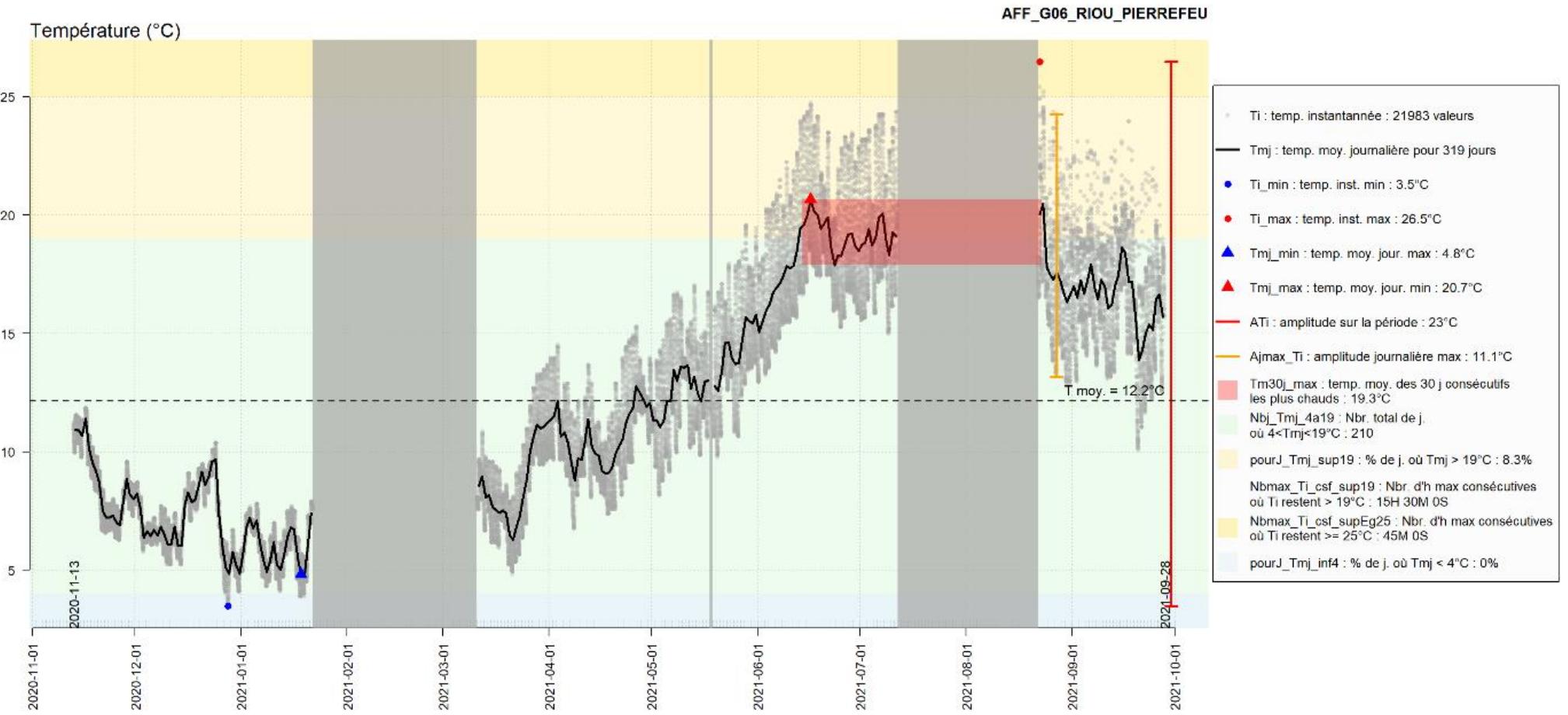
**Annexe 2.3 : Visualisation des chroniques de températures et de certaines métriques associées : stations des affluents de rive gauche**

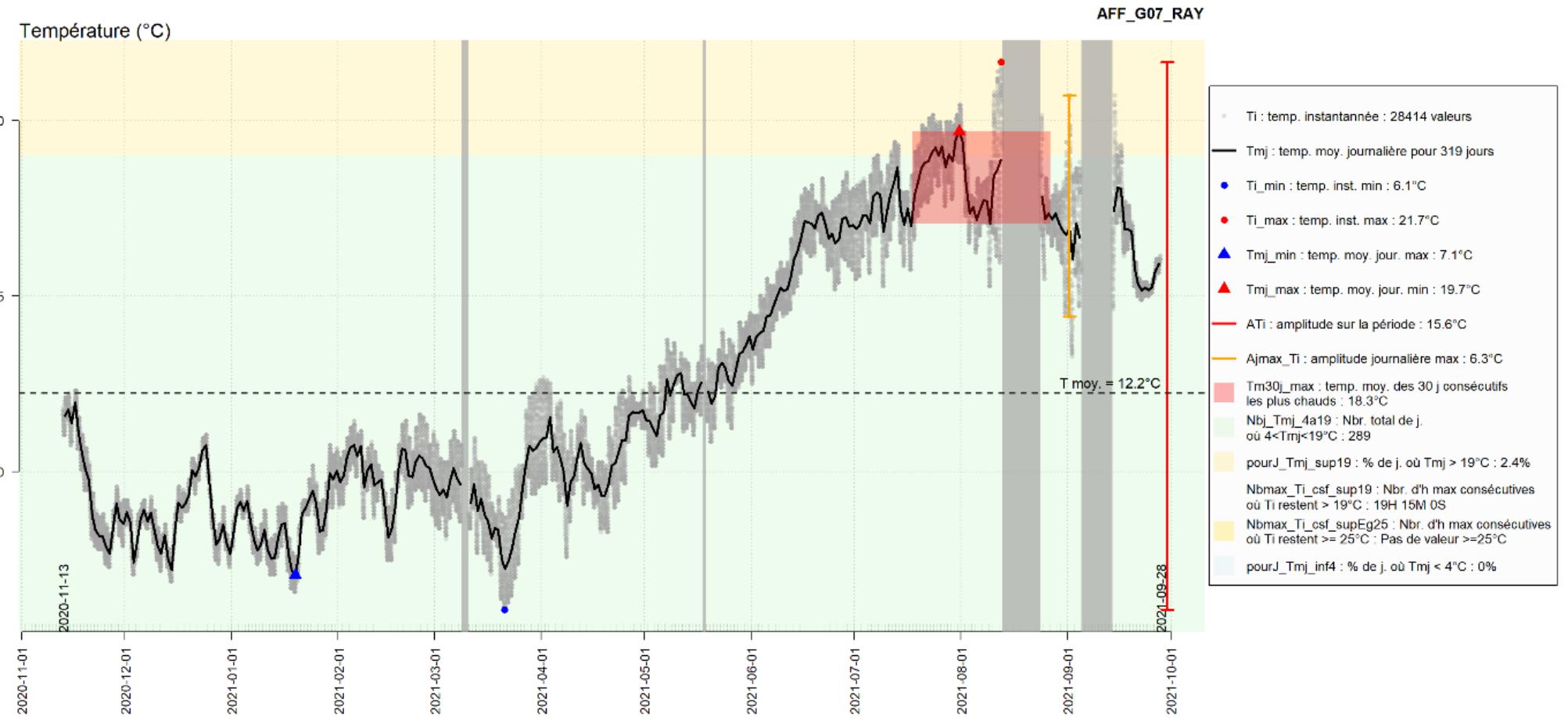


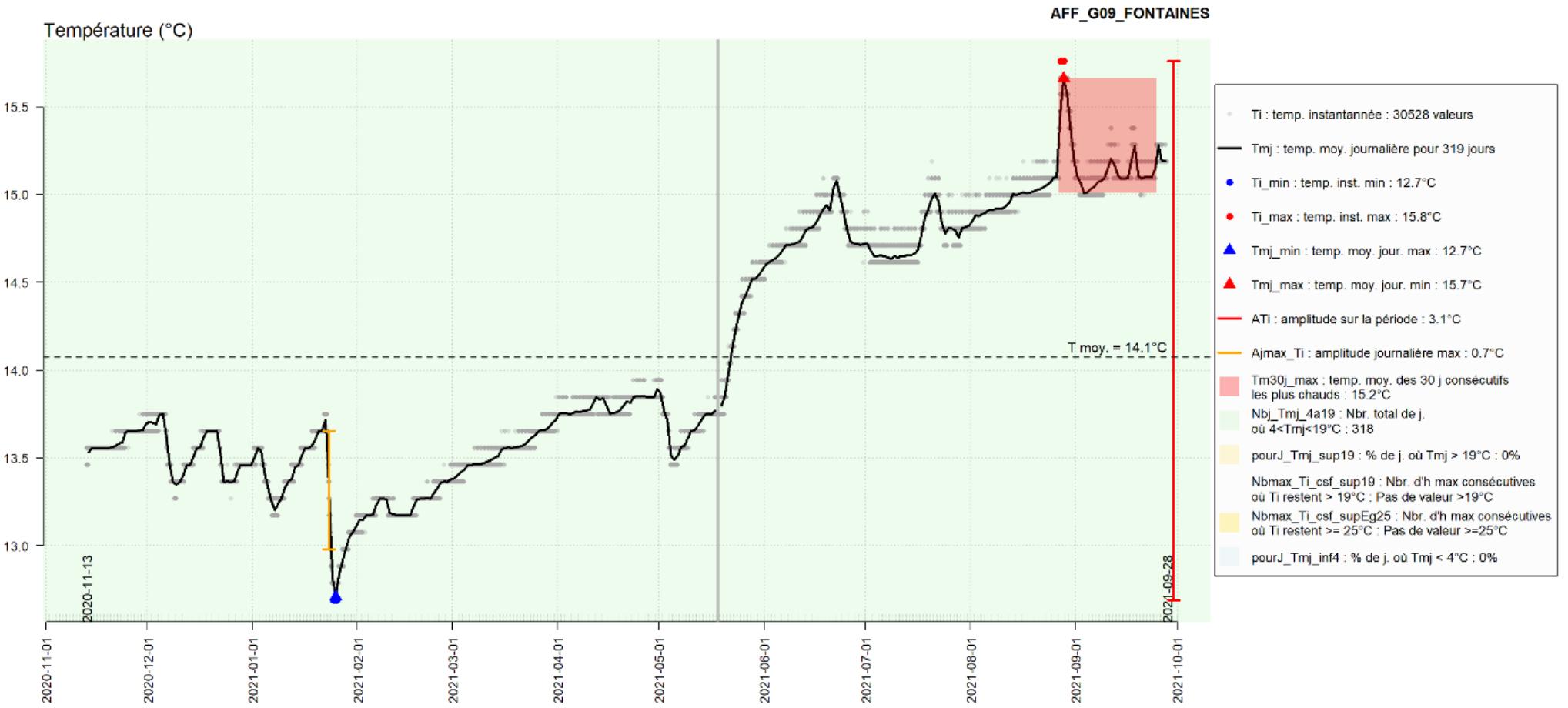












**Annexe 3 : Liste faunistique quantitative agrégées par campagne des stations du cours principal de l'Estéron. Les chiffres correspondent à des densités (ind./m<sup>2</sup>).**

Classe	Ordre	Famille		EST01_0520	EST01_0920	EST02_0520	EST02_0920	EST03_0520	EST03_0920	EST04_0520	EST04_0920	EST05_0520	EST05_0920	EST06_0520	EST06_0920	EST07_0520	EST07_0920	EST08_0520	EST08_0920	EST09_0520	EST09_0920	Occurrence
Insecta	Plécoptères	Leuctridae	Leuctra	727	553	350	370	310	200	343	57	47	120	257	150	113	107	77	60	50	87	<b>18</b>
Insecta	Plécoptères	Nemouridae	Nemouridae	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
Insecta	Plécoptères	Nemouridae	Amphinemura	0	0	3	47	0	33	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>6</b>
Insecta	Plécoptères	Nemouridae	Nemoura	0	37	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
Insecta	Plécoptères	Nemouridae	Protonemura	27	0	3	7	47	0	43	0	0	0	50	0	3	0	7	0	20	3	<b>10</b>
Insecta	Plécoptères	Perlidae	Dinocras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	<b>1</b>
Insecta	Plécoptères	Perlidae	Perla	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	7	13	0	7	0	<b>5</b>
Insecta	Plécoptères	Perlidae	Perla_marginata	0	0	3	7	3	7	37	50	7	13	0	3	0	0	0	0	0	0	<b>9</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Perlodidae	3	0	3	0	0	7	0	7	0	3	0	10	0	7	0	0	0	0	<b>8</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Besdolus_ravizarrum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Isogenus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Isoperla	0	0	0	0	0	3	17	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Isoperla_grammatica	0	0	17	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Isoperla_rivularum	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Perlodes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	Perlodes_intricatus	0	10	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetidae	3	37	20	190	227	1420	160	50	150	50	237	20	137	37	17	10	80	57	<b>18</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis	3	10	0	43	40	3	37	143	63	223	23	77	0	73	10	7	0	163	<b>15</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Acentrella_sinaica	0	0	0	0	663	0	383	0	967	0	343	20	30	3	240	0	60	3	<b>10</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Alainites_muticus	163	27	133	20	0	153	13	27	63	20	147	33	87	3	40	3	53	0	<b>16</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_alpinus	0	0	0	0	0	0	17	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	<b>3</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_fuscatus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	3	0	137	0	<b>3</b>	
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_gr._alpinus	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	23	0	13	0	3	0	0	0	<b>4</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_lutheri	0	0	3	0	43	100	13	0	20	0	13	0	33	0	33	0	40	23	<b>10</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_melanonyx	0	0	0	0	17	0	13	0	17	0	7	0	10	0	0	0	0	0	<b>5</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_pasquetorum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>7</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Baetis_rhodani	73	127	97	2023	267	767	113	0	57	0	70	0	187	0	73	0	423	0	<b>12</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Centroptilum	30	3	7	3	0	27	7	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	<b>8</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Cloeon	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
Insecta	Ephéméroptères	Baetidae	Procloeon_bifidum	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>2</b>
Insecta	Ephéméroptères	Caenidae	Caenis	0	0	0	0	0	7	0	33	3	57	23	90	57	33	0	47	3	23	<b>11</b>
Insecta	Ephéméroptères	Caenidae	Caenis_luctuosa	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	<b>3</b>
Insecta	Ephéméroptères	Caenidae	Caenis_pusilla	0	0	0	0	0	0	10	0	83	0	17	0	13	0	33	0	10	0	<b>6</b>
Insecta	Ephéméroptères	Ephemerellidae	Serratella_ignita	1383	10	613	27	60	0	120	0	73	0	463	0	693	0	263	0	220	0	<b>11</b>
Insecta	Ephéméroptères	Ephemerellidae	Torleya_major	3	0	150	13	17	107	7	10	7	17	0	3	0	0	0	0	0	0	<b>3</b>
Insecta	Ephéméroptères	Ephemeridae	Ephemera_danica	17	0	13	3	0	37	3	7	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	<b>8</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Heptageniidae	20	43	10	40	0	80	0	130	0	107	0	57	7	37	0	10	7	27	<b>13</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Ecdyonurus	0	3	17	0	10	40	3	133	10	23	0	90	0	93	0	10	0	40	<b>12</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Ecdyonurus_dispar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	20	0	<b>2</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Ecdyonurus_helveticus	87	113	43	43	23	17	10	0	0	20	63	0	3	0	20	0	20	0	<b>12</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Ecdyonurus_venosus	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	13	0	7	0	7	<b>5</b>
Insecta	Ephéméroptères	Heptageniidae	Electrogena	0	0	0	0	0	7	0	7	0	3	0	0	0	3	0	0			

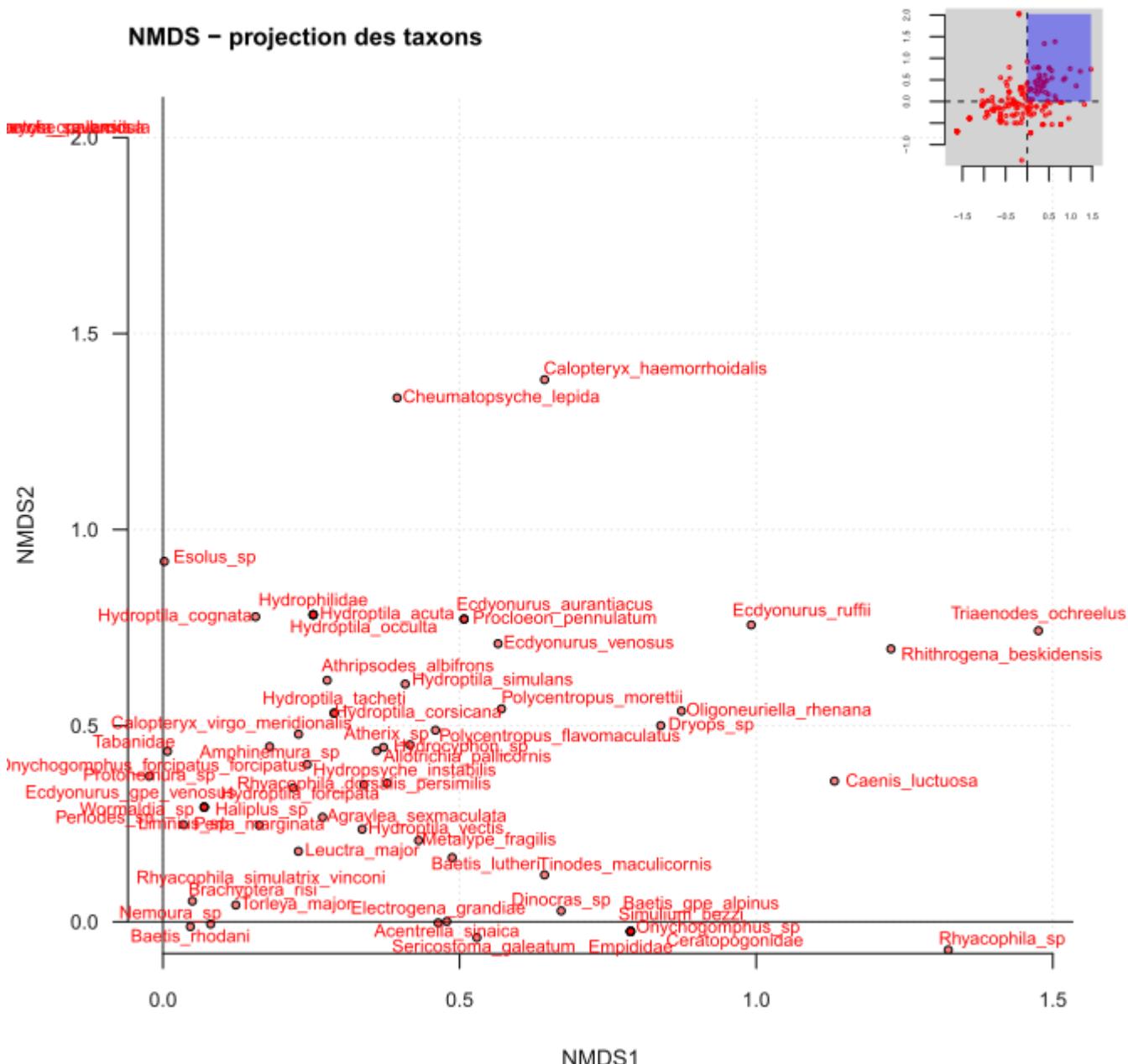
Classe	Ordre	Famille		EST01_0520	EST01_0920	EST02_0520	EST02_0920	EST03_0520	EST03_0920	EST04_0520	EST04_0920	EST05_0520	EST05_0920	EST06_0520	EST06_0920	EST07_0520	EST07_0920	EST08_0520	EST08_0920	EST09_0520	EST09_0920	Occurrence
Insecta	Coléoptères	Dryopidae	Dryops	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	30	3	20	7	3	6
Insecta	Coléoptères	Dytiscidae	Dytiscidae	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Coléoptères	Dytiscidae	Dystiscinae	0	0	0	0	0	3	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Insecta	Coléoptères	Dytiscidae	Colymbetinae	0	3	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Insecta	Coléoptères	Dytiscidae	Hydroporinae	0	0	37	23	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	4
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Elmidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	7	0	0	2
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Elmis	290	210	240	287	3	40	10	57	7	13	40	113	20	37	30	60	17	137	18
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Esolus	33	27	7	3	20	10	43	37	37	37	7	0	13	17	7	0	3	17	16
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Limnius	3	17	3	33	0	3	7	0	3	7	7	30	17	17	23	33	3	10	16
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Oulimnius	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Riolus	87	57	250	370	10	97	37	27	47	30	0	23	13	17	13	17	3	0	16
Insecta	Coléoptères	Elmidae	Stenelmis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Coléoptères	Girinidae	Orectochilus_villosus	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20	20	4	
Insecta	Coléoptères	Haliplidae	Brychius_elevatus	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Coléoptères	Haliplidae	Peltodytes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
Insecta	Coléoptères	Hydraenidae	Hydraena	23	157	23	40	0	0	3	3	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	8
Insecta	Coléoptères	Hydrophilidae	Hydrobius	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1
Insecta	Coléoptères	Scirtidae	Hydrocyphon	0	0	0	0	17	0	60	0	7	7	0	0	23	0	3	3	0	0	7
Insecta	Odonates	Aeshnidae	Aeshnidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Odonates	Aeshnidae	Boyeria Irene	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	3	17	10	3	0	3	0	0	7
Insecta	Odonates	Calopterygidae	Calopteryx	0	0	0	17	0	0	0	0	0	13	0	10	7	33	0	27	0	0	6
Insecta	Odonates	Cordulegasteridae	Cordulegaster_boltoni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Odonates	Gomphidae	Gomphidae	0	0	0	0	0	0	3	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Insecta	Odonates	Gomphidae	Onychogomphus	0	0	0	0	3	17	17	7	50	20	0	7	53	27	7	13	27	3	13
Insecta	Odonates	Lestidae	Lestidae	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Odonates	Platycnemididae	Platycnemis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1
Insecta	Diptères	Anthomyidae	Anthomyiidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1
Insecta	Diptères	Athericidae	Athericidae	7	17	0	3	10	10	3	0	17	7	0	27	10	7	0	7	0	0	12
Insecta	Diptères	Ceratopogonidae	Ceratopogonidae	3	0	3	0	10	0	23	7	20	23	33	3	7	0	17	0	10	3	13
Insecta	Diptères	Chironomidae	Chironomidae	123	0	40	0	133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Insecta	Diptères	Chironomidae	Chironomini	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	2
Insecta	Diptères	Chironomidae	Diamesina_Prodiamesinae	40	0	63	0	37	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Insecta	Diptères	Chironomidae	Orthocladiinae	300	1540	747	643	833	117	410	20	263	460	383	17	37	0	7	17	7	43	17
Insecta	Diptères	Chironomidae	Tanypodinae	83	80	120	83	0	50	17	3	50	27	50	0	90	20	7	13	17	40	16
Insecta	Diptères	Chironomidae	Tanytarsini	127	33	310	63	717	40	307	23	57	50	127	23	47	57	20	107	47	177	18
Insecta	Diptères	Dixidae	Dixidae	0	0	3	0	0	0	0	3	0	7	0	0	0	0	7	0	0	0	5
Insecta	Diptères	Empididae	Empididae	3	3	3	0	23	0	17	3	13	7	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Insecta	Diptères	Limoniidae	Limoniidae	27	3	7	3	3	3	0	10	3	3	0	0	0	0	3	0	0	0	10
Insecta	Diptères	Psychodidae	Psychodidae	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	4
Insecta	Diptères	Simuliidae	Simuliini	60	10	1357	30	6943	117	1393	7	3	0	530	433	27	23	20	13	210	203	17
Insecta	Diptères	Stratiomyidae	Stratiomyidae	0	0	7	0	0	0	0	0	3	20	0	0	7	3	0	0	3	0	6
Insecta	Diptères	Tabanidae	Tabanidae	0	3	0	3	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Insecta	Diptères	Tipulidae	Tipulidae	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	3	4
Insecta	Hétéroptères	Corixidae	Micronecta	0	0	290	30	0	13	0	3	13	170	0	0	0	0	7	0	0	0	8
Insecta	Mégaloptères	Sialidae	Sialis	7	3	0	3</td															

#### **Annexe 4 : Liste faunistique en présence / absence des prélèvements qualitatifs sur l'ensemble des stations d'étude.**





## **Annexe 5 : Projection des taxons dans la NMDS basée sur les distances de Jaccard des prélevements qualitatifs**



## NMDS – projection des taxons

