

5^{ème} année

Rapport de stage individuel

Evolution temporelle et spatiale des
communautés de macrophytes en lien avec les
paramètres environnementaux

EDF Lab Chatou

Île des Impressionnistes - 6 quai Watier 78401



Tuteur entreprise :

Geraldine Nogaro

Tuteur académique :

Michel Bacchi

Jeanne Morvan

IMA

2024-2025

Table des matières

Tables des illustrations.....	0
<i>Table des figures</i>	<i>0</i>
<i>Table des annexes</i>	<i>0</i>
1. Introduction	1
1.1. Contexte de l'étude	1
1.2. Présentations des missions et livrables.....	2
1.3. La présentation de la structure d'accueil	2
1.4. L'objet de l'étude : Macrophyte.....	3
2. Matériel et méthodes.....	6
2.1. Lieu études : Saint-Alban (Rhône)	6
2.1. Données disponibles et protocole d'échantillonnage.....	7
2.2. Collecte des données	8
2.3. Analyse des données.....	8
2.3.1. Pourcentages de recouvrement des macrophytes.....	8
2.4. Analyse statistique.....	8
2.4.1. Indice de diversité de Shannon.....	8
2.4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables physico-chimiques	9
2.4.3. Analyse multidimensionnelle des taux de recouvrement (NMDS)	9
2.4.4. Identification des groupes d'années similaires à l'aide du NMDS.....	10
2.4.5. Analyse des données environnementales	10
2.4.5.1. Calcul des métriques de la température de l'eau	10
2.4.5.2. Calculs des métriques de débit	11
2.4.5.3. Chroniques de physico-chimie à Saint Alban.....	11
2.4.6. Corrélation entre données environnementales et recouvrement	11
3. Résultat	11
3.1.1. Chronique des débits (1985-2024).....	11
3.1.2. Chronique des températures (1985-2024).....	12
3.1.3. Chronique de mesures physico-chimiques (1985-2024).....	12
3.2. Evolution du recouvrement et de la composition du peuplement de macrophytes à St-Alban14	
3.3. Espèces exotiques envahissantes à Saint Alban.....	16
3.4. Corrélations entre le recouvrement d' <i>Elodea Nuttalli</i> et les variables environnementales	17
3.5. NMDS de Saint-Alban	18
3.6. Corrélations entre NMDS et variables environnementales.....	20
3.6.1. Corrélation avec les variables de températures.....	20
3.6.2. Corrélation avec les métriques de débits.....	21
3.6.3. Corrélations avec les métriques physico-chimiques	21
3.7. Corrélation entre REC et variables environnementales	22
4. Discussion	23

4.1.	<i>Espèces exotiques envahissantes</i>	23
4.2.	<i>Corrélations : influence des conditions environnementales sur la dynamique des macrophytes</i> 24	
4.2.1.	Impact de la température de l'eau.....	24
4.2.2.	Impact des débits.....	25
4.2.3.	Impact de la physico-chimique	25
4.2.4.	Enjeux environnementaux futurs.....	25
4.3.	<i>Prédiction de recouvrement 2025</i>	27
5.	Conclusion	30
6.	Retour sur expérience	31
7.	Annexe	32
8.	Bibliographie	38

Tables des illustrations

Table des figures

Figure 1 : Positionnement du stage dans les travaux de recherche d'EDF	1
Figure 2 : Exemples de macrophytes :	3
Figure 3 : Schéma des relations entre les macrophytes et leur environnement	5
Figure 4: Secteur d'étude de Saint-Alban et localisation des stations étudiées dans ce rapport.....	6
Figure 5: Localisation de la station amont du CNPE de Saint-Alban.....	7
Figure 6 : Débit cumulé sur la période janvier à juin à Saint-Alban (1985–2024)	12
Figure 7 : Température moyenne annuelle de l'eau entre 1985 et 2024 au niveau du CNPE de St-Alban	12
Figure 8 : Evolution des descripteurs physico-chimiques de la station de St- Alban entre 1985 et 2024	13
Figure 9 : ACP des descripteurs physico-chimiques de la station de Saint Alban entre 1985 et 2024	14
Figure 10 : Pourcentage de recouvrement (% REC) des macrophytes de la station en amont rive gauche (RG) du CNPE de Saint Alban pour la période 1985-2024	15
Figure 11 : Indice de Shannon des stations de Saint-Alban Diversité de la station 1, amont RG.....	16
Figure 12 : Pourcentage de recouvrement (% REC) de l'élodée de Nuttall pour la station amont RG de Saint Alban	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : Analyse hiérarchique du suivi floristique la station de Saint-Alban pour la période 1985-2024	18
Figure 14 : Analyse NMDS du suivi floristique la station 1 amont RG de Saint-Alban pour la période 1985-2024 :	19
Figure 15 : Corrélations entre les métriques de température et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban :	20
Figure 16 : Corrélations entre les métriques de débits et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban :	21
Figure 17: Corrélations entre les métriques de physico-chimie et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban	21
Figure 18 : Corrélations entre les variables et REC de la station de Saint-Alban	22
Figure 19 : Débit au niveau de la station amont de Saint-Alban en 2025	27
Figure 20 : Température de l'eau au niveau de la station amont de Saint-Alban en 2025.....	28
Figure 21 : Modification de Analyse NMDS du suivi floristique la station 1 amont RG de Saint-Alban avec l'ajout de l'année 2025	29

Table des annexes

Annexe 1 : Liste des package	32
Annexe 2 : Résultat des corrélations entre coordonnées REC d' <i>Elodea nuttallii</i> et les variables environnementales.....	34
Annexe 3 : Résultat des corrélations entre coordonnées NMDS et variables de températures.....	34
Annexe 4 : Résultats des corrélations entre coordonnées NMDS et débits	35
Annexe 5 : Résultats des corrélations entre coordonnées NMDS et physico-chimie	35
Annexe 6 : Résultat des corrélations entre le recouvrement total de la station de Saint-Alban et tous les métriques calculées.....	37

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

En France, l'énergie nucléaire est la principale source d'électricité. En avril 2025, 57 réacteurs répartis sur 18 sites EDF assurent cette production, situés en bord de mer, en estuaire ou le long des grands fleuves (Hartmann, et al., 2014).

Un CNPE (centre nucléaire de production d'électricité) fonctionne grâce à trois circuits : le circuit primaire (chauffage de l'eau via le réacteur), le circuit secondaire (production d'électricité via la vapeur), et le circuit tertiaire (refroidissement via de l'eau prélevée dans le milieu naturel). Ce dernier peut fonctionner en circuit ouvert (eau rejetée directement après utilisation) ou fermé (refroidissement via un aéroréfrigérant, avec moins d'impact thermique sur le milieu). Le fonctionnement des CNPE dépend donc d'un apport constant en eau, mais peut être perturbé par des phénomènes de colmatage des prises d'eau, liés à l'accumulation de matière organique ou biologique.

En décembre 2009, un colmatage rapide des prises d'eau du CNPE de Cruas sur le Rhône par des plantes aquatiques en dérive a provoqué un incident d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale (incident de niveau 2 sur l'échelle INES) (Nogaro, 2015). L'espèce principalement mise en cause était une espèce exotique envahissante (EEE) : l'élodée de Nuttall (*Elodea nuttallii*).

Suite à cet incident, EDF a décidé de mettre en place une surveillance et une étude des colmatants biologiques, notamment des macrophytes, sous la forme d'un programme de recherche visant à comprendre les mécanismes de prolifération et de mise en dérive de ces plantes (Figure 1).

EDF a ainsi priorisé l'étude et la surveillance des macrophytes dans les cours d'eau afin d'évaluer leur développement et le risque de développement pouvant entraîner un colmatage des prises d'eau des CNPE.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet global de surveillance et de suivi des macrophytes et de compréhension de leur écologie. Il fait suite à des études réalisées en 2015 et 2016 sur l'influence des paramètres environnementaux sur les peuplements de macrophytes des grands cours d'eau français. L'objectif est de compléter ces études en intégrant les données de 2016 à 2024, afin d'analyser l'évolution des herbiers sur une période plus longue (Dagens, et al., 2015).

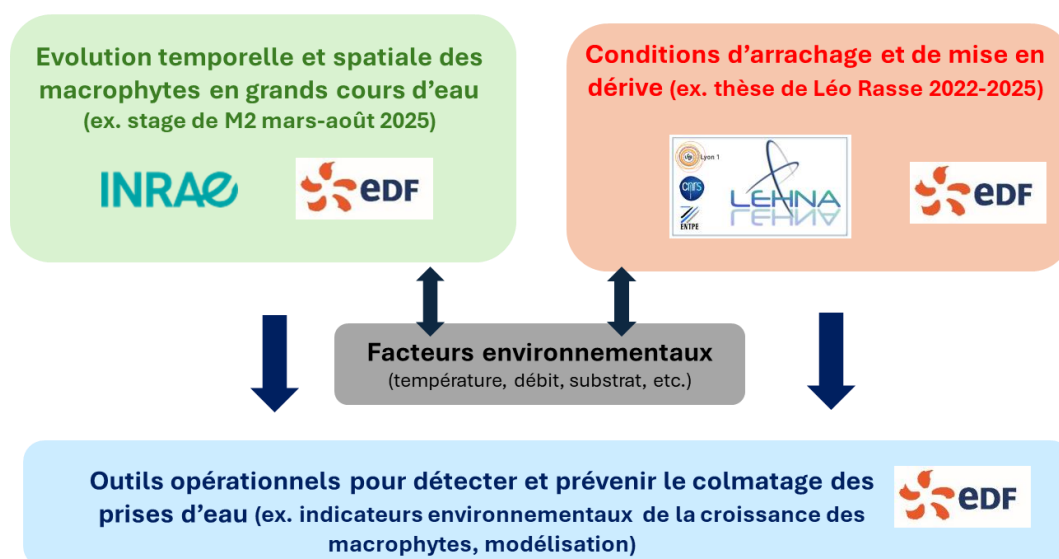


Figure 1 : Positionnement du stage dans les travaux de recherche d'EDF

1.2. Présentations des missions et livrables

Ce stage a pour objectif d'étudier le développement des communautés de macrophytes dans un grand cours d'eau, en lien avec différents paramètres environnementaux. L'enjeu est de comprendre comment ces plantes aquatiques réagissent aux conditions de leur milieu, en identifiant les principaux facteurs qui influencent leur présence, leur abondance et leur répartition.

Pour répondre à cet objectif, les travaux réalisés au cours de ce stage se sont appuyés sur des données collectées sur plusieurs stations situées à proximité de deux CNPE. Il s'agit de trois stations autour du CNPE de Saint-Alban (une en amont et deux en aval) et d'une station en amont du CNPE de Civaux. Toutefois, seules les analyses menées sur la station amont du CNPE de Saint-Alban seront présentées dans ce rapport.

L'objectif de ce stage est d'identifier les paramètres les plus représentatifs des herbiers de la station, afin de prédire les recouvrements et d'anticiper une éventuelle dérive pouvant entraîner un risque de colmatage. Pour ce faire, une phase de recherche documentaire a été nécessaire. Cette revue bibliographique a permis de dresser un état des lieux des connaissances scientifiques existantes sur les macrophytes et leurs interactions avec les différents facteurs environnementaux. Les macrophytes étant sensibles à de nombreux paramètres environnementaux, il a été important de cibler, à partir de la littérature, les variables les plus pertinentes. Les principaux résultats de cette recherche sont présentés dans la suite du rapport.

Dans cette étude, les paramètres environnementaux retenus sont ceux ayant le plus d'impact sur le développement des communautés macrophytiques : la température de l'eau, la vitesse d'écoulement et la physico-chimie. Les relations entre ces variables et le recouvrement des macrophytes ont été explorées à l'aide d'outils statistiques, détaillés dans la partie "Matériel et Méthodes".

Les livrables attendus par l'entreprise consistaient en un rapport interne (non fourni en annexe), ainsi que l'ensemble des scripts R et des jeux de données utilisés, afin qu'ils puissent être réutilisés ou servir de base pour de futurs travaux.

1.3. La présentation de la structure d'accueil

Mon stage s'est déroulé au sein de la R&D d'EDF, plus précisément dans le Laboratoire National Hydraulique et Environnement (LNHE) situé à EDF Lab Chatou, dans les Yvelines. Cette structure fait partie de l'un des trois laboratoires R&D d'EDF en France, et est spécialisée dans divers domaines tels que l'hydraulique, les énergies renouvelables, le nucléaire et l'environnement.

L'une des missions principales du LNHE est l'étude des impacts des ouvrages EDF sur l'environnement, mais également l'impact potentiel de l'environnement (crues, étiages, canicules, colmatant, etc.) sur les infrastructures. La gestion de la ressource en eau est également au cœur des missions R&D du département LNHE, cette ressource étant nécessaire à la production hydraulique et au refroidissement des centrales nucléaires, il est primordial de contribuer à l'optimisation des moyens de production et de préserver cette ressource.

Le LNHE a recours à trois approches complémentaires pour mener à bien ses travaux de recherche : des tests sur des modèles physiques ou en laboratoire ; des mesures *in situ* avec une équipe dédiée et des simulations numériques. Pour de nombreux travaux, le LNHE collabore avec d'autres

institutions, telles que l'INRAE pour la biodiversité, ENPC pour l'hydraulique, le CNRS pour la chimie en génie des procédés...

Le département regroupe environ 130 collaborateurs, dont 20 experts, et accueille également une quinzaine de doctorants. Il est structuré en cinq groupes et trois pôles expérimentaux, chacun spécialisé dans des domaines comme l'hydraulique fluviale et maritime, l'écologie aquatique et terrestre, la chimie environnementale, la microbiologie, et la gestion des risques sanitaires.

J'ai rejoint le groupe P76 : Gestion Hydro-Environnementale des Ouvrages. Le groupe travaille notamment sur l'impact des polluants sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, sur la gestion des données hydro-environnementales, et sur l'écologie des écosystèmes aquatiques et terrestres.

1.4. L'objet de l'étude : Macrophyte

Les macrophytes aquatiques sont des organismes photosynthétiques visibles à l'œil nu, dont le développement se réalise de manière permanente ou périodique dans l'eau, en étant immergés, flottants à la surface ou émergents à travers celle-ci (Figure 2) (Chambers, et al., 2008).

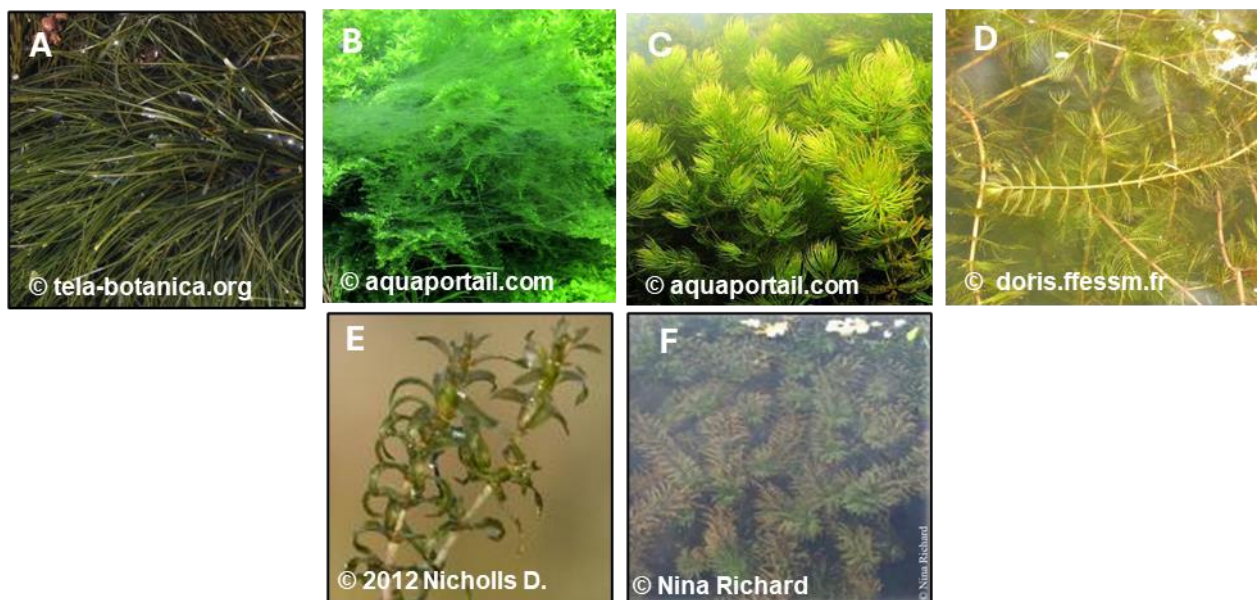


Figure 2 : Exemples de macrophytes :

(A) *Stuckenia pectinata*, (B) *Algues filamenteuses*, (C) *Ceratophyllum demersum*, (D) *Myriophyllum spicatum* (E) *Elodea nuttallii*, (F) *Egeria densa*

Selon la définition de Haury et al. (1996), le terme « macrophyte » inclut à la fois les spermatophytes, les bryophytes aquatiques, les algues (Characeae, *Cladophora*, etc.) ainsi que les colonies constituées de bactéries ou de champignons filamenteux aquatiques.

Le développement des herbiers de macrophytes est influencé par des facteurs environnementaux (température, débit, lumière, etc.) et anthropiques (activités industrielles, agricoles, ouvrages hydrauliques, changement climatique) (Tollie, 2021).

La Figure 3 présente de manière schématique les différents facteurs influençant les macrophytes et les effets qu'ils peuvent induire, tels qu'ils seront détaillés dans la suite de cette introduction.

Facteurs abiotiques

Lumière

- Nécessaire à la photosynthèse, limite leur croissance si insuffisante
- Délimitation zone viable : Profondeur 0-4 m [1]
- Communauté dense
→ Ombrage

Température de l'eau

- Influence leur période de croissance et la distribution des espèces [2]

Substrat

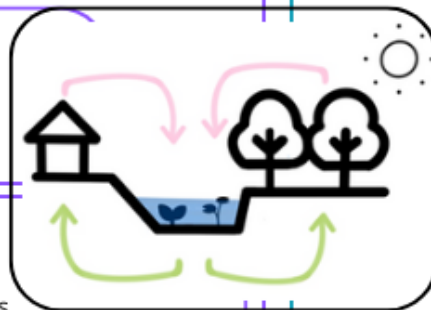
- Granulométrie - Composition [3]
→ Support ancrage + Source de nutriments
- Texture physique du substrat influence l'implantation, l'enracinement et la croissance des plantes aquatiques [1]
- Retiennent les sédiments et les nutriments
→ Filtration de l'eau
- Stabilisation des berges et des sédiments : Limite l'érosion

Courant

Facteur déterminant pour la répartition des macrophytes [4]

- Effet mécanique [5]
Arracher plantes, casser tige, colonisation végétative
- Effet physiologique [5]
Echange gaz ++, stress mécanique, turbidité
- Végétation dense → Ralentissement écoulement
- Habitat pour la faune aquatique [6]
→ Refuge et support pour invertébrés, poissons, insectes

- → Impact de l'environnement sur les macrophytes
- → Impact des macrophytes sur l'environnement



Qualité de l'eau

Echange gazeux

- Facteur limitant : CO_2 et O_2
- Production d'oxygène Par photosynthèse, améliore l'oxygénation de l'eau [7]
- Libération de matière organique (décomposition)
- Peut consommer de l' O_2 → anoxie si surabondance

Azote

- Nutriments clés pour les macrophytes
→ croissance, structure, métabolismes
- Quantité insuffisante → facteur limitant [8]
- Concentration excessive → Prolifération déséquilibrée [9]

Phosphore

- Élément essentiel de la chlorophylle [10]
- Excès d'azote → croissance du phytoplancton,
→ réduction transparence de l'eau [11]

Conductivité

- Corrélation positive entre la conductivité de l'eau et la richesse en macrophytes [12]

Facteurs anthropiques

Eutrophisation

- Apport polluants organiques et minéraux → Risque d'eutrophisation
- Macrophytes → Absorbent N et P + stabilisent les sédiments
→ Limitent l'eutrophisation [13]

Modifications hydromorphologiques

- Chenalisation, barrage, drainage [14]

Espèces exotiques envahissantes

- Compétition pour la lumière et les nutriments [15]
→ Disparition d'espèces

Figure 3 : Schéma des relations entre les macrophytes et leur environnement

- [1] (Bornette & Puijalon, 2011)
- [2] (Zhang, et al., 2019)
- [3] (Hrivnák, Oťaheľová, Kochjarová, & Paľove-Balang, 2013)
- [4] (Zelnik, Kuhar, Holcar, Germ, & Gaberščik, 2021)
- [5] (Madsen, Chambers, James, Koch, & Westlake, 2001)
- [6] (Thomaz & Ribeiro da Cunha, 2010)
- [7] (Lesiv, Polishchuk, & Antonyak, 2020)
- [8] (Lambers, 2022)
- [9] (Thiébaud, 2008)
- [10] (Navarro Law, Durance, Benstead, Fryer, & Brown, 2024)
- [11] (Jeppesen, Søndergaard, Søndergaard, & Christoffersen, 2000)
- [12] (Sun, et al., 2022)
- [13] (Chambers, Lacoul, Murphy, & Thomaz, 2008)
- [14] (Bernez, Hauray, & Ferreira, 2002) (Baláži & Hrivnák, 2016)
- [15] (Lolis, et al., 2020)

Parmi les facteurs majeurs, la lumière joue un rôle essentiel dans la photosynthèse. Comme les plantes terrestres, les macrophytes ont besoin de lumière pour se développer. Son accès peut cependant être limité par plusieurs éléments : la turbidité de l'eau, la couverture de surface, l'ombrage des berges, ou encore la compétition avec d'autres plantes (Bornette & Puijalon, 2011).

La température de l'eau est un paramètre clé pour le développement des macrophytes, influencée par l'éclairement et la température de l'air. Elle impacte fortement leur croissance dans les milieux humides. Une hausse de la température accélère l'activité métabolique des organismes (Zhang, et al., 2019), mais cette croissance a un seuil au-delà duquel elle devient nuisible. Les exigences en température varient selon les espèces.

Le substrat est un autre paramètre clé, notamment pour les espèces enracinées. Sa granulométrie et sa composition conditionnent à la fois l'ancrage des plantes et l'accès aux nutriments. Les sédiments fins, riches en azote (N) et en phosphore (P), favorisent le développement végétal par rapport aux substrats grossiers comme le sable ou le gravier (Barko & Smart, 1986).

Pour Dawson (1988), le débit est le facteur physique ayant le plus d'impact sur l'écosystème. La vitesse de l'eau influence fortement la structure et la distribution des herbiers. Des courants trop forts limitent la colonisation à certaines zones (berges, îlots), tandis que des faibles débits favorisent des espèces caractéristiques des eaux calmes.

La qualité de l'eau joue aussi un rôle essentiel. L'oxygène dissous est indispensable à la respiration des plantes, tandis que le dioxyde de carbone est utilisé pour la photosynthèse. Ces gaz sont échangés principalement par diffusion et leur renouvellement dépend du brassage de l'eau (Demars & Thiébaud, 2008). Les macrophytes peuvent assimiler les nutriments directement dans l'eau ou via les sédiments, selon qu'ils possèdent un système racinaire. Leur croissance dépend alors de la concentration en nutriments disponibles, et de leur capacité à les absorber.

Les cours d'eau sont régulièrement perturbés par des pressions anthropiques (eutrophisation, aménagements, régulation hydraulique, etc.), ce qui modifie leur morphologie, leur dynamique hydraulique, ou encore leur niveau trophique. Ces transformations impactent directement la composition des communautés macrophytiques. Par exemple, la mise en place de barrages modifie les débits, les températures, et interrompt la continuité écologique (Bernez, et al., 2002). De même, les réseaux de drainage peuvent déconnecter la rivière de ses berges, réduisant ainsi les habitats de bordure, essentiels pour de nombreuses espèces (Baláži & Hrivnák, 2016). Les apports en polluants (organiques ou minéraux) altèrent la chimie naturelle de l'eau, favorisant parfois un phénomène d'eutrophisation.

Par ailleurs, l'arrivée et la prolifération d'espèces exotiques envahissantes (EEE) constituent une menace pour les communautés natives. Ces espèces, souvent plus compétitives pour la lumière, l'espace ou les nutriments, peuvent supplanter les espèces locales et perturber l'équilibre du milieu (Verhoeven, et al., 2020).

En retour, les macrophytes influencent fortement leur environnement. Leur présence modifie la dynamique des sédiments (en limitant les particules en suspension, en stabilisant le fond), les flux hydrologiques et même la forme des berges (Madsen, et al., 2001). Écologiquement, ils jouent un rôle fondamental en fournissant un habitat pour de nombreuses espèces (invertébrés, poissons, autres plantes) (Thomaz & Da Cunha, 2010). Enfin, certaines espèces contribuent à l'amélioration de la qualité de l'eau, notamment en absorbant des nutriments tels que l'azote et le phosphore, ou en produisant de l'oxygène nécessaire à d'autres organismes aquatiques (Zhou et al., 2017 ; Xu et al., 2021).

2. Matériel et méthodes

2.1. Lieu études : Saint-Alban (Rhône)

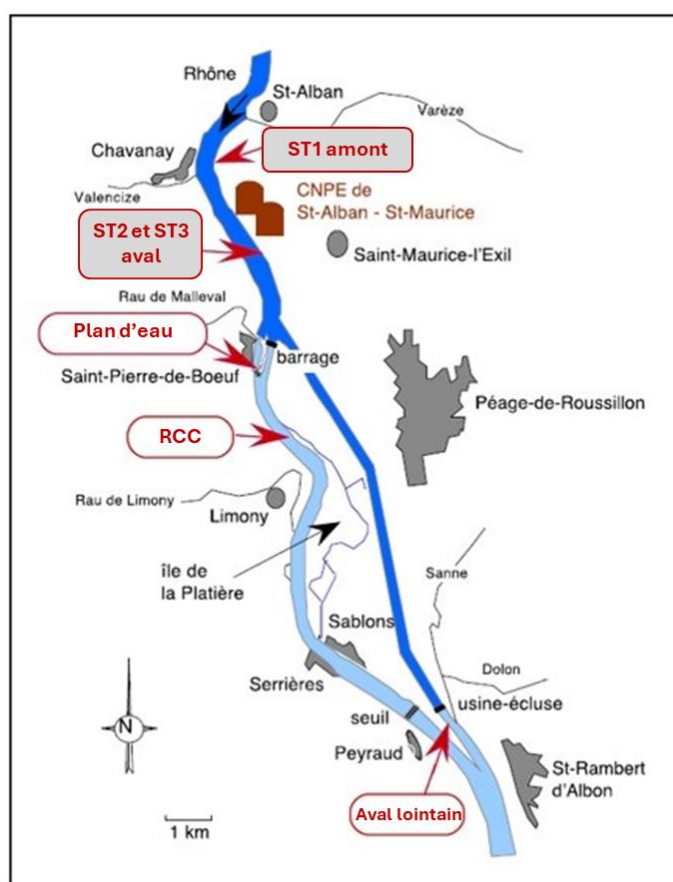
Le Rhône prend sa source dans le glacier du Rhône, en Suisse, et parcourt 812 kilomètres, dont 522 kilomètres en France. Il se jette dans la mer Méditerranée au niveau de la commune de Port-Saint-Louis-du-Rhône, dans le département des Bouches-du-Rhône.

Le CNPE de Saint-Alban est situé sur le Rhône, dans le département de l'Isère, à environ 50 km au sud de Lyon. Depuis 1985, les suivis floristiques sont réalisés par le bureau d'études ARALEP sur trois stations : une en amont et deux en aval (Figure 4).

Figure 4: Secteur d'étude de Saint-Alban et localisation des stations étudiées dans ce rapport (station 1 amont, stations 2 et 3 aval) ST = station. Source : modifié à partir de Chiumento, Brana, & Mallet, 2024

Le tronçon de cours d'eau concerné par l'étude s'étend sur environ 15 km, depuis l'amont de la centrale jusqu'à l'aval, vers Saint-Rambert-d'Albon (Chiumento et al., 2024) (Figure 4).

Bien que l'étude remonte à près de 40 ans, elle s'appuie sur un protocole constant, appliqué aux mêmes stations, ce qui garantit une cohérence des données et permet une analyse sur le long terme. Au fil des années, des évolutions ont été apportées : extension du nombre de stations (de 3 à 5) et ajout de nouvelles méthodes de suivi, telles que l'indice biologique macrophytes en rivière (IBMR).



2.1. Données disponibles et protocole d'échantillonnage

Les campagnes de suivis des macrophytes sur le site de Saint Alban sont réalisées depuis 1985 sur 3 stations : Amont immédiat rive gauche, Aval immédiat rive droite et rive gauche selon le même protocole d'échantillonnage. Entre 1985 et 2000, une campagne estivale était réalisée chaque année sur les 3 stations.

A partir de 2001, une deuxième campagne a été rajoutée à la campagne estivale avec environ un mois d'intervalle. Ces deux campagnes (début et fin d'été) permettent un suivi de la végétation au moment où la végétation aquatique est la plus florissante avant de se dégrader lors de la période plus froide.

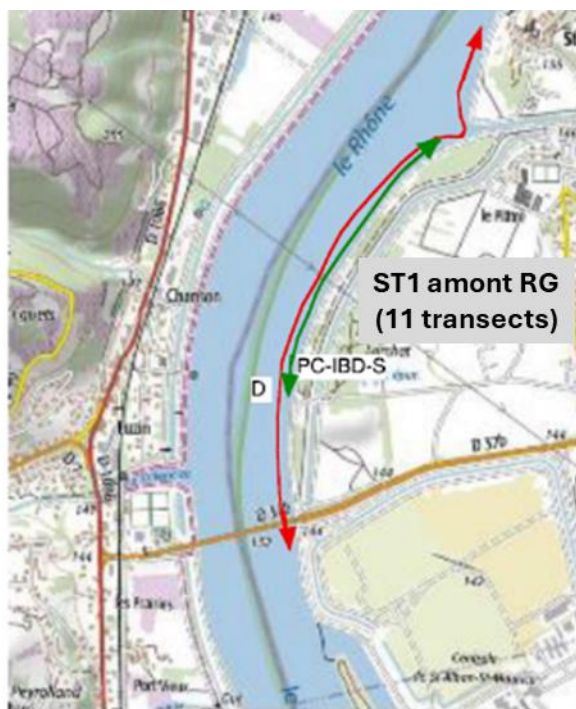


Figure 5: Localisation de la station amont du CNPE de Saint-Alban

Trait rouge = échantillonnage piscicole – Trait vert = relevé macrophytes. (Chiumento, Brana, & Mallet, 2024)

Ce rapport se concentre spécifiquement sur l'analyse des données collectées sur la station historique amont rive gauche (Figure 5) du site de Saint-Alban entre 1985 et 2024 réalisé à l'aide du même protocole de mesure. Le protocole utilisé pour le suivi historique à Saint Alban est la méthode des transects successifs et de points contacts (Balocco-Castella, 1988). Un transect est un linéaire perpendiculaire à la rive, sur lequel la végétation aquatique est prélevée par points contacts. Selon les stations, les transects sont répartis de manière homogène, espacés d'environ 50 mètres, leur nombre variant en fonction de l'étendue de l'herbier. Ainsi, sur la station en amont de St Alban, 11 transects ont été réalisés.

Les relevés sont effectués sur une largeur de 1 à 2 m et sur toute la longueur de l'herbier. Ce relevé ayant pour but de permettre un suivi des peuplements de végétations. Le nombre de relevés est identique chaque année. L'observation des espèces se fait à partir d'un bateau à l'aide d'un bathyscope et d'un râteau télescopique (Fruget, 2022). Chaque espèce rencontrée sur les points de relevés est estimée par un indice qui permet une évaluation semi-quantitative de la végétation :

- 1 : espèce isolée, quelques individus, recouvrement inférieur à 25 %,
- 2 : espèce faiblement abondante, recouvrement inférieur à 50 %,
- 3 : espèce abondante, recouvrement de 50 à 75 %,
- 4 : espèce très abondante (dominante), recouvrement supérieur à 75 %.

2.2. Collecte des données

La première étape de ce stage a consisté à rassembler l'ensemble des données sur les secteurs d'étude. Deux types de données ont été collectés : les relevés floristiques des macrophytes (indice de recouvrement et liste d'espèces) et les données environnementales associées.

Les données environnementales ont été collectées à partir de suivis réalisés par EDF sur les stations suivante :

- Température de l'eau mesurée à la station E5541 (Saint-Alban Amont),
- Débit mesuré à la station CNR de Ternay, située environ 30 km à l'amont du CNPE, au niveau du pont de Ternay
- Physico-chimie mesurée au niveau du CNPE.

2.3. Analyse des données

2.3.1. Pourcentages de recouvrement des macrophytes

Les coefficients d'abondance sont convertis en pourcentage de recouvrement (% de REC) par la pondération avec l'occupation de chaque espèce sur les points contacts.

Le protocole d'échantillonnage de Saint-Alban repose sur une classification en quatre classes. Pour les coefficients allant de 1 à 4, la valeur du pourcentage de recouvrement (REC) correspond au maximum de la classe : 25 %, 50 %, 75 % et 100 % respectivement.

Les % de REC sont ensuite utilisés pour calculer le recouvrement moyen d'une espèce sur la station selon la formule suivante :

$$\text{REC (\%)} = \frac{100(n_4 + 0,75 * n_3 + 0,5 * n_2 + 0,25 * n_1)}{\sum n_{\text{tot}}}$$

Avec,

- **REC (%)** le pourcentage de recouvrement du taxon T sur la station
- **n_1 à n_4** le nombre de transects présentant des indices d'abondance de 1 à 4 pour le taxon considéré
- **n_{tot}** le nombre total de transect réalisé sur chaque station

Après transformation des données, une matrice est obtenue pour chaque station, regroupant les taux de recouvrement des espèces par année.

2.4. Analyse statistique

L'ensemble des analyses statistiques effectuées sur les données a été réalisé avec le logiciel R (version 4.4.3, 2025-02-28) et RStudio. Tous les packages utilisés pour les analyses et les représentations graphiques sont indiqués en Annexe 1.

2.4.1. Indice de diversité de Shannon

Dans le cadre de l'analyse de la composition floristique, l'indice de Shannon a été utilisé pour décrire la diversité des espèces présentes sur la station.

L'indice de diversité de Shannon (ou indice H') permet d'évaluer la diversité spécifique d'un site en tenant compte à la fois du nombre d'espèces (richesse spécifique) et de la répartition des

recouvrements entre ces espèces. Plus l'indice est élevé, plus la diversité est importante. Il est particulièrement utile pour détecter des changements dans la structure des communautés végétales au fil du temps. (Grosjean, et al., 2021).

2.4.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables physico-chimiques

Les variables physico-chimiques mesurées sur les différentes années ont été analysées à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales (ACP).

Avant l'analyse, les données ont été centrées et réduites afin de mettre toutes les variables à la même échelle, indépendamment de leurs unités. L'ACP a été réalisée à partir de la matrice des variables physico-chimiques à l'aide de la fonction `prcomp()` dans R. Les graphiques ont été générés à l'aide du package `factoextra`, permettant de visualiser à la fois :

- La répartition des années en fonction de leur profil physico-chimique (plan des individus),
- La contribution des variables aux axes principaux (plan des variables),
- Et un biplot combiné, utile pour identifier les liens entre variables et observations.

L'ensemble de ces représentations permet d'identifier des tendances ou regroupements d'années en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, et de déterminer les variables les plus influentes sur cette répartition

2.4.3. Analyse multidimensionnelle des taux de recouvrement (NMDS)

Les pourcentages de recouvrement des macrophytes ont été analysés à l'aide d'un Positionnement Multidimensionnel Non-Métrique (Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS). Cette méthode d'analyse statistique multivariée permet de visualiser les similarités entre différentes observations dans un espace à dimensions réduites. Contrairement à d'autres méthodes comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP), le NMDS ne repose pas sur des hypothèses de linéarité et se concentre sur la préservation de l'ordre des distances (non-métriques), ce qui le rend particulièrement adapté aux données écologiques souvent complexes et asymétriques.

Le NMDS utilise une matrice de (dis)similarité ou de distance, calculée à partir des relations entre les objets étudiés (par exemple, les années ou les relevés floristiques). Dans le cas de données de composition floristique, une transformation de Hellinger est appliquée en amont (via le package `labdsv`), afin d'obtenir une matrice de distances plus adaptée à la nature des données (Rao, 1995).

Le résultat est une projection graphique où les points proches indiquent des observations similaires, tandis que les points éloignés indiquent des observations différentes. La qualité de cette projection est évaluée à l'aide d'un indice appelé stress, qui quantifie la fidélité de la représentation : plus la valeur de stress est faible, meilleure est la représentation des données. En général, un stress inférieur à 0,1 est considéré comme très bon, entre 0,1 et 0,2 comme acceptable, et au-delà de 0,2 la représentation devient peu fiable.

Dans cette étude, le NMDS a permis de visualiser l'évolution de la composition floristique dans le temps, et de regrouper certaines années ayant des compositions proches.

2.4.4. Identification des groupes d'années similaires à l'aide du NMDS

Les données analysées s'étendent sur 40 années (1985-2024). Certains relevés étaient très extrêmes en termes de recouvrement ou présentaient des compositions spécifiques, observables uniquement sur de courtes périodes. Pour faciliter la visualisation, certaines années ont été regroupées dans la projection NMDS afin de mieux comparer les périodes aux compositions floristiques similaires.

Le nombre de groupes a été déterminé grâce à un indice de corrélation de Pearson, qui mesure si les regroupements reflètent bien les différences réelles entre les années. Plusieurs regroupements ont été testés, et celui avec la meilleure corrélation a été retenu.

Une analyse des espèces indicatrices complémentaire a également été réalisée avec l'indice IndVal (Dufrene & Legendre, 1997), qui identifie les espèces les plus typiques de chaque groupe : celles qui sont à la fois fréquentes et spécifiques. Le regroupement final maximise donc la cohérence des données et la représentativité des espèces.

2.4.5. Analyse des données environnementales

Les données environnementales utilisées proviennent de mesures réalisées par EDF ou par des bureaux d'études. Les données analysées sont la température de l'eau, le débit et la physico-chimie de l'eau.

Les mesures pour certaines données comme le débit et la température de l'eau sont réalisées de manière continue au cours de l'année, il est donc important de calculer des métriques pour les comparer aux données floristiques qui sont réalisées une ou deux fois par an. Plusieurs métriques sont testées comme des variables susceptibles d'expliquer les variations du recouvrement des macrophytes sur la période végétative.

2.4.5.1. Calcul des métriques de la température de l'eau

Pour évaluer l'influence de la température de l'eau sur le développement des macrophytes, plusieurs métriques cumulatives ont été mises en place. Ces indicateurs permettent de synthétiser les variations thermiques au cours de la période de croissance des plantes aquatiques, et de faciliter leur croisement avec d'autres variables environnementales.

L'indicateur principal, Tacc_Tot, correspond à la somme des températures journalières enregistrées entre le 1er janvier et le 15 juillet, soit la période estimée comme la plus favorable à la croissance des macrophytes. Cette variable, exprimée en degré. jour (°C.Jour), permet d'estimer l'énergie thermique totale reçue par les végétaux pendant leur phase de développement (Dagens, et al., 2015).

D'autres indicateurs ont été ajoutés pour affiner cette analyse :

- Tacc-10, Tacc-12 et Tacc-15, qui ne prennent en compte que les températures dépassant respectivement 10°C, 12°C et 15°C. Ces seuils permettent d'identifier les périodes où les conditions thermiques sont réellement favorables à l'activité biologique.

Par ailleurs, des métriques mensuelles ont également été calculées afin de suivre l'évolution de la température accumulée tout au long de la période végétative :

- Tacc-Mars, Tacc-Avril, Tacc-Mai, Tacc-Juin, ... : représentent l'accumulation thermique pour chacun des mois de l'année.

L'ensemble de ces indicateurs constitue une base solide pour comprendre comment les variations de température peuvent influencer les dynamiques des communautés floristiques.

2.4.5.2. Calculs des métriques de débit

Afin de mieux comprendre l'impact des variations de débit sur la croissance des plantes aquatiques, plusieurs indicateurs ont été calculés pour représenter le proxy de la vitesse de l'eau. Pour calculer certaines de ces variables, le Q50 a été estimé pour chaque station. Il correspond ici à la médiane des débits journaliers, calculée sur des périodes choisies pour l'analyse : de 1985 à 2024 pour Saint Alban.

Voici les principaux indicateurs utilisés (Dagens et al., 2015) :

- ΔQ : mesure l'écart moyen entre le débit observé et la valeur médiane (Q50) pendant les périodes précédemment citées. Cela permet d'avoir une idée des variations globales de débit.
- ΔQ_{Mars} , ΔQ_{Avril} , ΔQ_{Mai} , ΔQ_{Juin} , $\Delta Q_{\text{Juillet}}$, qui permettent de repérer si un mois particulier a été anormalement sec ou humide.

2.4.5.3. Chroniques de physico-chimie à Saint Alban

La physico-chimie de l'eau est un facteur très important dans le développement des macrophytes. De nombreux paramètres ont été relevés sur la station, entre 3 et 5 fois par an, de 1985 à 2024. Pour permettre une caractérisation des peuplements à l'échelle annuelle, la médiane annuelle a été calculée pour chacun d'eux durant la période végétative.

2.4.6. Corrélation entre données environnementales et recouvrement

L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment les conditions environnementales influencent la dynamique des communautés végétales, que ce soit dans leur développement ou leurs limitations.

Pour explorer les liens entre variables environnementales et dynamique des macrophytes, des analyses statistiques ont été menées, notamment des corrélations linéaires entre la température, les axes NMDS ou le recouvrement total (REC). Un script R a permis d'automatiser ces analyses : pour chaque variable, une régression linéaire a été effectuée, fournissant la pente, l'ordonnée à l'origine, le R^2 , ainsi qu'un test de Pearson pour évaluer la significativité (*p-value*).

Les résultats sont présentés sous forme de tableau synthétique (voir Résultats), accompagné de graphiques réalisés avec ggplot2, incluant les points, la droite de régression et l'équation, afin de faciliter l'interprétation.

3. Résultat

3.1.1. Chronique des débits (1985-2024)

Le débit cumulé sur la période de janvier à juin entre 1985 et 2024 au niveau du CNPE de Saint-Alban présente une forte variabilité interannuelle, avec des valeurs comprises entre environ 4000 m³ et 11 000 m³ sur la période (Figure 6). Certaines années, comme 1994, 2000, 2012 et 2015 se démarquent par des débits particulièrement élevés, tandis que d'autres, comme 1992, 1995, 2010 et 2016, affichent des valeurs nettement plus faibles, proches des 4000 m³.

Aucune tendance nette à la hausse ou à la baisse ne se dégage sur l'ensemble de la période. En revanche, une variabilité plus marquée apparaît à partir des années 2010, avec une alternance plus prononcée entre années très humides et années très sèches. Cette augmentation de la fréquence des événements extrêmes pourrait être liée au changement climatique global.

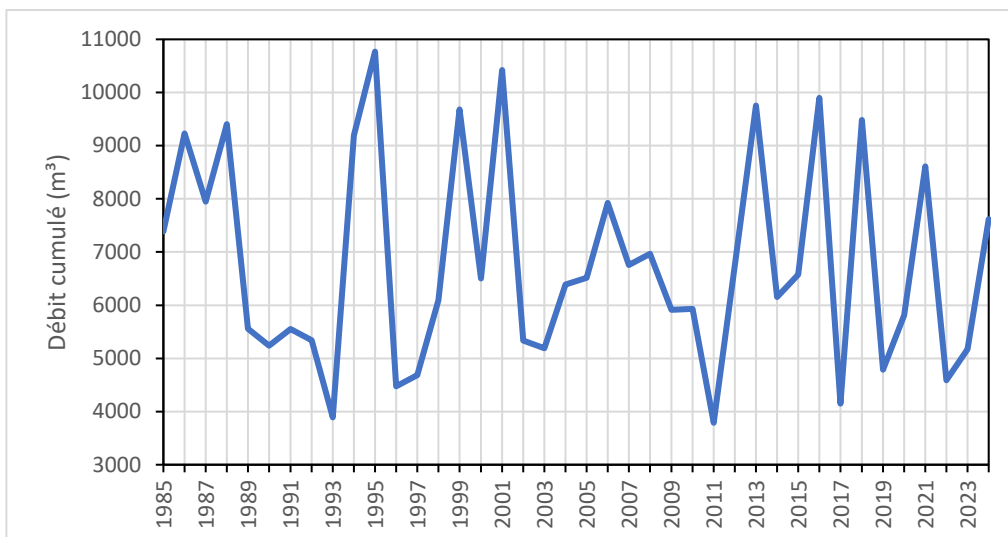


Figure 6 : Débit cumulé sur la période janvier à juin à Saint-Alban (1985–2024)

3.1.2. Chronique des températures (1985-2024)

L'analyse de l'évolution de la température moyenne annuelle entre 1985 et 2024 montre une tendance générale à la hausse (Figure 7). Les températures, qui oscillaient autour de 17 à 19 °C à la fin des années 1980, atteignent régulièrement 21 à 22 °C au cours des années récentes. Malgré quelques fluctuations interannuelles, comme en 2010 ou 2013 où des baisses sont visibles, la tendance globale reste clairement orientée vers un réchauffement.

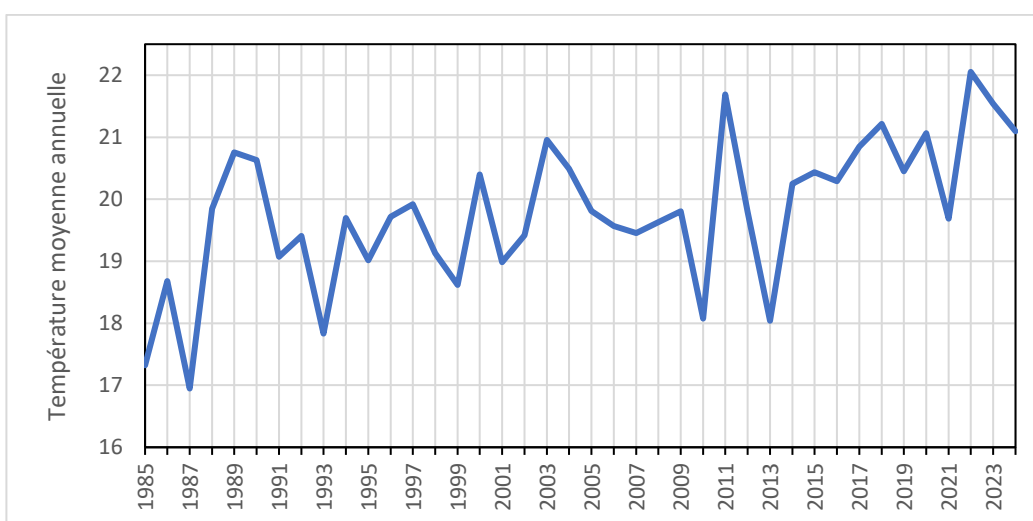


Figure 7 : Température moyenne annuelle de l'eau entre 1985 et 2024 au niveau du CNPE de St-Alban

3.1.3. Chronique de mesures physico-chimiques (1985-2024)

L'évolution des concentrations des paramètres physico-chimiques suivis sur la station de Saint Alban montre un changement important des caractéristiques du milieu à partir du début des années 1990 (Figure 8). Cette rupture est nettement visible par la dynamique des phosphates (PO_4), qui passent de valeurs comprises entre 1 et 3 mg/L avant 1992, à des teneurs désormais inférieures à 0,5 mg/L.

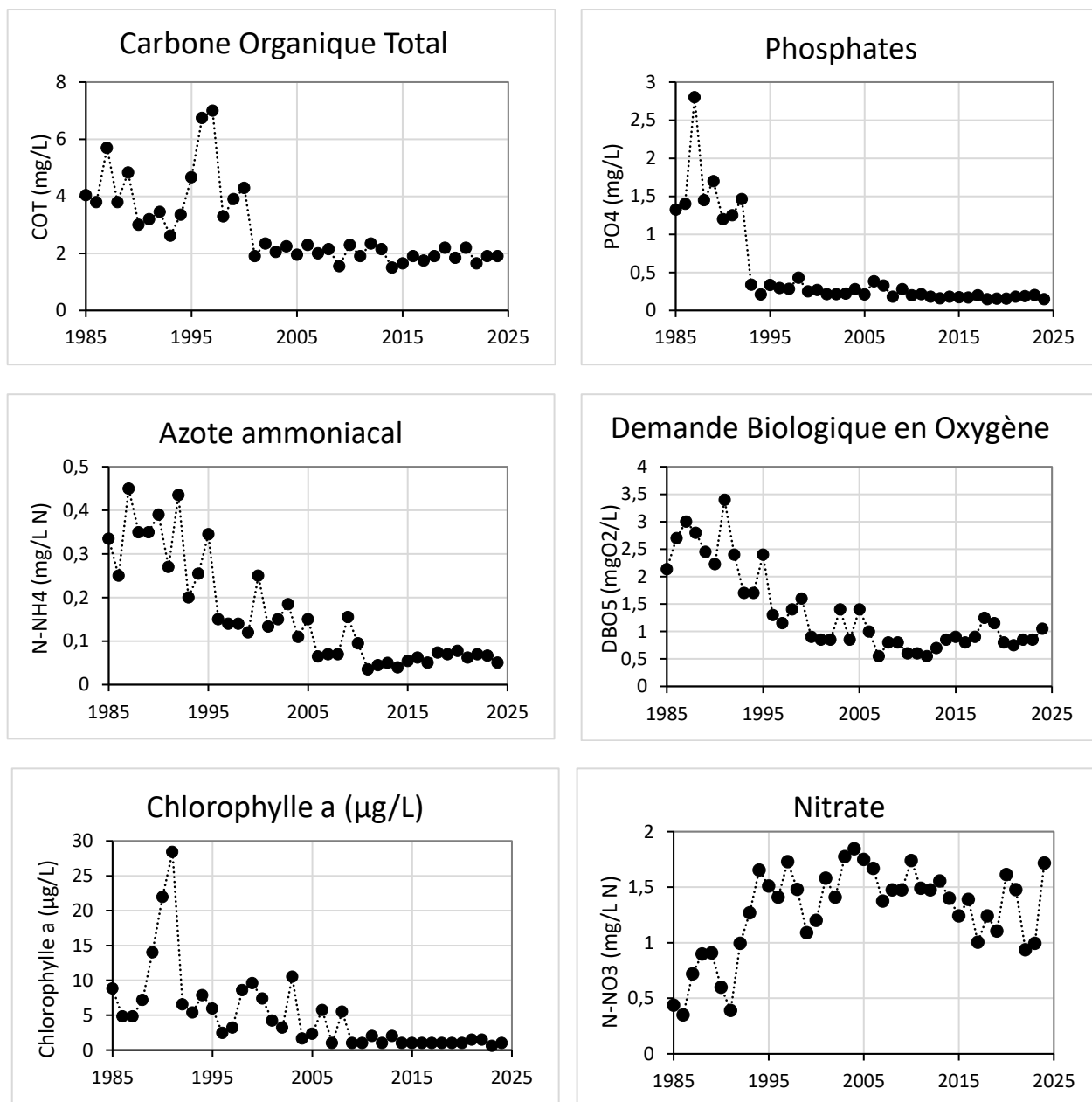


Figure 8 : Evolution des descripteurs physico-chimiques de la station de St-Alban entre 1985 et 2024

Les autres paramètres indicateurs d'une eutrophisation, tels que le Carbone Organique Total (COT), la Demande Biologique en Oxygène (DBO5) et l'azote ammoniacal (N-NH₄), suivent une dynamique similaire : une diminution progressive débutant autour de 1990, avec des valeurs divisées par deux voire par trois au cours de la décennie suivante.

L'évolution des nitrates (N-NO₃⁻) montre une augmentation progressive à partir de 1985, jusqu'à atteindre un plateau autour de 1,5 à 1,8 mg/L au début des années 2000. Entre 2015 et 2025, une légère baisse est observée, ou du moins une alternance entre des pics plus élevés (jusqu'à 1,6 mg/L) et des valeurs plus basses (autour de 1 mg/L).

Les concentrations en chlorophylle a, indicateur indirect de la productivité algale, montrent également une nette décroissance à partir du début des années 90, indiquant une réduction des phénomènes d'eutrophisation.

Dans la représentation ACP de la Figure 9, les années étudiées sont clairement séparées en deux groupes, la rupture est nette sur la première dimension. Sur la première dimension (qui explique 35,3 % de la variance), les années avant 2000 sont positionnées à gauche de l'axe, tandis que celles après 2000 sont à droite.

Cette représentation graphique permet de repérer facilement quels paramètres physico-chimiques sont les plus liés à chaque groupe d'années. Pour les années avant 2000, ce sont principalement les phosphates (PO_4^{3-}), la demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5), le nitrite (N-NO_2^-), l'ammonium (N-NH_4^+), la chlorophylle a, le carbone organique total (COT), l'oxygène dissous, le pH, la turbidité et les matières en suspension (MES) qui dominent.

Pour les années après 2000, ce sont plutôt la conductivité, le TAC (l'alcalinité), le dioxyde de silicium (SiO_2) et les nitrates (N-NO_3) qui sont les plus associés.

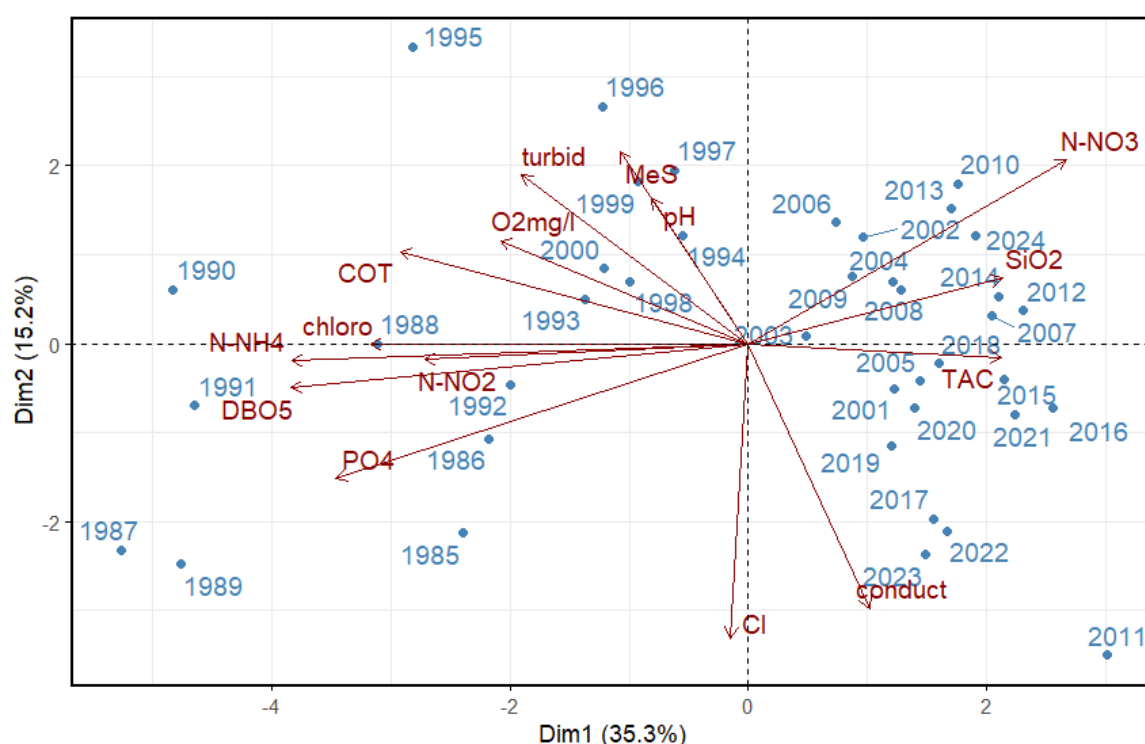


Figure 9 : ACP des descripteurs physico-chimiques de la station de Saint Alban entre 1985 et 2024

3.2. Evolution du recouvrement et de la composition du peuplement de macrophytes à St-Alban

Le pourcentage moyen de recouvrement de la station est de 218,9 %. Le recouvrement le plus faible a été observé en septembre 2003, avec 81,9 %, tandis que l'année présentant le recouvrement le plus élevé est 2017, avec 425 % (Figure 10).

Les relevés présentant des pourcentages de recouvrement inférieurs à 100 % témoignent de phases où la station était visiblement clairsemée. Les périodes de recouvrement élevé (> 250 %), et plus encore les années où les seuils de 300 % sont dépassés, traduisent un développement important des macrophytes.

St Alban Station 1 Amont RG (1985-2024)

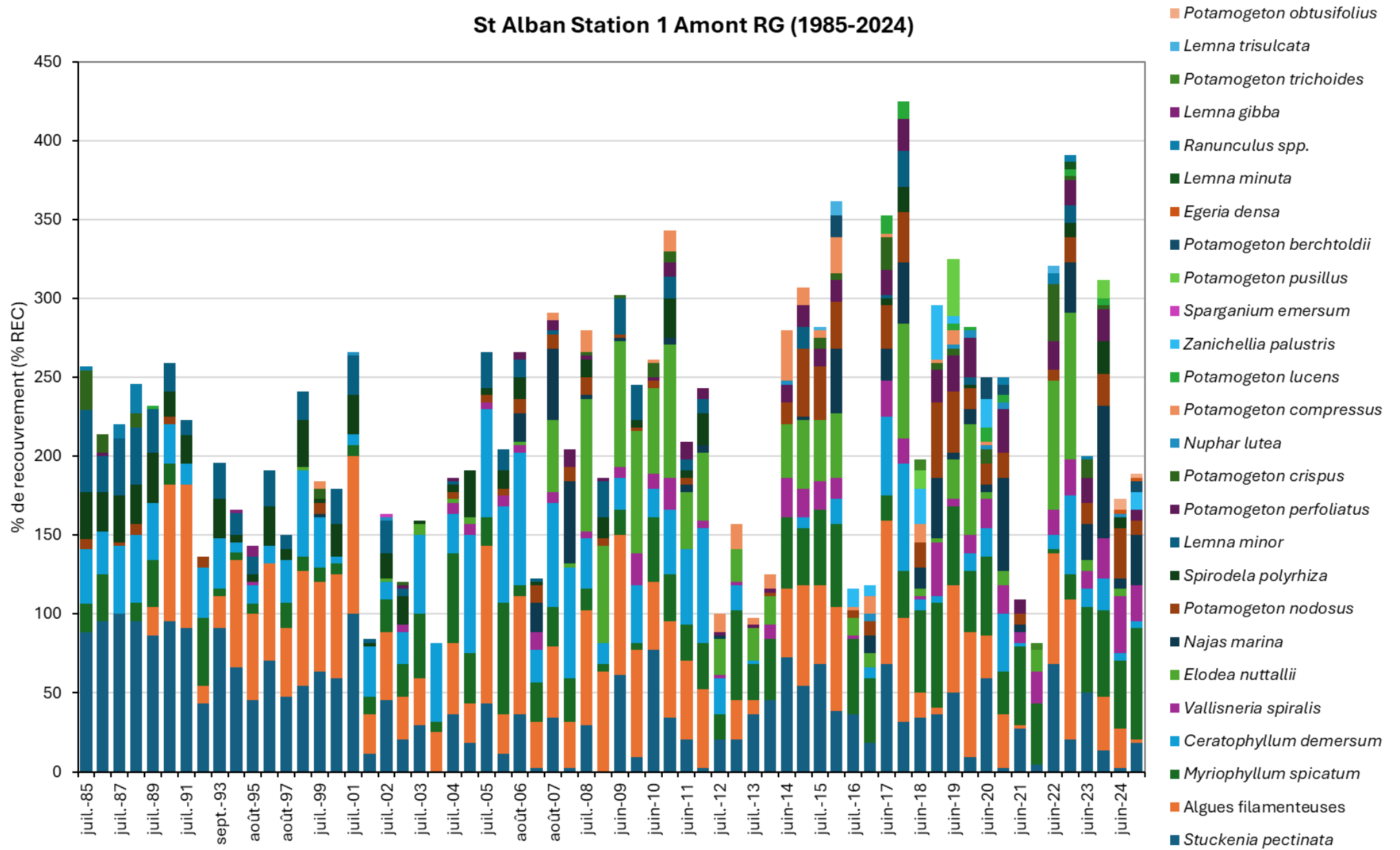


Figure 10 : Pourcentage de recouvrement (% REC) des macrophytes de la station en amont rive gauche (RG) du CNPE de Saint Alban pour la période 1985-2024

Pour la station étudiée, les pourcentages de recouvrement inférieurs à 100 % sont rares : ils ne sont observés que quatre fois sur l'ensemble de la chronique (2001, 2003, 2012 et 2013). À l'inverse, les épisodes de recouvrement supérieur à 300 % sont nombreux, succédant de 2009 à 2023, avec une concentration plus marquée entre 2014 et 2023. L'année 2017 constitue un pic, ses deux relevés estivaux dépassant les 300 %, dont un étant le maximum de la chronique. 2014 est une année avec un fort recouvrement, alors que les deux années précédentes, 2012 et 2013, présentent un recouvrement faible. Cela suggère une recolonisation rapide possible de la station.

Cette station montre ainsi une dynamique très marquée de densification depuis les années 2010, avec une succession de pics de recouvrement et peu d'années clairsemées.

Sur le plan spécifique, la dominance est nette de *Stuckenia pectinata*, *Myriophyllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum* et des algues filamenteuses, présents quasi systématiquement et en proportions importantes. A noter l'apparition massive d'*Elodea nuttallii* en 2007, qui malgré des années de faible présence reste une espèce dominante de 2007 à 2023.

L'indice de diversité de Shannon calculé pour la station présente une valeur moyenne de 1,78, ce qui traduit une diversité spécifique modérée. Les valeurs observées varient entre 0,87 (en 2003) et 2,35 (en 2015), indiquant une certaine variabilité temporelle (Figure 11).

À noter qu'à partir de 2015, une majorité des relevés montrent des indices supérieurs à 2, ce qui n'était pas observé auparavant. Ce changement suggère une augmentation de la diversité spécifique sur cette station au cours de la chronique, malgré deux points bas en 2016 ($H' = 1,47$) et 2021 ($H' = 1,32$).

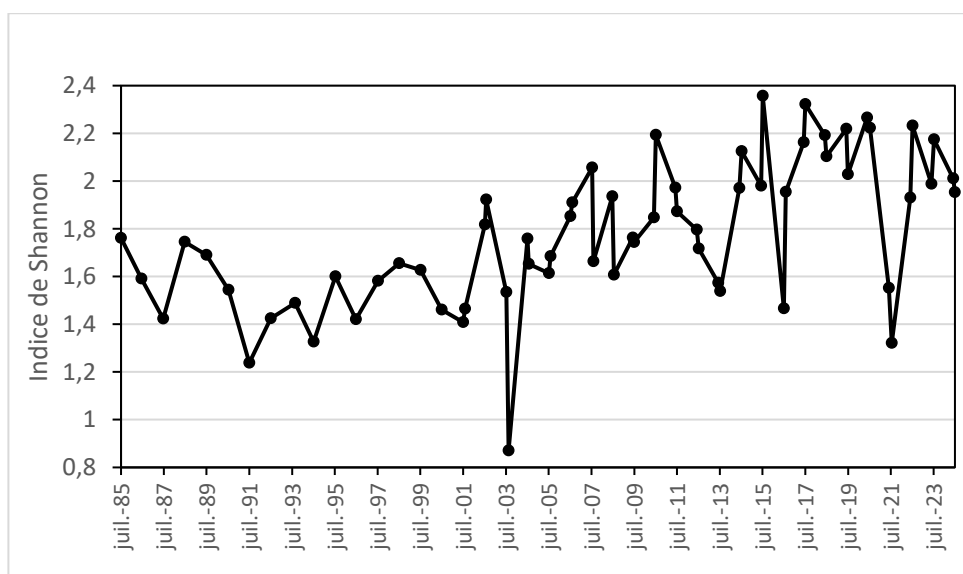


Figure 11 : Indice de Shannon des stations de Saint-Alban Diversité de la station 1, amont RG

3.3. Espèces exotiques envahissantes à Saint Alban

Dans le cadre de l'analyse floristique de la station de Saint-Alban, un focus a été fait sur la présence d'espèces exotiques envahissantes (EEE). Trois espèces ont été identifiées comme telles : *Egeria densa*, *Elodea nuttallii* et *Lemna minuta*. Ces espèces figurent dans la liste de référence des plantes exotiques envahissantes de la région Occitanie (Cottaz, et al., 2021).

Egeria densa et *Lemna minuta* sont présentes sur la station, mais à des recouvrements faibles, sur l'ensemble de la chronique leur recouvrement cumulé représente moins de 5%.

Elodea nuttallii quant à elle, est une des espèces majoritaires qui compose la station, son abondance cumulative sur la période 1985–2024 atteint un total de 1240 % de recouvrement (Figure 12)

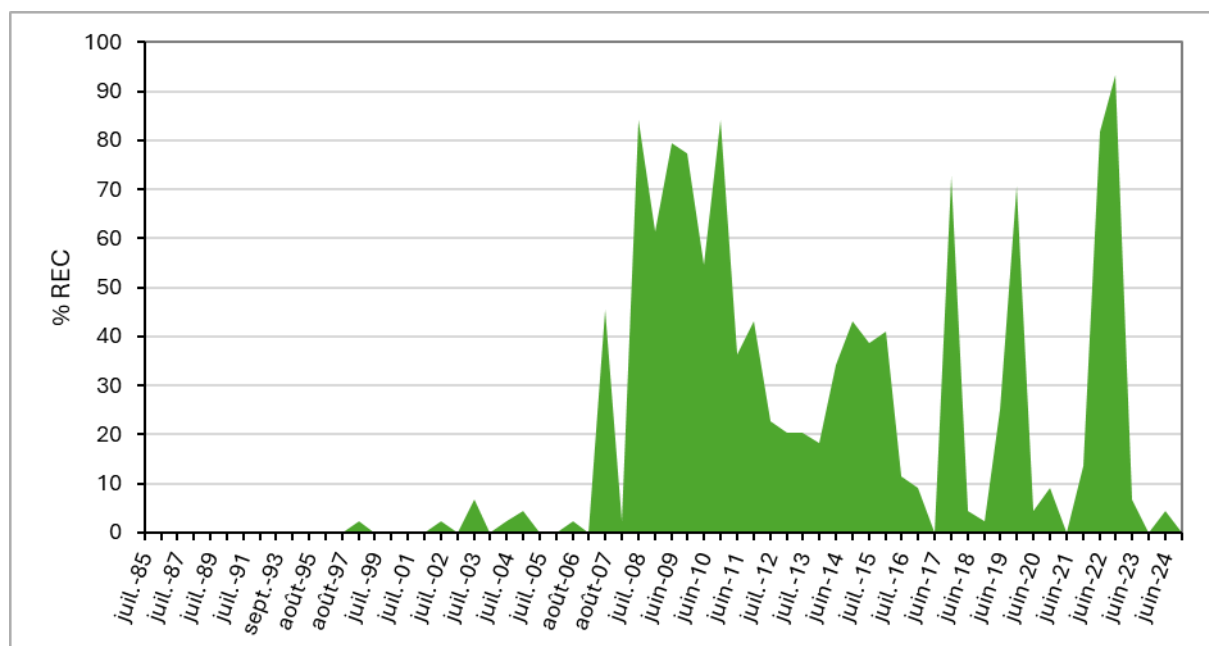


Figure 12 : Pourcentage de recouvrement (% REC) de l'élodée de Nuttall pour la station amont RG de Saint Alban

Elodea nuttallii a été observée pour la première fois en juillet 1998, puis disparaît des relevés jusqu'en 2002. À partir de cette date, elle est régulièrement présente sur la station 1, où elle semble s'être particulièrement bien implantée. Depuis 2002, elle y est observée presque à chaque campagne, avec des taux de recouvrement souvent important (> 40%).

3.4. Corrélations entre le recouvrement d'*Elodea Nuttalli* et les variables environnementales

Toutes les variables environnementales ont été soumises aux tests de corrélations avec le recouvrement totale de l'élodée de Nuttall annuelle sur la station amont Rive gauche de Saint-Alban. Tous les résultats de ces analyses sont présentés dans l' Annexe 2.

Sur les relations analysées entre les métriques environnementales et le REC de l'élodée de Nuttall, 13 sont statistiquement significatifs ($p\text{-value} < 0,05$). Le développement de l'espèce y est notamment corrélé positivement à la température cumulée (au-dessus de 12 °C) entre janvier et juillet, ainsi qu'à la température du mois d'avril.

À l'inverse, plusieurs facteurs présentent une corrélation négative avec le recouvrement de l'élodée à cette station :

- la variation des débits entre janvier et mai, janvier et juin, et janvier et juillet,
- les débits des mois d'avril et de mai,
- la concentration en chlorophylle a,
- la DBO5 (demande biologique en oxygène sur 5 jours),
- le COT (carbone organique total),
- les concentrations en azote ammoniacal (N-NH₄), en nitrites (N-NO₂) et en orthophosphates (PO₄).

3.5. NMDS de Saint-Alban

L'analyse NMDS, combinée à une classification en groupes d'années et à une analyse IndVal, a permis de regrouper les années de la station 1 en cinq groupes distincts (Figure 13). Chaque groupe correspond à une période présentant des communautés de macrophytes similaires, et certaines espèces ont été identifiées comme indicateurs caractéristiques de ces groupes.

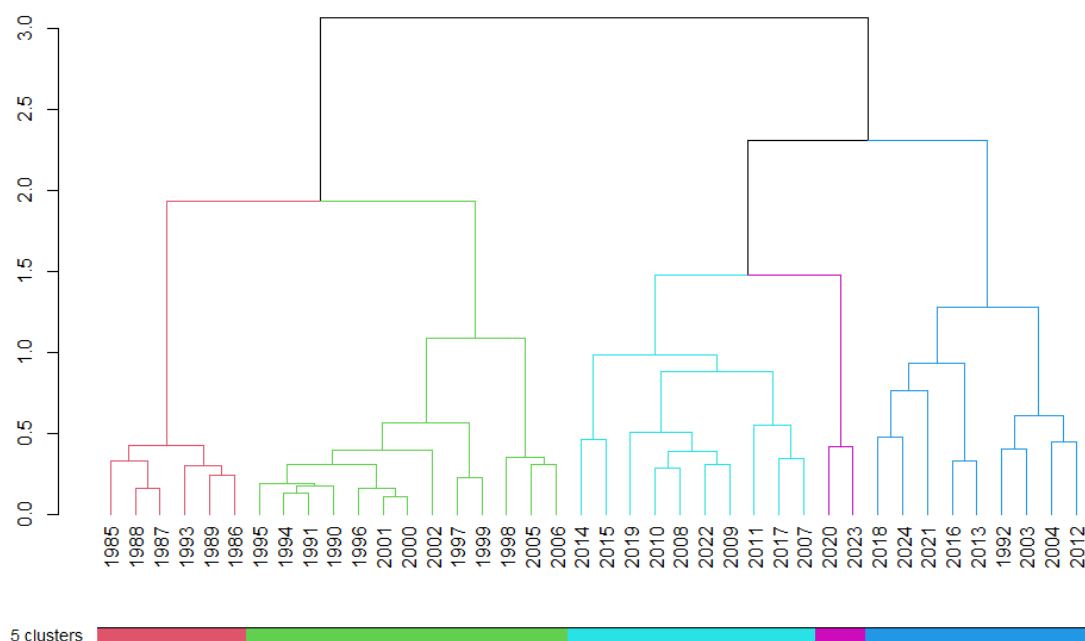


Figure 13 : Analyse hiérarchique du suivi floristique la station de Saint-Alban pour la période 1985-2024

- Groupe 1 (1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1993) : caractérisé par les espèces indicatrices : *Spirodela polyrhiza*, *Ranunculus fluitans* et *Lemna minor*.
- Groupe 2 (1990 à 2002, puis 2005 et 2006) : marqué par *Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor* et les algues filamenteuses comme espèces indicatrices.
- Groupe 3 (1992, 2003, 2004, 2012, 2013, 2016, 2018, 2021, 2024) : les espèces les plus représentatives sont *Potamogeton nodosus*, *Vallisneria spiralis* et *Elodea nuttallii*.
- Groupe 4 (2007 à 2011, puis 2014, 2015, 2017, 2019, 2022) : associé à une plus grande diversité d'espèces indicatrices, telles que *Vallisneria spiralis*, *Spirodela polyrhiza*, *Potamogeton perfoliatus*, *Najas marina*, *Lemna minor*, *Elodea nuttallii* et les algues filamenteuses.
- Groupe 5 (2020 et 2023) : se distingue par la co-occurrence de plusieurs espèces indicatrices, notamment *Vallisneria spiralis*, *Spirodela polyrhiza*, *Ranunculus fluitans*, *Potamogeton pusillus*, *P. perfoliatus*, *P. lucens*, *Nuphar lutea*, *Najas marina*, *Elodea nuttallii* et des algues filamenteuses.

NMDS - Analyse des communautés végétales

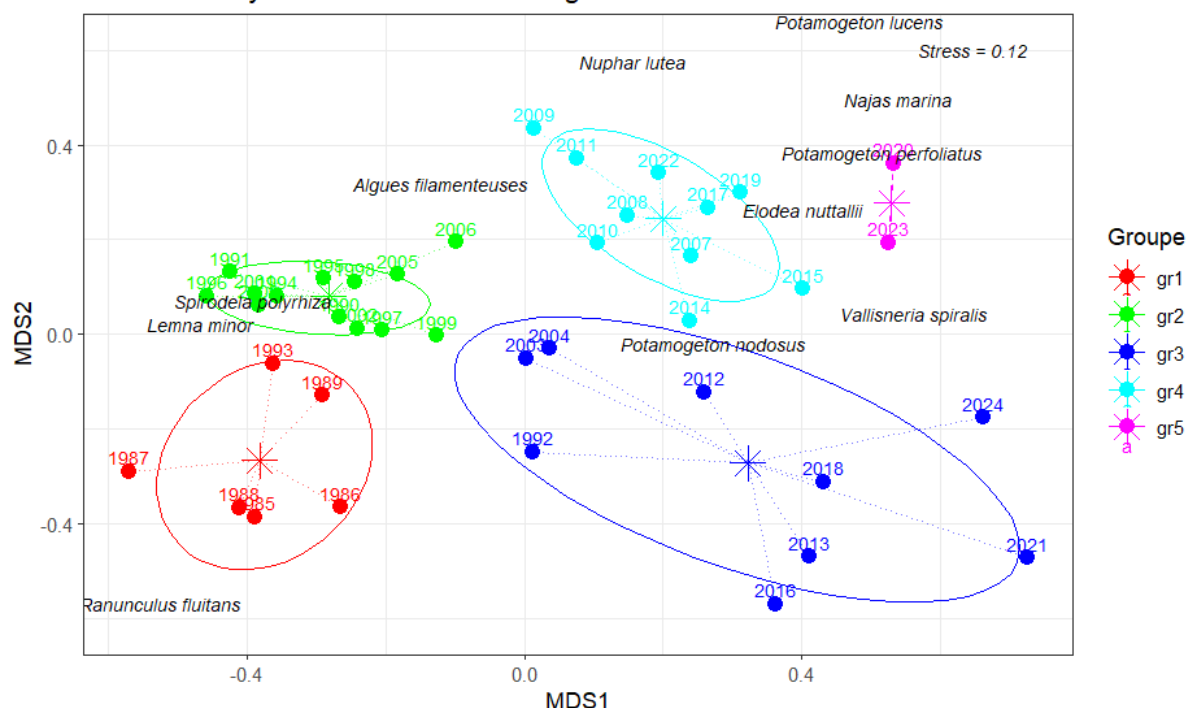


Figure 14 : Analyse NMDS du suivi floristique la station 1 amont RG de Saint-Alban pour la période 1985-2024 :

Groupe 1 (1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1993),

Groupe 2 (1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2005, 2006),

Groupe 3 (1992, 2003, 2004, 2012, 2013, 2016, 2018, 2021, 2024),

Groupe 4 (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2014, 2015, 2017, 2019, 2022),

Groupe 5 (2020, 2023)

Le groupe 1 (rouge), à gauche du graphique, correspond aux premières années de suivi (fin des années 80). Il est bien isolé, ce qui indique une communauté végétale assez distincte des années suivantes. Le groupe 2 (vert), situé juste au-dessus, montre une certaine continuité avec le groupe 1, mais avec des changements notables, notamment une présence accrue d'algues filamenteuses. C'est aussi le groupe le plus homogène, avec des années aux communautés très similaires, représenté par une ellipse très rapprochée.

Le groupe 3 (bleu foncé) est le plus étendu sur l'axe 1, traduisant une plus grande diversité floristique. Il chevauche les groupes 4 et 5 le long de cet axe, ce qui suggère des similarités, mais ces trois groupes sont bien séparés sur l'axe 2. Ensemble, ils couvrent les années 2000 à 2024.

Le groupe 4 (bleu clair) occupe la partie supérieure du graphique, proche du groupe 5 (rose), ce qui reflète une certaine continuité écologique. Le groupe 5, en marge, rassemble seulement 2020 et 2023, des années aux communautés végétales atypiques.

Enfin, la position des espèces sur le graphique montre leurs affinités temporelles : *Potamogeton perfoliatus* ou *Najas marina* sont associés aux groupes récents (4 et 5), tandis que *Ranunculus fluitans* reste lié au groupe 1.

3.6. Corrélations entre NMDS et variables environnementales

Les corrélations entre les métriques et les coordonnées NMDS ont été réalisées et analysées. La synthèse des résultats, incluant les p-values et les coefficients de détermination R^2 , est présentée dans l'Annexe 3 pour les variables liées à la température de l'eau, dans le Annexe 4 pour les métriques calculées à partir des débits et dans le Annexe 5 pour les métriques physico chimiques.

3.6.1. Corrélation avec les variables de températures

Sur la station de Saint-Alban, il est intéressant de noter que toutes les métriques de température sont significatives par rapport à l'axe 2 du NMDS (Annexe 3).

Les corrélations liées aux métriques calculées pour les températures supérieures à 12°C sont significatives pour les tests avec les coordonnées du NMDS1 et du NMDS2. Cependant, les valeurs de R^2 restent assez faibles (0,13 et 0,14 pour le NMDS1 ; entre 0,23 et 0,26 pour le NMDS2) (Figure 15). Des résultats similaires sont observés pour les métriques de températures cumulées sur les périodes étudiées, avec des valeurs de R^2 comprises entre 0,11 et 0,13 pour l'axe 1 du NMDS, et entre 0,08 et 0,26 pour l'axe 2.

Ces faibles valeurs de R^2 indiquent que les variables environnementales considérées n'expliquent qu'une petite partie de la variance dans les coordonnées NMDS. C'est sur les variables calculé sur le seuil des 15°C qui présentent les R^2 les plus important (plus de 0,30). C'est le cas des de la température accumulée sur la période janvier-juillet présentée dans la Figure 15.

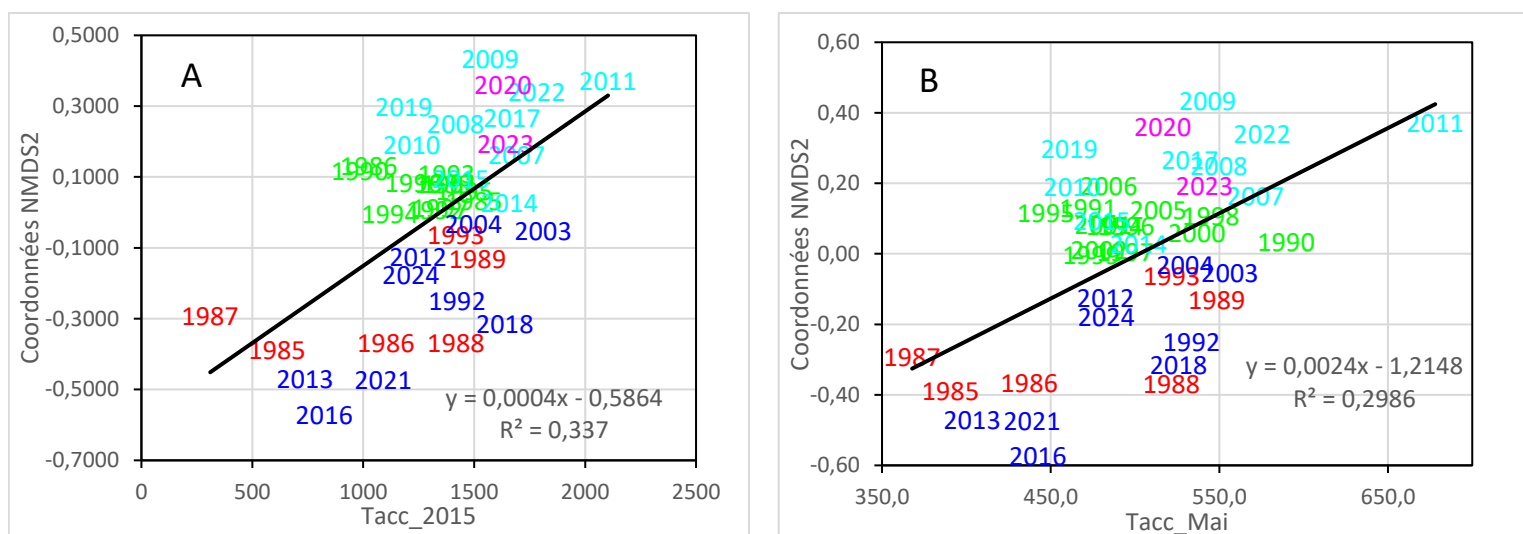


Figure 15 : Corrélations entre les métriques de température et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban :

(A) NMDS 2 en fonction de la température accumulée supérieure à 15°C entre le 1^{er} janvier et le 15 juillet,

(B) NMDS 2 en fonction de la température accumulée sur le mois de mai

Parmi les variables mensuelles, seul un mois présente des variations de température significatives sur les deux axes de l'analyse NMDS : le mois d'avril. D'autres mois sont aussi significatifs, mais uniquement par rapport à l'axe 2. C'est le mois de mai, sur l'axe 2 du NMDS, qui colle le mieux aux données, avec un R^2 de 0,30 (Figure 15).

3.6.2. Corrélation avec les métriques de débits

Les corrélations entre les métriques de débit et les coordonnées du NMDS sont moins nombreuses que celles observées avec les variables de température. Il est notable qu'aucune variable de débit n'est significativement corrélée à l'axe NMDS1.

En revanche, toutes les variables de l'Annexe 4 sont significativement corrélées à l'axe NMDS2 ($p < 0,05$). Les différences de débit sur la période janvier-juillet expliquent 31 % de la variation, ce qui constitue la meilleure représentation des données (Figure 16), même si les périodes janvier-mai (21 %) et janvier-juin (28 %) montrent des tendances similaires.

Les débits du mois de mai ressortent comme particulièrement pertinents, le modèle linéaire associé expliquant à lui seul 46 % de la variation observée (Figure 16).

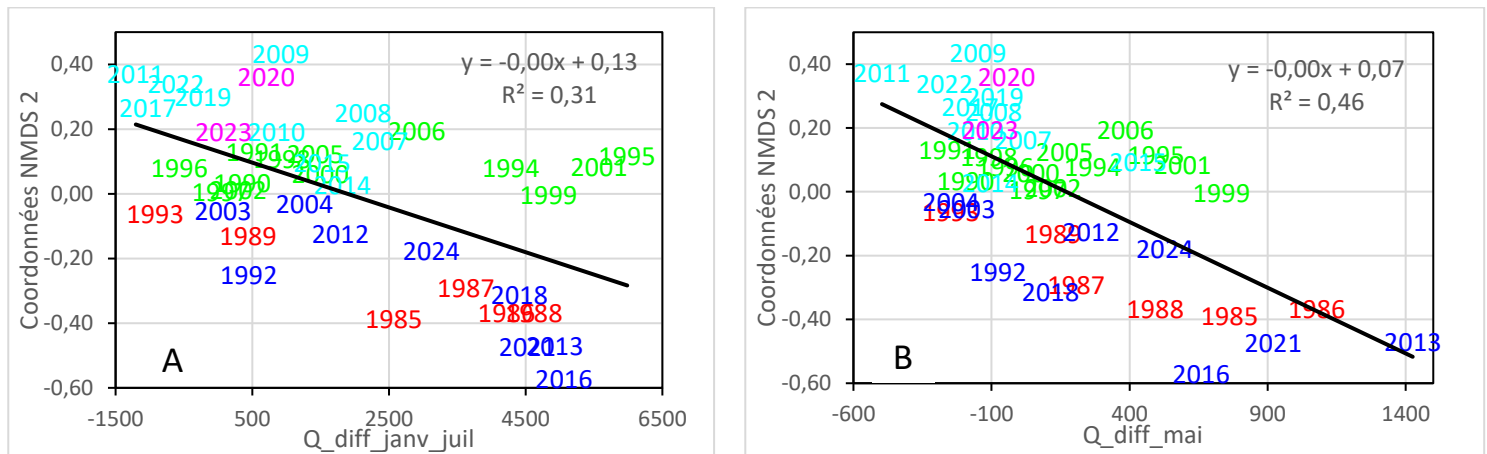


Figure 16 : Corrélations entre les métriques de débits et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban :
(A) NMDS 2 en fonction du cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1^{er} janvier et le 31 juillet
(B) NMDS 2 en fonction de la différence de débit du mois de mai

3.6.3. Corrélations avec les métriques physico-chimiques

Plusieurs paramètres physico-chimiques sont significativement corrélés aux axes du NMDS, en particulier à l'axe 1 (Annexe 5). Parmi les facteurs les plus influents dans la structuration des communautés figurent l'ammonium ($N-NH_4^+$) et les nitrites ($N-NO_2^-$), tous deux fortement corrélés à NMDS1 ($p < 0,001$), avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,51$) (Figure 17).

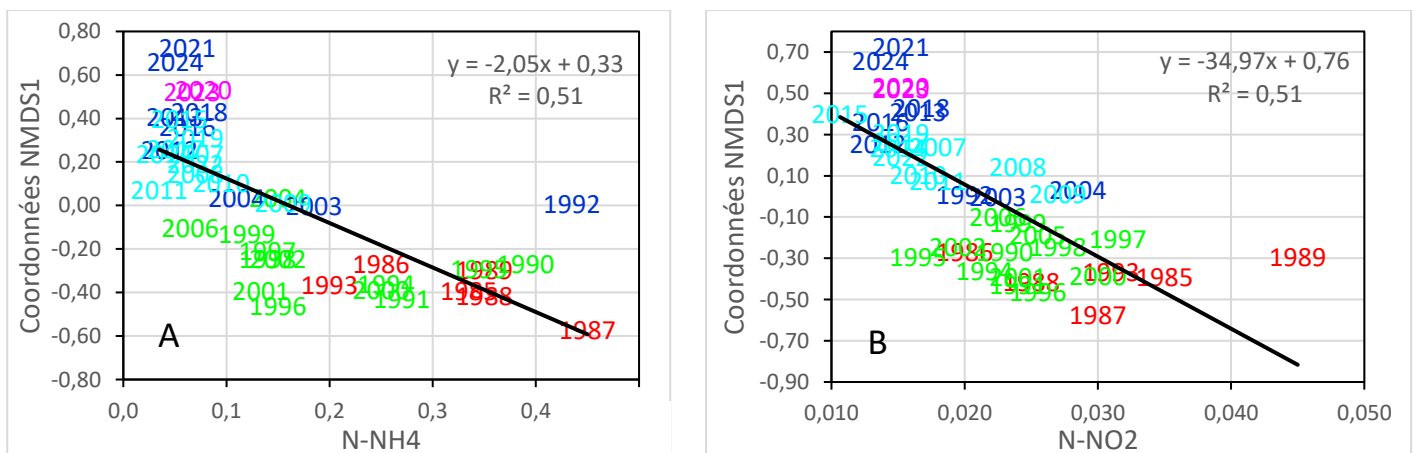


Figure 17 : Corrélations entre les métriques de physico-chimie et les coordonnées NMDS de la station de Saint-Alban
(A) NMDS 1 en fonction de la concentration d'ammonium ($N-NH_4$)
(B) NMDS 1 en fonction de la concentration de nitrites ($N-NO_2$)

L'oxygène dissous et la DBO5 montrent eux aussi une relation importante avec NMDS1 (R^2 de 0,31 et 0,40 respectivement ; $p < 0,001$), ce qui souligne l'effet des conditions d'oxygénation et de la charge organique sur les communautés biologiques.

La chlorophylle a et les phosphates (PO_4) sont également bien corrélés à NMDS1 (R^2 autour de 0,30 ; $p < 0,001$). À l'inverse, très peu de paramètres sont associés à NMDS2, et les R^2 restent faibles ($< 0,15$), ce qui montre que l'essentiel de la variabilité est capté sur le premier axe.

3.7. Corrélation entre REC et variables environnementales

Afin de mieux comprendre les recouvrements des stations de Saint-Alban, une analyse des corrélations entre les variables environnementales et le recouvrement total de chaque station a été réalisée. Les résultats sont présentés dans l'Annexe 6.

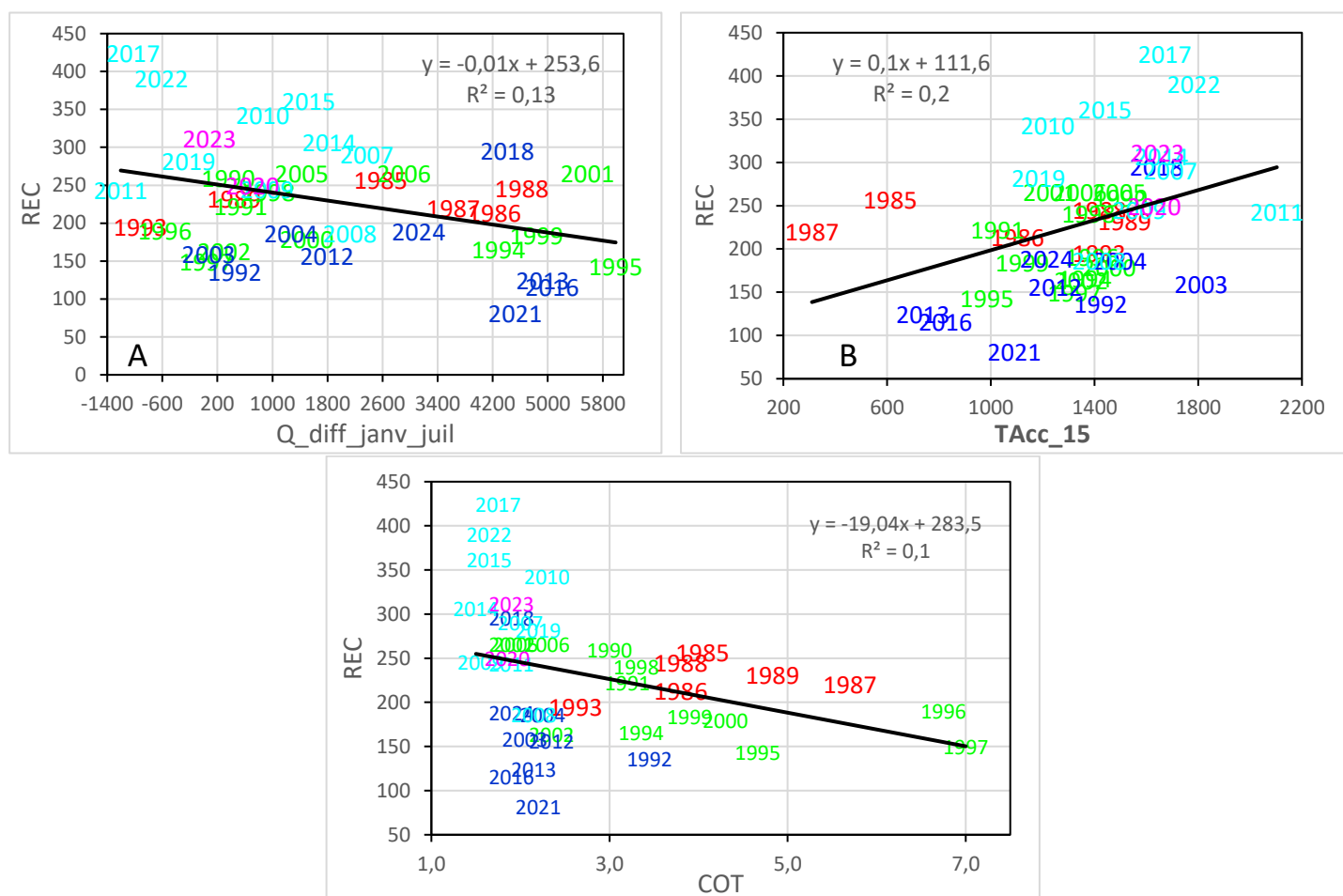


Figure 18 : Corrélations entre les variables et REC de la station de Saint-Alban

- (A) REC en fonction du cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1^{er} janvier et le 31 juillet,
- (B) REC en fonction de la température accumulée supérieure à 15°C entre le 1^{er} janvier et le 15 juillet,
- (C) REC en fonction du carbone organique total

Sur les métriques de températures, 6 corrélations sont significatives avec le REC. Les températures cumulées entre janvier et juillet, ainsi que celles dépassant un seuil de 15 °C, montrent des corrélations significatives. La période la plus représentative, bien que le coefficient de détermination (r^2) reste faible, est celle correspondant aux températures cumulées au-dessus de 15 °C entre le 1^{er} janvier et le 15 juillet. Les températures mensuelles de juin et juillet montrent également des liens intéressants avec le recouvrement total.

Concernant les débits, les différences calculées sur trois périodes (janvier-juillet, janvier-juin et janvier-mai) sont toutes significativement corrélées avec le recouvrement. La période janvier-juin semble être la plus représentative. Les différences de débit des mois de mai, juin et juillet montrent aussi des corrélations significatives.

Il est intéressant de noter que les mois de juin et juillet ressortent comme les plus importants dans les corrélations observées. Toutefois, les valeurs de r^2 restent faibles, ce qui signifie que les variables environnementales n'expliquent qu'une petite part de la variabilité du recouvrement total.

Concernant les variables calculées sur la physico-chimie de l'eau, le REC n'est corrélé qu'au carbone organique total (COT). Cette corrélation est négative : plus la concentration en COT est élevée, plus le recouvrement est faible sur la station.

4. Discussion

4.1. Espèces exotiques envahissantes

L'analyse de la présence des espèces exotiques envahissantes sur les stations de Saint-Alban met en évidence une forte présence d'*Elodea nuttallii*. Cette espèce, est identifiée sur la station pour la première fois en 1997, semble s'être installée durablement à partir de 2002, ce qui pourrait être lié à une modification des conditions environnementales. Les pics de recouvrement (en 2008, 2009, 2017, 2019 et 2022) suggèrent que certains facteurs climatiques ou hydrologiques impactent positivement la croissance de l'espèce.

D'après l'analyse des corrélations, son développement est positivement lié aux températures cumulées supérieur à 12°C de janvier à juillet, ce qui indique que la température tient un rôle déterminant pour le développement de cette espèce. L'élodée de Nuttall est connue pour sa croissance rapide et sa forte compétitivité, ce qui lui permet de dominer les milieux où elle cohabite avec d'autres espèces (Barrat-Segretain, 2005).

Inversement, les corrélations négatives observées avec des variables telles que la DBO5, le COT, les nutriments (N-NH4, NO2, PO4) et les variations de débit indiquent que l'élodée ne se développe pas correctement dans une mauvaise qualité de l'eau. Ces résultats semblent contradictoires avec d'autres études, telles que celle de Thiébaud & Muller (1999), qui suggèrent un bon développement d'*Elodea nuttallii* dans des eaux riches en nutriments.

En effet, cette espèce est bien adaptée à une absorption rapide des nutriments, ce qui lui donne un avantage dans les milieux eutrophes, voire en situation de surcharge en nutriments. Dans un contexte d'eutrophisation croissante des milieux aquatiques, *Elodea nuttallii* pourrait donc renforcer encore sa présence et sa dominance (Thiébaud, 2007).

Il est également possible que des interactions biotiques non mesurées (compétition, herbivorie, etc.) influencent la dynamique d'*Elodea nuttallii*, ce qui pourrait expliquer certaines variations inexpliquées par les variables environnementales étudiées. Cela suggère également que les perturbations anthropiques persistent et jouent un rôle important dans la dynamique de cette plante. Le Rhône étant un cours d'eau très anthropisé, le milieu reste fortement perturbé, même si la qualité de l'eau s'est améliorée au cours des 40 dernières années.

4.2. Corrélations : influence des conditions environnementales sur la dynamique des macrophytes

4.2.1. Impact de la température de l'eau

Les corrélations observées entre les métriques de température et le recouvrement des macrophytes sont globalement positives, indiquant une tendance au renforcement du développement végétal avec l'augmentation des températures. Cela est visible à la fois dans les graphiques présentés dans ce rapport, mais aussi dans ceux qui ne sont pas montrés ici.

Si les variables de température sont liées aux métriques de recouvrement, cela suggère que la température joue un rôle important dans la répartition des espèces sur un site donné. La composition spécifique des herbiers et leur recouvrement semblent dépendre des températures des mois précédant le relevé. Ce constat est en accord avec ce que l'on trouve dans la littérature.

En effet, de nombreuses études ont montré qu'une température plus élevée favorise le développement des macrophytes (Barko et al., 1982 ; Zhang, et al., 2019). Dans notre étude, plusieurs métriques se sont révélées intéressantes et significatives, notamment celles calculées sur la période végétative. Pour modéliser les dynamiques futures de population, ce sont principalement les métriques allant de janvier à juin qui semblent les plus utiles.

Dans les résultats présentés dans ce rapport, les corrélations moins nombreuses observées entre le REC totale de la station et les variables environnementales sont également de corrélations que l'on retrouve avec le NMDS. Pour synthétiser, il est donc intéressant de se pencher sur ces variables en particulier comme étant représentative des variations de la station aux conditions environnementales.

Les métriques calculées au-dessus de 12 °C sont corrélées aux coordonnées des deux axes NMDS, mais pas au REC. Alors que, celles calculées au-dessus de 15 °C présentent une corrélation avec l'ensemble des variables, y compris le REC. Ce seuil de 15 °C apparaît donc comme le plus pertinent à garder pour la suite des analyses.

La période présentant la plus forte représentativité des données (c'est-à-dire le R^2 le plus élevé) s'étend du 1er janvier au 15 juillet. La différence avec les autres périodes testées reste cependant très faible (par exemple, pour le REC : 0,13 contre 0,14 ; pour l'axe NMDS2 : 0,32 contre 0,34).

Ces variables permettent ainsi de décrire en partie (via les valeurs de R^2) la composition des herbiers en lien avec la température. À partir de ces données, il serait envisageable de prédire le recouvrement des macrophytes et de prévenir de l'arrivée massive des colmatants.

Pour une meilleure précision, il semble intéressant d'utiliser, pour chaque analyse, une variable différente de seuil et de période afin d'optimiser la pertinence des corrélations :

- Pour le REC : température ≥ 15 °C, période janvier–juillet
- Pour l'axe 1 du NMDS : température ≥ 12 °C, période janvier–juin
- Pour l'axe 2 du NMDS : température ≥ 15 °C, période janvier–juillet

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier l'influence de la température sur chaque espèce individuellement, car chacune possède sa propre plage de tolérance thermique. Pour mieux comprendre la réaction globale de l'herbier, il faudrait donc s'intéresser à chaque espèce, soit par des expérimentations, soit à travers une analyse bibliographique. Cela permettrait ensuite d'envisager des prédictions plus précises à l'aide de modèles prenant en compte les préférences thermiques des principales espèces présentes.

4.2.2. Impact des débits

Contrairement aux variables de température, les métriques de débit présentent globalement moins de corrélations significatives avec la composition des herbiers. Aucune variable de débit n'est corrélée à l'axe NMDS1, ce qui suggère que le débit ne structure pas les grandes tendances de variation floristique. Lorsqu'une corrélation significative est observée (notamment avec l'axe NMDS2), celle-ci est négative : une augmentation du débit est alors associée à des compositions d'herbiers différentes, souvent appauvries ou dominées par des espèces moins nombreuses mais plus résistantes.

La variable de débit expliquant le mieux les données, aussi bien vis-à-vis des axes NMDS ($R^2 = 0,31$) que du REC ($R^2 = 0,21$), est la différence de débit cumulée entre le 1er janvier et le 31 juillet.

La corrélation entre les communautés macrophytiques et les métriques de débit n'apparaît donc pas aussi marquée que celle observée avec les variables de température. Cela ne signifie pas pour autant que le débit n'est pas un facteur structurant important pour les herbiers, mais plutôt que cette métrique n'est peut-être pas la plus adaptée pour établir une corrélation avec la vitesse de l'eau, car elle pourrait être trop éloignée de la vitesse réelle subie par les herbiers.

Même si ses résultats ne sont pas aussi parlant sur l'importance des débits que la littérature, cela ne remet pas en cause l'importance de la vitesse de l'eau dans la structuration des herbiers. En effet, des études comme celles de Bornette & Amoros (1996) ou Riis & Biggs (2003) montrent que des débits élevés peuvent limiter le développement des macrophytes par des effets mécaniques (arrachement, cisaillement) ou physico-chimiques (réduction de la lumière, instabilité du substrat). De plus des effets locaux (morphologie du lit, micro-habitats) peuvent atténuer l'impact du débit sur les macrophytes de la station de Saint Alban.

4.2.3. Impact de la physico-chimique

Le recouvrement (REC) est peu corrélé aux variables physico-chimiques, à l'exception du carbone organique total (COT), avec une relation négative : une forte concentration en COT est associée à un recouvrement plus faible.

En revanche, plusieurs paramètres sont bien corrélés à l'axe 1 du NMDS, indiquant une influence sur la composition des herbiers. L'ammonium ($N-NH_4^+$) et les nitrites ($N-NO_2^-$) présentent les corrélations les plus fortes ($R^2 = 0,51$), suivis par la DBO5, l'oxygène dissous, la chlorophylle a et les phosphates ($R^2 \approx 0,30-0,40$). L'axe NMDS2 est peu structuré par ces variables.

À Saint-Alban, une rupture nette est visible entre les années avant et après 2000, aussi bien dans la composition floristique que dans les paramètres physico-chimiques (Figure 9). Cela reflète une évolution notable de la qualité de l'eau, qui joue un rôle clé dans le développement des communautés macrophytiques. Cette influence est bien visible dans nos résultats, et elle est largement documentée dans la littérature, notamment par Rameshkumar et al. (2019), qui soulignent que la conductivité, les solides dissous et la turbidité impactent négativement la diversité des macrophytes.

4.2.4. Enjeux environnementaux futurs

Nos résultats suggèrent que la température et la physico-chimie sont des facteurs déterminants pour la structuration des herbiers aquatiques. Dans une perspective un peu plus large, il est intéressant de se demander comment cette tendance pourrait évoluer dans un contexte de changement climatique.

D'après les projections du GIEC (GIEC, 2021), les températures moyennes devraient continuer à augmenter dans les années à venir, avec des épisodes de chaleur plus fréquents, plus précoces, et des saisons de croissance plus longues. C'est d'ailleurs ce qui est déjà en train d'être observé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse lors de ses suivis. Depuis 1970, la température de l'eau a nettement augmenté : en moyenne de +2,2 °C dans la partie nord, et jusqu'à +4,5 °C dans la partie sud (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2023). Ces conditions environnementales impacteront grandement l'écosystème, en favorisant certaines espèces plus tolérantes à la chaleur ou en modifiant le rythme de développement des herbiers, notamment avec des croissances plus précoces ou plus soutenues au printemps.

De leur côté, les débits pourraient aussi être de plus en plus marqués par des événements extrêmes : crues violentes, étiages sévères, alternances rapides. Ces variations hydrauliques pourraient jouer un rôle plus important à l'avenir, en perturbant davantage les communautés végétales (arrachage, déplacement de substrat, etc.). Lors de ces suivis à long terme, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse a noté que les sols autour du fleuve s'assèchent de plus en plus, avec une baisse de l'humidité estimée entre 18 % et 37 % depuis 1960, selon les zones. Cette perte d'eau dans les sols réduit leur capacité à alimenter le fleuve, surtout en période de sécheresse. Ces changements ont un impact direct sur les débits d'étiage. Depuis 1960, ils ont diminué de 7 % à la sortie du Léman et de 13 % à Beaucaire, en Camargue (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2023). Et selon les projections climatiques, cette tendance devrait s'aggraver : les débits moyens d'été à Beaucaire devraient subir une baisse de 20% supplémentaire dans les 30 prochaines années. Certains affluents du Rhône sont encore plus touchés, avec des baisses de débits d'étiage qui pourraient atteindre 40 % pour l'Isère, et autour de 30 % pour la Drôme et la Durance.

Dans ce contexte, la vitesse de l'eau, directement liée aux variations de débit, pourrait également évoluer de manière significative. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes modifierait la dynamique des écoulements, avec des vitesses plus élevées et plus variables. Or, la vitesse de l'eau est un facteur déterminant pour le développement des macrophytes : elle influence à la fois leur enracinement, leur stabilité, l'accès à la lumière et la disponibilité des nutriments. Des vitesses trop élevées peuvent entraîner l'arrachage des plantes ou l'érosion du substrat, tandis que des vitesses trop faibles peuvent favoriser la sédimentation excessive. Ainsi, les changements futurs dans l'hydrodynamique des cours d'eau pourraient profondément affecter la structure et la composition des communautés macrophytiques.

Ces modifications majeures dans la dynamique du cours d'eau (hausse des températures, hydrologie perturbée) entraîneront également une dégradation de la qualité de l'eau. En effet, une augmentation de la température de l'eau provoque des changements biochimiques, comme une diminution de l'oxygène dissous. Cela peut aussi favoriser les phénomènes d'eutrophisation, qui risquent de devenir plus importants. (Legube & Budzinski, 2020)

Une baisse des débits entraîne une concentration plus importante des polluants dans l'eau, pouvant parfois atteindre des seuils critiques pour la vie aquatique. De plus, en période de faibles débits, les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent s'intensifier. Cela peut provoquer une augmentation des transferts de polluants stockés dans les sols, notamment par des phénomènes de lessivage. (EPTB Vienne, 2024)

Dans ce contexte, c'est important de bien comprendre comment les macrophytes réagissent à ces changements en croisant les données de terrain avec des approches plus prédictives. Intégrer les préférences écologiques des espèces, par exemple à travers des modèles ou des expérimentations, peut aider à mieux anticiper leur évolution et à adapter les stratégies de suivi ou de gestion.

4.3. Prédiction de recouvrement 2025

L'année 2025 commence avec des débits élevés en janvier et février. La variabilité intermensuelle est prononcée, avec des écarts d'environ 500 m³/s entre les médianes mensuelles (Figure 19).

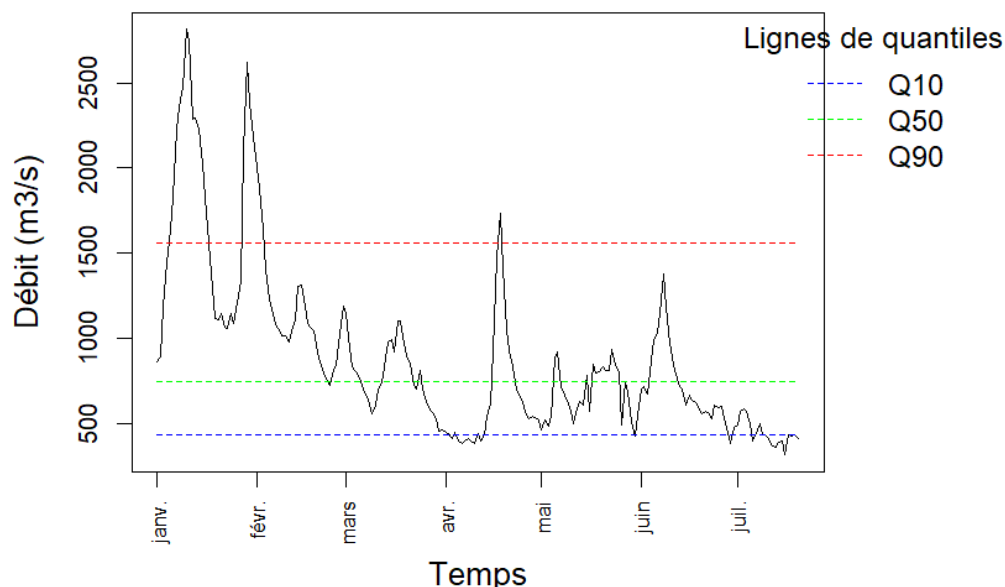


Figure 19 : Débit au niveau de la station amont de Saint-Alban en 2025

En avril, les débits atteignent leur niveau le plus bas depuis le début de l'année. Plusieurs jours passent sous le seuil Q10, indiquant une période de débit très faible, bien visible sur la courbe grâce aux points rouges. Néanmoins, au cours de ce même mois, un pic soudain à 1700 m³/s est enregistré, illustrant une variabilité très importante sur de courtes périodes. En mai, les débits se stabilisent autour de la valeur médiane de la station (Q50), marquant une période un peu plus calme. Mais en juin, un nouveau pic est enregistré vers 1500 m³/s, avant que les débits ne diminuent progressivement jusqu'à atteindre leurs niveaux les plus bas de l'année en juillet. Cette succession de hausses et de chutes brutales illustre une forte variabilité hydrologique en 2025. Ces variations rapides et marquées ont probablement eu un impact important sur les communautés végétales, en particulier sur les espèces les plus sensibles aux changements rapides du régime d'écoulement.

De janvier à mars, les températures restent en dessous de 10 °C, néanmoins une hausse lente et régulière est observable sur la période. Vers la fin mars ou début avril, les seuils clef sont progressivement dépassés : d'abord les 10 °C, puis les 12 °C (Figure 20).

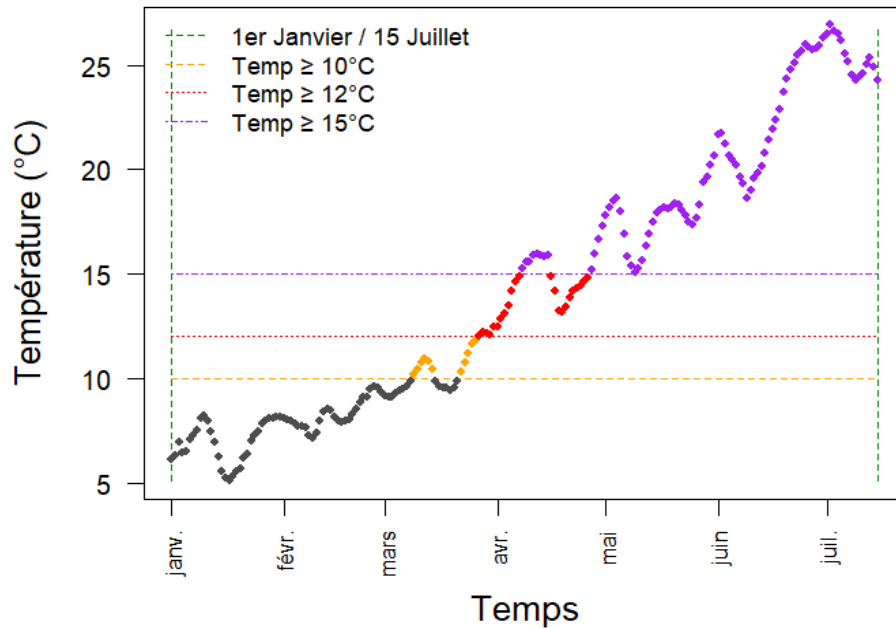


Figure 20 : Température de l'eau au niveau de la station amont de Saint-Alban en 2025

En avril, la barre des 15 °C est franchie, et à partir de là, cette température est souvent dépassée tout au long de mai et juin. Début juillet, elle dépasse même les 25 °C. La courbe montre des pics assez marqués et fréquents, ce qui reflète une dynamique thermique bien présente. À partir de mai, la température reste quasi tout le temps au-dessus de 15 °C. Cela crée un contexte favorable à une production biologique soutenue, mais ça peut aussi provoquer du stress chez certaines espèces plus sensibles à la chaleur.

Pour estimer les recouvrements de la station en 2025, les équations des droites issues des graphiques de corrélation sont utilisées. Seules les corrélations les plus significatives sont prises en compte, c'est-à-dire celles dont la p-value est inférieure à 0,05 et qui présentent les coefficients de détermination (R^2) les plus élevés. Le choix des corrélations s'est fait uniquement à partir des variables calculées sur des périodes, et non sur des mois, car la variabilité d'un mois à l'autre peut être très importante. Il est donc plus cohérent de s'intéresser aux variations sur des périodes plus longues.

- NMDS 1 estimé à partir de la température cumulée > 12 °C entre janvier et mai

Température cumulée en 2025 : $X = 1052$

Équation de la droite : $Y = 0,0006 * X - 0,42$

Résultat : $Y = 0,21$

- NMDS 2 estimé à partir de la température > 15 °C entre janvier et juillet

Température cumulée en 2025 : $X = 1798$

Équation de la droite : $Y = 0,0004 * X - 0,59$

Résultat : $Y = 0,13$

- NMDS 2 estimé à partir des différences de débit cumulées (janvier-juillet)

Différence de débit cumulée en 2025 : $X = 49,0$

Équation de la droite : $Y = -0,0001 * X + 0,131$

Résultat : $Y = 0,128$

Les coordonnées estimées pour l'analyse NMDS sont de 0,21 sur l'axe 1 et de 0,13 sur l'axe 2. En reportant ces valeurs sur le graphique NMDS (Figure 14), l'année 2025 se positionne dans le groupe 4, comme représenté dans la Figure 21.

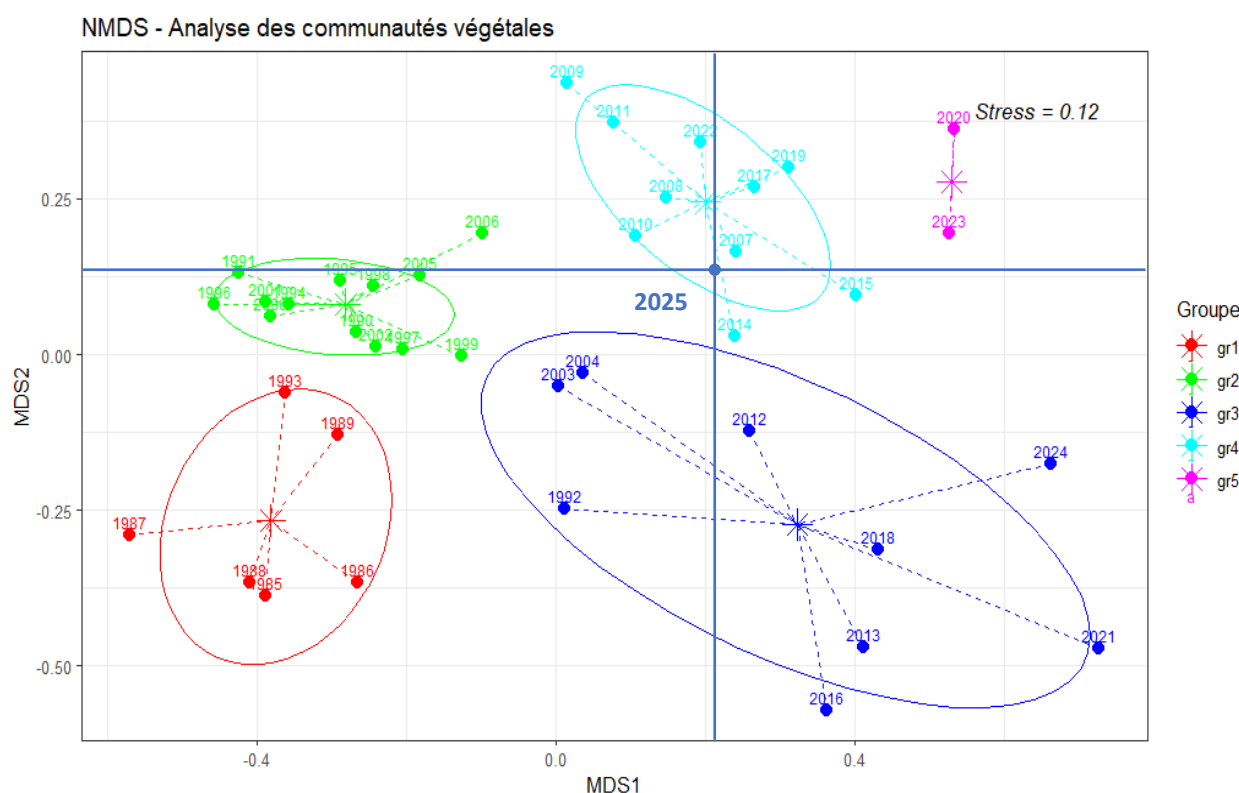


Figure 21 : Modification de Analyse NMDS du suivi floristique la station 1 amont RG de Saint-Alban avec l'ajout de l'année 2025

Cela signifie que l'année 2025 partage des caractéristiques écologiques avec les années de ce groupe (2007 à 2011, ainsi que 2014, 2015, 2017, 2019 et 2022). Ce résultat est cohérent : ce groupe regroupe des années relativement récentes, mais sans événements climatiques extrêmes, ce qui correspond bien au profil de 2025. Le groupe 4 est associé à une plus grande diversité d'espèces indicatrices, comme *Vallisneria spiralis*, *Spirodela polyrhiza*, *Potamogeton perfoliatus*, *Najas marina*, *Lemna minor*, *Elodea nuttallii* ainsi que des algues filamenteuses.

- Recouvrement estimé à partir du cumul des températures >15 °C (janvier à juillet) :
Température cumulée en 2025 : X = 1798
Équation de la droite : $Y = 0.09 * X + 111.6$
Résultat : Y = 267.9
- Recouvrement estimé à partir du cumul des débits (janvier à juin)
Différence de débit cumulée en 2025 : X = 429
Équation de la droite : $Y = -0.01 * X + 253.6$
Résultat : Y = 248.1

Les estimations indiquent un recouvrement de 258 % pour la station 1 (amont RG) en 2025. Cela correspond à une année où le recouvrement est supérieur à la moyenne, sans toutefois atteindre les valeurs extrêmes observées certaines années.

5. Conclusion

Cette étude, basée sur plus de 40 ans de données, montre à quel point les macrophytes réagissent de manière complexe aux conditions environnementales. Parmi les résultats marquants, la présence importante d'*Elodea nuttallii* illustre bien comment une espèce exotique peut s'adapter rapidement et profiter de conditions favorables, notamment les hausses de température., même si les corrélations observées, bien que significatives, présentent des coefficients de détermination (R^2) relativement faibles.

L'analyse des paramètres environnementaux et la recherche de métriques ont mis en évidence l'influence de la température de l'eau et du débit sur le développement des macrophytes. De fortes températures, accompagnées de faibles débits pendant la période végétative, contribuent à former des conditions optimales pour leur croissance.

La recherche de métriques permettant de caractériser les conditions propices au développement végétal a révélé que le cumul des températures de janvier à juillet, ainsi que de janvier à juin, joue un rôle important dans l'état des peuplements observés en été. Les seuils de 12 °C et 15 °C apparaissent comme des seuils cruciaux pour suivre l'évolution de ces végétaux. Ces données pourraient ainsi servir de facteur d'alerte précoce, tout comme les métriques calculées sur le débit.

La vitesse de l'eau subie par les herbiers a été estimée à partir des débits, ce qui s'éloigne de la réalité sur le terrain. Pourtant, cette vitesse constitue un facteur majeur influençant le développement des macrophytes. Lorsque des débits importants se produisent durant la période végétative, la croissance des plantes est fortement limitée, et les recouvrements observés en été restent faibles. En revanche, des débits faibles favorisent un développement important des herbiers.

En automne, des débits élevés n'impactent plus la croissance mais l'ancrage des plantes : les macrophytes peuvent alors se décrocher et dériver. Après des épisodes de crues marquées ou d'arrachages pendant l'automne et l'hiver, le développement des espèces au cours de l'année suivante est limité, entraînant un recouvrement réduit.

Les suivis réalisés à Saint-Alban constituent une ressource précieuse, car ils permettent un suivi à long terme particulièrement pertinent. Ils offrent la possibilité d'observer l'évolution de la station sur plusieurs décennies, ce qui contribue non seulement à une meilleure compréhension des effets du dérèglement climatique, mais aussi à la prise en compte de la variabilité interannuelle. Ces données sont extrêmement utiles pour orienter la gestion des milieux aquatiques et anticiper les changements à venir.

6. Retour sur expérience

Je suis très reconnaissante d'avoir pu faire ce stage au sein de la R&D d'EDF. J'y ai appris énormément, aussi bien sur le plan technique que personnel. J'ai pu renforcer mes compétences en R et mieux comprendre la méthodologie scientifique en général.

Pendant le stage, j'ai été formée à l'utilisation d'outils statistiques avec le logiciel R, et j'ai aussi appris à réaliser des représentations graphiques variées. Je suis vraiment contente d'avoir acquis ces compétences, qui me serviront clairement dans la suite de mon parcours.

Avec le recul, je pense que j'aurais pu améliorer certains aspects de mon organisation. Par exemple, une meilleure organisation de mes scripts R m'aurait fait gagner du temps. J'ai parfois investi du temps dans des analyses qui finalement ne servaient pas vraiment le sujet. Cela m'a appris l'importance de bien se documenter avant de se lancer dans une analyse. J'aurais peut-être dû prendre plus de temps au début pour me renseigner sur les outils les plus adaptés, plutôt que d'agir de manière précipitée.

Ce stage m'a également permis de mieux me connaître dans ma façon de travailler. J'ai réalisé que j'avais parfois tendance à vouloir tout résoudre seule, même lorsque des blocages persistaient. J'aurais probablement gagné en efficacité en demandant de l'aide de ma tutrice, notamment lorsque des informations me manquaient.

D'un point de vue professionnel, ce stage a confirmé et renforcé mon intérêt pour le domaine de la recherche, intérêt que j'avais déjà commencé à développer lors de mon précédent stage. Lors de ce dernier, j'ai travaillé à la réalisation d'une clé de détermination des bryophytes aquatiques dans un centre de recherche public.

Mon expérience chez EDF m'a permis de découvrir une autre facette de la recherche, plus appliquée et directement liée à des problématiques concrètes. Comme lors de mon stage précédent, j'ai évolué dans un environnement composé de chercheurs, doctorants et ingénieurs. Mais ici, les projets étaient vraiment orientés vers des besoins concrets. J'ai beaucoup apprécié cette dimension pratique et utile de mon travail, avec la perspective qu'il puisse être réutilisé dans le cadre d'autres projets.

Ce stage m'a confortée dans l'idée que je souhaitais m'orienter vers un métier de recherche, mais dans un cadre appliqué, au service de problématiques concrètes et environnementales. C'est dans ce type de projets que je me vois m'épanouir professionnellement.

7. Annexe

Annexe 1 : Liste des package

- Ade4
Dray, S., & Dufour, A. (2007). The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists. *Journal of Statistical Software*, 1-20.
- Cluster
Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., & Hornik, K. (2025). Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions.
- Corrplot
Taiyun, W., & Viliam, S. (2024). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.95).
- Dplyr
Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). dplyr : A Grammar of Data Manipulation.
- Ellipse
Murdoch, D., & Chow, E. (2023). ellipse: Functions for Drawing Ellipses and Ellipse-Like Confidence Regions.
- Factoextra
Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). factoextra : Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses.
- Gclus
Hurley, C. (2019). gclus: Clustering Graphics.
- Ggplot2
Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.
- Ggpubr
Kassambara, A. (2023). ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots.
- Ggrepel
Slowikowski, K. (2024). ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with 'ggplot2'.
- Gridextra
Auguie, B. (2017). gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics.
- Hcoplot
Gillet, F. (2012). Function hcoplot : Reorder and plot dendrogram with colors for groups and legend.
- Indicspecies
De Cáceres, M., & Legendre, P. (2009). Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference.
- Labdsv
Roberts, D. W. (2023). labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology.
- Openxlsx
Schauberger, P., & Walker, A. (2025). openxlsx: Read, Write and Edit xlsx Files.
- Pheatmap
Kolde, R. (2019). pheatmap: Pretty Heatmaps.

- Readxl
Wickham, H., & Bryan, J. (2025). readxl: Read Excel Files.
- Reshape2
Wickham, H. (2007). Reshaping Data with the reshape Package. Journal of Statistical Software. 1-20.
- Tibble
Müller, K., & Wickham, H. (2023). tibble: Simple Data Frames.
- Tidyverse
Wickham H, A. M., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., . . . Takahashi, K. (2019). Welcome to the tidyverse. Journal of Open Source Software.
- Vegan
Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., . . . Durand, S. (2025). vegan: Community Ecology Package.
- Writexl
Ooms, J. (2025). writexl: Export Data Frames to Excel 'xlsx' Format.
- Zoo
Zeileis, A., & Grothendieck, G. (2005). zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. Journal of Statistical Software, 1-27.

Annexe 2 : Résultat des corrélations entre coordonnées REC d'*Elodea nuttallii* et les variables environnementales

ST1			
Variable	R ²	P-value	
Tacc_Tot_Juil	0,07	0,10	Tacc-janv-mai : Température accumulée entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc_Tot_Juin	0,02	0,38	Tacc- janv-juin : Température accumulée entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc_Tot_Mai	0,01	0,56	Tacc- janv-juil : Température accumulée entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc_10_juil	0,05	0,15	Tacc-10-janv-mai : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc_10_juin	0,04	0,20	Tacc-10- janv-juin : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc_10_mai	0,03	0,25	Tacc-10- janv-juil : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc_12_juil	0,10	0,05	Tacc-12- janv-mai : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc_12_juin	0,09	0,06	Tacc-12-janv-juin : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc_12_mai	0,09	0,06	Tacc-12- janv -juil : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc_15_juil	0,09	0,06	Tacc-15- janv -mai : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc_15_juin	0,08	0,07	Tacc-15- janv -juin : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc_15_mai	0,09	0,06	Tacc-15- janv -juil : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc_Mars	0,005	0,67	Tacc-Mars : Température cumulée pendant le mois de mars
Tacc_Avril	0,14	0,02	Tacc-Avril : Température cumulée pendant le mois d'avril
Tacc_Mai	0,06	0,13	Tacc-Mai : Température cumulée pendant le mois de mai
Tacc_Juin	0,05	0,18	Tacc-Juin : Température cumulée pendant le mois de juin
Tacc_Juillet	0,05	0,17	Tacc-Juillet : Température cumulée pendant le mois de juillet
ΔQ-janv-mai	0,11	0,03	Tacc-Aout : Température cumulée pendant le mois d'aout
ΔQ-janv-juin	0,11	0,03	ΔQ-janv-mai : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 mai
ΔQ-janv-juil	0,11	0,04	ΔQ-janv-juin : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 30 juin
ΔQ-median	0,07	0,09	ΔQ-janv-juil : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 juillet
ΔQ_mars	0,04	0,20	ΔQ-fevrier : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de février
ΔQ_avril	0,10	0,04	ΔQ-median : Ecart entre le débit médian mensuel au Q50
ΔQ-mai	0,11	0,03	ΔQ-mai : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de mai
ΔQ-juin	0,03	0,26	ΔQ-juin : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juin
ΔQ-juillet	0,01	0,47	ΔQ-juillet : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juillet
chloro	0,14	0,02	Chlorophylle a (μg/L) : Concentration de chlorophylle a.
MeS	0,06	0,13	MeS (mg/L) : Matières en suspension, quantité de particules solides non dissoutes dans l'eau.
turbid	0,06	0,14	Turbidité (JTU) : Degré de trouble de l'eau dû aux particules en suspension, mesuré en unités Jackson Turbidity Unit.
pH	0,04	0,19	pH : Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau.
O2	0,05	0,15	O2 (mg/L) : Concentration en oxygène dissous.
conduct	0,03	0,30	Conductivité (μS/cm à 20°C) : Capacité de l'eau à conduire l'électricité.
DBO5	0,22	0,002	DBO5 (mgO ₂ /L) : Demande biologique en oxygène sur 5 jours.
COT	0,21	0,003	COT (mg/L) : Carbone organique total
N-NH4	0,21	0,003	N-NH ₄ (mgN/L) : Ammonium dissous.
N-NO2	0,14	0,02	N-NO ₂ (mgN/L) : Nitrites.
N-NO3	0,01	0,60	N-NO ₃ (mgN/L) : Nitrates.
PO4	0,11	0,04	PO ₄ (mgPO ₄ /L) : Orthophosphates.
SiO2	0,01	0,62	SiO ₂ (mgSiO ₂ /L) : Silice dissoute.
Cl	0,003	0,75	Cl (mg/L) : Chlorures.
TAC	0,05	0,16	TAC (mgHCO ₃ ⁻ /L) : Titre alcalimétrique complet

Annexe 3 : Résultat des corrélations entre coordonnées NMDS et variables de températures

	Station 1			
	NMDS1		NMDS 2	
	P-value	R2	P-value	R2
Tacc_Tot_Mai	0,034	0,11	0,071	0,08
Tacc_Tot_Juin	0,023	0,13	0,025	0,13
Tacc_Tot_Juil	0,030	0,12	0,001	0,26
Tacc-10-mai	> 0,05	0,04	0,001	0,25
Tacc-10-juin	> 0,05	0,05	0,001	0,26
Tacc-10-juil	> 0,05	0,06	0,0003	0,29
Tacc-12-mai	0,022	0,13	0,002	0,23
Tacc-12-juin	0,023	0,13	0,002	0,24
Tacc-12-juil	0,019	0,014	0,001	0,26
Tacc-15-mai	> 0,05	0,03	0,0002	0,32
Tacc-15-juin	> 0,05	0,05	0,0001	0,32
Tacc-15-juil	> 0,05	0,06	0,0001	0,34
Tacc-Mars	> 0,05	0,03	0,030	0,12
Tacc-Avril	0,007	0,16	0,008	0,17
Tacc-Mai	> 0,05	0,01	0,0003	0,3
Tacc-Juin	> 0,05	0,06	0,018	0,14
Tacc-Juillet	> 0,05	0,09	0,048	0,1

Tacc_Tot_Mai : Température accumulée entre le 1er janvier et le 31 mai

Tacc_Tot_Juin : Température accumulée entre le 1er janvier et le 30 juin

Tacc_Tot_Juil : Température accumulée entre le 1er janvier et le 15 juillet

Tacc-10-mai : Température accumulée supérieure à 10°C entre le 1er janvier et le 31 mai

Tacc-10-juin : Température accumulée supérieure à 10°C entre le 1er janvier et le 30 juin

Tacc-10-juil : Température accumulée supérieure à 10°C entre le 1er janvier et le 15 juillet

Tacc-12-mai : Température accumulée supérieure à 12°C entre le 1er janvier et le 31 mai

Tacc-12-juin : Température accumulée supérieure à 12°C entre le 1er janvier et le 30 juin

Tacc-12-juil : Température accumulée supérieure à 12°C entre le 1er janvier et le 15 juillet

Tacc-15-mai : Température accumulée supérieure à 15°C entre le 1er janvier et le 31 mai

Tacc-15-juin : Température accumulée supérieure à 15°C entre le 1er janvier et le 30 juin

Tacc-15-juil : Température accumulée supérieure à 15°C entre le 1er janvier et le 15 juillet

Tacc-Mars : Température cumulée pendant le mois de mars

Tacc-Avril : Température cumulée pendant le mois d'avril

Tacc-Mai : Température cumulée pendant le mois de mai

Tacc-Juin : Température cumulée pendant le mois de juin

Tacc-Juillet : Température cumulée pendant le mois de juillet

Annexe 4 : Résultats des corrélations entre coordonnées NMDS et débits

	Station 1			
	NMDS1		NMDS 2	
	P-value	R ²	P-value	R ²
ΔQ-janv-mai	> 0,05	<0,01	0,003	0,21
ΔQ-janv-juin	> 0,05	<0,01	0,0004	0,28
ΔQ-janv-juil	> 0,05	<0,01	0,0002	0,31
ΔQ-fevrier	> 0,05	0,03	0,008	0,17
ΔQ-median	> 0,05	<0,01	0,001	0,26
ΔQ-mai	> 0,05	0,01	0,0002	0,46
ΔQ-juin	> 0,05	<0,01	0,0001	0,34
ΔQ-juillet	> 0,05	0,02	0,009	0,17

ΔQ-janv-mai : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 mai

ΔQ-janv-juin : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 30 juin

ΔQ-janv-juil : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 juillet

ΔQ-fevrier : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de février

ΔQ-median : Ecart entre le débit médian mensuel au Q50

ΔQ-mai : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de mai

ΔQ-juin : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juin

ΔQ-juillet : Ecart journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juillet

Annexe 5 : Résultats des corrélations entre coordonnées NMDS et physico-chimie

	Station 1			
	NMDS1		NMDS 2	
	P-value	R ²	P-value	R ²
Chlorophylle a (µg/L)	<0,001	0,3	> 0,05	0,002
MeS (mg/L)	> 0,05	0,01	> 0,05	0,01
Turbidité (JTU)	> 0,05	0,08	> 0,05	0,04
pH	> 0,05	0,01	> 0,05	0,02
O2 (mg/L)	<0,001	0,31	> 0,05	0,01
Conductivité (µS/cm à 20°C)	> 0,05	0,08	> 0,05	0,04
DBO5 (mgO2/L)	<0,001	0,40	0,042	0,10
COT (mg/L)	<0,001	0,05	> 0,05	0,05
N-NH4 (mgN/L)	<0,001	0,51	> 0,05	0,08
N-NO2 (mg/L N)	<0,001	0,51	> 0,05	0,01
N-NO3 (mg/L N)	0,05	0,10	> 0,05	0,05
PO4 (mg PO4/L)	<0,001	0,29	0,015	0,15
SiO2 (mg SiO2/L)	0,034	0,11	0,048	0,10
Cl (mg/L)	> 0,05	0,03	> 0,05	0,02
TAC (mgHCO3-/L)	> 0,05	0,04	> 0,05	0,001

Chlorophylle a (µg/L) : Concentration de chlorophylle a.

MeS (mg/L) : Matières en suspension, quantité de particules solides non dissoutes dans l'eau.

Turbidité (JTU) : Degré de trouble de l'eau dû aux particules en suspension, mesuré en unités Jackson Turbidity Unit.

pH : Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau.

O2 (mg/L) : Concentration en oxygène dissous.

Conductivité (µS/cm à 20°C) : Capacité de l'eau à conduire l'électricité.

DBO5 (mgO2/L) : Demande biologique en oxygène sur 5 jours.

COT (mg/L) : Carbone organique total

N-NH4 (mgN/L) : Ammonium dissous.

N-NO2 (mgN/L) : Nitrites.

N-NO3 (mgN/L) : Nitrates.

PO4 (mgPO4/L) : Orthophosphates.

SiO2 (mgSiO2/L) : Silice dissoute.

Cl (mg/L) : Chlorures.

TAC (mgHCO3-/L) : Titre alcalimétrique complet.

ST1			
Variable	R ²	P-value	
Tacc-janv-juill	0,11	0,03	Tacc-janv-mai : Température accumulée entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc-janv-juin	0,02	0,43	Tacc- janv-juin : Température accumulée entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc-janv-mai	0,0003	0,91	juin
Tacc-10-janv-juil	0,08	0,08	Tacc- janv-juil : Température accumulée entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc-10-janv-juin	0,06	0,13	Tacc-10-janv-mai : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc-10-Janv-mai	0,03	0,28	Tacc-10- janv-juin : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc-12-janv-juil	0,08	0,07	Tacc-10- janv-juil : Température accumulée sup à 10°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc-12-janv-juin	0,07	0,10	Tacc-12- janv-mai : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc-12-Janv-mai	0,04	0,20	Tacc-12-janv-juin : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc-15-janv-juil	0,15	0,01	Tacc-12- janv -juil : Température accumulée sup à 12°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc-15-janv-juin	0,14	0,02	Tacc-15- janv -mai : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 31 mai
Tacc-15-Janv-mai	0,14	0,02	Tacc-15- janv -juin : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 30 juin
Tacc-Mars	0,0003	0,91	Tacc-15- janv -juil : Température accumulée sup à 15°C entre le 1er janvier et le 15 juillet
Tacc-Avril	0,05	0,15	Tacc-Mars : Température cumulée pendant le mois de mars
Tacc-Mai	0,08	0,08	Tacc-Avril : Température cumulée pendant le mois d'avril
Tacc-Juin	0,15	0,01	Tacc-Mai : Température cumulée pendant le mois de mai
Tacc-Juil	0,10	0,04	Tacc-Juin : Température cumulée pendant le mois de juin
ΔQ-janv-juil	0,21	0,003	Tacc-Juillet : Température cumulée pendant le mois de juillet
ΔQ -janv-juin	0,22	0,002	Tacc-Aout : Température cumulée pendant le mois d'aout
ΔQ -janv-mai	0,18	0,006	ΔQ-janv-mai : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 mai
ΔQ -median	0,09	0,066	ΔQ-janv-juin : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 30 juin
ΔQ -mars	0,001	0,854	ΔQ-janv-juil : Cumul des écarts journaliers au Q50 entre le 1er janvier et le 31 juillet
ΔQ -avril	0,01	0,620	ΔQ-fevrier : Ecarts journaliers au Q50 cumulés pour le mois de février
ΔQ -mai	0,15	0,015	ΔQ-median : Ecarts entre le débit médian mensuel au Q50
ΔQ -juin	0,10	0,043	ΔQ-mai : Ecarts journaliers au Q50 cumulés pour le mois de mai
ΔQ -juillet	0,11	0,033	ΔQ-juin : Ecarts journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juin
Chlorophylle a	0,02	0,39	ΔQ-juillet : Ecarts journaliers au Q50 cumulés pour le mois de juillet
MeS	0,07	0,09	Chlorophylle a (μg/L) : Concentration de chlorophylle a.
Turbidité	0,07	0,09	MeS (mg/L) : Matières en suspension, quantité de particules solides non dissoutes dans l'eau.
pH	0,01	0,53	Turbidité (JTU) : Degré de trouble de l'eau dû aux particules en suspension, mesuré en unités Jackson Turbidity Unit.
O2	0,01	0,56	pH : Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau.
Conductivité	0,06	0,13	O2 (mg/L) : Concentration en oxygène dissous.
DBO5	0,02	0,38	Conductivité (μS/cm à 20°C) : Capacité de l'eau à conduire l'électricité.
COT	0,12	0,03	DBO5 (mgO ₂ /L) : Demande biologique en oxygène sur 5 jours.
N-NH4	0,05	0,15	COT (mg/L) : Carbone organique total
N-NO2	0,03	0,27	N-NH ₄ (mgN/L) : Ammonium dissous.
N-NO3	0,05	0,15	N-NO ₂ (mgN/L) : Nitrites.
PO4	0,00	0,75	N-NO ₃ (mgN/L) : Nitrates.
SiO2	0,04	0,22	PO ₄ (mgPO ₄ /L) : Orthophosphates.
Cl	0,06	0,12	SiO ₂ (mgSiO ₂ /L) : Silice dissoute.
TAC	0,00	0,80	Cl (mg/L) : Chlorures.
			TAC (mgHCO ₃ ⁻ /L) : Titre alcalimétrique complet

8. Bibliographie

- Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. (2023, Mars 3). *Les débits d'étiage du Rhône en baisse sous l'effet du changement climatique*. Récupéré sur https://www.eaurmc.fr/:https://www.eaurmc.fr/jcms/pro_118307/fr/les-debits-d-etiage-du-rhone-en-baisse-sous-l-effet-du-changement-climatique
- Bai, X., Chen, K., Zhao, H., & Chen, X. (2015). Impact of water depth and sediment type on root morphology of the submerged plant *Vallisneria natans*. *Journal of Freshwater Ecology*, 75-84.
- Baláži, P., & Hrivnák, R. (2016). The relationship between macrophyte assemblages and environmental variables in drainage and irrigation canals in Slovakia. *Biologia*, 516–527.
- Balocco-Castella, C. (1988). *Les macrophytes aquatiques des milieux abandonnés par le Haut-Rhône et l'Ain : diagnostic phyto-écologique sur l'évolution et le fonctionnement de ces écosystèmes*.
- Barko, J. W., & Smart, R. M. (1986). Sediment-Related Mechanisms of Growth Limitation in Submersed Macrophytes. *Ecology*, 67, 1328-1340.
- Barrat-Segretain, M. H. (2005). Competition between invasive and indigenous species: Impact of Spatial Pattern and Developmental Stage. *Plant Ecology*, 153–160.
- Berneiz, I., Haury, J., & Ferreira, M. T. (2002). Downstream Effects of a Hydroelectric Reservoir on Aquatic Plant Assemblages. *The Scientific World JOURNAL*, 740-750.
- Birk, S. C. (2020). Impacts of multiple stressors on freshwater biota across spatial scales and ecosystems. *Nat Ecol Evol* 4, 1060–1068.
- Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2018). *Numerical Ecology with R*.
- Bornette, G., & Puijalon, S. (2011). Response of aquatic plants to abiotic factors : a review. *Aquatic Sciences*, 1-14.
- Bowen, J. L., Giblin, A. E., Murphy, A. E., Bulseco, A. N., Deegan, L. A., Johnson, D. S., . . . Sullivan, H. L. (2020). Not All Nitrogen Is Created Equal : Differential Effects of Nitrate and Ammonium Enrichment in Coastal Wetlands. *BioScience*, 1108-1119.
- Carbiener, R., Trémolières, M., Mercier, J., & Ortscheit, A. (1990). Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace). *Vegetation*, 71–88.
- Chambers, P. A., Lacoul, P., Murphy, K. J., & Thomaz, S. M. (2008). Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. *Hydrobiologia*, 9-26.
- Chiumento, P., Brana, J.-Y., & Mallet, J.-P. (2024). *Suivi hydrobiologique au niveau du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de St-Alban - St-MAurice - Année 2023*.
- CNRS, INRA, IRSTEA, & IFREMER. (2017). *Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*.
- Cottaz, C., Dao, J., Hamon, M., & De Barros, G. (2021). Liste de référence des plantes exotiques envahissantes de la région Occitanie.
- Dagens, N., Feret, T., Tocqueville, F., & Chauvin, C. (2015). *La prolifération des macrophytes aquatiques et les risques induits pour l'exploitation des CNPE en cours d'eau*.

- Dale, H. M. (1986). Temperature and light : The determining factors in maximum depth distribution of aquatic macrophytes in Ontario, Canada. . *Hydrobiologia*, 73-77.
- Dawson, F. (1988). Water Flow and the Vegetation of Running Waters. *Handbook of vegetation science*, 289-309.
- Demars, B. O., & Thiébaud, G. (2008). Distribution of aquatic plants in the Northern Vosges rivers: Implications for biomonitoring and conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 619-632.
- Dufrene, M., & Legendre, P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecological Monographs*, 345–366.
- EPTB Vienne. (2024). *Etude de l'influence du changement climatique sur les ressources en eau Bassin versant de la Vienne*.
- Feijoó, C., & Lombardo, R. B. (2007). Water Quality and Macrophyte Assemblages in Pampean Streams: A Regional Approach. *Water Res.*, 1399–1410.
- Fruget, J. F. (2022). *Suivi hydrobiologique du Rhône au niveau de la centrale nucléaire de St-Alban - St-Maurice - Année 2021*.
- GIEC. (2021). *Changement climatique 2021 : Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs*.
- Grosjean, P., Engels, G., & Conotte, R. (2021). *Indices de biodiversité*. Récupéré sur Science des données biologiques: <https://wp.sciviews.org/sdd-umons2-2020/indices-de-biodiversit%C3%A9.html>
- Gross, E. M., Johnson, R. L., & Hairston, N. G. (2001). Experimental evidence for changes in submersed macrophyte species composition caused by the herbivore *Acentria ephemerella* (Lepidoptera). *Oecologia* 127, 105–114.
- Hao, A., Kobayashi, S., Huang, H., M. Q., & Iseri, Y. (2020). Effects of substrate and water depth of a eutrophic pond on the physiological status of a submerged plant, *Vallisneria natans*. *PeerJ*.
- Haury, J., & Muller, S. (2008). Les communautés de macrophytes : typologie, dynamique et production. *Ingénieries-EAT, numéro spécial « Plantes aquatiques d'eau douce : biologie, écologie et gestion »*, 37-50.
- Haury, J., Cazaubon, A., Barrat-Segretain, M.-H., Elger, A., & Thiebaut, G. (2008). Analyse multi-compartiments et rôles fonctionnels des macrophytes dans les hydrosystèmes. *Ouvrage GIS Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires numéro spécial Plantes aquatiques d'eau douce: biologie, écologie et gestion*, 79-90.
- Haury, J., Peltre, M.-C., Muller, S., Trémoières, M., Barbe, J., Dutartre, A., & Guerlesquin, M. (1996). Des indices macrophytiques pour estimer la qualité des cours d'eau français : premières propositions. *Écologie*, 233-244.
- Hrivnák, R., Ořahelová, H., Kochjarová, J., & Pařove-Balang, P. (2013). Effect of environmental conditions on species composition of macrophytes – study from two distinct biogeographical regions of Central Europe. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 1-15.
- Jeppesen, E., Søndergaard, M., Søndergaard, M., & Christoffersen, K. (2000). The structuring role of submerged macrophytes in lakes. *Ecological Studies*.

- Kochjarová, J., Novikmec, M., Ořáhelová, H., Hamerlík, L., Svitok, M., Hrivnák, M., . . . Hrivnák, R. (2017). Vegetation-Environmental Variable Relationships in Ponds of Various Origins along an Altitudinal Gradient. *Polish Journal Of Environmental Studies*, 1575-1583.
- Kuhar, U., Gregorc, T., Renčelj, M., Šraj-Kržič, N., & Gaberščik, A. (2007). Distribution of Macrophytes and Condition of the Physical Environment of Streams Flowing through Agricultural Landscape in North-Eastern Slovenia. *Limnologica* , 146–154.
- Lambers, H. (2022). Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annual Review of Plant Biology* , 17–42.
- Legube, B., & Budzinski, H. (2020). *Les impacts du changement climatique sur la physico-chimie des ressources en eau*.
- Lesiv, M. S., Polishchuk, A. I., & Antonyak, H. L. (2020). Aquatic macrophytes : Ecological features and functions . *Biol. Stud.*, 79–94.
- Lolis, L. A., Alves, D. C., Fan, S., Lv, T., Yang, L., Li, Y., . . . Thomaz, S. M. (2020). Negative correlations between native macrophyte diversity and water hyacinth abundance are stronger in its introduced than in its native range. *Diversity And Distributions*, 242-253.
- Madsen, J. D., Chambers, P. A., James, W. F., Koch, E. W., & Westlake, D. F. (2001). The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*.
- Madsen, J. D., Chambers, P. A., James, W. F., Koch, E. W., & Westlake, D. F. (2001). The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 71-84.
- Mandal, R., Datta, A., & Sarangi, N. (2010). Diversity of Aquatic Macrophytes as Food and Feed Components to Herbivorous Fish—A Review. *Indian J. Fish*, 65–73.
- Navarro Law, I., Durance, I., Benstead, R., Fryer, M. E., & Brown, C. D. (2024). The Influence of Abiotic Factors on the Distribution of Macrophytes in Small Water Bodies in Temperate Ecosystems. *The Influence of Abiotic Factors on the Distribution of Macrophytes in Small Water Bodies in Temperate Ecosystems. Limnological Review*.
- Nogaro, G. (2015). *Synthèse des actions sur la caractérisation des agents colmatants : les macrophytes en cours d'eau (2013-2014)*.
- Rameshkumar, S., Venkatramanan, S., & Chung, S. Y. (2019). Influence of physicochemical water quality on aquatic macrophyte diversity in seasonal wetlands. *Applied Water Science*, 1-10.
- Rao, C. (1995). A review of canonical coordinates and an alternative to correspondence analysis using Hellinger distance. *Qüestió*, 23-63.
- Santamaria, L., & van Vierssen, W. (1997). Photosynthetic temperature responses of fresh- and brackish-water macrophytes: a review. . *Aquat Bot* , 135–150.
- Sculthrope, C. D. (1967). *The biology of Aquatic Vascular Plants*. London: Edward Arnold.
- Selvasothy, S. (2016). *Influence des paramètres environnementaux sur les peuplements de macrophytes des grands cours d'eau français*.
- Sun, J., Doeser, A., Cao, Y., Lv, X., Li, W., & Liu, F. (2022). Regional Macrophyte Diversity Is Shaped by Accumulative Effects Across Waterbody Types in Southern China. *Aquatic Botany*.

- Svitok, M., Hrivnák, R., Kochjarová, J., Ot'ahel'ová, H., & Pal'ove-Balang, P. (2016). Environmental Thresholds and Predictors of Macrophyte Species Richness in Aquatic Habitats in Central Europe. *Folia Geobotanica*, 227–238.
- Ter Braak, C. (1987). The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* 69, 69-77.
- Thiébaud, G. (2007). Non-indigenous aquatic and semiaquatic plant species in France. Dans F. Gherardi, *Biological invaders in inland waters: Profiles, distribution, and threats*.
- Thiébaud, G. (2008). Phosphorus and aquatic plants. *Plant ecophysiology* , 31-49.
- Thiébaud, G., & Muller, S. (1999). A macrophyte communities sequence as an indicator of eutrophication and acidification levels in weakly mineralised streams in north-eastern France. *Hydrobiologia*, 17–24.
- Thomaz, S. M., & Da Cunha, E. R. (2010). The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems : methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 218-236.
- Thomaz, S. M., & Ribeiro da Cunha, E. (2010). The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 218-236.
- Tollie, A. (2021). *Note technique : Développement des macrophytes en amont des CNPE de la Loire et de la Vienne : Evolution et influence des paramètres environnementaux*.
- Tollie, A. (2022). *Influence des paramètres environnementaux sur les arrivées massives de colmatants biologiques au droit des CNPE Bord de rivière et bord de mer*.
- Verhoeven, M., Glisson, W., & Larkin, D. (2020). Niche models differentiate potential impacts of two aquatic invasive plant species on native macrophytes. . *Diversity* .
- Voesenek, L., Colmer, T., Pierik, R., Millenaar, F., & Peeters, A. (2006). How plants cope with complete submergence. *New Phytologist*, 213-226.
- Wiegand, G. (1984). A study of habitat conditions of the macrophytic vegetation in selected river systems in western Lower Saxony. *Aquatic Botany*, 313-352.
- Xu, L., Chen, S., Zhuang, P., Xie, D., Yu, X., Liu, D., . . . Xing, F. (2021). Purification Efficiency of Three Combinations of Native Aquatic Macrophytes in Artificial Wastewater in Autumn. *Int J Environ Res Public Health*.
- Zelnik, I., Kuhar, U., Holcar, M., Germ, M., & Gaberščik, A. (2021). Distribution of Vascular Plant Communities in Slovenian Watercourses. *Water* .
- Zhang, P., Grutters, B., van Leeuwen, C., Xu, J., Petruzzella, A., van den Berg, R., & Bakker, E. (2019). Effects of Rising Temperature on the Growth, Stoichiometry, and Palatability of Aquatic Plants. *Frontiers Plant Science*.
- Zhou, X., Hea, Z., Jones, K., Li, L., & Stoffella, P. (2017). Dominating aquatic macrophytes for the removal of nutrients from waterways of the Indian River Lagoon basin, South Florida, USA. *Ecological Engineering*, 107-119.



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Morvan Jeanne

2024-2025

Titre : Evolution temporelle et spatiale des communautés de macrophytes en lien avec les paramètres environnementaux

Résumé : Ce stage a porté sur l'étude des communautés de macrophytes dans un grand cours d'eau (le Rhône) dans le but de comprendre leur lien avec les paramètres environnementaux influençant leur développement. Ce travail a combiné une phase de recherche bibliographique et une analyse de données environnementales (température, débit, physico-chimie de l'eau), à l'aide d'outils statistiques sous R.

Les résultats ont permis de mieux comprendre les relations entre les conditions du milieu et la présence des macrophytes, fournissant ainsi des éléments utiles pour la réalisation d'un outil prédictif du développement des macrophytes.

Abstract: The aim of this internship was to study the development of macrophyte communities in a large river system, in relation to key environmental variables. An initial literature review helped identify the main ecological factors influencing the presence and distribution of these aquatic plants. The analysis focused on available environmental data (including water temperature, water flow, and physico-chemical parameters). All the analyses were conducted using statistical tools in R.

Mots Clés : Macrophytes, Communautés aquatiques, Paramètres environnementaux, Analyse statistique

Tuteur entreprise :

Geraldine Nogaro

EDF Lab Chatou

Île des Impressionnistes –
6 quai Watier 78401 CHATOU

Tuteur académique :

Michel Bacchi