

## Expérimentation de lutte contre le Myriophylle hétérophylle dans la gare d'eau de Saint Jean de Losne



### Synthèse de l'expérimentation réalisée par la société INOVAL en 2023

## Table des matières

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Contexte et objectifs du renouvellement de l'expérimentation .....                                | 4  |
| 2.    | Introduction aux systèmes d'oxygénation déployés dans la Gare d'eau de Saint Jean Losne.....      | 8  |
| 3.    | Déploiement des rideaux de bulles pour limiter les échanges entre la Saône et la Gare d'eau ..... | 9  |
| 3.1   | Le fonctionnement et objectifs d'un rideau de bulles BubblePro® .....                             | 9  |
| 3.2   | Les composantes des rideaux de bulles .....   | 11 |
| 3.3   | Suivi de fonctionnement des rideaux à bulles.....   | 12 |
| 3.4   | Brassage complémentaire avec des stations ZEFAIR® Sous le pont .....                              | 13 |
| 3.5   | Conclusion-Réflexions 2023- Rideaux à bulles et brassage complémentaire.....                      | 14 |
| 4.    | Aération pour augmenter le brassage et l'oxygénation .....  | 16 |
| 4.1   | Le fonctionnement et objectifs de l'aération ZEFAIR® .....  | 16 |
| 4.2   | Les composantes du dispositif ZEFAIR® .....   | 17 |
| 4.2.1 | ZEFAIR® Secteur H2O/ Le Boat .....  | 17 |
| 4.2.2 | Les stations ZEFAIR entre le secteur H2O et le Boat.....  | 18 |
| 4.2.3 | Suivi de fonctionnement du dispositif Zefair. ....  | 19 |
| 4.3   | Conclusion /réflexions 2023 – Aération grosses bulles .....                                       | 19 |
| 5.    | Épandage de bioadditifs sur l'ensemble de la gare d'eau. ....                                     | 20 |
| 5.1   | Objectifs des biotraitements .....  | 20 |
| 5.2   | Cycle de l'azote .....  | 20 |
| 5.3   | Cycle du phosphore .....  | 22 |
| 5.4   | Objectifs des Biotraitements .....  | 23 |
| 5.5   | Protocole d'essai sur les sédiments de la gare d'eau.....   | 24 |
| 5.6   | Analyses d'eau et de sédiments .....  | 24 |
| 5.7   | Déroulement des différentes applications en bactéries.....  | 31 |
| 5.8   | Conclusion – Biotechnologies.....   | 33 |
| 6.    | Mise en place d'un inhibiteur de photosynthèse .....  | 34 |
| 6.1   | Objectifs.....  | 34 |
| 6.2   | Déroulement des différentes applications en inhibiteur de photosynthèse .....                     | 35 |
| 6.3   | Conclusion /réflexions 2023 - Inhibiteur de photosynthèse .....                                   | 38 |
| 7.    | Faucardage et ramassage .....   | 40 |
| 7.1   | Opérations de faucardage / ramassage .....  | 40 |
| 7.2   | Valorisation agricole du myriophylle hétérophylle par co-compostage .....                         | 42 |
| 8.    | Prises de vue.....  | 43 |
| 8.1   | Prise de vue aérienne par drone .....   | 43 |
| 8.2   | Prise de vue subaquatique .....   | 49 |
| 9.    | Conclusion .....  | 52 |



## SYNTHESE DE L'EXPERIMENTATION DANS LE PORT DE SAINT-JEAN-DE-LOSNE

- **Propriétaire du rapport :** Voies Navigables de France

Direction Rhône-Saône

2 rue de la quarantaine

69321 Lyon Cedex 05

- **Interlocuteurs :**

Mme Karine PASCAL

M. Hugo TEMPLÉ

- **En partenariat avec :**



Probul.fr



Janvier 2024

# 1. Contexte et objectifs du renouvellement de l'expérimentation

La gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne a longtemps été confrontée à un défi écologique majeur en raison de l'invasion persistante du myriophylle hétérophylle, une plante aquatique envahissante.

Face à la rapide expansion du myriophylle hétérophylle, des mesures ont été instaurées par les intervenants locaux, telles que le faucardage (coupe des plantes). Chaque année depuis 2017, cette méthode est employée pour tenter de limiter l'emprise de la plante sur l'écosystème. Toutefois, il s'agit d'une solution curative à court terme contre cette espèce, car la régulation de la plante s'avère complexe en raison de sa tolérance aux conditions physico-chimiques du milieu et de sa résistance aux aléas climatiques.

La complexité de la régulation découle de la capacité du myriophylle à prospérer dans des conditions environnementales variées, même dans des milieux appauvris en nutriments, bien qu'il préfère les environnements riches en éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore. La reproduction de la plante par bouturage accroît sa rapidité de propagation (c'est une des origines possibles de son introduction dans la gare d'eau), avec des tiges pouvant atteindre 30 cm par semaine. En été, les tiges florales créent des tapis denses à la surface de l'eau, s'élevant parfois à 20 à 30 cm au-dessus de la surface pendant la floraison.

Originaire d'Amérique du Nord et Centrale, le myriophylle hétérophylle est une plante exotique, introduite dans un environnement qui n'est pas le sien. Contrairement aux plantes indigènes, cette espèce invasive n'est pas soumise à une concurrence biotique, ce qui lui permet parfois de coloniser entièrement un écosystème aquatique, entraînant une diminution de la biodiversité locale.

À Saint-Jean-de-Losne, toutes les conditions favorables à la prolifération du myriophylle sont présentes : eau stagnante malgré la circulation fluviale, claire et peu profonde, riches en nutriments, avec un volume important de sédiments dans le fond, constituant une source de nutriments supplémentaire. L'étude exploratoire réalisée par l'entreprise Aquascop révèle un recouvrement quasi-total du fond de la gare d'eau par cette espèce, rendant son extraction de l'environnement complexe une fois installée.

Pour rappeler les problématiques majeures engendrées par la pousse de la plante :

- Une circulation fluviale entravée ;
- Perturbation des activités nautique et de pêche ;
- Accélération significative du volume de matière organique dans le fond du plan d'eau ;
- Coûts d'entretien élevés au regard de l'efficacité des actions apportées ;
- Modification globale de l'écosystème avec la prolifération d'une seule espèce





*Photo drone de la gare d'eau de Saint Jean de Losne juin 2021 – Crédit H2O / Max Gérard*

Pour faire face à cette problématique, un protocole expérimental a été initié en 2022 (février à octobre), visant à contrôler la prolifération de cette plante dans la région.

Il était constitué de :

1. Le déploiement de rideaux à bulles pour limiter les apports d'eau entre la gare d'eau et la Saône et d'éviter la dispersion de fragments de myriophylle ;
2. L'application de biotraitements sur l'ensemble de la gare d'eau pour limiter la ressource nutritive de l'écosystème ;
3. Le déploiement de deux solutions d'aération pour oxygéner et brasser les volumes d'eau (fines et grosses bulles) ;
4. L'application d'un inhibiteur de photosynthèse pour limiter les cycles de photosynthèse du myriophylle hétérophylle ;
5. Services non prévus au départ de faucardage et de ramassage mécanique par engin amphibie.



Figure 1 : Localisation en 2022 des rideaux de bulles (Rideaux à bulles BubblePro®), des aérateurs fines bulles (aération alternée BubblePro®) et des diffuseurs grosses bulles (aérateurs ZEFAIR®). Crédit Inoval

L'approche expérimentale adoptée pour aborder la croissance du myriophylle hétérophylle a impliqué une exploration méticuleuse de diverses méthodes de contrôle biologiques et mécaniques. Cette démarche a été conçue dans le but de limiter la prolifération de cette plante aquatique envahissante tout en prenant en considération les répercussions sur l'équilibre de l'écosystème local. Les ajustements apportés en 2023 ont été le fruit d'une analyse approfondie des résultats des tests pilotes de 2022 et visaient à affiner le protocole afin d'optimiser son efficacité.

Cette initiative témoigne de l'engagement de la communauté locale à trouver des solutions durables pour contrer la menace environnementale posée par l'invasion du myriophylle hétérophylle. Les conclusions tirées des résultats obtenus ainsi que les ajustements continus du protocole mettent en lumière l'importance cruciale de l'adaptabilité et de la vigilance dans la gestion des défis écologiques complexes.

Pour 2023 a ainsi été proposé :

- Le déploiement de rideaux à bulles pour limiter les apports d'eau entre la gare d'eau et la Saône et d'éviter la dispersion de fragments de myriophylle ;
- L'application de biotraitements sur l'ensemble de la gare d'eau pour limiter la ressource nutritive de l'écosystème ;
- Le déploiement de la solution d'aération pour brasser et aérer les volumes d'eau par l'intermédiaire des grosses bulles (les fines bulles étant jugées inefficaces contre la plante car celles-ci poussaient tout de même le long des bulleuses fines bulles) ;
- L'application d'un inhibiteur de photosynthèse pour limiter les cycles de photosynthèse du myriophylle hétérophylle ;
- Faucardage et de ramassage mécanique par engin amphibie.

- Le suivi régulier des paramètres physico chimiques de l'écosystème, et l'observation de la gare d'eau a également été effectué grâce à du matériel spécifique détenu par Inoval.



Figure 2 : Localisation en 2023 des rideaux de bulles (Rideaux à bulles BubblePro®) et des diffuseurs grosses bulles (aérateurs ZEFAIR®). Crédit Inoval

=

## 2. Introduction aux systèmes d'oxygénation déployés dans la Gare d'eau de Saint Jean Losne

Depuis 2016, l'entreprise INOVAL dispose d'une gamme étendue de dispositifs d'aération destinés à réguler et corriger divers problèmes rencontrés dans différents types d'écosystèmes. Nous avons donc entrepris de proposer des solutions d'aération adaptées aux caractéristiques spécifiques de la gare d'eau de Saint Jean de Losne. Ces solutions ont été conçues pour s'intégrer harmonieusement à l'écosystème sans entraver la circulation fluviale, d'où notre choix de privilégier les modèles subaquatiques.

Un système d'aération par injection d'air atmosphérique au fond d'un écosystème comprend plusieurs éléments essentiels :

- Un système de compression installé près des berges de l'écosystème ciblé. Ce choix dépend de sa technologie de fonctionnement (membranes, à palette, à vis, à bec), des caractéristiques de l'écosystème (profondeur, variations de profondeur, salinité), de son raccordement en air et de son dispositif d'oxygénation appelé « diffuseur ». Nous accordons une attention particulière au niveau de bruit généré, à la consommation électrique et à la facilité de maintenance.
- Le transport de l'air se fait à travers des « tuyaux lestés », fabriqués par INOVAL, conçus pour avoir une masse suffisamment importante afin de couler naturellement et de reposer sur les sédiments. Leur conception interne lisse vise à réduire le frottement de l'air dans le tuyau, optimisant ainsi le système d'injection d'air et les coûts associés. Bien que plusieurs diamètres soient disponibles, le choix dépend des distances entre le point A, déterminé par le compresseur, et les diffuseurs. Plus la profondeur de l'écosystème est grande, plus le compresseur doit être dimensionné correctement pour pousser l'air jusqu'aux diffuseurs et permettre ainsi le bon fonctionnement du système.

$$h_f = 7.57 * L * 10^4 * \frac{Q^{1.85}}{D^5 * (p)}$$

Figure 3 : Formule des Pertes de charge dues au frottement

« Diffuseur » choix et modélisation : Sur la gare de Saint-Jean-de-Losne et par rapport à l'expérimentation de 2022, la diffusion fines bulles n'a pas été sélectionnée, nous avons choisi :

- Le rideau de bulles BubblePro® ;
- Le diffuseur Zefair® par grosses bulles.

Les deux solutions proposées seront ainsi abordées dans les chapitres suivants.



### 3. Déploiement des rideaux de bulles pour limiter les échanges entre la Saône et la Gare d'eau

#### 3.1 Le fonctionnement et objectifs d'un rideau de bulles BubblePro®

Le rideau de bulles est un outil de protection de barrière environnementale sous-marine. Il peut être placé au fond des mers, rivières et lacs ou suspendu autour d'une structure sous-marine afin de créer un rideau de bulles linéaire en continu dans la colonne d'eau. Le rideau de bulles est un diffuseur qui se caractérise principalement par les moyennes et grosses bulles.

Le volume d'air injecté dans le diffuseur par minute est déterminé pour que ce diffuseur remplisse ces actions spécifiques de :

- Cloisonnement de l'écosystème grâce à la formation littérale d'un « Rideau de bulles »,
- Création d'un effet contre-courant grâce à la remontée des bulles dans l'écosystème,

Entre les diffuseurs, les forces de frottement entre les bulles d'air en ascension et l'eau créent des courants d'eau ascendants accélérant la vitesse de montée des bulles.

Les contres courants générés par le rideau de bulles permettent de limiter la pénétration des éléments flottants et de ce fait limiter la prolifération des plantes vers la Saône et donc sa contamination (voir photo ci-dessous).



Figure 4 : Prise de vue n°1 : Contres courants générés par le rideau à bulles. Crédit Inoval

D'une manière générale le fonctionnement d'un rideau à bulles repose sur :

- L'injection d'air comprimé dans un réseau d'air par l'intermédiaire d'un compresseur,
- L'air injecté alimente un diffuseur linéaire permettant de générer des bulles,
- L'air comprimé crée une pression interne dans toute la longueur du tuyau permettant la création d'un rideau de bulles uniformes,
- Les bulles remontent à la surface créant un courant vertical.

Dans le cadre de l'expérimentation, les objectifs des rideaux à bulles jouent un rôle direct et indirect sur la maîtrise du myriophylle hétérophylle, à savoir :

- Limiter la recontamination du plan d'eau par le canal de Bourgogne et la Saône ;
- Limiter les apports d'eau de la Saône riches en nitrates pour les plantes aquatiques ;
- Limiter la dispersion des boutures provenant de la gare d'eau dans la Saône.

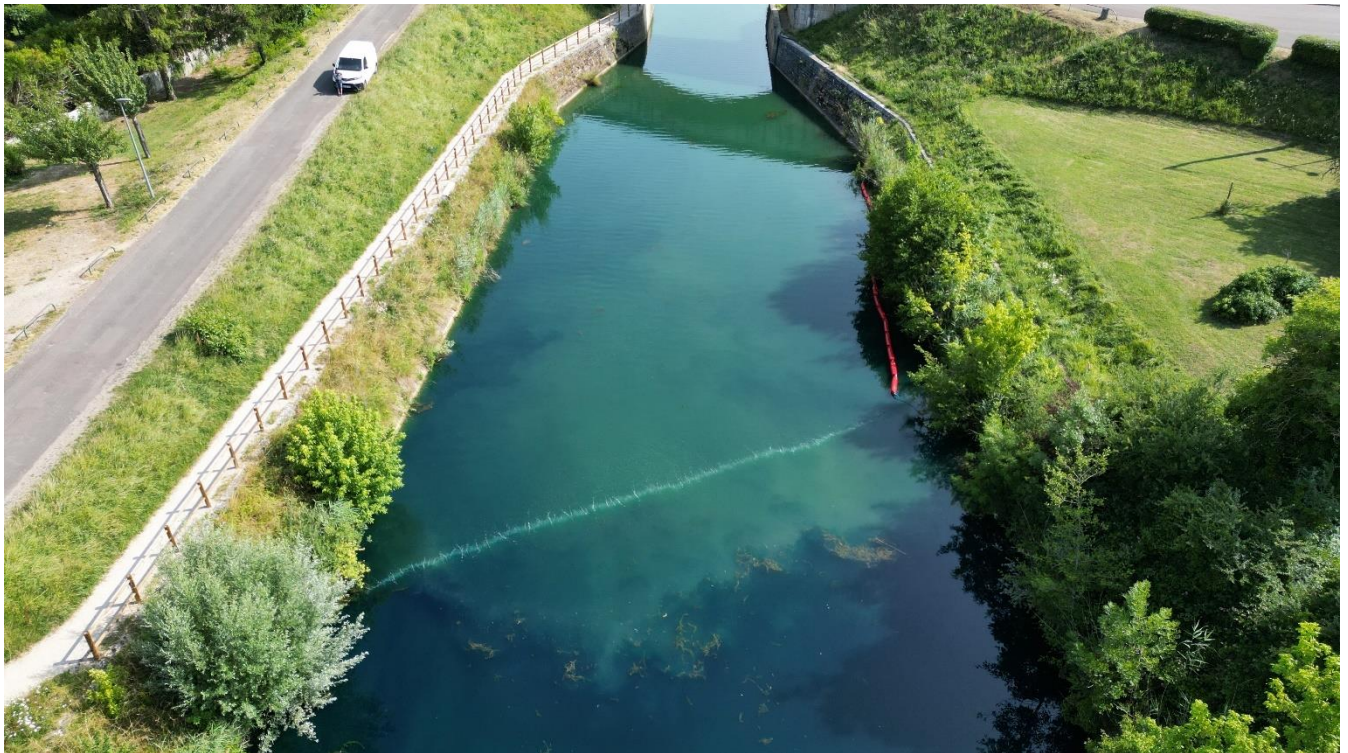


Figure 5 : Prise de vue n°2 : rideaux à bulles en fonctionnement à l'entrée de la Gare d'eau. Crédit Inoval



### 3.2 Les composantes des rideaux de bulles

Pour pouvoir isoler la gare d'eau de la Saône, la société INOVAL a proposé un système de rideaux à bulles constitué :

- Numéro 1 : d'un coffret compresseur insonorisé de 80 m<sup>3</sup>/h positionné dans un local technique ;
- Numéro 2 : des longueurs de tuyau d'alimentation d'air lesté pour alimenter les rideaux de bulles alimentant les deux parties du rideau ;
- Numéro 3 : le rideau de bulles BubblePro® de 30 mètres autolestés.

Il est à noter que les dispositifs de rideaux à bulles en 2022 considéraient trois rideaux à bulles 1/2" contre un rideau à bulle de diamètre 3/4" en 2023.



Figure 6 : Disposition des différents composants du rideau à bulles à l'entrée de la Gare d'eau. Crédit Inoval

### *3.3 Suivi de fonctionnement des rideaux à bulles*

La réutilisation des éléments liés à la précédente expérimentation a facilité le temps de mise en service, le rideau était opérationnel en une journée.

La mise en place du rideau de bulles a eu lieu le 24 avril 2023.

Pour optimiser le bullage, le rideau fut alimenté par ses deux extrémités.

Le 15 juin un barrage flottant a complété l'installation pour faciliter la collecte des plantes aquatiques (suite du RETEX 2022).



*Figure 7 : vue aérienne du rideau à bulles. Crédit Inoval*

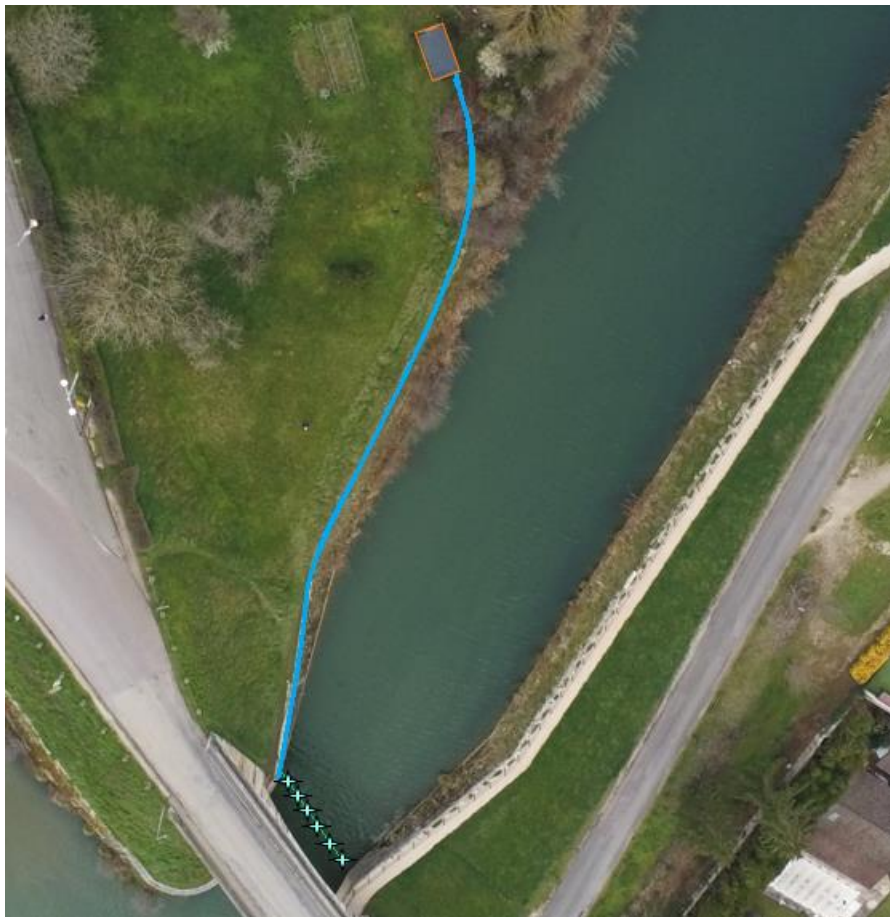


### *3.4 Brassage complémentaire avec des stations ZEFAIR® Sous le pont*

La technologie ZEFAIR repose sur une diffusion de moyennes et grosses bulles. L'intérêt ici est d'augmenter la vitesse de la bulle dans l'effluent pour créer un brassage du fond jusqu'à la surface de l'eau.

Ce brassage complémentaire avec la technologie ZEFAIR a pour objectifs de :

- Renforcer l'action du rideau à bulles existant et d'éviter ainsi la dispersion des plantes dans la Saône,
- Brasser les volumes d'eau pour limiter les transferts d'eau entre la Sane et la gare d'eau de Saint Jean de Losne,



*Figure 8 : Disposition des différents composants de l'aération grosses bulles avec la technologie ZEFAIR® sous le pont. Crédit Inoval*

6 stations ZEFAIR® ont été disposées le 27 mars 2023 sous le pont, à la sortie de la gare d'eau pour pouvoir retenir les potentiels éléments flottants issus des opérations de faucardage.

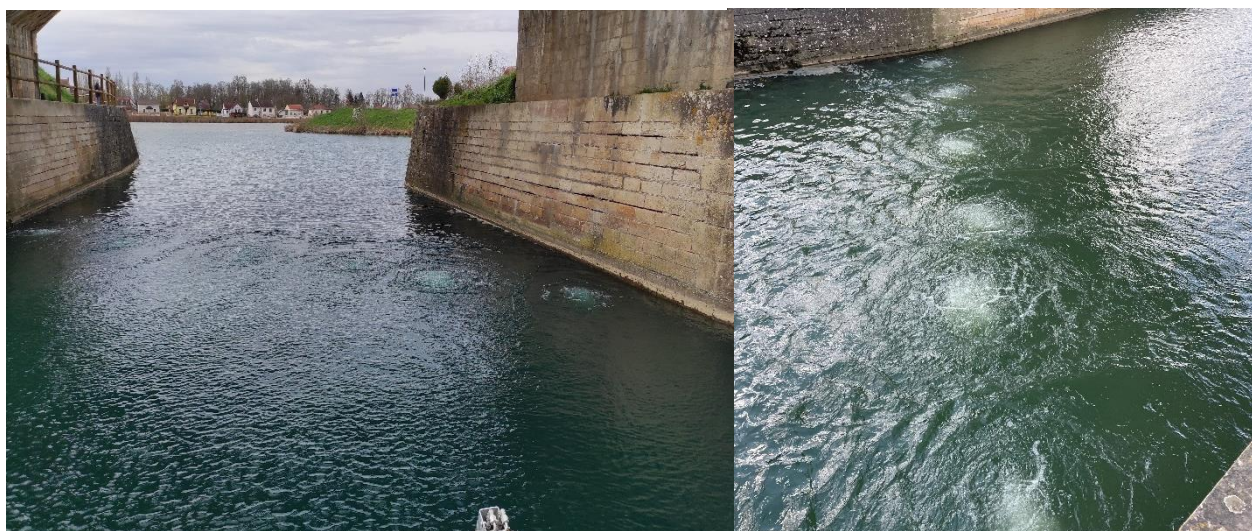


Figure 9 : Disposition stations ZEFAIR® pour entraver le passage des flottants sous le pont reliant la gare d'eau aux rives de la Saône.  
Crédit Inoval

Lors de l'intervention du 24 avril, un sabotage a été constaté sur l'aération ZEFAIR.

Effectivement, les vannes d'arrivées d'air ont été coupées plusieurs fois empêchant le système de fonctionner correctement. Différentes remises en état ont eu lieux dans les jours suivants.

### *3.5 Conclusion-Réflexions 2023- Rideaux à bulles et brassage complémentaire*

Les résultats de l'étude ont démontré que la technologie des rideaux à bulles présente un réel intérêt pour contrôler les flottants présents dans la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne. Cette technologie s'avère indispensable pendant les opérations de faucardage, permettant une gestion efficace des débris végétaux.

Cependant, il convient d'être attentif aux nuisances sonores générées par les compresseurs ainsi qu'à la consommation électrique importante liée à un usage continu. La configuration de la gare d'eau, et plus particulièrement du chenal d'entrée, est toutefois une configuration idéale pour l'utilisation de cette technologie.

Le brassage des volumes d'eau par la technologie ZEFAIR en remplacement du rideau de bulles a également présenté des intérêts. Néanmoins, des adaptations sont recommandées pour en améliorer l'efficacité, comme l'utilisation de diffuseurs sur un support linéaire plutôt que sur un socle de station.

De plus, cette technologie de brassage s'avère être moins énergivore que les rideaux à bulles. Elle sera donc plus appropriée pour un usage continu, complémentaire à l'utilisation des rideaux à bulles.

En conclusion, la combinaison des rideaux à bulles et du brassage complémentaire par la technologie ZEFAIR adaptée constitue une solution efficace et durable pour la gestion des flottants dans la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne. Cette approche permet de répondre aux enjeux de contrôle des débris végétaux tout en limitant les impacts environnementaux.

En 2023, un pas supplémentaire a été franchi avec l'ajout d'un barrage flottant, conçu pour capturer les débris à la surface de l'eau. Cet ajout de barrage vise à contenir et à récupérer efficacement les plantes aquatiques, contribuant ainsi à la préservation du bassin versant. Cette collecte par l'intermédiaire d'un barrage flottant doit être couplé par du ramassage mécanique avec un engin amphibie.

Comme énoncé dans le précédent rapport, si les rideaux à bulles devaient rester en place pendant plusieurs années, il serait recommandé d'installer un collecteur permanent à proximité de la rive. Cette barrière physique éviterait l'utilisation régulière d'engins amphibies pour le ramassage des myriophylles hétérophylles et autres déchets, optimisant ainsi les ressources et réduisant les perturbations supplémentaires de l'environnement.



*Figure 10 : vue aérienne du rideau à bulles et du barrage flottant. Crédit Inoval*



## 4. Aération pour augmenter le brassage et l'oxygénation

### 4.1 Le fonctionnement et objectifs de l'aération ZEFAIR®

Le diffuseur Zefair® est une technologie créée par Inoval. Elle repose sur un diffuseur disposant d'un revêtement perméable aléatoire, lui permettant d'absorber et de relâcher un volume d'air de façon quasi-totale sans contrainte de pression de fonctionnement. Le diffuseur comprend une hauteur de 10 cm, d'une largeur de 30 cm et d'une longueur de 40 cm pour une surface totale de diffusion de 0.12 m<sup>2</sup>.



Figure 11 : Diffuseur ZEFAIR® en fonctionnement. Crédit Inoval

Cette technologie repose sur une diffusion de moyennes et grosses bulles. L'intérêt ici est d'augmenter la vitesse de la bulle dans l'effluent pour créer un brassage du fond jusqu'à la surface de l'eau.

Ici le brassage est volontairement provoqué comparativement à l'oxygénation. En effet un plan d'eau dit « stagnant » est une masse d'eau qui n'est en mouvement que par les forces provoquées par le vent ou dans ce cas précis par les allers et venues des embarcations. La gare d'eau étant visuellement dans une « cuvette » et peu exposée aux vents, il était essentiel d'installer des diffuseurs Zefair® dans des zones spécifiques dites « cloisonnées ». Ces diffuseurs ont un cercle de brassage équivalent à un cercle de diffusion visuel à la surface de l'eau d'une dizaine de mètres au total. Les stations Zefair® ont donc été disposées de façon stratégique dans les zones prioritaires et de façon uniforme à équidistance les unes des autres pour limiter les zones de stagnations.

Les diffuseurs Zefair® déployés entre le Boat et H2O avaient pour objectifs :

- De brasser 3 000 m<sup>3</sup>/heure permettant le mélange 4 fois par jour d'une surface d'eau de 10 000 m<sup>2</sup>. Ce brassage a pour objectif de perturber le développement du myriophylle hétérophylle sur l'ensemble de la colonne d'eau,
- De créer des zones de survie pour éviter la mortalité éventuelle des poissons.



## 4.2 Les composantes du dispositif ZEFAIR®

### 4.2.1 ZEFAIR® Secteur H2O/ Le Boat

La société INOVAL a réutilisé l'installation effectuée en 2022, c'est à dire :

1. D'un compresseur alimentant un réseau d'air à raison de de 40 m3/heure,
2. D'une nourrisse d'alimentation d'air en PE 63 mm permettant d'acheminer l'air jusqu'au tuyau lesté,
3. Du tuyau lesté Probul®, chargé d'acheminer l'air de la nourrisse d'alimentation en air jusqu'aux différentes stations Zefair®. Ce tuyau d'air lesté est conçu pour les applications sous-marines, il coule de son propre poids,
4. 12 stations Zefair®. Celles-ci sont repiquées sur la nourrisse principale. Elles disposent d'une vanne de réglage du débit d'air dans les deux regards de réglage.



Figure 12 : Disposition des différents composants de l'aération grosses bulles avec la technologie ZEFAIR® secteur H2O Le Boat. Crédit Inoval

#### 4.2.2 Les stations ZEFAIR entre le secteur H2O et le Boat

Ces diffuseurs grosses bulles ZEFAIR® ont été installés entre le Boat et H2O et mis en service le 24 avril 2023.

Tout comme l'année passée, les stations se sont montrées opérationnelles pour effectuer un brassage et une oxygénation de la colonne d'eau. Une optimisation du bullage a été effectuée le 21 juin 2023.



Figure 13 : Prise de vue n°7 Système d'aération ZEFAIR en fonctionnement. Crédit Inoval

#### *4.2.3 Suivi de fonctionnement du dispositif Zefair.*

Les stations se montrent efficaces et opérationnelles, il n'y a globalement pas de remarque à souligner jusqu'au 20 mai. En bordure, il y a une apparition de plantes flottantes et algues filamenteuses résultant du faucardage venant s'y attacher.

Toutefois dans le mois de juillet 2023, la nourrisse d'air principal du dispositif d'oxygénation a été endommagé lors d'une opération de broyage.

#### *4.3 Conclusion /réflexions 2023 – Aération grosses bulles*

Le système d'aération ZEFAIR® d'Inoval a été déployé avec succès dans la gare d'eau entre le Boat et H2O. Le dispositif, composé d'un compresseur, d'une nourrisse d'alimentation en air, d'un tuyau lesté et de 12 stations ZEFAIR®, a fonctionné de manière satisfaisante. Bien qu'une optimisation du bullage ait été nécessaire en juin 2023 et qu'une apparition d'algues ait été observée lors des canicules, le système a démontré son efficacité globale.

Cette technologie innovante de diffusion de moyennes et grosses bulles a permis d'atteindre partiellement les objectifs fixés.

En effet le brassage ne perturbe pas le développement des plantes aquatiques toujours présentes à proximité des diffuseurs, toutefois, la création de zones oxygénées a évité la mortalité des poissons en leur offrant des zones de survie.

Malgré un incident mineur lié au broyage en juillet 2023, le suivi de fonctionnement a confirmé la performance du dispositif ZEFAIR® pour assurer un brassage et une oxygénation adéquats de la gare d'eau. Cette solution innovante représente uniquement un intérêt pour palier à un éventuel déficit en oxygène.

## 5. Épandage de bioadditifs sur l'ensemble de la gare d'eau.

### *5.1 Objectifs des biotraitements*

Les biotraitements BactaPro® jouent un rôle crucial dans la lutte contre les plantes exotiques envahissantes comme le myriophylle hétérophylle. Leur action principale consiste à réduire les nutriments essentiels à la croissance de ces plantes, notamment sur le cycle de l'azote et du phosphore. Ces traitements agissent sur plusieurs aspects de l'écosystème aquatique, tout d'abord, ils favorisent la décomposition des sédiments organiques. De plus, les bactéries bénéfiques introduites contribuent à la précipitation du phosphore dans les sédiments, le rendant moins disponible pour les plantes en surface. En ce qui concerne le cycle de l'azote, les biotraitements jouent un rôle régulateur important. Ils aident à convertir les formes toxiques de l'azote, comme l'ammoniac, en formes moins nocives, réduisant ainsi les effets néfastes sur la faune aquatique et limitant la croissance excessive des plantes envahissantes. L'ensemble de ces actions contribue à rétablir l'équilibre biologique de l'écosystème aquatique, créant des conditions moins favorables à la prolifération des plantes exotiques envahissantes comme le myriophylle hétérophylle.

### *5.2 Cycle de l'azote*

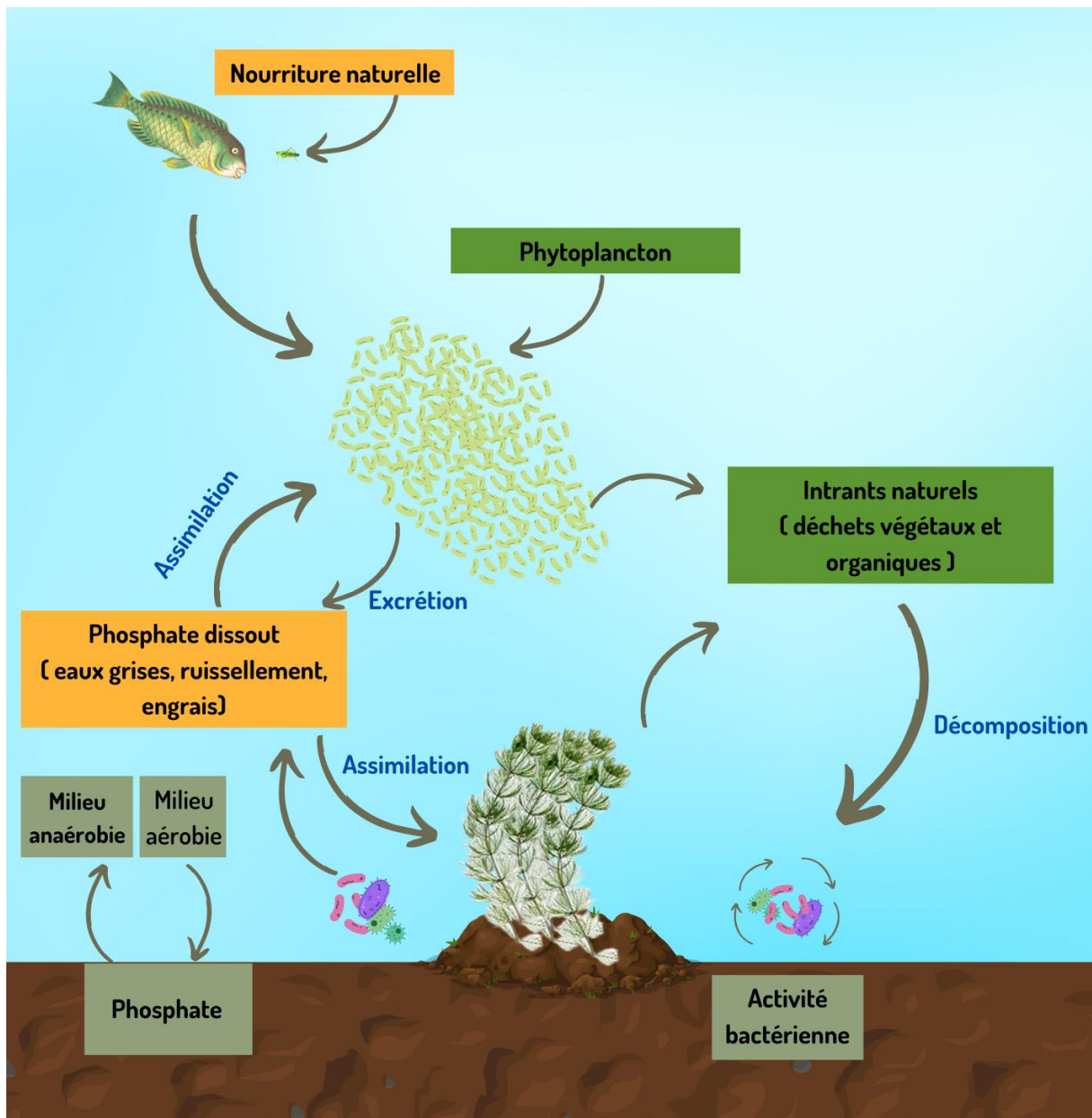
Le cycle de l'azote est un processus crucial pour maintenir l'équilibre écologique dans les écosystèmes aquatiques. Il implique une série de transformations chimiques de l'azote, qui permettent aux organismes vivants d'utiliser cette substance pour leur croissance et leur survie. Pour mieux comprendre ce cycle, voici ci-dessous le schéma illustrant les différentes étapes de ces processus.





### 5.3 Cycle du phosphore

Dans un écosystème aquatique, le cycle du phosphore est essentiel car il est un élément clé pour la croissance des organismes aquatiques. Les algues et les plantes aquatiques absorbent le phosphore des sédiments ou de l'eau pour leur croissance, et les poissons et autres animaux aquatiques consomment ces algues et plantes pour leur propre croissance. Cependant, une augmentation des niveaux de phosphore dans l'eau peut entraîner une prolifération excessive d'algues, ce qui peut épuiser l'oxygène dans l'eau et causer la mort de nombreux organismes aquatiques. Par conséquent, comprendre et maintenir un équilibre adéquat du cycle du phosphore dans un écosystème aquatique est crucial pour la santé et la survie de tous les organismes qui y vivent.



#### 5.4 Objectifs des Biotraitements

Les bactéries bénéfiques sont naturellement présentes dans les lacs et les étangs et sont responsables du traitement des matières organiques mortes. Il existe de nombreux types de bactéries, qui agissent de manières différentes pour décomposer les composés organiques (la vase).

Les bactéries aérobies utilisent l'oxygène et décomposent rapidement les composés organiques. Les bactéries anaérobies, quant à elles, sont capables de travailler sans oxygène. Les deux types de bactéries produisent des enzymes qui leur permettent de décomposer les composés organiques morts et de les introduire dans leurs cellules sous forme de nutriments.

De nombreuses bactéries effectuent également une dénitrification, en phase anaérobie, transformant le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) en azote gazeux ( $\text{N}_2$ ) et l'éliminant ainsi de l'écosystème. L'azote n'est ainsi plus assimilé par les plantes.

Au fur et à mesure que les bactéries se développent et se reproduisent, elles retiennent partiellement le phosphore et l'azote dans leurs cellules afin qu'ils ne soient moins disponibles pour les plantes nuisibles. La majorité des bactéries vont se déposer au fond de la gare d'eau et sur les côtés (pente submergée de la berge) de l'écosystème (zones benthiques) où elles décomposent la matière organique en excès.

Certaines des bactéries restent dans la colonne d'eau, où elles traitent le phytoplancton mort et les nutriments solubles.

Il existe de nombreux types et formulations de bactéries bénéfiques. La plupart des formulations de produits sont basées sur des bactéries aérobies et ciblent des composés qui se dégradent lentement. La société INOVAL utilise différentes formulations appelées consortiums. Afin de sélectionner la bonne formulation de bioadditifs (bactéries bénéfiques), nous avons apprécié la performance de ces dernières dans une étude réalisée sur des échantillons de sédiments prélevés dans la gare d'eau de Saint-Jean-Losne en 2021.

L'objectif de cette étude était de démontrer la faisabilité d'un traitement via un bioadditif des sédiments de la gare d'eau de St Jean de Losne en considérant :

- Les meilleures souches à utiliser,
- Les capacités de biodégradation de celles-ci sur des échantillons de vase de la gare d'eau de Saint Jean de Losne.

Après avoir réalisé un échantillonnage dans la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne, les essais ont été lancés le 3 janvier 2022 pour tester deux consortiums mis en évidence par la société INOVAL. Ces derniers, constitués de bactéries hétérotrophes de type Bacillus et qui appartiennent à la classe 1 du règlement Européen 2000/54 CE.

### 5.5 Protocole d'essai sur les sédiments de la gare d'eau

Dans les conditions de la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne, le protocole retenu est le suivant :

- Une introduction de 5 litres de concentré de CAN110 par mois de bactéries BactaPro® « dégradation de la vase »,
- Une application mensuelle de mars à octobre 2023,
- Une concentration bactérienne :  $>1.10^{10}$  bactéries/ml,
- Des applications à l'aide de l'engin amphibie TRUXOR muni d'une rampe d'épandage.



Figure 14 : Prise de vue n° : Épandage d'un bidon de 5 litres en format concentré Crédit Inoval

### 5.6 Analyses d'eau et de sédiments

Avant chaque introduction de bactéries bénéfiques, la société INOVAL a réalisé des analyses d'eau et de sédiments afin de pouvoir adapter son protocole de traitement et surveiller certains paramètres sensibles pour les milieux aquatiques.

Les prélèvements sont réalisés au moyen d'une canne de prélèvement afin de constituer un total d'échantillons moyens représentatifs sur la base de 10 prélèvements. Les échantillons ont ensuite été envoyés à un laboratoire accrédité COFRAC.

Voici la liste des paramètres analysés tous les mois (de mars à octobre 2023) :

Pour les analyses d'eau (prélèvements réalisés à mi-hauteur de colonne d'eau) : Matière en suspension (mg/l), pH, Azote totale Kjeldahl (mg/l), Azote ammoniacal  $\text{NH}_4^+$  (mg N/l), Azote



nitreux  $\text{NO}_2^-$  (mg N/l), les nitrates  $\text{NO}_3^-$  (mg N/l), Phosphore total  $\text{P}_2\text{O}_5$  (mg/l), Orthophosphate  $\text{PO}_4$  (mg/l),

Pour les analyses de sédiments (prélèvements réalisés dans les 30 premiers centimètres de la couche des sédiments) : Taux de matière sèche, pH, Carbone organique (%), Matière organique (g/kg), totale Kjeldahl (gN/kg), Azote ammoniacal  $\text{NH}_4^+$  (g N/kg), Azote organique (g/kg), Phosphore total  $\text{P}_2\text{O}_5$  (g $\text{P}_2\text{O}_5$ /kg), Potassium total  $\text{K}_2\text{O}$  (g/kg).

Les paramètres principalement suivis pour ajuster les dosages mensuels en biotechnologie sont les suivants :

- Le nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) présent dans la colonne d'eau. C'est un composé azoté intermédiaire de la décomposition de l'ammonium, qui ne se retrouve pas dans un écosystème aquatique équilibré. Lorsqu'il est présent, dans le cas d'un milieu eutrophié, il peut avoir un effet négatif sur la vie aquatique en réduisant la quantité d'oxygène dissous disponible et en perturbant la croissance des poissons et d'autres organismes aquatiques. **Seuil en nitrite à ne pas dépasser : 0,03 mg/litre  $\text{NO}_2^-$  \*.**
- Le nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) peut être converti en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) par les bactéries nitrifiantes (la présence d'oxygène est nécessaire). **Seuil de nitrate à ne pas dépasser : 2 mg/litre  $\text{NO}_3^-$  \*.**
- Le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) présents dans la colonne d'eau. Ces composés en excès peuvent causer des problèmes de qualité de l'eau, tels qu'une modification de la chimie de l'eau et une diminution de l'oxygène dissous. Une surveillance de l'oxygène dissous est donc nécessaire en parallèle. **Seuil d'azote ammoniacal à ne pas dépasser : 0,1 mg/litre  $\text{NH}_4^{+*}$**
- Les orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) sont des ions phosphore qui peuvent être présents dans la colonne d'eau. Les orthophosphates proviennent soit de sources extérieures au milieu (lessivages, eaux grises...) soit des sédiments par des phénomènes de relargage. Ils sont des nutriments importants pour la croissance des algues, ce qui peut entraîner une surabondance d'algues appelée "bloom d'algues". Ils jouent également un rôle important dans la croissance des plantes aquatiques tels que le myriophylle hétérophylle. L'objectif étant de limiter ici le phénomène de relargage (provoqué par des phénomènes d'anoxie dans l'interstice au sédiment) et ainsi une concentration trop importante dans la colonne d'eau. **Seuil d'orthophosphates à ne pas dépasser : 0,1 mg/litre  $\text{PO}_4^{3-}$  \*.**

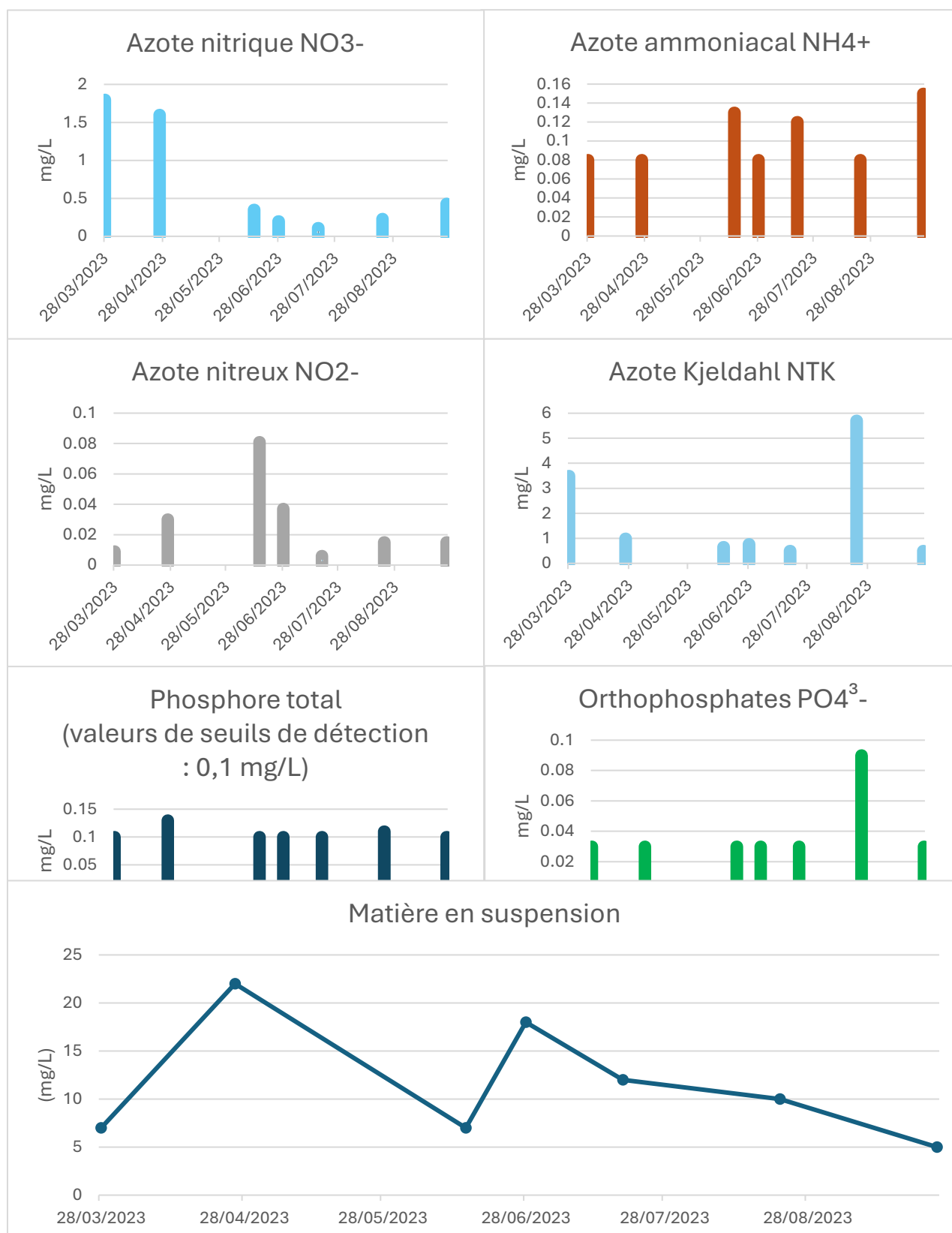
\*Source : Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau – rapport SEQ-EAU

Il est important de noter que les analyses réalisées ici sont utilisées uniquement à des fins d'adaptation de protocoles et ne sont pas destinées à définir l'efficacité ou non sur les plantes.

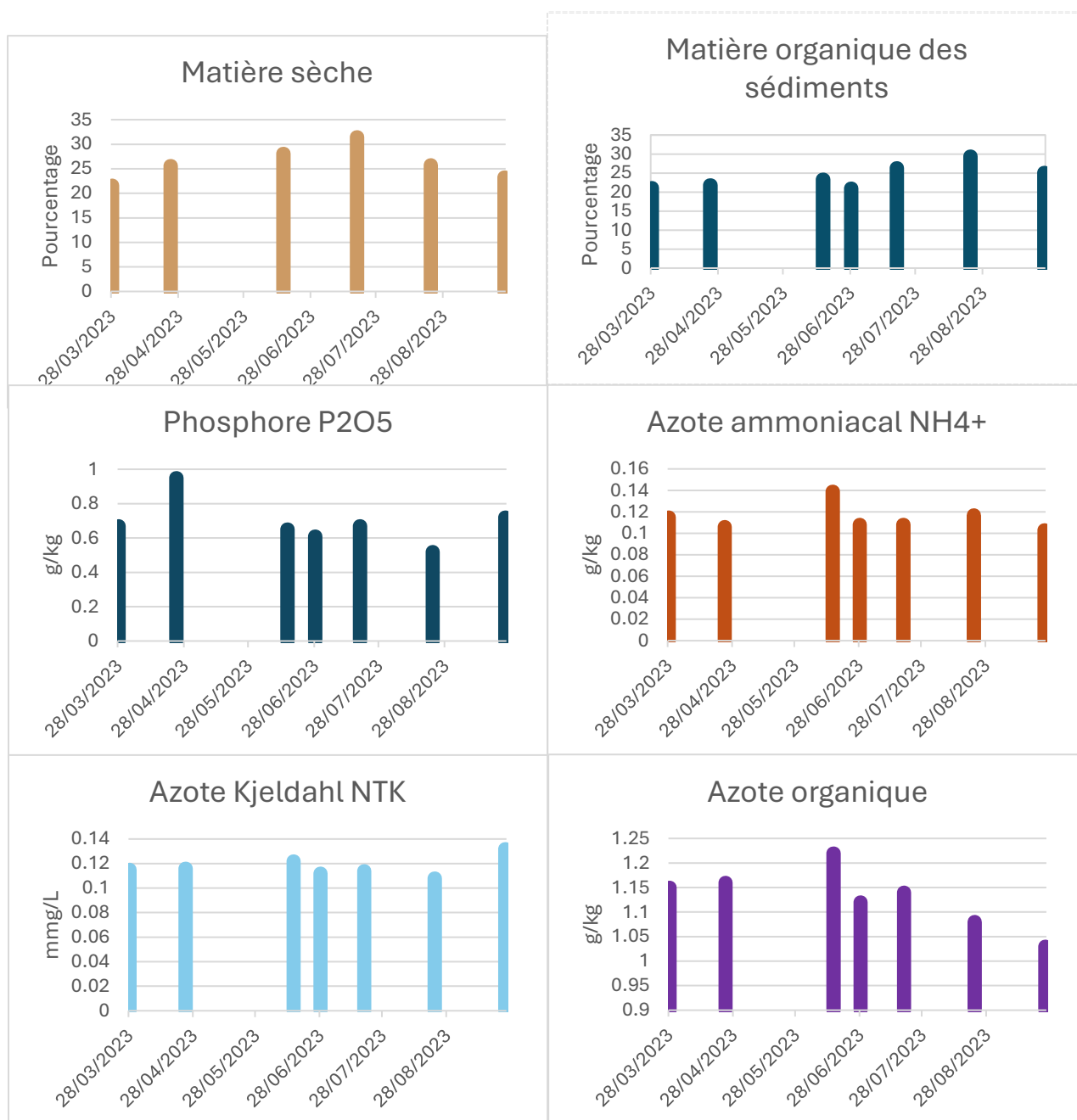
De plus, l'interprétation des résultats d'analyse d'eau et de sédiments peut s'avérer difficile, car de nombreux facteurs peuvent influencer les analyses. Les composants de l'écosystème aquatique, tels que les minéraux et les micro-organismes, ainsi que les contaminants d'origine

humaine, peuvent tous affecter les résultats des analyses. Il est donc crucial de prendre en compte tous les facteurs pertinents pour comprendre la santé globale de l'écosystème aquatique. L'université de Lorraine est consciente de l'importance de cette approche complexe et abordera ces points lors de ses études et recherches.

Résultats des analyses d'eau (analyses réalisées par la société Inoval) :



Résultats des analyses des sédiments (analyses réalisées par la société Inoval) :

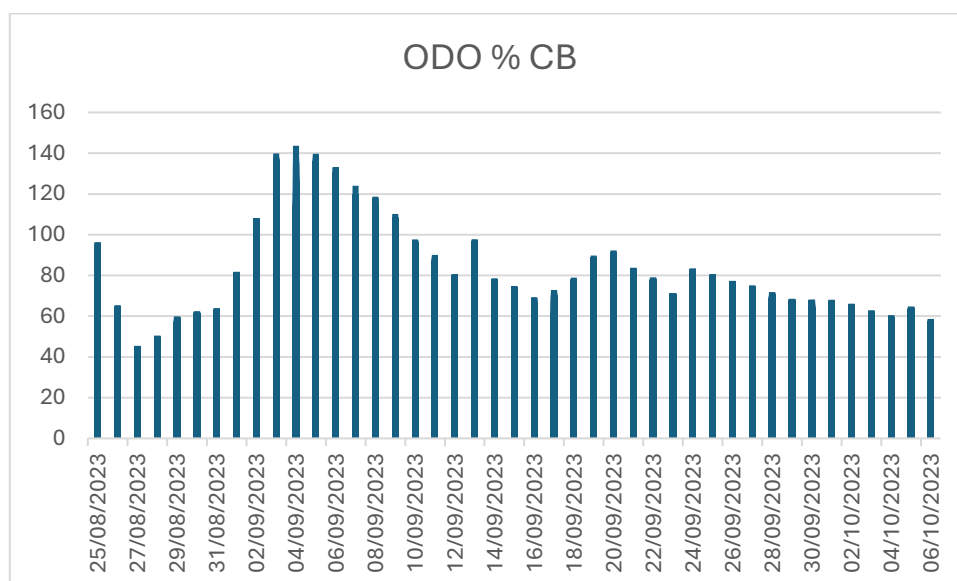
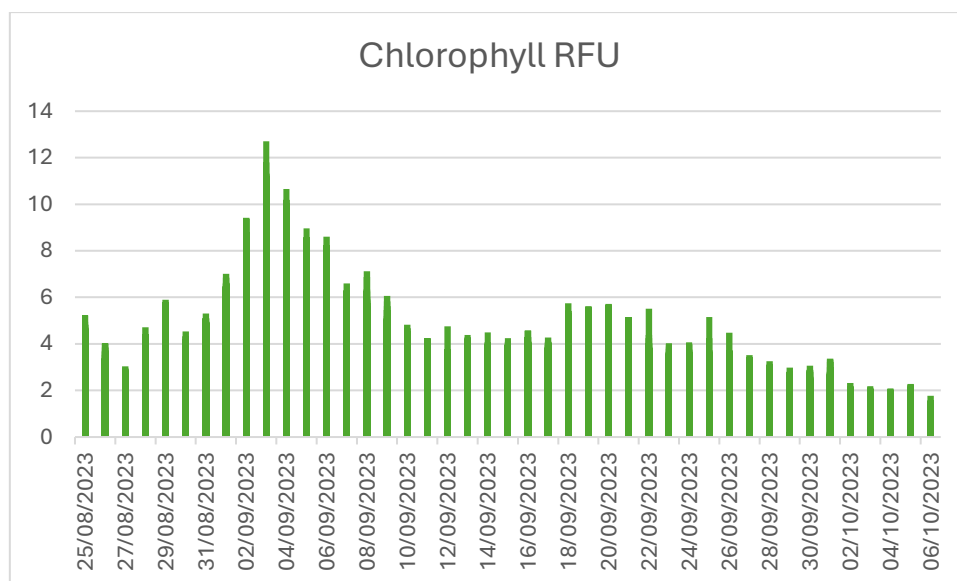


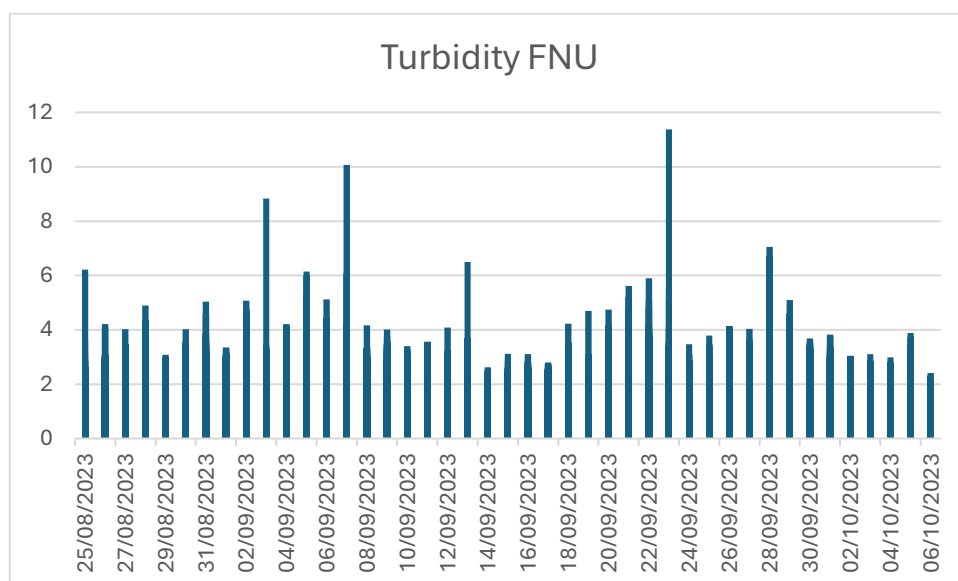
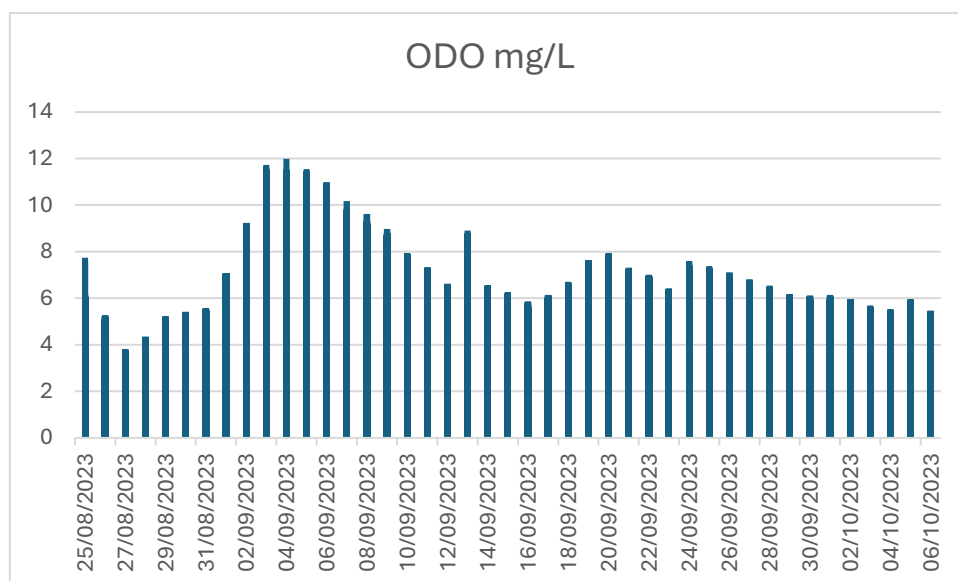


Une sonde multiparamètre EXO 3 a été installée dans l'été 2023 pour compléter les analyses, pour analyser l'oxygène dissous, la chlorophylle et la turbidité dans l'écosystème.



Les résultats effectués du 25 août au 6 octobre 2023 :







### 5.7 Déroulement des différentes applications en bactéries

La première application en bactéries, effectuée le mercredi 29 mars 2023, à raison de 5 litres de BactaPro Dégradation de la vase en formulation concentrée ( $>1.10^{10}$  bactéries/ml) ce qui explique la différence de quantité épandue. L'introduction des biotechnologies BactaPro® « Dégradation de la vase » est rendue possible grâce à une buse d'épandage installée depuis l'engin amphibie TRUXOR.



Figure 15 : Prise de vue n° : Application des biotraitements le 29/03/2023 grâce à l'engin amphibie et sa buse d'épandage. Crédit Inoval

La seconde application de 5 litres de bactéries a été effectuée le 24 avril 2023 dans l'écosystème.

Les mois suivants, le 23 mai (troisième application), le 15 juin (quatrième application), 18 juillet (cinquième application), 28 août (sixième application) et le 25 septembre (septième application) un épandage de 5 litres/mois fût introduit également dans l'écosystème. 22/08 – 25/09

Enfin durant l'intervention du 31 octobre, aucun traitement n'a été effectué, signant ainsi la fin de l'expérimentation sur deux années consécutives.

Il est à noter que deux applications de bactéries nitrifiantes ont eu lieu, une au mois d'août et une en septembre à raison de 5 litres par mois pour réduire l'accumulation de ces nutriments avant que les conditions automnales n'entraînent un dépôt plus important dans les sédiments.



*Figure 16 : Prise de vue n° : application des biotraitements avec un engin amphibie le 18.07.23*

## 5.8 Conclusion – Biotechnologies

En résumé, pour la formulation BactaPro® « Dégradation de la vase », un épandage mensuel de 5 litres de concentré a été utilisé, à l'exception du mois d'octobre. Ainsi, l'expérimentation de cette année 2023 totalise l'introduction de 35 litres en formulation concentrée à  $10^{10}$  bactéries hétérotrophes. Comme en 2022, les applications en bactéries nitrifiantes ont été réalisées entre le mois d'août et le mois de septembre.

Les résultats constatés en 2022 et 2023 permettent de faire émerger les points suivants :

- Une application mensuelle de  $0,025 \text{ ml/m}^3$  de la solution bactérienne BactaPro® "Dégradation de la vase" a été mise en œuvre pour réguler la charge nutritive de l'écosystème aquatique étudié. Bien qu'il reste difficile d'observer une évolution marquée des concentrations en nutriments dans la colonne d'eau et les sédiments, les observations visuelles indiquent que le développement du myriophylle hétérophylle a été ralenti pour la deuxième année consécutive.
- Les données collectées montrent qu'il existe une arrivée continue de nutriments dans la gare d'eau, ce qui, par un effet de "vases communicants", a un impact significatif sur les analyses des concentrations en azote et phosphore. Il sera donc crucial d'intégrer cette alimentation continue de nutriments dans l'interprétation des présents résultats ainsi que de ceux à venir, en collaboration avec l'Université.
- Pendant les périodes de fortes chaleurs, la gare d'eau a été sujette à des phases d'anoxie. Ces épisodes ont favorisé le relargage de phosphore contenu dans les sédiments. De ce fait, le myriophylle hétérophylle, déjà alimenté par des concentrations élevées en azote (notamment en raison des apports issus des eaux usées), a également bénéficié d'un accès accru au phosphore, un nutriment clé pour son développement.
- Bien que les concentrations de N (azote) et P (phosphore) n'aient pas diminué de manière significative dans la gare d'eau, cela ne signifie pas que le biotraitement n'était pas efficace. Son impact peut avoir été masqué par les apports massifs et constants de nutriments dans la gare d'eau, ainsi que par le relargage de phosphates dû aux phases d'anoxie mentionnées ci-dessus.
- À moyen terme, une lutte efficace contre le myriophylle hétérophylle pourrait passer par un assainissement global de la gare d'eau, visant à réduire les quantités de nutriments disponibles dans cet écosystème.

Enfin, il serait pertinent d'envisager une augmentation du dosage de la solution BactaPro® si les niveaux de  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{PO}_4^{3-}$  dans l'eau dépassent les seuils critiques de  $0,1 \text{ mg/L}$ , afin d'intensifier la consommation de ces nutriments et de limiter leur disponibilité pour le myriophylle hétérophylle.



## 6. Mise en place d'un inhibiteur de photosynthèse

### 6.1 Objectifs

L'expérimentation menée par la société INOVAL implique l'utilisation périodique d'un inhibiteur de la marque BactaPro® afin de réguler les cycles de photosynthèse des myriophylles hétérophylles. Cette démarche vise à créer un effet miroir à la surface de l'eau, augmentant sa réflectivité et réduisant ainsi la zone photique propice à la croissance des plantes aquatiques. Les dosages utilisés, équivalents à 80 litres par mois (soit 4 bidons de 20 litres), ont été repris de l'expérimentation antérieure réalisée en 2022.

La croissance des myriophylles hétérophylles dépend de la photosynthèse, qui nécessite une exposition au soleil pour produire de l'oxygène et utiliser les nutriments présents dans l'eau et les sédiments. En limitant la profondeur de la zone lumineuse grâce à l'inhibiteur de photosynthèse, la réflexion de la lumière diminue considérablement, ce qui entrave la croissance des plantes. La société INOVAL vise à réduire l'infiltration du rayonnement solaire d'environ 40% en créant cet effet miroir, reproduisant ainsi les conditions d'ensoleillement typiques de l'automne. L'objectif est de maintenir l'équilibre du système en évitant une surdose de l'inhibiteur.



Figure 17 : Prise de vue n° du 24 avril 2023 : Inhibiteur de photosynthèse reflétant les rayonnements solaires sur la gare d'eau en bas de l'image. En comparaison le Canal de Bourgogne en haut à droite apparaît plus gris et clair au même titre que les rives.

## 6.2 Déroulement des différentes applications en inhibiteur de photosynthèse

Typiquement, l'introduction d'un inhibiteur de la photosynthèse intervient postérieurement à une opération de faucardage ou de ramassage des plantes aquatiques, dans le dessein de contrôler leur réapparition. Cette approche s'explique par le fait que les activités telles que le faucardage exercent une stimulation de la croissance des végétaux, surtout lorsqu'elles sont menées durant la période estivale, propice à la croissance végétale (de mai à septembre).

Pour lutter efficacement contre l'envahissement du myriophylle hétérophylle, la société INOVAL a défini le protocole initial suivant : introduction mensuelle de 80 litres pendant la période de mars à octobre 2023 en même temps que l'application des bactéries. Ce dosage mensuel correspond à un dosage considérant 1 litre d'inhibiteur de photosynthèse pour 2 500 m<sup>3</sup> d'eau. Il s'agit en outre du même dosage que celui utilisé lors de la fin de l'expérimentation de 2022.

Les applications sont effectuées à l'aide d'une pompe doseuse depuis une embarcation légère, en effectuant des passages tous les 15 mètres pour assurer une distribution homogène des quantités injectées. Le colorant se disperse dans toute la colonne d'eau en moins de 24 heures, éliminant ainsi le besoin d'utiliser une rampe d'épandage.



Figure 18 : Prise de vue n° : Introduction de l'inhibiteur de photosynthèse liquide BactaPro®.

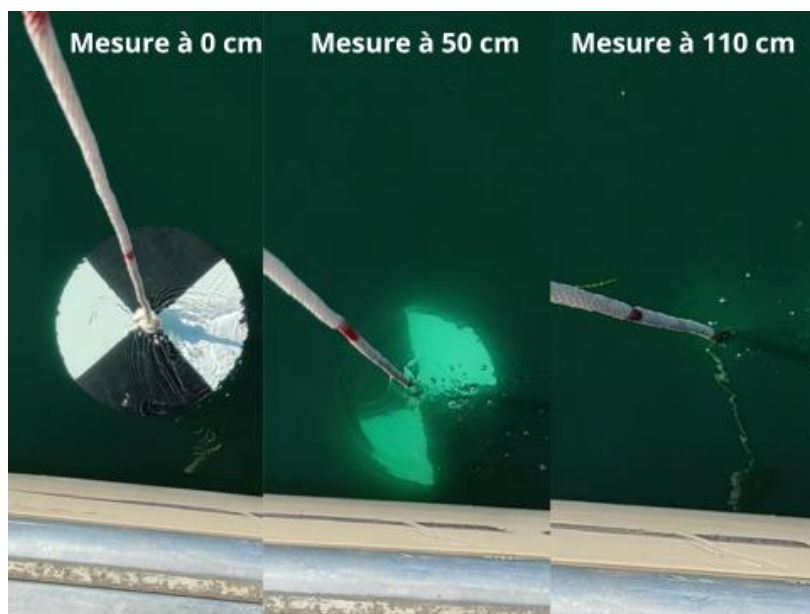


*Figure 19 : Prise de vue n° : introduction de l'inhibiteur de photosynthèse lors de la première application le 27.03.2023. Crédit Inoval*

Pour pouvoir apprécier l'efficacité de la teinte liée à l'introduction du BactaPro Inhibiteur de photosynthèse, les techniciens ont réalisé tous les mois des mesures relatives à la turbidité grâce à la technique du disque de SECCHI.

Elle consiste en un disque blanc ou noir attaché à une corde graduée. Pour effectuer la mesure, le disque est abaissé dans l'eau jusqu'à ce qu'il ne soit plus visible. La profondeur à laquelle le disque devient invisible est notée comme la profondeur de disparition.





*Figure 20 : Exemple de Mesure de SECCHI dans la Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 25 septembre 2023*

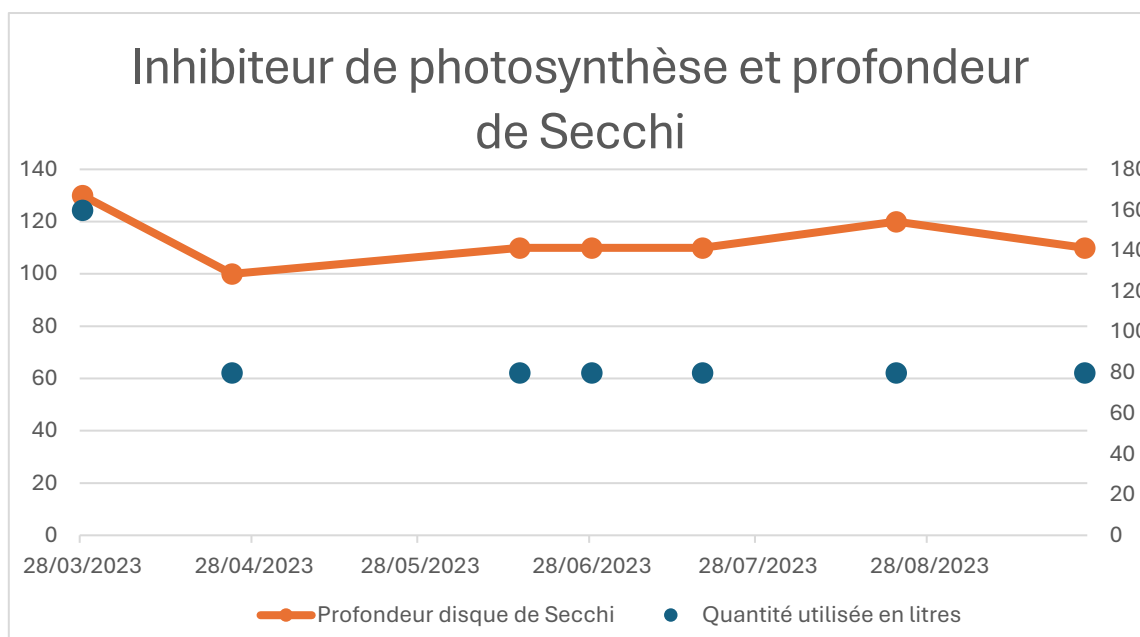
Cependant, la profondeur de SECCHI n'est pas le seul outil décisionnel. L'entreprise INOVAL a décidé de mettre en place un suivi avec des prises de vues par drone pour apprécier :

- Le maintien de la concentration du produit,
- L'homogénéité du produit sur l'ensemble de la gare d'eau,
- La réflectivité de l'environnement proche de la surface de l'eau,
- La transparence de l'eau.

Il convient de souligner que l'efficacité de l'inhibiteur sera influencée par divers éléments, tels que la concentration du colorant, la température de l'eau, l'exposition au soleil, la turbidité, les apports en eau dans l'écosystème, les précipitations et la profondeur de l'eau. Par conséquent, il est crucial de tenir compte de ces paramètres lors de l'évaluation de l'efficacité de l'effet miroir d'un colorant en surface de l'eau.

Grâce à l'expérience acquise durant l'expérimentation de 2022, lors de la première application le 28 mars 2023, le dosage standard a été doublé pour pouvoir prévenir au maximum la repousse dès le retour du printemps. Un dosage standard de 80 litres (4 bidons de 20 litres ont ensuite été appliqué d'avril à septembre.

Ci-après un tableau de synthèse permettant d'appréhender les volumes injectés tout en appréciant l'évolution de la profondeur de Secchi.



### 6.3 Conclusion /réflexions 2023 - Inhibiteur de photosynthèse

L'expérimentation menée avec l'application d'un inhibiteur de photosynthèse en 2023 a montré des résultats prometteurs dans la lutte contre le **myriophylle hétérophylle**, bien qu'il soit difficile de dissocier l'effet propre de l'inhibiteur des autres techniques mises en œuvre. L'objectif principal était de tester une combinaison de stratégies, et non d'évaluer isolément l'impact de chaque solution technique.

- **Comparaison des résultats 2022 et 2023**

Les données de 2022 et 2023 révèlent des différences notables dans les mesures de transparence (profondeur disque de Secchi) et les quantités de produit utilisé :

- **Quantité utilisée** : En 2023, le volume total utilisé (640 litres) a été doublé pour la première application (mars) afin d'augmenter l'efficacité, contre des doses constantes en 2022. Cette augmentation semble avoir eu un effet positif sur la colonne d'eau dès le début de la saison.
- **Profondeur de Secchi** : En 2023, la profondeur a été plus stable (oscillant entre 100 et 130 cm) avec une transparence cible atteinte plus rapidement, contre des variations marquées en 2022 (70 à 140 cm). Cette différence peut indiquer un meilleur contrôle des nutriments et une limitation plus efficace de la croissance des plantes.

La transparence cible, fixée en moyenne à **100 cm**, correspond à la profondeur à laquelle le myriophylle hétérophylle peut se développer. Une augmentation de la transparence peut donc être associée à une diminution de la biomasse et à une réduction de la compétition pour la lumière, favorisant ainsi le contrôle de l'espèce.

Le dosage appliqué (2,4 ml/m<sup>3</sup>/mois) reflète un **scénario défavorable**, caractérisé par :

- Une alimentation continue en nutriments dans la colonne d'eau (eaux usées, relargage de phosphore des sédiments en conditions anoxiques).
- Des variations hydrologiques et des renouvellements d'eau fréquents, réduisant l'efficacité des traitements.
- Une profondeur d'eau faible dans certaines zones, augmentant la vulnérabilité à la reprise de la plante.

Par conséquent, l'introduction d'un inhibiteur de photosynthèse peut avoir contribué à la réduction des volumes extraits constatés, en perturbant le processus de photosynthèse, mécanisme essentiel à la production d'énergie chez les plantes. Cependant, l'efficacité spécifique de l'inhibiteur n'est pas dissociable des autres solutions techniques utilisées dans le cadre de l'expérimentation. Des tests complémentaires seraient nécessaires pour évaluer précisément l'impact propre de l'inhibiteur sur la plante. En l'état, ce n'était pas l'objectif de l'expérimentation, qui visait à tester une combinaison de stratégies.

### **Pistes pour l'avenir**

Les **résultats visuels** obtenus au cours de l'expérimentation montrent une **efficacité claire** dans la réduction de la croissance du **myriophylle hétérophylle**. Les acteurs et utilisateurs de la gare d'eau sont unanimes quant à l'observation d'un **réel changement** depuis la mise en place du protocole de traitement. Ces retours sont encourageants et soulignent l'impact visible des interventions.

Cependant, bien que ces **résultats visuels** et les **retours favorables des acteurs** soient prometteurs, ils ne constituent pas une **démonstration scientifique**. Ces éléments doivent être considérés comme des indices encourageants, mais ne peuvent pas être intégrés dans la démarche scientifique de l'Université de Lorraine, qui repose sur une évaluation rigoureuse et méthodologique des effets.

Ainsi, **des tests supplémentaires** sont nécessaires pour évaluer précisément l'impact propre de l'inhibiteur de photosynthèse sur le myriophylle hétérophylle. En parallèle, il est essentiel de maintenir une **surveillance renforcée des apports en nutriments** (notamment le phosphate) et de poursuivre une **gestion intégrée de l'écosystème aquatique**, incluant la limitation des apports d'eaux usées et la réduction des phases d'anoxie, afin de garantir l'efficacité à long terme des interventions.

Enfin, l'introduction d'un dispositif **automatique de goutte-à-goutte** pour l'injection de l'inhibiteur pourrait optimiser la régularité et la précision des traitements tout en facilitant leur gestion.

## Coordination avec les travaux de l'Université de Lorraine

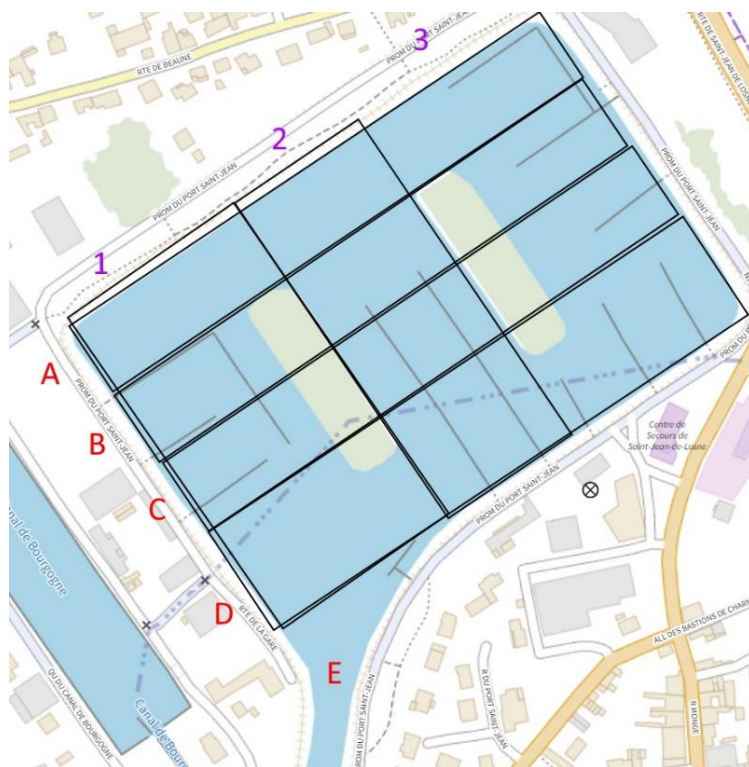
Les données collectées par la société INOVAL devront être croisées avec celles de l'Université de Lorraine pour affiner l'évaluation des impacts des biotechnologies utilisées. Une analyse comparative de la biomasse et des paramètres physico-chimiques permettra d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu et d'ajuster les stratégies de gestion à moyen et long terme.

## 7. Faucardage et ramassage

### *7.1 Opérations de faucardage / ramassage*

Pour pouvoir effectuer les opérations de faucardage et de ramassage, la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne fût divisée en 12 zones. Cela permet en outre de pouvoir adapter la stratégie de faucardage et de ramassage des myriophylles hétérophylles.

Cette segmentation permet une gestion ciblée en identifiant les zones présentant des niveaux d'infestation différents, optimisant ainsi l'utilisation des ressources et réduisant les risques de dispersion. De plus, elle facilite le suivi et l'évaluation des actions entreprises, permettant des ajustements au fur et à mesure pour maximiser l'efficacité des opérations de gestion. En personnalisant les méthodes de traitement en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque zone, comme la densité de végétation ou la profondeur de l'eau, cette approche offre des résultats plus précis et adaptés à la lutte contre cette espèce envahissante.



*Division de la gare d'eau en 12 zones*



Les premières opérations de faucardage ont eu lieu du 30 mai au 15 juin à raison de 8 jours de faucardage et 8 jours de ramassage.



Figure 21: Opération de ramassage sur les plantes accumulées vers l'arboretum/David Blancard le 06/06/2023 Crédit-Inoval.

Pour le mois de juin, une journée de ramassage le 27 juin était nécessaire ce qui représente au 30 juin un total de 17 jours de faucardage/ramassage. Soit un total de 135 m3 de biomasse a été extraits au 3 juillet 2023.

Prise de vue desdes Opérations de ramassage sur les plantes accumulées vers l'arboretum/David Blancard le 06/06/2023 Crédit-Inoval.



Figure 22 : Extraction de la biomasse sur les berges durant le mois de juin Crédit-Inoval

Face à une croissance rapide de cette plante envahissante, ces méthodes de faucardage offrent une réponse immédiate pour contenir sa propagation et prévenir les dommages écologiques associés.

Les résultats obtenus, combinés aux retours d'expérience (RETEX), suggèrent que la période de mai et juin est propice pour envisager des interventions telles que le faucardage. Cependant, il convient de noter que ces observations sont influencées par les traitements réalisés en parallèle, rendant difficile une conclusion définitive sur l'impact direct de la période d'intervention. Cette période offre plusieurs avantages notables. Tout d'abord, elle permet d'agir sur les plantes aquatiques dès les premières phases de leur croissance, limitant ainsi leur développement ultérieur. De plus, les conditions météorologiques printanières sont généralement propices à la réalisation de ces travaux.

Une opération de faucardage réalisée durant la période hivernale peut s'avérer particulièrement pertinente dans des conditions normales, c'est-à-dire en l'absence de traitements biologiques ou d'inhibiteurs de photosynthèse. En intervenant lorsque les plantes aquatiques sont en dormance ou en phase de croissance limitée, le faucardage hivernal permet de réduire efficacement la biomasse accumulée et de limiter la capacité de repousse rapide dès le retour des conditions favorables.

Cette approche offre plusieurs avantages :

- Elle réduit la pression végétale avant le début de la saison de croissance.
- Elle contribue à améliorer la qualité de l'écosystème aquatique en évitant une accumulation excessive de biomasse au printemps.

En revanche, l'efficacité de cette intervention pourrait être limitée dans un contexte où des traitements biologiques ou des inhibiteurs de photosynthèse sont déjà utilisés, ces derniers impactant la dynamique de croissance des plantes tout au long de la saison. Ainsi, dans un cadre sans traitement complémentaire, il est recommandé d'inclure le faucardage hivernal dans les plans de gestion, en le combinant avec des interventions ciblées lorsque nécessaire. Cette approche intégrée garantit une gestion durable et équilibrée des milieux aquatiques tout en limitant les impacts des espèces végétales envahissantes.

## *7.2 Valorisation agricole du myriophylle hétérophylle par co-compostage*

Comme en 2022, les plantes aquatiques extraites ont été valorisées par une filière agricole sur l'exploitation de M. Briot, située à seulement 5 km de la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne, dans la commune de Saint-Symphorien. Cette proximité a facilité la gestion des volumes importants extraits, mais certaines considérations essentielles être prises en compte pour optimiser ce processus :

1. **Gestion rapide des andains de plantes aquatiques :** Le stockage des plantes avant leur évacuation sur la parcelle agricole doit être limité à une durée inférieure à **10 jours** pour éviter la lixiviation des andains et ainsi réduire les risques de pollution des sols environnants.

2. **Tri des déchets et éléments indésirables** : Une attention particulière doit être portée au tri des déchets lors des différentes étapes du processus (constitution des andains, chargement dans les bennes, et co-compostage). Ce tri est également crucial lors des opérations de faucardage et de ramassage des plantes pour éviter toute contamination des parcelles agricoles par des déchets ou matériaux indésirables.
3. **Anticipation des volumes** : Les périodes de faucardage génèrent des apports conséquents sur une courte période. Il est nécessaire d'anticiper ces volumes pour organiser efficacement leur gestion et leur valorisation.
4. **Processus de co-compostage** : Le processus de co-compostage doit être engagé rapidement, avant le séchage complet des plantes, afin de préserver leurs propriétés agronomiques et de garantir une valorisation optimale.
5. **Caractérisation des plantes** : Un suivi spécifique est recommandé pour identifier les éventuels risques d'accumulation de métaux lourds par les plantes aquatiques, ce qui pourrait limiter leur valorisation agricole. La caractérisation régulière des plantes est essentielle pour garantir une utilisation durable et sécurisée.

En intégrant ces recommandations, il sera possible d'améliorer encore la gestion et la valorisation des plantes aquatiques tout en réduisant les impacts environnementaux associés.

## 8. Prises de vue

### *8.1 Prise de vue aérienne par drone*

L'utilisation de drones pour l'analyse de photos se révèle être une méthode particulièrement efficace dans le suivi de l'évolution du myriophylle hétérophylle au sein de la gare d'eau de Saint Jean de Losne. Les drones, équipés de caméras haute résolution, peuvent capturer des images et des vidéos couvrant l'intégralité de la gare d'eau en un seul cliché, offrant ainsi une vue globale et détaillée de l'évolution de la végétation aquatique au fil du temps.

Ces images fournissent des données essentielles pour déterminer la densité et l'étendue du myriophylle hétérophylle, permettant ainsi d'évaluer l'efficacité des stratégies de lutte mises en place. Cette analyse s'avère précieuse pour les gestionnaires dans la prise de décisions éclairées concernant le contrôle du développement des plantes aquatiques. Toutefois, il convient de noter certaines limites de cette technique, notamment liée à la luminosité et au climat.

Effectivement, lors de nos observations, il est évident que nous pouvons facilement repérer la présence de plantes en surface, mais il est souvent difficile de distinguer celles qui se trouvent sous l'eau, sauf dans des conditions exceptionnelles de transparence de l'eau. De plus, lors de conditions météorologiques pluvieuses ou venteuses, il serait risqué voire compromettant de procéder au décollage du drone afin d'éviter d'endommager le matériel. Heureusement, lors



de cette expérimentation, nous n'avons pas rencontré de telles conditions, ce qui nous a permis d'effectuer toutes les prises de vue nécessaires de manière appropriée.

Malgré ces limitations, il convient de souligner que l'analyse des photos prises par drone demeure une approche efficace dans la gestion proactive de la gare d'eau. En effet, ces images aériennes fournissent des informations précieuses pour surveiller et évaluer l'état de la végétation aquatique, ce qui permet de prendre des mesures préventives ou correctives lorsque cela est nécessaire. En combinant cette technologie avec d'autres méthodes de surveillance et de gestion, nous pouvons améliorer la qualité de notre suivi environnemental et contribuer à la préservation de cet écosystème fragile.



*Figure 23 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 02 février 2023- Crédit Inoval*





Figure 25 : Prise de vue n° : Gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne le 27 mars 2023- Crédit Inoval

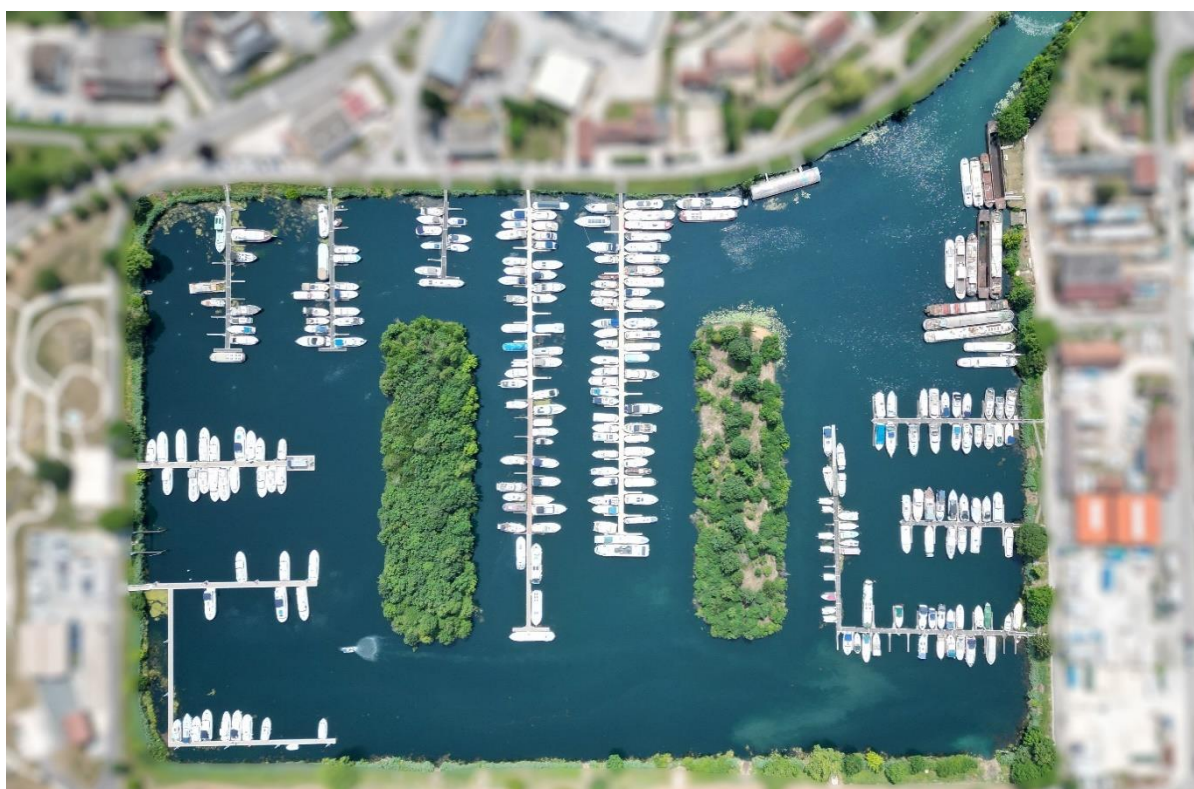


Figure 24 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 24 avril 2023- Crédit Inoval





*Figure 26 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 16 mai 2023- Crédit Inoval*



*Figure 27 : Gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne le 28 juin 2023*



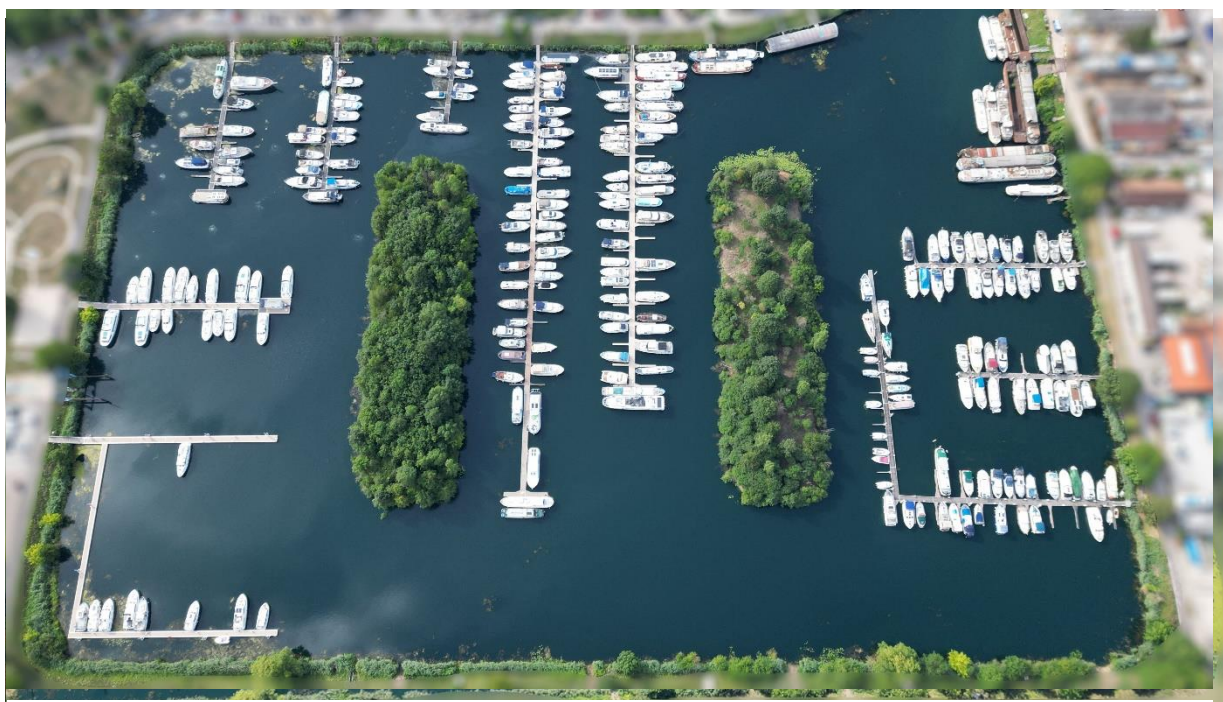


Figure 28 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 18 juillet 2023- Crédit Inoval



Figure 29 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 25 septembre 2023-Crédit Inoval



Figure 30 : Gare d'eau de Saint Jean de Losne le 31 octobre 2023 avec la présence de lentille d'eau en surface - Crédit Inoval

Effectuer un suivi régulier en réalisant des prises de vue par drone lors de chaque intervention s'est révélé être une stratégie essentielle dans la gestion efficace de l'écosystème de la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne.

Cette approche a permis de figer l'écosystème dans son ensemble, offrant ainsi une perspective complète et détaillée de l'évolution de la densité et de la répartition du myriophylle hétérophylle au fil du temps.

Grâce à ces prises de vue régulières, les parties prenantes au projet ont pu ajuster leur stratégie de gestion, en particulier en ce qui concerne le faucardage et le ramassage des plantes. En observant directement les zones où les plantes en surface étaient visibles, ils ont pu cibler plus efficacement leurs interventions, maximisant ainsi leur impact et leur efficacité. Cette approche a permis d'apporter une efficacité jusqu'alors inégalée dans la lutte contre le myriophylle hétérophylle et dans la préservation de la santé de l'écosystème aquatique de la gare d'eau. Elle doit toutefois être associée à d'autres mesures (notamment un suivi visuel de terrain et des suivis subaquatiques) pour assurer une interprétation juste et cohérente pour notamment voir la croissance des plantes sous l'eau.



## 8.2 Prise de vue subaquatique

La société INOVAL a procédé à des prises de vue vidéo subaquatiques lors de ses interventions mensuelles en 2023.

Cette action permet d'avoir un retour visuel essentiel au suivi des zones faucardées et estimer le potentiel de repousse de la plante.

La caméra était ainsi fixée sur une perche ce qui lui a permis d'accéder au fond du plan d'eau et de pouvoir contrôler la repousse des plantes.

Pour ce faire, 5 linéaires ont été contrôlés de manière à couvrir au mieux l'entièreté des fonds de la gare d'eau.



Figure 31: Tracés des linéaires permettant d'effectuer les vidéos subaquatiques Crédit-Inoval



*Prise de vue subaquatique n°1 : Myriophylle en mars 2023 -Credit-Inoval*



*Prise de vue subaquatique n°2 : Myriophylle en juin 2023 -Credit-Inoval*



*Prise de vue subaquatique n°3 : Myriophylle en août 2023 -Credit-Inoval*

En conclusion, l'utilisation du suivi par vidéos subaquatiques dans l'expérimentation menée à la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne contre le myriophylle hétérophylle s'avère être une approche essentielle et efficace.

Cette technologie offre une perspective unique sur les interactions complexes entre les espèces aquatiques et leur environnement, permettant aux chercheurs d'observer en temps réel les comportements des plantes et des organismes qui y vivent.

En fournissant des données détaillées et précises sur la croissance et la propagation de cette espèce envahissante, le suivi par vidéos subaquatiques facilite une meilleure compréhension des dynamiques des écosystèmes aquatiques et fournit des informations cruciales pour orienter les stratégies de gestion et de contrôle. Toutefois son interprétation pour notamment apprécier les densités reste un exercice relativement complexe et nécessite la mise en place d'un protocole de mesure et d'interprétation très fin.



## 9. Conclusion

Dans la continuité des efforts engagés en 2022, la société INOVAL a mis en œuvre une approche multimodale pour lutter contre le **myriophylle hétérophylle** dans la gare d'eau de Saint-Jean-de-Losne. Cette stratégie combinait différents moyens tels que le **bio-traitement**, l'inhibiteur de photosynthèse, un dispositif de rideaux de bulles, un système de brassage d'eau et une opération de faucardage réalisée en début de saison, généralement au mois de mai. Cette période, qui précède le pic de croissance de la plante, peut toutefois varier en fonction des conditions géographiques et climatiques spécifiques à chaque année.

Les résultats obtenus en 2023 sont encourageants. Comme en 2022, la repousse du myriophylle hétérophylle a été considérablement freinée, suggérant que le protocole mis en place a un **impact significatif** sur la prolifération de cette plante aquatique envahissante. De plus, une réduction remarquable de **70 % des volumes de plantes extraites** a été observée, passant de 450 m<sup>3</sup> en 2022 à 135 m<sup>3</sup> en 2023.

Cependant, il convient de nuancer ces résultats encourageants. Bien que la quantité de nutriments dans la gare d'eau n'ait pas diminué de manière significative, cela ne signifie pas que le bio-traitement n'était pas efficace. En effet, l'impact du bio-traitement peut avoir été masqué par les apports constants de nutriments dans la gare d'eau, qu'il s'agisse d'eaux usées ou de relargage depuis les sédiments. Il est important de noter que les analyses de l'Université de Lorraine se concentrent sur la **quantité totale de nutriments**, sans évaluer leur **disponibilité réelle** pour les plantes. Cette distinction est essentielle pour mieux comprendre les mécanismes en jeu et pour ne pas décrédibiliser les résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation.

De plus, il est difficile de mesurer précisément l'impact individuel de chaque méthode utilisée dans cette stratégie combinée. L'efficacité globale du protocole résulte probablement de l'effet synergique des différentes techniques déployées, qui agissent ensemble pour limiter la croissance des plantes.

Pour une deuxième année consécutive, les volumes de plantes extraites ont diminué de manière significative, illustrant une **amélioration générale de la situation**. Sur la base de son expérience et d'autres expérimentations menées en France, la société INOVAL met en avant l'intérêt combiné des pratiques de faucardage en profondeur associées à l'application de l'inhibiteur de photosynthèse. Ce duo constitue un levier indispensable pour contrôler et réduire efficacement la prolifération du myriophylle hétérophylle.

L'ajout du bio-traitement représente également une méthode prometteuse pour la gestion à long terme, bien que ses mécanismes d'action méritent d'être approfondis. À l'avenir, il conviendra d'accorder davantage d'attention à la **disponibilité réelle des nutriments** dans l'écosystème, plutôt qu'à leur simple quantité, afin de mieux cibler les interventions.

Enfin, la généralisation d'une ou plusieurs pratiques de lutte contre le myriophylle hétérophylle restera un défi. Cela nécessitera une adaptation constante aux particularités de chaque écosystème, ainsi qu'une **observation rigoureuse des effets directs et indirects** des techniques appliquées.