

Fiche projet Accord Cadre ZABR – Agence de l'eau

EFFET-SEL – UR RiverLy – Etude des communautés microbiennes benthiques pour diagnostiquer l'impact du salage des routes sur la qualité écologique des cours d'eau

INTITULE DU PROJET : : AC ZABR – Act°104 – Impact du salage des routes sur la qualité écologique des cours d'eau
(EFFET-SEL) INRAE RiverLy – USMB Edytem

Responsable scientifique du projet:

PESCE Stéphane, INRAE UR RiverLy, Directeur de Recherche, stephane.pesce@inrae.fr, 04 72 20 87 95

Référent (s) administratif(s) :

ATADIT-MOUORI Gerson, INRAE SDAR, Service Ingénierie de Projets et Partenariats,
gerson.atadit-mouori@inrae.fr / partenariat.lyon-grenoble@inrae.fr , 06 46 89 36 20

EQUIPES DE RECHERCHES ZABR CONCERNEES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE

EDYTEM, USMB, Emmanuel Naffrechoux (Professeur, emmanuel.naffrechoux@univ-smb.fr)

CARTEL, USMB, Emilie Lyautey (Maitre de Conférences, emilie.lyautey@univ-smb.fr)

AUTRES PARTENAIRES

Institutionnel : Expertise et relais locaux sur les sites d'études

DANONE Waters, Service Ressources en Eaux, contact = Cathy Le Hec (Directrice Ressources en Eaux & Affaires Publiques) et Pierre Belle (Hydrogéologue) / Accord de Principe (**lettre de soutien fournie en annexe**)

Collectivités territoriales (en Savoie et Haute-Savoie), incluant celles impliquées dans le réseau multipartite déjà structuré dans le cadre de l'Association pour la Protection de l'Impluvium de l'Eau Minérale Evian (APIEME).

THEMATIQUE NATURE ET OPERATION (ne rien compléter))

- Thématique : Etude recherche et réseau de suivi
- Nature du projet : Etude générale et recherche
- Type d'opération : Recherche et innovation
- **Intitulé de l'opération** :

LOCALISATION DU PROJET: (se remplit automatiquement -Ne rien remplir)

- **Commune principale et numéro INSEE** : à compléter
- **Sous bassin versant**
- **Nom du cours d'eau**
- Contrat (si intégré dans un contrat de rivière, un SAGE ou un autre contrat avec l'agence de l'eau)

RESUME DU PROJET GLOBAL

- **Résumé :**

Le salage des routes engendre un coût environnemental non négligeable, notamment pour les hydrosytèmes. Le sel utilisé est principalement du chlorure de sodium (NaCl), souvent mélangé avec d'autres composés tels que le chlorure de calcium (CaCl₂) ou de magnésium (MgCl₂) pour améliorer son efficacité. Dans les cours d'eau situés à proximité de routes traitées, les concentrations en ions chlorure peuvent être multipliées d'un facteur 10 à 300, dépassant ainsi parfois 5000 mg Cl⁻/L [1]. Conscientes de ces enjeux, plusieurs collectivités territoriales s'efforcent de mettre en place des alternatives plus durables et d'optimiser les pratiques de traitement hivernal. **Dans cette dynamique positive, l'élaboration de recommandations basées sur des études d'impact environnemental de l'usage du sel pourrait jouer un rôle clé pour accélérer la transition vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement.**

Dans les cours d'eau, les communautés microbiennes benthiques (CMB), telles que le périphyton et les communautés qui se développent à la surface du sédiment, constituent des indicateurs précieux de la qualité de ces écosystèmes. Sensibles et réactives aux perturbations environnementales, elles représentent en effet de véritables sentinelles écologiques. Des tests en laboratoire ont montré que les concentrations en sel détectées dans certains cours d'eau peuvent avoir un impact significatif sur les CMB, en particulier en raison des effets toxiques sur les micro-organismes phototrophes (microalgues et cyanobactéries [2]) ainsi que sur les bactéries [3,4]. Toutefois, certains micro-organismes peuvent tirer parti de ces nouvelles conditions pour se développer, notamment les halophiles [5], suggérant donc une possible acquisition de tolérance à l'échelle de la communauté, du fait du remplacement d'espèces sensibles par des espèces plus tolérantes.

A ce jour, peu d'études ont été réalisées *in situ* et les effets du salage sur les communautés microbiennes naturellement présentes dans les cours d'eau restent méconnus.

Dans ce contexte, **ce projet vise à tester la pertinence d'étudier les CMB (périphyton et sédiment) pour diagnostiquer *in situ* l'impact du salage des routes sur la qualité écologique des cours d'eau.**

Pour ce faire, **i)** nous proposons dans un premier temps de développer une approche de type SICT (stress-induced community tolerance, le stress étant ici le sel) inspirée de l'approche PICT (pollution-induced community tolerance) utilisée à ce jour avec différents toxiques. **ii)** Cette approche sera ensuite testée dans des études expérimentales en microcosmes afin de vérifier si elle peut renseigner l'impact du sel routier sur les CMB et leur diversité (appréhendée par une approche de metabarcoding sur l'ADN environnemental (gène codant l'ARNr 16S). **iii)** Enfin, nous couplerons SICT et metabarcoding dans différents cours d'eau afin d'appréhender leur potentiel opérationnel pour diagnostiquer l'impact écologique du salage des routes.

Ces travaux visent à contribuer à l'élaboration de recommandations pour limiter les impacts environnementaux du salage des routes. Leur potentiel opérationnel sera renforcé par un partenariat étroit avec plusieurs collectivités territoriales de Savoie et Haute-Savoie, s'appuyant notamment sur le réseau multipartite déjà structuré par DANONE Waters (partenaire de ce projet, voir *lettre d'intention en annexe*) dans le cadre de l'Association pour la Protection de l'Impluvium de l'Eau Minérale Evian (APIEME). Ce réseau inclut notamment le Département de la Haute-Savoie ainsi que plusieurs communes associées à ce territoire. Ces acteurs expriment un fort besoin en données scientifiques, afin de mieux évaluer l'impact de leurs actions.

ENCART 2024-XX-EFFET-SEL-RiverLy (PESCE Stéphane)

- **L'équipe Ecotoxicologie Microbienne Aquatique (EMA)** sera en charge de la coordination et l'animation du projet : organisation des réunions, planification et réalisation des expériences en laboratoire, centralisation des données et production des livrables. Elle réalisera également l'ensemble des tests de toxicité pour évaluer la tolérance des communautés microbiennes au sel dans le cadre de l'approche SICT (à partir d'analyses fonctionnelles : photosynthèse, respiration et activités enzymatiques).

ENCART 2024-XX-EFFET-SEL-USMB (NAFFRECHOUX Emmanuel / LYAUTEY Emilie)

- **Les équipes EDYTEM (E. Naffrechoux) et CARTEL (E. Lyautey)** seront respectivement en charge, d'une part, de la planification des campagnes d'échantillonnage et de la réalisation des analyses physico-chimiques pour caractériser le milieu (et les concentrations en sel), et, d'autre part, de la réalisation des approches de metabarcoding (depuis l'extraction d'ADN jusqu'aux analyses de bioinformatique et biostatistiques).

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

• Contexte général

Chaque hiver, d'importantes quantités de sel sont utilisées pour garantir la sécurité routière, notamment dans les départements de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie, dont les zones de montagne sont particulièrement exposées aux chutes de neige. Par exemple, une enquête publiée en 2013 estimait que 90 000 à 100 000 tonnes de sel étaient alors utilisées chaque année sur le réseau routier départemental de ces trois territoires (hors autoroutes, routes nationales et voirie communale) [6]. Le sel employé est principalement du chlorure de sodium (NaCl), souvent associé à d'autres composés tels que le chlorure de calcium (CaCl₂) ou de magnésium (MgCl₂), afin d'en renforcer l'efficacité. Il est appliqué soit sous forme solide (essentiellement pour le traitement curatif sur route enneigée), soit sous forme de saumure (plutôt en traitement préventif sur chaussée sèche). Au-delà de son coût financier — par exemple, le Département de la Savoie consacre chaque année entre 12 et 18 millions d'euros à l'entretien hivernal de son réseau routier, dont environ 2 millions pour l'achat de sel [7] —, **cette pratique a un impact environnemental significatif.**

Le sel peut en effet contaminer les sols, les cours d'eau et porter atteinte à la biodiversité locale. À proximité des routes traitées, les concentrations en ions chlorure dans les cours d'eau peuvent être multipliées par un facteur allant de 10 à 300, atteignant parfois plus de 5 000 mg Cl⁻/L [1]. De plus, l'accumulation de sel dans certaines zones sensibles peut également altérer la qualité de l'eau potable, y compris celle de certaines eaux minérales commercialisées.

Conscientes de ces enjeux, plusieurs collectivités territoriales s'efforcent de mettre en place des alternatives plus durables et d'optimiser les pratiques de traitement hivernal. Ainsi, en dix ans, le département de la Savoie a réduit d'environ 20% sa consommation annuelle de sel [7]. La lettre d'intention transmise par DANONE Waters, jointe en annexe de ce document, souligne également une réduction de plus de 39 % de l'usage de sel sur certaines routes départementales et communales de Haute-Savoie. Cette diminution résulte des actions engagées depuis la signature d'une convention multi-partenaire réunissant plusieurs acteurs territoriaux.

Dans cette dynamique positive, l'élaboration de recommandations basées sur des études d'impact environnemental de l'usage du sel pourrait jouer un rôle clé pour accélérer la transition vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement.

Dans les cours d'eau, **les communautés microbiennes benthiques (CMB) constituent des indicateurs précieux de la qualité écologique de ces écosystèmes.** Elles se développent principalement à la surface des substrats immergés — on parle alors de périphyton, généralement dominé par des micro-organismes photosynthétiques tels que les microalgues et les cyanobactéries —, ainsi qu'à celle des sédiments, où prédominent des micro-organismes hétérotrophes, en particulier les bactéries. Caractérisées par une très grande diversité taxonomique et fonctionnelle, ces communautés jouent un rôle clé dans le fonctionnement écologique des milieux aquatiques. Elles sont par ailleurs particulièrement sensibles et réactives aux perturbations environnementales, ce qui en fait de **véritables sentinelles écologiques [8].** Des tests en laboratoire ont montré que **les concentrations en sel détectées dans certains cours d'eau peuvent avoir un impact significatif sur les CMB**, en raison des effets toxiques sur les micro-organismes phototrophes (microalgues et cyanobactéries [2]) ainsi que sur les bactéries [3,4]. **Les risques écotoxicologiques associés à l'exposition des CMB à de fortes concentrations de sel sont donc établis.** Cependant, peu d'études ont été menées *in situ*, et **les effets du salage sur les communautés microbiennes naturellement présentes dans les cours d'eau restent encore largement méconnus.**

• Contexte ZABR :

- **Thématique ZABR :** Flux, Polluants, Écotoxicologie, Écosystèmes
- **Site Atelier ou Observatoire ZABR :** Projet mené sur le territoire associé au site « Lacs Alpins » mais problématique potentiellement applicable à l'ensemble des sites
- **Besoin de connaissance Agence de l'eau :** Substances et risques associés, enjeux de santé-environnement / Quelle méthode pour établir un diagnostic sur les cas de pollution toxique ?

FINALITE ET ATTENDUS OPERATIONNELS

• Objectifs scientifiques

Le principal objectif du projet est de fournir de **nouvelles connaissances sur les effets du sel utilisé pour le traitement des réseaux routiers sur la diversité et la fonctionnalité des communautés microbiennes benthiques (CMB)**, telles que le périphyton et le sédiment, exposées à cette substance dans les cours d'eau.

Pour ce faire, **la stratégie adoptée reposera principalement sur l'application d'une approche SICT (Stress-Induced Community Tolerance)**, inspirée de la méthode PICT (Pollution-Induced Community Tolerance), développée et utilisée par l'équipe RiverLy-EMA pour étudier l'impact de divers micropolluants (métaux lourds, pesticides, produits pharmaceutiques) sur les écosystèmes aquatiques.

Cette approche se base sur l'hypothèse selon laquelle des CMB exposées de manière chronique à une substance chimique deviennent progressivement plus tolérantes à sa toxicité aiguë (ou à celle de substances ayant un mode d'action similaire). Ce niveau de tolérance est évalué par des tests de toxicité aiguë réalisés en laboratoire, où des CMB issues du milieu naturel sont exposées, sur une courte durée (quelques heures), à des concentrations croissantes de la substance sélectionnée (le sel, dans notre cas). **La détection d'une augmentation de la tolérance indique la présence d'une pression chimique suffisamment forte dans l'environnement pour induire des changements dans la diversité des communautés.**

L'avantage de cette approche est qu'elle permet d'obtenir une réponse relativement spécifique à la substance chimique étudiée. Dans notre cas, **nous faisons l'hypothèse que cette spécificité de réponse sera particulièrement marquée pour le sel**, en raison de son principal mode d'action : le stress osmotique, qui distingue ce produit des micropolluants couramment détectés dans les cours d'eau.

Dans un premier temps, **nous développerons des tests de toxicité pour évaluer la tolérance des communautés microbiennes benthiques (CMB) à la toxicité aiguë du sel** - afin de pouvoir les mettre en œuvre dans le cadre d'approches SICT - en analysant la réponse des communautés périphtiques et sédimentaires à travers des mesures ciblant différentes fonctions microbiennes (photosynthèse, respiration, activités enzymatiques).

Des études en microcosmes (canaux artificiels de laboratoire) permettront ensuite de **déterminer les seuils d'exposition chronique au sel (en termes de durée et de concentration) susceptibles d'entraîner des changements dans la diversité microbienne**, menant à une augmentation de la tolérance à la toxicité aiguë du sel (mesurée *via* l'approche SICT développée précédemment). Ces changements seront analysés par metabarcoding de l'ADN microbien. Nous évaluerons également si ces seuils d'exposition peuvent augmenter la vulnérabilité des CMB face à d'autres substances chimiques toxiques, ou au contraire les rendre moins sensibles à la toxicité de celle-ci, du fait de la possible existence de phénomènes de co-tolérance.

Enfin, nous combinerons l'approche SICT et le metabarcoding dans plusieurs cours d'eau pour **évaluer leur potentiel à diagnostiquer *in situ* l'impact écologique du salage des routes**. La comparaison des concentrations en sel mesurées avec les niveaux de tolérance obtenus via la méthode SICT permettra notamment de déterminer la spécificité de la réponse microbienne et, le cas échéant, d'identifier des facteurs environnementaux confondants, en analysant les caractéristiques physico-chimiques du milieu.

- **Attendus opérationnels**

Le projet vise à **développer un outil de diagnostic pour évaluer les impacts écologiques du sel utilisé pour le traitement des réseaux routiers sur les cours d'eau**.

Le couplage d'approches expérimentales en microcosmes et de suivis réalisés dans divers secteurs de la Savoie et de la Haute-Savoie permettra :

- D'estimer les seuils de contamination en sel (durée et concentration) pouvant constituer un risque pour les communautés microbiennes benthiques, et donc pour la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes ;
- D'identifier les contextes environnementaux (proximité des routes, multi-contamination, etc.) susceptibles d'accroître la vulnérabilité de ces communautés face au risque écotoxicologique du salage.

Ces résultats pourraient contribuer à l'élaboration de recommandations visant à limiter les impacts environnementaux du salage des routes. Ces recommandations pourraient être affinées à l'avenir en élargissant l'étude à d'autres organismes potentiellement vulnérables à cette forme de contamination.

En outre, l'association de l'approche SICT et du metabarcoding pourrait permettre d'identifier des taxons bactériens plus sensibles ou, au contraire, plus tolérants au sel. Le cas échéant, **cela pourrait ouvrir de nouvelles pistes pour considérer ces taxons comme des bioindicateurs d'un stress chimique lié à la contamination par le sel**.

Le potentiel opérationnel de ce projet sera renforcé par un partenariat étroit avec plusieurs collectivités territoriales de Savoie et Haute-Savoie, s'appuyant notamment sur le réseau multipartite déjà structuré par DANONE Waters dans le cadre de l'Association pour la Protection de l'Impluvium de l'Eau Minérale Evian (APIEME). Ce réseau inclut notamment le Département de la Haute-Savoie ainsi que plusieurs communes associées à ce territoire (**voir ANNEXE**). **Ces acteurs expriment un fort besoin en données scientifiques, afin de mieux évaluer l'impact de leurs actions.**

DESCRIPTIF DETAILLE

Le projet EFFET-SEL reposera sur 3 actions principales :

1. **Développements méthodologiques** : Validation des tests de toxicité aiguë visant à évaluer dans les approches SICT les niveaux de tolérance au sel des communautés microbiennes périphtiques et sédimentaires ;
2. **Approches en microcosmes** : Estimation des seuils d'exposition chronique au sel entraînant une augmentation de la tolérance au sel des communautés microbiennes périphtiques et sédimentaires et caractérisation des changements de diversité microbienne associés ;
3. **Suivis *in situ*** : Evaluation du potentiel opérationnel de la méthode SICT couplée à l'analyse de la diversité microbienne pour diagnostiquer *in situ* l'impact écologique du salage des routes dans différents cours d'eau.

1. Développements méthodologiques

Calendrier prévisionnel : Février 2026 à Juin 2026

Développements concernant le périphyton : février à avril 2026

Développement concernant le sédiment : mai à juin 2026

Cette étape consistera à réaliser des tests de toxicité aiguë à partir de communautés microbiennes périphtiques et sédimentaires, exposées pendant une courte durée (quelques heures) à des concentrations croissantes en ions chlorure (forme NaCl). **L'objectif sera double** : d'une part, **identifier les fonctions microbiennes sensibles à cette toxicité** parmi un panel de fonctions phototrophes (activité photosynthétique, croissance algale) et hétérotrophes (respiration, activités enzymatiques diverses) ; d'autre part, **optimiser les protocoles de test**, notamment en ce qui concerne la durée d'exposition et la gamme de concentrations testées.

Ce type de développement méthodologique est parfaitement maîtrisé par l'équipe RiverLy-EMA, forte d'une longue expérience dans ce domaine grâce à de nombreux travaux menés dans le cadre de l'approche PICT. Cette méthode a été appliquée à divers types de substances chimiques, comme illustré récemment par l'action n°75 PharmaTOX de l'accord cadre ZABR-AE, portant sur les substances pharmaceutiques [9].

Les communautés microbiennes utilisées pour ces tests seront issues d'un cours d'eau peu soumis aux pressions chimiques et éloignés des zones de salage routier, afin de limiter tout risque de pré-adaptation préalable de ces communautés à la toxicité des ions chlorure. La sélection du site de prélèvement initial se fera en concertation avec les partenaires, sur la base de leur connaissance du terrain. Ces communautés seront maintenues en laboratoire dans des conditions optimales durant toute la durée de cette action, afin de garantir un matériel biologique suffisant pour mener à bien l'ensemble des développements méthodologiques.

Les différentes étapes de cette action sont illustrées sur la Figure 1. **Les protocoles validés à l'issue de celle-ci serviront de base aux actions suivantes, dans le cadre de la mise en œuvre de l'approche SICT.**

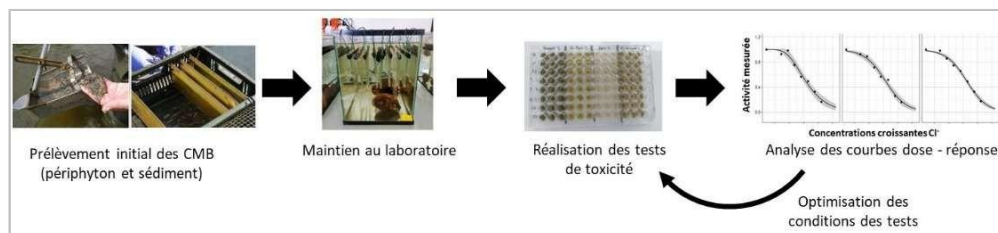


Fig.1 : Illustration des différentes étapes pour l'optimisation des tests de toxicité des ions chlorures sur les communautés microbiennes benthiques

2. Approches en microcosmes

Calendrier prévisionnel: Mai 2026 à Septembre 2027

Périphyton : réalisation expérience : Mai-Juin 2026 / analyses (incluant metabarcoding) : Juillet-Décembre 2026

Sédiment : réalisation expérience : Septembre-Octobre 2026 / analyses (incluant metabarcoding) : Novembre 2026-Avril 2027

Interprétation résultats : Janvier-Septembre 2027

Les expérimentations en microcosmes seront menées en conditions contrôlées de laboratoire à l'aide de canaux artificiels (Fig. 2), dont l'usage est parfaitement maîtrisé par l'équipe EMA-RiverLy pour l'étude des communautés microbiennes périphytiques et sédimentaires soumises à diverses conditions environnementales.

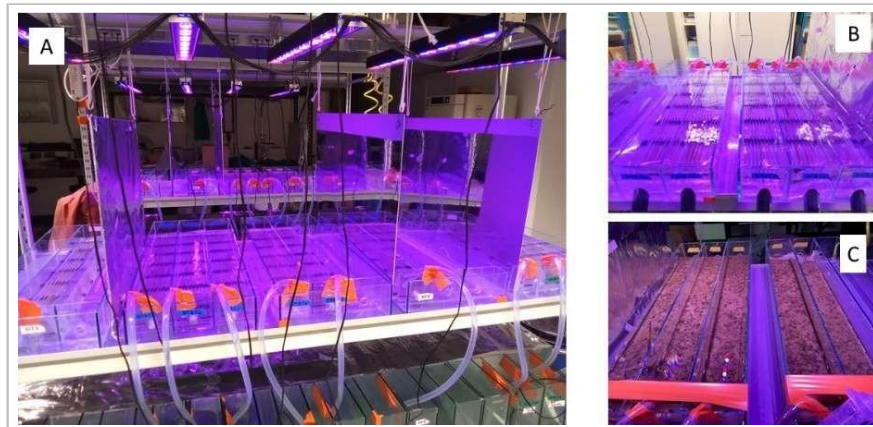


Fig.2 : Illustration des canaux utilisés pour les approches en microcosmes.
A: vue générale
B: canaux contenant du périphyton (sur des lames de verre)
C : canaux contenant du sédiment de surface

Dans ce cadre, les deux types de communautés microbiennes (CMB) seront exposés à une contamination chronique en sels de déneigement, à des concentrations comparables à celles mesurées dans des cours d'eau particulièrement impactés (plusieurs centaines à plusieurs milliers de mg/L). Les CMB utilisées proviendront du même cours d'eau que celles mobilisées dans l'action 1, afin d'assurer une continuité expérimentale. **Pour renforcer la pertinence environnementale de l'étude, nous utiliserons un type de sel réellement employé pour le traitement des routes.** Celui-ci sera fourni par l'une des collectivités territoriales partenaires du projet.

L'évolution temporelle des effets de l'exposition chronique, étalée sur plusieurs semaines, sera suivie à travers une série d'indicateurs structurels (biomasse totale, biomasse algale), fonctionnels (activités microbiennes mentionnées dans l'action 1), ainsi que par l'analyse d'une éventuelle acquisition de tolérance aux ions chlorure. Cette dernière sera évaluée via l'approche SICT, sur la base des protocoles développés précédemment.

Deux hypothèses seront testées : (1) au-delà d'un certain seuil d'exposition chronique – à définir au cours de ces expérimentations – les CMB développeraient une tolérance accrue à la toxicité aigüe des ions chlorure ; (2) cette tolérance émergente serait principalement liée à une modification de la diversité microbienne, avec un déclin des populations sensibles et une prolifération de populations plus tolérantes. Ces changements de diversité seront analysés par metabarcoding de l'ADN microbien, ciblant les communautés bactériennes via le séquençage d'une portion du gène codant l'ARN 16S.

Les résultats issus de ces microcosmes permettront ainsi de valider l'approche SICT tout en identifiant les seuils critiques d'exposition au sel – en termes de durée et de concentration – susceptibles d'induire une augmentation de la tolérance des communautés péiphytiques et sédimentaires à la toxicité aiguë des chlorures.

En complément, nous mobiliserons des protocoles issus de plusieurs années d'expérience dans le cadre d'approches PICT appliquées à divers micropolluants. L'objectif sera d'**évaluer si les seuils d'exposition chronique au sel testés peuvent accroître la vulnérabilité des CMB à d'autres substances chimiques toxiques, ou, au contraire, induire une moindre sensibilité à leur toxicité en raison de possibles phénomènes de co-tolérance**. A titre d'exemple, nous avons par exemple démontré par le passé qu'une hausse brutale de température pouvait moduler la tolérance de communautés microbiennes péiphytiques à la toxicité du cuivre, avec des réponses variables suivant le type de fonction microbienne considérée pour la mesure PICT [10].

3. Suivis in situ

Calendrier prévisionnel: Septembre 2026 à Décembre 2027

Réalisation des campagnes (n=4) : Septembre 2026 - Mai 2027

Analyses (incluant metabarcoding) et interprétation : Septembre 2026 – Décembre 2027

Cette action visera à évaluer le potentiel opérationnel de la méthode SICT, associée à l'analyse de la diversité microbienne, pour diagnostiquer in situ l'impact écologique du salage hivernal des routes sur les cours d'eau. Pour cela, **quatre campagnes d'échantillonnage (C1 à C4) seront organisées sur trois cours d'eau** fortement exposés à ce type de contamination. La sélection de ces cours d'eau s'appuiera sur une présélection établie en concertation avec les collectivités territoriales partenaires, complétée par des analyses préliminaires (dosages in situ des ions chlorure) menées en début de projet, en parallèle à cette action (voir calendrier prévisionnel ci-dessous).

Les quatre campagnes seront réparties autour de la période principale de salage selon le calendrier suivant :

C1 : peu avant les premiers traitements de voirie,

C2 et C3 : pendant la période de salage (par exemple en décembre et février, selon les conditions météorologiques),

C4 : un mois après la fin des opérations de salage.

Lorsque cela sera possible, deux sites seront échantillonnés par cours d'eau : un site en amont et un autre en aval immédiat d'une zone de salage. Les prélèvements porteront à la fois sur les communautés péiphytiques et sédimentaires, et seront complétés par une caractérisation physico-chimique de l'eau de surface et des sédiments, incluant notamment la mesure des ions chlorures.

Cette stratégie permettra d'évaluer les effets du salage, ainsi que la résilience des communautés microbiennes, selon une double approche temporelle (comparaison entre les différentes campagnes) et spatiale (comparaison amont-aval). La multiplication des points de prélèvement (8 sites x 4 campagnes) garantira un volume de données suffisant pour appliquer des analyses statistiques multivariées. Celles-ci permettront de tester les corrélations entre les niveaux de contamination saline et les réponses microbiennes observées, tout en tenant compte des autres paramètres physico-chimiques afin d'identifier d'éventuels facteurs confondants.

Par ailleurs, l'association de la méthode SICT avec une approche de metabarcoding pourrait permettre d'identifier des taxons bactériens particulièrement sensibles ou, au contraire, tolérants au sel. Le cas échéant, ces taxons pourraient constituer de nouveaux bioindicateurs d'un stress chimique lié à la contamination saline.

Les résultats obtenus permettront ainsi d'évaluer la pertinence des méthodes mobilisées en tant qu'outils de diagnostic pour mesurer les impacts écologiques du salage des routes sur les écosystèmes aquatiques.

LIVRABLES :

- Organisation de 2 réunions de pilotage (au démarrage et à mi-parcours) avec l'ensemble des parties prenantes (scientifiques, gestionnaires de sites et agence de l'eau)
- Création d'une page web décrivant le projet EFFET-SEL
- Organisation en fin de projet d'un séminaire multi-acteurs de restitution et de mise en débat des résultats
- Rédaction et diffusion d'un rapport décrivant les objectifs, les résultats et les perspectives scientifiques et opérationnelles (si les résultats le permettent, certaines parties de ce rapport pourront faire l'objet de publications scientifiques internationales)
- Rédaction et diffusion d'une fiche synthétique ZABR

DUREE DU PROJET:

- Date de début : 01/02/2026
- Date de fin : 31/01/2028

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hintz WD, Relyea RA (2019). A review of the species, community, and ecosystem impacts of road salt salinisation in fresh waters. *Freshwater Biology*, doi :10.1111/fwb.13286
 - [2] Porter-Goff ER, Frost PC, Xenopoulos MA (2013). Changes in riverine benthic diatom community structure along a chloride gradient. *Ecological Indicators*, doi : 10.1016/j.ecolind.2013.03.017
 - [3] Van Gray JB, Ayayee P. (2024) Examining the impacts of salt specificity on freshwater microbial community and functional potential following salinization. *Environmental Microbiology*, doi : 10.1111/1462-2920.16628
 - [4] DeVilbiss SE, Steele MK, Brown BL, Badgley BD (2022). Stream bacterial diversity peaks at intermediate freshwater salinity and varies by salt type. *Science of the Total Environment*, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156690
 - [5] Pecher WT, Al Madadha ME, DasSarma P, Ekulona F, Schott EJ, Crowe K, Gut BS, DasSarma S (2019). Effects of road salt on microbial communities: Halophiles as biomarkers of road salt pollution. *PLoS One*, doi: 10.1371/journal.pone.0221355
 - [6] Schmitt X (2012). France 3 Alpes - Enquête publiée le 07/12/2012 (mise à jour 2020) <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/2012/12/07/la-note-salee-du-salage-des-routes-alpines-160453.html>
 - [7] Département de la Savoie - https://www.savoie.fr/web/sw_61581/salage-reduire-les-quantites-de-sel
 - [8] Sabater S, Guasch H, Ricart M, Romaní A, Vidal G, Klünder C, Schmitt-Jansen M (2007). Monitoring the effect of chemicals on biological communities. The biofilm as an interface. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, doi: 10.1007/s00216-006-1051-8
 - [9] Pesce S, Miège C, Dabrin A, Lyautey E, Margoum C, Masson M, Naffrechoux E, Topp E, Bonnineau C (2024) Gradients spatio-temporels des substances pharmaceutiques et conséquences écologiques en cours d'eau agricole et urbain (PharmaTOX). Rapport final de l'action n°75 du Programme 2021 au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR. <https://hal.inrae.fr/hal-04995956>
 - [10] Pesce S, Lambert A-S, Morin S, Foulquier A, Coquery M, Dabrin A (2018) Experimental warming differentially influences the vulnerability of phototrophic and heterotrophic periphytic communities to copper toxicity. *Frontiers in Microbiology*, doi: 10.3389/fmicb.2018.01424
-