

# Etude de la qualité de l'eau sur la communauté de communes de Sumène-Artense, alliant les approches biomarqueur, bioessais et l'intelligence artificielle.

SALVA Sébastien<sup>1</sup>, SAMIR Chafik<sup>1</sup>

DEPRESLE Marie<sup>2</sup>, BANANA HAMADIDI Amira<sup>2</sup>, ROUX Manon<sup>2</sup>, Antoine GOISNARD<sup>2</sup>, Xavier BOURRAIN<sup>2</sup>, Emmanuelle MOUNETOU<sup>2</sup>, Pierre DAUMAR<sup>2</sup> & Mahchid BAMDAD<sup>2</sup>

BONNET Muriel<sup>3</sup>, BORNES Stéphanie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Clermont Auvergne, IUT CA, LIMOS (UMR 6158), Clermont-Ferrand, France,  
[sebastien.salva@uca.fr](mailto:sebastien.salva@uca.fr), [chafik.samir@uca.fr](mailto:chafik.samir@uca.fr)

<sup>2</sup> IUT Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne Laboratoire Imagerie Moléculaire et Stratégies Théranostiques, UMR INSERM UCA 1240, Clermont-Ferrand, France.  
[Mahchid.bamdad@uca.fr](mailto:Mahchid.bamdad@uca.fr)

<sup>3</sup> Université Clermont Auvergne, IUT Clermont Auvergne, Unité Mixte de Recherche sur le Fromage, UMR F 0545, Aurillac, France.

[muriel.bonnet@uca.fr](mailto:muriel.bonnet@uca.fr), [stephanie.bornes@uca.fr](mailto:stephanie.bornes@uca.fr)

*La qualité des ressources en eau représente un enjeu majeur, car elle est impactée principalement par les activités industrielles, le changement climatique et des stratégies de gestion inadaptées. C'est dans ce contexte que les travaux menés en collaboration entre la Communauté de communes de Sumène-Artense (CCSA) et l'Université Clermont Auvergne, avaient proposé de combiner des approches basées sur les biomarqueurs, les bio-essais et l'intelligence artificielle afin de développer des méthodologies innovantes et explicables pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Deux méthodes biologiques ont été explorées : Quantification de la protéine P-gp dans les globules rouges de truite en tant que Biomarqueur de Résistance et l'évaluation de la toxicité de l'eau avec le modèle C. elegans en tant que bio-essais. L'intelligence artificielle a permis de tirer partie de vastes bases de données environnementales et de développer des modèles prédictifs orientés qualité de l'eau. Fort de ces résultats, ce travail pluridisciplinaire a mis en exergue l'importance de la médiation scientifique, nécessaire pour sensibiliser la population aux enjeux de la gestion de l'eau et pour favoriser une gestion durable et participative des ressources aquatiques.*

*Mot-clés: Qualité de l'eau, biomarqueur, bio-essais, science des données*

*Key-words: Water quality, biomarker, bioassays, data science*

## Contexte et besoins

L'eau est omniprésente au sein de la Communauté de Communes de Sumène-Artense, Cantal (CCSA) : lacs, rivières, tourbières et autres zones humides qui ont façonné les paysages et largement influencé l'activité humaine. La région des lacs de l'Artense constitue aujourd'hui un des pôles touristiques majeurs du territoire intercommunal. Parallèlement, les usages industriels locaux (hydroélectricité, agriculture, entreprises, rejets domestiques), associés à des phénomènes climatiques de plus en plus sévères, telles que la sécheresse historique et les canicules observées en France en 2022 impactent de manière de plus en plus conséquente la qualité des milieux aquatiques jusqu'à mettre en péril lesdites activités. De plus, une gestion de l'eau, inadaptée à la réalité de nos ressources et incohérente par rapport aux connaissances scientifiques, ne peut qu'aggraver les sécheresses ou la baisse de la qualité de l'eau. L'Agence Régionale de Santé (ARS) et les communautés de communes à travers leurs compétences sur la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) jouent un rôle essentiel

dans la surveillance et la gestion des milieux aquatiques. Ces organismes interviennent régulièrement pour effectuer des contrôles rigoureux de la qualité microbiologique et chimique de l'eau, garantissant ainsi le respect des normes sanitaires applicables aux consommateurs et aux baigneurs. Ces analyses physico-chimiques et biologiques retournent des données quantitatives et qualitatives indéniables, offrant des informations précieuses pour évaluer l'état des eaux et les risques. Cependant, bien qu'elles soient d'une grande valeur analytique, ces données restent difficilement accessibles au grand public en raison de leur complexité et de leur caractère technique. Cette difficulté d'interprétation freine à élaborer un dialogue constructif avec la population, qui pourrait pourtant être un acteur clé dans la préservation des ressources aquatiques et dans la compréhension des enjeux liés à la qualité de l'eau. Une meilleure vulgarisation et une communication adaptée seraient nécessaires pour rendre ces informations compréhensibles et utiles à tous.

C'est dans ce contexte qu'un consortium de chercheurs de l'IUT Clermont Auvergne s'est associé à la CCSA pour engager une réflexion approfondie sur l'enjeu crucial de la qualité de l'eau. Cette réflexion doit amener à développer des approches novatrices visant à créer une médiation scientifique adaptée, afin de sensibiliser les citoyens et de leur offrir un nouveau regard sur les ressources en eau. Cette collaboration aspire à renforcer la compréhension et l'implication des populations dans la préservation de ce bien précieux. Le consortium a pris naissance lors d'un événement initié par l'IUT Clermont Auvergne appelé Université Foraine (<https://iut.uca.fr/universite-foraine/presentation-de-luniversite-foraine-1>). Cet événement offre un temps d'échange entre enseignants, chercheurs, entreprises et acteurs des territoires en dehors des murs de l'Université, dans un territoire. À la suite de l'événement datant de juillet 2022, la CCSA et trois laboratoires de recherche IMOST, UMRF et LIMOS, ont choisi de travailler ensemble sur cet enjeu sociétal. Ces acteurs ont formulé deux questions scientifiques clés, servant de base à une approche pluridisciplinaire :

### **Quels autres processus d'analyses biologiques peut-on mettre en place pour estimer la qualité de l'eau, qui soient explicables à la population ?**

Deux méthodes ont été retenues en réponse aux besoins identifiés et en tenant compte des expertises scientifiques des participants : le **Développement d'un biomarqueur environnemental avec le modèle poisson** et le **Développement d'un bio-essai de toxicité avec le modèle *Caenorhabditis elegans***. La première repose sur l'analyse d'une protéine de défense/agression mesurée à l'échelle cellulaire dans les globules rouges de truites. Ce biomarqueur permet d'évaluer la qualité de l'eau directement à travers un organisme aquatique supérieur, offrant ainsi une analyse pertinente et biologique des conditions environnementales. La seconde méthode se base sur un test de toxicité utilisant un nématode modèle connu pour ses homologies génétiques et protéiques importantes avec l'humain. Ces approches, qui s'appuient sur l'utilisation d'organismes vivants pour diagnostiquer la qualité de l'eau, sont amenés à faciliter la médiation scientifique en rendant les résultats plus tangibles et accessibles. Elles favorisent ainsi une meilleure sensibilisation et compréhension des enjeux environnementaux par le grand public.

### **Comment l'intelligence artificielle peut-elle être déployée pour « faire parler » les données ?**

L'étude repose sur l'exploitation des grandes masses de données fournies par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et dans le but est d'identifier des techniques simples, explicables et re-exploitable pour aborder la qualité de l'eau dans ses dimensions spatiales et temporelles. Cette démarche ouvre la voie à une autre réflexion sur des outils de diagnostic avancés permettent d'anticiper les évolutions de la qualité des ressources en eau, et de contribuer ainsi à une gestion plus proactive et adaptée aux défis environnementaux et sanitaires.

Le besoin de transmettre et de vulgariser les résultats obtenus par le biais de la médiation scientifique a rapidement été soulevé. Plusieurs temps de discussions ont été mis en place avec la CCSA, ses techniciens GEMAPI, les associations de pêche et les citoyens. Ces échanges ont permis d'aborder l'enjeu sur la qualité de l'eau selon différents angles.

Ces points sont développés dans la suite de cet article.

## **Etude de la Qualité de l'eau par le développement du biomarqueur Sentinelle à partir du niveau d'expression de la « Permeability Glycoprotein » (P-gp) dans les globules rouges des truites fario *via* les fluorosondes LightSpot®-FL-1 et Guardian-1**

Le groupe Résistance IMoST (UMR INSERM-UCA 1240) a une grande expertise dans le développement de biomarqueurs environnementaux à partir de l'expression de la protéine de « MultiDrug Resistance » (MDR) majeure, la Permeability glycoprotein (P-gp). Cette dernière est une protéine d'efflux membranaire impliquée dans les mécanismes de défense à l'échelle cellulaire (Sarkadi et al., 2006). Elle reconnaît et cible une grande classe de substrats de structures et de propriétés très variées, tels que les médicaments et les polluants. L'expression de la P-gp (au niveau génique et protéique) peut-être induite (augmentée) en présence de xénobiotiques (médicaments et polluants) dans l'environnement (Bamdad et al. 2011; Valton et al, 2013). Cette propriété d'induction de la P-gp peut être exploitée pour le développement d'un biomarqueur global et de type prédictif de la pollution de l'eau. La preuve de concept du biomarqueur Sentinelle a été démontrée au laboratoire et également sur le terrain dans différentes rivières, en Région AURA [Bamdad et al., 2011, Valton et al., 2013; 2015; 2017). Cependant, les méthodologies employées pour ce développement étaient lourdes et coûteuses. Plus récemment, le groupe Résistance a développé de nouveaux traceurs intracellulaires fluorescents intitulés "LightSpot" et "Guardian" capables de détecter et de quantifier la P-gp, d'une manière spécifique et directe (Goisnard et al. 2021, Bamdad et al., 2019). La détection et la quantification de la P-gp par ces outils sont réalisées par des méthodologies simples, rapides et directes, d'imagerie ou de cytométrie (Goisnard et al. 2021, Bamdad et al., 2019).

C'est dans ce contexte que le groupe Résistance IMoST a initié le développement d'un **biomarqueur Sentinelle sur la P-gp des globules rouges de truites des lacs et rivières de la CCSA**, mais avec la nouvelle méthodologie utilisant ces traceurs innovants.

Pour ce développement plusieurs méthodologies de fixation ou pas avec la paraformaldéhyde des globules rouges de truites ont été testées à température ambiante et à 4°C sur le terrain et/ou au laboratoire. Par la suite, la méthodologie de marquage par les deux traceurs fluorescents a été développée au laboratoire.

Pour cette mise au point, des tests préliminaires seront effectués avec des truites de pisciculture, ces résultats ont permis de déterminer les conditions expérimentales optimales. Ensuite, des études comparatives ont été réalisées sur le terrain en utilisant les sangs de truites issues des eaux de rivières en collaboration avec la Fédération de la Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques (FPPMA) du Cantal (45) et du Puy de Dôme (63).

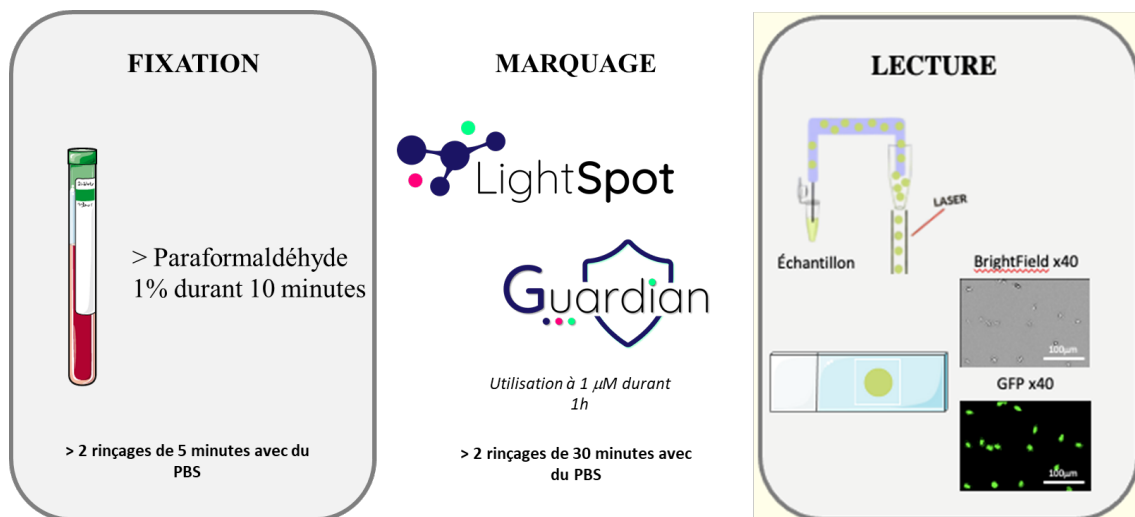
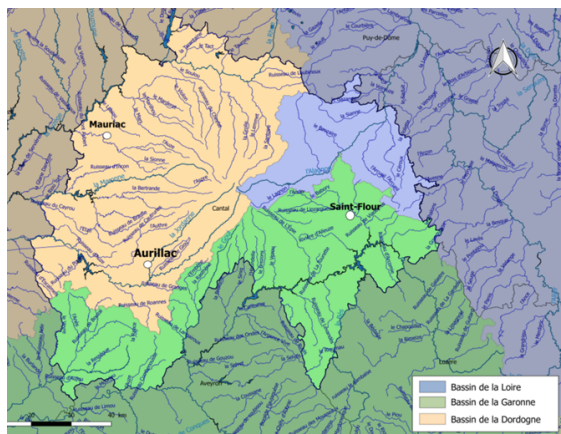
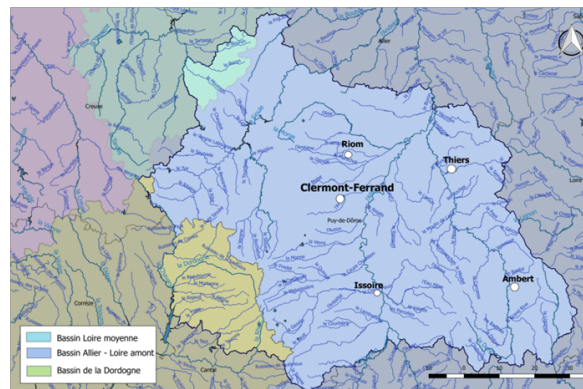


Figure 1 : protocole expérimental pour le marquage des globules rouges de truites utilisant les étapes de fixation, marquage par les traceurs fluorescents et la lecture par cytométrie en flux.

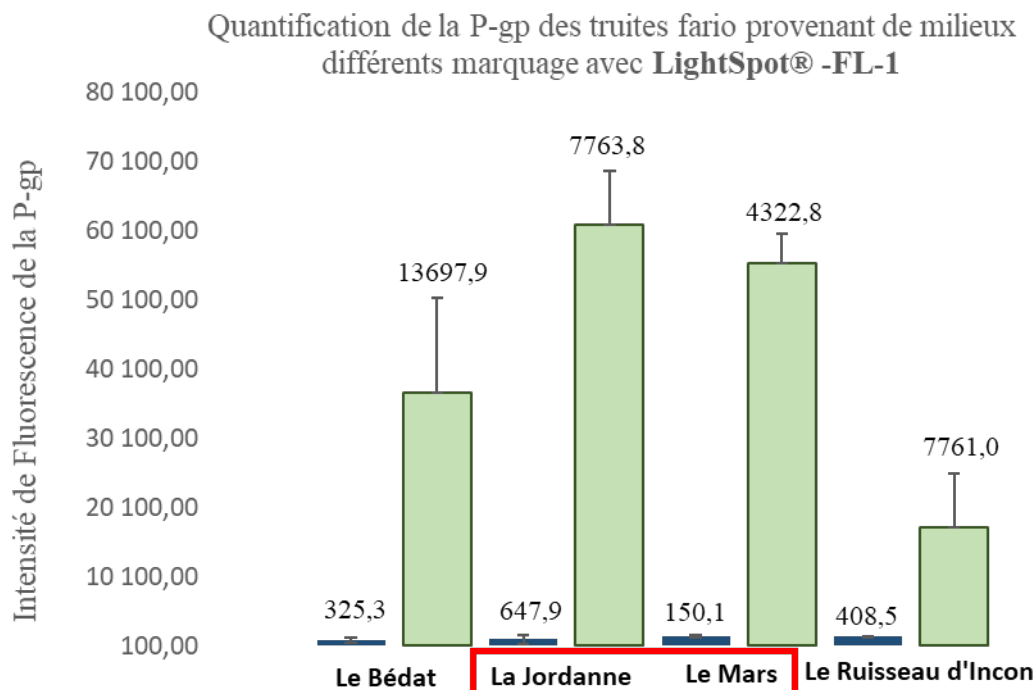


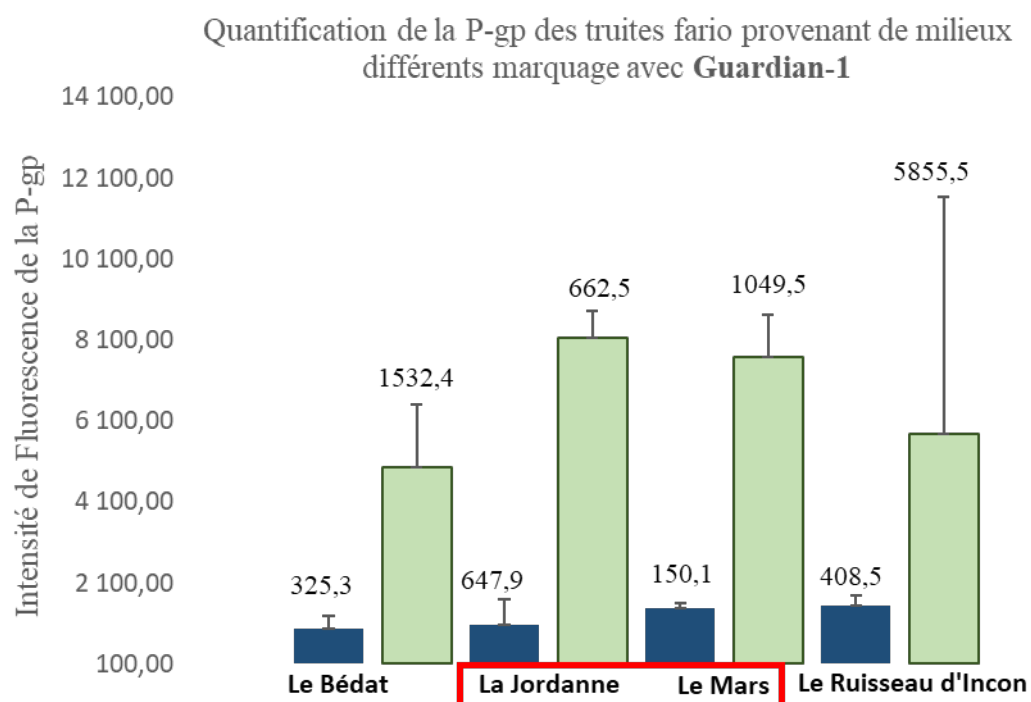
- Le ruisseau d'Incon
- La Jordanne
- Le Mars

- Le Bédet



**Figure 2 : Les cours d'eau analysée pour l'étude au sein de la Communauté de communes de Sumène-Artense, Cantal (CCSA).** Pour cette partie des travaux, nous avons été accompagnés par Romain MAX et les différents membres de la Fédération de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques du Cantal, ainsi que par Lillian BONAFOUX, François DESMOLLES et les différents membres de la Fédération de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques du Puy de Dôme pour leur aide lors de la pêche effectuée au département du Puy de Dôme.





**Figure 3 : Comparaison de l'expression de la P-gp sur des rivières avec des niveaux de pollution différents.** Sur chaque site, 4 truites ont été prélevées. Les échantillons conservés à température ambiante et non fixés ont été rincés avec du PBS. Finalement ils ont été marqués avec chacune des sondes LightSpot®-FL-1 ou Guardian – 1. Pour chaque site nous avons présenté les conditions des cellules non marquées (barre en bleu = témoin) et marquées par la fluorosonde (barre vert). Les barres d'erreur représentent les écart-types.

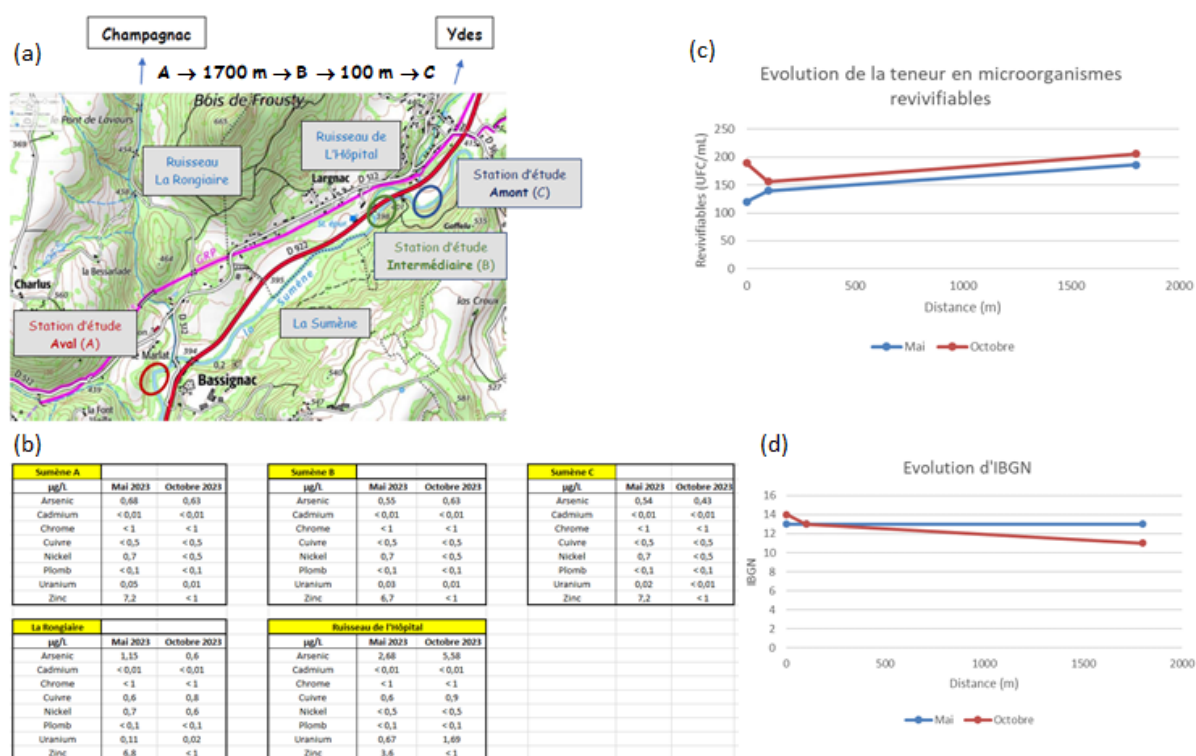
Une fois que les meilleures conditions de conservations des échantillons sanguins, ont été établies, les premiers tests sur le terrain ont été réalisés. Pour ces travaux, nous avons collaboré avec la Fédération de Pêche et de Protection des Milieux Aquatiques du Cantal (45) et du Puy de Dôme (63) (**Figures 1, 2**). Les résultats obtenus à partir des échantillons non fixés et marqués avec LightSpot®-FL-1 et Guardian avec Guardian-1 montrent que l'expression de la P-gp est le plus élevée sur La Jordanne et Le Mars, suivis par le Bédât et finalement le ruisseau d'Incon (**Figure 3**). Le niveau d'expression élevé de la P-gp au niveau du Mars et de la Jordanne pourrait être expliquer par la disparition du 50% des truites sur ces sites. Concernant le Bédât, situé dans une zone urbaine, le niveau de P-gp est inférieur à celui des deux ruisseaux précédents. Cela pourrait s'expliquer par un état de pollution chronique de cette rivière, auquel les truites se seraient adaptées. Pour le ruisseau d'Incon, nous pouvons constater que le taux d'expression de la P-gp est le plus bas, cela est en adéquation avec les données physico-chimiques existantes.

L'ensemble des résultats obtenus par ces travaux laissent supposer que la méthodologie mise en au point pour la mesure du taux d'expression de la P-gp par les deux traceurs fluorescents, est optimisée et par conséquent pourrait être exploitée. Cette nouvelle avancée permettra d'une part, de fournir des **données quantitatives sur la qualité de l'eau et d'autre part, d'informer sur l'état santé des poissons**, colonisant cette rivière. Le savoir-faire et la méthodologie du biomarqueur sentinelle seront transférés pour une application large sur l'ensemble des eaux de rivières et/ou des plans d'eau.



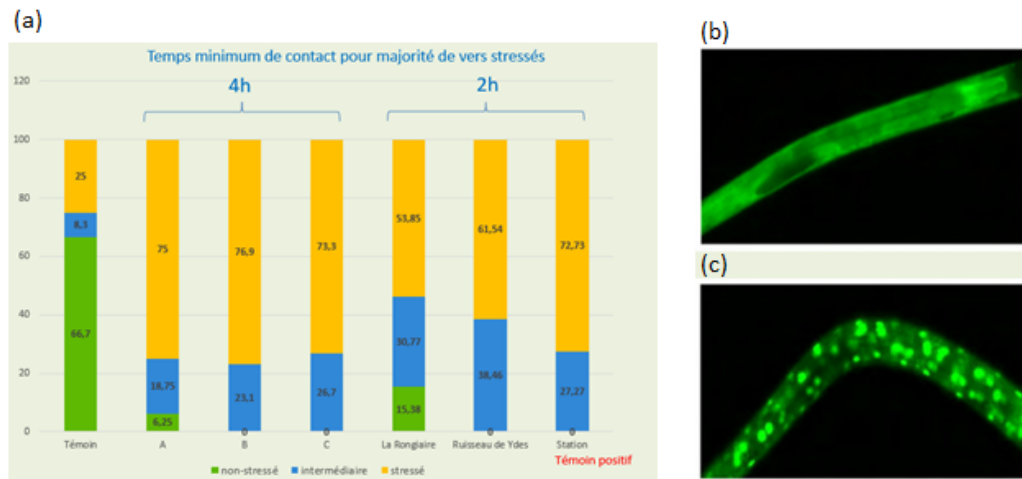
## Etude de la Qualité de l'eau utilisant un bio-essai avec le modèle *C. elegans*

L'Unité Mixte de Recherche sur le Fromage (UMRF, UMR 0545) est spécialisée dans la compréhension des interactions microbiennes dans des domaines de la santé et de l'agroalimentaire. Le modèle nématode *Caenorhabditis elegans* a été développé à l'UMRF pour étudier de façon innovante et bioéthique les effets biologiques de microorganismes, de produits chimiques et d'extraits de différentes origines (végétaux, algues, fromages) sur un hôte. *C. elegans* possède d'importantes homologues avec l'homme aux niveaux génétique et protéique. De plus, les voies de signalisation (réponse au stress) sont conservées du nématode jusqu'à l'homme ce qui en fait un modèle pertinent et robuste pour décrypter des mécanismes moléculaires [Poupet *et al.*, 2020; Cardin *et al.*, 2021; Poupet *et al.*, 2022]. Dans le contexte de ce projet, **l'utilisation du modèle *C. elegans* a été étendue au domaine de l'environnement**. En effet, ce modèle a été utilisé comme un bio-essai pour réaliser des tests de toxicité sur des échantillons d'eau, tests complémentaires de ceux réalisés dans l'étape (i). Trois points de prélèvements ont été identifiés, un sur le ruisseau de référence, la Sumène, et les 2 autres en aval de l'arrivée de 2 affluents (Figure 4.a). Deux prélèvements ont été réalisés, un au printemps (mai), le second en automne (octobre). La méthodologie de prélèvement a été mise au point (prélèvements, transport et conservation, échantillonnage) et standardisée. Les étudiants de BTS métiers de l'eau du lycée de Mauriac ont réalisé des analyses physico-chimiques qui ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative de température, de teneur en dioxygène, de turbidité, de MES entre le printemps et l'automne, entre l'amont et l'aval de la rivière. De plus, les nitrates, nitrites, phosphates et ammonium sont en concentrations équivalentes quel que soit le prélèvement ; aucune substance toxique n'a été identifiée (Figure 4.b). L'étude microbiologique ne montre pas de différence entre les échantillons, avec une présence normale de *E. Coli* et d'entérocoques (Figure 4.c). Seule une légère perturbation de l'IBGN a été observé à l'automne (Figure 4.d).



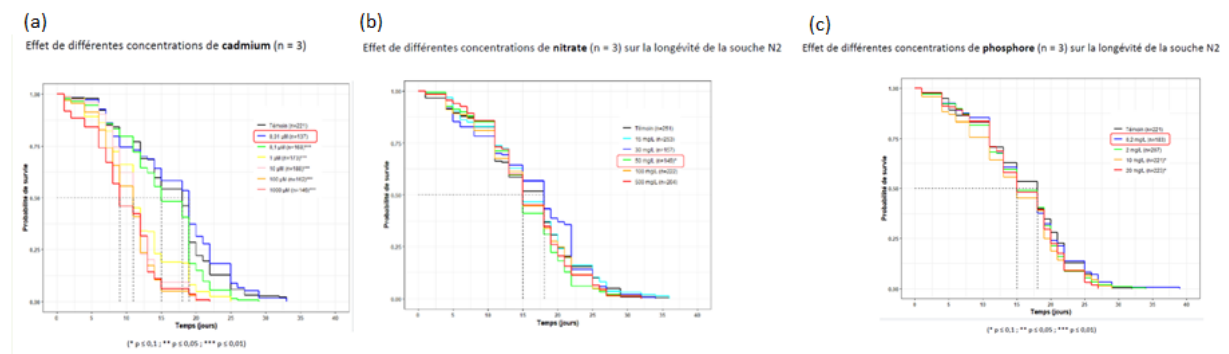
**Figure 4 : Analyses physico-chimiques et biologiques des eaux prélevées.** (a) Positions des sites de prélèvements des eaux de rivière en Sumène-Artense. (b) Evaluation de la qualité hydrobiologique des eaux par le calcul de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN). (c) Analyse des métaux et autres composés toxiques. (d) Etude microbiologique, via la quantification de la présence d'entérocoques et *E. coli*.

En parallèle des analyses physico-chimiques et biologiques, les nématodes ont été mis en contact avec les différentes eaux et des tests de viabilité et de longévité ont été réalisés en laboratoire. Pour cela, les vers vivants en contact des échantillons d'eau ont été comptés quotidiennement afin d'évaluer le niveau de toxicité des différentes eaux prélevées. Le suivi de la localisation cellulaire du facteur de transcription DAF16 a également été réalisé par microscopie à fluorescence chez un mutant *C. elegans* DAF16-GFP. La localisation nucléaire de ce facteur reflète la perception d'un stress par le nématode et permet d'avoir des résultats en quelques minutes. Les tests de survie et de longévité en présence des eaux prélevées en rivière n'ont pas montré de résultats significativement différents du contrôle sur leur milieu de référence (résultats non montrés). Les tests avec le mutant DAF16-GFP montre un stress important perçu par le nématode lorsqu'il est mis en présence d'eaux de rivière (Figure 5). La sensibilité excessive de ce test le rend inutilisable pour cette application.



**Figure 5 : Evaluation du stress provoqué chez *C. elegans* en présence des eaux de rivière.** (a) Utilisation d'un mutant GFP (Green Fluorescent Protein) pour mettre en évidence la perception d'un stress par le nématode en présence d'eau. En vert sont représentés les nématodes non stressés, en jaune, les nématodes stressés et en bleu les vers pour lesquels la situation est intermédiaire. (b) Photo d'un nématode mutant GFP non stressé (fluorescence diffuse). (c) Photo d'un nématode mutant GFP stressé (fluorescence localisée dans les noyaux cellulaires).

Pour vérifier la sensibilité du nématode à des contaminations, des tests ont été réalisés en utilisant des eaux artificiellement contaminées (Figure 6). Les résultats obtenus montrent que le nématode n'est pas sensible à des contaminations artificielles d'eau à des gammes de concentrations en Cadmium, Nitrates ou Phosphore. Un effet toxique a été observé en présence de Cadmium mais à des concentrations supérieures aux normes environnementales (1uM à 1000mM) mais même dans ces conditions, les nématodes survivent pendant une vingtaine de jours.



**Figure 6 : Tests de longévité des nématodes en présence des eaux artificiellement polluées avec du Cadmium (a), du Nitrate (b), du Phosphore (c).**



Ce travail a permis de mettre en évidence que le modèle *C. elegans* n'était pas pertinent pour évaluer la qualité de l'eau et pour émettre des diagnostics de toxicité. En effet, les résultats montrent que la sensibilité de ce modèle n'est pas adaptée à ces conditions expérimentales. D'autre part, les échantillons doivent être transportés jusqu'au laboratoire pour être testés et la durée des tests (survie, longévité) est de plusieurs semaines ce qui ne rend pas l'utilisation de ce modèle pertinent pour une utilisation en routine sur le terrain.

### Comment l'intelligence artificielle peut-elle être déployée pour « faire parler » les données ?

La science des données, qui comprend l'extraction de connaissances, l'analyse de patterns et l'apprentissage automatique (machine learning), revêt une importance croissante aussi bien dans le domaine académique que dans le secteur industriel. Concernant l'étude de la qualité de l'eau, les agences de l'eau et les communautés de communes, dans le cadre de leur mission GEMAPI, collectent une large quantité de données incluant les paramètres physico-chimiques et biologiques des eaux de surface. Dans cette étude, nous nous sommes principalement appuyés sur les données de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, qui fournit des informations détaillées par station de mesure. Chaque station correspond à un site spécifique équipé de dispositifs et d'instruments permettant de collecter des données sur divers paramètres environnementaux. Les données couvrent une période allant de 1970 à nos jours, avec des volumes conséquents pour chaque année. Ces données sont disponibles par station et comprennent environ 200 paramètres différents, incluant des mesures physico-chimiques, biologiques, phytosanitaires, ainsi que des données liées à l'hydrobiologie. Cependant, il est essentiel de souligner que ces ensembles de données présentent des limitations significatives, ce qui compromet la précision et l'exhaustivité de toute analyse. Par exemple, la Figure 7 synthétise le nombre de paramètres collectés pour la station *La Sumène en amont de Valette*. On peut facilement observer que le nombre de paramètres collectés varie considérablement, avec des périodes allant jusqu'à quelques mois sans collecte.

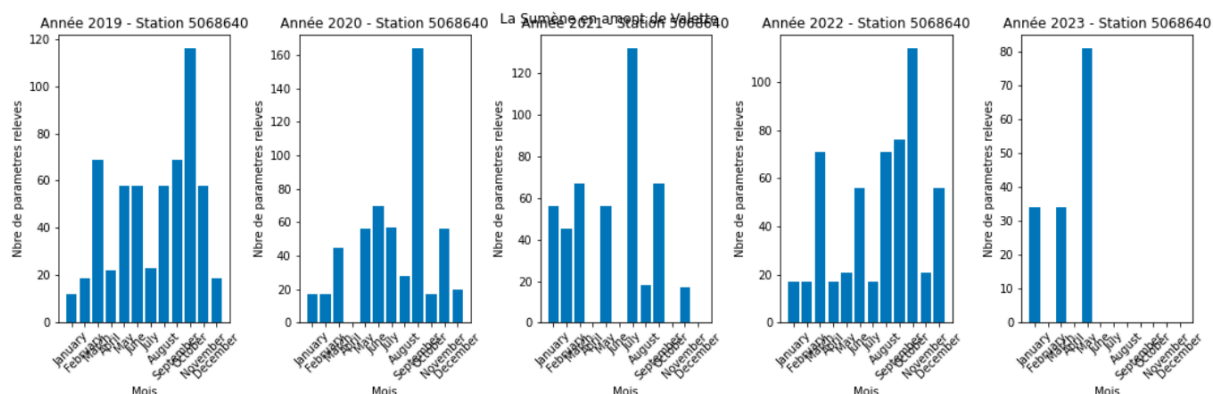


Figure 7 : nombre de paramètres physico-chimiques de l'eau collectés - La Sumène en amont de Valette

Notre première approche a donc été d'appliquer un pré-traitement approfondi de ces données visant à éliminer les anomalies, les valeurs manquantes ou les erreurs de saisie conformément aux méthodes décrites dans divers travaux antérieurs (Yingyi et al., 2020, Li et al. 2019, Jouseau et al., 2024). Afin de rendre cette première étape d'analyse des données accessible, nous avons élaboré diverses cartes de stations. La Figure 8 présente une carte où le niveau de qualité de l'eau est défini par la moyenne des paramètres normalisés, sur une échelle allant de 1 à 5 (1 correspondant à un niveau de qualité "Très Bon" et 5 à un niveau de qualité "Mauvais").

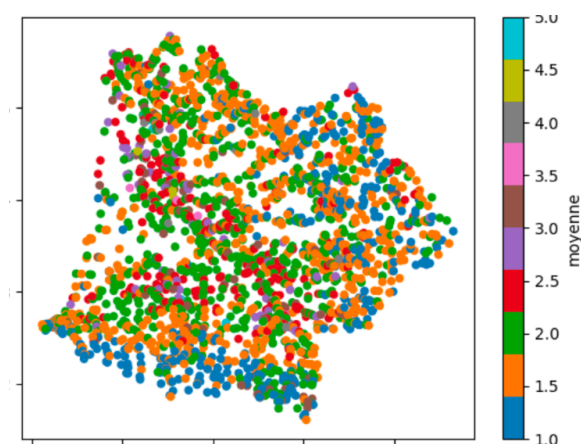


Figure 8 : cartes des stations du bassin Adour-Garonne selon le niveau de qualité de l'eau

Dans une seconde étape, nous avons utilisé des techniques d'analyse de données pour identifier les paramètres les plus influents dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Parmi les méthodes employées, le *mean decrease in impurity* et la *feature permutation* ont été particulièrement efficaces pour mesurer l'importance relative de chaque paramètre. Ces techniques, couramment employées dans le domaine de l'apprentissage automatique, permettent de quantifier l'impact de chaque variable sur la performance d'un modèle prédictif. L'application de ces méthodes a permis d'extraire 8 paramètres clés qui jouent un rôle déterminant dans le calcul de la qualité de l'eau, tels que l'oxygène dissous, les nitrates, les nitrites, le taux de saturation en oxygène et le phosphore, qui sont bien connus pour leur impact direct sur la santé des écosystèmes aquatiques. Ce travail nous a permis d'étudier l'évaluation de la qualité de l'eau grâce à une métrique internationale largement reconnue : l'Indice de Qualité de l'Eau (Water Quality Index, WQI) (Khan et al., 2022, Aldbyani et al., 2020). Ce dernier repose sur des techniques d'agrégation qui permettent de combiner plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques en un indice unique qui reflète l'état de la qualité de l'eau. Le WQI permet ainsi de simplifier des données complexes et volumineuses en une échelle facilement compréhensible, facilitant la communication des résultats et la prise de décision dans la gestion des ressources en eau. De façon synthétique, et en respectant les niveaux de pollution définits nationalement et listés sur LEGIFRANCE, nous avons observé que 91,54% des cours d'eau de surface sont d'excellente qualité, 7,55% sont de bonne qualité et 0,9% sont de qualité moyenne dans le bassin Adour-Garonne.

Dans une dernière étape, nous avons réalisé des prédictions sur l'évolution de la qualité de l'eau, tant à l'échelle des mois à venir qu'à celle des prochaines années. Pour ce faire, nous avons exploité les données disponibles en tant que séries temporelles (données organisées sous la forme d'une séquence chronologique, où chaque observation est associée à un moment précis). Dans ce travail, nous nous sommes limités à des séries temporelles univariées qui décrivent le niveau de WQI de 15 stations. Nous avons rapidement rencontré une difficulté majeure liée aux effets du changement climatique pour le calcul d'une prédiction de la qualité de l'eau sur les prochaines années. Les années 2022 et 2023 ont été marquées par des épisodes de forte chaleur et de sécheresse, qui n'avaient pas été prévus par les modèles météorologiques. Ces aléas climatiques, qui ont des répercussions significatives sur la qualité de l'eau, rendent difficile un calcul de prédiction précis et fiable à long terme, car, par définition, ces aléas ne sont pas présents dans les observations passées. En revanche, les modèles de prédiction que nous avons expérimentés à court terme (sur quelques mois) se sont révélés performants. Par exemple, la Figure 9 illustre, sous forme de série temporelle, l'évolution de la qualité de l'eau pour la station La Sumène en amont de Valette. La courbe bleue représente le niveau de qualité passé, la partie orange correspond à la prédiction calculée, et la partie rouge montre le niveau de qualité réel observé. La prédiction obtenue est très proche du niveau réel, ce qui témoigne de la fiabilité du modèle à court terme et de sa capacité à anticiper correctement l'évolution de la qualité de l'eau sur une période limitée.

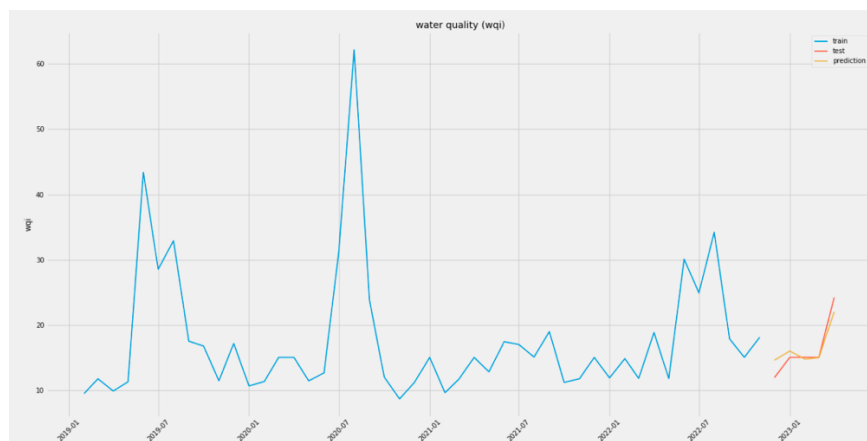


Figure 1 : prédiction de la qualité de l'eau station La Sumène en amont de Valette

L'utilisation de ces modèles de prédiction peut aider à anticiper les variations de la qualité de l'eau, facilitant ainsi la gestion préventive des ressources en eau et la mise en place de mesures adaptées pour préserver leur qualité. Il est donc essentiel d'encourager le développement de modèles précis intégrant plusieurs scénarios sur le changement climatique et l'intégration de ces outils analytiques dans les pratiques de gestion de l'eau à travers des politiques publiques renforcées.

### La qualité de l'eau, un enjeu sociétal

Ce travail sur la qualité de l'eau a également mis en lumière l'utilité de l'Université sur le territoire en exerçant et développant une contribution à l'éducation populaire à travers la médiation scientifique. Cette dernière joue un rôle clé dans le traitement de l'enjeu complexe de la qualité de l'eau, en établissant un pont entre les connaissances scientifiques et les besoins des citoyens, des décideurs et des acteurs locaux. Dans ces travaux, nous nous sommes efforcés de traduire des données techniques en informations accessibles et contextualisées. En favorisant le dialogue entre chercheurs et communautés, cette médiation a aidé à sensibiliser sur les risques liés à la dégradation de l'eau, pour ensuite développer des enjeux sociétaux pour une gestion durable et équitable des ressources en eau.

Afin de coconstruire cette médiation de façon efficace avec les acteurs territoriaux, nous avons adopté une démarche réflexive sur les actions entreprises afin d'évaluer leur impact sur un discours. Cela a inclut une analyse critique des processus employés pour mieux ajuster nos actions à chaque étape. Des temps de restitution des connaissances produites ont ensuite été organisés, permettant de partager les connaissances avec les techniciens GEMAPI et les associations de pêche. Ces moments ont permis d'obtenir des informations de terrain sur la qualité de cours d'eau, sur les données, et d'évaluer le sens des résultats présentés par des experts de terrain. Par la suite, deux temps de vulgarisation ont été programmés dans le Cantal à destination des élus, d'étudiants de BTS "Métiers de l'eau" et du public pour faciliter la rencontre entre chercheurs et les acteurs locaux. Ces temps ont été complétés par des visites de laboratoires organisées à l'Université pour les élus locaux, leur permettant de découvrir directement les outils et méthodologies utilisés pour étudier la qualité de l'eau. A travers ces actions, nous avons cherché à établir un pont entre la recherche scientifique et les territoires, en assurant une diffusion des connaissances claire, pertinente et adaptée aux besoins des différents publics. Ces échanges ont amené à développer la problématique sur la qualité de l'eau selon différents angles et à lever des questions dont la majorité est présentée ci-dessous :

**Pollution chimique et biologique** : La pollution chimique (pesticides, métaux lourds, hydrocarbures) et biologique (bactéries, virus, algues toxiques) altère la qualité de l'eau, menaçant les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. Les sources principales incluent l'agriculture intensive, les rejets industriels, et l'absence de traitement adéquat des eaux usées. Les impacts vont de la perte de biodiversité à l'augmentation des maladies hydriques. Comment sensibiliser les agriculteurs et les industries à adopter des pratiques moins polluantes ? Comment intégrer les savoirs locaux pour une gestion durable de l'eau face à ces pollutions ?

**Coût de l'assainissement** : L'assainissement de l'eau nécessite des infrastructures coûteuses pour le traitement des eaux usées et la distribution d'eau potable, ce qui pose des défis financiers, notamment

dans les zones rurales. Ces coûts élevés peuvent exacerber les inégalités, car les communautés les plus vulnérables font souvent face à davantage de difficultés pour financer ces services. Par ailleurs, le manque d'investissement dans l'entretien des infrastructures peut entraîner leur dégradation, aggravant les problèmes sanitaires et environnementaux. Quels modèles d'économie circulaire pourraient réduire les coûts liés au traitement des eaux usées ?

**Économie locale :** Une eau polluée peut compromettre les rendements agricoles, décimer les ressources halieutiques, ou rendre les destinations touristiques moins attractives. Par ailleurs, les coûts associés à la dépollution ou à la gestion des conséquences économiques peuvent peser lourdement sur les petites entreprises et les collectivités locales. Comment encourager des pratiques agricoles et industrielles durables pour préserver la qualité de l'eau ? Comment valoriser l'eau comme ressource économique tout en protégeant les écosystèmes locaux ?

**Augmentation des températures :** L'augmentation des températures due au changement climatique a des effets directs sur la qualité et la disponibilité de l'eau. Elle accélère l'évaporation, réduisant le niveau des réservoirs et des cours d'eau, tout en concentrant les polluants dans les eaux stagnantes. Les températures élevées favorisent aussi la prolifération de microorganismes pathogènes et d'algues toxiques, ce qui impacte les écosystèmes aquatiques et accroît les risques sanitaires pour les populations. Comment intégrer l'impact de l'augmentation des températures dans les stratégies de gestion de l'eau ? Comment adapter les infrastructures d'assainissement pour faire face à des températures extrêmes ?

**Gestion des ressources :** La gestion des ressources en eau doit concilier des besoins multiples (domestiques, agricoles, industriels, écologiques) dans un contexte de disponibilité souvent limitée. Une mauvaise gestion peut entraîner une surconsommation, une pollution accrue et des conflits, nécessitant des solutions durables et intégrées qui tiennent compte des réalités locales et globales. Quels outils de planification peuvent optimiser la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle locale et régionale ? Comment promouvoir des pratiques de consommation responsable parmi les différents utilisateurs de l'eau ? Quelles technologies pourraient améliorer l'efficacité de l'utilisation et de la distribution de l'eau ?

## Conclusion et perspectives

La question de la qualité de l'eau constitue un enjeu majeur aux implications tant environnementales, sanitaires, qu'économiques. Cette approche pluridisciplinaire alliant biomarqueurs, bioessais et intelligence artificielle, a permis d'apporter une autre évaluation de la qualité des eaux de surface du territoire de la CCSA. La complémentarité des méthodes utilisées a offert une vision plus accessible de la problématique aux acteurs locaux et la population. Cette étude a également introduit l'avantage à développer de la médiation scientifique dans la préservation des ressources en eau. La mise en place d'outils innovants et l'implication active des acteurs locaux sont essentielles pour assurer une gestion durable et adaptée aux enjeux contemporains du changement climatique et de la pression anthropique sur les milieux aquatiques. L'exploitation des données issues des biomarqueurs et des analyses prédictives pourrait être intégrée en tout ou partie aux plans communaux de sauvegarde. Cette démarche permettrait d'anticiper les risques environnementaux liés à la dégradation de la qualité de l'eau et d'orienter des mesures préventives adaptées. Elle permettrait aussi de développer davantage d'actions de médiation scientifique, notamment à travers des plateformes interactives de suivi de la qualité de l'eau ou des ateliers participatifs impliquant les collectivités, les écoles et les associations locales.

## Références

Aldhyani, Theyazn Hh, Al-yaari, Mohammed, Alkahtani, Hasan, et al. (2020), Water quality prediction using artificial intelligence algorithms. Applied Bionics and Biomechanics, 2020, vol. 2020.

Bamdad, M.; Daumar, P.; Gauthier, J.; Goisnard, A.; Dubois, C.; Mounetou, E.; Penault-Llorca, F.; Vidalinc, B. LightSpot Patent - (04 Octobre 2019) Université Clermont Auvergne/INSERM/BIOMARQUEURS - N° FR1911035 - PCT/EP2020/077694 Du 02/10/2020 - Exclusive License for BIOMARQUEURS SAS.

Bamdad M., Valton E. & Amblard C (09 décembre 2011) Biomarqueurs moléculaires sentinelles. Brevet Sentinelle UCA n° FR2983871.

Cardin G, Poupet C, Bonnet M, Veisseire P, Ripoche I, Chalard P, Chauder A, Saunier E, Priam J, Bornes S, Rios L. A Mechanistic Study of the Antiaging Effect of Raw-Milk Cheese Extracts. *Nutrients*. 2021 Mar 10;13(3):897. doi:10.3390/nu13030897. PMID: 33802038; PMCID: PMC8000626.

Goisnard A., Daumar P., Dubois C., Aubel C., Roux M., Depresle M., Gauthier J., Vidalinc B., Penault-Llorca F., Mounetou E. & Bamdad M. (2021) LightSpot®-FL-1 Fluorescent Probe: An Innovative Tool for Cancer Drug Resistance Analysis by Direct Detection and Quantification of the P-glycoprotein (P-gp) on Monolayer Culture and Spheroid Triple Negative Breast Cancer Models. *Cancers (Basel)* 2021 Aug 11;13(16):4050. doi: 10.3390/cancers13164050.

Roxane Jouseau, Sébastien Salva, Chafik Samir (2024), A Novel Metric for Measuring Data Quality in Classification Applications. International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2024, p. 141-148, Rome, Italy

Khan, Md Saikat Islam, Islam, Nazrul, Uddin, Jia, et al. (2022), Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022, vol. 34, no 8, p. 4773-4781.

Li, L., Jiang, P., Xu, H. et al (2019), Water quality prediction based on recurrent neural network and improved evidence theory: a case study of Qiantang River, China. *Environ Sci Pollut Res* 26, 19879–19896 (2019).

Poupet C, Rifa É, Theil S, Bonnet M, Veisseire P, Cardin G, Guéret É, Rialle S, Chassard C, Nivoliez A, Bornes S. *In vivo* investigation of Lcr35® anti-candidiasis properties in *Caenorhabditis elegans* reveals the involvement of highly conserved immune pathways. *Front Microbiol*. 2022 Dec 23;13:1062113. doi: 10.3389/fmicb.2022.1062113. PMID: 36620055; PMCID:PMC 9816150.

Poupet C, Chassard C, Nivoliez A, Bornes S. *Caenorhabditis elegans*, a Host to Investigate the Probiotic Properties of Beneficial Microorganisms. *FrontNutr*. 2020 Aug 21;7:135. doi: 10.3389/fnut.2020.00135. PMID: 33425969; PMCID:PMC7786404.

Sarkadi, B.; Homolya, L.; Szakacs, G.; Varadi, A. Human multidrug resistance ABCB and ABCG transporters: Participation in a chemoimmunity defense system. *Phys. Rev.* 2006, 86, 1179–1236.

Valton, E.; Amblard, C.; Wawrzyniak, I.; Penault-Llorca, F.; Bamdad, M. P-gp Expression in Brown Trout Erythrocytes: Evidence of a Detoxification Mechanism in Fish Erythrocytes. *Sci Rep* 2013, 3, 3422, doi:10.1038/srep03422.

Valton E, Amblard C, Desmolles F, Combourieu B, Penault-Llorca F, Bamdad M. Mini-P-gp and P-gp Co-Expression in Brown Trout Erythrocytes: A Prospective Blood Biomarker of Aquatic Pollution. *Diagnostics (Basel)*. 2015 Jan 12;5(1):10-26. doi: 10.3390/diagnostics5010010.PMID: 26854141 .

Valton, E.; Wawrzyniak, I.; Amblard, C.; Combourieu, B.; Bayle, M.-L.; Desmolles, F.; Kwiatkowski, F.; Penault-Llorca, F.; Bamdad, M. P-gp Expression Levels in the Erythrocytes of Brown Trout: A New Tool for Aquatic Sentinel Biomarker Development. *Biomarkers* 2017, 22, 566–574, doi:10.1080/1354750X.2017.1338314.

Yingyi Chen and Lihua Song and Yeqi Liu and Ling Yang and Daoliang Li (2020), A Review of the Artificial Neural Network Models for Water Quality Prediction, 10(17), 5776, *Applied Sciences*, 2020