

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2021-2022

Méthodes de suivis de la biodiversité



Sous la direction de Sabine GREULICH

Sidney KREMER

Méthodes de suivis de la biodiversité :

**Possibilités de suivis automatisés dans les
milieux aquatiques et alluviaux de la Loire**

Sabine GREULICH

Sidney KREMER

2021-2022

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier ma tutrice, Mme Sabine GREULICH, pour m'avoir proposé ce sujet enrichissant dans le cadre de mon cursus.

Je la remercie également pour ses conseils et ses relectures avisés ainsi que pour s'être montré disponible tout au long de ce PFE.

SOMMAIRE

Introduction.....	10
Matériel & Méthodes.....	15
Résultats.....	17
1. Faune.....	17
A. Poissons.....	17
B. Oiseaux.....	21
C. Mammifères.....	23
D. Amphibiens & Reptiles.....	25
E. Arthropodes terrestres.....	26
F. Macroinvertébrés aquatiques.....	26
G. Zooplancton.....	27
2. Flore.....	28
A. Phytoplancton.....	28
B. Végétation enracinée.....	29
3. Physico-chimie.....	31
A. Milieu aquatique.....	31
B. Milieu terrestre.....	32
4. Réseaux de suivis.....	32
Discussion.....	34
1. Méthodes de suivi récurrentes.....	34
A. Photo-pièges.....	34
B. Bioacoustique.....	35
C. ADN.....	35
2. Méthodes par groupe taxonomique.....	36
A. Poissons.....	36
B. Oiseaux.....	37
C. Mammifères.....	37
D. Amphibiens & Reptiles.....	38
E. Arthropodes terrestres.....	38
F. Macroinvertébrés aquatiques.....	38
G. Zooplancton.....	39

H.	Phytoplancton	39
I.	Végétation enracinée	40
3.	Physico-chimie.....	40
A.	Milieu aquatique	40
B.	Milieu terrestre	41
C.	Réseaux de suivis	41
	Conclusion	42
	Bibliographie	43
	Annexes	50

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Relations entre le climat, les activités humaines et la biodiversité (d'après Bertrin, 2020)	10
Figure 2: Composants du réseau OBLA	13
Figure 3: Fonctionnement d'une caméra acoustique (d'après Abdallah et al., s. d.)	18
Figure 4: Théorie des zones aveugles (d'après Abdallah et al., s. d.)	18
Figure 5: Fonctionnement du dispositif de couplage (d'après Cadieux, 2002)	20
Figure 6: Processus d'analyse d'un son par fusion des coefficients spectraux (d'après Noda et al., 2018)	25
Figure 7 : Récapitulatif des méthodes de suivi automatisé par groupe taxonomique	34

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Catégories étudiées: groupes taxonomiques et physico-chimie	16
Tableau 2: Difficultés rencontrées dans l'analyse d'une silhouette de poisson	21

Introduction

Changements climatiques et biodiversité

Les milieux aquatiques sont des écosystèmes précieux pour la biodiversité mais également pour les sociétés humaines. En effet, ils abritent une importante richesse biologique floristique et faunistique et sont en relation forte avec les milieux qui les entourent (Lévêque, 2005). Ces milieux rendent également de nombreux services essentiels au maintien de notre société, comme la ressource en eau potable, la production d'énergie ou le développement des activités agricoles et industrielles (Grizzetti et al., 2019). Toutefois, les milieux aquatiques, déjà impactés par le développement des activités humaines, sont aussi menacés par les changements climatiques globaux. Ces changements à l'échelle planétaire perturbent la biodiversité présente dans les milieux aquatiques mais également certains des services qu'ils rendent à la société. En effet, le climat, les humains et la biodiversité sont interdépendants les uns des autres (Figure 1). Une modification à l'échelle de l'un d'eux aura un impact sur les deux autres (Kappelle et al., 1999).

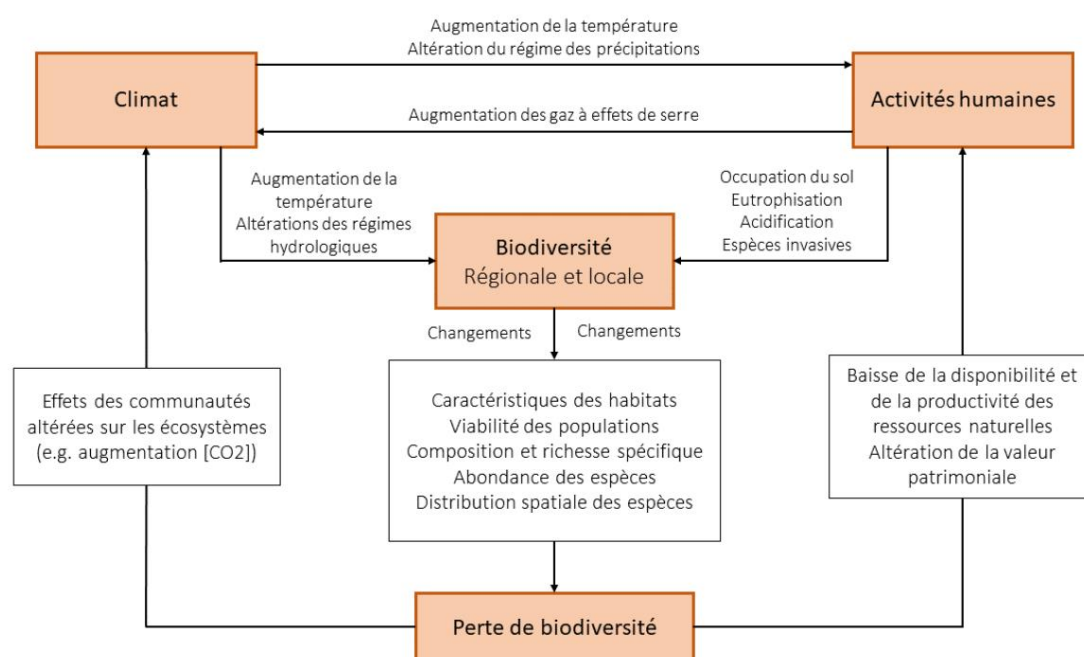


Figure 1: Relations entre le climat, les activités humaines et la biodiversité (d'après Bertrin, 2020)

Les changements climatiques peuvent avoir un impact sur la température des eaux, leur régime d'écoulement, la physico-chimie et sur la présence de nutriments. Ces perturbations peuvent modifier la présence et la répartition des espèces mais également l'utilisation que font les sociétés humaines des milieux aquatiques (Bertrin, 2020).

Aux vues des menaces des changements climatiques globaux, il semble essentiel de comprendre le fonctionnement futur des milieux aquatiques afin d'anticiper les perturbations possibles. Pour cela, il est indispensable de réaliser un suivi de ces milieux et de leur biodiversité. Toutefois, les méthodes d'observation et d'échantillonnage utilisées jusqu'à présent pour le suivi écologique présentent de nombreuses contraintes de réalisation et de coûts. Depuis peu, de nouvelles approches automatisées présentant moins de contraintes dans ces domaines prétendent à les remplacer.

Le suivi des milieux aquatiques

Le suivi des milieux aquatiques et alluviaux est essentiel afin de comprendre leur fonctionnement face aux multiples pressions qu'ils subissent. Ces écosystèmes sont en effet impactés par la dégradation des habitats, les rejets de polluants, leur surexploitation, les invasions biologiques et le changement climatique (Michelet, 2017). Il semble donc primordial de réaliser un suivi de ces milieux pour comprendre et connaître leur réaction face à ces perturbations. Cela permettra d'acquérir des connaissances sur la qualité de l'eau et la présence de polluants, sur les impacts des rejets industriels et urbains ainsi que sur l'impact de certaines pratiques agricoles (Hébert & Légaré, 2000). La biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes pourront également être mieux connus ce qui permettra la mise en place de mesures de gestion adaptées. De nombreux critères peuvent être mesurés dans le cadre d'un suivi de milieux, ceux-ci peuvent être physiques, chimiques, biologiques, morphologiques ou même bactériologiques (Blin, 2008). Historiquement, les critères physico-chimiques ont d'abord été utilisés pour mesurer la qualité des milieux aquatiques et notamment des cours d'eau. Néanmoins, ces paramètres ne suffisent pas à comprendre le fonctionnement de ces milieux. Ils doivent être complétés par la mesure de variables biologiques. En effet, par exemple, l'analyse physico-chimique ne permet pas d'enregistrer toutes les perturbations ponctuelles à moins d'effectuer une mesure au moment de celle-ci. A l'inverse, une perturbation pourra être « enregistrée » par l'étude des variables biologiques, notamment par la diminution ou la disparition de certaines espèces habituellement présentes (Lévêque, s. d.). Ainsi, les analyses physico-chimiques doivent être complétées par des mesures de la qualité de la faune, de la flore et des sédiments. Une interprétation constante des variations de ces différents critères permet d'acquérir une importante connaissance des milieux aquatiques (Blin, 2008). Le suivi des milieux aquatiques et alluviaux est également essentiel pour surveiller la végétation aquatique et notamment les espèces exotiques envahissantes. Celles-ci peuvent être à l'origine de prédation, de diffusion de pathogènes, de compétition avec la biodiversité autochtone, de modification des structures physiques des milieux et à termes du fonctionnement de l'écosystème. La prolifération de ces espèces peut être renforcée par le changement climatique et aboutir à l'extinction de certaines espèces (Michelet, 2017). Le suivi des milieux aquatiques permet donc d'avoir un aperçu des changements qui s'y produisent sur une longue période de temps et de les comprendre afin de mettre en place des mesures de protection et de gestion de ces milieux (Forio & Goethals, 2020). Il est nécessaire d'avoir une « vision dynamique à large échelle pour l'évaluation des effets du changement et pour une gestion adaptée » (Bertrin, 2020). Dans cet objectif, il est primordial d'améliorer les outils actuellement utilisés et de financer des suivis de longs termes et des programmes de recherche dédiés.

Les méthodes de suivi en écologie

Depuis plusieurs années et encore aujourd'hui, diverses méthodes sont utilisées pour réaliser un suivi des milieux aquatiques et de leur biodiversité. En effet, le suivi de ces milieux peut être fait grâce à des stations de mesures, des échantillonnages de faune, flore, sédiments et eau sur différents points de prélèvement ou simplement grâce à l'observation de ces milieux (Laronde et al., 2008). Néanmoins, l'utilisation de ces méthodes apporte diverses contraintes en termes de mise en œuvre, de coût ou d'imprécisions. Tout d'abord, les prélèvements ou échantillonnages donnent une image à un instant donné du milieu qui ne permet pas de savoir ce qui se déroule en continu. Pour comprendre au mieux un milieu, il est donc nécessaire d'augmenter la fréquence de prélèvement des échantillons. Cependant, une augmentation du nombre d'échantillons à réaliser entraîne forcément une augmentation des coûts associés, notamment pour le matériel utilisé, le déplacement sur le terrain et l'analyse de l'échantillon (Martin et al., 2015). De plus, la nécessité de se rendre régulièrement sur le terrain pour réaliser ces prélèvements ou pour observer le milieu,

demande un temps important (Malet et al., 2017). La réalisation d'échantillonnage, apporte d'autres contraintes en plus de celles de coût et de représentativité abordées précédemment. Une perturbation du milieu est possible par la présence d'individus extérieurs au milieu mais aussi par la pratique de prélèvements. L'intervention anthropique régulière dans le milieu peut potentiellement amener de nouveaux organismes non-présent initialement qui peuvent être à l'origine d'une modification du milieu. De plus, lors du protocole d'échantillonnage, une contamination du prélèvement ou une erreur de prélèvement est possible par l'opérateur. Pour assurer la stabilité de l'échantillon entre le moment de prélèvement et l'analyse, il est nécessaire d'avoir un transport et une conservation rapide et efficace (Mazzella et al., s. d.). Ainsi, plusieurs contraintes sont associées aux méthodes actuellement utilisées pour le suivi des milieux aquatiques, qui concernent le coût, le temps, les imprécisions dues au prélèvement ou à la conservation de l'échantillon, ainsi qu'à sa représentativité. Pour réaliser un suivi optimal il semble donc nécessaire de l'automatiser, que ça soit pour des prélèvements ou de l'observation, et de garantir une représentativité tout en limitant les coûts, la perte de temps et les interventions dans les milieux.

Face aux diverses contraintes amenées par les méthodes de suivi des milieux aquatiques actuellement utilisées, de nouvelles approches dites « automatisées » voient le jour depuis quelques années. L'objectif de ces nouvelles méthodes est de réaliser des mesures en continu dans les milieux étudiés tout en réalisant une économie de temps, d'argent, de matériels et d'intervention humaine. La réalisation d'un suivi en continu des milieux aquatiques permet d'obtenir des informations plus complètes sur le milieu concernant son fonctionnement, ses variations et son évolution (Blin, 2008). La représentativité temporelle du milieu est meilleure grâce au suivi automatisé et améliore donc l'analyse qui en découle. Certains outils déjà développés et mis en place dans des milieux autres que aquatiques ont prouvés leurs avantages. C'est le cas des échantillonneurs passifs qui permettent de réaliser un échantillonnage in situ réduisant ainsi les possibles perturbations et l'utilisation de matériels et produits (Mazzella et al., s. d.). Ils permettent également d'effectuer un échantillonnage sélectif directement dans le milieu et d'améliorer les limites de détection (Belles, 2012). Les échantillonneurs passifs ont aussi l'avantage de ne nécessiter que peu d'intervention humaine avec une mise en place simple pouvant être effectuée par du personnel non spécialisé (Gonzalez, s. d.). Ainsi, de nouvelles méthodes aux avantages semblables aux échantillonneurs passifs seraient nécessaires pour mener un suivi correct des milieux aquatiques et alluviaux. Ces méthodes automatisées permettent de limiter les différents coûts et la récurrente intervention de l'homme pour réaliser ces suivis. Elles permettent, en effet, de réaliser un plus grand nombre de mesures tout en diminuant le déplacement de personnes sur le terrain. Ces nouvelles méthodes pourraient avoir un coût supérieur à l'achat mais qui serait rentabilisé par la diminution du nombre d'intervention terrain sur le long terme. Elles permettraient également un gain de temps non négligeable. Il semble donc indispensable de les développer et de les mettre en place pour le suivi des milieux aquatiques.

Le Réseau OBLA

La présente étude s'inscrit dans le cadre du réseau d'Observation de la Biodiversité de la Loire et de ses Affluents (OBLA). Ce réseau, qui se veut complémentaire à ceux déjà existants, couvrira les habitats du lit majeur de la Loire, de ses principaux affluents ainsi que les zones humides des têtes de bassins. Il a pour vocation d'éclaircir les processus de répartitions et les dynamismes des organismes (Greulich et al., 2014). La Loire est un fleuve particulier présentant une plaine alluviale au fonctionnement hydro-sédimentaire dynamique et une riche biodiversité. De nombreux facteurs, comme le régime d'inondation ou les ressources disponibles, sont à l'origine du patrimoine exceptionnel que présente la Loire. Ce fleuve est également

fortement influencé par les activités humaines du fait des zones urbanisées qu'il traverse mais aussi par la forte présence de l'agriculture sur son bassin versant (Greulich et al., 2017).

Le projet OBLA, qui a vu le jour en 2012, fait partie des projets de la Zone Atelier Loire. Il a plusieurs objectifs :

- Etudier sur le long terme les dynamiques des habitats et des espèces en lien avec les facteurs abiotiques majeurs ;
- Développer des expérimentations et modèles basés sur les observations réalisées dans le cadre du réseau ;
- Réunir chercheurs et gestionnaires d'espaces naturels autour de thématiques communes.

Le réseau OBLA se divise en 3 axes de recherche et en une action transversale (Figure 2).

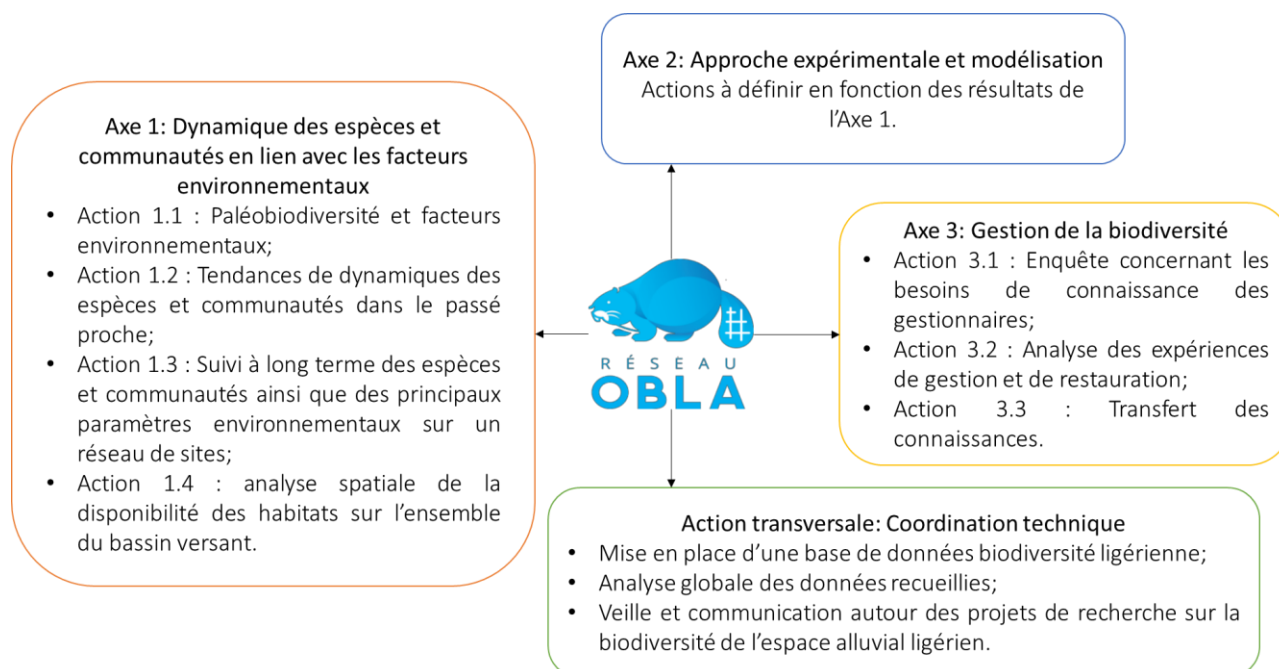


Figure 2: Composants du réseau OBLA

Le réseau OBLA est un projet ambitieux pour diverses raisons. Sa zone d'étude correspond à l'ensemble du bassin versant de la Loire. Il couvre des affluents de la Loire comme l'Allier et la Vienne et regroupe ainsi 8 régions. Ce réseau a pour but de réaliser un suivi simultané de la répartition des organismes et des facteurs environnementaux majeurs du biotope. L'ensemble des études permettront de prendre en compte simultanément plusieurs groupes taxonomiques dans différents types de milieux. En effet, le réseau OBLA s'applique aux milieux aquatiques, aux milieux écotones, qui constituent le lit mineur, ainsi qu'aux milieux terrestres inondables, qui constituent le lit majeur (*Observatoire de la Biodiversité – OBLA – Zone Atelier Loire*, s. d.). Les principaux groupes taxonomiques étudiés sont :

- Le phytoplancton ;
- Le zooplancton ;
- La végétation enracinée (flore vasculaire, bryophytes, Characées) ;
- Les arthropodes terrestres (aranéides et coléoptères carabiques) ;
- Les macroinvertébrés aquatiques ;
- Les poissons ;
- Les oiseaux ;

- Les amphibiens/reptiles ;
- Les mammifères.

Le suivi actuel de ces groupes est réalisé par des échantillonnages (pêche électrique, IBMR...) et des observations. Une base de données OBLA permet de regrouper les données relatives aux habitats et à la biodiversité de la zone d'étude. Elle comporte ainsi des données sur la faune, la flore et les habitats mais aussi des données environnementales susceptibles d'influencer la dynamique des organismes et des habitats (Greulich et al., 2014).

Objectifs de l'étude

Au vu de ces éléments, il semble donc primordial de développer de nouvelles approches permettant de les surmonter. Ainsi, les méthodes traditionnelles de suivis des milieux aquatiques et alluviaux étant contraignantes, nous pouvons nous demander quelles sont les méthodes automatisées existantes ou en cours de développement et quels sont leurs avantages. Cette étude étant réalisée dans le cadre du réseau OBLA, nous pouvons également nous demander lesquelles pourraient, potentiellement, être mise en place sur la Loire. Il paraît intéressant d'étudier les avantages mais aussi les inconvénients que pourraient présenter ces méthodes automatisées. Enfin, il semble compliqué de penser que ces approches automatisées aient déjà pu être mises en place sur un fleuve présentant des caractéristiques particulières comme celles de la Loire.

L'objectif de cette étude sera donc, dans un premier temps, de réaliser un inventaire des approches automatisées existantes ou en cours de développement permettant d'effectuer un suivi des milieux aquatiques et alluviaux et de leur biodiversité. Cet inventaire se fera sur la base des différents groupes taxonomiques étudiés par le réseau OBLA en essayant d'analyser, pour chacun de ces groupes, une ou plusieurs méthodes de suivis automatisés. Dans un second temps, l'objectif sera de faire des propositions de suivis de la biodiversité dans le cadre du réseau OBLA en prenant en compte les particularités des méthodes étudiées. Les méthodes seront ainsi comparées pour déterminer lesquelles seraient les plus optimales pour le suivi de la biodiversité des milieux aquatiques et alluviaux de la Loire.

Matériel & Méthodes

Cette étude se base principalement sur une recherche bibliographique pour dresser un inventaire des méthodes existantes ou en développement. Ainsi, cette étude a été réalisée par la lecture de plusieurs articles, compte-rendu de conférence et par la consultation de sites internet. La recherche de ces articles a notamment été effectuée avec la bibliothèque en ligne de l'Université de Tours. D'autres plateformes de bases de données en ligne ont également été utilisées comme Research Gate, Google Scholar ou celle du CAIRN.

Afin de mener à bien ces recherches, une liste de mots-clés concernant le sujet a été constituée. Ces mots clés ont été utilisés dans les différentes plateformes citées pour trouver divers textes et articles pouvant servir à cette étude. Ils ont été utilisés seul ou bien par combinaison de mots-clés. Cette liste comprend des mots entrant dans le champ lexical du sujet, tous en français et anglais, mais aussi les noms des projets et porteurs de projet déjà connus. Voici quelques exemples de mots-clés :

- | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| - ADN environnemental | - Laurent Longuevergne | - Physico-chimie |
| - Aquacosme | - Mammifères | - Poisson |
| - Arnaud Elger | - Milieu aquatique | - Sonar DIDSON |
| - Bioacoustique | - Nouvelles technologies | - Suivi automatisé |
| - Biodiversité | - Oiseaux | - Suivi continu |
| - Capteurs in-situ | - Photo-pièges | - Terra forma |
| - Econect | | - Végétation |

Au fur et à mesure des recherches, cette liste a été complétée par de nouveaux mots, nom de méthodes, nom de projets, porteurs de projets et auteurs s'intéressant au sujet.

De plus, la recherche a été améliorée en étudiant les références bibliographiques même des articles sélectionnés. Cela a permis d'approcher au mieux le sujet en explorant toutes les possibilités rencontrées. Grâce à ces différentes recherches, plusieurs articles ont été étudiés et les plus pertinents ont été choisis afin de mener une étude approfondie.

Dans un premier temps, les articles sélectionnés ont été lus, un résumé a été écrit et ils ont été triés et classés. Chaque article a été classé selon le ou les groupe(s) taxonomique(s) au(x)quel(s) il se rapportait, selon le type de méthodes utilisées (vidéo, son, laser...) et le milieu dans lequel la ou les méthodes étaient mises en place. L'intérêt des articles a également été évalué. Ce classement a permis de faire le tour des types de méthodes rencontrées dans 42 articles. Des sites internet ont également été consultés pour compléter les recherches sur certaines méthodes.

Dans un second temps, un tableau a été créé afin de regrouper les méthodes étudiées dans les lectures et de visualiser à quel(s) groupe(s) taxonomique(s) elles se rapportaient. Les articles ou site internet abordant chaque méthode ont également été indiqués. Ce tableau a ainsi permis d'avoir une vue d'ensemble sur les méthodes automatisées étudiées et de voir les méthodes par groupe taxonomique (Annexe 1). Ensuite, pour chacune des méthodes, le principe a été analysé et les avantages et inconvénients identifiés sur la base des articles consultés. La possibilité d'une mise en place sur le territoire de la Loire a également été étudiée.

L'analyse des méthodes a été réalisée en se basant sur les groupes taxonomiques étudiés par le réseau OBLA. Pour chacun de ces groupes, l'objectif était d'analyser au moins une méthode de suivi automatisé. Il a

également été choisi d'étudier des méthodes de suivis automatisées de la physico-chimie des milieux aquatiques et alluviaux. Ainsi, 3 grandes catégories ont été identifiées, se divisant ensuite en sous-catégories (Tableau 1). Il est possible que certaines méthodes analysées puissent être utilisées pour le suivi de plusieurs sous-catégories.

Tableau 1: Catégories étudiées: groupes taxonomiques et physico-chimie

Faune	Flore	Abiotique
Arthropodes terrestres	Phytoplancton	Chimie
Macroinvertébrés aquatiques	Végétation enracinée	Physique
Poissons		
Oiseaux		
Amphibiens & Reptiles		
Mammifères		
Zooplancton		

Pour chacun des groupes taxonomiques étudiés, la ou les méthodes les plus optimales ont été définies en comparant les diverses méthodes étudiées. Cette comparaison a pris en compte différents facteurs (liste non exhaustive) :

- Coût ;
- Fiabilité ;
- Praticité ;
- Qualité ;
- Pertinence par rapport au réseau OBLA ;
- Possibilité de mise en place sur les milieux aquatiques et alluviaux de la Loire ;
- Avantages et inconvénients.

A la suite de ces comparaisons, des propositions de méthodes automatisées pour le suivi de la biodiversité des milieux aquatiques et alluviaux de la Loire ont pu être réalisées.

Résultats

Afin d'être optimal, le suivi des milieux aquatiques et alluviaux doit intégrer l'ensemble des éléments qui les composent. Il est donc nécessaire d'effectuer un suivi de la faune et de la flore de ces milieux mais aussi de leurs paramètres physico-chimiques. Ainsi, des méthodes de suivis automatisées existantes ou en cours de développement sont analysées pour chacun des groupes taxonomiques étudiés par le réseau OBLA et pour la physico-chimie.

1. Faune

A. Poissons

La faune piscicole est d'une grande richesse et comprend des espèces très diversifiées. En effet, des espèces aux modes de vie différents cohabitent dans des milieux comme la Loire. Certaines espèces sont très menacées, notamment les espèces migratrices, par la mise en place d'obstacles dans le lit des cours d'eau et par l'impact des activités anthropiques. Des espèces envahissantes perturbent également le fonctionnement des écosystèmes aquatiques en déstabilisant l'équilibre du milieu. Le suivi de la faune aquatique est donc essentiel afin de suivre l'évolution des différentes populations et les résultats d'actions de préservation.

4 types de dispositifs pourraient permettre le suivi automatique de plusieurs espèces de poisson simultanément : les caméras acoustiques, les caméras lasers, les scanners infrarouges et les caméras vidéo.

Caméras acoustiques

Les caméras acoustiques sont des sonars à haute fréquence qui permettent d'obtenir des images à hautes résolutions semblables à des vidéos. Les images obtenues sont des images monochromes avec différentes nuances qui permettent ainsi de distinguer la morphologie et le comportement de nage des poissons. Il est alors possible d'identifier les poissons et de les comptabiliser (Daroux et al., 2014). La mise en place de ces caméras est plutôt aisée : le dispositif comporte une petite structure physique simple et ne nécessite pas d'avoir une grosse contrainte sur le passage des poissons. Les caméras nécessitent un nettoyage régulier mais plutôt simple à réaliser (Abdallah et al., 2020).

Les caméras acoustiques fonctionnent grâce à l'émission d'ondes acoustiques dans le milieu aquatique. Lorsqu'un poisson traverse le champ d'émission, les ondes se réfléchissent sur son corps et repartent en direction de la caméra (Figure 3). Les images ainsi obtenues permettent de distinguer la forme du poisson. Plus les fréquences d'émissions sont hautes, plus la détection de la morphologie du poisson sera fine. Le choix de la fréquence est donc très important, de même que le modèle car, selon les constructeurs, la qualité des images peut être différentes pour une même fréquence (Abdallah et al., 2020). L'utilisation d'ondes acoustiques offre la possibilité d'acquérir des données de nuit et dans les eaux turbides.

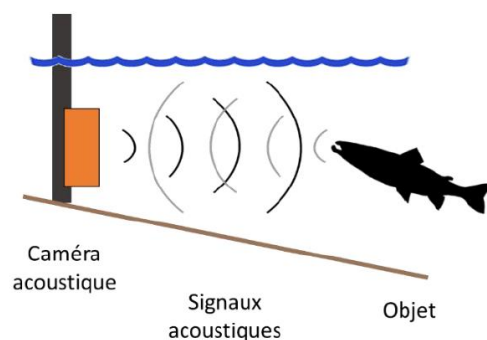


Figure 3: Fonctionnement d'une caméra acoustique (d'après Abdallah et al., s. d.)

Le choix du site de mise en place de la caméra est également très important : il ne doit pas y avoir de zones aveugles. En effet, si des obstacles se trouvent dans le champ de la caméra, ils pourront masquer une partie du milieu et donc empêcher la détection de certains poissons (Figure 4). Il est donc nécessaire de positionner la caméra à un endroit du lit relativement plat et uniforme (Abdallah et al., 2020). Les caméras acoustiques doivent également être utilisées dans un milieu au courant laminaire (Daroux et al., 2014).

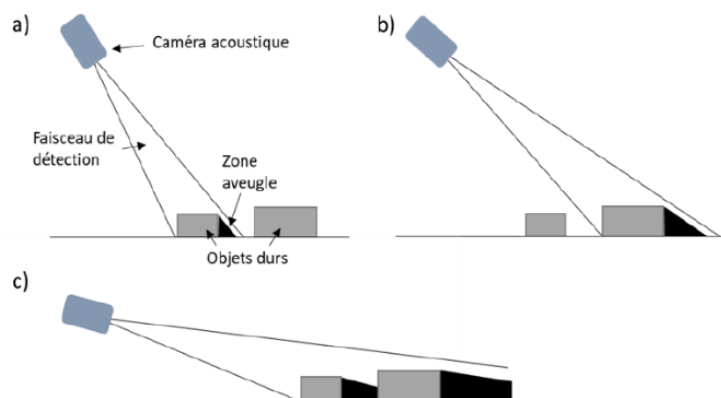


Figure 4: Théorie des zones aveugles (d'après Abdallah et al., s. d.)

Pour analyser les images enregistrées par les caméras, des logiciels informatiques sont nécessaires. Ils permettent d'identifier les poissons grâce à un algorithme de reconnaissance. Les poissons peuvent alors être reconnus et comptabilisés automatiquement par le dispositif. Néanmoins, la reconnaissance automatique effectuée par la majorité des logiciels disponibles aujourd'hui est encore limitée. Les analyses présentent une part d'erreur non négligeable. Des logiciels plus performants commencent à voir le jour ou sont en cours de développement (Abdallah et al., 2020). Le traitement des images est donc un frein à l'automatisation des caméras acoustiques.

Le champ de vision des caméras acoustiques présente également des particularités à prendre en compte. Les angles d'ouvertures sont fixés par la fréquence, plus la fréquence est faible et plus l'angle est élevé. L'angle d'ouverture verticale est notamment assez faible : pour un recul de 5 mètres, il est possible d'enregistrer sur une hauteur d'eau de seulement 1.05 mètres. Or, à fréquence maximale (3.0 MHz), les caméras acoustiques peuvent analyser sur une profondeur de champ de 5 mètres (Abdallah et al., 2020). Ainsi, une caméra acoustique doit être mise en place dans une section à faible hauteur d'eau.

Les données enregistrées par les caméras acoustiques sont des fichiers très volumineux. La capacité de stockage doit donc être très importante pour pouvoir contenir les données acquises par le dispositif de caméra acoustique (Abdallah et al., 2020).

Il existe plusieurs modèles de caméra acoustique. La caméra acoustique DIDSON a par exemple été mise en place sur la Sélune pour le suivi des saumons. Cette caméra présente néanmoins de nombreuses contraintes. Elle est généralement utilisée pour le suivi des individus de plus de 20 cm de long car elle n'est pas fiable pour l'identification de poissons plus petit. En haute fréquence, elle a une portée de 10 mètres tandis qu'à basse fréquence, elle a une portée de 45 mètres (Daroux et al., 2014). Toutefois, des caméras à plus haute fréquence sont disponibles sur le marché et présentent une précision plus importante. La caméra acoustique la plus performante semble être la caméra ARIS, elle présente la plus haute fréquence et une qualité d'image très bonne. Une caméra aux caractéristiques similaires a été développée pour 2021 : la caméra Oculus. La caméra ARIS est à un prix de 75 000€, tandis que le prix de la caméra Oculus devrait tourner autour de 25 000€ (Abdallah et al., 2020). Ces deux caméras sont actuellement les plus performantes en termes de fréquence et de qualité d'image.

Les caméras acoustiques présentent donc plusieurs caractéristiques intéressantes pour le suivi automatisé des poissons. Néanmoins, ces caméras présentent tout de même quelques contraintes et inconvénients.

Caméras laser

Les caméras laser sont des caméras subaquatiques avec éclairage laser intégré. Elles sont ainsi à mi-chemin entre les caméras acoustiques et les caméras vidéo. Elles permettent d'obtenir des images visuelles et des données 3D à haute résolution. L'utilisation de laser permet d'acquérir des données en eaux turbides. Les images obtenues sont des images à très haute résolution. Il semblerait que la qualité soit même plus importante que celle des caméras acoustiques à haute fréquence (Abdallah et al., 2020). Cette haute résolution d'image permet ainsi de distinguer des espèces aux morphologies proches. Les caméras laser ont un champ de vision plutôt important : environ 70° en diagonal. Ce large champ permettrait de limiter les contraintes sur la section de cours d'eau nécessaire pour mettre en place ce dispositif (Abdallah et al., 2020). Les caméras laser semblent donc présenter de nombreux avantages avec une très haute résolution d'images et un champ de vision large.

Actuellement, il semble y avoir une seule caméra laser existante adaptée au milieu aquatique : la caméra UTOFIA. Néanmoins, cette caméra a été développée pour une utilisation en milieu marin. Ainsi, il serait donc nécessaire de réaliser des tests avant de l'appliquer dans les eaux intérieures. Cette caméra a été développée uniquement pour un projet et est donc peu disponible sur le marché. 3 autres caméras ont été développées et ont dû être disponibles courant 2021. Des nouveaux projets visent à améliorer les caractéristiques de la caméra et notamment le développement du logiciel de traitement. Le prix de la caméra devrait se trouver autour de 50 000€ (Abdallah et al., 2020).

Ainsi, les caméras laser semblent présenter des caractéristiques avantageuses pour l'identification de poissons avec une haute résolution d'image et un champ de vision plutôt large. Néanmoins, la seule caméra laser disponible actuellement n'a pas été conçue pour les eaux intérieures et est toujours en cours de développement.

Caméra vidéo & Scanner infrarouge

Le couplage de caméra vidéo et de scanner infrarouge permet de créer un dispositif de reconnaissance et de comptage des poissons. Ce dispositif est développé pour être mis en place dans les passes à poissons, au niveau de la chute d'eau pour que les poissons ne restent pas dans la structure. Grâce à des diodes infrarouges, le capteur peut enregistrer la silhouette des poissons et un logiciel d'analyse peut ensuite les identifier. Plusieurs rangées de diodes sont mises en place et permettent donc de capter à plusieurs reprises la silhouette et donc d'affiner l'identification (Figure 5) (Cadieux, 2002).

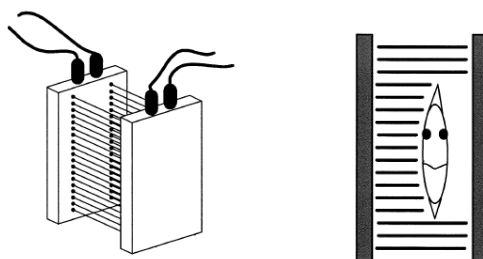


Figure 5: Fonctionnement du dispositif de couplage (d'après Cadieux, 2002)

Plusieurs modèles sont disponibles sur le marché : le RiverWatch, l'Ichtyos et les systèmes Ibaï Begi. Tous nécessitent de contraindre le passage des poissons et sont plutôt limités par la turbidité de l'eau. Le RiverWatch et l'Ichtyos font 40 cm de large tandis que l'Ibaï Begi peut avoir une largeur de 55 à 60 cm. Tous ces dispositifs ont une hauteur de 60 cm. L'Ibaï Begi est modulable en largeur tandis que l'Ichtyos peut être couplé en hauteur. Des contraintes de focales s'appliquent à ces outils : pour une focale courte l'image est détaillée et déformée tandis que pour une focale moyenne il est nécessaire d'avoir 1 mètre de recul (Abdallah et al., 2020). Les informations décrites ci-dessous sont celles de l'Ichtyos mais les deux autres modèles répondent aux mêmes caractéristiques.

Le dispositif Ichtyos ne nécessite pas beaucoup d'énergie, il peut être alimenté de façon autonome et peut donc être mis en place à des endroits non raccordés au réseau électrique. La structure peut également intégrer d'autres technologies de détection comme le RFID. Il est donc possible de coupler les moyens de suivis et de détections grâce à ce dispositif. La présence d'une caméra offre la possibilité de réaliser une vérification manuelle et un suivi en temps réel. Ces dispositifs sont équipés de sondes supplémentaires permettant d'enregistrer les paramètres du milieu (température, turbidité, date, heure...) (*Compteur automatisé pour le suivi des populations de poissons* / WSP, s. d.).

L'identification automatique se fait grâce à un logiciel d'analyse développé pour le dispositif Ichtyos. Celui-ci permet de sélectionner les espèces à reconnaître. Les données sont accessibles en continu sur une interface créée par le développeur (WSP) avec des graphiques et tableau. Le système de reconnaissance doit d'abord être entraîné pour s'adapter au milieu. Il est ainsi nécessaire de confirmer les premiers enregistrements pour que l'intelligence artificielle puisse s'adapter spécifiquement au milieu (Sonny et al., 2016).

La pénétration dans l'eau est possible même avec une forte turbidité grâce au scanner infrarouge. Néanmoins, les lasers sont protégés par des vitres qui s'encrassent rapidement à cause des matières en suspension ou des algues. Ainsi, si les vitres ne sont pas nettoyées régulièrement l'efficacité est rapidement réduite et limite la détection et l'identification des poissons (Sonny et al., 2016).

Le dispositif est adapté pour identifier les poissons de taille plutôt grande car il ne peut pas compter les poissons inférieurs à 10 cm de long. Le dispositif est également perturbé par les passages de bancs de petits

poissons pour lesquels il est induit en erreur. Globalement, il a une bonne efficacité d'identification pour le domaine pour lequel il est prévu (grand poisson individuel) : il présente un taux d'efficacité de 95.5 % (Sonny et al., 2016). Il permet ainsi de détecter beaucoup d'espèces, de les identifier et de déterminer le sens de trajet et la classe de taille. La qualité de la mesure dépend également de la vitesse si le poisson est trop rapide ou qu'il change de vitesse cela peut entraîner des difficultés d'identification (Cadieux, 2002).

Tableau 2: Difficultés rencontrées dans l'analyse d'une silhouette de poisson

Cause	Conséquence
Passage trop rapide	La silhouette n'est pas composée d'assez de points pour facilement distinguer l'espèce du poisson : mauvaise définition de la silhouette.
Poisson trop court	Même effet qu'un passage trop rapide. La silhouette n'est pas composée d'assez de points pour facilement distinguer l'espèce du poisson : mauvaise définition de la silhouette.
Poisson qui change de vitesse dans le capteur	La mesure de la longueur est erronée, ce qui rend la distinction de l'espèce plus difficile.

Un dispositif de couplage de caméra vidéo et de scanner infrarouge permet donc de réaliser un suivi des poissons de grande taille. L'un des inconvénients majeurs de ces dispositifs est qu'ils sont conçus pour les passes à poissons. Les scanners infrarouges permettent de pénétrer convenablement dans les eaux turbides mais cette efficacité est fortement impactée par l'encrassement des vitres de protection des scanners. Ces dispositifs ne permettent pas non plus de comptabiliser et d'identifier des poissons de petite taille ni les bancs de poissons.

B. Oiseaux

L'avifaune des milieux aquatiques et alluviaux est riche et très diversifiée. Certaines espèces sont intimement liées au milieu aquatique et en dépendent fortement. La qualité d'un milieu est également reflétée par les oiseaux qui s'y trouvent. Le suivi de l'avifaune est donc important pour suivre l'évolution des écosystèmes aquatiques.

Suivi RFID

Le suivi RFID (Radio Frequency Identification) fonctionne par l'utilisation d'une étiquette radiofréquence. Une puce et une antenne sont encapsulées dans un support et peuvent être lues pour transmettre l'information que contient la puce. Ces étiquettes sont associées aux oiseaux à l'aide de bagues. L'utilisation de cette méthode permet de faire un suivi sur la formation des couples, la dispersion, les changements temporels et d'autres paramètres de description (*RFID et ornithologie*, s. d.).

Pour cela, les détecteurs RFID peuvent être associés à d'autres dispositifs, de pesage ou de vidéo par exemple. C'est notamment le cas dans le projet ECONECT, où des mangeoires connectées ont été développées : les mangeoires Openfeeder. Ces mangeoires peuvent détecter la présence d'un oiseau sur le perchoir et ainsi activer la lecture de la puce RFID. Ces dispositifs permettent d'étudier les populations et de suivre les réseaux et interactions sociales inter- et intraspécifiques, les stratégies de recherche de nourriture, les différences entre les espèces. Ces mangeoires ont notamment été développés pour le suivi des mésanges. Des nichoirs connectés (Smartnest) sont en cours de développement pour réaliser un suivi de la reproduction avec notamment un suivi des œufs à l'intérieur du nichoir (*Openfeeder et Smartnest – ECONECT*, s. d.).

Pour être détectée, une puce RFID doit être très près du lecteur. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies pour attirer les oiseaux équipés de puces près des lecteurs. Il est également nécessaire d'équiper tous les oiseaux pour effectuer un suivi complet et optimal. L'achat et le remplacement des puces RFID peut représenter un coût important (*RFID et ornithologie*, s. d.). Un lecteur RFID a également un coût important mais il serait possible d'en développer en limitant les coûts (Bridge & Bonter, 2011).

Le suivi RFID pourrait être un moyen intéressant de réaliser un suivi des populations d'oiseaux. Néanmoins, pour mener à bien ce suivi, il est nécessaire d'équiper une majeure partie des oiseaux avec des puces RFID et de les attirer près du lecteur.

Photo-piège

Les photos pièges permettent d'observer les oiseaux par le déclenchement d'une photo lorsqu'ils passent devant l'appareil. Le piège se déclenche grâce à un détecteur de mouvement. Ces pièges fonctionnent de jour comme de nuit grâce à des éclairages infrarouges. Plusieurs types d'éclairages existent mais les plus adaptés à l'observation de la faune sont les infrarouges (*Comment choisir un piège photographique, surveillance, chasse, animaux, cambrioleurs*, s. d.). Actuellement les photos pièges sont des outils très développés et sont beaucoup utilisés pour l'observation de la faune.

Le principal enjeu des photos pièges repose sur l'automatisation de la détection à partir des images capturées. Les algorithmes de reconnaissance sont de plus en plus perfectionnés pour décrypter au mieux les images. Il reste toujours nécessaire d'entraîner les algorithmes manuellement lors de la mise en place de l'outil. Pour optimiser l'identification il est donc nécessaire d'avoir un jeu de données d'entraînement important et adapté à l'endroit où les pièges sont mis en place (Miele et al., 2021). Le logiciel ClassifyMe permet par exemple de télécharger son propre jeu de données pour réaliser un entraînement spécifique de l'algorithme avant de lancer l'analyse des enregistrements du pièges (*ClassifyMe: A Field-Scouting Software for the Identification of Wildlife in Camera Trap Images*, s. d.).

L'utilisation de photo-pièges est intéressante pour le suivi des oiseaux dans les milieux aquatiques et alluviaux. Néanmoins, les photos pièges permettent seulement d'observer les espèces qui viennent à proximité du dispositif. Pour réaliser un suivi complet il serait donc nécessaire de disposer d'un grand nombre de pièges et d'attirer les individus près de ces pièges. Le principal enjeu de l'automatisation du suivi par photo-pièges repose sur la performance des logiciels de détection.

Bioacoustique

Les oiseaux ont une signature spécifique par leurs chants et ils sont plus souvent entendus que vus ou attrapés. Le suivi de l'avifaune peut donc être réalisé grâce à l'identification des chants d'oiseaux. Les chants des oiseaux sont en effet complexes et variés et ils sont spécifiques aux espèces. Des variations entre les individus de mêmes espèces peuvent également être observées. Ces unités sonores peuvent par exemple contenir des segments à fréquence constante, d'autres plutôt à fréquence modulée ou encore des segments avec de fortes harmoniques (Brandes, 2008). La variabilité des sons entre les individus de mêmes espèces ou pour un individu lui-même complexifie la reconnaissance autant pour les observateurs que pour les systèmes automatiques. Les chants des oiseaux peuvent également varier selon les paramètres du milieu, ce qui complexifie également l'identification (Obrist et al., 2010).

Pour une identification automatique, l'utilisation d'un microphone permet de capter des sons venus de plusieurs directions et augmente donc le champ d'enregistrement. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour analyser et caractériser le son puis l'identifier. Les différents algorithmes existants nécessitent d'être entraînés avec des jeux de données. Certaines méthodes de caractérisation sont plus adaptées pour certains types de chants. Actuellement, plusieurs logiciels permettent d'analyser les chants des oiseaux : OldBird, XBat. Les bases de données sur les chants d'oiseaux sont plutôt complètes en comparaison à d'autres groupes taxonomiques (Brandes, 2008).

Il existe différents dispositifs d'enregistrement des chants d'oiseaux : les ARS (Automated Recording Systems) et les ADRS (Automated Digital Recording System) semblent être les plus développés. Ces deux dispositifs permettent d'enregistrer les chants d'oiseaux. Néanmoins, l'ADRS est une modification de l'ARS pour remplacer une horloge externe par un microcontrôleur et le magnétophone analogique par un numérique (Acevedo & Villanueva-Rivera, 2006). Ces deux dispositifs sont toutefois limités par la source d'énergie et la capacité de stockage (Obrist et al., 2010). Il serait intéressant de chercher si des enregistreurs autonomes en énergie ont été développés et s'ils permettent de transmettre les données directement.

L'un des problèmes majeurs de l'étude des chants d'oiseaux est la présence du bruit de fond qui peut limiter l'identification ou induire des erreurs. Il existe des filtres qui permettent de réduire le bruit de fond mais ils peuvent également éliminer certains chants (Brandes, 2008). Un autre enjeu majeur de l'identification par les chants est porté par la capacité des algorithmes à identifier le chant enregistré. L'algorithme doit être entraîné de sorte à être spécialisé au milieu dans lequel il est mis en place. Le projet Amibio a par exemple permis de développer une station de surveillance multi-capteurs autonomes avec analyse automatique. Cette station a été développée pour être mise en place sur un milieu spécifique en Grèce. Cette station permet notamment d'enregistrer les sons émis par la faune et de les reconnaître automatiquement. Pour les oiseaux, elle permet de réaliser un suivi de présence/absence et d'envoyer une alerte lors de la disparition ou de l'apparition d'une espèce. Cette station permet également d'enregistrer les paramètres du milieu comme le vent, la pluie, la température ou l'humidité (Ganchev et al., 2012). Les algorithmes utilisés par cette station pour l'identification automatique ont été développés spécifiquement pour le milieu dans lequel est installée la station.

Le suivi par bioacoustique des oiseaux est très intéressant car il permet d'enregistrer des oiseaux qui ne sont pas forcément visibles ou de faire des études dans des milieux plutôt fermés. Cette méthode est très prometteuse mais nécessite d'être mise en place de manière spécifique en utilisant notamment un logiciel de détection entraîné spécifiquement au milieu. L'une des difficultés rencontrées est le bruit de fond qui peut limiter l'identification des chants.

C. Mammifères

Les mammifères des milieux aquatiques et alluviaux sont fortement liés à la qualité des milieux aquatiques. Certaines espèces sont très sensibles aux changements qui s'y opèrent et reflètent donc la qualité des milieux par leur présence ou absence. D'autres espèces sont à l'origine de déséquilibre biologique et peuvent donc perturber le milieu. Le suivi des mammifères est donc très important afin d'étudier les interactions et les évolutions des populations.

Photo piège

Tout comme les oiseaux, le suivi des mammifères peut se faire par photo-pièges. Les photos-pièges permettent en effet d'observer un grand nombre d'espèces dans divers habitats. L'utilisation de caméras infrarouges permet de capturer les mammifères de jour comme de nuit et d'obtenir la localisation et la date pour un suivi complet. Il est possible d'enregistrer une photo simple, une série de photos ou même une vidéo (McShea et al., 2015). Les photos-pièges permettent d'observer un large panel de mammifères et notamment des espèces qui sont parfois difficiles à observer sur le terrain (Cailly et al., s. d.).

L'automatisation des photo-pièges repose sur la capacité de l'algorithme d'identification. Ces algorithmes fonctionnent par apprentissage profond (deep learning), il faut donc les entraîner à partir d'un jeu de données d'entraînement. Cet entraînement permet de spécialiser l'algorithme aux types de mammifères à reconnaître (Gimenez et al., 2021). La reconnaissance automatique se fait selon 3 étapes : isolement du corps par rapport au fond ; extraction de l'apparence, du mouvement et des paramètres biométriques ; application de l'algorithme d'identification (McShea et al., 2015). Les mesures à partir des photos sont encore à perfectionner, diverses méthodes sont proposées mais il y a beaucoup de difficultés à les mettre en œuvre.

Le suivi des mammifères par photo-pièges permet d'observer divers mammifères qui peuvent parfois être difficiles à observer. L'automatisation de cette méthode passe par l'utilisation d'un algorithme d'identification. Les algorithmes actuellement utilisés sont encore à perfectionner mais sont très prometteurs.

Bioacoustique

Les mammifères émettent des signaux acoustiques pour une multitude de fonctions : recherche de nourriture, de partenaires sexuels, définition et défense du territoire, communication, défense... (BruitParif, 2020). Beaucoup de mammifères utilisent donc une communication acoustique. Les sons émis dépendent de nombreux paramètres : de l'expérience, du contexte social. Il est ainsi possible d'identifier les espèces à partir des sons qu'elles émettent. Il est également possible de simuler un son pour voir si une réponse est reçue. Le suivi par bioacoustique est très développé pour certaines espèces comme les cerfs et les loups (Obrist et al., 2010). La bioacoustique est également très développée pour les mammifères marins (Merchant et al., 2012). Toutefois, le suivi des mammifères terrestres ne répond pas aux mêmes caractéristiques.

L'identification des petits mammifères tels que les rongeurs est également possible grâce à la bioacoustique. Ces mammifères émettent chacun des sons très particuliers avec beaucoup de variations. Parfois, l'espèce peut être identifiée simplement grâce à la structure du spectrogramme. Il est néanmoins nécessaire d'avoir une grande bibliothèque de sons pour calibrer correctement l'algorithme d'identification (Newson et al., s. d.).

La reconnaissance automatique des sons se fait grâce à un algorithme d'identification. Leur développement est de plus en plus important grâce à l'apparition des nouvelles technologies et donc de nouvelles méthodes. Les bibliothèques d'entraînement sont également de plus en plus complètes ce qui favorise la spécialisation des algorithmes (Stowell et al., 2019). L'automatisation de cette méthode repose encore une fois sur la capacité des algorithmes à identifier les sons. Les algorithmes peuvent être encore améliorés et des recherches sont faites pour cela. Le bruit de fond est également une limite à l'utilisation de la bioacoustique pour le suivi des mammifères notamment sur les milieux aquatiques et alluviaux.

Le suivi par bioacoustique pourrait également permettre de localiser les animaux. En effet, la mise en place d'enregistreurs synchronisés permettrait de localiser la source selon le délais d'arrivée entre les différents microphones (Rhinehart et al., 2020). Le déplacement de l'animal pourrait même être suivi. Ce type de recherche est en cours de développement (Huetz & Aubin, 2012).

Le suivi des mammifères par bioacoustique est une méthode intéressante encore en cours de développement. Le suivi par le son présente l'avantage de ne pas être freiné par les obstacles et d'être possible de jour comme de nuit. Toutefois, les sons peuvent être variables d'un individu à l'autre et également pour un individu lui-même. Le bruit de fond peut être un frein à l'enregistrement et à l'identification des sons. Enfin, les algorithmes sont en cours de perfectionnement pour optimiser l'identification des mammifères. Dans ce même objectif, il est nécessaire d'entraîner les algorithmes aux sons spécifiques au milieu dans lequel ils sont mis en place. L'utilisation de la bioacoustique pour le suivi des mammifères semble donc prometteuse mais nécessite d'être encore perfectionnée.

D. Amphibiens & Reptiles

Les amphibiens et les reptiles, tout comme les oiseaux et les mammifères, émettent de cris afin de communiquer. Chez les amphibiens, les sons émis ont beaucoup moins de variations que chez les oiseaux par exemple. Les sons sont principalement émis dans un but de reproduction et ils présentent tout de même des propriétés acoustiques uniques par espèces (J. J. Noda et al., 2016). Chez les reptiles, les sons émis sont fortement influencés par le milieu ambiant (Obrist et al., 2010).

L'automatisation de l'identification par bioacoustique repose encore une fois sur la capacité des algorithmes à analyser correctement les sons. Les sons sont variables entre les espèces, ils présentent plus ou moins de variations de fréquences, de pulsations. L'enregistrement des paramètres du milieu peut être un atout important pour étudier l'impact des paramètres du milieu sur les sons émis par les amphibiens et reptiles (Márquez et al., 2008).

Une nouvelle méthode qui permet de caractériser un son grâce à ses fréquences hautes et basses à la fois semble prometteuse. L'enregistrement est d'abord segmenté pour séparer le signal acoustique en syllabe. Ensuite, la fréquence mel et la fréquence linéaire sont extraites puis fusionnées pour chaque syllabe : c'est la fusion des coefficients spectraux (J. Noda et al., 2018). Le vecteur ainsi créé est ensuite utilisé pour l'identification à l'aide d'un algorithme.

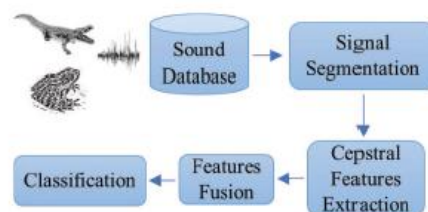


Figure 6: Processus d'analyse d'un son par fusion des coefficients spectraux (d'après Noda et al., 2018)

La nouveauté repose sur l'analyse grâce à la fréquence mel et à la fréquence linéaire simultanément. En effet, l'analyse par fusion des fréquences linéaires et mel donne de meilleurs résultats d'identification que les algorithmes utilisant uniquement la fréquence mel ou la fréquence linéaire. Cette comparaison a été testée sur un jeu de données d'amphibiens et de reptiles. Il semblerait qu'un algorithme de type SVM (Support

Vector Machine) soit le plus efficace dans l'identification. De plus, plus le jeu de données d'un algorithme est important plus les résultats seront bons (J. Noda et al., 2018).

Le suivi des amphibiens et des reptiles par bioacoustique semble être la seule méthode adaptée pour un suivi complet et automatisé. En effet, le suivi par photo-piège est peu développé et présente beaucoup de contraintes car les amphibiens et reptiles sont des individus plutôt difficiles à observer et aux habitats variés. La bioacoustique permet de capturer les sons des individus dans un large périmètre. Les algorithmes de détection semblent être bien développés et nécessitent d'être entraînés afin de s'adapter au milieu. L'impact du bruit de fond sur les enregistrements peut tout de même être une limite au suivi des amphibiens et reptiles.

E. Arthropodes terrestres

Les arthropodes terrestres forment un groupe taxonomique très varié et diversifié. En effet ce groupe, comprend de nombreux individus différents. Leur suivi permet d'étudier les variations du milieu dans lequel ils se trouvent et donc les possibles modifications qui peuvent s'y dérouler. Actuellement, le suivi des arthropodes terrestres est réalisé par des inventaires et des comptages qui peuvent parfois demander un temps important.

Pour le suivi des arthropodes terrestres, il semble actuellement difficile de mettre en place une méthode totalement automatisée. Cependant, il est tout de même possible de mettre en place des stratégies permettant de gagner du temps et ayant des coûts limités. L'utilisation combinée de piège Malaise et du codage à barres de l'ADN permet d'obtenir une méthode de suivi semi-automatique. Les pièges Malaise permettent de collecter facilement un grand nombre d'individus en laissant le dispositif sur place. Une fois les pièges relevés et les individus collectés, leur identification peut se faire grâce à la technique du code-barres ADN ou barcoding moléculaire (Dewaard et al., 2018). Cette méthode permet d'identifier la présence d'individus recherchés dans un échantillon. Les individus sont identifiés grâce à une séquence ADN choisie qui leur correspond. La séquence d'ADN choisie peut-être plus ou moins spécifique selon ce que l'on cherche à trouver (« Code-barres ADN pour caractériser la biodiversité », 2016). La détection par code-barres ADN permet un gain de temps tout en limitant les coûts d'analyses.

L'utilisation de piège de capture et la détection par barcoding moléculaire pourrait permettre un suivi des arthropodes terrestres semi-automatisés. La combinaison de ces techniques permettrait un gain de temps tout en ayant un coût limité.

F. Macroinvertébrés aquatiques

Les macroinvertébrés aquatiques reflètent la qualité du milieu dans lequel ils se trouvent. Ils sont notamment la base d'indices biologiques permettant de caractériser la qualité des cours d'eau. Le suivi des invertébrés aquatiques est donc important pour suivre l'évolution et les variations des milieux aquatiques. Les méthodes actuellement utilisées sont principalement des inventaires qui demandent notamment du temps pour l'identification des individus. L'identification demande également une forte expertise pour la détermination jusqu'à l'espèce (Milošević et al., 2020).

Afin d'accélérer l'identification, des méthodes automatiques ont été testées pour identifier les macroinvertébrés aquatiques à partir de photos. Pour cela, il est nécessaire d'avoir des photographies de

bonne qualité. Les algorithmes ont besoin d'être entraînés à la détection à partir d'une banque d'images variée et de qualité. Les différents algorithmes utilisables ont globalement des bons résultats d'identification. La reconnaissance automatique permet d'identifier les individus jusqu'à l'espèce (Milošević et al., 2020; Raitoharju et al., 2018; Serna et al., 2020). Le développement de cette méthode d'identification permettrait de faire un gain de temps et de limiter les coûts.

Le processus d'identification des macroinvertébrés aquatiques pourrait être automatisé pour améliorer leur suivi. La mise en place de cette méthode demande encore le perfectionnement des algorithmes d'identification mais permettrait un gain de temps et d'argent. Il serait néanmoins toujours nécessaire d'aller régulièrement sur le terrain pour la capture des individus.

G. Zooplancton

Le zooplancton est un groupe d'animaux aux caractéristiques particulières. Le suivi de ce plancton animal est très intéressant car c'est un groupe plutôt significatif de la qualité des eaux. Son développement ou sa disparition sont souvent les marqueurs de changements des conditions du milieu. Le suivi du zooplancton est donc très intéressant pour suivre les variations des milieux aquatiques.

Comptage automatique

Afin d'analyser un prélèvement de zooplancton, il existe des dispositifs permettant de compter et d'identifier automatiquement les espèces. Deux outils ont notamment été développés dans cet objectif : le Zooscan et la Flowcam.

Le Zooscan est un dispositif permettant de numériser les prélèvements et d'analyser les images obtenues pour compter, mesurer et identifier les espèces de zooplancton. Il permet en effet d'étudier l'abondance et la taille des organismes et de les classer en groupes faunistiques. Le Zooscan est un système rapide qui permet l'étude de séries temporelles ou spatiales, la détection d'événements exceptionnels ou de changements de tendances à long termes (*Nouveaux produits, brevets, technologies, innovations*, s. d.). L'identification grâce à une comparaison avec une banque d'images de références. Le Zooscan est adapté pour des organismes de 200 µm à quelques centimètres (Xiong et al., 2020).

La Flowcam utilise une détection laser pour capturer les images. Ce dispositif permet également d'estimer l'abondance, la taille des organismes et de faire une classification. Il était utilisé initialement pour le phytoplancton mais a ensuite pu être appliqué au zooplancton. La Flowcam permet de détecter des organismes de 3 à 3 000 µm, ce qui inclut la majorité des espèces de zooplancton d'eau douce (Xiong et al., 2020).

Le suivi du zooplancton peut être automatisé grâce aux dispositifs d'identification automatique. Ces dispositifs commercialisés permettent un gain de temps important avec un taux d'erreurs limités. Ils peuvent néanmoins présenter un certain coût à l'achat.

Code-barres ADN

L'identification du zooplancton peut également être automatisée grâce au code-barres ADN. Cette technique, déjà décrite pour le suivi des arthropodes terrestres, permet un gain de temps tout en limitant les coûts. Toutefois, l'analyse du zooplancton par cette technique est beaucoup moins développée par rapport à

d'autres groupes taxonomiques. L'analyse par ADN peut se faire selon 2 méthodes. La première consiste à l'échantillonnage de spécimens et la seconde concerne l'ADN environnemental. Cette deuxième méthode sera présentée plus en détail dans la suite de l'étude.

L'utilisation des code-barres ADN permet d'identifier les espèces recherchées dans un échantillon à l'aide d'une séquence spécifique d'ADN. Cette méthode est rapide et rentable. Néanmoins, pour le zooplancton, il existe peu de références sur les séquences d'ADN. Les bibliothèques de séquences ADN sont donc encore à développer (Xiong et al., 2020).

La détection par code-barres ADN pourrait donc permettre l'automatisation de l'identification des espèces de zooplancton. Toutefois, les séquences de référence n'étant pas complètes, il serait nécessaire d'approfondir les recherches avant d'envisager un développement complet de cette méthode pour le suivi du zooplancton.

2. Flore

A. Phytoplancton

Le phytoplancton correspond aux organismes végétaux qui vivent en suspension dans la colonne d'eau. Tout comme le zooplancton, le phytoplancton est très significatif du milieu dans lequel il se trouve. Le développement ou la disparition de certaines espèces permet d'indiquer un changement de condition du milieu. Le développement de certaines espèces de phytoplancton peut aussi provoquer des problèmes sanitaires. Le suivi du phytoplancton des milieux aquatiques est donc indispensable pour suivre leur qualité.

Surveillance aérienne

Le développement du phytoplancton peut perturber les usages de l'eau et peut être un indicateur d'une altération du milieu. La surveillance du phytoplancton peut s'avérer compliquée avec la surface d'eau à couvrir. Des techniques de surveillance d'ensemble ont donc été mises en place dans l'objectif de surveiller les proliférations de phytoplancton sur l'ensemble des écosystèmes.

Tout d'abord, la télédétection satellitaire permet de réaliser une analyse des couleurs en fonction des concentrations en chlorophylle-a, des particules en suspension et de la matière organique. L'analyse des couleurs en surface de l'eau permet de localiser les proliférations de phytoplanctons. Néanmoins, cette méthode est plutôt utilisable pour de large échelle comme les mers et océans. Cette technique par satellite ne peut pas être utilisée par temps nuageux (Silva et al., 2011).

La détection des proliférations de phytoplancton peut également se faire par avion. Un spectroradiomètre peut être embarqué à bord d'un avion et permettre ainsi de voir de petites proliférations. Cette technique est plus adaptée à la surveillance de petite surface comme les lacs ou les petits réservoirs, plutôt peu profond et méso-eutrophe (Silva et al., 2011).

Enfin, une des dernières méthodes développées est l'utilisation de drone pour réaliser le suivi du phytoplancton. Équipé d'un dispositif de spectrophotométrie et d'un capteur de réflectance, les drones peuvent survoler les systèmes aquatiques et détecter la présence de phytoplancton et notamment de cyanobactéries. Le projet OSS-CYANO a permis le développement d'un drone pouvant appréhender la distribution spatiale des cyanobactéries, cartographier leur concentration à une fréquence adaptée et

intégrer l'ensemble dans un système permettant de prévoir les évolutions des efflorescences de cyanobactéries. L'utilisation d'un drone présente l'intérêt de pouvoir réaliser des missions automatiquement, de retrouver un emplacement exact et de faire des mesures et des échantillonnages dans la colonne d'eau (Derkx et al., 2015).

Plusieurs méthodes de surveillance aérienne sont actuellement développées pour le suivi des proliférations de phytoplanctons. Toutes ces méthodes présentent l'avantage de couvrir un large périmètre de surveillance. Toutefois, le drone permet également la réalisation de prélèvement et de mesure directement dans le milieu.

Station de mesures in-situ

Afin de suivre l'évolution du phytoplancton, il existe des stations de mesures flottantes permettant d'acquérir des données à intervalle de temps régulier. Ces stations permettent en effet de réaliser des mesures à différentes profondeurs, de les relier avec les paramètres physico-chimiques du milieu et de transmettre les données de manière automatique. L'identification du phytoplancton se fait par la reconnaissance de la longueur d'ondes émises par les particules lors d'une stimulation avec des rayons lasers (Pomati, s. d.). Les spectrofluorimètres permettent en effet d'étudier le phytoplancton grâce à la fluorescence de la chlorophylle-a et autres pigments spécifiques. Il est possible d'émettre des radiations lumineuses de longueurs d'ondes spécifiques selon la classe phytoplanctonique à détecter. Ces stations sont souvent couplées avec des capteurs hydrologiques et météorologiques permettant d'enregistrer les paramètres du milieu. Le recueil de ces données permet de générer en temps réel des rapports, graphiques et cartographies (Silva et al., 2011).

Le projet Proliphyc a par exemple permis le développement de stations de mesures autonomes en énergie. Ces stations comportent une station météorologique et un ensemble de sondes immergées. La station météorologique permet par exemple de mesurer le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent, la température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité relative ou encore les précipitations. Les mesures de qualité d'eau comprennent la température, la conductivité, le pH ou encore l'oxygène dissous. Les stations développées intègrent un système de surveillance et d'alertes. Le pas de la mesure peut être choisi mais il reste possible d'interroger la bouée pour faire un relevé au moment même si nécessaire (Silva et al., 2011).

L'installation de ces stations est facile et leur entretien est peu onéreux. Toutefois, l'achat d'une telle station peut représenter un coût important mais celui-ci peut être rentabilisé sur le long termes. La mise en place de ce type de stations est intéressante pour réaliser un suivi continu du phytoplancton à un endroit précis.

B. Végétation enracinée

Les milieux aquatiques et alluviaux sont caractérisés par des populations de végétations enracinées diverses et variées. La végétation est très différente selon si l'on se trouve dans le cours d'eau, sur des bancs de sable ou dans les forêts alluviales. Le suivi des variations de végétation dans ces différentes zones est important pour comprendre la dynamique des milieux et leurs évolutions futures.

Cartographie automatique

La cartographie automatique permet de localiser et d'identifier la végétation à partir d'images satellitaires. Cette méthode peut permettre de caractériser les grands types de végétations, de caractériser les milieux et les habitats à partir d'images spécifiques. La photo-interprétation a notamment beaucoup été utilisée pour étudier la végétation mais les outils de classification automatique sont moins développés (Sellin et al., 2015).

Le développement de logiciel de classification automatique de la végétation à partir d'images satellites peut se faire selon deux méthodes : la méthode des pixels ou la méthode orientée objet. La méthode des pixels se base sur le spectre de couleur des pixels pour classer la végétation tandis que la méthode orientée objet utilise un algorithme plus perfectionné permettant une classification à partir des objets observés sur l'image. La méthode orientée objet semble être la plus adaptée à la classification de la végétation grâce à sa précision supérieure. Des jeux de données peuvent être intégrés à l'algorithme pour l'aider dans sa détection. Ces jeux de données, comme l'humidité du sol ou la géologie, permettent d'améliorer la classification en apportant des éléments supplémentaires non visibles sur les images. L'analyse de la végétation pourrait être possible à plusieurs niveaux. Le niveau « types de formations végétales » permet d'avoir une certitude correcte mais pour une classification à des niveaux plus précis, les algorithmes doivent être perfectionnés (Sellin et al., 2015).

La télédétection automatique peut également être utilisée pour les macrophytes, donc pour étudier la végétation directement dans le lit des cours d'eau. Un test a notamment été mené sur une portion d'1km et de 110 m de large de la Garonne moyenne. Les images utilisées sont les images satellites Pléiades qui ont permis d'avoir une précision de 50 cm. Les images ont été géoréférencées et un filtre a été appliqué pour laisser apparaître seulement la rivière. Un algorithme permet d'analyser le spectre visible et le spectre infrarouge pour repérer les macrophytes. Les cartes obtenues de manière automatique ont été comparées à des cartes obtenues par photo-interprétation d'images de drone (*Submerged Macrophyte Assessment in Rivers*, s. d.). Cette méthode a permis d'estimer la couverture en macrophytes mais pas de les identifier. L'analyse peut être gênée par la réflexion de l'eau. L'estimation de la couverture en macrophytes était convenable mais nécessite d'être améliorée pour avoir une précision plus forte. L'algorithme de détection doit être entraîné pour être efficace dans sa détection. Cette méthode est donc encore à approfondir.

La cartographie automatique de la végétation, pour les milieux aquatiques ou les milieux connexes, nécessite d'être approfondie. Elle semble néanmoins prometteuse pour identifier les grands ensembles de végétation et localiser leur développement.

Code-barres ADN

La végétation peut également être suivie grâce aux code-barres ADN. En effet, cette méthode, comme il l'a été expliqué précédemment, permet d'accélérer et d'automatiser l'identification d'échantillons biologiques. Cette méthode peut donc être mise en place pour l'étude des végétaux et ainsi permettre d'améliorer le suivi à large échelle (Papadopoulou et al., 2014). Les séquences ADN analysées sont obtenues à partir d'échantillons de végétaux. Cette méthode nécessite donc d'avoir des échantillons de végétaux.

Une autre méthode consiste à analyser l'ADN libéré dans le milieu par les individus : c'est la technique d'ADN environnemental. Les échantillons sont obtenus par prélèvements directement dans le milieu support de vie des individus (eau, sédiments...). Les végétaux peuvent en effet disperser de l'ADN dans leur environnement

lors de la dégradation de leur tissu. Des séquences d'ADN peuvent donc être retrouvées même après la disparition de l'individu (*L'ADN environnemental*, s. d.). L'utilisation de l'ADN environnemental permet ainsi d'obtenir une liste des individus présents dans le milieu. Néanmoins, elle ne permet pas d'obtenir des informations plus précises comme le stade de développement. L'ADN environnemental est également très fragile et certaines de ces propriétés doivent encore être développées (transport, dégradation...) (Civade, 2016; Valentini et al., 2016).

Les méthodes basées sur l'ADN permettent une automatisation du suivi des végétaux. Elles peuvent également être mise en place simplement avec un coût limité mais nécessite tout de même des interventions terrain pour le prélèvement des échantillons. L'utilisation de l'ADN environnemental est par ailleurs plutôt prometteuse car elle permettrait de réaliser des relevés en dehors des périodes de développement de certaines populations.

3. Physico-chimie

Le suivi des paramètres physico-chimiques des écosystèmes est important pour comprendre les changements qui s'y opèrent. La biodiversité est très sensible à l'évolution des paramètres du milieu dans lequel elle se trouve. Un petit changement peut avoir des impacts importants sur l'écosystème. Dans le cadre des changements climatiques globaux, il est essentiel de suivre la physico-chimie des milieux aquatiques et alluviaux pour comprendre leur évolution.

A. Milieu aquatique

Le suivi de la physico-chimie des milieux aquatiques permet d'étudier les évolutions, de comprendre leur fonctionnement et de détecter de potentielles pollutions. De nombreux paramètres peuvent être étudiés dans les milieux aquatiques, aussi bien dans l'eau qu'à sa surface.

Comme nous avons pu le voir pour le suivi du phytoplancton, des stations de mesures flottantes peuvent être mises en place pour enregistrer les paramètres physico-chimiques. Ces stations regroupent plusieurs dispositifs de suivis : sonde à pH, turbidité, conductivité, température, courant... Les dispositifs installés sur la station peuvent être adaptés selon les besoins des études. Elles peuvent également intégrer des dispositifs permettant de suivre la météorologie (Silva et al., 2011). Ces stations correspondent à des bouées installées dans le cours d'eau, comme le modèle de bouée DB600. Elles sont équipées de manières à être autonome sur le long terme : matériaux résistants, panneaux solaires. L'utilisation de ces stations flottantes permettent d'avoir une visualisation continue en temps réelle des données acquises (*Bouée DB600*, s. d.).

Des stations de surveillances et d'alertes de tailles plus importantes existent également. Ces stations sont installées sur les rives du cours d'eau et des dispositifs permettent de réaliser des mesures dans le cours d'eau. Ces stations sont beaucoup plus importantes que les stations flottantes en termes de tailles et de mises en place. Elles permettent de réaliser le même type de mesure selon les sondes installées (Guigues et al., 2013).

Dans le cadre du projet ECONECT, des mésocosmes aquatiques ont été développés pour suivre l'état de santé des milieux aquatiques. Ces appareils, appelés Aquacosme, sont des enceintes de quelques litres flottants à la surface des milieux aquatiques. Un flux d'eau du milieu est reçu par l'Aquacosme qui dispose également de sédiments au fond. La présence d'écomarqueurs, biofilm algal et vers spécifiques, permet d'étudier la

qualité du milieu, car ils ont un rôle important dans la décomposition de la matière organique et l'oxygénation des sédiments. Ce dispositif permet de recréer les caractéristiques du milieu dans une petite enceinte. Selon la qualité de l'eau qui entre dans le milieu, l'activité des vers et du biofilm sera perturbée et les paramètres du milieu seront modifiés. L'Aquacosme permet ainsi de mesurer le pH, la température de l'eau, la turbidité, l'intensité lumineuse mais aussi la teneur en oxygène et surtout l'oxygénation des sédiments (*Aquacosme – ECONECT*, s. d.). Ce dispositif permet donc une étude approfondie des paramètres du milieu et un suivi de l'oxygénation des sédiments en recréant les conditions du milieu à petite échelle.

La physico-chimie des milieux aquatiques est suivie par la mise en place de sonde dans le milieu. La différence entre les méthodes présentées est la structure du dispositif. L'Aquacosme permet de recréer le milieu et de mesurer des paramètres supplémentaires notamment au niveau des sédiments.

B. Milieu terrestre

Les milieux aquatiques et alluviaux abritent aussi une biodiversité aux habitats terrestres. Le suivi des paramètres des milieux terrestres est donc également important pour comprendre les variations observées dans les populations qui s'y trouvent.

Les paramètres du milieu peuvent être mesurés avec diverses sondes. Généralement, des sondes sont déployées avec les différents dispositifs de suivis des populations (Ganchev et al., 2012; Márquez et al., 2008). Des stations de surveillances multi-capteurs peuvent donc être développées. Ces stations permettent d'enregistrer différents paramètres comme le vent, la pluie, la température ou l'humidité. C'est notamment le cas de la station développée dans le cadre du projet Amibio (Ganchev et al., 2012). L'enregistrement des paramètres du milieu permet également de maximiser la qualité de l'identification pour certaines méthodes de mesure (bioacoustique).

Le déploiement de stations de mesures permet donc l'enregistrement et le suivi de différents paramètres du milieu ambiant. Ces stations peuvent être installées dans divers milieux (forêt, bancs de sables...). Elles peuvent également être construites de sorte à être autonomes en énergie et transmettre automatiquement les données acquises. Ces stations de suivi permettent donc d'étudier les paramètres physico-chimiques des milieux dans lesquels elles sont installées afin dans l'objectifs de comprendre leur fonctionnement et leur évolution future.

4. Réseaux de suivis

A l'heure des changements climatiques à grande échelle, la nécessité de comprendre les écosystèmes et leur dynamiques d'évolutions est de plus en plus forte. C'est le but du réseau OBLA et notamment du projet BPO Loire qui a pour objectif de comprendre les relations entre les paramètres environnementaux et la composition de la faune et de la flore (*BPO LOIRE – Intelligence des Patrimoines*, s. d.). Le suivi de la biodiversité et des milieux naturels est essentiel et doit être porté par tous les acteurs. Les recherches et travaux doit se faire de manière conjointe entre les acteurs pour permettre une étude optimale. La mise en commun des données est également essentielle. Dans cet objectif, différents projets voient le jour. C'est notamment le cas du projet TERRA FORMA qui consiste à développer des observatoires intelligents.

Le projet TERRA FORMA souhaite répondre aux défis imposés par l'Anthropocène, la nouvelle période géologique où les actions des sociétés humaines modifient l'habitabilité de la Terre. L'étude des interactions

entre les humains et l'environnement semble essentiel pour prévoir l'évolution des milieux et ainsi mettre en place des actions ciblées (Longuevergne, Elger, & Girard, 2020). Pour définir le fonctionnement et la trajectoire des socio-écosystèmes, le projet TERRA FORMA a pour objectif d'étudier les phénomènes reliant les humains, les organismes vivants et les éléments abiotiques. Pour cela, des observatoires in-situ au point de la technologie sont développés. L'objectif est de créer un réseau évolutif de capteurs intelligents, connectés et à bas coût (Church et al., s. d.; Longuevergne, Elger, Church, et al., 2020).

Le projet TERRA FORMA souhaite notamment développer des capteurs des paramètres physico-chimiques. Un fluorimètre a notamment été développé avec un système de communication intégré pour un coût de 50 €. Un capteur multi-paramètres a également été développé et permet la mesure du débit, de la température, de la conductivité, de la turbidité, du pH, de l'O₂ et d'autres paramètres. Son prix pourrait aller de 500 à 2000 € (Longuevergne, Elger, Church, et al., 2020). Une multitude de paramètres abiotiques doivent être suivis dans le projet TERRA FORMA comme les contaminants ou les gaz à effets de serres.

Concernant le suivi de la biodiversité, le projet TERRA FORMA s'appuie sur le réseau de Zones Ateliers. C'est un réseau inter-organismes de recherches interdisciplinaires sur l'environnement et les socio-écosystèmes (Church, 2021; *Les Zones Ateliers*, s. d.). Pour le suivi de la biodiversité, le projet TERRA FORMA souhaite utiliser des pièges photos et audios. Ces outils permettent d'avoir une solution polyvalente, modulable, performante et à coûts limités. Ces dispositifs permettent d'identifier les individus à partir d'images ou de sons capturés dans le milieu. Le prix de ces appareils pourraient aller de 75 à 950 € selon les options sélectionnées (Longuevergne, Elger, Church, et al., 2020).

Le projet TERRA FORMA propose donc plusieurs dispositifs de suivi automatique de la biodiversité. Le point fort de ce projet est d'envisager une étude à large échelle et une mise en commun des données. L'objectif principal est d'unir chercheurs et acteurs pour étudier finement les évolutions de l'environnement avec les impacts des sociétés humaines.

Discussion

De nombreuses méthodes automatisées de suivi de la biodiversité sont en cours de développement ou ont été développées dans les dernières années. Certaines de ces méthodes présentent encore des éléments à consolider afin de garantir un suivi et une automatisation maximale. Des méthodes peuvent être mises en place pour différents groupes taxonomiques. Le développement de méthodes de suivi automatisé varie d'un groupe à l'autre. Les poissons ou les oiseaux sont par exemple souvent étudiés tandis que les méthodes de suivi pour le zooplancton ou les macroinvertébrés aquatiques sont beaucoup moins développées (Figure 7). Globalement, beaucoup d'études se concentrent sur le suivi de la faune tandis que le développement de méthodes de suivi pour la flore est beaucoup plus restreint. Certaines méthodes nécessitent d'être améliorées mais présentent un fort potentiel pour les années à venir. Un tableau récapitulatif des méthodes et de leurs avantages et inconvénients est disponible en annexes (Annexe 2).

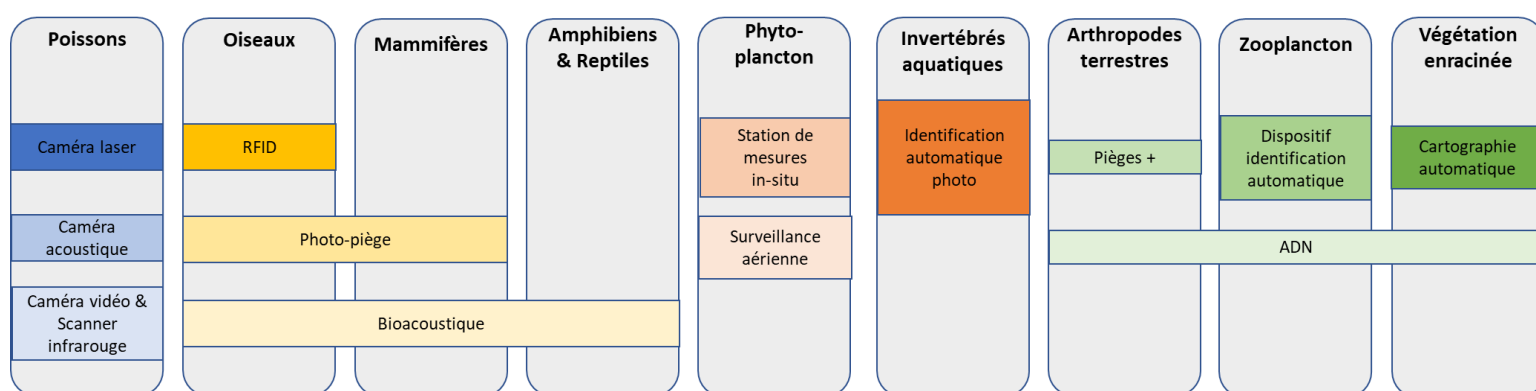


Figure 7 : Récapitulatif des méthodes de suivi automatisé par groupe taxonomique

1. Méthodes de suivi récurrentes

A. Photo-pièges

Les pièges photos sont des outils actuellement très développés et permettent l'acquisition d'images de bonne qualité. Ils présentent l'avantage d'être utilisables de jour comme de nuit et sont des méthodes non invasives. Leur mise en place pourrait être intéressante pour le suivi des oiseaux et des mammifères dans le cadre du réseau OBLA. Le déploiement de ces pièges permettrait potentiellement d'observer des espèces plus compliquées à voir dans le cadre d'observations terrains.

Comme il l'a été dit, le principal enjeu pour l'automatisation du suivi par photos pièges repose sur l'utilisation de logiciel d'identification efficace. Beaucoup de logiciels sont développés aujourd'hui et certains permettent d'entraîner l'algorithme avec son propre jeu de données pour l'adapter au milieu dans lequel le piège est mis en place. Pour un suivi de la biodiversité de la Loire, il pourrait être intéressant de réaliser un test sur une zone spécifique. Des pièges photos pourraient être disposés sur cette zone test et l'algorithme entraîné de manière spécifique avec la faune de ce milieu. Selon les résultats obtenus, le dispositif pourrait alors être étendu sur l'ensemble du bassin versant de la Loire.

L'identification automatique par photo-piège pourrait permettre de réaliser un suivi automatisé de l'avifaune et des mammifères de la Loire. Toutefois, il est probable que toutes les espèces ne soient pas capturées par

le photo-piège. Le suivi réalisé par les pièges photos ne serait donc pas complet mais permettrait déjà d'identifier et de localiser certaines espèces. La diversité des observations doit être améliorée en disposant ces pièges à des endroits divers. La mise en place de cette méthode nécessiterait l'installation de pièges sur tout le territoire pour le couvrir dans son ensemble et ainsi réaliser un suivi complet.

B. Bioacoustique

Le suivi par bioacoustique de la biodiversité est une méthode intéressante. Elle présente l'avantage d'être non-intrusive, réalisable de jour comme de nuit et permet de capter des individus dans un large périmètre autour de l'enregistreur. Cette méthode pourrait être appliquée pour plusieurs groupes taxonomiques : oiseaux, mammifères et amphibiens. La grande majorité de ces individus émettent des sons. Néanmoins, certains répertoires (oiseaux) sont actuellement plus complets que d'autres (mammifères).

La qualité des algorithmes de d'identification est l'enjeu majeur pour établir un suivi correct. Certains algorithmes demandent à être perfectionnés. Il est également nécessaire de les entraîner de manière spécifique au milieu dans lequel ils sont installés. Le principal problème rencontré serait celui du bruit de fond notamment dans le cas du réseau OBLA car le suivi est fait à proximité de cours d'eau. Les cours d'eau entraînent en effet un bruit de fond non négligeable. Il pourrait être intéressant de tester ce type de suivi et l'efficacité des filtres à bruits de fond.

Pour une application sur le bassin versant de la Loire, la bioacoustique semble donc une méthode complète et adaptée. Il serait nécessaire d'entraîner les algorithmes choisis avec un jeu de données adaptés au territoire pour améliorer l'identification et limiter les erreurs. Pour les enregistrements à proximité des eaux courantes, il serait également intéressant d'effectuer un test pour étudier l'impact du bruit de fond sur l'efficacité des algorithmes.

C. ADN

L'utilisation des code-barres ADN permet d'accélérer le processus d'identification des individus à partir d'échantillons biologiques. Cette méthode permet de limiter les coûts d'identification et d'automatiser le processus. Néanmoins cette méthode demande une intervention sur le terrain pour le prélèvement des échantillons.

Le développement de l'ADN environnemental est très intéressant car il permet une identification à partir d'un extrait d'échantillon environnemental. L'environnement permet en effet de stocker les séquences d'ADN libérées par différents individus du milieu. L'ADN environnemental a les mêmes avantages que l'utilisation des prélèvements d'organismes pour la détection. Néanmoins, il permet également d'identifier des individus après leur passage ou leur disparition. Il offre ainsi plus de possibilités pour détecter les espèces. L'ADN environnemental pourrait être utilisé pour le suivi de plusieurs groupes taxonomiques : poissons, amphibiens, reptiles, arthropodes, invertébrés, zooplancton, phytoplancton et végétation.

L'utilisation de l'ADN et notamment de l'ADN environnemental est une méthode très prometteuse pour le suivi de la biodiversité. Elle pourrait être déployée à grande échelle pour le suivi de la biodiversité sur le bassin versant de la Loire.

2. Méthodes par groupe taxonomique

A. Poissons

Les caméras acoustiques permettent d'acquérir des données de nuit et dans des eaux turbides. Elles permettent également d'obtenir des images très précises à hautes résolutions et ont une mise en place plutôt aisée. Actuellement, la mise en place de caméra acoustique est freinée d'une part par le champ de vision qui reste limité et impose donc de nombreuses contraintes sur la section à choisir pour positionner le dispositif. D'autre part, les logiciels actuellement disponibles pour l'identification des poissons ne sont pas assez performants pour automatiser totalement le processus. Il est donc nécessaire d'attendre la disponibilité de nouveau logiciel en cours de développement pour pouvoir limiter les erreurs d'identifications automatiques. Les caméras acoustiques restent tout de même des dispositifs intéressants pour un suivi semi-automatisé mais avec un coût conséquent.

La caméra laser UTOFIA présente des avantages non négligeables. En effet, elle permet d'acquérir des données avec une très haute résolution et permet ainsi de distinguer des espèces aux morphologies pourtant très proches. Le champ de vision est également plutôt large ce qui impose moins de contraintes sur la section de cours d'eau mise en place. Les caméras laser ont donc de nombreux avantages mais ne sont cependant pas encore développées pour les cours d'eaux intérieurs. Il serait donc nécessaire que des tests soient réalisés avant d'envisager une mise en place sur la Loire. Il serait également nécessaire de développer un logiciel de reconnaissance adapté aux espèces retrouvées dans les eaux douces. Ainsi, les caméras lasers pourraient être des outils performants pour le suivi des poissons de la Loire dans les prochaines années.

Les dispositifs de couplages de caméra vidéo et de scanners infrarouges sont des outils adaptés au suivi dans les passes à poissons. Néanmoins, leurs utilisations présentent quelques inconvénients notamment pour une mise en place sur la Loire. En effet, la Loire est un fleuve plutôt sauvage comportant quelques passes à poissons. Un suivi à l'aide d'un tel dispositif signifierait suivre les poissons uniquement dans les passes à poissons et donc à des endroits très localisés. De plus, les passes à poissons sont utilisées uniquement par certaines espèces de poissons. Ainsi ce dispositif pourrait être utile pour le suivi des poissons migrateurs qui utilisent les passes. En plus de cette limite d'utilisation, ce dispositif de couplage présente d'autres inconvénients. En effet, pour une mise en place hors d'une passe à poissons il serait nécessaire de contraindre le passage des poissons. Des dispositifs telles que les barrières flottantes permettent de le faire mais leur mise en place sur un fleuve large comme la Loire semble peu envisageable (Sonny et al., 2016). De plus, ce dispositif de comptage permet uniquement d'identifier des poissons de grands tailles solitaires. Il ne permet pas de détecter des poissons de petites tailles ou en banc. L'utilisation de cet outil ne permettrait donc pas de suivre l'ensemble des espèces piscicoles présentes dans la Loire. Enfin, l'efficacité de ce matériel peut être affectée dans des eaux chargées en matière en suspension ou par les algues. Un nettoyage régulier est donc nécessaire pour assurer une efficacité optimale.

Dans le cadre du réseau OBLA, l'utilisation du dispositif de couplage de caméra vidéo et de scanner infrarouge permettrait de réaliser un suivi automatique dans les passes à poissons. Toutefois, il serait plus pertinent d'installer du matériel de suivi hors des passes à poissons, sur des sections variées de la Loire pour pouvoir étudier l'ensemble des espèces présentes dans le bassin versant de la Loire. Dans ce cas-là, les caméras lasers et acoustiques semblent plus appropriées. Leur utilisation requiert tout de même une portion de cours d'eau aux caractéristiques spécifiques. Le degré d'automatisation du suivi grâce à ces caméras dépend fortement

du logiciel d'analyse utilisé. Il serait donc intéressant d'attendre la disponibilité de logiciels plus efficaces dans l'identification des poissons afin d'obtenir une automatisation convenable du suivi. Les caméras laser semblent les plus prometteuses grâce à la qualité des images obtenues. Toutefois, la mise en place de tout ces dispositifs, caméras acoustiques, caméras laser et dispositif de couplage, représentent un coût non négligeable pour une seule unité. Or, dans le cadre du réseau de la Loire, il serait plutôt intéressant de réaliser plusieurs suivis à des endroits variés tout le long du bassin versant. Ainsi, ce genre de dispositif pourrait être intéressant à des endroits ponctuels mais il est nécessaire de trouver une autre méthode pour réaliser un suivi plus important de la faune piscicole.

B. Oiseaux

Le suivi des oiseaux par RFID pourrait être intéressant car il permettrait d'identifier les oiseaux sans erreurs et rapidement. Le développement d'outils comme le projet ECONECT sont intéressants pour suivre et comprendre les populations d'oiseaux et leurs interactions. Néanmoins, la mise en place d'un suivi par RFID nécessiterait d'équiper de nombreux oiseaux pour réaliser un suivi optimal et complet. Cette optique semble inenvisageable ne serait-ce que pour l'impossibilité de baguer tous les oiseaux, ou au moins une grande partie, présents sur la Loire. Cela représenterait également un coût important pour l'achat de nombreuses puces RFID. De plus, il faudrait ensuite réussir à attirer les oiseaux près des lecteurs pour que ce suivi soit optimal. Il faudrait alors plusieurs types de structures pour attirer toutes les espèces d'oiseaux et alors réaliser un suivi efficace.

Pour le suivi des oiseaux, 3 méthodes ont pu être analysées : le suivi par RFID, les photo-pièges et le suivi par bioacoustique. Le suivi par RFID présente de nombreuses contraintes de mises en place et de coût. C'est également une méthode très intrusive. Elle ne semble pas adaptée pour un suivi des oiseaux à grande échelle comme c'est le cas dans le cadre du réseau OBLA. Le suivi par photo-piège et par bioacoustique sont deux méthodes qui se rapprochent. Elles dépendent toutes deux de la capacité des algorithmes à identifier les individus à partir des enregistrements. La méthode des pièges photos impose néanmoins aux oiseaux de se trouver en face de l'appareil, ce qui peut limiter l'observation et donc le suivi. La méthode bioacoustique permet quant à elle de capter des sons dans un certain périmètre et couvre donc une zone plus large. Cette méthode a tout de même une limite, celle du bruit de fond qui peut être très important notamment à proximité des cours d'eau. Ces deux méthodes pourraient donc toutes les deux être appliquées dans le cadre du réseau même si elles présentent chacune des inconvénients. Elles ont également un avantage de coûts par rapport au suivi RFID.

Ainsi, pour le suivi des oiseaux du bassin versant de la Loire, les méthodes par photo-pièges et par bioacoustique semblent être les plus appropriées. Leur automatisation est liée à la qualité des logiciels à réaliser une identification automatique. La méthode par bioacoustique semble toutefois être prometteuse malgré la limite imposée par le bruit de fond. Cette méthode permettrait en effet de couvrir un plus grand nombre d'individus et donc de réaliser un meilleur suivi. Le matériel d'enregistrement doit donc encore être perfectionné tout comme les algorithmes d'identification. Le suivi par RFID ne semble pas du tout adapté pour ce suivi à grande échelle.

C. Mammifères

Le suivi par bioacoustique et par photo-piège sont deux méthodes relativement similaires. Toutes deux permettent d'identifier un mammifère à partir d'un enregistrement (son ou photo) effectué dans le milieu.

Ces méthodes reposent également sur la capacité des algorithmes à analyser les enregistrements pour déterminer l'espèce du mammifère.

La principale limite de la bioacoustique par rapport aux photo-pièges est liée au bruit de fond qui peut perturber l'analyse du son. Concernant les photo-pièges, la limite est plutôt liée au périmètre couvert par les dispositifs de captures. En effet, les mammifères doivent nécessairement se trouver en face de l'appareil tandis que les capteurs bioacoustiques permettent de capturer des sons beaucoup plus éloignés et couvrent donc un périmètre plus large.

L'efficacité de ces méthodes sont toutes les deux liées à la capacité des algorithmes à l'identification. Néanmoins le suivi par bioacoustique présente des avantages supérieurs au suivi par piège photo. En effet, la bioacoustique permet de couvrir une surface d'étude plus large et de capturer des animaux plutôt difficiles à observer même par photo-piège. Pour une application sur le bassin versant de la Loire, les enjeux majeurs reposent donc sur le développement et l'entraînement d'algorithmes adaptés à ces milieux et sur la réduction de l'impact du bruit de fond.

D. Amphibiens & Reptiles

Le suivi automatisé des amphibiens et reptiles pourrait être permis par la bioacoustique. Cette méthode présente de nombreux avantages : elle est non-invasive, possible de jour comme de nuit et permet de capter un grand nombre d'individus. Les méthodes d'analyses automatiques semblent être beaucoup étudiées et certaines sont très efficaces.

Pour une application sur le bassin versant de la Loire, la bioacoustique semble donc une méthode complète et adaptée. Il serait nécessaire d'entraîner les algorithmes choisis avec un jeu de données adaptés au territoire pour améliorer l'identification et limiter les erreurs. La méthode de fusion des coefficients spectraux semble actuellement la plus efficace, il serait donc intéressant de la tester sur le territoire. Pour les enregistrements à proximité des eaux courantes, il serait également intéressant d'effectuer un test pour étudier l'impact du bruit de fond sur l'efficacité des algorithmes. Le suivi par bioacoustique des amphibiens et reptiles semble donc adapté à un développement dans le cadre du réseau OBLA.

E. Arthropodes terrestres

Une méthode de suivi totalement automatisé des arthropodes terrestres ne semble pas possible actuellement. Toutefois, il est tout de même possible de mettre en place une méthode semi-automatisée permettant un gain de temps avec des coûts raisonnables. Cette méthode combine la mise en place de piège Malaise pour la capture de individus et l'utilisation des codes-barres ADN pour leur identification.

Dans le cadre du réseau OBLA, cette méthode semi-automatisée semble tout à fait convenable. Il n'y a pas de freins majeurs à son développement. La détection par code-barres ADN est actuellement une méthode très développée dans différents domaines comme l'écologie ou la médecine.

F. Macroinvertébrés aquatiques

Le suivi des macroinvertébrés aquatiques est essentiel pour suivre la qualité des eaux. Ce suivi peut être partiellement automatisé avec l'étape d'identification. En effet, des algorithmes d'identification automatique

par photos sont actuellement en cours de développement. La mise en place de cette méthode demande des photos de qualité pour limiter les erreurs.

Pour le suivi de la biodiversité de la Loire, l'identification automatique des macroinvertébrés aquatiques permettrait un gain de temps non négligeable. Il serait néanmoins nécessaire d'attendre le développement d'algorithmes performants pour limiter les erreurs d'identification. La capture des individus nécessite toujours un déplacement sur le terrain car il semble actuellement compliqué d'imaginer une méthode de prélèvement automatisée complète.

L'identification automatique des macroinvertébrés aquatiques semble donc être une méthode prometteuse qui va se développer dans les années futures. Cette méthode permettrait de gagner en temps, de limiter les coûts et ne nécessite pas une expertise approfondie.

G. Zooplancton

Grâce aux dispositifs d'identification automatique, le suivi des communautés de zooplancton pourrait être partiellement automatisé. Ces outils sont aujourd'hui commercialisés et ont prouvés leur efficacité. Ils permettent un gain de temps non négligeable mais peuvent toutefois présenter un léger coût à l'achat.

Les deux méthodes analysées pour le suivi du zooplancton, dispositifs d'identification automatique et code-barres ADN, dans le cadre du réseau OBLA sont toutes deux adaptées et ne présentent pas d'inconvénients majeurs. Ces méthodes permettraient un gain de temps tout en limitant les coûts associés. Néanmoins, les dispositifs d'identification automatique sont actuellement plus développés que l'identification par code-barres ADN. Même si ces dispositifs représentent un certain coût à l'achat, ils pourraient être rentabilisés avec une utilisation sur le long terme. Les dispositifs d'identification automatique semblent donc actuellement plus adaptés pour le suivi du zooplancton sur le bassin versant de la Loire même si la méthode par ADN semble prometteuse pour l'avenir.

H. Phytoplancton

Les méthodes de surveillance du développement du phytoplancton permettent de réaliser un suivi à large échelle. La méthode de télédétection satellitaire ne semble pas adaptée un suivi à l'échelle de la Loire car elle ne serait pas assez précise. La méthode de détection aéroportée pourrait correspondre mais pour un suivi régulier cela représenterait un coût important en termes d'argent et de temps. La surveillance par drone permettrait de réaliser un suivi automatisé des développements de phytoplanctons. Cette méthode permet de réaliser la surveillance automatiquement tout en laissant la possibilité de prendre le contrôle de l'appareil pour réaliser des mesures spécifiques. L'achat d'un tel drone peut par contre présenter un coût financier important et être un frein à sa mise en place. Pour le suivi du phytoplancton dans le cadre du réseau OBLA, seul le suivi par drone semble être adapté. En effet, les méthodes par télédétection satellitaire et aéroportée sont soit imprécise soit coûteuses et longues. L'utilisation d'un drone présente des avantages en termes de temps, de capacités et d'automatisations des mesures et des analyses. Le principal problème à son développement est le coût d'un tel dispositif.

Les stations de mesures flottantes permettent de réaliser un suivi continu du phytoplancton mais également des paramètres physico-chimiques du milieu. Ces stations permettent en effet de mettre en place une surveillance du phytoplancton en un point donné et de réaliser des mesures dans toute la colonne d'eau. Les

paramètres météorologiques et hydrologiques peuvent également être étudiés par la station de manière automatique. Le principal frein à la mise en place de ces stations est le coût à l'achat. Dans le cadre du réseau OBLA, le déploiement de ce type de stations sur certains endroits localisés et judicieusement choisis permettrait de maintenir un suivi et une surveillance continue de façon automatique. Elles permettraient d'avoir des données complètes sur le phytoplancton et le milieu de manière précises et continues. Le coût et le risque de dégradation par des individus extérieurs sont les deux points pouvant freiner leur installation.

Le suivi du phytoplancton par drone et par stations de mesures in-situ sont deux méthodes complémentaires. En effet, l'utilisation d'un drone permet de couvrir l'ensemble des milieux aquatiques et offrent la possibilité de réaliser des mesures ponctuelles. Les stations de mesures permettent de faire un suivi continu du phytoplancton en un point donné avec des mesures plus approfondies. Elles permettent également de relevés les paramètres du milieu. Ces deux méthodes sont donc complémentaires et permettent un suivi complet et automatisé du phytoplancton. Pour une mise en place dans le réseau OBLA le principal frein est le coût à l'achat de ces deux dispositifs qui peut représenter une somme non négligeable pour un déploiement à grande échelle.

I. Végétation enracinée

La cartographie automatique de la végétation permet d'identifier des grands ensembles de végétations et de suivre le développement de certaines populations. Néanmoins, ces méthodes sont encore à perfectionner afin d'avoir une efficacité optimale et une précision intéressante. Dans le cadre du réseau OBLA, ces méthodes, une fois perfectionnée, permettrait de suivre les populations de végétations à grande échelle. Le développement des macrophytes en rivière pourrait en effet être suivi sur tous les linéaires de cours d'eau et permettrait ainsi une surveillance totale du réseau et un gain de temps. L'apparition et l'évolution d'ensemble de végétation pourraient être cartographiées sur tout le bassin versant de la Loire de manière automatique. Ces méthodes de cartographie automatiques pourraient donc se révéler intéressantes dans les années à venir.

Les méthodes d'identification par ADN peuvent également être utilisée pour le suivi de la végétation. C'est une méthode complémentaire à la cartographie qui permettrait d'automatiser l'identification des populations végétales. Ainsi, dans le cadre du réseau OBLA la cartographie automatique et les techniques par ADN pourraient être mises en place de manière complémentaires. La cartographie permettrait de suivre le développement des populations à grande échelle tandis que l'ADN permettrait d'identifier les individus qui composent ces populations.

3. Physico-chimie

A. Milieu aquatique

Le suivi de la physico-chimie des milieux aquatiques est réalisé par la mise en place de station. Ces stations peuvent être fixées en berges ou flottantes dans le cours d'eau. Elles regroupent diverses sondes permettant de mesurer des paramètres hydrologiques mais aussi météorologiques. Selon le suivi voulu, les sondes peuvent être adaptées. Les stations flottantes présentent l'avantage d'une mise en place facile et un déplacement simple contrairement aux stations en bord de cours d'eau qui sont souvent fixes. Néanmoins, ces dernières sont plus protégées de la dégradation car les sondes sont enfermées dans une structure tandis

que les bouées de mesures peuvent être approchées. Les Aquacosmes permettent de réaliser des mesures approfondies du milieu en créant un petit volume d'étude. Ils permettent notamment d'étudier l'oxygénation des sédiments.

Dans le cadre du réseau OBLA, les stations de mesures flottantes semblent être les plus intéressantes. En effet, elles peuvent être mises en place facilement, déployées à grande échelle et peuvent être déplacées si nécessaire. Les Aquacosmes sont également intéressants mais ces dispositifs sont encore en développement. Les stations de mesures fixées en berges demandent une installation importante par la construction d'une structure particulière. Ces stations ne s'intègrent également pas beaucoup dans le paysage et sont plus volumineuses que les stations flottantes. Les stations flottantes sont néanmoins plus exposées au public et pourraient être dégradées par les usagers des cours d'eau. Le coût de ces dispositifs est principalement associé aux sondes mises en place.

B. Milieu terrestre

Le suivi des paramètres des milieux terrestres peut également être réalisé à l'aide de stations de mesures in-situ. Ces stations regroupent différentes sondes selon les besoins de l'étude et ont un fonctionnement autonome. Elles présentent l'avantage d'avoir une mise en place plutôt simple et de pouvoir être déployée dans différents types de milieu.

Dans le cadre du réseau OBLA, le déploiement de ces stations permettrait de réaliser des mesures automatiques et continues des paramètres des milieux à différents endroits du territoire. Leur mise en place permettrait d'avoir des relevés de manière continues et donc de limiter le temps passé sur le terrain. Les données transmises de manière autonome permettraient d'avoir un suivi des différents milieux complet. La mise en place de ces stations accompagnées des dispositifs de suivi de biodiversité offrirait la possibilité de croiser les données et donc de réaliser des études approfondies.

C. Réseaux de suivis

Le projet TERRA FORMA est un projet intéressant et en lien avec les objectifs du réseau OBLA. Ce projet permet de présenter une méthode de suivi à grande échelle de la biodiversité. Cela permet d'avoir des ressources pour le suivi de la biodiversité à l'échelle du bassin versant de la Loire. Les techniques et dispositifs mis en place pour le projet TERRA FORMA peuvent servir d'appui aux études dans le cadre du réseau OBLA.

En termes d'automatisation, le projet TERRA FORMA a permis le développement de méthodes de suivis de la biodiversité connectés à coûts limités. Les recherches menées ont ainsi permis de développer des outils performants et ont potentiellement permis de réduire les problèmes rencontrés pour ces méthodes (photo-pièges et bioacoustique). La mise en place dans les Zones Ateliers permettra d'observer l'efficacité de ces dispositifs pour l'identification automatique de la biodiversité. Le réseau OBLA pourra donc s'appuyer sur les résultats du projet TERRA FORMA pour mettre en place ces méthodes sur le bassin versant de la Loire.

Le déploiement du projet TERRA FORMA est une source d'appui pour la mise en place de méthode de suivi de la biodiversité automatisée dans le réseau OBLA. Les outils développés pourront ainsi être mis en place sur le bassin versant de la Loire selon les résultats obtenus.

Conclusion

Le changement climatique est un enjeu majeur à l'échelle planétaire pour les années futures. La biodiversité et les écosystèmes pourront être fortement impactés par ces changements majeurs. Il est donc essentiel d'étudier les écosystèmes pour comprendre leur fonctionnement et leur évolution future. Le suivi de la biodiversité et des paramètres des écosystèmes est donc nécessaire pour comprendre la dynamique des populations dans les milieux. Dans cet objectif, le réseau OBLA souhaite mettre en place des méthodes de suivi automatisé de la biodiversité des milieux aquatiques et alluviaux. Dans cette étude, plusieurs techniques ont donc été analysées.

Pour le suivi de la faune, un nombre important de méthodes automatisées ont pu être identifiées contrairement au suivi de la flore. Pour certains groupes taxonomiques, comme les oiseaux ou les poissons, ils existent plusieurs méthodes disponibles ou en développement. A l'inverse, d'autres groupes taxonomiques, tels que les macroinvertébrés aquatiques ou les arthropodes, sont moins étudiés pour la mise en place méthode de suivi automatisé. Concernant le suivi des paramètres abiotiques des milieux, les outils sont plutôt bien développés et les principaux enjeux reposent sur l'automatisation de la transmission des données.

Une grande partie des méthodes analysées ici ont besoins d'être développées pour garantir une efficacité optimale. C'est notamment le cas des méthodes qui utilisent un algorithme d'identification. Ces algorithmes sont actuellement performants mais ont besoin d'être optimisés pour permettre l'automatisation des suivis. Les méthodes de bioacoustique et d'ADN environnemental sont les plus prometteuses pour les années à venir. Elles présentent des avantages importants en termes de coût, de capacité et de facilité de déploiement.

Dans le cadre du réseau OBLA, les méthodes étudiées ici permettraient d'automatiser les suivis de biodiversité. Elles permettraient un gain de temps, de limiter les coûts, les interventions sur le terrain et les impacts sur les milieux aquatiques et alluviaux de la Loire. Leur perfectionnement est toutefois nécessaire pour un déploiement à grande échelle.

Bibliographie

- Abdallah, Y., Robert, M., & Rimbert, L. (2020). *Etude avant-projet pour la mise en place d'une station de comptage « migrants » (STACOMI) sur le fleuve Léguer.*
- Acevedo, M. A., & Villanueva-Rivera, L. J. (2006). *Using Automated Digital Recording Systems as Effective Tools for the Monitoring of Birds and Amphibians.* [https://bioone.org/journals/wildlife-society-bulletin/volume-34/issue-1/0091-7648_2006_34_211_UADRSA_2.0.CO_2/Using-Automated-Digital-Recording-Systems-as-Effective-Tools-for-the/10.2193/0091-7648\(2006\)34\[211:UADRSA\]2.0.CO;2.short](https://bioone.org/journals/wildlife-society-bulletin/volume-34/issue-1/0091-7648_2006_34_211_UADRSA_2.0.CO_2/Using-Automated-Digital-Recording-Systems-as-Effective-Tools-for-the/10.2193/0091-7648(2006)34[211:UADRSA]2.0.CO;2.short)
- Aquacosme – ECONECT.* (s. d.). Consulté 19 février 2021, à l'adresse <https://econect.cnrs.fr/aquacosmes/>
- Belles, A. (2012). *Développement et applications environnementales des échantillonneurs passifs pour la surveillance des écosystèmes aquatiques.*
- Bertrin, V. (2020). *Impacts des changements globaux sur les ressources en eau et les milieux aquatiques.* 17.
- Blin, E. (2008). La mesure en continu des milieux aquatiques. *Techniques Sciences Méthodes*, 2, 27-31. <https://doi.org/10.1051/tsm/200802027>
- Bouée DB600 : Station d'alerte instrumentée et autonome en milieux naturels.* (s. d.). Actu-Environnement; Actu-environnement. Consulté 15 janvier 2022, à l'adresse <https://www.actu-environnement.com/materiels-services/produit/bouee-instrumentee-db600-analyse-eau-riviere-mer-3189.php>
- BPO LOIRE – Intelligence des Patrimoines.* (s. d.). Consulté 19 janvier 2022, à l'adresse <https://intelligencepatrimoines.fr/recherche/chantiers/loire-et-fleuves/bpo-loire/>
- Brandes, T. S. (2008). Automated sound recording and analysis techniques for bird surveys and conservation. *Bird Conservation International*, 18(S1), S163-S173. <https://doi.org/10.1017/S0959270908000415>
- Bridge, E. S., & Bonter, D. N. (2011). A low-cost radio frequency identification device for ornithological research. *Journal of Field Ornithology*, 82(1), 52-59. <https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2010.00307.x>
- BruitParif. (2020). *Bruit et biodiversité.*
- Cadieux, S. (2002). *Reconnaissance et comptage de silhouettes de poissons.* Université de Sherbrooke. <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/1201>

- Cailly, C., Duffay, B., & Mazille, M. (s. d.). *Suivi des moyens et grands mammifères*. 29.
- Church, J. M. (2021). Un exemple de milieu vivant partagé. In É.-É. et P. universitaires de Reims (Éd.), *Penser les milieux vivants en commun* (p. 21-24). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03208864>
- Church, J. M., Ragueneau, O., Girard, V., Longuevergne, L., & Elger, A. (s. d.). *TERRA FORMA : des observatoires des systèmes socio-écologiques au cœur des transitions socio-techniques*. 2.
- Civade, R. (2016). *L'ADN environnemental, méthode moléculaire d'étude de la biodiversité aquatique. Une approche innovante*. (p. 140) [Phdthesis, Doctorat Sciences de l'Environnement, AgroParisTech]. <https://hal.inrae.fr/tel-02606484>
- ClassifyMe : A field-scouting software for the identification of wildlife in camera trap images*. (s. d.). 42.
- Code-barres ADN pour caractériser la biodiversité. (2016, juillet 11). *Encyclopédie de l'environnement*. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/metabarcoding-codes-barres-adn-caracteriser-biodiversite/>
- Comment choisir un piège photographique, surveillance, chasse, animaux, cambrioleurs*. (s. d.). studioSPORT. Consulté 11 janvier 2022, à l'adresse <https://www.studiosport.fr/comment-choisir-un-piege-photographique-m60289.html>
- Compteur automatisé pour le suivi des populations de poissons / WSP*. (s. d.). Consulté 10 janvier 2022, à l'adresse <https://www.wsp.com/fr-CA/services/compteur-automatise-pour-le-suivi-des-populations-de-poissons>
- Daroux, A., Martignac, F., & Guillard, J. (2014). Utilisation de la caméra acoustique DIDSON pour le suivi en rivière des poissons migrateurs. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 83(3), 1-8.
- Derkx, F., Vinçon-Leite, B., Lemaire, B. J., Soudani, K., Quiblier, C., Freissinet, C., Chollet, S., Decencièrre, B., Seguy, L., Buttigieg, S., Tassin, B., Sorin, J.-L., & Humbert, J.-F. (2015). Un drone pour la surveillance des proliférations phytoplanctoniques dans les milieux aquatiques lenticques. In SHF (Éd.), *Drones et hydraulique : Les drones au service des métiers de l'eau*. SHF. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02329216>
- Dewaard, J., Levesque-Beaudin, V., deWaard, S., Ivanova, N., Mckeown, J., Miskie, R., Naik, S., Perez, K., Ratnasingham, S., Sobel, C., Sones, J., Steinke, C., Telfer, A., Young, A., Young, M., Zakharov, E., & Hebert, P. (2018). Expedited Assessment of Terrestrial Arthropod Diversity by Coupling Malaise Traps with DNA Barcoding. *Genome*, 62. <https://doi.org/10.1139/gen-2018-0093>

- Forio, M. A. E., & Goethals, P. L. M. (2020). An Integrated Approach of Multi-Community Monitoring and Assessment of Aquatic Ecosystems to Support Sustainable Development. *Sustainability*, 12(14), 5603. <https://doi.org/10.3390/su12145603>
- Ganchev, T., Potamitis, I., Jahn, O., Riede, K., & Fakotakis, N. (2012). Automatic acoustic monitoring and inventorying of biodiversity. *AmiBio Newsletter*, 8, 2.
- Gimenez, O., Moulherat, S., & Tarel, J.-P. (2021). *OCAPI - Observation de la biodiversité par des CAMéras Plus Intelligentes—Restitution du projet*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20742.91209>
- Gonzalez, J.-L. (s. d.). *FORMATION A L'UTILISATION DES TECHNIQUES D'ECHANTILLONNAGE PASSIF (DGT, POCIS, SBSE) EN MILIEU MARIN : JOURNEES DE FORMATION ET GUIDE TERRAIN*. 32.
- Greulich, S., Gandouin, E., Leitao, M., Abonyi, A., Vallet, J., Bouillet, V., Chabrol, L., Cordier, J., Filoche, S., Lacroix, P., Magnanon, S., Wantzen, K., Richard, N., Lafage, D., Pétillon, J., Boisneau, C., Secondi, J., Faivre, B., Marchadour, B., & Airaud, S. (2014). *Mise en place d'un réseau d'Observation de la Biodiversité de la Loire et de ses Affluents (OBLA)*. <http://www.za-loire.org/presentation/>
- Greulich, S., Richard, N., Gandouin, E., & Leitao, M. (2017). *Demande de subvention—Biodiversité et variables de forçage dans les habitats de la plaine ligérienne—Protocole et outils—BPO Loire*.
- Grizzetti, B., Liqueste, C., Pistocchi, A., Vigiak, O., Zulian, G., Bouraoui, F., De Roo, A., & Cardoso, A. C. (2019). Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Science of The Total Environment*, 671, 452-465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.155>
- Guigues, N., Lepot, B., Berho, C., & Salvétat, F. (2013). *PANORAMA DE L'EXISTANT ET RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES CAPTEURS ET ANALYSEURS EN LIGNE POUR LA MESURE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS L'EAU*. 74.
- Hébert, S., & Légaré, S. (2000, octobre). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières et des petits cours d'eau* [Matériel éducatif]. Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ). <http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1288/>
- Huetz, C., & Aubin, T. (2012). *Bioacoustics approaches to locate and identify animals in terrestrial environments*. In « *Sensors for Ecology* ». (F. Gaill, Y. Lagadeuc and J-F. Le Galliard eds).

Kappelle, M., Van Vuuren, M. M. I., & Baas, P. (1999). Effects of climate change on biodiversity : A review and identification of key research issues. *Biodiversity & Conservation*, 8(10), 1383-1397. <https://doi.org/10.1023/A:1008934324223>

L'ADN environnemental : Un nouvel outil pour espionner les espèces sauvages. (s. d.). Planet-Vie. Consulté 15 janvier 2022, à l'adresse <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/l-adn-environnemental-un-nouvel-outil-pour-espionner-les-especes-sauvages>

Laronde, S., Jourdan, Ch., & Legrand, H. (2008). Panorama des réseaux de mesure pour la connaissance et la gestion des milieux aquatiques. *Techniques Sciences Méthodes*, 2, 81-84. <https://doi.org/10.1051/tsm/200802081>

Les Zones Ateliers : Un réseau inter-organismes de recherches interdisciplinaires sur l'environnement et les socio-écosystèmes en lien avec les enjeux sociétaux | INEE. (s. d.). Consulté 19 janvier 2022, à l'adresse <https://www.inee.cnrs.fr/fr/zones-ateliers>

Lévêque, C. (s. d.). *Etat de santé des écosystèmes aquatiques : L'intérêt des variables biologiques*. 17.

Lévêque, C. (2005). Biodiversité et gestion des systèmes aquatiques continentaux. *Revue Des Sciences de l'eau*, 11, 211-221. <https://doi.org/10.7202/705339ar>

Longuevergne, L., Elger, A., Church, J. M., & Girard, V. (2020). *TERRA FORMA des observatoires des systèmes socio écologiques au coeur des transitions socio techniques*.

Longuevergne, L., Elger, A., & Girard, V. (2020). *TERRA FORMA : Concevoir et tester l'observatoire intelligent des territoires à l'heure de l'Anthropocène*. <https://www.univ-reims.fr/les-programmes-en-cours/equipex-terra-forma/terra-forma,25229,41688.html>

Malet, E., Astrade, L., Gauchon, C., & Jaillet, S. (2017). Introduction—Monitorer les milieux naturels, entre ambitions et contraintes, une affaire de compromis. *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 19(1), 9-17. <https://doi.org/10.3406/edyte.2017.1356>

Márquez, R., Llusia, D., Beltran, J., S. do Amaral, J. P., & Bowker, R. (2008). Anurans, the group of terrestrial vertebrates most vulnerable to climate change : A case study with acoustic monitoring in the Iberian Peninsula. *BfN-Skripten*, 234, 43-52.

Martin, A., Guillemain, C., Le Dreau, M., Liger, L., Peyrard, X., Gouy, V., & Margoum, C. (2015). Intérêts de l'échantillonnage passif pour un suivi simplifié des transferts de pesticides dans les milieux

- aquatiques. *45e congrès du Groupe Français des Pesticides*, 6 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01250632>
- Mazzella, N., Coquery, M., Miege, C., & Berho, C. (s. d.). *Applicabilité des échantillonneurs passifs dans le cadre de la DCE*. 81.
- McShea, W., Forrester, T., Costello, R., He, Z., & Kays, R. (2015). Volunteer-run cameras as distributed sensors for macrosystem mammal research. *Landscape Ecology*, 31. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0262-9>
- Merchant, N. D., Witt, M. J., Blondel, P., Godley, B. J., & Smith, G. H. (2012). Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and Automatic Identification System (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin*, 64(7), 1320-1329. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.004>
- Michelet, P. (2017). La biodiversité des milieux aquatiques continentaux en France métropolitaine : État des lieux et menaces. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 86(2), 36-39.
- Miele, V., Dray, S., & Gimenez, O. O. (2021). Images, écologie et deep learning. *Regards sur la biodiversité*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03142486>
- Milošević, D., Milosavljević, A., Predić, B., Medeiros, A. S., Savić-Zdravković, D., Stojković Piperac, M., Kostić, T., Spasić, F., & Leese, F. (2020). Application of deep learning in aquatic bioassessment : Towards automated identification of non-biting midges. *Science of The Total Environment*, 711, 135160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135160>
- Newson, S., Middleton, N., & Pearce, H. (s. d.). *The acoustic identification of small terrestrial mammals in Britain*. 5.
- Noda, J. J., Travieso, C. M., & Sánchez-Rodríguez, D. (2016). Methodology for automatic bioacoustic classification of anurans based on feature fusion. *Expert Systems with Applications*, 50, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.020>
- Noda, J., Sanchez-Rodriguez, D., & Travieso, C. (2018). *A Methodology Based on Bioacoustic Information for Automatic Identification of Reptiles and Anurans*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74333>
- Nouveaux produits, brevets, technologies, innovations*. (s. d.). Consulté 14 janvier 2022, à l'adresse <http://www.waternunc.com/fr2005/zooscan.htm>

Obrist, M. K., Pavan, G., Sueur, J., Riede, K., Llusia, D., & Márquez, R. (2010). Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. *Abc Taxa*, 8, 68-99.

Observatoire de la Biodiversité – OBLA – Zone Atelier Loire. (s. d.). Consulté 8 janvier 2022, à l'adresse <https://www.za-loire.org/observatoire-de-la-biodiversite-oblal>

Openfeeder et Smartnest – ECONECT. (s. d.). Consulté 11 janvier 2022, à l'adresse <https://econnect.cnrs.fr/openfeeder-et-smartnest/>

Papadopoulou, A., Chesters, D., Coronado, I., De la Cadena, G., Cardoso, A., Reyes, J., Maes, J., Rueda, R., & Gómez-Zurita, J. (2014). Automated DNA-based plant identification for large-scale biodiversity assessment. *Molecular ecology resources*, 15. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12256>

Pomati, F. (s. d.). *Suivi automatique du plancton lacustre*.

Raitoharju, J., Riabchenko, E., Ahmad, I., Iosifidis, A., Gabbouj, M., Kiranyaz, S., Tirronen, V., Ärje, J., Kärkkäinen, S., & Meissner, K. (2018). Benchmark Database for Fine-Grained Image Classification of Benthic Macroinvertebrates. *Image and Vision Computing*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2018.06.005>

RFID et ornithologie. (s. d.). Natural Solutions. Consulté 11 janvier 2022, à l'adresse <https://www.natural-solutions.eu/blog/rfid-ornithologie>

Rhinehart, T. A., Chronister, L. M., Devlin, T., & Kitzes, J. (2020). *Acoustic localization of terrestrial wildlife : Current practices and future opportunities*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ece3.6216>

Sellin, V., Magnanon, S., Gourmelon, F., Debaine, F., & Nabucet, J. (2015). Etude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection. *Cybergeog: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.27067>

Serna, J., Cann, D., Vélez Macías, F., & Ramírez, N. (2020). An image processing method for recognition of four aquatic macroinvertebrates genera in freshwater environments in the Andean region of Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08545-2>

Silva, T., Lemaire, B. J., & Vinçon-Leite, B. (2011). SUIVI DU PHYTOPLANCTON DANS LES LACS URBAINS A L'AIDE D'UNE BOUEE INSTRUMENTEE : LE CAS DU LAC D'ENGHIEN-LES-BAINS. In D. Thevenot (Éd.),

22èmes Journées Scientifiques de l'Environnement—Reconquête des environnements urbains : Les défis du 21ème siècle: Vol. JSE-2011 (Numéro 9). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00608282>

Sonny, D., Goffaux, D., Watthez, Q., Roy, R., Deshaies, M., Demers, C., & Brunet, R. (2016). *Fourniture d'un système de contrôle automatique de l'ichtyofaune adapté à la passe à poissons de la Vesdre à Chênée et traitement des données.*

Stowell, D., Petrusková, T., Šálek, M., & Linhart, P. (2019). Automatic acoustic identification of individuals in multiple species : Improving identification across recording conditions. *Journal of The Royal Society Interface*, 16(153), 20180940. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0940>

Submerged macrophyte assessment in rivers : An automatic mapping method using Pléiades imagery | Elsevier Enhanced Reader. (s. d.). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116353>

Valentini, A., Taberlet, P., Miaud, C., Civade, R., Herder, J., Thomsen, P. F., Bellemain, E., Besnard, A., Coissac, E., Boyer, F., Gaboriaud, C., Jean, P., Poulet, N., Roset, N., Copp, G. H., Geniez, P., Pont, D., Argillier, C., Baudoin, J.-M., ... Dejean, T. (2016). Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding. *Molecular Ecology*, 25(4), 929-942. <https://doi.org/10.1111/mec.13428>

Xiong, W., Huang, X., Chen, Y., Fu, R., Du, X., Chen, X., & Zhan, A. (2020). *Zooplankton biodiversity monitoring in polluted freshwater ecosystems : A technical review.* <https://doi.org/10.1016/j.jese.2019.100008>

Annexes

Annexe 1 : Méthodes analysées par groupes taxonomiques

Méthode										
	Arthropodes terrestres	Macroinvertébrés aquatiques	Poissons	Oiseaux	Amphibiens	Mammifères	Zooplankton	Phytoplankton	Végétation enracinée	
Caméra acoustique			X							
Caméra laser			X							
Caméra vidéo & Scanner infrarouge			X							
RFID				X						
Photo-piège				X		X				
Bioacoustique				X	X	X				
Surveillance aérienne								X		
Stations de mesures in-situ								X		
Identification automatique de photo		X								
ADN	X						X		X	
Dispositif d'identification automatique							X			
Cartographie automatique									X	

Annexe 2 : Caractéristiques des méthodes de suivi automatisé analysées

Méthodes	Groupe taxonomique	Avantages	Inconvénients	Coût	Pertinence OBLA
Caméra acoustique	Poissons	Haute résolution Mise en place simple Acquisition de nuit et en eau turbide	Emplacement : section resserée, lit uniforme et plat Champ de vision restreint Algorithme limité	25 000 à 75 000 €	+
Caméra laser	Poissons	Haute résolution Mise en place simple Acquisition de nuit et en eau turbide	Non développé pour les milieux d'eau douce	50 000 €	++
Caméra vidéo & Scanner infrarouge	Poissons	Précision Autonomie Algorithme efficace	Développé pour passe à poisson Inadapté pour les petits poissons Impacté par la turbidité Nécessité d'un éclairage pour la nuit	?	+
RFID	Oiseaux	Suivi approfondis	Coût important Equipement de tous les oiseaux Attirer les individus prêt du lecteur	?	-
Photo-piège	Oiseaux, Mammifères	Photo de qualité Technique développée Réalizable de nuit	Algorithme limité Attirer les individus prêt du lecteur Petite surface couverte	74 à 950 € (TERRA FORMA)	++
Bioacoustique	Oiseaux, Mammifères, Amphibiens & Reptiles	Couvre beaucoup d'individus Couvre une large surface	Bibliothèque de sons complète Algorithme limité Bruit de fond	74 à 950 € (TERRA FORMA)	+++
Surveillance aérienne	Phytoplancton	Large échelle Suivi des proliférations	Pas focément de prélèvements possibles	?	++
Stations de mesures in-ditu	Phytoplancton	Prélèvements dans la colonne d'eau Paramètres hydrologiques Paramètres météorologiques Peu d'entretien	Ponctuel	?	++
Identification automatique de photo	Invertébrés aquatiques	Gain de temps Pas besoin d'expertise	Algorithme limité Nécessite des photo de bonne qualité Bibliothèque incomplète Nécessité de faire les prélèvements	?	++
ADN	Arthropodes terrestres, Zooplancton, Végétation enracinée	Gain de temps Pas besoin d'expertise Fiabilité importante	Nécessité de faire les prélèvements Bibliothèques parfois incomplètes	?	+++
Dispositif d'identification automatique	Zooplancton	Déjà commercialisés Gain de temps	Coût	?	++
Cartographie automatique	Végétation enracinée	Couvre une large échelle Gain de temps Suivi du développement	Algorithme limité, à perfectionner	?	+

Directeur de recherche :

Sabine GREULICH

Sidney KREMER

PFE/DAE5

IMA

2021-2022

**Méthodes de suivis de la biodiversité :
Possibilités de suivis automatisés dans les milieux aquatiques et alluviaux de la
Loire**

Résumé : Dans le cadre des changements climatiques globaux, le suivi de la biodiversité des milieux aquatiques et alluviaux est essentiel afin de comprendre le fonctionnement de ces milieux et leurs évolutions futures. Toutefois, les méthodes actuellement utilisées sont souvent longues et chronophages et peuvent avoir un coût important. L'objectif de cette étude est donc de faire un tour d'horizon des méthodes de suivis automatisés existantes ou en cours de développement pour la biodiversité des milieux aquatiques et alluviaux. Cette étude s'inscrit dans le cadre du réseau OBLA qui a pour vocation d'éclaircir les processus de répartitions et les dynamismes des organismes sur le bassin versant de la Loire. Plusieurs méthodes sont analysées selon les groupes taxonomiques étudiés dans le réseau OBLA. Certaines méthodes sont aujourd'hui très au point tandis que d'autres sont prometteuses mais doivent encore être développées. Pour chacune des méthodes, le fonctionnement est présenté ainsi que les avantages et les inconvénients. Enfin, la pertinence pour un déploiement dans le cadre du réseau OBLA est évaluée.

Mots Clés : biodiversité, suivi, réseau, méthodes, OBLA, abiotique, faune, flore