



Strasbourg, le 16 octobre 2024

TPVS(2024)16

CONVENTION RELATIVE À LA CONSERVATION DE LA VIE SAUVAGE
ET DU MILIEU NATUREL DE L'EUROPE

Comité permanent

44^e réunion
Strasbourg, 2-6 décembre 2024

Lignes directrices techniques pour le suivi des habitats des esturgeons

**Document de travail pour la mise en œuvre du Plan
d'action paneuropéen pour la conservation des
esturgeons**

Document préparé par M. Ralf Reinartz

Les lignes directrices qui suivent ont été rédigées dans le cadre du contrat de service N° 09.0201/2022/885601/SER/D.3 « Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons » signé entre la Commission européenne et un consortium dirigé par l'organisation environnementale WWF Europe centrale et orientale dans le cadre d'une procédure d'appel d'offres publique.

Après avoir été approuvée par la Commission européenne, la version finale de ces lignes directrices appartiendra à cette dernière qui pourra décider de la publier en temps voulu.

La Commission ne peut en aucun cas être tenue responsable de l'utilisation qui pourrait être faite de ce document.

Collaborateurs (par ordre alphabétique) :

Marie-Laure Acolas, Giuseppe Castaldelli, Dewayne Fox, Thomas Friedrich, Jörn Gessner, Gabor Guti, Tim Haxton, Andrzej Kapusta, Borislava Margaritova, Stoyan Mihov, Jakob Neuburg, Marian Paraschiv, Stephanie Popp, Eric Rochard, Beate Striebel-Greiter, Meelis Tambets

Mise à disposition des images : Danube Delta National Institute (institut national de recherche et de développement du delta du Danube, Roumanie), Dewayne Fox (États-Unis), Jörn Gessner (Allemagne), Jarko Jaadla (Estonie), Keskkonnaamet (Estonie), le projet MEASURES, Meelis Tambets (Estonie), WWF Europe centrale et orientale, WWF-Bulgarie

Ces lignes directrices sont élaborées dans le cadre du contrat de service de la CE (09.0201/2022/885601/SER/D.3) « Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons »

Merci de citer ce document comme suit :

Reinartz, R., *Lignes directrices techniques pour le suivi des habitats des esturgeons*, Contrat de service de la CE (09.0201/2022/885601/SER/D.3) «Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons», Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2024, 101 p.

Table des matières

Table des matières.....	3
1 Résumé.....	5
2 Introduction.....	8
2.1 Le suivi : fondement de la prise de décision.....	10
2.2 Champ d'application.....	13
2.3 Outils de support : cartographie et solutions fondées sur les données.....	14
2.4 Travail et sécurité opérationnelle.....	15
2.5 Bien-être et manipulation des animaux.....	16
3 Informations générales.....	18
3.1 Terminologie de l'habitat.....	18
3.2 Caractéristiques, exigences en matière d'habitats et cycle de vie de l'esturgeon.....	20
3.3 Stades de vie et types d'habitats de l'esturgeon.....	25
3.4 Menaces liées à l'habitat.....	27
4 Programme de suivi des habitats.....	30
4.1 Définition, conseils et raison d'être.....	30
4.2 Identification de zones de pertinence globale.....	32
4.2.1 Critères d'habitat pour l'identification de cours d'eau et de tronçons pertinents.....	32
4.2.2 Méthodes.....	33
<i>4.2.2.1 Exploration des données.....</i>	<i>33</i>
<i>4.2.2.2 Analyse des cartes bathymétriques, des photographies aériennes et de l'orthophotographie.....</i>	<i>34</i>
<i>4.2.2.3 Télédétection.....</i>	<i>36</i>
<i>4.2.2.4 Calcul rétroactif de la période et du lieu de fraie.....</i>	<i>40</i>
<i>4.2.2.5 Évaluation des barrières à la migration.....</i>	<i>41</i>
<i>4.2.2.6 Présence de populations reproductrices d'espèces aux exigences similaires à celles de l'esturgeon en matière d'habitats.....</i>	<i>44</i>
<i>4.2.2.7 Études des cours d'eau.....</i>	<i>44</i>
4.3 Contrôle des habitats identifiés.....	46
4.3.1 Critères de contrôle des habitats.....	46
<i>4.3.1.1 Qualité générale de l'eau.....</i>	<i>46</i>
<i>4.3.1.2 Fraie et larves vésiculées.....</i>	<i>48</i>
<i>4.3.1.3 Larves capables de se nourrir.....</i>	<i>49</i>
<i>4.3.1.4 Jeunes de l'année.....</i>	<i>50</i>

4.3.1.5 Juvéniles, subadultes et adultes > 1 an (fluviaux, marins pour les populations anadromes)	50
4.3.1.6 Hivernage (fluvial)	51
4.3.2 Méthodes.....	51
4.3.2.1 Profondeur de l'eau	51
4.3.2.2 Température de l'eau	52
4.3.2.3 Vitesse du courant.....	52
4.3.2.4 Oxygène et autres variables de la qualité de l'eau.....	54
4.3.2.5 Demande biochimique en oxygène (DBO) et échantillons d'eau	55
4.3.2.6 Conditions hydrologiques.....	56
4.3.2.7 Substrats de fond grossiers.....	58
4.3.2.8 Évaluation du substrat par sonar à balayage latéral	60
4.3.2.9 Substrats de fond fin et organismes alimentaires (fluviaux)	64
4.3.2.9.1 Le zooplancton	66
4.3.2.9.2 Les invertébrés benthiques	67
4.3.2.10 Modélisation de l'habitat	71
4.4 Confirmation de l'utilisation des habitats par l'esturgeon.....	76
4.4.1 Génétique moléculaire et ADN environnemental (ADNe).....	76
4.4.2 Suivi, télémétrie et observation	77
4.4.2.1 Télémétrie	78
4.4.2.2 Marquage et balisage	83
4.4.2.3 Photographie et vidéographie sous-marines basées sur la lumière	84
4.4.2.4 Techniques hydroacoustiques.....	84
4.5 Mesures de suivi récurrentes et en temps réel.....	88
4.5.1 Feuille de route de suivi	89
5 Modèle de plan de travail	90
6 Messages pour les décideurs.....	96
7 Bibliographie.....	98

1 Résumé

Les populations d'esturgeons dans les cours d'eau et les eaux côtières d'Europe ont considérablement diminué au cours des 150 dernières années. Outre la surpêche, le développement intensif de l'énergie hydroélectrique et de la chenalisation des cours d'eau ont entraîné une perte et une fragmentation massives des habitats et ont affecté tous les stades de vie de l'esturgeon. Les huit espèces d'esturgeons présentes dans les eaux européennes sont par conséquent menacées d'extinction (Union internationale pour la conservation de la nature – UICN) et leur état de conservation est signalé comme « défavorable » dans le cadre du rapport réalisé au titre de l'article 17 de la Directive « Habitats ».

Pour remédier à cette situation, le Comité permanent de la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne) a adopté la Recommandation n° 199 (2018) sur le Plan d'action paneuropéen pour les esturgeons (PANEUAP), dont la mise en œuvre est préconisée dans le cadre de la Directive « Habitats ». Le PANEUAP offre un cadre aux actions qui doivent être mises en œuvre dans les pays de l'aire de répartition de l'esturgeon par les parties prenantes régionales, notamment par les commissions régionales chargées des mers et des cours d'eau.

Le Plan d'action appelle l'ensemble des pays signataires à ramener toutes les populations d'esturgeons existantes à un état de « préoccupation mineure » (UICN) ou « favorable », à rétablir des populations d'esturgeons autonomes et à restaurer les habitats nécessaires aux différentes phases de leur cycle de vie dans leur aire de répartition historique, de manière à garantir la survie de l'espèce et la représentation des sous-populations, dans la mesure du possible.

Le Plan d'action souligne l'importance d'habitats fonctionnels et de couloirs de migration comme condition préalable à la survie à long terme de populations d'esturgeons autonomes. L'objectif de ces lignes directrices techniques est donc le soutien à la mise en œuvre de l'objectif 3 « Protection et restauration des habitats de l'esturgeon dans les principaux cours d'eau » et de l'objectif 4 « Assurer ou faciliter la migration de l'esturgeon (montaison et dévalaison) » du Plan d'action.

Le cycle de vie de l'esturgeon nécessite des habitats spécifiques et accessibles pour permettre certaines utilisations de l'habitat telles que la fraie, l'alimentation et l'hivernage, afin d'assurer la viabilité des populations. Les esturgeons sont ainsi des indicateurs clés de l'intégrité écologique des cours d'eau (Schiemer, 2000), puisque leurs habitats peuvent être répartis sur plusieurs bassins versants et les aires marines adjacentes.

À ce titre, le recensement et le suivi rapides des habitats de l'esturgeon et de leur utilisation sont essentiels pour protéger et restaurer les habitats, ainsi que pour comprendre les interactions dynamiques entre les populations et leur environnement, et pour continuer l'élaboration des mesures de conservation de l'esturgeon.

Dans le cadre de ce document, le suivi des habitats est défini comme toutes les mesures récurrentes visant à rendre compte de la fonctionnalité des habitats, et les évaluations permettant le recensement des habitats ainsi que le contrôle et la confirmation de l'utilisation des habitats sont considérées comme des conditions préalables de base. Toutes ces mesures devraient faire partie d'un programme de suivi des habitats, et devraient être synchronisées et coordonnées avec tous les autres aspects de la conservation et du rétablissement des esturgeons dans un système donné.

Une approche en quatre étapes permettant l'évaluation des habitats et la mise en place d'un programme de suivi de l'esturgeon est recommandée :

- 1. Identification des zones de présence antérieure et globalement pertinentes grâce à la recherche de données et d'informations :** collecte et analyse d'informations utiles sur les anciens habitats et eaux de l'esturgeon, ainsi que sur les aires et tronçons présentant les caractéristiques des habitats qu'il occupe. Cela devrait inclure l'exploration des données sur la biologie spécifique de l'esturgeon, son écologie et ses anciens habitats en matière de présence de l'espèce, d'accessibilité (barrières à la migration), de dynamique des populations, d'aires de répartition, d'utilisation des habitats, de cycle de vie, d'hydromorphologie et d'hydrologie, ainsi que les données du suivi en eau libre et des évaluations de terrain faisant état de la qualité générale de l'eau. L'exploration des données devrait également s'intéresser aux caractéristiques spécifiques des habitats telles que le substrat et la vitesse du courant.
- 2. Contrôle des habitats :** relevé et enregistrement des variables environnementales pertinentes constatées sur le terrain, en ciblant des lieux, des moments et des conditions spécifiques et en incluant leur quantification en termes d'étendues spatiales et temporelles ainsi que leur fréquence dans un système donné, accompagnés d'une modélisation statistique des habitats.
- 3. Confirmation de l'habitat réel et des types d'habitats :** dans un premier temps, observation de la présence et des mouvements de l'esturgeon dans tout ou partie des cours d'eau, et dans un second temps, description de l'utilisation réelle des habitats et de ses résultats concrets, principalement par le suivi des populations.
- 4. Mesures de suivi récurrentes et en temps réel :** relevé et enregistrement de la fonctionnalité continue des habitats et des types d'habitats au fil du temps grâce à l'observation et au relevé de variables environnementales pertinentes et grâce au suivi des populations.

Ce document fournit des critères pertinents pour le recensement et le contrôle des habitats, ainsi que des méthodes permettant de documenter et de confirmer leur localisation et leur utilisation. Des critères permettant de

déterminer les mesures de suivi récurrentes et en temps réel, une feuille de route de suivi, un modèle de plan de travail comprenant des exemples tirés de recherches sur les esturgeons, des messages à l'attention des décideurs et une liste de références pertinentes complètent ces lignes directrices techniques pour le suivi des habitats des esturgeons.

2 Introduction

Huit espèces d'esturgeons sont indigènes dans les cours d'eau d'Europe et toutes figurent sur la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN, avec sept des huit espèces étant considérées « en danger critique ». Bien que menacés d'extinction, les esturgeons sont des indicateurs clés de l'intégrité écologique des cours d'eau, puisque les habitats nécessaires à leur cycle de vie peuvent être répartis sur des bassins versants entiers (Schiemer, 2000). L'esturgeon est donc considéré comme une espèce emblématique pour de nombreux acteurs de la conservation œuvrant pour des cours d'eau sains et fluides

Du fait du risque d'extinction élevé de ce groupe d'espèces, le Comité permanent de la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne) a adopté la Recommandation n° 199 (2018) sur le Plan d'action paneuropéen pour les esturgeons (PANEUAP)¹, dont sont Parties tous les pays européens importants de l'aire de répartition de l'esturgeon, ainsi que l'UE et ses États membres. En mai 2019, le sous-groupe d'experts des directives « Nature » (NADEG) de l'UE a également recommandé la mise en œuvre du PANEUAP aux États membres de l'UE. Le PANEUAP a été conçu pour servir de cadre de travail et est constitué de près de 70 actions qui visent à ramener toutes les populations d'esturgeons existantes à un état de « préoccupation mineure » (UICN) ou « favorable » (Directive « Habitats »), à rétablir des populations d'esturgeons autonomes et à restaurer les habitats nécessaires aux différentes phases de leur cycle de vie dans leur aire de répartition historique, de manière à garantir la survie de l'espèce et la représentation des sous-populations, dans la mesure du possible.

La recommandation charge le Secrétariat de la Convention de Berne de suivre de près la mise en œuvre du Plan d'action et de coordonner l'élaboration de rapports périodiques sur son application aux niveaux nationaux.

Depuis l'adoption du PANEUAP, la Commission européenne suit de près sa mise en œuvre et en 2022, elle a émis un contrat de service (09.0201/2022/885601/SER/D.3) pour accompagner sa réalisation. Le champ d'application du contrat inclut l'évaluation de la mise en œuvre du PANEUAP dans 18 pays clés de l'aire de répartition de l'esturgeon, dont 15 États membres de l'UE (Roumanie, Bulgarie, Croatie, Slovénie, Hongrie, Slovaquie, Autriche, Allemagne, Italie, Pologne, Lituanie, Lettonie, Estonie, France et Pays-Bas) ainsi que la Serbie, l'Ukraine et la Géorgie. Les connaissances actuelles sur les habitats de l'esturgeon et les obstacles à la migration dans 11 bassins fluviaux, dont ceux du Danube, du Rioni, du Pô, de la Vistule, de l'Oder, du Niémen, de la Gauja, de la Narva, de l'Elbe, du Rhin et de la Gironde ont été recueillies et présentées sur des cartes (Popp, S., 2024. Characteristics and locations of Sturgeon Habitat in European Rivers).

De plus, le contrat englobe (1) une étude sur les captures accidentelles

¹ <https://rm.coe.int/pan-european-action-plan-for-sturgeons/16808e84f3>

d'esturgeons et les mesures possibles pour les éviter ou les atténuer, (2) des lignes directrices techniques pour le suivi des populations d'esturgeons, (3) des lignes directrices techniques pour le suivi des habitats, ainsi que (4) des lignes directrices techniques pour les bonnes pratiques en matière de programmes de reproduction *ex situ* et de lâchers.

Ce document présente les lignes directrices techniques pour le suivi des habitats, qui encouragent de manière explicite la mise en œuvre de l'objectif 3 du PANEUAP « Protection et restauration des habitats de l'esturgeon dans les principaux cours d'eau » et accordent une attention particulière au recensement et au suivi des habitats. Elles soutiennent également la mise en œuvre de l'objectif 4 : « Assurer ou faciliter la migration de l'esturgeon (montaison et dévalaison) ». Ces lignes directrices complètent les Lignes directrices techniques pour le suivi des populations développées dans le cadre du même contrat de service. Les populations et leurs habitats sont des « jumeaux écologiques », c'est-à-dire que l'un ne peut pas survivre de manière durable sans l'autre. Une approche de la conservation réussie et durable nécessite une mise en œuvre rapide de mesures visant le maintien de populations d'esturgeons viables et d'habitats fonctionnels. La restauration des populations, des habitats ou des routes migratoires demande des ressources importantes, une volonté politique et une base de connaissances solide, autant d'éléments nécessaires à une prise de décisions éclairées concernant les priorités en matière de conservation de la nature.

*D'une manière générale, toutes les espèces d'esturgeons étant protégées par la Directive « Habitats » (directive 92/43/CEE du Conseil), les États membres de l'UE sont dans l'obligation d'assurer le maintien ou le rétablissement des espèces concernées par la Directive à un état de conservation favorable dans l'ensemble de leur aire de répartition naturelle au sein de l'UE. Le suivi de l'état de conservation inclut l'évaluation de la disponibilité des habitats des espèces et constitue une obligation découlant de l'article 11 de la Directive pour toutes les espèces d'intérêt communautaire (comme cela est énuméré aux Annexes II, IV et V). L'obligation spécifique de rendre des comptes découle de l'article 17, et les rapports sur l'évaluation de l'état de conservation doivent être renouvelés tous les six ans (dernier rapport disponible datant de 2013-2018). Pour trois espèces listées aux annexes II et IV (*Acipenser naccarii*, *A. oxyrinchus* et *A. sturio*), les États membres sont tenus de « désigner les zones clés de leur habitat comme des sites d'importance communautaire qui devront être inscrits dans le Réseau Natura 2000 afin d'être gérés conformément aux besoins écologiques de l'espèce » et « d'appliquer un régime de protection strict dans l'ensemble de leur aire de répartition naturelle, à l'intérieur et à l'extérieur des sites Natura 2000 » (articles 12 et 16).*

Dans le même temps, la Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe (Convention de Berne) vise également à protéger les esturgeons et leurs habitats. Le Réseau Émeraude de la Convention est un réseau écologique composé de zones d'intérêt spécial pour la conservation (ZISC), qui fait l'objet de mesures de gestion, de suivi et d'information, et dont l'objectif

est d'assurer la survie à long terme des espèces et des habitats protégés qui nécessitent des mesures de conservation spécifiques.

En gardant à l'esprit le statut emblématique des esturgeons, l'amélioration des connaissances sur leurs habitats et leurs couloirs de migration participe donc également à une meilleure mise en œuvre de la Directive « Habitats » et de la Convention de Berne au sens large, favorisant ainsi une approche écosystémique nécessaire au maintien de la diversité biologique de l'Europe.

2.1 Le suivi : fondement de la prise de décision

L'état des populations de poissons migrateurs parcourant de longues distances est un excellent indicateur des fonctions des corridors écologiques, de l'existence d'un nombre suffisant d'habitats de reproduction, d'alimentation et d'hivernage, de l'accessibilité et de la connectivité des habitats, ainsi que de la santé, de la résilience et de la qualité de l'eau de l'écosystème dans son ensemble.

Le Plan d'action paneuropéen pour les esturgeons présente les Actions suivantes comme étant la **raison et le fondement du suivi des habitats** au sein d'une approche globale de conservation et de rétablissement de l'esturgeon au titre de **l'objectif 3 « Protection et restauration des habitats de l'esturgeon dans les principaux cours d'eau » :**

- 3.1.1 Identifier les habitats critiques existants (époque et localisation/conditions et ressources) afin de créer une base de données commune
- 3.1.2 Assurer la protection juridique des habitats prioritaires identifiés et de leurs fonctions
- 3.1.3 Identifier les conflits et les intérêts communs entre les programmes de développement économique, les habitats identifiés et leur fonctionnalité
- 3.1.4 Atténuer les conflits entre le développement économique et les exigences et fonctions écologiques des habitats de l'esturgeon
- 3.2.1 Identifier les possibilités de restauration des habitats
- 3.2.2 Développer un concept intégré pour la restauration des habitats essentiels afin de rétablir des fonctions écosystémiques quasi naturelles offrant une capacité de charge suffisante pour permettre la survie d'une population d'esturgeons autonome dans un bassin fluvial donné
- 3.2.3 Mettre en œuvre des actions de restauration pilotes
- 3.2.4 Assurer le suivi de la qualité des habitats dans le cadre des actions de restauration pilotes, en accordant une attention particulière aux critères pertinents pour les esturgeons

En outre, au titre de l'**objectif 4 « Assurer ou faciliter la migration de l'esturgeon (montaison et dévalaison) »**, les actions suivantes sont présentées :

- 4.1.1 Interdire toute nouvelle construction de barrière à la migration en s'appuyant sur la législation, les lois, les traités et les conventions existants
- 4.1.2 Mettre en place les conditions juridiques préalables à tout futur projet de construction en rivière, notamment l'inclusion d'un canal de déviation aux caractéristiques propices à la migration des poissons, avec un débit minimum permanent de 30 %
- 4.2.1 Identifier les barrières à la migration des esturgeons importantes
- 4.2.2 Donner la priorité à l'atténuation des barrières à la migration selon des critères tels que : les stocks existants, les anciens habitats, les anciens sites de fraie ou ceux existants, la longueur du cours d'eau, les habitats existants et le potentiel de recolonisation
- 4.2.3 Réaliser des études de faisabilité (comprenant un suivi et une modélisation hydrologiques et hydrodynamiques et un suivi des poissons (téléométrie, sonar DIDSON, etc.)) sur les moyens de faciliter les migrations de montaison et d'avalaison au niveau des barrières hautement prioritaires (sur la base des résultats du point 4.2.2)
- 4.2.4 Allouer des fonds aux études de faisabilité ainsi qu'aux mesures d'atténuation
- 4.2.6 Mettre en œuvre des solutions de passage fonctionnelles (démonstrées par les résultats des suivis)
- 4.2.7 Établir des lignes directrices pour le suivi, identifier les dispositifs appropriés et mettre en œuvre des programmes d'évaluation de l'efficacité des passes à poissons
- 4.4.2 Assurer le suivi de la répartition, des schémas de migration et du comportement des populations d'esturgeons sur un bassin versant en eaux marines et en eaux douces

Les connaissances acquises grâce au suivi des populations et des habitats peuvent avoir divers usages et constitueraient les meilleures connaissances disponibles permettant une prise de décisions fondée sur les données et la mise en œuvre d'une gestion fondée sur des données probantes.

Les données de suivi des habitats seront très utiles aux mesures visant à protéger et à améliorer les corridors écologiques, qu'il s'agisse de la prévention ou de l'atténuation des interventions néfastes, de la restauration active des habitats critiques de fraie, d'alimentation ou d'hivernage ou de la création d'une importante base d'informations pour les grands investissements, tels que la mise en œuvre de passes à poissons, considérée comme nécessaire et prioritaire.

Le suivi des habitats des esturgeons est essentiel pour comprendre les interactions dynamiques entre les populations d'esturgeons et leur environnement, et pour permettre le recensement des habitats clés potentiels en décrivant l'utilisation des habitats faite par les esturgeons et les impacts négatifs qui les touchent. Une compréhension globale de la fonctionnalité de ces types d'habitats est essentielle pour :

- Prendre des décisions éclairées en matière de planification et de mise en œuvre de mesures de protection des habitats ciblées.
- Comprendre les principaux éléments qui affectent la répartition des esturgeons, le succès de reproduction et la viabilité de la population.
- Évaluer les impacts des infrastructures existantes sur la qualité, la fonctionnalité et l'adéquation des habitats.
- Prévoir les effets des projets de développement d'infrastructures dans le cadre d'évaluations des incidences sur l'environnement, de processus généraux de préplanification ou de programmes pour la mise en œuvre de mesures d'atténuation appropriées.
- Décider des mesures de protection des habitats nécessaires, notamment la création de zones protégées spécifiques ou la limitation spatiale de certaines activités.
- Planifier et mettre en œuvre des mesures de restauration des habitats essentiels ou des corridors écologiques de migration quand ils ne sont pas fonctionnels.

Au final, le suivi des populations et des habitats est essentiel pour évaluer et confirmer le succès ou l'échec potentiel des mesures prises dans le cadre du PANEUAP.

Les lignes directrices correspondantes doivent orienter les institutions et autorités nationales compétentes sur les bonnes pratiques permettant de concevoir des programmes de suivi ou de décider des priorités en matière de financement. La description des méthodes et technologies, de leurs objectifs ainsi que de leurs avantages et inconvénients fournit des orientations et des conseils qui permettent aux professionnels de développer leurs propres solutions individuelles pour mettre en œuvre des approches méthodologiques ciblées, afin d'aborder des questions de recherche spécifiques et de combler les lacunes existantes en matière de connaissances.

Les chapitres techniques sont complétés par une compilation des principaux avantages et inconvénients, des ressources nécessaires, d'exemples pratiques provenant des sciences appliquées, ainsi que d'une synthèse des références essentielles sur le sujet concerné en vue de lectures et de recherches complémentaires.

2.2 Champ d'application

Les informations fournies dans ces lignes directrices se basent sur les similarités générales entre les espèces appartenant à la famille des esturgeons (*Acipenseridae*). Il existe cependant des variations entre les espèces et les bassins versants, qui expliquent l'existence de lacunes dans les connaissances concernant les conditions et les exigences des habitats. Des informations spécifiques sont fournies lorsque celles-ci sont disponibles, mais il est de la responsabilité de l'utilisateur du document d'effectuer ses propres recherches et d'adapter les informations selon ses besoins.

Le document se focalise clairement sur les habitats d'eau douce fluviaux des esturgeons pour deux raisons :

1. C'est en eau douce que se situent leurs sites de reproduction et de fraie, mais également les sites nécessaires au développement précoce des jeunes, qui jouent un rôle central dans la viabilité des populations. L'eau douce est donc nécessaire à la survie de tous les esturgeons.
2. Ainsi, une grande partie des informations et des documents de référence disponibles traitent de la phase d'eau douce du cycle de vie de l'esturgeon.

Il existe encore des lacunes importantes dans les connaissances qui doivent être comblées, notamment en ce qui concerne les critères d'habitat pour certaines espèces, certains bassins versants et certains stades de vie spécifiques.

En plus d'obtenir des informations supplémentaires sur le système en question, les principes de base des « quatre C » devraient être appliqués pour toutes les activités liées au suivi des habitats de l'esturgeon, au sein d'un système d'habitats et de populations interconnectés.

Ces principes sont les suivants :

- **Cohérence** : s'appuyer sur les connaissances et les résultats qui ont déjà été obtenus/validés.
- **Compatibilité** : œuvrer pour la normalisation et l'harmonisation des méthodes et technologies au sein des juridictions dirigeantes et entre elles.
- **Communication** : créer des réseaux au sein de la « communauté des habitats » et au-delà, partager votre propre expertise ainsi que vos expériences et données pour la cause commune.
- **Collaboration** : s'appuyer sur les ressources existantes et faire équipe avec d'autres acteurs et parties prenantes. La conservation de l'esturgeon, notamment le suivi de ses habitats, requiert l'implication de différents domaines de compétence, disciplines et juridictions dans une approche coordonnée.

2.3 Outils de support : cartographie et solutions fondées sur les données

Dans le cadre du suivi des habitats, il est recommandé d'utiliser des systèmes d'information géographique (SIG) associés à des solutions de stockage de base de données, tant pour la cartographie préliminaire des aires et portions pertinentes du système, fondée sur l'exploration des données et les études préliminaires, que pour l'enregistrement des résultats du contrôle et de la confirmation des habitats, et pour le suivi périodique.

Les SIG sont des outils puissants qui permettent de recueillir, de stocker, de traiter, d'analyser et de présenter diverses informations et données sur le suivi des habitats aquatiques. Ils intègrent différentes formes d'informations spatiales telles que les cartes, l'imagerie par satellite, la topographie et les données géoréférencées sur une plateforme numérique unique, et permettent la visualisation, l'analyse et l'interprétation des relations spatiales grâce à la superposition de ces données. Cela permet aux chercheurs d'obtenir des informations supplémentaires et de prendre des décisions éclairées en ce qui concerne l'utilisation des habitats, les aires de répartition et les efforts de conservation. Ces systèmes facilitent également une approche interdisciplinaire du suivi des habitats en intégrant des informations et des données en provenance de divers domaines tels que l'écologie, l'hydrologie, la géologie et l'étude de l'utilisation de la terre et de l'eau par l'homme (Gordon, 1994). Les avantages potentiels des SIG dans le cadre du suivi des habitats sont les suivants :

- **Informations en couches :** les SIG permettent de superposer plusieurs couches de données telles que les types d'habitats potentiels et réels, les résultats du suivi des populations, les lieux de capture historiques, la profondeur de l'eau, les types de substrats, la température, les routes migratoires et les barrières à la migration, et de les associer, par exemple, aux activités humaines. Cette disposition en couches optimise l'identification des zones d'habitat au sein du système, les menaces potentielles et les possibilités de conservation (une sélection des couches de base est présentée à l'adresse suivante : <https://www.copernicus.eu/fr/services>).
- **Analyse spatiale :** les SIG permettent d'effectuer des analyses spatiales poussées, telles qu'une modélisation de l'adéquation des habitats et des évaluations de la connectivité, et facilitent ainsi l'identification d'un éventail de types d'habitats et de couloirs de migration potentiels pour l'esturgeon.
- **Tendances temporelles :** en stockant des données actuelles mais également historiques, les SIG permettent de suivre l'évolution de la qualité des habitats et de leur nombre au fil du temps, et ainsi d'avoir un aperçu des possibilités en termes de dynamique à long terme des populations et d'évolution des habitats.
- **Visualisation des données :** les SIG génèrent des cartes, des graphiques et des tableaux faciles à comprendre, y compris pour les responsables politiques et les décideurs. Cela permet d'améliorer la communication et les

négociations entre les différentes parties prenantes, par exemple entre les décideurs et les professionnels de la conservation.

- **Collaboration** : les plateformes SIG facilitent la collaboration entre chercheurs, professionnels et responsables politiques en mettant à leur disposition un référentiel centralisé pour les données, qui garantit la cohérence et la transparence des prises de décisions.

Les **ressources nécessaires** comprennent du matériel informatique et des logiciels, tels que des ordinateurs capables d'exécuter un logiciel SIG (ArcGIS, QGIS, paquets en R ou en Python, par exemple), et des périphériques tels que des dispositifs GPS et des écrans à haute résolution. Les données spatiales saisies dans le SIG doivent être précises et actualisées, et des professionnels formés aux SIG doivent superviser et mettre en œuvre les opérations. Il est également nécessaire de disposer d'une capacité de stockage suffisante et de systèmes de sauvegarde permettant de gérer et de sécuriser une grande quantité de données sous la forme d'une base de données. Il est impératif que les solutions de cartographie et de base de données soient pleinement opérationnelles avant de commencer à générer les données de l'évaluation initiale et du suivi.

2.4 Travail et sécurité opérationnelle

Garantir la sécurité au travail au cours des études de terrain est essentiel au bien-être des chercheurs et au succès des activités de suivi. Lors de la réalisation d'études de terrain, les chercheurs évoluent dans des environnements potentiellement dangereux. Il est donc essentiel de donner la priorité à la sécurité en respectant les obligations légales et les réglementations, et de faire appel au sens commun, comme expliqué ci-dessous :

- Rester vigilant et ne pas tomber dans la complaisance, même après de longues périodes de travail sur le terrain s'étant bien passées.
- Créer et maintenir des environnements de travail sûrs pour tous les membres de l'équipe.
- Accepter d'être responsable de sa propre sécurité et de celle de ses collègues.
- Vérifier les prévisions météorologiques et les conditions de débit des cours d'eau avant toute sortie d'échantillonnage.
- Affecter au moins deux personnes à chaque équipe de suivi.
- Maintenir la communication avec la base ou avec les contacts d'urgence pendant toute la durée du travail sur le terrain.
- Équiper les membres de l'équipe avec du matériel nautique, des gilets de sauvetage, des vêtements de pluie et des vêtements de protection appropriés.
- Bien s'hydrater, se protéger contre le soleil et emporter une trousse de premiers secours.
- Maintenir une attention constante et une vigilance accrue pendant toutes les phases du travail de terrain.

Avant de démarrer le travail sur le terrain, s'assurer d'avoir obtenu toutes les autorisations nécessaires au suivi scientifique et de les avoir à portée de main. Le respect des règles prévues par la loi et des exigences en matière d'autorisations est essentiel pour mener des recherches dans les zones protégées ou impliquant des espèces menacées.

2.5 Bien-être et manipulation des animaux

Préserver le bien-être des esturgeons lors de leur manipulation et de la collecte de données est essentiel pour que le travail avec les animaux vivants soit fait correctement et de manière éthique. Merci de respecter les orientations suivantes :

- S'assurer d'avoir obtenu toutes les autorisations nécessaires permettant de travailler avec des esturgeons vivants.
- Privilégier une manipulation des esturgeons sûre et respectueuse afin de minimiser leur stress et les risques de blessures (exemple sur la figure 1).
- Appliquer les bonnes pratiques et respecter les normes les plus strictes lors de la manipulation et des soins aux esturgeons.
- Minimiser le temps de manipulation et l'impact sur les esturgeons à tous les stades des activités de recherche.
- Faire appel à des personnes expérimentées et définir à l'avance les rôles de chaque membre de l'équipe pour minimiser les risques lors de la manipulation.
- Utiliser des méthodes d'échantillonnage non invasives dans la mesure du possible, afin de réduire le niveau de stress des esturgeons.
- S'assurer que les chercheurs impliqués dans la manipulation des esturgeons sont correctement formés et compétents.
- Relâcher prudemment les esturgeons immédiatement après avoir recueilli les données, et s'assurer d'utiliser des pratiques douces pour la remise en liberté.
- Estimer les effets cumulés de la manipulation et minimiser le stress des poissons pendant la période de reproduction afin de préserver la durabilité des populations.

Pour plus d'informations sur le bien-être animal et la manipulation correcte des esturgeons vivants, voir « Gessner et al., 2024, lignes directrices techniques concernant les mesures de conservation *ex situ* de l'esturgeon ».

[image supprimée pour réduire la taille du fichier]

Figure 1 : Le marquage d'un grand esturgeon par électronarcose à l'aide d'une sonde directement dans la rivière afin de réduire son stress et de garantir une manipulation sûre (© Danube Delta National Institute for Research and Development, Roumanie).

3 Informations générales

3.1 Terminologie de l'habitat

D'une manière générale, « **l'habitat** » se réfère à toute zone qui possède les conditions et ressources favorisant son utilisation par un organisme donné dans une des phases de son cycle de vie (Maddock, 1999).

« **L'utilisation des habitats** » est la manière dont un individu ou une population utilise un type d'habitat particulier.

Les « **habitats** » ou « **types d'habitats** » sont des zones (un lieu donné à un moment donné) qui offrent certaines conditions et ressources, favorisant une utilisation spécifique de l'habitat au cours d'un stade de développement distinct de l'esturgeon, tels que **la fraie, l'éclosion, l'alimentation ou l'hivernage**. Les habitats peuvent appartenir à différentes échelles spatiales de l'habitat physique (macrohabitat et mésohabitat, par exemple) et couvrir de simples parcelles, des étendues, une berge unique ou des biefs entiers dans un cours d'eau ou un bassin versant (Muhar, 1996).

Les « **habitats potentiels** » sont des habitats identifiés comme possédant les caractéristiques de certains types d'habitats et/ou offrant les conditions et ressources qui leur permettraient éventuellement de favoriser certains types d'utilisation de l'habitat (sites de fraie potentiels, par exemple), mais dont l'utilisation n'a pas encore été vérifiée. Les « **habitats réels** » ou « **habitats actuels** » ont été **confirmés** par leur utilisation par les esturgeons.

Les « **critères de l'habitat** » sont des paramètres et éléments descriptifs qui servent à identifier les types d'habitats et à assurer le suivi de la fonctionnalité des habitats.

Les « **routes migratoires** » connectent différents types d'habitats aux niveaux physique et écologique, tout au long du cycle de vie de l'esturgeon. Le terme technique de « **système** », tel qu'il est utilisé dans le présent document, fait référence au fonctionnement des populations et des types d'habitats et à leurs interactions au sein d'un habitat global pris dans son ensemble. Il est synonyme de « **corridor écologique pour les poissons migrants** » (Haidvogel et al., 2021) et comprend les différents types d'habitats, l'utilisation naturelle des habitats, les populations de poissons « utilisatrices de l'habitat » ainsi que tous les processus et échanges tels que les informations (comportementales, génétiques, etc.) et les renouvellements (énergie, biomasse, charge de fond, etc.) nécessaires pour que le fonctionnement écologique du système puisse assurer la viabilité des populations de poissons indigènes et en particulier des espèces migratoires. D'un autre côté, la « **fragmentation** » induite par les barrières à la migration peut perturber la connectivité entre différents habitats et ainsi affecter les populations en entravant leur capacité à migrer, à accéder aux habitats ou à trouver des ressources adaptées.

Les principaux composants du corridor écologique et leurs connexions écologiques permettent également de faire la distinction entre le **suivi des habitats et celui des populations** (figure 2).

Le suivi des habitats (à gauche) décrit l'état d'un habitat et la connectivité physique à l'intérieur de celui-ci, tandis que le suivi des populations (à droite) observe l'état et la viabilité de la population correspondante. Les deux types de suivi s'intéressent aux mouvements, à l'utilisation des habitats et à ses conséquences et donc, dans une certaine mesure, à la connectivité écologique. Pour accéder à des lignes directrices complètes sur le suivi des populations, voir les Lignes directrices techniques pour le suivi des populations d'esturgeons (Neuburg, et al. 2024).

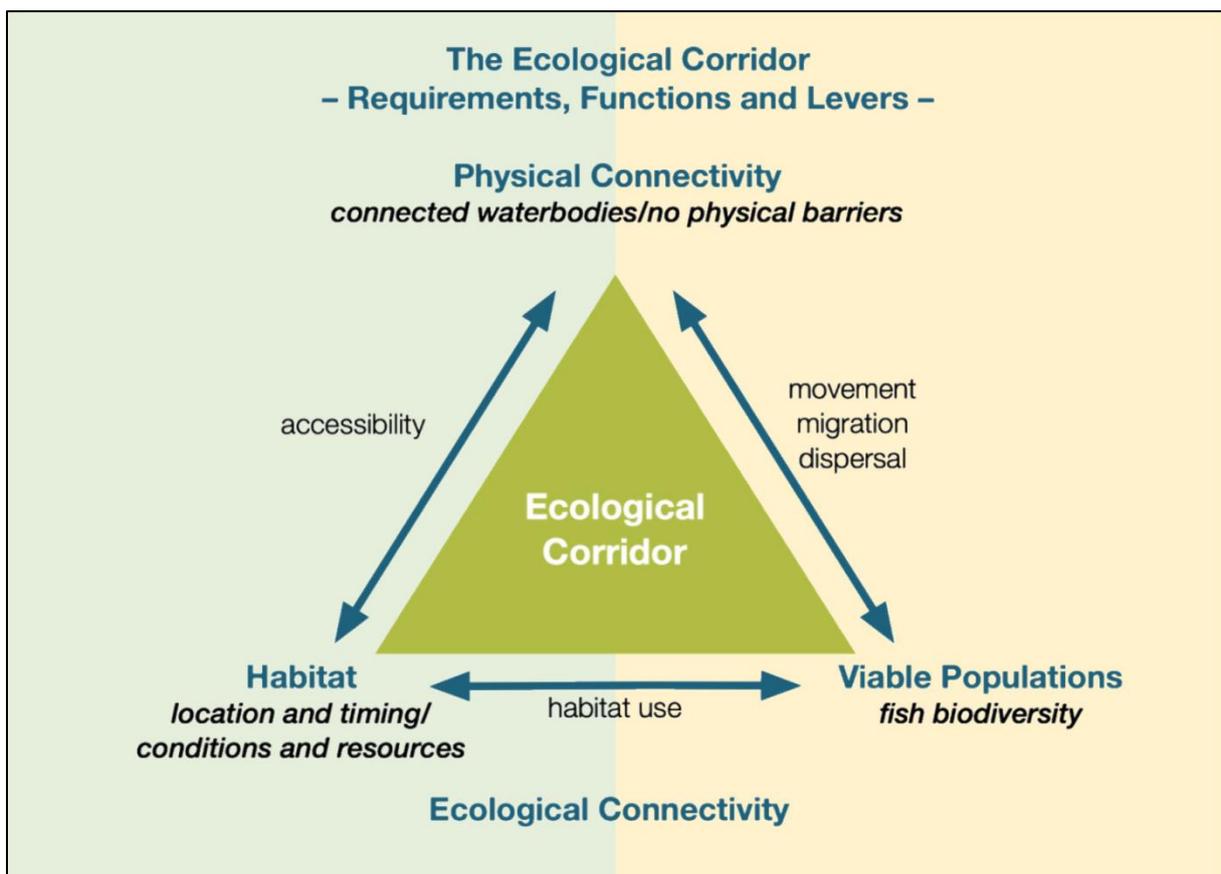


Figure 2 : Le Corridor écologique pour les poissons migrateurs (d'après Haidvogel et al., 2021, modifié). Le côté gauche est l'élément central du suivi des habitats, le côté droit celui du suivi des populations.

Traduction des termes de la figure 2 :

The Ecological Corridor – Requirements, Functions and Levers = Le corridor écologique – Besoins, fonctions et leviers ; *Physical Connectivity* = Connectivité physique ; *connected waterbodies/no physical barriers* = masses d'eau connectées / pas de barrières physiques ; *accessibility* = accessibilité ; *Ecological Corridor* = Corridor écologique ; *movement migration dispersal* = mouvement, migration, dispersion ; *Habitat* = Habitat ; *location and timing/ conditions and resources* = localisation et période / conditions et ressources ; *habitat use* = utilisation de l'habitat ; *Viable Populations* = Populations

viables ; *fish biodiversity* = biodiversité des poissons ; *Ecological Connectivity* = Connectivité écologique

3.2 Caractéristiques, exigences en matière d'habitats et cycle de vie de l'esturgeon

Les traits distinctifs et les exigences en matière d'habitats varient selon les espèces, mais aussi selon les bassins versants, en raison des conditions spécifiques des habitats dans les différentes masses d'eau. Cependant, les espèces européennes d'esturgeons partagent certains traits écologiques et liés à l'habitat, qui sont résumés dans le tableau 1. Pour plus d'informations sur les caractéristiques des habitats des esturgeons européens et sur les habitats dans les cours d'eau européens, se référer au document « Characteristics and locations of Sturgeon Habitat in European Rivers », Popp, S., 2024.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des esturgeons européens liées à l'habitat (d'après Jungwirth et al., 2003, modifié).

Nom scientifique	Dénomination commune	Préférence de température	Habitat	Type migratoire	Guilde écologique	Guilde de reproduction	Choix du site de fraie
<i>Acipenser gueldenstaedtii</i> (complexe)	Esturgeon russe	mésio-eurytherme	eau douce - marin	anadrome	rhéophile de type A	lithophile	rhéopare
<i>Acipenser naccarii</i>	Esturgeon de l'Adriatique		eau douce - marin	anadrome/potamodrome			
<i>Acipenser nudiventris</i>	esturgeon à barbillons frangés		eau douce - marin / eau douce	anadrome/potamodrome			
<i>Acipenser oxyrinchus</i>	esturgeon de l'Atlantique		eau douce - marin	anadrome			
<i>Acipenser ruthenus</i>	sterlet		eau douce	potamodrome			
<i>Acipenser stellatus</i> *	esturgeon étoilé		eau douce - marin	anadrome			
<i>Acipenser sturio</i>	esturgeon européen		eau douce - marin	anadrome			
<i>Huso huso</i>	esturgeon béluga		eau douce - marin	anadrome			

**Acipenser stellatus* est adapté à des températures plus élevées que *A. gueldenstaedtii* ou *Huso huso*, en particulier durant les premières phases de son développement (Dettlaff et al., 1993, Igumnova, 1985).

Notes explicatives sur le tableau 1

mésio-eurytherme	les exigences de température varient selon le stade de vie et l'environnement correspondant / les températures minimales requises pour la reproduction au printemps et en été ; des températures plus élevées sont tolérées pendant l'été
rhéophile de type A	adapté au courant et présent exclusivement dans les cours d'eau (pas dans les eaux stagnantes des zones inondables)
lithophile	fraie sur des substrats grossiers
rhéopare	fraie dans le courant
anadrome	migre de l'eau salée vers l'eau douce pour frayer
potamodrome	migre uniquement en eau douce

Le tableau 1 présente les nombreux traits similaires entre différentes espèces d'esturgeons. Tous les esturgeons se reproduisent en eau douce dans des conditions lotiques où peuvent se produire des crues avant la reproduction (McAdam et al., 2018). Les esturgeons sont des reproducteurs en eau libre, qui ont besoin de vitesses de courant suffisamment élevées pour permettre la diffusion des œufs fécondés/embryons sur le site de reproduction (tableau 2 ; Bruch & Binkowski, 2002).

Toutes les espèces d'esturgeons sont capables de migrer sur de longues distances (Auer, 1996) et des schémas de migration potamodromes, anadromes et amphidromes ont été décrits (Bemis & Kynard 1997). Chez les espèces anadromes, au moins quatre formes présentant des périodes et des distances de migration différentes étaient connues chez les esturgeons de la région Ponto-Caspienne (Berg, 1934). Une forme vernale précoce et une forme vernale tardive qui migrent et fraient au printemps, une forme estivale ou hivernale précoce qui fraie dans le cours inférieur des rivières à la fin de l'été ou à l'automne, et une forme hivernale tardive qui migre à l'automne, hiverne dans la rivière et termine sa montaison pour frayer au printemps suivant. De plus petits groupes de poissons en migration remontent la rivière toute l'année (Khodorevskaya et al., 2009).

Les œufs fécondés/embryons ont besoin de substrats grossiers propres avec peu ou pas de périphyton (Manny & Kennedy, 2002) et de niveaux de sédimentation fine peu élevés pour pouvoir se développer. En outre, la sédimentation risque d'asphyxier les embryons et les larves vésiculées (Du et al., 2011, McAdam et al., 2005). Ces substrats grossiers peuvent être composés de galets (taille minimale d'un diamètre \varnothing de 25 – 30 mm), de cailloux, de pierres, de rochers, de rochemère (*A. oxyrinchus*) ou même de barres argileuses dures (*A. stellatus*) (Gessner & Schütz, 2011; Kynard et al., 2013; McAdam et al., 2018; Hont et al., 2022, NOAA). Les espaces interstitiels utilisés par les œufs/embryons et les larves vésiculées évitent le déplacement des œufs et les protègent des prédateurs, mais leur utilisation exige des échanges d'eau suffisants à travers le lit de gravier pour

apporter une oxygénation adéquate (Gessner & Schütz, 2011; Du et al., 2011; McAdam, 2011), car les esturgeons sont particulièrement sensibles à une faible concentration en oxygène dans le milieu, correspondant à l'hypoxie (Secor & Niklitschek, 2002; HELCOM, 2019; Delage et al., 2020).

Après la résorption du sac vitellin, les larves se tournent vers une alimentation exogène et ont besoin de « zones de productivité » riches en organismes nourriciers étroitement liés au cours d'eau principal (Gessner & Schütz, 2011). À ce stade, connaître les préférences des espèces en matière d'alimentation aide à localiser des sites d'alimentation adéquats (Margaritova et al., 2021).

Les juvéniles d'esturgeons se nourrissent en eau douce et restent en amont du front salé puisque leur tolérance à la salinité dépend des espèces et se développe au fil du temps chez les espèces anadromes, tandis que les espèces potamodromes ne tolèrent pas la salinité. Certaines espèces pénètrent immédiatement dans les eaux saumâtres, comme c'est le cas chez *A. stellatus* dans le nord de la mer Caspienne (Khorodevskaya et al., 2009), ou à l'issue de leur première année comme chez *A. oxyrinchus* (Allen et al., 2014; Niklitschek & Secor, 2009 a and b). Les taux de consommation d'oxygène suggèrent que l'augmentation de la régulation ionique et osmotique influe sur le métabolisme des jeunes poissons (Allen et al., 2014).

Le tableau ci-dessous donne des exemples des conditions de fraie des espèces eurasiennes d'esturgeons.

Tableau 2 : Exemples de conditions de fraie observées chez les espèces européennes d'esturgeons (d'après Billard & Lecointre, 2000, modifié, données tirées principalement de Holcik, 1989; Rochard et al., 1991; Chapman et al., 1996; Birstein et al., 1997; Hont et al., 2022).

Espèces	Période de fraie	Température [°C]	Localisation des frayères	Substrat de fraie	Profondeur [m]	Vitesse du courant [m/s]
<i>Acipenser gueldenstaedtii</i>	mai – juin	8 – 15	bras principal	gravier	4 – 25	1 – 1,5
<i>A. naccarii</i>	février - mars	12 – 15	cours moyen et inférieur du Pô et de ses affluents	le long des berges	n.a.	courant faible
<i>A. nudiventris</i>	avril – juin	15 – 25	cours moyen	graviers, galets	4 – 15	1 – 2
<i>A. oxyrinchus</i>	mai – juin juin – août septembre	13 – 24	cours inférieur	fond grossier, rochers	11 – 13	0,5 – 0,8

<i>A. ruthenus</i>	avril – juin	12 – 17	lit de la rivière et zones inondées au printemps	graviers, galets	2 – 15	1,5
<i>A. stellatus</i>	mai – septembre	12 – 24 (Volga) 15,0 – 29 (Koura)	cours inférieur, le long des berges	graviers / barres argileuses	2 – 14	0,7 – 1,8 fond 1,1 – 1,9 surface
<i>A. sturio</i>	mars – août	7,7 – 22	cours moyen	graviers, cailloux	> 5	1,5 – 2
<i>Huso huso</i>	mars – avril	6 – 21 optimale 9 – 14	cours supérieur / niveau d'eau plus haut	cailloux, galets, graviers	4 – 15	1,5 – 2

Toutes les espèces disposent d'un laps de temps limité pendant lequel la température est optimale pour le bon développement des premiers stades de vie. Des températures supérieures à cette plage thermique causent une augmentation des déformations et de la mortalité, tandis que des températures inférieures prolongent le temps de développement et augmentent les risques de mortalité par infection fongique ou prédation (tableau 3).

Tableau 3 : Plages des températures optimales selon l'espèce au cours de l'embryogenèse (d'après Chebanov & Galich, 2013, Dean, 1895, Delage et al., 2020, Gessner & Schütz, 2011, Jatteau, 1998, Mohler, 2004, fishbase.org).

Espèces	Plage de température optimale au cours de l'embryogenèse [° C]
<i>Acipenser gueldenstaedtii</i>	16 – 20
<i>A. nudiventris</i>	14 – 18
<i>A. oxyrinchus</i>	18 – 20
<i>A. naccarii</i>	14 – 18
<i>A. ruthenus</i>	13 – 16
<i>A. stellatus</i>	17 – 24
<i>A. sturio</i>	17 – 20
<i>Huso huso</i>	9 – 14

Les larves vésiculées éclosent au bout de quelques jours (en fonction de la température) et vont se dissimuler jusqu'à la résorption du sac vitellin (tableau 4).

Tableau 4 : Durée (h) de l'incubation jusqu'à l'éclosion à différentes températures (d'après Chebanov & Galich 2013, modifié; HELCOM 2019).

Température [° C]	Durée d'incubation des œufs [h]				
	<i>Huso huso</i>	<i>A. nudiventris</i>	<i>A. gueldenstaedtii</i>	<i>A. stellatus</i>	<i>A. oxyrinchus</i>
10 - 11	240 - 235				
11 - 12	230 - 220	190 - 180			
12 - 13	210 - 200	170 - 168			
13 - 14	190 - 180	155 - 145			
14 - 15	170 - 160	135 - 125			
15 - 16		115 - 105			
16 - 17		105 - 100			
17 - 18		95 - 90	150 - 145		
18 - 19			140 - 130		
19 - 20			120 - 115		105 - 95
20 - 21			110 - 95	100 - 90	95 - 85
21 - 22			90 - 85	80 - 70	
22 - 23			80 - 75	70 - 60	85 - 75
23 - 24				60 - 50	

Les larves émergent de leurs cachettes juste avant la résorption du sac vitellin, se dispersent dans les zones d'alimentation et commencent à se nourrir (aliments planctoniques : rotifères, daphnies, etc. / aliments benthiques : chironomidés, tubificidés, etc. (Chiasson et al., 1997; Jatteau 1998; Muir et al., 2000; Gessner et al., 2007; Zarri & Palkovacs 2019; Holley et al., 2022) (tableau 5).

Tableau 5 : Durée du développement prélarvaire de l'esturgeon dans les jours qui précèdent sa transition vers une nourriture exogène, en fonction de la température de l'eau (d'après Chebanov & Galich 2013, modifié; HELCOM 2019).

	Durée, d
--	----------

Température de l'eau [° C]	<i>A. gueldenstaedtii</i>	<i>A. stellatus</i>	<i>A. oxyrinchus</i>	<i>Huso huso</i>
12	20	-		18
13	18	-		16
15	12	-		12
17	9,5	12		10
19 (20)	8	9	11	8
21	7,5	8		7
23	-	6,5	8	-

3.3 Stades de vie et types d'habitats de l'esturgeon

Une généralisation du cycle de vie (anadrome) de l'esturgeon, de ses principaux stades de vie et des menaces qui pèsent sur lui est présentée dans le schéma ci-dessous.

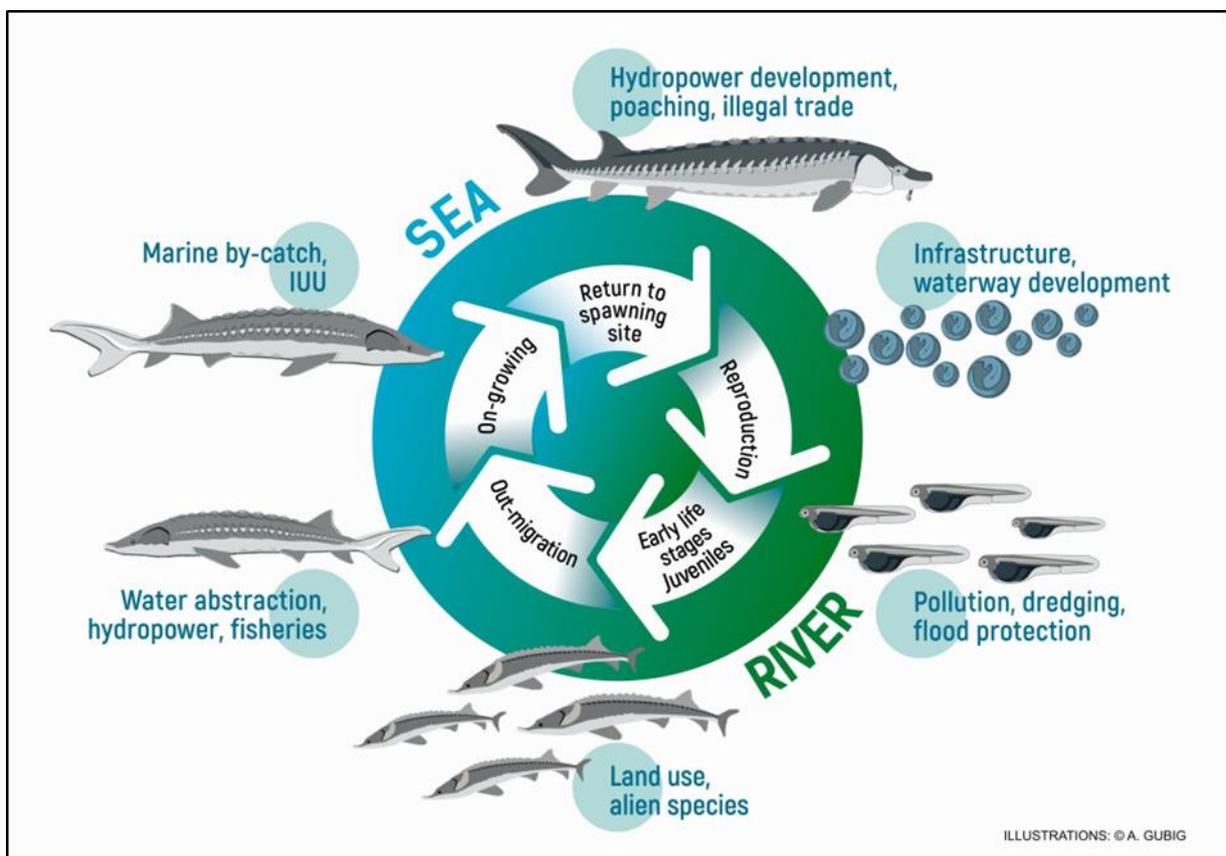


Figure 3 : Le cycle de vie de l'esturgeon et ses principales menaces.

Traduction des termes de la figure 3 :

SEA = MER ; *Hydropower development, poaching, illegal trade* = Développement de l'hydroélectricité, braconnage, commerce illégal ; *Infrastructure, waterway development* = Infrastructures, développement de voies navigables ; *Pollution, dredging, flood protection* = Pollution, dragage, protection contre les inondations ; *RIVER* = COURS D'EAU ; *Land use, alien species* = Occupation des sols, espèces exotiques ; *Water abstraction, hydropower, fisheries* = Captage d'eau, hydroélectricité, pêche ; *Marine by-catch, IUU* = Prises accidentelles en mer, pêche INN ; *On-growing* = Croissance ; *Return to spawning site* = Retour vers le site de fraie ; *Reproduction* = Reproduction ; *Early life stages & juveniles* = Premières phases du cycle de vie et juvéniles ; *Out-migration* = Migration vers l'aval

Des lacunes dans les connaissances subsistent en ce qui concerne les stades de vie spécifiques et les besoins de la plupart des espèces ainsi que les bassins versants, et il n'existe aucune norme officielle permettant leur classification parmi toutes les espèces d'esturgeons et les types d'habitats qui leur sont associés. Différents termes et formulations sont utilisés dans la littérature scientifique.

Le tableau 6 montre un exemple du cycle de vie de l'esturgeon et des conditions de l'habitat correspondantes, en prenant comme référence l'esturgeon de l'Atlantique (*A. oxyrinchus*). Une classification courante pour décrire les stades de vie s'applique également à d'autres espèces d'esturgeons.

Tableau 6 : Stades de vie de l'esturgeon de l'Atlantique (*A. oxyrinchus*) dans la Grande région de l'Atlantique (NOAA, modifié).

Phase	Taille (mm)	Durée	Description	Utilisation de l'habitat
Œufs	-2 - 3 mm	L'éclosion a lieu 4 à 6 jours après le dépôt des œufs et la fécondation.	Fécondé ou non fécondé	Les œufs sont déposés en eau douce (0,0 - 0,5 ppt) sur un substrat de fond grossier (galet, par ex.) et vont devenir adhésifs peu après la fécondation.
Embryons libres (larve vésiculée)	-6 - 14 mm	8 - 12 jours post-éclosion	Comportement thigmotactique (Gessner et al. 2009, Bates et al., 2014), nourris via le sac vitellin.	La phase larvaire dure environ 8 à 12 jours, pendant lesquels les larves absorbent le sac vitellin et terminent leur développement embryonnaire. Au moment de l'éclosion, les embryons libres émergent du gravier (ils vont par exemple nager vers la surface puis se laisser dériver vers le fond) puis se réfugient dans les espaces interstitiels du substrat de fond grossier (rochers, pierres, graviers, roches calcaires, cailloux, etc.).
Larves capables de se nourrir (sorties du sac vitellin)	-14 - 37 mm	12 - 40 jours après éclosion	Nagent librement ; se nourrissent ; fond limoneux/sableux, chenal profond ; eau douce	Entre le 13 ^e et le 40 ^e jour post-éclosion, les larves se dispersent en aval du site de fraie / de croissance. Les larves d'esturgeon ne tolèrent pas l'eau salée ; leur habitat doit donc être situé en amont du front salé, dans des eaux dont la salinité est comprise entre 0,0 et 0,5 ppt. Les larves capables de se nourrir sont présentes dans la colonne d'eau mais se nourrissent au fond en se déplaçant vers l'aval à la recherche d'insectes aquatiques, de larves d'insectes et d'autres invertébrés.
Juvéniles de l'année	0,3 grammes ; longueur totale < 410 mm	De 40 jours à 1 an	Poissons dont l'âge est > 3 mois et < 1 an ; capables de capturer et de consommer de la nourriture vivante	On appelle juvéniles de l'année les poissons depuis leur naissance jusqu'à l'été de l'année suivante. Les proies peuvent inclure des insectes aquatiques, des larves d'insectes et d'autres invertébrés.
Juvéniles	Longueur totale > 410 mm et < 760 mm	De 1 an jusqu'au moment de la première migration vers la côte	Poissons d'au moins 1 an, qui n'ont pas atteint la maturité sexuelle et n'effectuent	À l'issue de leur première année (juvéniles de l'année), les esturgeons de l'Atlantique juvéniles sont de plus en plus tolérants à l'eau salée et peuvent utiliser toute l'étendue du cours d'eau pour se nourrir de manière

	Longueur totale > 760 mm et < 1 500 mm	De la première migration vers la côte jusqu'à la maturité sexuelle	pas de migrations vers la côte Poissons qui n'ont pas atteint la maturité sexuelle mais effectuent des migrations vers la côte	opportuniste, en particulier dans les zones de substrat fin (sable, vase, etc.). Les esturgeons de l'Atlantique juvéniles tardifs en migration et en quête de nourriture peuvent pénétrer dans l'estuaire maritime dès la mi-mars et y rester jusqu'à mi-novembre. Les esturgeons de l'Atlantique juvéniles proches de la maturité sexuelle et les adultes effectuent des mouvements saisonniers le long des côtes au printemps et à l'automne. Ils restent généralement dans les zones proches de 50 m de profondeur mais n'y sont pas limités. Leurs proies peuvent comprendre des espèces benthiques telles que les mollusques, les gastéropodes, les amphipodes, les annélides, les décapodes, les isopodes et les poissons tels que les lançons.
Adultes - périodes de migration et d'alimentation	Longueur totale > 1 500 mm	Post maturité sexuelle	Poissons ayant atteint la maturité sexuelle	Les esturgeons de l'Atlantique juvéniles proches de la maturité sexuelle et les adultes peuvent se rassembler dans les zones estuariennes (au large de l'embouchure du cours d'eau), les baies, les bras de mer et les océans pendant l'hiver. Ils restent généralement dans les zones proches de 50 m de profondeur mais n'y sont pas limités. Leurs proies peuvent comprendre des mollusques, des gastéropodes, des amphipodes, des annélides, des décapodes, des isopodes et des poissons tels que les lançons.
Adultes - périodes de fraie	Longueur totale > 1 500 ♂ - 1 800 ♀ mm		Poissons aux gonades entièrement développées qui pénètrent dans les cours d'eau pour se reproduire	Les esturgeons de l'Atlantique adultes migrent vers les cours d'eau au printemps, au début de l'été ou au début de l'automne pour frayer et retournent dans les eaux côtières après s'être reproduits. Pour frayer, les adultes utilisent des habitats d'eau douce avec un substrat de fond grossier (rochers, pierres, graviers, roches calcaires, roches-mères, etc.) et des températures de l'eau comprises entre 13 et 26° C. Les esturgeons ont

				<p>besoin d'une eau courante et bien oxygénée, et de l'absence de barrières physiques bloquant leur passage (écluses, barrages, réservoirs, matériel de pêche, panaches thermiques, turbidité, bruit, etc.) entre l'embouchure du cours d'eau et les sites de fraie.</p> <p>Autour de la période de fraie, les adultes peuvent se rassembler en aval du site de fraie.</p>
--	--	--	--	--

Il est important de noter que toutes les conditions observées sur les sites de présence de l'esturgeon ne sont pas nécessairement inhérentes à l'habitat ; il est donc essentiel de réfléchir de manière approfondie lors du choix des critères d'identification de l'habitat à des fins de suivi.

En guise d'exemple, les critères d'adéquation des habitats pour l'esturgeon européen (*A. sturio*) sont détaillés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Les critères d'adéquation des habitats de l'esturgeon, en prenant comme référence *A. sturio* (d'après Gessner & Schütz 2011, modifié et traduit).

Stade de vie / Critères	Œufs fécondés/embryons	Larves vésiculées	Larves capables de se nourrir	Juveniles de l'année	Juveniles > 30 cm	Adultes (périodes de fraie)
Vitesse du courant (min, max, variabilité spatiale)	0,6 - 2,2 m/s, les échanges d'eau dans les espaces interstitiels conservent une saturation en O ₂ > 70 %	0,6 - 2,2 m/s, les échanges d'eau dans les espaces interstitiels conservent une saturation en O ₂ > 70 %	zones à faible débit et à forte productivité	zones à faible débit 0 - 0,8 m/s	zones à faible débit 0 - 1,4 m/s	Grande variabilité de vitesse du courant avec des zones de repos (structures sinueuses, bassins) ; périodes de fraie : voir œufs fécondés
Substrat de fond (taille des particules, qualité, extension)	galets/graviers > 25 mm, propre, croissance du périphyton faible sous-optimal : galets de 3 - 30 cm	galets/graviers > 25 mm, propre, croissance du périphyton faible	du sable au gravier	sable et substrats fins (limon, argile) avec une forte abondance d'organismes alimentaires benthiques (tubificidés, chironomidés)	Sable et substrats fins (limon, argile, structures de berges) avec une forte abondance d'organismes alimentaires benthiques (tubificidés, chironomidés)	galets/graviers > 25 mm, propre, faible encrassement biologique, pas de sédimentation
Navigation	pas en amont des sites de fraie	pas en amont des sites de fraie	succion et action des vagues modérées	distance suffisante entre la coque des navires et le lit du cours d'eau, succion modérée (< V crit.) et action des vagues modérée	distance suffisante entre la coque des navires et le lit du cours d'eau	pas en amont des sites de fraie, distance suffisante entre la coque des navires et le lit du cours d'eau
Température de l'eau (min, max)	17 - 20 °C	15 - 22 °C	15 - 22 °C	1 - 26 °C	1 - 26 °C	17 - 22 °C (juin - juillet)
Particules suspendues	faibles	faibles	jusqu'à 10 g/l	jusqu'à 10 g/l	jusqu'à 10 g/l	faibles (fraie)
Oxygène	> 6 ppm dans le lit de gravier	> 6 ppm dans le lit de gravier	> 6 ppm	> 5,5 ppm	> 5,5 ppm	> 6 ppm dans le lit de gravier
pH	6,5 - 8	6,5 - 8	6,5 - 8	6,5 - 8	6,5 - 8	6,5 - 8
Conductivité (salinité, ions)	< 800 µS/cm	< 800 µS/cm	< 1000 µS/cm	< 1200 µS/cm		< 800 µS/cm (fraie)

Charge organique (DBO)	faible	moyenne	élevée	élevée	élevée	faible (fraie)
-------------------------------	--------	---------	--------	--------	--------	----------------

3.4 Menaces liées à l'habitat

La combinaison des menaces pesant sur les habitats de l'esturgeon peut être spécifique à un système fluvial donné. Pourtant, il existe des menaces communes qui nuisent aux différents habitats de l'esturgeon (tableau 8).

Tableau 8 : Menaces communes pesant sur les habitats de l'esturgeon, les types d'habitats et les esturgeons dans leur habitat (d'après Friedrich et al., 2019, modifié et adapté).

Impacts/menaces	Conséquences physiques	Conséquences écologiques
Barrages	Barrières à la migration	Barrière à la migration de montaison pour la fraie
		Barrière à la migration d'avalaison pour les adultes ayant frayé
		Barrière à la migration d'avalaison pour les juvéniles
	Altération de l'habitat en aval (affouillement, érosion, transport des sédiments insuffisant, modification de la dynamique du débit, modification des températures due à la libération d'eaux profondes ou à l'augmentation de l'irradiation)	Perte de sites de fraie à proximité des barrages, altération de la disponibilité du substrat, changements dans l'hydrologie et modification du régime de température, tous ces éléments engendrent une réduction de l'efficacité de la reproduction, des changements dans l'âge auquel les poissons atteignent la maturité sexuelle et une réduction de la productivité
Modification de l'habitat en amont - retenue d'eau	Perte d'orientation, interruption de la migration de montaison des adultes	

		Migration d'avalaison des juvéniles retardée, risque accru de prédation et risque de suffocation (déficit en O ₂ dans un réservoir stratifié)
		Perte de sites de fraie et d'habitats de nourricerie
		changements dans la dynamique fluviale
		sédimentation
		modification du régime thermique et risque de stratification
		réduction de la productivité du cours d'eau
Exploitation des centrales hydroélectriques	Barrières à la migration et changements d'habitat	Voir « barrages » ci-dessus
	Curage des sédiments	Perte de sites de fraie et d'habitats de nourricerie
		Augmentation de la mortalité des juvéniles
		Réduction de la productivité
	Régime en éclusées	Perte d'habitats de nourricerie
		Augmentation de la mortalité des juvéniles
		Réduction de la productivité
		Drainage des sites de fraie
		Débits réduits pendant les heures hors-éclusée, ce qui affecte les processus d'oxygénation des embryons et des larves en développement dans les espaces interstitiels
	Passage des turbines	Augmentation de la mortalité des adultes ayant frayé et des juvéniles en migration d'avalaison

Modifications de l'hydromorphologie	Redressement des cours d'eau, perte des bras latéraux et des zones d'eaux dormantes	Perte d'hétérogénéité des habitats
		Augmentation du flux dans le chenal principal, augmentation du transport des sédiments, perte d'habitats
		Réduction de la productivité
	Approfondissement du lit du cours d'eau	Perte d'habitats, modification de la composition des sédiments, augmentation du débit
Navigation	Trafic maritime	Collisions avec des embarcations, déplacement sous l'action des vagues
	Approfondissement du lit du cours d'eau	Voir « Modifications de l'hydromorphologie » ci-dessus Mortalités directes causées par les interactions entre les poissons et les dragues
	Barrières à la migration	Voir « barrages » ci-dessus
Pollution	Métaux lourds et hydrocarbures	L'exposition est une cause directe de mortalité
		L'accumulation entraîne une baisse de la fertilité
	Augmentation des nutriments et de la DBO	Mortalité accrue des œufs et des larves en raison d'une pression bactérienne et fongique accrue Diminution du succès reproductif en raison de l'appauvrissement en oxygène
Extraction du gravier	Autres impacts physico-chimiques négatifs	Perte de sites de fraie et d'habitats de nourricerie
		Risque d'augmentation de la sédimentation fine

4 Programme de suivi des habitats

4.1 Définition, conseils et raison d'être

Gruijter et al., (2006) définissent le **suivi** comme la « collecte d'informations sur un objet par l'observation répétée et continue afin d'identifier les changements possibles de l'objet ». Schmidt & Van der Sluis (2021) fournissent un aperçu complet du suivi des espèces et des habitats.

Dans le cadre du présent document, le **suivi des habitats** désigne l'évaluation régulière de la fonctionnalité des habitats de l'esturgeon. Cependant, les conditions préalables de base nécessaires pour effectuer un suivi comprennent également une évaluation des informations, des données, des conditions, des périodes et de l'utilisation des habitats dans le but de recenser, de contrôler et de confirmer les habitats au sein d'un système donné. Il est ainsi fortement recommandé d'aborder le suivi sous la forme d'un programme coordonné et synchronisé en interne comme en externe (avec les autres domaines de la conservation et de la restauration des esturgeons), y compris pour toutes les évaluations et activités récurrentes nécessaires.

Une telle approche comprend des étapes de **recensement** et de **contrôle** des habitats adaptés aux différents stades de vie de l'esturgeon, la **confirmation** de ces évaluations grâce à la description de l'utilisation des habitats, tandis que des mesures de **suivi récurrentes et en temps réel** sont menées afin de documenter la fonctionnalité de ces habitats au fil du temps.

Cette approche en quatre étapes de l'évaluation et du suivi des habitats comprend :

1. L'identification de zones de pertinence globale grâce à la recherche de données et d'informations

- Recueillir des informations et des données pertinentes passées et présentes sur la présence des espèces, les populations, les habitats, les activités anthropiques et leurs interactions.
- Identifier les cours d'eau et les zones de pertinence globale et réaliser une cartographie préliminaire grâce au recensement des bassins versants et des cours d'eau utilisés par les esturgeons, ainsi que les sections et les biefs susceptibles de constituer un habitat pour l'esturgeon en s'appuyant par exemple sur des documents historiques, la littérature scientifique, les zones de présence attestée et les données de capture.
- Répertorier les zones et les biefs susceptibles de présenter les caractéristiques physico-chimiques et hydromorphologiques des

habitats de l'esturgeon en s'appuyant par exemple sur le suivi de la qualité de l'eau basé sur les données, la télédétection, l'analyse de photos aériennes, les cartes et les relevés dans les cours d'eau.

- Inclure les données et les informations provenant des SIG et des bases de données afin de créer des cartes en couches permettant d'effectuer des analyses complémentaires.

2. Le contrôle des habitats identifiés

- Vérifier les travaux de cartographie antérieurs par la mesure et la documentation sur le terrain des principaux critères d'habitat tels que la température, la profondeur de l'eau, la vitesse d'écoulement, la quantité d'oxygène dissous et la composition des substrats **dans les conditions réelles d'utilisation de l'habitat** (saison, hydrologie, exploitation des centrales hydroélectriques, etc.), ainsi que par la modélisation statistique afin d'étayer les résultats obtenus sur le terrain.
- Importer les résultats des évaluations sur le terrain dans des bases de données, par exemple en tant que couche distincte dans les SIG, afin de visualiser le résultat de l'évaluation des habitats.
- Développer, contrôler et adapter des protocoles de travail spécifiques afin d'évaluer la fonctionnalité des habitats correspondants au fil du temps.

3. La confirmation de l'utilisation des habitats par l'esturgeon

- Documenter en premier lieu l'utilisation réelle de l'habitat selon la présence de l'espèce en utilisant les méthodes de télémétrie et de suivi des individus, des groupes et de la génétique (ADN environnemental) des esturgeons.
- Documenter ensuite les résultats réels de l'utilisation de l'habitat en les combinant avec l'évaluation de la fonctionnalité des habitats par le suivi des populations.
- Inclure les données sur l'utilisation réelle de l'habitat dans les bases de données et les SIG.

4. Des mesures de suivi récurrentes et en temps réel

- Suivre la fonctionnalité des habitats de l'esturgeon au fil du temps.
- Évaluer les impacts et menaces qui pèsent sur les habitats de l'esturgeon.
- Les mesures sont établies dans le cadre d'un **programme** spécifique à moyen et à long terme.

Il est important de noter que l'attribution ultérieure des méthodes à utiliser pour la réalisation des étapes décrites ci-dessus n'est qu'une recommandation, puisque certaines méthodes peuvent remplir différentes fonctions / être utiles à plusieurs étapes, et que leur ordre d'application dépend de la disponibilité spécifique des

données, des objectifs et conditions respectifs du programme de suivi et des caractéristiques de l'habitat surveillé.

4.2 Identification de zones de pertinence globale

Afin d'identifier les habitats de l'esturgeon dans les bassins versants anciennement ou actuellement utilisés par celui-ci, il est essentiel de connaître l'étendue de l'aire de répartition de l'esturgeon au sein de ces bassins (Kinzelbach 1994) et la connectivité des habitats. L'identification d'aires et de portions susceptibles de contenir des habitats du cycle de vie de l'esturgeon est également une condition préalable à leur contrôle (Limnoplan 2017). Il est nécessaire d'évaluer la localisation, le moment et la fréquence d'occurrence des habitats potentiels ainsi que leur étendue spatiale, et de leur appliquer les critères fournis. La documentation et la cartographie préliminaire des résultats est effectuée à l'aide d'un SIG.

4.2.1 Critères d'habitat pour l'identification de cours d'eau et de tronçons pertinents

- Présence historique d'esturgeons indigènes (validée par les captures anecdotiques, les observations enregistrées dans d'anciens documents, les revues de pêche, les photos, etc.).
- Présence actuelle d'esturgeons indigènes (validée par les captures, les observations et le recensement/suivi d'individus, de groupes ou de regroupements d'individus à un stade de vie distinct, l'obtention d'ADN environnemental, par exemple grâce au suivi des populations, voir aussi « Confirmation de l'utilisation des habitats par l'esturgeon »).
- Qualité de l'eau répondant aux critères pour certains stades de vie spécifiques de l'esturgeon (taux élevés d'oxygène dissous, faible niveau de DBO, régime de température adéquat, etc., voir tableau 12).
- Caractéristiques hydromorphologiques indiquant des types d'habitats potentiels (rivière sinueuse dont la dynamique fluviale présente des motifs de courants changeants, un dépôt et une translocation de divers substrats et matériaux qui donnent lieu à une alternance entre les berges concaves et les berges convexes, une alternance de biefs plus profonds à flux rapide présentant des substrats potentiellement durs, des bancs de gravier, des zones à faible débit au fond meuble dans le chenal principal ou adjacentes à celui-ci, des zones sans sédimentation et des bassins profonds pour l'hivernage).
- Régime d'écoulement favorisant la fraie et le développement précoce des esturgeons, les crues se produisant avant la période de fraie et de développement précoce.
- Régime de température favorisant tous les stades de vie de l'esturgeon (exigences strictes et uniquement des modifications mineures au cours des premiers stades de vie).
- Zones riches en organismes nourriciers pour différents stades de vie.

- Accessibilité des habitats potentiels (absence/présence et répartition des barrières à la migration et des dispositifs d'aide à la migration).
- Présence et reproduction d'espèces aux exigences similaires à celles de l'esturgeon en matière d'habitats.

4.2.2 Méthodes

4.2.2.1 Exploration des données

Le lancement d'un programme de suivi des habitats de l'esturgeon nécessite une approche systématique afin d'obtenir et de rassembler des données sur la **biologie, l'écologie et les habitats de l'esturgeon**. Les domaines d'intérêt comprennent des données actuelles et historiques concernant la **présence, la dynamique des populations, les aires de répartition et le cycle de vie** de l'espèce, avec une attention particulière portée à l'**utilisation saisonnière de l'habitat**. En outre, les **données officielles** provenant des sources de suivi en eau libre telles que les **évaluations de la qualité de l'eau** et les **stations hydrométriques** devraient être incluses.

Les informations pertinentes se trouvent dans divers endroits, notamment les universités, les bibliothèques, les organismes de recherche, les musées, les administrations nationales et internationales, les ONG, les entreprises et les associations de pêche. Ces informations peuvent être disponibles en format papier ou numérique, allant des bases de données et des cartes aux applications SIG, ou seulement à titre anecdotique.

Les **parties prenantes** telles que les actuels et anciens pêcheurs commerciaux, les adeptes de la pêche récréative et les négociants en poissons peuvent fournir des informations précieuses, puisque les informations anecdotiques issues des connaissances locales peuvent compléter les données scientifiques et offrir ainsi une vision plus complète des habitats de l'esturgeon. Interroger les parties prenantes et les spécialistes peut permettre de combler les lacunes dans les informations écrites et en ligne. Ils apportent des renseignements précieux, en particulier les pêcheurs, sous réserve d'une éventuelle désinformation intentionnelle (Blaž et al., 2021).

Les **sources d'information historiques** telles que les cartes historiques numérisées (par exemple les cartes du XVIII^e et du XIX^e siècle réalisées dans le cadre du projet MAPIRE (MAPs of the empIRE)) peuvent apporter des informations sur l'état écosystémique passé de masses d'eau naturelles ou y ressemblant, et servir de points de référence pour les habitats de l'esturgeon. Les conditions de référence historiques ajoutent une dimension temporelle qui permet de mieux comprendre les évolutions à long terme des habitats de l'esturgeon et d'encourager les stratégies de gestion adaptative. Il est conseillé de faire preuve d'une certaine prudence lors de l'utilisation des descriptions scientifiques des siècles passés, en raison des divergences potentielles avec les normes contemporaines. Les analyses historiques devraient ainsi identifier et dater de manière méthodique les impacts sur le système visé.

L'exploration des **données historiques des pêcheries commerciales** peut compléter les informations en matière d'habitat, mais il faut être conscient de leurs

limites pour ce qui est de refléter avec précision l'abondance écologique et la composition des espèces (Haidvogel et al., 2003). Les données provenant des captures de la pêche à la ligne et d'autres types de pêche à l'esturgeon récréative doivent également être prises en compte dans les régions où ces activités sont toujours autorisées.

L'utilisation de différentes approches, notamment la science citoyenne, les conditions de référence historiques et les données de la pêche commerciale et de la pêche récréative, peut **élargir le champ des données** de manière significative et fournir une vue plus globale des habitats de l'esturgeon. Incorporer les connaissances locales grâce à des entretiens avec les parties prenantes et à la science citoyenne permet d'**enrichir le jeu de données avec des informations** qui pourraient ne pas être saisies par le biais des seules évaluations scientifiques.

Les approches telles que la science citoyenne et les entretiens avec les parties prenantes **encouragent l'implication de la communauté et permettent de sensibiliser et de favoriser un sentiment de responsabilité partagée pour la conservation des esturgeons.**

Les ressources et les efforts nécessaires sont difficiles à évaluer et dépendent en grande partie de la documentation disponible, de la taille du bassin versant en question ainsi que des méthodes choisies pour réaliser l'évaluation. La science citoyenne et l'engagement des parties prenantes nécessitent des ressources pour la formation, la coordination et le soutien, qui peuvent imposer des contraintes ; et combler le fossé entre la terminologie scientifique et les connaissances locales ou les archives historiques nécessite une communication efficace qui peut être entravée par les différences de langue ou d'interprétation. La science citoyenne et les données historiques peuvent constituer des options rentables, tandis que les technologies avancées ou un travail de terrain approfondi peuvent entraîner des coûts plus élevés. Certaines méthodes comme l'exploration des données historiques peuvent faire gagner du temps, tandis que d'autres, telles que la science citoyenne, peuvent nécessiter une planification et une coordination minutieuses ainsi qu'une contribution importante de la part du personnel. Dans l'ensemble, l'expérience/expertise requise pour cette première étape n'est pas limitante pour l'approche globale.

4.2.2.2 Analyse des cartes bathymétriques, des photographies aériennes et de l'orthophotographie

L'analyse des cartes bathymétriques, des photographies aériennes et de l'orthophotographie constitue également une approche permettant l'identification de zones potentiellement pertinentes pour le suivi des habitats de l'esturgeon au sein des bassins versants. Ces méthodes incluent l'examen de la topographie sous-marine, de l'imagerie aérienne et des photographies aériennes corrigées afin de distinguer et d'attribuer des caractéristiques clés associées aux habitats de l'esturgeon (Blaž et al., 2021).

Les **cartes bathymétriques** fournissent des informations sur la topographie sous-marine et montrent les courbes de profondeur qui permettent d'identifier les caractéristiques potentielles des habitats de l'esturgeon (bassins profonds pouvant servir de sites de repos, de rassemblement ou d'hivernage, par exemple).

La **photographie aérienne** capture des images à haute résolution de la surface de la Terre, tandis que l'**orthophotographie** corrige les distorsions, ce qui permet des mesures précises et donc une quantification potentielle des habitats. L'analyse de ces images consiste à identifier les caractéristiques de la surface, telles que les structures de berges, les schémas d'écoulement de l'eau et les indicateurs potentiels des habitats de l'esturgeon tels que les structures submergées, les bancs de gravier, les rapides et les barrières à la migration.

Avantages et inconvénients

- Cette méthode permet une évaluation visuelle détaillée des caractéristiques sous-marines (en partie) et de surface.
- Elle permet de couvrir de vastes zones à distance, offrant ainsi une vision globale des habitats potentiels.
- Elle facilite les comparaisons historiques afin d'identifier les changements dans les caractéristiques des habitats au fil du temps.
- Contrairement aux études sous-marines directes, elle ne fournit pas d'informations détaillées sur les structures sous-marines ou la composition du substrat.
- La météo affecte la qualité des données, notamment dans les zones exposées à une forte couverture nuageuse ou à des conditions défavorables.
- Les limitations de résolution peuvent entraver l'identification des caractéristiques des habitats à plus petite échelle.
- Elle nécessite des connaissances spécialisées pour pouvoir interpréter les caractéristiques visibles en rapport avec les habitats de l'esturgeon.

Ressources et efforts nécessaires

- **Coût :** moyen (coûts modérés associés à l'achat d'images aériennes à haute résolution et d'orthophotographies, avec des variations éventuelles selon la couverture de la zone et la résolution des images.)
- **Temps nécessaire :** moyen (couverture efficace de vastes zones, mais le temps de traitement dépend de la résolution des images et de l'étendue de l'analyse requise.)
- **Équipement :** faible (équipement de base pour accéder aux images aériennes et aux orthophotographies et les analyser, tel qu'un logiciel SIG et des ressources informatiques.)
- **Expérience/expertise :** moyenne (si des compétences de base peuvent suffire pour une analyse et une interprétation générales des images, une maîtrise approfondie est nécessaire pour identifier de manière précise les indicateurs des habitats de l'esturgeon.)

4.2.2.3 Télédétection

La télédétection est un terme générique qui désigne l'évaluation des caractéristiques des habitats à distance, à l'aide d'un ensemble de plateformes, de technologies et de capteurs. Elle est utilisée pour identifier des habitats terrestres et aquatiques, mais également pour documenter la dynamique des habitats et leurs évolutions. Pour plus d'informations sur la télédétection dans le cadre du suivi des espèces et des habitats, voir Schmidt & Van der Sluis (2021).

Dans les habitats d'eau douce, elle est principalement utilisée pour identifier des caractéristiques hydromorphologiques et certaines caractéristiques physico-chimiques. Les tableaux 9 et 10 offrent un aperçu des plateformes, technologies, capteurs et ensembles de données concernant les conditions potentielles des habitats. La télédétection a été utilisée pour identifier les habitats de poissons d'eau douce (Kuiper et al., 2023). Les recherches bibliographiques effectuées dans le cadre du présent document n'ont pas révélé d'utilisation spécifique pour l'identification des habitats de l'esturgeon. Cela peut s'expliquer par les limites d'application de ces technologies dans des masses d'eau étendues et profondes. Elles sont présentées ici car les bénéfices potentiels de leur utilisation pour l'identification de certaines caractéristiques des habitats de l'esturgeon ne peuvent être exclus. Les ressources et efforts nécessaires sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 9 : Aperçu des technologies de télédétection, de leurs forces et de leurs faiblesses et de leurs applications pour la caractérisation des habitats d'eau douce (d'après Kuiper et al., 2023, modifié et adapté).

Technologies	Forces	Faiblesses	Exemple d'application pour les habitats d'eau douce
Plateformes			
Terrestres	Très haute résolution spatiale (cm), facile à coupler avec des données de terrain	Couverture géographique très limitée	Bief unique
Véhicules aériens sans pilote (drones)	Haute résolution spatiale (cm - m), baisse du coût ces dernières années	Couverture géographique limitée	Plusieurs biefs, un seul cours d'eau

Aériennes	Haute résolution spatiale, couverture géographique moyenne	Coûteux, généralement une seule collecte de données	Un ou plusieurs bassins versants
Satellites	Résolution spatiale moyenne à haute, large couverture géographique, acquisition répétée de données selon un cycle régulier	La résolution spatiale peut ne pas être suffisante en fonction de l'application souhaitée	Plusieurs bassins versants / continent
Capteurs			
Imagerie optique	Type de capteur le plus courant, large éventail d'informations disponibles, nombreuses données en libre accès, et les archives d'images ainsi que l'étalonnage à long terme permettent d'établir des séries temporelles	Difficile d'obtenir des informations sur la structure de la végétation, le capteur passif dépend de conditions d'éclairage appropriées, les images peuvent être obscurcies par les nuages et la brume, la turbidité peut limiter les performances, l'efficacité est maximale uniquement en eaux peu profondes	Type et complexité de l'habitat, couverture végétale, fraie (salmonidés), peut différencier les différents types de substrats en fonction de leur couleur et de leurs propriétés de réflectance (signatures spectrales uniques)
Thermiques	Meilleure option pour obtenir des informations sur la température	Sert uniquement à obtenir des informations sur la température	Température de surface des cours d'eau et lacs
Lidar	Informations 3D à haute résolution spatiale sur la structure du terrain et de la végétation, capteur actif, peut pénétrer la surface de l'eau dans une certaine mesure, le Lidar monté sur un drone permet de réaliser des mesures	Manque d'informations spectrales, coût élevé, pénétration limitée dans les eaux troubles, les données satellites peuvent ne pas avoir la résolution nécessaire.	Type et complexité de l'habitat, caractéristiques hydrologiques, fraie (salmonidés) profondeur de l'eau : Lidar, lidar bathymétrique, peut fournir des données bathymétriques

	bathymétriques à haute résolution.		détaillées, permettant de cartographier la morphologie du fond des cours d'eau, sait faire la distinction entre les surfaces grossières (les rochers, par exemple) et les surfaces plus lisses (les fonds sablonneux, par exemple)
Radars	Capteur actif, capable de traverser les nuages, peut fournir certaines informations sur la structure de la végétation	Disponibilité des données limitée pour les radars à grande longueur d'onde, traitement des données difficile	Couverture de glace, caractéristiques hydrologiques profondeur de l'eau : radar de sondage de profondeur
Photogrammétrie numérique	Informations à haute résolution spatiale sur la structure de la forêt dans la plaine inondable, similaires à celles fournies par le Lidar (mais pas identiques), pouvant contenir des informations spectrales limitées	Couverture géographique limitée, effectuée le plus souvent par drone, manque de pénétration à travers la végétation et les nuages	Type et complexité de l'habitat, caractéristiques hydrologiques, fraie (salmonidés), fournit des modèles de surface numériques et des modèles de terrain tridimensionnels

Tableau 10 : Efforts nécessaires pour l'utilisation des technologies de télédétection (d'après Kuiper et al., 2023, modifié et adapté).

<p>Imagerie optique</p>	<p>Coût : moyen</p> <p>Temps : faible à moyen (dépend de la fréquence de revisite des satellites et de la disponibilité des données)</p> <p>Équipement : faible (accès aux fournisseurs d'imagerie satellite ou aérienne)</p> <p>Expérience et expertise : faible à moyenne (compétences de base en interprétation d'images, connaissance des principes de la télédétection)</p>
<p>Thermiques</p>	<p>Coût : élevé (les coûts d'acquisition et de traitement sont généralement plus élevés que ceux de l'imagerie optique)</p> <p>Temps nécessaire : moyen (la disponibilité des données thermiques peut varier et leur traitement peut prendre du temps)</p> <p>Équipement : moyen à élevé (capteurs thermiques spécialisés et infrastructures de traitement des données)</p> <p>Expérience et expertise : moyenne à élevée (connaissance des principes de la télédétection thermique, du traitement et de l'interprétation des données)</p>
<p>Lidar</p>	<p>Coût : élevé (satellite) à moyen (aérien, drones)</p> <p>Temps nécessaire : faible à moyen (selon l'échelle)</p> <p>Équipement : faible à élevé (selon la plateforme)</p> <p>Expérience et expertise : moyenne à élevée (selon la technologie utilisée)</p>
<p>Radars</p>	<p>Coût : élevé (les coûts d'acquisition et de traitement peuvent être relativement élevés)</p> <p>Temps nécessaire : moyen à élevé (la disponibilité des données radar peut être moins fréquente que celle des données optiques)</p> <p>Équipement : moyen à élevé (capteurs radars spécialisés et infrastructures de traitement des données)</p> <p>Expérience et expertise : moyenne à élevée (connaissances approfondies de la technologie radar, du traitement et de l'interprétation des données)</p>
<p>Photogrammétrie numérique</p>	<p>Coût : moyen à élevé (dépend de l'échelle et de la complexité du projet)</p> <p>Temps nécessaire : moyen à élevé (le temps de traitement peut être long, en particulier pour les grands ensembles de données)</p> <p>Équipement : moyen à élevé (nécessite un logiciel de photogrammétrie spécialisé et des ressources informatiques)</p>

	Expérience et expertise : moyenne à élevée (connaissances approfondies des principes de la photogrammétrie, de l'utilisation du logiciel et du traitement des données)
--	---

4.2.2.4 Calcul rétroactif de la période et du lieu de fraie

Le calcul rétroactif est utilisé dans le suivi des habitats de l'esturgeon, soit pour déterminer la date de fraie en identifiant la phase exacte de développement d'embryons et de larves dont la présence a été documentée, tout en tenant compte de la température de l'eau et de la durée nécessaire pour atteindre le stade de développement observé, soit pour faire une estimation approximative de l'emplacement des sites de fraie et de développement précoce des esturgeons, en tenant compte des épisodes de fraie attestés et des vitesses moyennes de déplacement en aval des juvéniles d'esturgeon au sein du système (Duncan et al., 2004; Wei et al., 2009; Chiotti et al., 2008; Chapman & Jones 2010; Seesholtz et al., 2015). Cependant, il est difficile de documenter/capturer des esturgeons à un stade de vie précoce dans les grands cours d'eau sans connaître l'emplacement des sites de reproduction. L'emplacement approximatif de sites de fraie et de développement précoce a été évalué pour les juvéniles grâce à un simple calcul de la distance depuis d'autres sites de fraie similaires lors d'épisodes de fraie attestés et en connaissant la vitesse moyenne de déplacement en aval des juvéniles (e.g. Margaritova 2022; Mihov et al., 2022).

Avantages et inconvénients

- Fournit une méthode permettant de prédire l'emplacement de sites de fraie potentiels grâce à l'analyse des captures de juvéniles.
- Constitue une méthode temporellement précise en tenant compte du moment de survenue des épisodes de fraie.
- Peut s'avérer plus rentable que des études de terrain approfondies, en particulier lorsque les données historiques de capture de juvéniles sont disponibles.
- S'appuie sur des données précises et complètes sur les captures de juvéniles d'esturgeon, les périodes de fraie et les vitesses de déplacement en aval.
- S'appuie sur des connaissances spécifiques de l'écologie et du comportement des esturgeons.
- Ne tient pas compte des facteurs environnementaux qui influent sur les déplacements des juvéniles, ce qui peut entraîner des prédictions imprécises.

Ressources nécessaires

- Périodes de fraie : informations précises sur le moment de survenue des épisodes de fraie des esturgeons au sein du système.
- Vitesses de déplacement des juvéniles : vitesses moyennes de déplacement en aval des juvéniles d'esturgeon dans le cours d'eau concerné.
- Localisation des captures de juvéniles : données sur les captures de juvéniles d'esturgeon en différents points du cours d'eau en fonction de leurs sites de fraie respectifs.

4.2.2.5 Évaluation des barrières à la migration

Les barrières bloquent la migration des esturgeons entre les différents habitats de leur cycle de vie. Les barrières à la migration doivent ainsi être évaluées et le fonctionnement des dispositifs d'aide à la migration / passes à poissons contrôlé (Kemp et al., 2008; Noonan et al., 2012; Silva et al., 2017; Katopodis et al., 2019; Matica 2020). Ces informations doivent être examinées en tenant compte des résultats de l'identification des habitats actuels et potentiels, afin d'orienter la gestion de la conservation des esturgeons en ce qui concerne le développement et la mise en œuvre de nouvelles mesures de restauration des routes migratoires de l'esturgeon, et afin d'identifier les priorités en matière d'évaluation et de suivi des habitats (Schmutz & Mielach 2013; PANEUAP 2018; Johnston et al., 2019; Bruch & Haxton 2023; Popp, S., 2024).



Figure 4 : Barrage de Sindi sur la Pärnu en Estonie. Barrière à la migration de l'esturgeon et d'autres espèces de poissons. Notez la passe à poissons à droite sur la photo (© Jarko Jaadla).



Figure 5 : La Pärnu en Estonie après le retrait du barrage de Sindi. La continuité du cours d'eau a été rétablie pour les poissons migrateurs (© Keskkonnaamet).

L'évaluation des barrières se fait à la fois par l'exploration des données trouvées dans les bases de données et autres sources d'informations (ICPDR 2021; Amber 2020; Amber Barrier Atlas <https://amber.international/>), et par l'évaluation sur le terrain des barrières à la migration. De nombreux protocoles d'évaluation de la franchissabilité ont été élaborés pour l'évaluation *in situ* des barrières. Il existe par exemple trois protocoles clés bien développés et largement accessibles en Europe (SNIFFER (Royaume-Uni), ICE (France) et ICF (Espagne)). Ces protocoles ont été testés et révisés par Kerr et al. (2016). Le protocole français ICE (Baudoin et al., 2014) s'est avéré être le moins subjectif et produit des scores de franchissabilité pour la plupart des espèces, tout en nécessitant moins de mesures physiques que d'autres protocoles d'étude à échelle fine.

Le protocole ICE a ainsi été choisi comme protocole de référence à utiliser par le consortium AMBER (un projet qui vise la mise en place d'une gestion adaptative de l'exploitation des barrières dans les cours d'eau européens, afin de restaurer la connectivité des cours d'eau de manière plus efficace et plus efficiente) et comme protocole à promouvoir à grande échelle en tant que norme européenne pour l'évaluation des barrières.

Une des limites du protocole ICE est que les scores de franchissabilité sont produits via un processus d'arbre de décision chronophage. Le logiciel d'évaluation de la franchissabilité des barrières et du potentiel hydroélectrique (AMBER Barrier Track) automatise ce processus par un calcul des scores de franchissabilité basé sur quelques paramètres d'entrée. En plus de générer les scores de franchissabilité du protocole ICE, l'outil donne une estimation du potentiel hydroélectrique du site grâce à l'évaluation du débit et de la hauteur de chute. L'outil produit ainsi des données qui peuvent être utilisées pour alimenter les outils de priorisation

concernant l'atténuation des barrières, et faciliter la prise de décisions de gestion au niveau du bassin versant.

Tableau 11 : Attributs de la page de premier niveau intitulée « Enregistrer un nouvel obstacle » de l'application Barrier Tracker d'AMBER (modifié).

Élément	Enregistrement de donnée	Automatique ou manuel	Type de réponse
Photo de la barrière	Obligatoire	Ouverture automatique, contrôle manuel de l'obturateur et possibilité de refaire la photo : l'appareil photo se lance dès l'ouverture de la page « enregistrer l'obstacle »	Défini par l'utilisateur (photo)
Date de l'enregistrement	Obligatoire	Automatique, lors de la prise de la photo	Date au format Heure/minutes/secondes & Jour/mois/année
Type de barrière	Facultatif	Manuel	Déversoir, barrage, ponceau, gué, écluse, rampe (avec des images pour faciliter le choix)
Hauteur de la barrière	Facultatif	Manuel	Catégories de hauteur : < 0,5 mètre, 0,5 – 1,0 mètre, 1,0 – 2,0 mètres, 2,0 – 5,0 mètres, 5,0 – 10,0 mètres, > 10,0 mètres*
La barrière traverse-t-elle le cours d'eau de part en part ?	Facultatif	Manuel	Oui/non
La barrière est-elle en état de fonctionnement ?	Facultatif	Manuel	oui/non/ne sait pas
Merci d'ajouter toute remarque supplémentaire	Facultatif	Manuel	

Localisation de la barrière (géolocalisation de l'obstacle) Obligatoire	Obligatoire	Automatique, lors de la prise de la photo. Demande d'autorisation pour utiliser le GPS (localisation) s'il n'est pas activé. L'application enregistre si la position a été obtenue par le GPS, le signal téléphonique ou les deux.	Coordonnées (lat/long) via la puce GPS du téléphone et le signal du téléphone lorsque la réception est bonne.
Merci d'ajouter toute remarque supplémentaire	Facultatif	Manuel	Texte

4.2.2.6 Présence de populations reproductrices d'espèces aux exigences similaires à celles de l'esturgeon en matière d'habitats

La présence de populations viables d'espèces de poissons autres que l'esturgeon, mais ayant des exigences similaires en matière d'habitats de reproduction, de nurricerie et/ou de migration, peut indiquer l'existence de conditions également favorables pour l'esturgeon (Marenkov & Fedonenko, 2016). Il n'existe aucun protocole et ces espèces de poissons indicatrices seraient spécifiques à une certaine zone et à un certain bassin versant.

Avantages et inconvénients

- Peut permettre d'identifier des types d'habitats potentiels de l'esturgeon sans la présence de l'espèce, et d'identifier les systèmes ayant le plus grand potentiel de rétablissement.
- La liste des espèces indicatrices peut ne pas être transférable à d'autres zones et à d'autres bassins versants.

Ressources nécessaires

- Informations et données relatives à l'écologie, l'autécologie, l'état et les types d'habitats des espèces de poissons présentes dans le bassin versant concerné.

4.2.2.7 Études des cours d'eau

Une démarche préliminaire à l'identification des portions de cours d'eau qui présentent les caractéristiques de l'habitat recherché consiste à effectuer une étude (en bateau) du cours d'eau. L'objectif est de documenter les indicateurs de

critères d'habitat pertinents, tels que les caractéristiques hydromorphologiques ou d'autres substrats et structures visibles à l'échelle macroscopique, les portions à flux rapide alternant avec des zones à faible débit directement connectées au cours d'eau principal, ainsi que la présence de barrières à la migration. En outre, les entretiens complémentaires sur place avec les parties prenantes et autres experts locaux (pêcheurs professionnels et adeptes de la pêche récréative) peuvent fournir des informations supplémentaires sur les substrats, les profondeurs d'eau et des informations anecdotiques sur les conditions écologiques. Une telle étude peut déjà mettre en évidence des sites d'échantillonnage pour le contrôle des habitats.

Avantages et inconvénients

- Permet des observations directes et de première main du cours d'eau et de ses caractéristiques, qui facilitent l'évaluation en temps réel.
- Fournit une méthode relativement rapide pour collecter des données initiales sur les caractéristiques des habitats.
- Peut couvrir de nombreuses portions de rivière, y compris des zones reculées ou difficiles et potentiellement inaccessibles par d'autres moyens.
- Permet de confirmer visuellement les caractéristiques des habitats, telles que les types de substrats et les schémas d'écoulement de l'eau.
- Donne l'opportunité d'engager le dialogue avec les acteurs locaux sur place, et d'obtenir des informations précieuses tirées de leurs connaissances et de leur expérience.
- Peut ne pas fournir d'informations détaillées sur les caractéristiques sous-marines, telles que les chenaux profonds ou les structures immergées.
- Les observations peuvent être subjectives et dépendre des compétences et de l'expérience du chargé d'étude.
- Les conditions météorologiques peuvent affecter l'efficacité des relevés, en limitant le nombre de jours propices à leur réalisation.
- Implique un risque de propagation involontaire d'espèces envahissantes si plusieurs bassins versants sont étudiés et que le matériel n'est pas nettoyé correctement avant d'être utilisé dans une masse d'eau différente.
- Comporte des risques inhérents à la collecte de données sur le terrain, en particulier dans des environnements difficiles.
- Pourrait être combinée à une étude à balayage latéral de la topographie du fond et des substrats, mais cela nécessiterait des efforts et du temps supplémentaires, ainsi qu'une planification minutieuse à l'avance.

Ressources et efforts nécessaires

- **Coût :** faible (en général, les coûts sont relativement faibles, surtout en comparaison de certaines méthodes de pointe telles que la télédétection).
- **Temps nécessaire :** moyen (plus rapide que d'autres méthodes, l'étude des cours d'eau demande malgré tout du temps pour effectuer les relevés sur le terrain et consigner les données).

- **Équipement** : faible (l'équipement de base, comme les bateaux et les outils de navigation, est nécessaire, mais ce type d'étude requiert moins d'équipement que les techniques de pointe).
- **Expérience/expertise** : faible à moyenne (des compétences de base en navigation sont nécessaires, mais une expertise technique approfondie n'est pas indispensable. Cependant, il est nécessaire d'avoir de l'expérience dans l'interprétation des structures et des conditions observées afin de garantir la qualité des observations.)

4.3 Contrôle des habitats identifiés

Faisant suite à l'étape précédente d'identification d'aires et de portions à plus grande échelle au sein d'un bassin versant, ce chapitre porte sur le repérage et le contrôle des zones d'habitats potentiels grâce à des études de terrain, à des évaluations et à la modélisation de l'habitat. Cette étape inclut également la quantification des habitats dans une certaine mesure, puisqu'il est nécessaire d'évaluer la fréquence des types d'habitats, ainsi que leur étendue spatiale.

4.3.1 Critères de contrôle des habitats

Les critères communs d'évaluation des paramètres physico-chimiques et structuraux adaptés à l'esturgeon sont uniquement disponibles pour un éventail réduit de types d'habitats, du fait de lacunes dans les connaissances sur les besoins, l'ontogénie, l'autécologie et l'écologie générale spécifiques des esturgeons. Les critères communs d'habitat sont tirés de la littérature (Holčík 1989; Bemis & Kynard 1997; Billard & Lecointre 2000; Gessner & Schütz 2011; McAdam et al., 2018). Des informations supplémentaires sur les caractéristiques et critères des habitats pour différentes espèces, bassins versants et types d'habitats tirées de la recherche appliquée sur le terrain sont disponibles dans le rapport sur les habitats de l'esturgeon (Popp, S., 2024. Characteristics and locations of Sturgeon Habitats in European Rivers).

4.3.1.1 Qualité générale de l'eau

Le rôle exact que joue la qualité générale de l'eau dans la conservation des esturgeons n'est pas clair. Cependant, dans le cadre de l'évaluation des habitats potentiels, les conditions hostiles à la vie aquatique sont un facteur d'exclusion définitif pour un bassin versant ou une portion de cours d'eau. Les esturgeons sont sensibles aux faibles taux d'oxygène dissous, en raison de l'affinité réduite de leur hémoglobine pour l'oxygène et de l'absence de mécanisme de compensation. Ainsi, un niveau de concentration en O₂ inférieur à 5 mg/l peut déjà s'avérer critique pour les adultes (Sullivan et al., 2003, Chebanov et al., 2011).

Les conditions hypoxiques sont encore moins bien tolérées au cours du développement précoce et de la croissance des juvéniles, qui dépendent fortement de la température, de la salinité et de l'oxygène dissous, avec une croissance optimale lorsque la saturation en oxygène est > 70 % (Gunderson 1998; Cech & Crocker 2002; Campbell & Goodman 2004; Niklitschek & Secor 2009a, b; Cech &

Doroshov 2010; Kieffer et al., 2011). La tolérance à l'augmentation de la salinité se développe chez les esturgeons anadromes au fil du temps et avec l'augmentation de la masse corporelle (Jenkins et al., 1993). Les espèces potamodromes ne tolèrent pas la salinité. Les taux de consommation d'oxygène suggèrent que l'augmentation de la régulation ionique et osmotique affecte les jeunes poissons à des salinités plus élevées (Allen et al., 2014).

Le tableau 12 donne un aperçu des valeurs et plages de valeurs des paramètres de qualité de l'eau nécessaires à la vie des esturgeons en milieu d'élevage. Ces valeurs sont validées par l'expérience et considérées comme bénéfiques, et peuvent également servir de référence pour le milieu naturel.

Tableau 12 : Valeurs et plages de valeurs des variables de la qualité de l'eau recommandées pour les esturgeons (Chebanov et al., 2011, d'après Conte et al., 1988, modifié).

Paramètres	Valeur
Alcalinité, mg/litre exprimé en CaCO ₃	50 – 400
Ammoniac (non ionisé), mg/l	< 0,01
DBO ₅ , O ₂ , mg/litre	< 2,5
Cadmium (eau douce à 100 ppm d'alcalinité), mg/litre (eau dure à 100 ppm d'alcalinité), mg/litre	0,004 0,003
Dioxyde de carbone, mg/litre	0 – 10
Cuivre, mg/litre dans une eau douce	0,006
Oxygène dissous, mg/litre	> 5,0 à saturation
Saturation des gaz	< 105 %
Sulfure d'hydrogène, mg/litre	0,002
Fer, mg/litre	< 0,01
Plomb, mg/litre	< 0,03
Nitrites, mg/litre exprimés en N (azote) dans une eau douce dans une eau dure	< 0,1 < 0,2
Oxydabilité au permanganate, O ₂ mg/litre	≤ 10
Ozone, mg/litre	0,005
pH	6,5 – 8,5
Salinité, ppt pour les alevins pour les juvéniles pour les adultes	0 – 0,5 0 – 3 3

Dureté totale, mg/litre exprimé en CaCO ₃	10 – 400
Total des matières en suspension et décantables, mg/litre	≤ 80
Zinc, mg/litre	0,03

4.3.1.2 Fraie et larves vésiculées

Description :

- Absence de barrières physiques bloquant le passage ou présence de dispositifs d'aide à la migration fonctionnels au niveau des barrières (écluses, barrages, réservoirs, panaches thermiques, turbidité, son, etc.) dans le corridor ou le continuum écologique, c'est-à-dire entre l'embouchure du cours d'eau et les sites de fraie pour les populations anadromes, et entre les sites d'hivernage, d'alimentation et de fraie pour les populations potamodromes.
- Portions profondes du cours d'eau avec des vitesses d'écoulement élevées par rapport aux vitesses moyennes du courant, (McAdam et al., 2018; Kerr et al., 2010).
- Principalement des substrats de fond grossiers et propres avec peu ou pas de périphyton, par exemple des gros graviers, (Manny & Kennedy 2002), absence de sédimentation pendant les périodes de fraie et de développement précoce (McAdam et al., 2005).
- Espaces interstitiels avec une bonne circulation de l'eau, bien oxygénés, et avec une faible incrustation du substrat rugueux dans les fractions de substrat plus fines (Bain & Stevenson 1999; Du et al., 2011).
- La DBO est faible (valeur empirique provenant d'une propagation contrôlée, non publiée) et la température de l'eau favorise un développement précoce en temps opportun jusqu'à la résorption du sac vitellin des larves et jusqu'à ce que les premières larves capables de se nourrir (de manière exogène) se déplacent vers un autre type d'habitat (voir « Larves capables de se nourrir » ci-dessous).

Profondeur de l'eau : > 2 m

Température de l'eau : 13 – 20 °C, les variations pendant les jours que dure le développement précoce sont ≤ 2 °C (la plage de valeurs et la variation représentent des valeurs d'orientation, pas nécessairement des facteurs d'exclusion, elles doivent être adaptées aux espèces ; voir aussi le tableau 3 : « Plages des températures optimales selon l'espèce au cours de l'embryogenèse »).

Vitesses du courant (en aval du site de fraie) : > 0,6 m/s (limite supérieure maximale non définie, valeurs observées > 2,0 m/s).

Oxygène dissous (OD) (espaces interstitiels) : > 6,0 mg/l.

Demande biochimique en oxygène (DBO) : faible, < 2 mg/l.

Salinité : 0,0 – 0,5 ppt.

Substrats de fond : graviers, cailloux, pierres, rochers, galets de taille > 25 mm, et également barres argileuses dures (*A. stellatus*), roche-mère (*A. oxyrinchus*) (Hontj et al., 2022; NOAA).

Sédimentation : absente, faible incrustation du substrat dans les sédiments fins.

Débit : stable après les crues, seules des petites variations pendant le retrait progressif de la crue.

Capacité de charge : la densité d'incubation naturelle supposée des femelles reproductrices. Selon Derzhavin (1947) et Vlasenko (1970), appliqués par Gessner & Bartel (2000) et Arndt et al. (2006), la fécondité moyenne d'un esturgeon reproducteur est de un million d'œufs par femelle et la densité optimale se situe entre 1 000 et 3 500 œufs/m², ce qui donne une surface moyenne de site de fraie pour une femelle d'environ 350 m².

Confirmation : présence de poissons adultes en train de frayer et description d'embryons et/ou de larves vésiculées.

4.3.1.3 Larves capables de se nourrir

Description :

- Zones à faible écoulement en aval (!) des sites de fraie et des sites de développement des larves vésiculées.
- Présence d'organismes alimentaires pour le premier repas.
- Substrats mixtes offrant une protection contre les prédateurs.

Profondeur de l'eau : > 2,0 m.

Température de l'eau : 15 – 22 °C.

Vitesses du courant (dans l'habitat) : N.A.

Oxygène dissous (OD) : > 6,0 mg/l.

Demande biochimique en oxygène (DBO) : moyenne, 2 – 5 mg/l.

Salinité : 0,0 – 0,5 ppt.

Substrats de fond : substrats mixtes (argile, sable et gravier).

Sédimentation : faible, < 10 mg/l (particules suspendues).

Débit : N.A.

Capacité de charge : N.A. ; elle peut être fonction de la disponibilité en organismes alimentaires de taille adéquate (aliments planctoniques : copépodes, daphnies, etc. ; aliments benthiques : chironomidés, tubificidés, etc.). Spécifique à chaque espèce et peut dépendre de la taille des larves, de l'ouverture de la bouche et du comportement alimentaire (Gessner et al., 2007).

Confirmation : présence attestée de larves capables de se nourrir (sac vitellin résorbé, tube digestif rempli).

4.3.1.4 Jeunes de l'année

Description :

- Zones à faible écoulement en aval des sites de fraie et des sites de développement des larves vésiculées, et étroitement connectées au chenal principal.
- Présence d'organismes alimentaires.

Profondeur de l'eau : N.A.

Température de l'eau : 1 – 26 °C.

Vitesses du courant (dans l'habitat) : 0 – 0,8 m/s.

Oxygène dissous (OD) : > 5,5 mg/l.

Demande biochimique en oxygène (DBO) : élevée, > 5 mg/l.

Salinité : 0,0 – 0,5 ppt.

Substrats de fond : substrats de fond fin (limon, sable, argile, etc) relativement stables pour permettre la colonisation et l'émergence d'organismes alimentaires.

Sédimentation : faible, < 10 mg/l (particules suspendues).

Débit : N.A.

Capacité de charge : N.A. ; elle peut être fonction de la disponibilité en organismes alimentaires de taille adéquate. Spécifique à chaque espèce (piscivorie chez *Huso huso*, par ex.) et peut également dépendre d'une alimentation opportuniste.

Confirmation : présence attestée de juvéniles en train de s'alimenter et contenu du tube digestif qui concorde avec l'éventail d'organismes alimentaires disponibles (lavage gastrique).

4.3.1.5 Juvéniles, subadultes et adultes > 1 an (fluviaux, marins pour les populations anadromes)

Description :

- Zones fluviales et marines avec présence d'organismes alimentaires.

Profondeur de l'eau : N.A.

Température de l'eau : 1 – 26 °C.

Vitesses du courant (dans l'habitat fluvial) : 0 – 1,4 m/s.

Oxygène dissous (OD) : > 5,0 mg/l à saturation.

Demande biochimique en oxygène (DBO) : élevée, > 5 mg/l.

Salinités : dans le cas des espèces marines (anadromes), dépend de l'environnement concerné (par ex. : mer du Nord 34 - 35 ppt, mer Baltique 2 - 30 ppt, mer Noire 17 - 20 ppt, mer Méditerranée 38 - 39 ppt).

Substrats de fond : N.A.

Sédimentation : N.A.

Débit : N.A.

Capacité de charge : N.A. ; elle peut être fonction de la disponibilité en organismes alimentaires de taille adéquate. Spécifique à chaque espèce (piscivorie chez *Huso huso*, par ex.) et peut également dépendre d'une alimentation opportuniste.

Confirmation : présence attestée d'individus en train de s'alimenter et contenu du tube digestif qui concorde avec l'éventail d'organismes alimentaires disponibles (lavage gastrique).

4.3.1.6 Hivernage (fluvial)

Description : bassins profonds ou dépressions dans le lit du cours d'eau, souvent à proximité des sites de fraie.

Profondeur de l'eau : N.A.

Température de l'eau : N.A.

Vitesses du courant : N.A. (courant réduit près du fond).

Oxygène dissous (OD) : > 5,0 à saturation.

Demande biochimique en oxygène (DBO) : N.A.

Salinité : 0,0 - 0,5 ppt.

Substrats de fond : N.A.

Sédimentation : N.A.

Débit : N.A.

Capacité de charge : N.A.

Confirmation : présence attestée d'esturgeons hivernants.

4.3.2 Méthodes

4.3.2.1 Profondeur de l'eau

Les sondages de profondeur, les dispositifs acoustiques à effet Doppler, les levés par station totale ou des appareils plus simples mais efficaces (ainsi que des appareils improvisés) tels que les mètres ruban ou les lignes lestées peuvent être utilisés pour mesurer la profondeur de l'eau, si les conditions telles que la vitesse du courant le permettent. Il n'existe aucun protocole spécifique pour mesurer la profondeur sur les différents habitats de l'esturgeon.

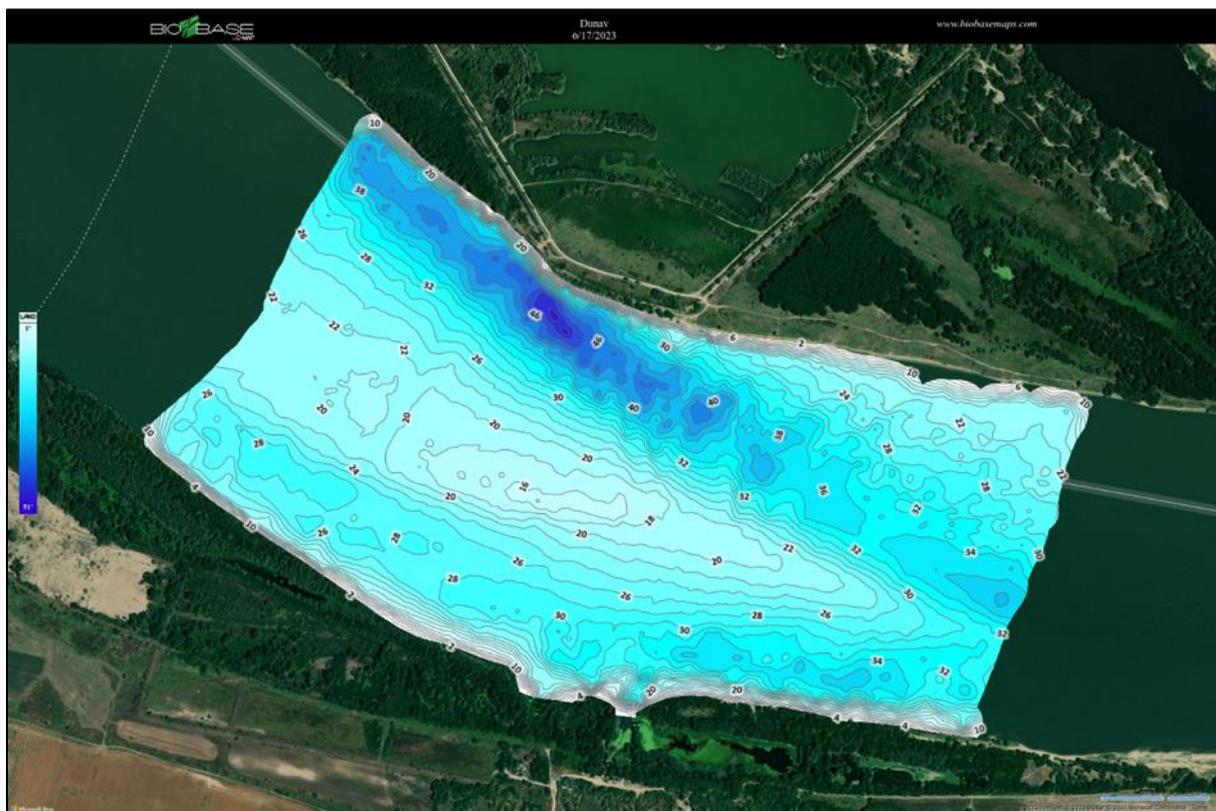


Figure 6 : Carte bathymétrique d'une section du Danube près de Béléne en Bulgarie, réalisée grâce à un relevé bathymétrique par sonar (© WWF-Bulgarie).

4.3.2.2 Température de l'eau

Des sondes de température portables, des enregistreurs de données de température, des thermocouples et des caméras d'imagerie thermique peuvent être utilisés pour mesurer et enregistrer la température de l'eau à différents endroits et à différentes profondeurs. Il n'existe aucun protocole spécifique pour mesurer la température de l'eau sur les différents habitats de l'esturgeon. Cependant, il s'agit d'une variable importante pour surveiller les périodes de fraie, les durées d'incubation qui permettent de prédire le moment de la dérive larvaire, ainsi que pour surveiller les tendances à long terme du changement climatique.

4.3.2.3 Vitesse du courant

Le tableau 13 donne un aperçu des différentes méthodes de mesure des vitesses du courant fondées sur une revue des méthodes de suivi de l'écoulement fluvial effectuée par Dobriyal et al., (2017), et inclut des conditions pertinentes pour leur mise en œuvre.

Alors que les vitesses de surface peuvent être utiles pour identifier les portions d'un cours d'eau où les vitesses du courant sont élevées, et donc identifier les sites de fraie, l'évaluation de leur fonctionnalité pour la fraie de l'esturgeon doit inclure la mesure des vitesses sur place dans la colonne d'eau et juste au-dessus du

substrat de fraie, faisant des courantomètres et des profileurs de courant acoustique à effet Doppler (ADCP) des méthodes applicables sur le terrain.

Tableau 13 : Aperçu des méthodes de mesure des vitesses du courant (d'après Dobriyal et al., 2017, modifié et adapté).

Méthode	Flotteur	Courantomètre (débitmètre)	Profileur de courant acoustique à effet Doppler	Électromagnétique	Téledétection	Vélocimétrie par images de particules
Facilité d'utilisation	facile	difficile	difficile	difficile	difficile	difficile
Rapport coût-efficacité	peu coûteux	cher	(très) cher	cher	cher	cher
Précision	faible	élevée	élevée	élevée	faible	élevée
Efficacité temporelle	efficace	efficace	efficace	efficace	efficace	efficace
Importance écologique	non polluant	non polluant	non polluant	non polluant	non polluant	non polluant
Remarques	uniquement pour les petits cours d'eau mesure habituellement les courants de surface	étude à court terme uniquement peut mesurer les vitesses à des profondeurs spécifiques, y compris à la surface les courantomètres sont souvent déployés à différentes profondeurs à l'aide d'un système de profilage vertical	capable de mesurer les vitesses du courant dans toute la colonne d'eau nécessite un effort important, notamment des stations fixes	peut être utilisé pour mesurer la vitesse de l'eau à la surface ou à des profondeurs spécifiques, selon le modèle et le déploiement	couvre de vastes zones mais nécessite une vérification sur le terrain généralement utilisé pour les courants de surface	couvre de vastes zones et donne des résultats précis, mais les estimations doivent être validées et il ne peut pas être utilisé en terrain vallonné souvent utilisé en laboratoire peut mesurer les vitesses à différentes profondeurs, mais son utilisation dans les cours d'eau peut être limitée

Couvrir les différentes profondeurs de zones fluviales étendues et profondes depuis un bateau avec des courantomètres peut prendre énormément de temps. D'un autre côté, un seul passage équipé d'un profileur de courant acoustique à effet Doppler peut produire des schémas de vitesses de courant pour des transects entiers (Yorke & Oberg 2002). L'utilisation des profileurs de courant acoustique à effet Doppler pour réaliser des mesures de vitesse et de débit dans les cours d'eau a ainsi augmenté au cours des dernières décennies. Il existe une multitude de solutions propriétaires, intégrant différentes tailles d'appareils, configurations de faisceaux et fréquences, et pouvant être utilisées aussi bien dans les cours d'eau

peu profonds que dans les rivières profondes. Les profileurs de courant acoustique à effet Doppler peuvent être montés sur de petits bateaux télécommandés, des supports flottants attachés ou des bateaux à moteur, selon les caractéristiques de la masse d'eau. Ils fournissent un moyen fiable pour effectuer des mesures de débit rapides et précises, même sur des cours d'eau importants et dans des conditions de débit variables, y compris lors d'inondations, et permettent de documenter l'étendue spatiale des schémas de vitesse du courant. En revanche, les profileurs de courant acoustique à effet Doppler ne peuvent pas mesurer la vitesse près de la surface, au niveau du lit du cours d'eau ou près des berges, mais ces limitations sont compensées par un logiciel fourni avec les appareils et qui calcule les vitesses dans les zones non mesurées, ou devrait être compensées *in situ* par des mesures d'orientation supplémentaires à l'aide d'un courantomètre. L'équipement associé aux profileurs de courant acoustique à effet Doppler est cher et nécessite une expertise et une formation importantes. Un point fondamental à prendre en considération avant d'envisager un programme de suivi serait donc de se demander si l'équipement et la formation devront être achetés, ou s'il serait préférable d'acheter les évaluations par profileur de courant acoustique à effet Doppler en tant que service. Il n'existe aucun protocole spécifique pour mesurer les vitesses d'écoulement du courant dans les différents types d'habitats de l'esturgeon.

4.3.2.4 Oxygène et autres variables de la qualité de l'eau

La concentration en oxygène dissous (OD) et la saturation en oxygène (O_2 -%), ainsi que d'autres variables de la qualité de l'eau considérées comme pertinentes (pH et température, par ex.) doivent être mesurées *in situ* à l'aide d'appareils de mesure de terrain appropriés.

D'une manière générale, les appareils de mesure de terrain doivent être étalonnés conformément aux instructions du fabricant. Toute mesure de variables sur site doit être effectuée avant les prélèvements biologiques afin d'éviter que la turbidité des sédiments causée par l'équipe d'échantillonnage n'affecte les résultats. Toutes les données et observations de terrain doivent être enregistrées dans un protocole de terrain (Wolfram et al., 2019).

Afin de documenter la fonctionnalité des sites de fraie et de développement précoce, l'oxygénation doit également être mesurée à proximité ou directement dans l'eau interstitielle du substrat, à l'aide d'un capteur optique à fluorescence (Neill et al., 2014). Les tendances temporelles des principales variables chimiques et physiques pertinentes pour l'habitat doivent être suivies sur une période prolongée et tout au long du cycle journalier afin d'obtenir les minima et les maxima des valeurs examinées.

En cas d'effets préjudiciables réels ou soupçonnés sur la qualité de l'eau affectant la vie et le cycle de vie des esturgeons, des sorties de suivi régulières ou même un suivi en temps réel à des endroits et à des moments stratégiques devraient être menés. Des lignes directrices globales pour la mesure de l'OD en eau douce et en eau salée et pour le suivi de la qualité générale de l'eau ont été élaborées

(Doudoroff & Shumway 1970; Culberson 1991; Best et al., 2007; Directive-cadre sur l'eau (2000/60/EC); Behmel et al., 2016; HELCOM/Andreasson & Kronsell; U.S. Geological Survey (Institut d'études géologiques des États-Unis) 2020). Il n'existe aucun protocole spécifique pour mesurer l'oxygène et évaluer la qualité de l'eau dans les différents types d'habitats de l'esturgeon.

4.3.2.5 Demande biochimique en oxygène (DBO) et échantillons d'eau

Prélever des échantillons d'eau et mesurer la DBO sont des procédures normales dans le suivi des eaux de surface, et il existe de nombreux protocoles. La DBO et son échantillonnage en tant que variable environnementale sont mentionnés séparément ici, car ils ont une certaine importance pour l'esturgeon. Un exemple fondé sur Wolfram et al., (2019) est présenté ultérieurement.

Le matériau du conteneur d'échantillon, et tout traitement nécessaire des échantillons d'eau (filtration ou stabilisation, par ex.) dépendent des variables à analyser et des instructions du laboratoire. Les bouteilles PEHD sont adaptées pour de nombreuses variables. En revanche, il convient d'utiliser des flacons de Karlsruhe pour la DBO₅. Les conteneurs d'échantillonnage (ainsi que toutes les unités de filtration et substances de conservation/stabilisation) doivent être étiquetés de manière à indiquer clairement le site d'échantillonnage ou le cours d'eau.

Le prélèvement d'échantillons d'eau pour des analyses chimiques doit être effectué avant le prélèvement d'échantillons biologiques afin d'éviter que les sédiments brassés n'affectent les résultats. Lors de l'échantillonnage, il convient de faire attention aux éventuels effets perturbateurs en amont, qui peuvent entraîner une augmentation de la turbidité.

La bouteille d'échantillonnage doit être rincée avec de l'eau de l'échantillon avant d'être remplie. L'échantillon est prélevé directement à la main avec un pot séparé ou à l'aide d'une tige (télescopique) munie d'un pot à son extrémité. Si deux bouteilles ou plus sont prélevées sur le même site, toutes les bouteilles doivent être remplies à l'aide du même pot. Les échantillons doivent être prélevés de manière à éviter toute contamination par des débris, des sédiments ou des particules (plus grosses) de quelque nature que ce soit. Les échantillons ne doivent pas non plus comporter de film de surface ou de couches flottantes. Il faut éviter de prélever les échantillons à la surface, au fond, au niveau des berges d'un cours d'eau ou à proximité de ces zones. La plupart des échantillons représentatifs sont prélevés à environ 30 cm sous la surface ou au milieu de la colonne d'eau.

L'eau prélevée doit être transférée dans la bouteille sans aucune turbulence le long des parois internes de la bouteille afin d'éviter un contact supplémentaire avec l'air (oxygène). La bouteille PEHD doit être entièrement remplie et légèrement pressée au moment de visser le bouchon de manière à évacuer les bulles d'air, ce qui va permettre une homogénéisation sans perte au laboratoire.

Pour la DBO₅, on remplit deux flacons de Karlsruhe (fioles coniques avec bouchons en verre) de 250 mL. L'échantillon doit atteindre au moins 1 cm à l'intérieur de

l'entonnoir en verre situé sur le dessus de la bouteille. Un barreau d'agitation magnétique est ensuite ajouté et le flacon est fermé avec le bouchon en verre. L'excédent d'eau dans l'entonnoir ne doit pas être vidé.

Toutes les bouteilles sont placées dans des boîtes de refroidissement immédiatement après l'échantillonnage (Wolfram et al., 2019).

Pour déterminer la DBO₅ et prélever des échantillons sur des types d'habitats de l'esturgeon spécifiques, il convient de suivre les instructions suivantes :

- Utiliser des conteneurs propres et stériles pour le prélèvement des échantillons d'eau et la procédure d'échantillonnage, comme cela est décrit ci-dessus.
- Utiliser un compteur d'oxygène dissous (OD) fiable pour mesurer les concentrations initiales (au moment de la collecte de l'échantillon) et finales en oxygène dissous.
- Maintenir un incubateur à température contrôlée (20 ± 1 °C) pour l'incubation des bouteilles de DBO.
- Clairement identifier et documenter l'emplacement exact des sites d'échantillonnage.
- Prélever les échantillons d'eau à différentes profondeurs et à différents endroits afin de saisir les variations potentielles de la DBO₅.
- Planifier les échantillonnages afin qu'ils coïncident avec les périodes critiques pour l'utilisation des habitats de l'esturgeon, en tenant compte des facteurs associés aux saisons et aux stades du cycle de vie.
- Préserver les échantillons avec des agents de préservation appropriés afin de minimiser les variations de la DBO au cours du transport vers le laboratoire.
- Incuber les bouteilles de DBO₅ à 20 ± 1 °C dans l'obscurité pendant 5 jours, et mesurer de nouveau l'oxygène dissous à la fin.
- Inclure des bouteilles de contrôle sans source de carbone afin d'évaluer les changements de l'oxygène de référence.
- Calculer la DBO₅ comme la différence entre les concentrations initiales et finales d'oxygène dissous.
- Valider les résultats en les comparant avec les bouteilles de contrôle et envisager de répéter les analyses si besoin.
- Documenter avec précision les détails de l'échantillonnage, les procédures d'analyse et les résultats.
- Interpréter les niveaux de DBO₅ dans la contexte des exigences des habitats de l'esturgeon.
- Sur la base des évaluations de la DBO, formuler des recommandations pour le suivi des habitats et proposer d'éventuelles mesures correctives pour le maintien ou l'amélioration de la qualité de l'eau pour les esturgeons.

4.3.2.6 Conditions hydrologiques

Des limnimètres, des débitmètres et des échantillonneurs d'eau automatisés peuvent être utilisés pour observer et enregistrer les évolutions pertinentes ou les

schémas de débit significatifs pour l'utilisation de l'habitat (qui agissent par exemple comme déclencheur de la migration de fraie ou affectent les conditions de l'habitat) (Burt 2003; Brierly et al., 2010; Chen & Wu 2011). Il n'existe aucun protocole spécifique pour évaluer et interpréter les conditions hydrologiques dans les différents types d'habitats de l'esturgeon. Des exemples de recherche sur les conditions hydrologiques concernant les habitats de l'esturgeon et ses utilisations de l'habitat sont présentés dans Hamel et al., 2014; Porter 2017; Porter & Schramm 2018; Klimley et al., 2020, and Chang et al., 2021.



Figure 7 : Site de fraie historique de l'esturgeon dans la Narva avec un débit suffisant (© Meelis Tambets).



Figure 8 : Même site de fraie que sur la photo précédente, mais avec un débit insuffisant pour la fraie de l'esturgeon (© Meelis Tambets).

4.3.2.7 Substrats de fond grossiers

Les substrats peuvent être prélevés directement, analysés visuellement et classés à l'aide de carottiers à sédiments, de bennes d'échantillonnage, de dragues ou par photographie sous-marine, vidéographie et sonar visuel. Des plongeurs ont également été envoyés sur des sites de fraie de l'esturgeon difficiles d'accès afin d'y examiner les substrats (Arndt et al., 2006).

Des protocoles généraux d'échantillonnage des différents substrats dans les masses d'eau sont disponibles (par ex. Mudroch & Azcue 1995, Clapcott et al., 2011, Skilbeck et al., 2017, DES 2018, Tuit & Wait 2020, BC Ministry of Environment, Lands and Parks (ministère de l'environnement, des terres et des parcs de la Colombie-Britannique)) ; la classification, le traitement des échantillons et l'analyse des types de substrats et de leurs compositions varient d'une étude à l'autre et ne sont pas normalisés en ce qui concerne les habitats de l'esturgeon.

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses méthodes permettant de mesurer les dimensions des clastes ont vu le jour. Les dimensions des clastes sont organisées selon l'échelle dite « de Wentworth », qui classe les particules de sédiments meubles selon un logarithme de base 2, allant des petites particules d'argile aux gros blocs rocheux. La mesure des tailles de particules peut être effectuée avec des méthodes manuelles ou basées sur l'image. Les méthodes manuelles impliquent la mesure physique des grains de sédiment (par tamisage des échantillons, par ex.). À un niveau basique, les grains sont traités comme des

ellipsoïdes triaxiaux qui peuvent être mesurés à l'aide de trois axes, a, b et c, l'axe a désignant l'axe le plus long, b l'axe intermédiaire et c l'axe le plus court.

Des descriptions et protocoles détaillés des méthodes classiques de mesure de la taille des grains, ainsi que les avantages et inconvénients des méthodes, sont présentés dans Bunte & Abt (2001).

Cependant, l'échantillonnage direct dérange le lit des cours d'eau et peut interférer avec l'utilisation de l'habitat, il nécessite le transport de sédiments lourds puis leur analyse en laboratoire, il est relativement coûteux et demande du temps.

Les substrats de fond grossier, tels que ceux rencontrés sur les sites de fraie et les sites de développement des embryons et des larve vésiculées de l'esturgeon, posent des difficultés de suivi spécifiques. Les vitesses de courant élevées et les grandes dimensions du substrat sur les sites de fraie de *Acipenser spp.* rendent souvent inefficaces l'échantillonnage direct quantitatif et l'utilisation de bennes et de dragues (Chiotti et al., 2008). Par conséquent, des techniques qualitatives ont souvent été utilisées pour caractériser le substrat de fraie (Parsley et al., 1993; Sulak and Clugston 1998), qui ont entraîné des ambiguïtés lors de la comparaison du substrat des sites de fraie d'une étude à l'autre. À l'inverse, les photographies et les images vidéo sous-marines ont été utilisées avec succès pour quantifier les tailles des particules du substrat et l'hétérogénéité du substrat dans les systèmes aquatiques, et ont permis de produire un système de mesure quantitatif plus facile à comparer (Boyero 2003; Whitman et al., 2003; Rubin 2004; Graham et al., 2005a; 2005b; Detert & Weitbrecht 2012), mais qui nécessite des dispositions afin de garantir une distance fixe optimale pour l'identification des tailles des particules du substrat, pour minimiser les effets de distorsion et pour maximiser la surface couverte par l'image. Ainsi, les photographies et les vidéos ne nécessitent pas d'analyse manuelle en laboratoire, et permettent une plus grande couverture géographique et une plus grande fréquence des observations (Rubin et al., 2007), mais elles sont limitées par un champ de vision réduit, la possibilité de faire des erreurs de positionnement et les conditions de forte turbidité.

Les substrats émergés peuvent également être évalués par télédétection à l'aide de drones et d'aéronefs pilotés (Carbonneau et al., 2005; Buscombe et al., 2010; Dugdale et al., 2010; Carbonneau et al., 2018; Woodget et al., 2018), mais ils ne sont pas nécessairement représentatifs de la situation des substrats submergés adjacents en eau profonde et à des vitesses de courant élevées.

L'obtention d'un nombre suffisant d'échantillons sous-marins de cette façon, afin de caractériser ou de cartographier un bief ou un cours d'eau entier, peut s'avérer trop longue et trop coûteuse pour être pratique dans les grands cours d'eau, et peut ne pas refléter la distribution spatiale ou les motifs des sédiments (disparité, par ex.) de manière adéquate (Hamill et al., 2016). Les dispositifs hydroacoustiques (par ex. sonar multifaisceaux) constituent une solution alternative, et peuvent être utilisés pour classifier les textures sur des zones étendues sans qu'il soit absolument nécessaire de procéder à un échantillonnage direct des matériaux du lit (Kaeser and Litts 2010; Kaeser et al., 2012; Buscombe et al., 2014, 2015). La cartographie de classification de la texture du lit s'effectue à l'aide d'un sonar multifaisceaux en analysant soit des cartes bathymétriques

haute résolution, soit la rétrodiffusion acoustique des sédiments du lit du cours d'eau.

Des algorithmes statistiques ont été développés afin de créer des cartes de la texture du lit à partir de modèles numériques d'élévation à haute résolution dérivés du sonar multifaisceaux, en développant une calibration entre la taille des grains et l'écart type des élévations locales (Brasington et al., 2012). Cependant, le traitement des données sonar multifaisceaux nécessite un équipement coûteux, des opérateurs expérimentés, des logiciels commerciaux et d'importantes opérations de post-traitement avant de pouvoir produire un modèle numérique d'élévation précis (Kaplinski et al., 2009). Ces exigences limitent l'utilisation des échosondeurs multifaisceaux à des cas spécialisés où l'objectif principal est la collecte d'informations bathymétriques (Hamill et al., 2016).

4.3.2.8 Évaluation du substrat par sonar à balayage latéral

Le **sonar à balayage latéral (SBL)** peut être utilisé pour le suivi des habitats de l'esturgeon (Kaeser & Litts 2010; Hook 2011; Kaeser et al., 2012; Litts & Kaeser 2016; Walker & Alford 2016) et pour le suivi des populations (Hughes et al., 2018; Kazyak et al., 2020; Flowers & Hightower 2013; Flowers & Hightower 2015; Fund et al., 2016; Andrews et al., 2020; Vine et al., 2019; Brown 2020). Il permet d'identifier de grands esturgeons et des poissons isolés dans certaines conditions, et d'effectuer une cartographie benthique relativement rapide de portions de cours d'eau. Il s'est avéré particulièrement utile pour créer des images continues haute résolution du fond des masses d'eau comprenant des cartes bathymétriques et les compositions du substrat, y compris dans des conditions difficiles telles que des cours d'eau profonds, troubles et difficiles d'accès. Blondel (2010) fournit un aperçu complet de cette technologie et des méthodologies associées.

Il faut cependant savoir qu'en l'absence d'étalonnage et d'un traitement ultérieur, seule la « rugosité » du lit du cours d'eau est évaluée. Le SBL est un système de sonar actif constitué d'un projecteur, d'un hydrophone et d'un enregistreur ou d'une unité d'affichage. Le projecteur convertit une impulsion électrique en ondes sonores, et l'hydrophone fait l'inverse. Le projecteur et l'hydrophone sont généralement combinés en un seul dispositif, le transducteur. Le transducteur peut être remorqué derrière un navire ou installé directement sur le bateau, permettant d'effectuer des relevés sur tous les types de masses d'eau navigables. Le transducteur émet une impulsion acoustique en forme d'éventail qui voyage dans les deux directions perpendiculairement à la direction de déplacement du navire ou bateau remorqueur. Lorsque les ondes sonores se propagent vers l'extérieur entrent en contact avec des surfaces submergées, elles sont renvoyées vers le transducteur avec une intensité déterminée par la forme, la densité et la position des objets rencontrés. La variation d'intensité est affichée sur l'unité d'enregistrement / d'affichage sous la forme d'une variation de luminosité du signal affiché, les parties lumineuses et sombres représentant des échos forts ou faibles selon les propriétés de réflexion des objets sur le fond. Chaque impulsion est suivie d'une autre, et les lignes d'affichage qui en résultent forment une image cohérente du fond. Associées à des informations de localisation fournies par un

GPS, ces images peuvent être géoréférencées pour obtenir des informations spatiales précises sur le fond du cours d'eau et sa cartographie.

Des sonars à balayage latéral de haute précision et de qualité commerciale ont été utilisés pour réaliser l'imagerie haute résolution des fonds marins (Blondel 2009). Cette technologie a été largement utilisée, principalement dans les environnements marins et lenticulaires, car les équipements étaient autrefois volumineux, encombrants et relativement coûteux. Les capteurs étaient contenus dans un sonar remorqué en forme de torpille, qui devait être tiré par un navire de recherche. Le sonar remorqué lui-même pouvait atteindre une longueur de plus de 2 mètres. Ces transducteurs conventionnels de type « poissons sonars » ont toutefois une applicabilité limitée dans les rivières et les cours d'eau parce que le transducteur est remorqué en profondeur, ce qui limite son utilisation aux masses d'eau importantes, qu'il peut aussi entraver le positionnement précis des sonars et est relativement coûteux.

Des plateformes équipées de sonars à balayage latéral grand public comparativement bon marché utilisées dans la pêche récréative, par exemple, sont disponibles depuis peu (Hamill et al., 2016). Ces sonars à balayage latéral peuvent être déployés dans les cours d'eau peu profonds, depuis différentes embarcations, être contrôlés à distance ou par une seule personne ayant peu d'expérience des sonars, et ne sont pas autant limités par la profondeur que les sonars à balayage latéral remorqués ou par la turbidité dans la même mesure que les vidéos sous-marines (Kaeser and Litts 2010). Les transducteurs des sonars à balayage latéral peuvent être fixés directement sur un bateau, ce qui facilite leur déploiement sur tous les types de cours d'eau navigables.

Le traitement des enregistrements réalisés par sonar à balayage latéral s'effectuait auparavant à l'aide de logiciels de cartographie maritime et d'interprétation visuelle disponibles dans le commerce. D'autres logiciels sont utilisés pour convertir les enregistrements d'un format binaire en différents formats de données spatiales permettant de visualiser facilement les données. Les parcelles de sédiments peuvent ensuite être délimitées afin de créer des cartes de la texture du lit (Kaeser et al., 2012). Il est cependant difficile de reproduire des cartes de la structure du lit dérivées de l'interprétation visuelle car l'interprétation des transitions depuis des sédiments de taille similaire est subjective. Buscombe et al., (2015) ont proposé une méthode automatisée qui permet de classer les textures du lit selon les groupements de l'échelle de Wentworth, en analysant les données enregistrées par un sonar à balayage latéral grand public, auxquelles ont été appliquées les corrections acoustiques appropriées.

Hamill et al., (2018) ont développé une méthode permettant de réaliser une segmentation automatisée des textures du lit en deux à cinq plages de grosseur des grains, à partir d'images prises par un sonar à balayage latéral. Des statistiques de texture du second ordre ont été utilisées conjointement à un modèle de mélange gaussien afin de classer le lit hétérogène en petites parcelles homogènes de sable, de gravier et de pierres avec une précision moyenne respective de 80 %, 49 % et 61 %. Les proportions moyennes de ces types de sédiments en fonction du bief ne dépassaient pas les 3 % comparées à des cartes similaires dérivées d'un sonar multifaisceaux.

La combinaison d'un système de sonar à balayage latéral numérique spécialisé dans la caractérisation du fond et de systèmes GPS et SIG, ainsi que d'un logiciel de statistiques, peut être utilisée pour obtenir des données géoréférencées et réaliser une cartographie acoustique des types, de la localisation et de la bathymétrie des substrats de fond en une seule opération.

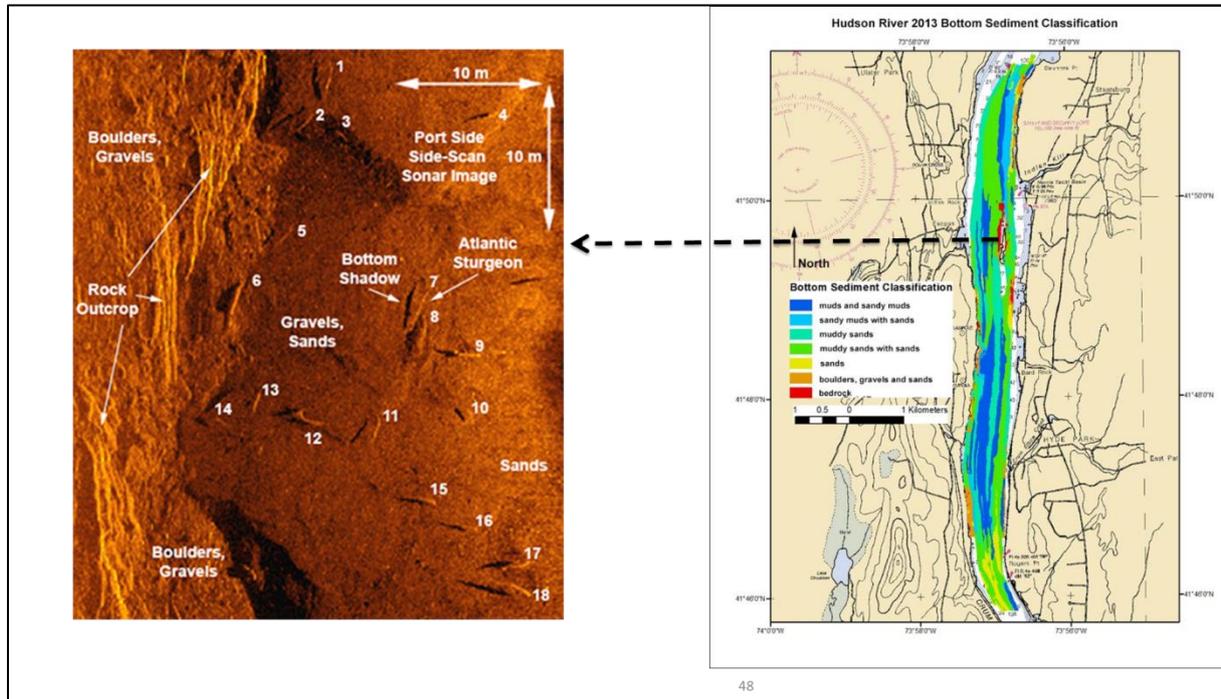


Figure 9 : Utilisation d'un SBL pour la classification des sédiments de fond. Les numéros 1 à 18 sur l'image sonar de gauche représentent des esturgeons individuels (© Dewayne Fox).

Traduction des termes de la figure 9 :

Image de gauche : *Boulders, Gravels* = Blocs rocheux, Gravier ; *Port Side Side-Scan Sonar Image* = Côté bâbord, Image de sonar à balayage latéral ; *Rock Outcrop* = Affleurement rocheux ; *Bottom Shadow* = Ombre sur le fond ; *Atlantic Sturgeon* = Esturgeon de l'Atlantique ; *Gravels, Sands* = Gravier, Sables ; *Sands* = Sables ; *Boulders, Gravels* = Blocs rocheux, Gravier ; Image de droite : *Hudson River 2013 Bottom Sediment Classification* = Classification des sédiments de fond de la rivière Hudson (2013) ; *North* = Nord ; Légende : *Bottom Sediment Classification* = Classification des sédiments de fond ; *muds and sandy muds* = boues et boues sableuses ; *sandy muds with sands* ; boues sableuses avec sables ; *muddy sands* = sables boueux ; *muddy sands with sands* = sables boueux avec sables ; *sands* = sables ; *boulders, gravels and sands* = blocs rocheux, graviers et sables ; *bedrock* = roche-mère ; Échelle : *kilometers* = kilomètres

Il n'existe pas à ce jour de protocoles standards pour l'évaluation des habitats de l'esturgeon à l'aide de SBL, mais de multiples combinaisons propriétaires d'appareils (ajoutant des capacités telles que la bathymétrie et le positionnement GPS) et de logiciels sont disponibles, qui comprennent également des appareils moins chers destinés au grand public et des logiciels libres qui peuvent être utilisables et utiles dans un scénario donné (Buscombe 2017; Hamill 2018). Le

tableau 14 résume les principaux aspects de la mise en œuvre des informations ci-dessus.

Tableau 14 : Principaux aspects de l'échantillonnage et de la cartographie des substrats selon différentes méthodes décrites dans le texte.

Méthode	Effort	Avantages et inconvénients
Manuel	<p>Coût : élevé (main-d'œuvre pour un échantillonnage complet)</p> <p>Équipement : faible (pour l'échantillonnage, mais implique des analyses en laboratoire)</p> <p>Temps nécessaire : élevé (pour des échelles spatiales plus grandes)</p> <p>Expérience/expertise : moyenne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • méthodologies et protocoles facilement accessibles • utile pour la vérification sur le terrain et l'étalonnage des méthodes basées sur l'image / l'acoustique • dérange l'habitat • habitats en eau profonde / à courant rapide difficiles voire impossibles à échantillonner • peut nécessiter l'échantillonnage par des plongeurs • ne convient pas à la cartographie et à la quantification des habitats à grande échelle, faible couverture spatiale
Par photographie (vidéo)	<p>Coût : faible (posés au sol et portables, moyen à élevé pour les drones et aéronefs pilotés)</p> <p>Équipement : faible à élevé (au sol, aérien, piloté)</p> <p>Temps nécessaire : faible à moyen (selon l'étendue à cartographier)</p> <p>Expérience/expertise : moyenne à élevée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • échantillonnage possible dans les habitats en eau profonde / à courant rapide • utile pour la vérification sur le terrain et l'étalonnage des méthodes basées sur l'acoustique • non invasif • limité par un champ de vision réduit, la possibilité d'erreurs de positionnement et les conditions sous-marines de forte turbidité ou de faible visibilité
Sonar à balayage latéral	<p>Coût : moyen ou élevé (qualité grand public ou commerciale)</p> <p>Équipement : moyen à élevé (qualité grand public vs. qualité commerciale), bateau, poisson sonar remorqué ou transducteur,</p>	<ul style="list-style-type: none"> • convient à la cartographie des substrats à grande échelle en réalisant l'imagerie continue de plusieurs kilomètres de chenal en quelques heures • offre des capacités d'imagerie à haute résolution, permettant une visualisation détaillée du

	<p>véhicule tracteur, matériel informatique et logiciels</p> <p>Temps nécessaire : faible</p> <p>Expérience/expertise : moyenne à élevée</p>	<p>fond des cours d'eau et des caractéristiques des habitats</p> <ul style="list-style-type: none"> • non invasif • nécessite d'autres méthodes pour l'étalonnage et un post-traitement pour la quantification • combinaisons d'appareils, de logiciels et de fonctionnalités (par ex. la bathymétrie multifaisceaux, le référencement GPS, l'intégration SIG, la cartographie continue) disponibles pour des appareils propriétaires coûteux • les appareils grand public moins coûteux et la mise en œuvre de solutions logicielles libres nécessitent une adaptation ainsi que le développement et l'ajustement de solutions individuelles
--	--	---

4.3.2.9 Substrats de fond fin et organismes alimentaires (fluviaux)

Le lavage gastrique et l'analyse du contenu du tube digestif des esturgeons peut apporter des informations sur les préférences en matière d'organismes alimentaires en fonction du stade de vie de l'esturgeon et donc potentiellement sur certains critères d'habitat (Holčík 1989; Damon-Randall et al., 2010; Crossman et al., 2016; Zarri & Palkovacs 2019; Margaritova et al., 2021). Pour une description du lavage gastrique chez l'esturgeon, voir les lignes directrices techniques concernant les mesures de conservation *ex situ* de l'esturgeon (Gessner et al., 2024). Pour un aperçu complet de l'analyse du contenu gastrique chez le poisson, voir Manko (2016).



Figure 10 : Lavage gastrique réalisé sur un juvénile d'esturgeon pour l'identification des organismes alimentaires (© WWF-Bulgarie).

La documentation disponible sur le sujet répertorie différents types d'organismes alimentaires en fonction des espèces et des stades de vie, mais ne donne aucune information sur les espèces alimentaires indispensables (l'alimentation opportuniste et les changements dans les communautés de macro-invertébrés ont également leur importance (Strel'nikova 2012)), les abondances minimales requises ou les capacités de charge des habitats de nurricerie et d'alimentation basées sur la biomasse ou l'abondance des organismes alimentaires, ainsi que sur les critères d'habitat spécifiques pouvant être déduits de ces informations.

Les deux groupes écologiques du zooplancton et des invertébrés benthiques présents sur les substrats de fond fin et dans ceux-ci (zones à faible débit dans le chenal principal ou étroitement connectées à celui-ci dans un environnement fluvial) jouent un rôle majeur dans l'alimentation des larves, juvéniles, subadultes et adultes d'esturgeon, y compris des organismes appartenant à des groupes tels que les crustacés, larves d'insectes, oligochètes et polychètes (Muir et al., 1988; Holčík 1989; Chiasson et al., 1997; Muir et al., 2000; Nilo et al., 2006; Gessner et al., 2007; Brosse et al., 2011; HELCOM 2019; Sun et al., 2019; Holley et al., 2022). De nombreux protocoles sont disponibles pour l'échantillonnage du zooplancton et des invertébrés benthiques à des fins qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives. Selon Blaž et al., (2021), l'objectif principal de l'échantillonnage des organismes alimentaires de l'esturgeon est de confirmer leur

présence et leur abondance relative, de sorte que l'échantillonnage qualitatif est généralement suffisant. Cela dépend néanmoins des objectifs spécifiques de l'étude en question.

Des exemples sont donnés ci-dessous en guise de référence (adaptés des données du ministère de l'environnement, des terres et des parcs de la Colombie-Britannique (BC Ministry of Environment, Lands and Parks)). Des protocoles spécifiques devraient être établis ou adaptés, si le modèle et l'objectif de l'étude l'exigent.

4.3.2.9.1 Le zooplancton

Le zooplancton (rotifères, cladocères, etc.) est constitué d'animaux flottant librement en suspension dans les eaux libres ou pélagiques. Il est généralement collecté à l'aide d'un filet conique au maillage spécifique (allant de très petites mailles de 64 µm de diamètre à des mailles plus larges de 256 µm). Les petites mailles de filet se bouchent plus facilement que les mailles plus grandes, mais les petits organismes passent facilement au travers de plus grandes ouvertures. Le maillage requis pour une masse d'eau donnée va dépendre de sa productivité et de l'objectif de l'étude. Le maillage de filet à privilégier, le cas échéant, est de 64 µm avec un diamètre d'ouverture de filet de 20 cm.

Le filet est descendu à une profondeur donnée et remonté directement dans la colonne d'eau (trait vertical). Les alternatives au trait vertical sont les traits horizontaux et obliques, grâce auxquels différentes couches de lacs ou d'eaux marines sont échantillonnées individuellement (trait horizontal) ou en tant que composite (trait oblique). Il s'agit de techniques élaborées qui nécessitent un équipement spécialisé fixé au bateau ainsi qu'un filet remorqué qui peut être ouvert et fermé à distance. À moins que des données spécifiques soient requises qui nécessitent l'utilisation des traits horizontaux et obliques, ceux-ci ne sont pas utilisés. Le trait vertical est donc le seul protocole qui sera décrit ci-dessous.

PROTOCOLE (zooplancton, trait vertical)

(a) S'assurer que la corde est solidement fixée à l'ouverture du filet à plancton et que le bout libre est attaché au bateau.

(b) À l'arrivée sur le site choisi, descendre le filet à la profondeur indiquée dans le plan du projet.

Remarque : la distance réelle parcourue par le filet dans l'eau doit être enregistrée, et le volume total d'eau qui passe à travers le filet doit être calculé (voir la formule de quantification ci-dessous).

(c) Dans les masses d'eau plus petites, remonter le filet à la main d'un geste régulier et sans précipitation, à une vitesse de 0,5 m/s. Dans les grandes masses d'eau, lors de longues pêches au filet, utiliser un bossoir, une poulie compteuse et un treuil. La vitesse maximale de remorquage devrait être 1 m/s.

(d) Une fois le filet remonté à la surface, rincer le filet en soulevant et en abaissant dans l'eau le corps du filet situé sous la bouche du filet. Puis asperger l'extérieur du filet de haut en bas avec de l'eau déminéralisée. Cela permet de faire tomber le plancton collé dans le cul de filet (récipient amovible au bout du filet).

- (e) Détacher le cul de filet et transvaser avec soin l'eau et le plancton dans une bouteille pré-étiquetée. Rincer le cul de filet plusieurs fois, en versant chaque eau de rinçage dans la bouteille (cela permet de s'assurer de recueillir tout le plancton).
- (f) Laver le filet par rinçage (en le tirant dans l'eau sans le cul de filet). Cette étape est absolument nécessaire avant de continuer vers le site d'échantillonnage suivant (en particulier entre différentes masses d'eau).
- (g) Préserver l'échantillon dans de l'éthanol à 70 % (70 mL d'éthanol à 100 % pour chaque 30 mL de volume d'échantillon) et le placer dans une glacière pour l'envoi ou le transport au laboratoire pour analyse.

Formule : volume (V) d'eau passé à travers un trait de zooplancton

$$V = \pi r^2 d$$

V : volume d'eau filtré à travers un échantillonneur

π : 3,1416

r : rayon de la bouche du filet

d : profondeur de l'échantillonneur à filet au début du trait vertical (longueur totale du trajet dans l'eau)

Avantages et inconvénients

- Fournit une méthode d'évaluation quantitative grâce au calcul du volume d'eau filtrée.
- Nécessite un filet à grand diamètre pour parer au mouvement d'évitement du zooplancton mobile.
- Peut être adapté à différentes masses d'eau, y compris des masses d'eau petites et grandes.
- Permet la préservation des échantillons collectés pour une analyse ultérieure en laboratoire.
- Nécessite un équipement spécialisé pour la réalisation de traits horizontaux et obliques, le cas échéant.

Ressources et efforts nécessaires

- **Coût :** faible
- **Équipement :** faible (filet conique au maillage spécifique, bateau, corde, bouteilles pour la préservation des échantillons, eau déminéralisée, éthanol pour la préservation)
- **Temps nécessaire :** faible
- **Expérience/expertise :** faible à moyenne (formation de base à la manipulation des filets et à la préservation des échantillons)

4.3.2.9.2 Les invertébrés benthiques

Les invertébrés benthiques présents dans les lacs ou les grands cours d'eau à courant lent sont généralement collectés de la même manière que les échantillons de sédiments. C'est dans le traitement de l'échantillon après son prélèvement que les techniques divergent. Le type d'échantillonneur qu'il convient d'utiliser sur un site donné dépendra des conditions du site et de l'objectif de l'étude (par ex. benne

Ekman, benne Petersen, benne Ponar, benne Van Veen, carottier). L'équipement à utiliser (benne ou carottier) sera dicté par le plan du projet et doit être indiqué dans le carnet de terrain et la liste de contrôle pour le pré-échantillonnage.

PROTOCOLE (échantillonnage en bateau à l'aide d'une benne)

(a) S'assurer que la corde est solidement fixée à la benne et que le bout libre de la corde est attaché au bateau.

(b) Régler le dispositif d'échantillonnage avec les mâchoires ouvertes. **Il convient d'être très prudent dans la manipulation du dispositif lorsque celui-ci est réglé, car une fermeture accidentelle des mâchoires peut entraîner des blessures graves.**

(c) Faire descendre la benne jusqu'à ce qu'elle repose sur le sédiment (son propre poids suffit à pénétrer des sédiments meubles). À ce stade, le relâchement de la ligne active le mécanisme de fermeture des mâchoires des bennes Ponar et Petersen.

(d) Dans le cas de la benne Ekman, faire descendre le messageur pour « actionner » le mécanisme de libération.

(e) Remonter la benne lentement afin de minimiser les effets de la turbulence (qui peut entraîner une perte/perturbation des sédiments de surface).

(f) Placer un récipient (par ex. un bac peu profond) sous la benne juste au moment où elle traverse la surface de l'eau.

Remarque : si les mâchoires n'étaient pas complètement fermées, l'échantillon doit être abandonné. Jeter l'échantillon dans un seau si la seconde tentative de prélèvement est effectuée dans la même zone. Rejeter l'échantillon non désiré uniquement après que le « véritable » échantillon a été prélevé avec succès.

(g) Placer un tamis entre la benne et le bac et ouvrir délicatement les mâchoires pour permettre aux sédiments de se déverser dans le tamis. La dimension des mailles du tamis dépendra de l'objectif de l'étude, mais une dimension courante des mailles est de 0,20 mm (200 µm). Cette taille constitue la limite inférieure pratique pour l'étude générale des organismes benthiques. Il n'est pas aussi crucial d'avoir un petit maillage lorsque la seule analyse qui sera effectuée est celle de la biomasse.

(h) Enregistrer immédiatement (dans le carnet de terrain) les observations concernant l'aspect des sédiments (texture, couleur, odeur, présence de biote, présence de détritus, etc.).

(i) Rincer le tamis avec de l'eau déminéralisée ou de l'eau du site pour retirer le plus de sédiment possible.

(j) Transférer les organismes dans une bouteille d'échantillonnage pré-étiquetée et les préserver dans de l'éthanol à 70 %. Le formol peut être utilisé comme

fixateur pour la préservation initiale mais devrait ensuite être rincé et l'échantillon transféré dans de l'éthanol à 70 %.



PROTOCOLE (échantillonnage en bateau à l'aide d'un carottier)

(a) Ouvrir la valve et régler le mécanisme de déclenchement. S'assurer que la corde est solidement fixée au carottier et attacher le bout libre de la corde au bateau.

(b) La plupart des carottiers sont conçus pour être simplement descendus dans le sédiment et pour que le tube de carottage se remplisse sous l'effet de leur propre poids, et il n'est pas nécessaire de les laisser tomber d'une quelconque hauteur. Il faudra tenir compte du type de carottier utilisé et de la nature des sédiments prélevés.

(c) Faire descendre le messenger pour actionner le mécanisme de déclenchement.

(d) Récupérer le carottier avec précaution et placer un bouchon dans l'ouverture inférieure **avant** de le sortir de l'eau afin d'éviter toute perte d'échantillon.

(e) Retirer le tube de carottage ou la gaine du carottier et boucher l'extrémité supérieure.

Remarque : une fois sur le rivage, l'échantillon peut être traité comme un échantillon global ou être segmenté et

les organismes séparés du sédiment par strates.

Figure 11 : Prélèvement de substrat à l'aide d'une benne d'échantillonnage pour une analyse ultérieure de la présence et de la composition des organismes alimentaires (© WWF-Bulgarie).

et la longueur totale de la carotte). Chaque strate peut être tamisée et son contenu placé dans des bouteilles d'échantillonnage pré-étiquetées, ou bien les sédiments non tamisés peuvent être placés directement dans des bouteilles d'échantillonnage pré-étiquetées.

(g) Préserver les échantillons dans de l'éthanol à 70 %.

Remarque : il est préférable de segmenter la carotte le plus tôt possible après son prélèvement. Au fur et à mesure que les sédiments se réchauffent, ils ont tendance à se dilater dans le tube de carottage. Le réchauffement entraîne une libération beaucoup plus rapide des gaz de décomposition et, si des bulles sont expulsées à travers la carotte, elles vont altérer la stratigraphie.

Soucek et al., (2023) fournissent une description du traitement ultérieur des échantillons.

Après l'échantillonnage sur le terrain, les échantillons préservés sont généralement envoyés dans un laboratoire qui va se charger de la séparation, de l'identification et du comptage des invertébrés collectés. Parmi les nombreuses méthodes de comptage disponibles, la méthode à privilégier sera soit le sous-échantillonnage, soit la méthode de dénombrement complet. Les méthodes d'échantillonnage qualitatives (comme dans le cas présent) et semi-quantitatives impliquent généralement un sous-échantillonnage, dans lequel un nombre fixe d'organismes est séparé de la litière. Les comptes fixes peuvent être limités à un nombre d'organismes compris entre 100 et 550 (Carter and Resh, 2001). Bien que le dénombrement complet de tous les organismes collectés dans un échantillon prenne beaucoup de temps, cette approche présente de nombreux avantages. Ces avantages incluent :

- L'identification d'un plus grand nombre de taxons, et en particulier d'un plus grand nombre de taxons rares (Pence et al., 2021).
- La possibilité d'estimer l'abondance totale et, si l'échantillonnage a été effectué dans une zone donnée, d'estimer la densité des organismes par unité de surface.

Une fois les invertébrés triés et comptés, les organismes doivent être identifiés avec un certain degré de spécificité taxonomique. Les identifications se font habituellement au moins au niveau de la famille, mais de préférence au « niveau taxonomique pratique le plus bas », qui, pour de nombreux taxons, est le genre. L'identification au niveau de l'espèce présente des avantages, mais nécessite généralement un haut niveau d'expertise spécifique, ainsi que l'élevage des organismes jusqu'à l'âge adulte pour pouvoir les identifier.

Avantages et inconvénients

- Pénètre dans les sédiments, offrant un aperçu complet des organismes benthiques.
- Permet l'échantillonnage et l'analyse des sédiments par strates, ce qui fournit des informations détaillées sur les caractéristiques des sédiments.
- Facilite la préservation des échantillons pour une analyse ultérieure en laboratoire.
- Inclut des protocoles pour l'enregistrement des observations en ce qui concerne l'aspect, la texture et le biote des sédiments.

- Le processus d'échantillonnage peut brasser les sédiments de surface et affecter la précision des résultats ainsi que l'utilisation de l'habitat.
- Conçu principalement pour les sédiments meubles et peut ne pas convenir à tous les types de substrat.
- La méthode de dénombrement complet peut prendre du temps, en particulier lorsqu'il s'agit de traiter un grand nombre d'échantillons.
- En fonction des objectifs de l'étude, une combinaison de méthodes peut permettre une compréhension plus globale, notamment en ce qui concerne les sources alimentaires des larves d'esturgeon.

Ressources et efforts nécessaires

Coût : moyen.

Équipement : moyen à élevé.

Benne ou carottier (bateau, corde, tamis au maillage spécifique, bouteilles pour la préservation des échantillons, eau déminéralisée, éthanol pour la préservation).

Temps nécessaire : moyen à élevé.

Expérience/expertise : moyenne à élevée (manipulation de matériel spécialisé, connaissances spécifiques nécessaires pour l'identification de groupes d'espèces, d'espèces et de stades de développement).

4.3.2.10 Modélisation de l'habitat

Dans le cadre de la conservation des esturgeons, la modélisation statistique permet d'évaluer les préférences en matière d'habitat, d'identifier les facteurs environnementaux clés qui influent sur la présence d'esturgeons, et au final d'orienter des stratégies de conservation ciblées pour la sauvegarde des esturgeons et de leurs habitats (De Kerckhove et al., 2008; Jarić et al., 2014). La modélisation de l'habitat peut servir à la fois à l'identification et au contrôle des habitats, en fonction de sa mise en œuvre au sein d'un programme de suivi des habitats. Dans le cadre du présent document, la modélisation de l'habitat est utilisée pour contrôler les aires et portions qui répondent aux critères des types d'habitats potentiels.

Avant tout, les modèles d'habitat peuvent aider à prédire les portions et aires utilisées, qui peuvent ensuite être contrôlées par le suivi / la télémétrie et les études d'observation ou de compensation afin d'améliorer les prédictions du modèle, et donc l'adéquation entre les utilisations de l'habitat attendues et réelles dans un système aux conditions changeantes. La modélisation associe les données scientifiques, les informations géospatiales et les algorithmes mathématiques afin de décrire la qualité de l'habitat ou les processus qui favorisent l'utilisation de l'habitat en termes de modélisation, et la relation entre des caractéristiques distinctes des habitats et les préférences de l'espèce pour certaines conditions limites.

Ces modèles permettent d'identifier les facteurs qui influencent le choix et la répartition des habitats de l'esturgeon. Les SIG peuvent être utilisés pour intégrer

des données géospatiales dans les modèles d'habitat. Cela peut comprendre des données pertinentes sur la morphologie des cours d'eau, la bathymétrie, l'occupation des sols et d'autres informations spatiales.

De nombreux modèles ont été utilisés en sciences de l'écologie et pour répondre à différentes questions de recherche. Les **modèles de répartition des espèces** (MRE) et les **modèles d'indice de qualité de l'habitat** (IQH) sont les deux principaux types de modèles utilisés ici à titre d'exemples, parce qu'ils sont également souvent utilisés dans les études sur les milieux aquatiques et sur les types d'habitats de l'esturgeon.

Les **MRE** prédisent la probabilité d'occurrence des esturgeons en se basant sur des variables environnementales, et permettent d'identifier les types d'habitats adaptés et les éventuels changements d'aire de répartition (Yi et al., 2010; Melo-Merino et al., 2020; Charbonnel et al., 2023). Ils fournissent un outil qui permet non seulement de comprendre les préférences des esturgeons en matière d'habitat, mais également de prédire la façon dont les changements dans les conditions environnementales peuvent avoir un impact sur leur répartition. Pour cela, les MRE doivent disposer de critères clairs concernant les choix d'habitat de l'espèce en question et les moteurs associés, ainsi que des données de modélisation pour l'environnement à évaluer suffisamment fiables. Cela nécessite une analyse statistique des 1. **données de répartition observées** associées aux 2. **facteurs d'impact** potentiellement sous-jacents (profondeur, vitesses du courant, turbidité, température, composition du substrat, abondance des organismes alimentaire, etc.). Étant donné que dans la plupart des cas, l'un de ces éléments n'est pas disponible, les MRE peuvent être élaborés malgré la présence des poissons (sans aucune méthode de collecte biaisée), ce qui peut permettre de décrire les caractéristiques de l'habitat qui sont utilisées. Dans les deux cas, les exigences en matière de données et les contraintes liées à la qualité limitent l'applicabilité et la solidité des résultats.

Les MRE peuvent faciliter l'évaluation des effets cumulés de multiples facteurs de stress sur les habitats de l'esturgeon, tels que les impacts potentiels du changement climatique, en prévoyant la façon dont l'évolution des températures et des précipitations pourraient compromettre l'adéquation de l'habitat.

Les modèles d'IQH sont également des outils précieux pour évaluer les impacts potentiels de divers facteurs sur les habitats et les types d'habitats de l'esturgeon, en fournissant un cadre structuré qui permet de quantifier la qualité et l'adéquation des habitats pour l'esturgeon, sur la base de variables environnementales spécifiques (Haxton et al., 2008; Collier 2018; Collier et al., 2022). Les modèles d'IQH permettent d'évaluer les impacts potentiels des activités humaines, des changements de qualité de l'eau ou des modifications des caractéristiques des habitats sur les populations d'esturgeons. En ajustant les scores attribués aux variables de l'habitat affectées par ces impacts, il est également possible de prédire la manière dont l'adéquation globale des habitats pourrait évoluer et d'examiner

les conséquences potentielles de différentes mesures de gestion, ou de participer à l'identification d'aires prioritaires pour les efforts de restauration des habitats.

Les caractéristiques principales des MRE et des modèles d'IQH ainsi que les différences entre ces deux types de modèles de l'habitat sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15 : Principales caractéristiques et différences des modèles de répartition des espèces et d'indice de qualité de l'habitat

Caractéristique	Modèles de répartition des espèces (MRE)	Modèles d'indice de qualité de l'habitat (IQH)
Objectif	Prédire la répartition potentielle d'une espèce dans une aire géographique. Vise à répondre, au sein d'une aire ou d'un bassin versant donné couvrant une vaste étendue, à la question : « Où est-il probable de trouver des habitats adaptés à l'esturgeon ? »	Évaluer la qualité de types d'habitats spécifiques pour une espèce ou une phase de développement. Vise à répondre à la question : « Dans quelle mesure cette zone en particulier est-elle adéquate en tant que type d'habitat de l'esturgeon ? »
Entrée de données	La modélisation de la répartition dépend des données sur l'occurrence (présence - absence) des espèces et de variables environnementales (température, profondeur, qualité de l'eau, etc.).	Nécessite des données plus détaillées sur les caractéristiques de l'habitat, qui impliquent souvent des connaissances spécialisées et des études de terrain afin d'évaluer des facteurs tels que les types de substrats, le débit de l'eau et la disponibilité des organismes alimentaires.
Résultat	Cartes de répartition spatiale qui mettent en évidence les zones où la probabilité de présence d'esturgeons est élevée.	Scores ou indices qui reflètent l'adéquation de parcelles d'habitat spécifiques pour l'esturgeon.
Applicabilité	Un bon outil pour comprendre les exigences écologiques globales de l'esturgeon et identifier l'emplacement d'habitats potentiels, excellent pour identifier les habitats adéquats sur une grande échelle géographique.	Utile pour les évaluations à échelle fine de la qualité des habitats dans une zone donnée, excellent pour identifier les types d'habitats au sein de zones plus larges identifiées par les MRE.
Questions de recherche	Utile pour les questions liées à l'adéquation de l'habitat et pour planifier la conservation à grande échelle, par exemple en identifiant les régions dans lesquelles les efforts de conservation devraient être prioritaires, ou en évaluant la manière dont le changement climatique pourrait influencer sur la répartition des espèces.	Pratique pour les questions liées à la conservation et aux décisions de gestion pour un site donné. Utile pour identifier les zones dans lesquelles les efforts de protection ou de restauration de l'habitat devraient être concentrés et pour évaluer l'impact potentiel de menaces ou d'interventions spécifiques sur les différents types d'habitat de l'esturgeon.

En résumé, les MRE sont mieux adaptés pour identifier l'adéquation des habitats à grande échelle et comprendre les préférences globales de l'esturgeon en matière d'habitat (qui ne sont généralement pas transposables d'un bassin à l'autre, Haulsee et al., 2020). D'un autre côté, les modèles d'IQH sont précieux pour évaluer la qualité d'habitats spécifiques au sein d'une région et prendre des décisions précises en matière de conservation. Combiner les deux approches peut apporter une compréhension globale des exigences de l'esturgeon en matière d'habitat et orienter des stratégies de conservation efficaces à différentes échelles spatiales.

Avantages et inconvénients

- Les modèles d'habitat permettent de contrôler (ou d'identifier) les types d'habitats potentiels pour l'esturgeon, ainsi que les zones à fort potentiel de restauration. Ils peuvent également émettre des prédictions sur la répartition des espèces et sur les impacts du changement climatique, ou sur les effets des interventions humaines dans le système.
- Cependant, la qualité d'un modèle dépend des données sur lesquelles il est construit ; des données précises et fiables sont donc essentielles pour une modélisation robuste de l'habitat. En outre, les méthodes de collecte de données doivent être cohérentes et normalisées.
- Les IQH peuvent varier d'un système à l'autre et ne sont pas nécessairement transposables, leur application à grande échelle est donc limitée.
- Les modèles devraient également toujours être validés afin d'évaluer leur précision et leur fiabilité et, puisque l'habitat est dynamique, la mise à jour régulière des modèles est obligatoire. Le suivi des habitats peut nécessiter de nombreuses ressources et requiert des financements, du personnel qualifié et du matériel. En outre, l'acquisition ou la transformation de données adéquates tirées de sources existantes ou obtenues en menant ses propres études de terrain peut être difficile.

Ressources et efforts nécessaires

L'élaboration et la mise en œuvre de modèles d'habitat pour les types d'habitats de l'esturgeon implique plusieurs ressources spécifiques. L'approche globale peut présenter des éléments en communs entre les modèles d'IQH et les MRE, mais les ressources nécessaires peuvent être différentes du fait de la nature des modèles. Les modèles d'IQH et les MRE nécessitent tous deux des données, un logiciel de modélisation et des connaissances du domaine, mais les modèles d'IQH mettent davantage l'accent sur la participation d'experts pour définir les préférences en matière d'habitat et attribuer des scores. Toutefois, on observe depuis peu une tendance à l'abandon des avis d'experts dans l'utilisation de facteurs d'adéquation modélisés (par ex. les modèles linéaires généralisés à effets mixtes (MLGM) ou les modèles d'occupation) au profit de méthodes davantage axées sur les données et

plus rigoureuses sur le plan statistique (Haxton 2023, comm. pers.). En outre, le développement des MRE peut nécessiter des compétences plus pointues en matière de statistiques ou d'apprentissage automatique. Les ressources nécessaires pour les deux types de modèles sont présentées ci-dessous.

Les modèles de répartition des espèces (MRE) nécessitent :

- Des données environnementales haute résolution comprenant la bathymétrie, la température, le type de substrat et les caractéristiques du débit.
- Des données sur les occurrences d'esturgeons (présence et absence) dans l'aire étudiée.
- Un logiciel de système d'information géographique (SIG) pour gérer et analyser les données spatiales.
- L'accès à des ensembles de données SIG pertinents décrivant la topographie, l'hydrographie et l'occupation des sols ou la couverture végétale.
- Un logiciel de statistiques ou d'apprentissage automatique pour construire les MRE. Les outils courants incluent R, Python (avec des bibliothèques telles que scikit-learn, TensorFlow ou Keras) ou des logiciels de modélisation spécialisés tels que MaxEnt.
- Des connaissances spécialisées afin d'identifier et de sélectionner les principales variables environnementales qui influencent la répartition, la croissance et la survie des esturgeons.
- Une connaissance des points de référence pour ces variables environnementales.
- Des données fiables et complètes sur les occurrences (présence) et les non-occurrences (absence) d'esturgeons dans l'ensemble de la zone étudiée.
- Des indicateurs permettant d'évaluer les performances du modèle, tels que l'AUC-ROC, l'AIC ou des techniques de validation croisée.
- L'accès à des ressources informatiques hautement performantes capables d'accélérer l'entraînement et l'évaluation des modèles en vue de la mise en œuvre de techniques de modélisation à forte intensité de calcul (facultatif).

Les modèles d'indice de qualité de l'habitat (IQH) nécessitent :

- Des données environnementales haute résolution similaires à celles requises par les MRE.
- Des connaissances spécialisées afin d'attribuer des scores aux différentes variables de l'habitat et de créer la formule de l'IQH.
- Un logiciel permettant de calculer l'IQH sur la base des scores attribués et des variables de l'habitat.
- Des données historiques pour calibrer et valider le modèle d'IQH.

- La collaboration avec des experts chevronnés connaissant bien l'écologie et les préférences en matière d'habitat de l'esturgeon afin de garantir une notation précise des variables.
- Des outils SIG permettant de cartographier les valeurs de l'IQH obtenues afin de visualiser l'adéquation de l'habitat sur l'ensemble de la zone étudiée.
- Des données environnementales à long terme pour rendre compte des variations temporelles de l'adéquation de l'habitat.

4.4 Confirmation de l'utilisation des habitats par l'esturgeon

La confirmation d'un habitat comme étant un « habitat réel » passe par la documentation de son utilisation réelle ; celle-ci s'effectue tout d'abord par la description de la présence d'individus ou de groupes d'une espèce donnée au sein d'un cours d'eau ou d'une portion de cours d'eau, puis grâce aux méthodes et stratégies utilisées pour le suivi des populations (voir les Lignes directrices techniques pour le suivi des populations d'esturgeons, Neuburg, et al., 2024). Une fois confirmée, l'utilisation de l'habitat doit également être évaluée en fonction de la localisation, du moment, de la fréquence et de l'étendue spatiale (motif), puis enregistrée dans un SIG et mise en relation avec les résultats de l'identification et du contrôle des types d'habitats potentiels, afin d'adapter et d'affiner encore les objectifs et procédures du suivi des habitats et des populations.

4.4.1 Génétique moléculaire et ADN environnemental (ADNe)

Appliquer des techniques génétiques permet au chercheur de comprendre la présence et/ou l'origine d'une espèce dans une zone donnée (indigène, non-indigène, hybride ou provenant de l'aquaculture, par ex.), ainsi que les mouvements des esturgeons sur plusieurs échelles spatiales et au cours de l'évolution. En outre, pour certaines espèces d'esturgeons, de nombreuses populations reproductrices peuvent exister au sein d'un même système fluvial, ce qui conduit des lignées (maternelles) différentes à utiliser des sites de fraie différents. La différenciation des populations peut résulter des différences dans les périodes ou les sites de fraie et peut se produire en l'absence de toute barrière physique séparant les populations. Les méthodes et technologies génétiques peuvent ainsi être utilisées pour affecter les individus à certains cours d'eau natus dans les bassins versants marins, où les esturgeons provenant de différentes populations reproductrices peuvent se rassembler. Un aperçu complet des techniques génétiques est donné dans les lignes directrices techniques concernant les mesures de conservation *ex situ* de l'esturgeon (Gessner et al., 2024).

L'analyse de l'ADN environnemental (ADNe) permet de détecter la présence d'espèces dans une masse d'eau et est utile pour restreindre la recherche de leur présence à des tronçons et des saisons spécifiques. Elle est moins invasive et souvent moins coûteuse que les méthodes d'échantillonnage traditionnelles qui nécessitent la capture d'individus, et donc inévitablement la gestion de leur stress (Pfleger et al., 2016). Cette méthode s'appuie sur le fait que les espèces diffusent en permanence leur ADN dans leur environnement, et s'est également révélée efficace dans le cas des esturgeons. Une description complète, comprenant des

instructions pour le prélèvement d'échantillons de tissus et d'eau à des fins d'analyse de l'ADNe, est donnée dans les Lignes directrices techniques pour le suivi des populations d'esturgeons (Neuburg, et al. 2024). Les ressources et efforts nécessaires dépendent résolument de la portée de l'étude et des méthodes génétiques spécifiques appliquées.

Avantages et inconvénients

- Les techniques de génétique moléculaire permettent d'identifier avec précision les espèces d'esturgeons et leur présence dans une aire donnée, et également de distinguer les espèces indigènes, non-indigènes, hybrides ou provenant de l'aquaculture.
- Elles fournissent des informations sur les mouvements des esturgeons sur différentes échelles spatiales et au cours de l'évolution.
- Elles permettent l'identification de nombreuses populations reproductrices au sein d'un même système fluvial.
- Elles facilitent l'affectation des individus à des cours d'eau natals spécifiques dans les bassins versants marins.
- La mise en œuvre des techniques de génétique nécessite du matériel et une expertise spécialisés et peut donc coûter très cher.
- Il peut être difficile d'obtenir des échantillons représentatifs, en particulier dans le cours inférieur des rivières et dans les estuaires.
- L'échantillonnage de l'ADNe n'apporte aucune information sur les paramètres ou la fraie des populations et ne permet pas d'identifier les stades de vie des espèces ou leur nombre. Cette technique ne fait que confirmer la présence ou l'absence des espèces.

4.4.2 Suivi, télémétrie et observation

L'observation, le suivi, la documentation de l'utilisation de l'habitat et la compréhension de la présence et des mouvements de l'esturgeon dans ses habitats peuvent être essentiels pour identifier et confirmer les types d'habitats au sein du système et comprendre leur fonctionnement et leurs relations écologiques (Lucas & Baras 2000; Fox et al., 2000; Cooke et al., 2013; Nelson et al., 2013; Acolas et al., 2017; Hontž et al., 2018).

De nombreuses méthodes et technologies pertinentes sont utilisées pour le suivi et l'observation des poissons dans leur habitat sous-marin et sont décrites ci-dessous. Des aperçus détaillés de ces méthodes sont présentés dans Lucas & Baras (2000), Cooke et al., (2013) et Nelson et al., (2013). Les capacités de ces technologies sont variables, allant de la simple observation visuelle à des méthodes plus complexes telles que la télédétection et les méthodes d'imagerie. En fin de compte, l'équipe de suivi des habitats concernée décidera des méthodologies et de l'équipement les plus appropriés selon les compétences disponibles, les recherches antérieures sur les habitats dans le système, les ressources disponibles et les questions de recherche correspondantes. Le choix des méthodes et technologies à appliquer dépendra fortement des objectifs définis

de l'étude en question, par exemple l'utilisation de la détection statique (récepteurs ou réseau de récepteurs) ou mobile des individus marqués afin de documenter les mouvements à petite ou grande échelle (triangulation), mais également de l'utilisation spécifique de l'habitat (migration de fraie, gestion des passes à poissons/contrôles de leur fonctionnement, etc.).

Le **suivi** des esturgeons dans leur environnement naturel est réalisé à l'aide de marques électroniques de plusieurs sortes différentes. Certaines marques transmettent des données en temps réel sur le poisson (balises de télémétrie), tandis que d'autres stockent les données pour un téléchargement ultérieur ou un chargement en bloc (balises d'archivage). Toutes les marques électroniques ne nécessitent pas la recapture du poisson afin de récupérer les données générées.

Dans ce contexte, le « European Tracking Network » (ETN, réseau de suivi européen) a pour objectif d'acquérir des connaissances sur les mouvements, l'utilisation de l'habitat et la survie des animaux aquatiques grâce à la télémétrie, dans un effort d'information des responsables de la gestion durable de la vie aquatique. L'ETN œuvre en particulier pour la compatibilité des équipements, des protocoles et des logiciels pour et entre les différents fabricants (<https://europeantrackingnetwork.org/en>).

Le suivi et l'observation de la présence et des mouvements des esturgeons n'ont de sens, en ce qui concerne le suivi de l'habitat, que s'il est possible d'interpréter cette présence, ce regroupement et ces mouvements par des hypothèses bien fondées, ou mieux encore, par une réelle documentation de l'utilisation de l'habitat qui leur est associée. Cet objectif peut être atteint grâce à des cartes préliminaires du système montrant les types d'habitats potentiels identifiés par la recherche d'informations et de données (exploration de données), la modélisation de l'habitat, les études de terrain (contrôle des habitats) et par des données télémétriques de localisation suffisamment précises, ainsi que par la documentation de l'utilisation réelle de l'habitat dans le cadre du suivi des populations (confirmation des types d'habitats par la fraie, la présence de stades de vie précoces ou d'esturgeons en train de s'alimenter, par exemple).

4.4.2.1 Télémétrie

Les systèmes de télémétrie comprenant des émetteurs et des récepteurs sont disponibles en mode de transmission des données radio ou acoustique. Les marques acoustiques peuvent transmettre des codes d'identification et des données de capteurs à des hydrophones récepteurs sur des distances limitées.



Figure 12 : Marque acoustique (© WWF-Bulgarie).

Les marques radio et leurs ondes émettent relativement bien dans l'air et l'eau douce, mais de façon médiocre dans l'eau dure, ou eau salée, et à des profondeurs plus importantes. Les marques acoustiques et radio combinées (CART) permettent d'utiliser à la fois des récepteurs acoustiques et radio, qui émettent dans les deux types d'environnement.

Les émetteurs de télémétrie peuvent être équipés de différents capteurs de température, de profondeur, de salinité, de mouvement ou de prédation, par exemple. Les données sont soit émises en continu, soit stockées jusqu'à ce que le contact avec un récepteur soit établi. Un type particulier de balises d'archivage sont les marques à mémoire (DST) qui archivent également les données environnementales mais nécessitent la recapture du poisson et le démontage de l'écusson.

L'utilisation de balises d'archivage, capables de stocker des données provenant de plusieurs capteurs, est recommandée lorsque les poissons se déplacent hors de la portée des réseaux de récepteurs (Erickson et al., 2011). Les informations enregistrées par les balises d'archivage peuvent par exemple inclure la pression (profondeur), la température et le niveau de luminosité, qui permettent d'estimer la localisation en fonction de la température de la surface de la mer et des heures de lever et de coucher du soleil.



Figure 13 : *Contrôle du fonctionnement d'une marque acoustique à l'aide d'un récepteur mobile avant la remise en liberté d'un esturgeon marqué (© WWF-Bulgarie).*

D'autres capteurs pouvant être utilisés sont les électromyogrammes (EMG), qui enregistrent les contractions musculaires, les accéléromètres et les capteurs d'inclinaison, qui fournissent des données sur les mouvements et la position.

Les données des balises d'archivage peuvent être récupérées lors d'une recapture ultérieure, par le téléchargement des données ou par le chargement des données archivées vers des satellites après la remise en liberté pré-programmée de l'animal marqué et l'ascension de la balise à la surface.

Quoi qu'il en soit, dans le cas des balises de télémétrie, les récepteurs doivent être placés de manière stratégique afin de s'assurer que la portée des balises permette d'identifier clairement le signal et de télécharger de grands ensembles de données. Le bon positionnement du récepteur et du réseau de récepteurs dépend des mouvements et de l'aire potentielle de l'individu ou des groupes marqué(s), mais également des capacités du matériel électronique et des conditions environnementales prédominantes (bruits naturels, transport des sédiments, production biologique (algues), sources d'interférence radio/acoustiques aux alentours, etc.).



Figure 14 : Hydrophones en attente d'être paramétrés avant d'être déployés en tant que réseau de récepteurs, sur la rive en aval de la centrale hydroélectrique de Freudenau (© IHG/BOKU).

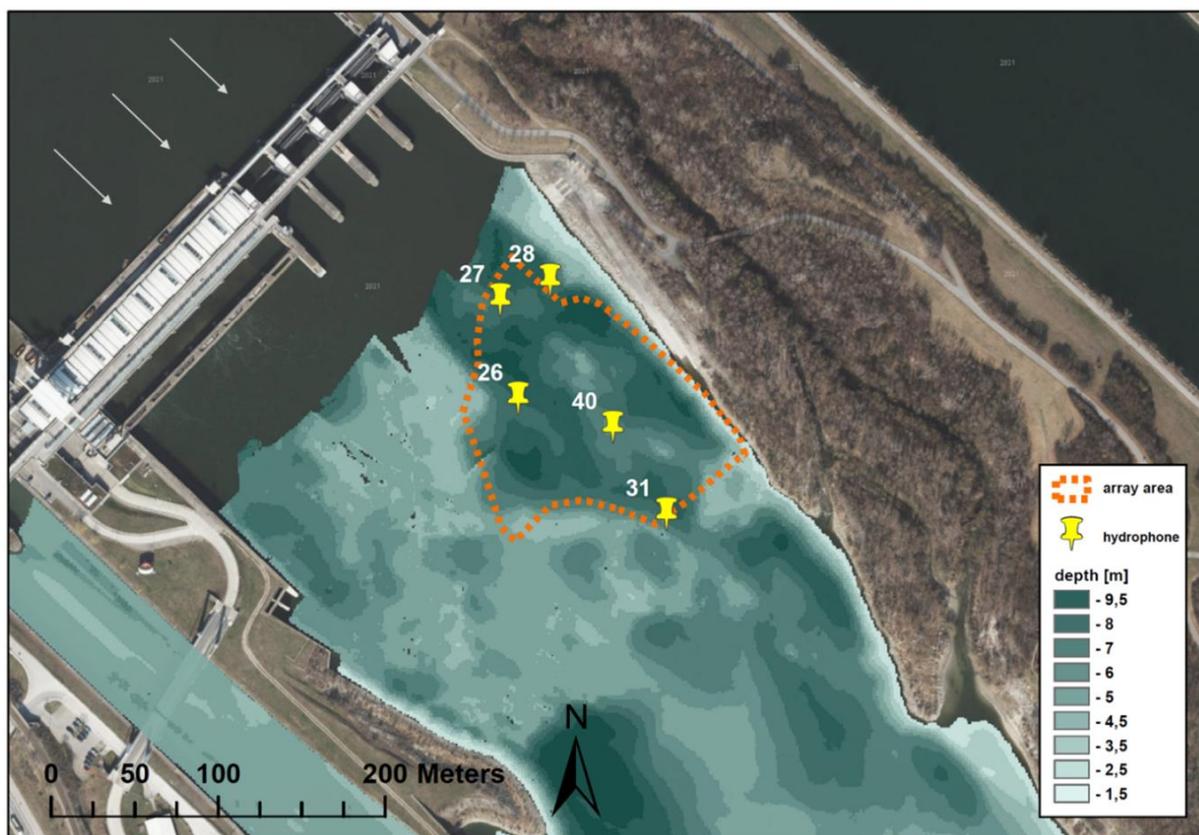


Figure 15 : Zone couverte par le réseau de récepteurs pour le suivi précis du sterlet (*A. ruthenus*) en aval de la centrale hydroélectrique de Freudenau sur le Danube (© IHG/BOKU).

Traduction des termes de la figure 15 :

array area = zone du réseau ; *hydrophone* = hydrophone ; *depth [m]* = profondeur [m] ; *meters* = mètres

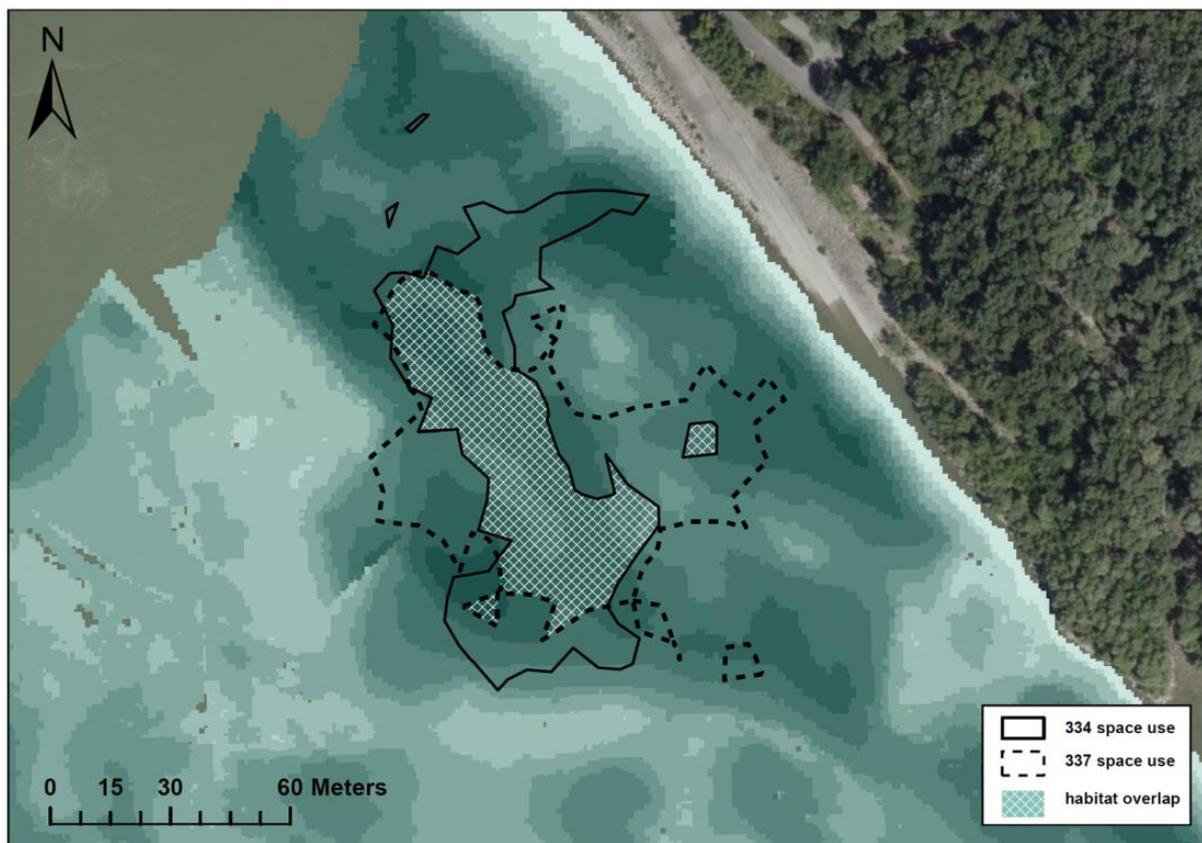


Figure 16 : Zone utilisée par deux sterlets (*A. Ruthenus*) (n^{os} 334 et 337) et chevauchement des habitats pendant la période de fraie, en aval de la centrale hydroélectrique de Freudenua sur le Danube (© IHG/BOKU, Popp 2022).

Traduction des termes de la figure 16 :

space use = utilisation de l'espace ; habitat overlap = chevauchement des habitats ; meters = mètres

L'alternative aux émetteurs dépendant d'un récepteur sont les balises satellites qui se détachent du poisson et font surface au bout d'une durée prédéterminée après la remise à l'eau du poisson ou se connectent au satellite à chaque fois que la balise entre en contact avec l'air (balise d'archivage « pop-up »). Les principaux inconvénients de ce type de marques sont leur taille et leur coût, qui peut atteindre plusieurs milliers d'euros par unité, en plus des cas de détachement prématuré qui ont été signalés (Musyl et al., 2011).

En ce qui concerne le suivi des habitats, la présence des poissons doit être mise en relation avec l'habitat, le type d'habitat et l'utilisation de l'habitat (statut de l'individu). Cet objectif peut être atteint grâce au référencement ou à la

cartographie des types d'habitats réels et potentiels connus, associés à la connaissance du statut de l'animal (par exemple stade de développement, sexe et statut reproductif, voir les lignes directrices *ex situ* pour la détermination du statut gonadique).

L'observation directe des esturgeons dans leur environnement naturel est une tâche complexe. Les technologies permettant l'observation directe peuvent être classées dans les deux catégories principales suivantes : les procédures d'imagerie optique et les procédures d'imagerie acoustique.

4.4.2.2 Marquage et balisage

Le marquage et le balisage des esturgeons sont utiles pour identifier les habitats et pour documenter leurs mouvements en cas de prise ultérieure.

Une description complète est donnée dans les lignes directrices techniques concernant les mesures de conservation *ex situ* de l'esturgeon (Gessner et al., 2024).



Figure 17 : Marque externe sur un esturgeon russe juvénile (*A. gueldenstaedtii*) (©WWF-Bulgarie).

4.4.2.3 Photographie et vidéographie sous-marines basées sur la lumière

Ces techniques permettent l'observation directe des poissons. Les possibilités offertes par la photographie et la vidéographie sous-marines ont été principalement améliorées par le développement et l'utilisation de petits véhicules sous-marins télécommandés (ROV) et par les avancées technologiques en matière d'appareils photos et de caméras numériques fonctionnant en basse lumière. Ces technologies sont également utiles pour vérifier les conditions du substrat sur le terrain dans le cadre du contrôle des habitats.

4.4.2.4 Techniques hydroacoustiques

Le **sonar à balayage latéral (SBL)** peut être utilisé aussi bien pour le suivi des habitats de l'esturgeon (Kaeser & Litts 2010; Hook 2011; Kaeser et al., 2012; Litts & Kaeser 2016; Walker & Alford 2016) que pour le suivi des populations (Hughes et al., 2018; Kazyak et al., 2020; Flowers & Hightower 2013; Flowers & Hightower 2015; Fund et al., 2016; Andrews et al., 2020; Vine et al., 2019; Brown 2020). Il permet d'identifier de grands esturgeons et des poissons isolés dans certaines conditions, et d'effectuer une cartographie benthique relativement rapide de portions de cours d'eau (voir également 4.3.2.8. Évaluation du substrat par sonar à balayage latéral).

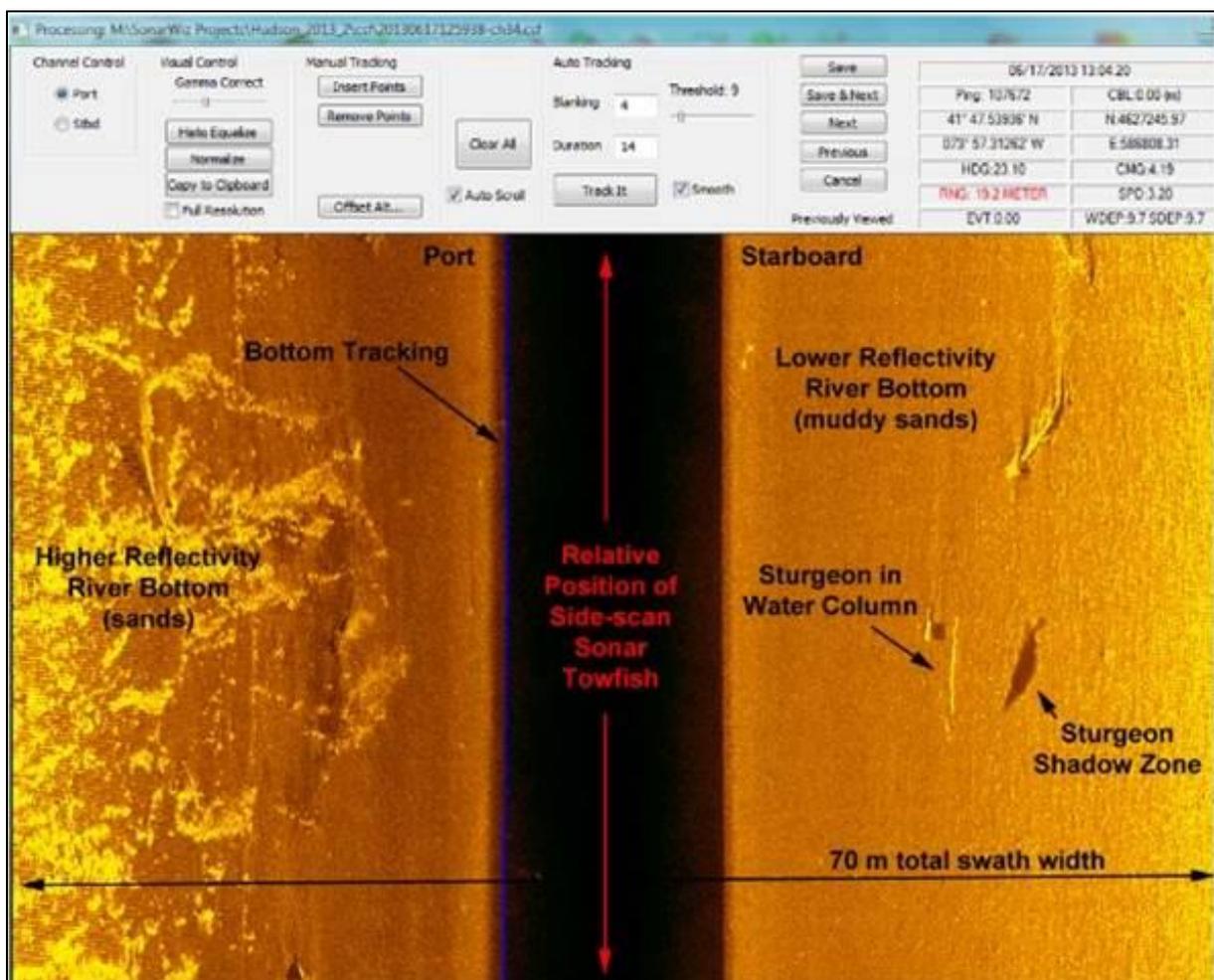


Figure 18 : Image produite par un SBL démontrant le potentiel d'identification des substrats de fond et des poissons (© Dewayne Fox).

Traduction des termes de la figure 18 :

Port = Bâbord ; *Starboard* = Tribord ; *Bottom Tracking* = Suivi du fond ; *Lower Reflectivity River Bottom (muddy sands)* = Réflectivité moins importante, Fond du cours d'eau (sables boueux) ; *Higher Reflectivity River Bottom (sands)* = Réflectivité plus importante, Fond du cours d'eau (sables) ; *Relative Position of Side-scan Sonar Towfish* = Position relative du poisson sonar à balayage latéral ; *Sturgeon in Water Column* = Esturgeon dans la colonne d'eau ; *Sturgeon Shadow Zone* = Zone d'ombre de l'esturgeon ; *70 m total swath width* = largeur de fauchée totale de 70 m

Cette méthode a été mise au point et s'est avérée efficace pour les évaluations mobiles et statiques des populations de poissons dans les environnements d'eau douce et marins. Les évaluations mobiles sont généralement réalisées depuis un bateau qui se déplace sur des transects prédéterminés de la masse d'eau et prélève des échantillons qui vont permettre d'évaluer la présence des poissons et les caractéristiques du fond. Les poissons échantillonnés produisent des signaux acoustiques caractéristiques qui peuvent être traités à l'aide d'un logiciel spécialisé afin de produire des estimations de la densité, de l'abondance, du comportement et de la répartition des tailles des poissons.

Les **sonars à basse fréquence** ont été utilisés pour les études à l'échelle du plateau continental, tandis que les **sonars à haute fréquence** sont utilisés pour étudier plus en détails des zones plus petites. Les **sonars à synthèse d'ouverture (SSO)** associent un ensemble de signaux acoustiques pour former une image dont la résolution est beaucoup plus élevée que celle des sonars conventionnels. Cette technologie est devenue commercialement viable et la technique est bien adaptée aux véhicules sous-marins remorqués ou télécommandés. Il faut cependant être conscient du fait que tous les systèmes acoustiques ont des limites d'échantillonnage en ce qui concerne leur capacité à détecter des cibles très proches des limites, comme le fond d'une masse d'eau, ou leur résolution spatiale, ce qui nécessite une planification minutieuse des études pour cartographier une zone d'intérêt.

Les détecteurs de poissons, tels que ceux utilisés par les pêcheurs récréatifs, peuvent également être utiles pour la recherche sur l'habitat des esturgeons et sur leur utilisation de l'habitat, car ils facilitent la détection des esturgeons dans certaines conditions. Pour la recherche sur les esturgeons, il est recommandé d'utiliser un détecteur de poissons doté de plusieurs réglages de zoom et d'options de verrouillage du fond et d'écran partagé (Nelson et al 2013).

Les principaux avantages des **systèmes à faisceau divisé** par rapport à d'autres techniques hydroacoustiques sont l'amélioration de la localisation à l'intérieur du faisceau acoustique et la réduction de la sensibilité au bruit ambiant. En raison de niveaux de biais identiques dans la résolution angulaire, le système à faisceau divisé peut localiser les poissons dans le faisceau avec une meilleure résolution que les systèmes à simple faisceau, à double faisceau ou à balayage latéral. Il est

donc souvent utilisé depuis des sites fixes pour le comptage des poissons en migration de montaison dans les grands cours d'eau. L'identification des espèces à l'aide de cette technique est néanmoins très limitée.

Une caméra acoustique (sonar d'identification à double fréquence), qui est un sonar d'imagerie haute résolution fournissant des images proches de la qualité vidéo, peut également être utilisée pour compter les migrateurs en montaison. En outre, cette méthode génère des fichiers vidéo qui montrent clairement la forme du corps et le comportement de nage des poissons individuels, lorsqu'elle est utilisée à une distance de 5 à 10 m. Les appareils à faisceau divisé peuvent fournir des informations plus précises sur la localisation des poissons, mais les données des caméras acoustiques sont beaucoup plus faciles à interpréter, et offrent la possibilité de mesurer la longueur des poissons directement à l'écran.

Il est possible d'utiliser un système associant plusieurs méthodes synchronisées afin de collecter un maximum de données relatives à l'habitat et à l'utilisation de l'habitat dans le cadre d'une seule étude. La cartographie hydroacoustique intensive à l'échelle du bief, basée par exemple sur une série de bathymétries multifaisceaux, peut être combinée à un profileur de courant acoustique à effet Doppler (ADCP) pour mesurer les vitesses du courant, à un sonar à balayage latéral haute résolution pour documenter les types de substrats, à l'imagerie par caméra acoustique pour détecter, entre autres, les gros poissons, et à un suivi intensif des individus et des groupes. Une telle approche pourrait fournir des mesures de la disponibilité de l'habitat et des variables de sélection de l'échelle sub-métrique à l'échelle de la forme de fond, qui correspond à l'échelle observée à laquelle les poissons occupent et utilisent ces types d'habitats. Les efforts, le coût, et donc le financement nécessaires dépendent résolument de la portée et de l'échelle de l'étude, ainsi que des marques et appareils utilisés.

Avantages et inconvénients

- L'observation directe et le suivi fournissent des données très précises sur les mouvements des esturgeons et sur leur utilisation des habitats.
- Cela peut également permettre aux chercheurs de mieux comprendre le comportement des esturgeons et leurs interactions avec leur habitat.
- Le marquage et la pose de balises GPS peuvent permettre de suivre des individus ou des groupes d'esturgeons en continu sur de longues périodes, et ainsi d'obtenir encore plus d'informations qu'avec les opportunités d'observation ponctuelles (lors de prises accidentelles, par exemple).
- Outre les données qui fournissent des informations temporelles et spatiales sur les types d'habitats et leur utilisation, des informations essentielles telles que les aires de répartition maximales, les goulots d'étranglement migratoires et les routes migratoires préférées peuvent également être mises en évidence.

- La manipulation et le marquage des esturgeons peuvent causer du stress et des blessures aux poissons, et potentiellement fausser les résultats des recherches par un effet de biais.
- La marge d'erreur dans la localisation des habitats doit être déterminée pour chaque technique télémétrique, afin de faciliter le suivi de l'utilisation de l'habitat, en particulier lorsqu'un type d'habitat est limité dans le cours d'eau.
- Cette approche requiert également énormément de ressources, telles que du matériel spécialisé, du personnel qualifié, un temps de travail important et des fonds. En raison de la baisse du coût des marques et des émetteurs au cours des dernières décennies, un plus grand nombre d'individus et des groupes plus importants d'esturgeons marqués ont pu être relâchés. Cependant, le traitement et l'analyse de grandes quantités de données de suivi peuvent être complexes et chronophages, et nécessitent donc des efforts supplémentaires en termes d'expertise, de travail et de temps de calcul.

Ressources et efforts nécessaires

- Des autorisations permettant de travailler et de se déplacer sur la terre et sur l'eau (dans les zones protégées par exemple), d'interagir avec des animaux vivants et de réaliser des interventions chirurgicales.
- Du matériel de photographie et de vidéographie (sous-marin), un équipement hydroacoustique, des sonars.
- Des marques (émetteurs radio, marques acoustiques, balises satellites, etc.).
- Des récepteurs et des lecteurs pour détecter et enregistrer les données des marques.
- Des plateformes terrestres, navales et aériennes : des bateaux, avions ou drones pour le suivi des esturgeons en milieu aquatique, des ROV pour l'observation sous-marine, des lieux protégés pour placer les récepteurs fixes et des véhicules pour le transport et le remorquage.
- Des applications de banques de données : pour stocker et classer les données de suivi.
- Un logiciel d'analyse des données : pour traiter et analyser les données de suivi.
- Du personnel qualifié : biologistes, chercheurs et techniciens spécialisés dans le marquage et le suivi des poissons, et des esturgeons en particulier, et spécialistes du stockage et de l'analyse de grandes quantités de données de suivi.
- Un engagement institutionnel en termes de financement et de planification de la relève, en particulier pour les études à long terme.
- Du temps de travail au bureau et sur le terrain : les horaires de travail du personnel qualifié doivent être adaptés pour permettre de travailler sur une telle approche.

- Des fonds : des ressources financières suffisantes pour couvrir le matériel, le personnel et l'analyse des données.
- Considérations éthiques : respect des directives en matière d'éthique pour la manipulation et le marquage des esturgeons afin de minimiser le stress et les blessures potentielles.

4.5 Mesures de suivi récurrentes et en temps réel

Les activités de suivi récurrentes visant à documenter et à évaluer le fonctionnement des habitats et des types d'habitats dépendent principalement des conditions et des moteurs spécifiques du système en question. Leur mise en œuvre ne devrait pas être constituée uniquement d'activités régulières isolées, mais faire partie d'un programme de suivi des habitats au sein d'un bassin versant. Les principaux objectifs d'un tel programme seraient la détection et l'évaluation des changements dans l'habitat et dans ses fonctions écologiques, afin de guider les efforts de conservation et de gestion des esturgeons (Vos et al., 2000).

Des exemples de changements pertinents sont :

- Les changements dans la reproduction et le recrutement biologique documentés par le suivi des populations.
- Les changements dans l'hydrologie, le débit et l'hydromorphologie.
- Les changements prévus/suspectés dans le scénario impacts/menaces.
- La détermination des activités et des intervalles de suivi et la nécessité d'un suivi en temps réel devraient constituer un processus adaptatif. L'efficacité du programme de suivi devrait être évaluée régulièrement, notamment au regard des nouvelles informations et des conditions changeantes, et le programme ajusté en conséquence.

Le suivi des habitats devrait permettre la détection précoce des menaces potentielles et faciliter la planification rapide de mesures d'urgence. D'une manière générale, les activités de suivi devraient s'aligner sur l'habitat en ce qui concerne les stades essentiels du cycle de vie tels que la fraie, la migration et l'alimentation. Elles devraient prendre en compte les menaces ou impacts pertinents qui sont observés ou suspectés. La fréquence et les intervalles de suivi devraient être basés sur le calendrier de ces événements, tout en tenant compte des variations saisonnières des conditions de l'habitat. Les contraintes en matière de ressources, telles que le budget, les effectifs et la technologie, doivent être prises en compte, et le programme de suivi qui en résulte devrait se concentrer en priorité sur l'évaluation des impacts des pressions anthropiques sur la fonctionnalité des habitats clés. À ce titre, les calendriers de suivi devraient utiliser au mieux les ressources disponibles.

En cas de changement soudain des conditions, un suivi en temps réel devrait être effectué pour les événements et paramètres critiques, tels que les changements

soudains de la qualité de l'eau, les événements météorologiques extrêmes ou les impacts humains inattendus. Des systèmes et des capteurs automatisés devraient être utilisés pour générer des alertes instantanées en cas d'occurrence. Les progrès technologiques des équipements de suivi devraient être exploités.

4.5.1 Feuille de route de suivi

Reynolds et al., (2016) fournissent une feuille de route permettant l'élaboration d'un programme de suivi biologique en général. Ils recommandent de concevoir et de mettre en œuvre un cadre de suivi comprenant quatre phases principales, dont dix étapes distinctes, comme cela est présenté ci-dessous.

1^{ère} phase : Formuler le problème

1. Définir le problème ou la question
2. Énoncer clairement les objectifs de l'étude
3. Esquisser un modèle conceptuel du système (composants, moteurs et facteurs de stress du système)
4. Préciser les mesures en matière de politique ou de gestion ou confirmer qu'aucune telle mesure n'est prévue

2^e phase : Concevoir le suivi

5. Déterminer l'approche
 - 5a. Effectuer le suivi pour comprendre le système. Aucune action (suivi du statut et des tendances)
 - 5b. Effectuer le suivi pour décider quand agir. Pas d'action initiale (suivi des seuils)
 - 5c. Effectuer le suivi pour évaluer le résultat des actions (suivi de l'efficacité)
 - 5d. Effectuer le suivi pour évaluer les résultats de plusieurs actions dans un cadre explicite afin de guider l'action suivante (gestion adaptative)
6. Traduire le modèle conceptuel de l'étape 3 sous forme quantitative (Quels attributs et covariables devraient être mesurés ?)
7. Concevoir l'étude, l'approche analytique et le système de gestion des données
8. Recueillir et gérer les données

3^e phase : Mettre en œuvre et apprendre

9. Analyser les données et rendre compte des résultats

4^e phase : Apprendre et corriger

10. Mettre à jour les modèles, évaluer ou planifier et mettre en œuvre les actions, le cas échéant

Documenter toutes les étapes et répéter les étapes 8 à 10.

5 Modèle de plan de travail

Une approche par étapes est recommandée pour la planification et la mise en œuvre d'un programme combiné d'évaluation et de suivi des habitats.

Étape 1 : lancement du programme et identification de zones de pertinence globale grâce à la recherche de données et d'informations

- Lancer et concevoir le programme de suivi des habitats en étroite coordination et synchronisation avec tous les autres acteurs et aspects de la conservation des esturgeons, et en tant que partie intégrante de ceux-ci, dans un système donné.
- Élaborer les objectifs, les évaluations et les mesures du programme de suivi des habitats et obtenir un financement pour sa mise en œuvre.
- Mettre en place les ressources nécessaires pour le stockage, l'analyse et la cartographie (SIG) des données. Les bases de données doivent être opérationnelles avant de générer les premières données liées à l'habitat.
- Identifier les sources de données relatives aux cours d'eau.
- Identifier les zones de présence antérieure.
- Collecter et analyser des informations sur les conditions actuelles (biotiques et abiotiques) telles que les caractéristiques hydromorphologiques, la composition des sédiments et la qualité de l'eau.
- Établir des profils écologiques des espèces et des populations (cycle de vie) présentes dans le système, y compris les aires de répartition et l'abondance des espèces antérieures et les principaux sites utilisés, ainsi que les périodes de prélèvement et d'observation.
- Identifier les défaillances dans les données en vue d'évaluations supplémentaires permettant de combler les lacunes dans les connaissances.
- Élaborer des listes et des cartes des habitats potentiels au sein du système et des lieux et périodes adéquats pour les évaluations de terrain.

Étude de cas : aire de répartition et distribution du sterlet (*Acipenser ruthenus*) dans le Haut-Danube

Kinzelbach (1994) décrit et commente les occurrences du sterlet dans le Haut-Danube sur la base de sources historiques, l'observation dans la partie la plus haute du cours d'eau ayant eu lieu près de Ulm en 1430. L'auteur donne un aperçu d'un certain nombre d'observations historiques de cette espèce d'esturgeon dans le bassin versant du Danube en amont de Passau. Une synthèse de toutes les informations disponibles et présentées, associée à certaines caractéristiques de l'espèce telles que la distance des migrations, suggère qu'il devait y avoir autrefois une population indigène de cette espèce de taille considérable dans le Danube, entre les villes fluviales de Regensburg et de Passau. Il conclut qu'au vu de la régularité et de la distribution des occurrences documentées, il est évident que les spécimens capturés dans le Danube en amont de Passau au XIX^e siècle ne constituaient pas des migrants accidentels uniques en provenance de biefs lointains en aval, mais les derniers vestiges d'une population en voie de disparition.

Il en ressort que le Haut-Danube constitue également un habitat de l'esturgeon, et que la limite supérieure de l'aire de répartition de cette espèce spécifique dans le Danube se situe près d'Ulm (2 600 rkm de l'embouchure du fleuve dans la mer Noire). Ces résultats soutiennent les mesures de conservation et de restauration du sterlet dans le Haut-Danube en Autriche et en Allemagne.

Étape 2 : contrôle des habitats identifiés

- Évaluer les principales caractéristiques hydromorphologiques et les informations complémentaires requises, choisir les variables à évaluer sur le terrain et les méthodes les mieux adaptées à l'objectif et au budget.
- Mettre en place un plan de travail structuré identifiant les dates des sorties sur le terrain, leur durée, le nombre de collaborateurs nécessaires, l'équipement à utiliser, les échantillons à prélever, les mesures à effectuer ; acheter des consommables et des matériaux de stockage ; s'assurer de la disponibilité des infrastructures nécessaires ; réserver l'hébergement pour les voyages et élaborer les protocoles d'évaluation distincts correspondants.
- Effectuer les demandes d'autorisation pour l'accès au cours d'eau, la conduite des véhicules d'échantillonnage, l'échantillonnage et le transfert des échantillons.
- Tester le matériel et se familiariser avec les méthodes à appliquer, préparer les documents nécessaires pour les activités de terrain, s'assurer du bon fonctionnement des équipements techniques, former les équipes aux mesures de sécurité et adapter les protocoles de suivi.
- Organiser des sorties de terrain pour l'échantillonnage et les mesures, vérifier et réviser les protocoles de suivi.
- Transférer les échantillons, transcrire les données, stocker les protocoles et analyser les échantillons.
- Traiter et stocker les données.
- Regrouper et analyser les données.
- Quantifier les habitats contrôlés dans le système et les enregistrer dans un SIG.

Étude de cas : première évaluation des sites de fraie de l'esturgeon dans les affluents de l'Oder

Gessner & Bartel (2000) ont procédé à l'évaluation des zones de fraie dans le bassin versant de l'Oder dans le cadre d'une étude de faisabilité visant à rétablir la présence de l'esturgeon dans son ancienne aire de répartition dans les eaux allemandes et polonaises. Les zones de fraie de l'esturgeon étant considérées comme étant d'une importance majeure pour le succès de la restauration et de la reproduction ultérieure des poissons, elles ont été abordées comme une priorité. Les exigences en matière d'habitat ont été identifiées sur la base d'informations publiées sur la reproduction de l'esturgeon, les données de capture historiques et les stades de vie précoces. Les habitats de fraie potentiels ont été déterminés grâce à une approche par étapes (figure 19). En ce qui concerne les sites de fraie historiques identifiés, des données récentes sur les barrières à la migration et la

pollution de l'eau ont été analysées, et les sites non accessibles ou affectés de manière négative ont été exclus. Des données ont été recueillies sur la dynamique du débit, la qualité de l'eau, les profils longitudinaux et les coupes transversales du cours d'eau, ainsi que sur la composition du substrat. Cinq biefs de la Drawa, couvrant une superficie d'environ 15 000 m², ont été contrôlés comme étant potentiellement propices à la fraie de l'esturgeon. En admettant une fertilité moyenne de un million d'œufs par femelle et une densité maximale de 3 500 œufs/m², la surface de site de fraie nécessaire pour une femelle moyenne serait aux alentours de 350 m². La Drawa pourrait ainsi servir de zone de fraie à environ 50 femelles.

Étape 3 : confirmation de l'utilisation des habitats

- Confirmer dans un premier temps en documentant la présence d'esturgeons dans un système, un cours d'eau et/ou un tronçon donné grâce au suivi, à l'observation ou à l'ADNe (suivi des populations).
- Documenter les résultats réels de l'utilisation de l'habitat tels que la présence d'embryons, de larves, de juvéniles, le contenu d'un tube digestif, la croissance (suivi des populations).
- Déterminer et enregistrer (SIG) l'étendue, les aspects comportementaux et les préférences pour une utilisation de l'habitat spécifique telle que la fraie, la croissance et l'hivernage.

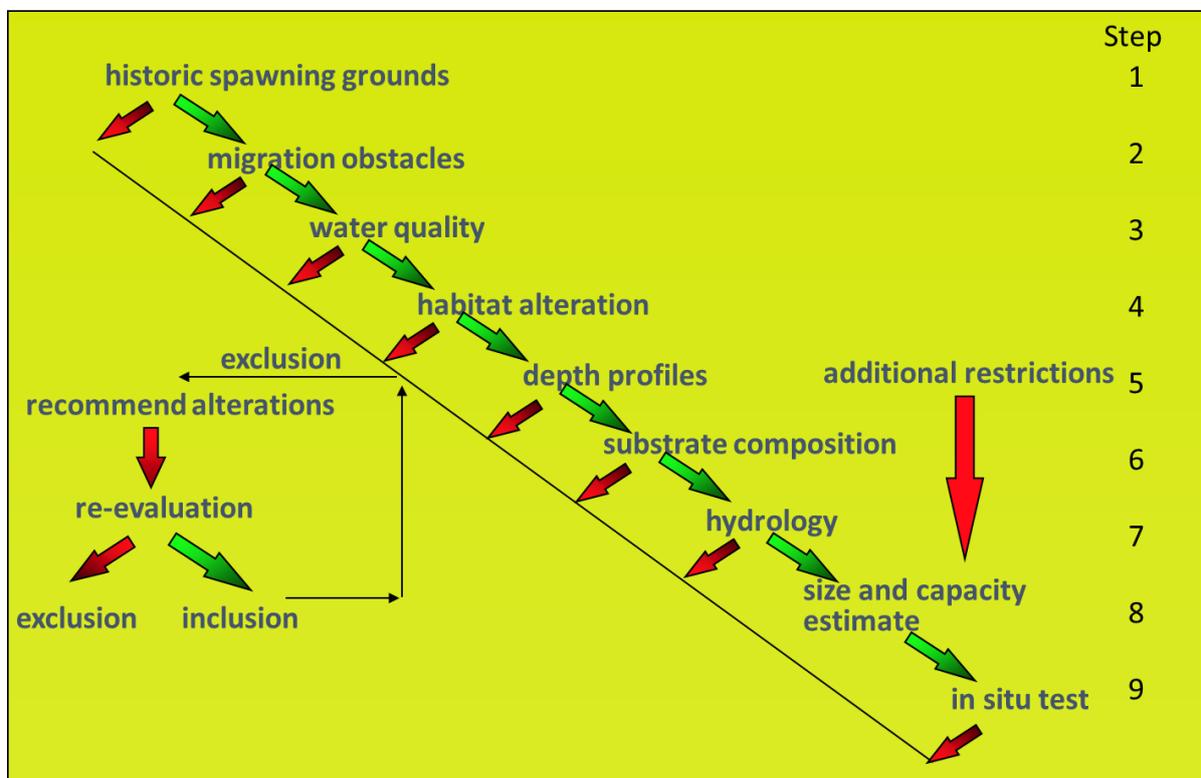


Figure 19 : Arbre de décision comprenant les étapes ultérieures de l'évaluation de l'adéquation de l'habitat ; les flèches rouges indiquent un décalage avec les critères, les flèches vertes indiquent que les critères sont respectés ; dans le cas où les critères ne sont

pas respectés, le site est exclus des évaluations futures et des contre-mesures sont proposées et leur efficacité testée (d'après Gessner & Bartel 2000, modifié).

Traduction des termes de la figure 19 :

Step = Étape ; *historic spawning grounds* = sites de fraie historiques ; *migration obstacles* = barrières à la migration ; *water quality* = qualité de l'eau ; *habitat alteration* = altération de l'habitat ; *depth profiles* = profils de profondeur ; *additional restrictions* = restrictions supplémentaires ; *substrate composition* = composition du substrat ; *hydrology* = hydrologie ; *size and capacity estimate* = estimation de la taille et de la capacité ; *in situ test* = test in situ ; *exclusion* = exclusion ; *recommend alterations* = recommander des modifications ; *re-evaluation* = réévaluation ; *exclusion* = exclusion ; *inclusion* = inclusion

Étude de cas : suivi de la migration de fraie et confirmation de l'habitat et des conditions de fraie pour l'esturgeon du golfe du Mexique (*Acipenser oxyrinchus desotoi*) dans le sud-est des États-Unis

Fox et al. (2000) ont utilisé une combinaison de télémétrie à ultrasons et de télémétrie radio pour suivre les mouvements de 35 esturgeons du golfe du Mexique adultes lors de leur migration de fraie dans un système marin et fluvial du sud-est des États-Unis au cours des printemps 1996 et 1997. L'analyse histologique des biopsies gonadiques a permis de déterminer le sexe et le statut reproductif de chaque individu marqué et suivi. Les résultats du suivi et l'échantillonnage des œufs ont permis de localiser et de confirmer les sites de fraie de l'esturgeon du golfe du Mexique et de mieux comprendre l'importance du sexe et du statut reproductif pour le comportement migratoire. Des œufs d'esturgeons fécondés ont pu être collectés en six endroits caractérisés par un substrat de fond grossier, des berges abruptes et des débits relativement élevés (par rapport au débit moyen du système).

On a constaté que les esturgeons matures occupaient les sites de fraie de fin mars à début mai. Les poissons matures des deux sexes sont entrés dans le cours d'eau beaucoup plus tôt et à une température de l'eau plus basse, et ont migré plus en amont que les poissons non matures. Les mâles sont entrés dans le cours d'eau à une température de l'eau plus basse que les femelles. Les résultats de l'histologie et de la télémétrie confirment l'hypothèse selon laquelle les mâles de l'esturgeon du golfe du Mexique peuvent frayer chaque année, tandis que les femelles ont besoin de plus d'une année entre les périodes de fraie. Les zones à fond grossier du cours supérieur de la rivière se sont révélées importantes pour la réussite de la fraie de l'esturgeon du golfe du Mexique, et il a donc été recommandé de protéger ces sites ainsi que les habitats de fraie connus contre la perte ou la dégradation des habitats.

Étape 4 : mesures de suivi récurrentes et en temps réel

- Identifier les menaces qui pèsent sur les habitats et les altérations de la fonctionnalité des habitats propres au système, ainsi que les paramètres et les variables à surveiller pour documenter la fonctionnalité actuelle.
- Déterminer les intervalles nécessaires pour les évaluations de suivi et les échantillonnages récurrents.
- Effectuer un suivi régulier des habitats et ajuster et adapter régulièrement le programme de suivi à l'évolution des conditions dans le système.

Étude de cas : évaluations des habitats des poissons le long du Bas-Danube pour servir de base de suivi dans le cadre des interventions de navigation

Hontj et al., (2022) et leur équipe de l'institut national de recherche et de développement du delta du Danube (Danube Delta National Institute for Research and Development, DDNI) à Tulcea, en Roumanie, ont procédé à des évaluations des habitats de l'esturgeon et d'autres espèces de poissons dans le Bas-Danube, entre les rkm 864 et 375. Ces évaluations ont été réalisées dans le cadre d'interventions planifiées visant à améliorer les conditions de navigation, en particulier pendant les périodes de faible niveau d'eau. Les données et les informations provenant d'évaluations antérieures de l'habitat dans d'autres parties du Bas-Danube bulgare-roumain ont été utilisées pour identifier de nouveaux types d'habitats potentiels de l'esturgeon pour la fraie, l'alimentation (respectivement les habitats de nourricerie et ceux d'alimentation pour les esturgeons juvéniles de l'année) et l'hivernage dans la zone d'étude.

Afin de concentrer les efforts lors des sorties de terrain, les données bathymétriques ont été analysées au préalable lors d'une étude de bureau, à l'aide d'un logiciel spécialisé permettant d'identifier les sites d'hivernage potentiels et les berges argileuses verticales (pouvant servir d'habitat de fraie potentiel pour *A. stellatus*). Les données sur les sédiments ont également été analysées afin d'identifier les fonds de gravier pouvant constituer un substrat adapté pour la fraie de l'esturgeon béluga (*Huso huso*). Les types d'habitats potentiels de l'esturgeon ont été identifiés en repérant les similitudes (substrat de fond et faune, vitesses de l'eau, espèces capturées) avec les types d'habitats précédemment étudiés dans d'autres parties du cours d'eau. Deux sorties de terrain ont été réalisées en 2017 et 2018 et 21 nouveaux sites d'habitat potentiels ont été identifiés, dont 15 sites de fraie potentiels pour l'esturgeon (rives rocailleuses avec fonds de gravier et blocs rocheux, berges abruptes avec filons argileux), deux sites présentant un substrat spécifique sableux/vaseux riche en invertébrés pour l'alimentation des juvéniles de l'année, et quatre sites d'hivernage potentiels (zones profondes avec de faibles vitesses d'écoulement) (tableau 16).

Tableau 16 : Localisation de types d'habitats potentiels de l'esturgeon identifiés par des études de terrain dans la partie bulgare-roumaine du Danube entre rkm 864 et rkm 375 (d'après Honț et al., (2022), modifié)

N°	rkm	Type d'habitat	Périmètre [km]	Surface [km ²]	Observation/explication
1	843 – 841	fraie	4,57	0,39	Berge gauche, substrat de gravier
2	831 – 824	fraie	14,6	1,5	Berge droite, berges rocheuses et substrat de gravier
3	786 – 785	fraie	2,43	0,14	Berge gauche, berges argileuses verticales
4	778 – 776	fraie	5,70	0,45	Berge droite, berges rocheuses et substrat de gravier
5	775 – 771	fraie	9,27	0,74	Berge droite, berges rocheuses et substrat de gravier
6	770 – 769	fraie	2,30	0,14	Berge gauche, berges argileuses verticales
7	762 – 761	fraie	2,68	0,16	Berge gauche, berges argileuses verticales
8	678 – 677	hivernage	0,145	0,00128	Berge gauche, 8 m de profondeur, proche du chenal principal
9	678 – 673	fraie	8,50	1	Berge droite, les échantillons de fond révèlent un substrat de gravier / rocheux et de grosses pierres lisses
10	662 – 651	fraie	23,4	2,26	Berge droite, les échantillons de fond révèlent un substrat de gravier / rocheux et de grosses pierres lisses
11	649 – 640	fraie	19,9	2,25	Berge droite, berges rocheuses et substrat de gravier
12	626 – 624	alimentation des juvéniles de l'année	3,90	0,56	Berge gauche, les échantillons de fond contiennent des vers
13	603 – 602	fraie	3,62	0,23	Berge droite, substrat de gravier / rocheux
14	596 – 593	fraie	6,10	0,44	Berge droite, berges rocheuses et substrat de gravier
15	586 – 585	hivernage	0,363	0,0082	Berge gauche, eau profonde / fosse

16	579 – 577	fraie	5,41	0,46	Berge droite, substrat de gravier
17	572 – 571	alimentation des juvéniles de l'année	1,12	0,0313	Berge gauche, à l'extrémité de l'île, les échantillons de fond contiennent des vers
18	570 – 569	fraie	2,00	0,1	Berge gauche, berges argileuses verticales
19	524 – 523	hivernage	1,50	0,1	Berge gauche, eau profonde / fosse
20	414 – 412	fraie	4,35	0,29	Berge gauche, substrat de gravier
21	409	hivernage	n.a.	n.a.	Berge gauche, fosse profonde à l'extrémité de l'île

6 Messages pour les décideurs

- Encouragez et facilitez la conception d'une méthode de suivi cohérente dans votre pays et votre bassin versant. Fixez des priorités de suivi en fonction d'un plan d'action national pour les esturgeons ou d'une stratégie de conservation transnationale, en adoptant par exemple le cadre du Plan d'action paneuropéen pour les esturgeons (PANEUAP 2018).
- Intégrez le suivi des habitats de l'esturgeon à d'autres stratégies de suivi existantes (dans l'UE, il peut être intégré à la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), par exemple).
- Veillez à ce que les futurs projets faisant l'objet d'un financement public ou national respectent les bonnes pratiques décrites dans le présent document, c'est-à-dire que la question de recherche est clairement formulée et que la méthode choisie pour y répondre est pertinente.
- Veillez à ce que les résultats des mesures de suivi soient partagés de manière transparente avec le public et les autres parties prenantes concernées par la conservation des esturgeons, y compris les différents instituts de recherche nationaux, les ONG ou les autres parties prenantes des secteurs de la navigation, de la pêche, de la protection de la nature ou de la gestion de l'eau.
- Assurez un échange de données transnational régulier avec les pays voisins partageant les mêmes populations d'esturgeons. Par exemple, les informations concernant la disponibilité d'un habitat clé tel qu'un site de fraie dans un pays situé en amont peuvent orienter les décisions de gestion des pays situés en aval, et inversement.

- Intégrez les connaissances sur les habitats des esturgeons dans les plans nationaux et régionaux de gestion des bassins fluviaux, de navigation ou autres documents pertinents d'un point de vue stratégique.
- Les gouvernements nationaux et les organisations internationales doivent fournir les financements nécessaires à la mise en œuvre des mesures de suivi. La combinaison de sources nationales et d'instruments de financement spécifiques (LIFE, Horizon, le Fonds européen de développement régional (FEDER), le Fonds de cohésion (FC) et le Fonds européen pour les affaires maritimes, la pêche et l'aquaculture (Feampa) dans l'UE, par exemple) peut offrir des opportunités intéressantes pour lancer la mise en œuvre, mais à plus long terme, ces coûts devraient être intégrés dans les budgets nationaux.
- À court et à moyen terme, les ministères compétents (Environnement, Agriculture, Pêche, Développement, etc.) des États de l'aire de répartition de l'esturgeon devraient donc s'assurer que le suivi des espèces de poissons migrateurs menacés soit une priorité, certains habitats essentiels subissant des pressions importantes qui requièrent la mise en place de mesures immédiates. Par exemple, l'intégration d'un tel suivi dans les cadres d'action prioritaires (CAP) est d'une importance capitale dans l'Union européenne, car les références aux CAP constituent une condition préalable pour accéder aux financements des instruments de l'UE.

7 Bibliographie

Acolas, M. L., Le Pichon, C., & Rochard, E., «Spring habitat use by stocked one year old European sturgeon *Acipenser sturio* in the freshwater-oligohaline area of the Gironde estuary», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 196, 2017, pp. 58-69.

Allen, P. J., Mitchell, Z. A., De Vries, R. J., Aboagye, D. L., Ciaramella, M. A., Ramee, S. W., Stewart, H. A., Shartau, R. B., «Salinity effects on Atlantic Sturgeon (*Acipenser oxyrinchus oxyrinchus*, Mitchill, 1815) growth and osmoregulation», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 30, 2014, 1229–1236.

Amber, Parasiewicz, P., Łapińska, M., Suska, K., Prus, P., Ligięza, J., Rodriguez Barretto, D., P., Olivo del Amo, R., Fernández Garrido, P., Kerr, J., Kemp, P., Vowels, A., Carboneau, P., Pipil, S., Consuegra, S., Hurst, V. & Garcia de Leaniz, C, *Amber Field Manual*: https://amber.international/wp-content/uploads/2021/01/AMBER-Field-Manual_draft_Final_cover2_.pdf, 2020.

Andrews, S. N., O’Sullivan, A. M., Helminen, J., Arluison, D. F., Samways, K. M., Linnansaari, T., & Curry, R. A., «Development of active numerating side-scan for a high-density overwintering location for endemic shortnose sturgeon (*Acipenser brevirostrum*) in the Saint John River, New Brunswick», *Diversity*, vol. 12, n° 1, art. 23, 2020.

Arndt, G. M., Gessner, J., & Bartel, R., «Characteristics and availability of spawning habitat for Baltic sturgeon in the Odra River and its tributaries», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 22, 2006.

Auer, N. A., «Importance of habitat and migration to sturgeons with emphasis on lake sturgeon», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol 53, suppl. 1, 1996, pp. 152-160.

Bates, L. C., Boucher, M. A., Shrimpton, J. M., «Effect of temperature and substrate on whole body cortisol and size of larval white sturgeon (*Acipenser transmontanus*, Richardson, 1836)», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 30, n° 6, 2014, pp. 1259–1263, doi:10.1111/jai.12570

Baudoin, J.M., Burgun V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P., & Voegtle B., *Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes.*, Onema (Office national de l’eau et des milieux aquatiques), 2014, 204 p.

BC MINISTRY OF ENVIRONMENT, LANDS AND PARKS (ministère de l’environnement, des terres et des parcs de la Colombie-Britannique), *Lake and Stream Bottom Sediment Sampling Manual*: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/natural-resource-stewardship/nr-laws-policy/risc/lake_and_stream_bottom_sediment_sampling_manual.pdf

Bemis, W. E., & Kynard, B., «Sturgeon rivers: an introduction to acipenseriform biogeography and life history», *Environmental Biology of Fishes*, vol. 48, 1997, pp. 167-183.

Berg, L. S., «Vernal and hiemal races of anadromous fish species», *Akademia Nauk USSR, Otd. Matemat Estestv Nauk*, vol. 5, 1934, pp. 711-732.

- Best, M. A., Wither, A. W., & Coates, S., «Dissolved oxygen as a physico-chemical supporting element in the Water Framework Directive», *Marine pollution bulletin*, vol. 55, n^{os} 1-6, 2007, pp. 53-64.
- Billard, R., & Lecointre, G., «Biology and conservation of sturgeon and paddlefish», *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 10, 2000, pp. 355-392.
- Bird, T. J., Bates, A. E., Lefcheck, J. S., Hill, N. A., Thomson, R. J., Edgar, G. J., Stuart-Smith, R.D., Wotherspoon, S., Krkosek, M., Stuart-Smith, J.F., Pecl, G.T., Barrett, N. & Frusher, S., «Statistical solutions for error and bias in global citizen science datasets», *Biological Conservation*, vol. 173, 2014, pp. 144-154.
- Birstein, V. J., Waldman, J. R., & Bemis, W. E. (eds.), *Sturgeon biodiversity and conservation*, vol. 17, Springer Science & Business Media, 2005.
- Blaž, C., Paraschiv, M., & Pekarik, L. (eds.), *Danube Migratory Fish Habitat Manual*, projet MEASURES, Interreg – Programme Transnational pour le Danube, Danube Delta Technological Center Publishing House, 2021, 161 p.
- Blondel, P., *The handbook of sidescan sonar*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 316 p.
- Boyero, L., «The quantification of local substrate heterogeneity in streams and its significance for macroinvertebrate assemblages», *Hydrobiologia*, vol. 499, 2003, pp. 161–168.
- Brasington, J., Vericat, D., Rychkov, I., «Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning», *Water Resour. Res.*, vol. 48, 2012, doi:10.1029/2012 WR012223.
- Brierley, G., Reid, H., Fryirs, K., & Trahan, N., «What are we monitoring and why? Using geomorphic principles to frame eco-hydrological assessments of river condition», *Science of the Total Environment*, vol. 408, n^o 9, 2010, pp. 2025-2033.
- Brosse, L., Taverny, T., Lepage, M., Williot, P., Rochard, E., Desse Berset, N., ... & Gessner, J., «Habitat, movements and feeding of juvenile european sturgeon (*Acipenser sturio*) in Gironde estuary», in *Biology and Conservation of the European Sturgeon Acipenser sturio L. 1758*, chap. 11, 2011.
- Brown, C. J., *Using Side-Scan Sonar to Quantify the Spawning Runs of Atlantic Sturgeon in the Altamaha River, Georgia*, Thèse de Doctorat, University of Georgia, 2020.
- Bruch, R. M., & Binkowski, F. P., «Spawning behavior of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*)», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 18, 2002.
- Bruch, R. M., & Haxton, T. J., «Cost and relative effectiveness of Lake Sturgeon passage systems in the US and Canada», *Fisheries Research*, vol. 257, art. 106510, 2023.
- Bulliner, E. A., Erwin, S. O., Jacobson, R. B., Chojnacki, K. A., George, A. E., & Delonay, A. J., «Identifying sturgeon spawning locations through back-calculations of drift», pubs.er.usgs.gov, 2016.
- Bunte, K. & Abt, S.R., *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel-and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*, (n^o RMRS-GTR-74), U.S. Department of Agriculture, Forest

Service, Rocky Mountain Research Station, Ft. Collins, CO.,
<https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-74>, 2001.

Burt, T. P., «Monitoring change in hydrological systems», *Science of the Total Environment*, vol. 310, n^{os} 1-3, 2003, pp. 9-16.

Buscombe, D., «Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar», *Environmental modelling & software*, vol. 89, 2017, pp. 1-18.

Buscombe, D., Grams, P.E., Kaplinski, M.A., «Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 2. Scattering signatures of Colorado River bed sediment in Marble and Grand Canyons», Buscombe *et al.*, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* vol. 119, 2014, pp. 2692–2710, doi:10.1002/2014 JF003191.

Buscombe, D., Grams, P.E., Smith, S.M.C., «Automated Riverbed Sediment Classification Using Low-Cost Sidescan Sonar», *J. Hydraul. Eng.*, art. 06015019, 2015, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001079.

Buscombe, D., Rubin, D.M., Warrick, J.A., «A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment», *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, vol. 115, art. F02015, 2010, <https://doi.org/10.1029/2009JF001477>.

Campbell, J. G., & Goodman, L. R., «Acute sensitivity of juvenile shortnose sturgeon to low dissolved oxygen concentrations», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 133, n^o 3, 2004, pp. 772-776.

Carbonneau, P. E., Bizzi, S., Marchetti, G., «Robotic photosieving from low-cost multirotor sUAS: a proof-of-concept», *Earth Surf. Process. Landf.*, n/a-n/a., 2018, <https://doi.org/10.1002/esp.4298>.

Carbonneau, P. E., Bergeron, N., Lane, S.N., «Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes», *Water Resour. Res.*, vol 41, art. W11426, 2005, <https://doi.org/10.1029/2005WR003994>

Carter, J.L., et Resh, V.H., «After site selection and before data analysis—Sampling, sorting, and laboratory procedures used in stream benthic macroinvertebrate monitoring programmes by USA state agencies», *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 20, n^o 4, 2001, pp. 658–682. [Également disponible à l'adresse <https://doi.org/10.2307/1468095>.]

Cech J. J. Jr., Doroshov S. I., «Environmental requirements, preferences, and tolerance limits of North American sturgeons», in *Biology of North American sturgeon and paddlefish*, G. T. O. LeBreton, F. W. H. Beamish et R. S. McKinley (eds). Kluwer, Dordrecht, 2010, pp. 73–83.

Cech, J. J., & Crocker, C. E., «Physiology of sturgeon: effects of hypoxia and hypercapnia», *Journal of applied ichthyology*, vol. 18, 2002.

Chang, T., Gao, X., & Liu, H., «Potential hydrological regime requirements for spawning success of the Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* in its present spawning ground of the Yangtze River», *Ecohydrology*, vol. 14, n^o 8, art. e2339, 2021.

Chapman, C. G., & Jones, T. A., «First documented spawning of white sturgeon in the lower Willamette River, Oregon», *Northwest Science*, vol. 84, n^o 4, 2010, pp. 327-335.

Chapman, F. A., Van Eenennaam, J. P., & Doroshov, S. I., «The reproductive condition of white sturgeon, *Acipenser transmontanus*, in San Francisco Bay, California», *Fishery Bulletin*, vol. 94, n° 4, 1996, pp. 628-634.

Charbonnel, A., Lambert, P., Lassalle, G., Quinton, E., Guisan, A., Mas, L., Paquignon, G., Lecomte, M. & Acolas, M. L., «Developing species distribution models for critically endangered species using participatory data: The European sturgeon marine habitat suitability», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 280, art. 108136, 2023.

Chebanov, M. S., & Galich, E. V., *Sturgeon hatchery manual*, FAO, document technique sur les pêches et l'aquaculture n° 558, 2013, pp. 1-17.

Chebanov, M., Rosenthal, H., Gessner, J., Van Anrooy, R., Doukakis, P., Pourkazemi, M., Williot, P., *Sturgeon hatchery practices and management for release-guidelines*, FAO, document technique sur les pêches et l'aquaculture n° 570, Ankara, FAO, 2011, 110 p.

Chen, Y. B., & Wu, B. F., «Impact analysis of the Three-Gorges Project on the spawning of Chinese sturgeon *Acipenser sinensis*», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 27, n° 2, 2011, pp. 383-386.

Chiasson, W. B., Noakes, D. L. & Beamish, F. W. H., «Habitat, benthic prey, and distribution of juvenile lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) in northern Ontario rivers», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 54, n° 12, 1997, pp. 2866-2871.

Chiotti, J. A., Holtgren, J. M., Auer, N. A., & Ogren, S. A., «Lake sturgeon spawning habitat in the Big Manistee River, Michigan», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 28, n° 4, 2008, pp. 1009-1019.

Clapcott, J., Young, R., Harding, J., Matthaei, C., Quinn, J., & Death, R., *Sediment assessment methods. Protocols and guidelines for assessing the effects of deposited fine sediment on in-stream values*, Cawthron Institute, Nelson, Nouvelle-Zélande, 2011, 108 p.

Collier, J. J., *Creating a Spatially-Explicit Habitat Suitability Index Model for Lake Sturgeon (*Acipenser fulvescens*) in the Maumee River, Ohio*, Thèse de Doctorat, University of Toledo, 2018.

Collier, J. J., Chiotti, J. A., Boase, J., Mayer, C. M., Vandergoot, C. S., & Bossenbroek, J. M., «Assessing habitat for lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) reintroduction to the Maumee River, Ohio using habitat suitability index models», *Journal of Great Lakes Research*, vol. 48, n° 1, 2022, pp. 219-228.

Conte, F.F., Doroshov, S.I., Lutes, P.B. & Strange, E.M., *Hatchery manual for the white sturgeon, *Acipenser transmontanus**, Publication 3322, Coop. Ext. Univ. California, Div. Agriculture and Natural Resources, 1988, 104 p.

CONVENTION DE BERNE, *Pan-European Action Plan for Sturgeons*, Recommandation n° 199 (2018) du Comité permanent de la Convention de Berne (Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe), Strasbourg, 27-30 novembre, 2018, <https://rm.coe.int/pan-european-action-plan-for-sturgeons/16808e84f3>

Cooke, S.J., Midwood, J.D., Thiem, J.D., Klimley, P., Lucas, M.C., Thorstad, E.B., Eiler, J., Holbrook, C. & Ebner, B.C., «Tracking animals in freshwater with electronic tags: past, present and future», *Animal Biotelemetry*, vol. 1, art. 5, 2013.

COPERNICUS : la composante d'observation de la Terre du programme spatial de l'Union européenne – source de couches de base pour les SIG,
<https://www.copernicus.eu/fr/services>

Crossman, J. A., Jay, K. J., & Hildebrand, L. R., «Describing the diet of juvenile white sturgeon in the upper Columbia River Canada with lethal and nonlethal methods», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 36, n° 2, 2008, pp. 421-432.

Damon-Randall, K., Bohl, R., Bolden, S., Fox, D., Hager, C, Hickson, B., Hilton, E., Mohler, J., Robbins, E, Savoy, T. & Spells, A., *Atlantic Sturgeon Research Techniques*, Mémoire technique de la NOAA NMFS-NE- 215, 2010, 74 p.

De Kerckhove, D. T., Smokorowski, K. E., Randall, R. G. & ministère des Pêches et des Océans, Sault Ste. Marie, ON (Canada), Laboratoire des Grands Lacs pour les pêches et les sciences aquatiques, *A primer on fish habitat models*, «Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques», n° 2817, 2008, 71 p.

Delage N, Cachot J, Rochard E. *et al.*, «Hypoxia tolerance of European sturgeon (*Acipenser sturio* L., 1758) young stages at two temperatures», *J. Appl. Ichthyol.*, vol. 30, n° 6, 2014, pp. 1195-1202.

Delage, N., Couturier, B., Jatteau, P., Larcher, T., Ledevin, M., Goubin, H., ... & Rochard, E., «Oxythermal window drastically constraints the survival and development of European sturgeon early life phases», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, 2020, pp. 3651-3660.

DES, *Monitoring and Sampling Manual: Environmental Protection (Water) Policy*, Brisbane, Department of Environment and Science Government, 2018.
https://environment.des.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0031/89914/monitoring-sampling-manual-2018.pdf

Detert, M. & Weitbrecht, V., «Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - A free stand-alone tool», in *River Flow 2012 - Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, vol 1, 2012, pp. 595-600.

Dettlaff, T. A., Ginsburg, A. S., & Schmalhausen, O. I., *Sturgeon fishes: developmental biology and aquaculture*, trad. G.G. Gause et S.G. Vassetzky, Springer-Verlag, 1993, 300 p.

Dobriyal, P., Badola, R., Tuboi, C., & Hussain, S. A., «A review of methods for monitoring streamflow for sustainable water resource management», *Applied Water Science*, vol. 7, n° 6, 2017, pp. 2617-2628.

Doudoroff, P., & Shumway, D. L., *Dissolved oxygen requirements of freshwater fishes*, 1970.

Du, H., Wei, Q. W., Zhang, H., Liu, Z., Wang, C., & Li, Y., «Bottom substrate attributes relative to bedform morphology of spawning site of Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* below the Gezhouba dam», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 27, n° 2, 2011, pp. 257-262.

Dugdale, S.J., Carbonneau, P.E., Campbell, D., «Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps», *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 35, 2010, pp. 627–639, <https://doi.org/10.1002/esp.1936>

Duncan, M. S., Isely, J. J., & Cooke, D. W., «Evaluation of shortnose sturgeon spawning in the Pinopolis Dam tailrace, South Carolina», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 24, n° 3, 2008, pp. 932-938.

European Tracking Network (réseau de suivi européen, ETN),
<https://europeantrackingnetwork.org/en>

Flowers, H. J., & Hightower, J. E., «A novel approach to surveying sturgeon using side-scan sonar and occupancy modeling», *Marine and Coastal Fisheries*, vol. 5, n° 1, 2013, pp. 211-223.

Flowers, H. J., & Hightower, J. E., «Estimating sturgeon abundance in the Carolinas using side-scan sonar», *Marine and Coastal Fisheries*, vol. 7, n° 1, 2015, pp. 1-9.

Fox, D.A., Hightower, J. E., & Parauka, F.M., «Gulf Sturgeon Spawning Migration and Habitat in the Choctawhatchee River System, Alabama-Florida», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 129, 2000, pp. 811-826.

Friedrich, T., Reinartz, R., & Gessner, J., «Sturgeon re-introduction in the Upper and Middle Danube River Basin», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 35, n° 5, 2011, pp. 1059-1068.

Fund, H. C. T., Johnson, S., Beveridge, I., & English, K., *Side-scan Sonar Surveys of Potential White Sturgeon (Acipenser transmontanus) Spawning Areas in the Lower Fraser River, 2015*, 2016.

Gessner, J., & Schütz, W., «Wiedereinbürgerung des Europäischen Störs in der Oste», *WASSER UND ABFALL*, vol. 1, n° 2, 2011, p. 17.

Gessner, J., Kamerichs, C. M., Kloas, W., & Wuertz, S., «Behavioural and physiological responses in early life phases of Atlantic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus* Mitchill 1815) towards different substrates», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 25, 2009, pp. 83-90.

Gessner, J., Van Eenennaam, J. P., & Doroshov, S. I., «North American green and European Atlantic sturgeon: comparisons of life histories and human impacts», *Environmental biology of fishes*, vol. 79, 2007, pp. 397-411.

Gessner, J. et al., *Technical Guideline for EX SITU Conservation Measures in Sturgeons (lignes directrices techniques concernant les mesures de conservation ex situ de l'esturgeon)*, Contrat de service de la CE (09.0201/2022/885601/SER/D.3) «Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons», Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2024.

Gordon Jr, W. R., «A role for comprehensive planning, geographical information system (GIS) technologies and program evaluation in aquatic habitat development», *Bulletin of Marine Science*, vol. 55, n°s 2-3, 1994, pp. 995-1013.

Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P., «Automated Sizing of Coarse-Grained Sediments: Image-Processing Procedures», *Math. Geol.*, vol. 37, 2005a, pp. 1-28,
<https://doi.org/10.1007/s11004-005-8745-x>

Graham, D.J., Rice, S.P., Reid, I., «A transferable method for the automated grain sizing of river gravels», *Water Resour. Res.*, vol. 41, art. W07020, 2005b,
<https://doi.org/10.1029/2004WR003868>

Gruijter, J. J., Bierkens, M. F., Brus, D. J., & Knotters, M., *Sampling for natural resource monitoring*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, pp. xiii+332.

Gunderson, T. E., «Effects of hypoxia and temperature on survival, growth, and respiration of juvenile Atlantic sturgeon, *Acipenser oxyrinchus*», *Fishery Bulletin*, vol. 96, n° 3, 1998, pp. 603-613.

Haidvogel, G., Hohensinner, S., Schmutz, S. & H. Waidbacher, «Typology of the River Danube and descriptions of reference condition based on historical data and expert judgment», Département d'hydrologie, de pêche et d'aquaculture, Université des ressources naturelles et des sciences de la vie appliquées, Vienne, 2003, 19 p. Annexe 2 in Sommerhäuser, M., Robert, S., Birk, S., Hering, D., Moog, O., Stubauer, I. & T. Ofenböck, *UNDP/GEF DANUBE REGIONAL PROJECT, "STRENGTHENING THE IMPLEMENTATION CAPACITIES FOR NUTRIENT REDUCTION AND TRANSBOUNDARY COOPERATION IN THE DANUBE RIVER BASIN"- ACTIVITY 1.1.6 "DEVELOPING THE TYPOLOGY OF SURFACE WATERS AND DEFINING THE RELEVANT REFERENCE CONDITIONS, Rapport final*, 2003.

Haidvogel, G., Munteanu, C., & Reinartz, R., *Strategy for ecological corridor conservation and restoration in the Danube catchment*, projet MEASURES, Interreg – Programme Transnational pour le Danube, https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/48/1bc7e7a87c87f736946ab3c98fe275296cd7698e.pdf, 2021, consulté le 27 juillet 2023.

Hamel, M. J., Spurgeon, J. J., Pegg, M. A., Hammen, J. J., & Rugg, M. L., «Hydrologic variability influences local probability of pallid sturgeon occurrence in a Missouri River tributary», *River Research and Applications*, vol. 32, n° 3, 2016, pp. 320-329.

Hamill, D., Buscombe, D. et Wheaton, J.M., «Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side-scan sonar imagery», *PLoS ONE*, vol. 13, n° 3, art. e0194373, 2018, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194373>

Hamill, D., Wheaton, J. M., Buscombe, D., Grams, P. E., & Melis, T. S., «Bed texture mapping in large rivers using recreational-grade side-scan sonar», in *Proceedings of the Eighth International Conference on Fluvial Hydraulics (RiverFlow 2016)*, 2016, pp. 306-312.

Haulsee, D. E., Breece, M. W., Fox, D. A., & Oliver, M. J., «Simple is sometimes better: a test of the transferability of species distribution models», *ICES Journal of Marine Science*, vol. 77, n° 5, 2020, pp. 1752-1761.

Haxton, T. J., Findlay, C. S., & Threader, R. W., «Predictive value of a lake sturgeon habitat suitability model», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 28, n° 5, 2008, pp. 1373-1383.

Haxton, T., 2023: communication personnelle sur un changement plus important dans la communauté de la modélisation écologique vers l'utilisation de méthodes basées sur les données, dans lesquelles les modèles statistiques sont basés sur les données observées plutôt que de s'appuyer principalement sur l'opinion subjective d'un expert.

HELCOM/Andreasson, K. & Kronsell, J., *Guidelines for sampling and determination of dissolved oxygen in seawater*, 7 p., <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Guidelines-for-sampling-and-determination-of-dissolved-oxygen.pdf>

HELCOM, «HELCOM Action Plan for the protection and recovery of Baltic sturgeon *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus* in the Baltic Sea area», *Baltic Sea Environment Proceedings*, n° 168, 2019, <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/06/HELCOM-Sturgeon-Action-Plan-2019-2029.pdf>

Holčík, J. (dir.), *General introduction to Fishes and Acipenseriformes*, «Freshwater fishes of Europe (vol. I part. II)», Aula Verlag, Wiesbaden, 1989, 460 p.

Holley, C., Braaten, P., Poulton, B., Heist, E., Umland, L., & Haddix, T., «Diet composition and overlap of larval pallid sturgeon and shovelnose sturgeon from the upper Missouri River, USA», *Endangered Species Research*, vol. 49, 2022, pp. 103-114.

Honț, S., Paraschiv, M., & Iani, M. I., «Preliminary migratory fish habitats assessment along the Danube River sector km 863-375», *North-Western Journal of Zoology*, vol. 18, n° 1, 2022.

Honț, Ș., Paraschiv, M., Iani, M. I., Stefanov, T., Lenhardt, M., & Oprea, L., «Long Distance Migration of Beluga (*Huso huso*) and Stellate Sturgeon (*Acipenser stellatus*) in Lower Danube River in Relation with Iron Gate II Dam», *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Animal Science & Biotechnologies*, vol. 75, n° 1, 2018.

Hook, J. D., *Sturgeon habitat quantified by side-scan sonar imagery*, Thèse de Doctorat, University of Georgia, 2011.

Hughes, J. B., Bentz, B., & Hightower, J. E., «A non-invasive approach to enumerating White Sturgeon (*Acipenser transmontanus*, Richardson, 1863) using side-scan sonar», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 34, n° 2, 2011, pp. 398-404.

ICPDR, «Ecological Prioritisation Approach River and Habitat Continuity Restoration», Annexe 17, in *Danube River Basin Management Plan Update 2021*, 2021, 13 p.

Igumnova, L., «Effect of temperature fluctuations on embryonic development of the beluga, *Huso huso*, and the sevryuga, *Acipenser stellatus*», *J. Ichthyol.*, vol. 24, 1985, pp. 85-90.

Jarić, I., Gessner, J., Acolas, M. L., Lambert, P., & Rochard, E., «Modelling attempts utilized in sturgeon research: a review of the state-of-the art», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 30, n° 6, 2011, pp. 1379-1386.

Jenkins, W. E., Smith, T. I., Heyward, L. D., & Knott, D. M., «Tolerance of shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum*, juveniles to different salinity and dissolved oxygen concentrations», in *Proceedings of the Annual Conference of the Southeastern Association of Fish and Wildlife Agencies*, vol. 47, 1993, pp. 476-484.

Johnston, C., Zydlewski, G. B., Smith, S., Zydlewski, J., & Kinnison, M. T., «River reach restored by dam removal offers suitable spawning habitat for endangered Shortnose Sturgeon», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 148, n° 1, 2004, pp. 163-175.

Jungwirth, M., Haidvogel, G., Moog, O., Muhar, S., & Schmutz, S., *Angewandte Fischökologie an Fließgewässern*, vol. 547, Facultas-Verlag, Wien, 2003.

Kaesler, A.J., Litts, T.L., «A Novel Technique for Mapping Habitat in Navigable Streams Using Low-cost Side-Scan Sonar», *Fisheries*, vol. 35, 2010, pp. 163-174, doi:10.1577/1548-8446-35.4.163.

- Kaesler, A.J., Litts, T.L., Tracy, T.W., «Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the Lower Flint River, Georgia, USA», *River Res. Appl.*, vol. 29, 2012, 634–644.
- Kaplinski, M., Hazel, J.E., Parnell, R., Breedlove, M., Kohl, K., *Monitoring fine-sediment volume in the Colorado River Ecosystem, Arizona: Bathymetric survey techniques*, U.S. Geol. Surv., Rapport public n° 2009–1207, Flagstaff, Arizona, 2009.
- Katopodis, C., Cai, L., & Johnson, D., «Sturgeon survival: The role of swimming performance and fish passage research», *Fisheries Research*, vol. 212, 2019, pp. 162–171.
- Kazyak, D. C., Flowers, A. M., Hostetter, N. J., Madsen, J. A., Breece, M., Higgs, A., ... & Fox, D. A., «Integrating side-scan sonar and acoustic telemetry to estimate the annual spawning run size of Atlantic sturgeon in the Hudson River», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 77, n° 6, 1997, pp. 1038-1048.
- Kemp, P. S., Russon, I. J., Waterson, B. J., O'Hanley, J., & Pess, G. R., *Recommendations for a "coarse-resolution rapid-assessment" methodology to assess barriers to fish migration, and associated prioritization tools*, 2008.
- Kerr, J., Vowles, A., O'Hanley, J. et Kemp, P., *D.1.1 Guidance on Stream Barrier Surveying and Reporting. Part A: Locating, Surveying and Prioritising Mitigation Actions for Stream Barriers.*, Un rapport pour le projet H2020 AMBER, Convention de subvention : n° 689682. 2016, 58 p.
- Kerr, S. J., M. J. Davison et E. Funnell, *A review of lake sturgeon habitat requirements and strategies to protect and enhance sturgeon habitat*, Section des politiques des pêches, Direction des politiques de conservation des espèces, Ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario, Peterborough, Ontario, 2010, 58 p. + annexes.
- Khodorevskaya, R. P., Ruban, G. J., & Pavlov, D. S., *Behaviour, migrations, distribution, and stocks of Sturgeons in the Volga-Caspian Basin*, n° 3, BoD–Books on Demand, 2009.
- Kieffer, J. D., Baker, D. W., Wood, A. M., & Papadopoulos, C. N., «The effects of temperature on the physiological response to low oxygen in Atlantic sturgeon», *Fish physiology and biochemistry*, vol. 37, 2011, pp. 809-819.
- Kinzelbach, R., «Ein weiterer alter Nachweis des Sterlets, *Acipenser ruthenus* in der württembergischen Donau», in Kinzelbach (dir.), «Limnologie aktuell», Band/vol. 2, *Biologie der Donau*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-Jena-New York, 1994.
- Klimley, A. P., McDonald, R., Thomas, M. J., Chapman, E., & Hearn, A., «Green sturgeon habitat suitability varies in response to drought related flow regimes», *Environmental biology of fishes*, vol. 103, 2020, pp. 425-435.
- Kynard, B., Parker, E., Kynard, B., & Horgan, M., «Behavioural response of Kootenai white sturgeon (*Acipenser transmontanus*, Richardson, 1836) early life stages to gravel, pebble, and rubble substrates: guidelines for rearing substrate size», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 29, n° 5, 2011, pp. 951-957.
- LimnoPlan, *Evaluation of potential reproductive habitats in the Lower Rhine River in Germany - Literature study on key aspects of sturgeon reproductive habitats combined with GIS-based analyses of habitat availability*,

https://www.ark.eu/sites/default/files/media/Steur/Sturgeon_reproductive_habitat_Rhin_e.pdf, 2017, consulté le 27 juillet 2023.

Litts, T. L., & Kaeser, A. J., «Mapping potential spawning substrate for shortnose and Atlantic sturgeon in coastal plain rivers of Georgia using low-cost side-scan sonar», *Journal of the Southeastern Association of Fish and Wildlife Agencies*, vol. 3, 2016, pp. 80-88.

Lucas, M.C., & Baras, E., «Methods for studying spatial behaviour of freshwater fishes in the natural environment», *FISH and FISHERIES*, vol. 1, 2000, pp. 283-316.

Maddock, I., «The importance of physical habitat assessment for evaluating river health», *Freshwater Biology*, vol. 41, 1999, pp. 373±391.

Manko, P., *Stomach content analysis in freshwater fish feeding ecology*, Université de Prešov, vol. 116, n° 5, 2016, pp. 1-25,
https://www.unipo.sk/public/media/30699/2016_PV_MANKO_Stomach_content_fish.pdf

Manny, B. A., Kennedy, G. W., «Known lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) spawning habitat in the channel between lakes Huron and Erie in the Laurentian Great Lakes», *J. Appl. Ichthyol.*, vol. 18, 2002, pp. 486-490.

Mapire : <https://maps.arcanum.com/en/>

Marenkov, O., & Fedonenko, O., «Ways of optimization of breeding conditions of fish by using artificial spawning grounds», *World Scientific News*, vol. 49, n° 1, 2016, pp. 1-58.

Margaritova, B., K., *Study of the spawning and feeding habitats of the sturgeons in the Bulgarian section of the Danube River*, Thèse de Doctorat, Université «St. Kliment Ohridski» de Sofia, Faculté de Biologie, Département d'hydrobiologie générale et appliquée, 2022, 239 p.

Margaritova, B., Kenderov, L., Dashinov, D., Uzunova, E., & Mihov, S., «Dietary composition of young sturgeons (*Acipenseridae*) from the Bulgarian section of the Danube River», *Journal of Natural History*, vol. 55, n°s 35-36, 2021, pp. 2279-2297.

Matica, Z., «Considerations for multi-species fish passage in California: A literature review», *San Francisco Estuary and Watershed Science*, vol. 18, n° 3, 2020.

McAdam, S. O., «Effects of substrate condition on habitat use and survival by white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) larvae and potential implications for recruitment», *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 68, n° 5, 2011, pp. 812-822.

McAdam, S. O., Crossman, J. A., Williamson, C., St Onge, I., Dion, R., Manny, B. A., & Gessner, J., «If you build it, will they come? Spawning habitat remediation for sturgeon», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 34, n° 2, 2018, pp. 258-278.

McAdam, S. O., Walters, C. J., Nistor, C., «Linkages between white sturgeon recruitment and altered bed substrates in the Nechako River, Canada», *Trans. Amer. Fish. Soc.*, vol. 134, 2005, pp. 1448-1456.

Melo-Merino, S. M., Reyes-Bonilla, H., & Lira-Noriega, A., «Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence», *Ecological Modelling*, vol. 415, art. 108837, 2020.

Mihov, S. D., Margaritova, B. K., & Koev, V. N., «Downstream migration of young-of-the-year sturgeons (*Acipenseridae*) in the Lower Danube River, Bulgaria», *Biodiversity*, vol. 23, n° 2, 2022, pp. 72-80.

Mudroch, A., & Azcue, J. M., *Manual of aquatic sediment sampling*, Crc Press, 1995.

Muhar, S., «Habitat improvement of Austrian rivers with regard to different scales», *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 12, 1996, pp. 471±482.

Muir, W. D., Emmett, R. L., et McConnell, R. J., «Diet of juvenile and subadult white sturgeon in the lower Columbia River and its estuary», *California Fish and Game*, vol. 74, n° 1, 1988, pp. 49-54.

Muir, W. D., George Jr, T., Parsley, M. J., & Hinton, S. A., «Diet of first-feeding larval and young-of-the-year white sturgeon in the lower Columbia River», *Northwest science*, vol. 74, n° 1, 2000, pp. 25-33.

Musyl, M. K., Domeier, M. L., Nasby-Lucas, N., Brill, R. W., McNaughton, L. M., Swimmer, J. Y., ... & Liddle, J. B., «Performance of pop-up satellite archival tags», *Marine Ecology Progress Series*, vol. 433, 2011, pp. 1-28.

Neill, M., Walsh, N., & Lucey, J., «Direct measurement of oxygen in river substrates», *Water and Environment Journal*, vol. 28, n° 4, 2014, pp. 566-571.

Nelson, T.C., Doukakis, P., Lindley, S.T., Schreier, A.D., Hightower, J.E., Hildebrand, L.R., Whitlock, R.E., & Webb, M.A.H., «Research Tools to Investigate Movements, Migrations, and Life History of Sturgeons (*Acipenseridae*), with an Emphasis on Marine-Oriented Populations», *PLoS ONE*, vol. 8, n° 8, art. e71552, 2013, Doi: 10.1371/journal.pone.0071552

Neuburg, J., Acolas, M.-L., Friedrich, T., Gessner, J., Haxton, T.J., *Technical Guideline for Sturgeon Population Monitoring (Lignes directrices techniques pour le suivi des populations d'esturgeons)*, Contrat de service de la CE (09.0201/2022/885601/SER/D.3) «Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons», Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2024.

Niklitschek, E., Secor, D. H., «Dissolved oxygen, temperature and salinity effects on the ecophysiology and survival of juvenile Atlantic Sturgeon in estuarine waters: I. Laboratory results», *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, vol. 381, 2009a, pp. S150–S160.

Niklitschek, E., Secor, D. H., «Dissolved oxygen, temperature and salinity effects on the ecophysiology and survival of juvenile Atlantic sturgeon in estuarine waters: II. Model development and testing», *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, vol. 381, 2009b, pp. S161–S172.

Nilo, P., Tremblay, S., Bolon, A., Dodson, J., Dumont, P., & Fortin, R., «Feeding ecology of juvenile lake sturgeon in the St. Lawrence River system», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 135, n° 4, 2006, pp. 1044-1055.

NOAA : https://media.fisheries.noaa.gov/dam-migration/ans_life_stage_behavior_descriptions_20191029_508.pdf

Noonan, M. J., Grant, J. W., & Jackson, C. D., «A quantitative assessment of fish passage efficiency», *Fish and Fisheries*, vol. 13, n° 4, 2012, pp 450-464.

- Parsley, M. J., L. G. Beckman, et G. J. McCabe, «White sturgeon spawning and rearing habitat in the Columbia River downstream of McNary Dam», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 122, 1993, pp. 217–228.
- Pence, R.A., Cianciolo, T.R., Drover, D.R., McLaughlin, D.L., Soucek, D.J., Timpano, A.J., Zipper, C.E., et Schoenholtz, S.H., «Comparison of benthic macroinvertebrate assessment methods along a salinity gradient in headwater streams», *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 193, n° 765, 2021, 16 p.
- Pfleger, M. O., Rider, S. J., Johnston, C. E., & Janosik, A. M., «Saving the doomed: Using eDNA to aid in detection of rare sturgeon for conservation (*Acipenseridae*)», *Global Ecology and Conservation*, vol. 8, 2016, pp. 99–107, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.08.008>
- Popp, S. W., *Small-scale habitat use of the sterlet (*Acipenser ruthenus*) during spawning season in the Danube downstream of the hydropower plant Freudenua*, Thèse de Master, IHG/BOKU, 2022, 96 p.
- Popp, S., *Characteristics and locations of Sturgeon Habitat in European Rivers*, Contrat de service de la CE (09.0201/2022/885601/SER/D.3) «Soutien aux actions de conservation et de protection en vue de la mise en œuvre du plan d'action paneuropéen pour la conservation des esturgeons», 2024.
- Porter, J. M., *Effects of temperature and hydrology on growth and recruitment of Shovelnose Sturgeon in the lower Mississippi River*, Thèses et mémoires, n° 1802, 2017, <https://scholarsjunction.msstate.edu/td/1802>, Mississippi State University
- Porter, J. M., & Schramm Jr, H. L., «Effects of temperature and hydrology on growth of shovelnose sturgeon *Scaphirhynchus platyrhynchus* (Rafinesque, 1820) in the lower Mississippi River», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 34, n° 1, 2018, pp. 21-28.
- Reynolds, J. H., Knutson, M. G., Newman, K. B., Silverman, E. D., & Thompson, W. L., «A road map for designing and implementing a biological monitoring program», *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 188, 2016, pp. 1-25.
- Rochard, E., Williot, P., Castelnaud, G., & Lepage, M., «Eléments de systématique et de biologie des populations sauvages d'esturgeons», in *Acipenser*, Cemagref, Antony, 1991, pp. 475-507.
- Rubin, D.M., «A Simple Autocorrelation Algorithm for Determining Grain Size from Digital Images of Sediment», *J. Sediment. Res.*, vol. 74, 2004, pp. 160–165, <https://doi.org/10.1306/052203740160>.
- Rubin, D.M., Chezar, H., Harney, J.N., Topping, D.J., Melis, T.S., Sherwood, C.R., «Underwater microscope for measuring spatial and temporal changes in bed-sediment grain size», *Sedimentary Geology*, vol. 202, n° 3, 2007, pp. 402–408, <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.02>.
- Ruiz-Villaverde, A., & García-Rubio, M. A., «Public participation in European water management: From theory to practice», *Water Resources Management*, vol. 31, 2017, pp. 2479-2495.
- Schiemer, F., «Fish as indicators for the assessment of the ecological integrity of large rivers», *Hydrobiologia*, vol. 422, 2000, pp. 271-278.

- Schmidt, A.M. & Van der Sluis, T., *E-BIND Handbook (Part A): Improving the availability of data and information on species, habitats, and sites*, Wageningen Environmental Research, Ecologic Institute, Milieu Ltd., Wageningen, The Netherlands, 2021, https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/A_EBind_Handbook.pdf
- Schmutz, S., & Mielach, C., *Measures for ensuring fish migration at transversal structures*, ICPDR-Internat. Commission for the Protection of the Danube River, 2013.
- Seesholtz, A. M., Manuel, M. J., & Van Eenennaam, J. P., «First documented spawning and associated habitat conditions for green sturgeon in the Feather River, California», *Environmental Biology of Fishes*, vol. 98, 2015, pp. 905-912.
- Silva, A. T., Lucas, M. C., Castro Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L. J., Thiem, J. D., ... & Cooke, S. J., «The future of fish passage science, engineering, and practice», *Fish and Fisheries*, vol. 19, n° 2, 2017, pp 340-362.
- Skilbeck, C. G., Trevathan-Tackett, S., Apichanangkool, P., & Macreadie, P. I., «Sediment sampling in estuaries: site selection and sampling techniques», in *Applications of paleoenvironmental techniques in estuarine studies*, 2017, pp. 89-120.
- Soucek, D.J., Farag, A.M., Besser, J.M., et Steevens, J.A., *Guide for benthic invertebrate studies in support of Natural Resource Damage Assessment and Restoration*, U.S. Geological Survey, Rapport public n° 2022-1110, 2023, 11 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20221110>.
- Strel'nikova, A. P., «Feeding of juvenile sterlet (*Acipenser ruthenus*, *Acipenseridae*) in the Danube River midstream», *Journal of Ichthyology*, vol. 52, 2012, pp. 85-90.
- Sulak, K. J., et J. P. Clugston, «Early life history of Gulf sturgeon in the Suwannee River, Florida», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 127, 1998, pp. 758-771.
- Sullivan, A. B., Jager, H. I., & Myers, R.,. «Modeling white sturgeon movement in a reservoir: the effect of water quality and sturgeon density», *Ecological Modelling*, vol. 167, n°s 1-2, 2003, pp. 97-114.
- Sun, L., Zhao, F., Wang, S., Wang, Y., Yang, G., & Zhuang, P., «Growth and feeding ecology of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze Estuary», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 35, n° 1, 2019, pp. 47-53.
- Tuit, C. B., & Wait, A. D., «A review of marine sediment sampling methods», *Environmental Forensics*, vol. 21, n°s 3-4, 2020, pp. 291-309.
- U.S. Geological Survey, «Dissolved oxygen», in U.S. Geological Survey, *Techniques and Methods*, livre 9, chap. A6.2, 2020, 33 p., <https://doi.org/10.3133/tm9A6.2>. [Remplace USGS, *Techniques of Water-Resources Investigations*, livre 9, chap. A6.2 version 3.0.]
- Vine, J. R., Kanno, Y., Holbrook, S. C., Post, W. C., & Peoples, B. K., «Using side-scan sonar and N-mixture modeling to estimate Atlantic Sturgeon spawning migration abundance», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 39, n° 5, 2008, pp. 939-950.
- Vos, P., Meelis, E. & Ter Keurs, W.J., «A FRAMEWORK FOR THE DESIGN OF ECOLOGICAL MONITORING PROGRAMS AS A TOOL FOR ENVIRONMENTAL AND NATURE MANAGEMENT», *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 61, 2000, pp. 317-344.

Walker, D. J., & Alford, J. B., «Mapping Lake sturgeon spawning habitat in the upper Tennessee River using side-scan sonar», *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 36, n° 5, 2016, pp. 1097-1105.

Walker, D., & Alford, B., *Mapping Lake Sturgeon (Acipenser fluvescens) Spawning habitat in the Upper Tennessee River Using Side-Scan Sonar*, Hydropower Foundation, 2016.

Directive-cadre sur l'eau (2000/60/EC)

Wei, Q. W., Kynard, B., Yang, D. G., Chen, X. H., Du, H., Shen, L., & Zhang, H., «Using drift nets to capture early life stages and monitor spawning of the Yangtze River Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)», *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 25, 2009, pp. 100-106.

Whitman, M. S., E. H. Moran, et R. T. Ourso, «Photographic techniques for characterizing streambed particle sizes», *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 132, 2003, pp. 605-610.

Wolfram, G., Sigmund, E., Schaufler, K. & Zornig, H., *General Manual for Surveys in Running Waters*, European Union Water Initiative Plus for the Eastern Partnership (EUWI+ 4 EaP) - Results 2 and 3 (ENI/2016/372-403), 2019, 40 p.

Woodget, A.S., Fyffe, C., Carbonneau, P.E., «From manned to unmanned aircraft: Adapting airborne particle size mapping methodologies to the characteristics of sUAS and SfM», *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 43, 2018, pp. 857-870, <https://doi.org/10.1002/esp.4285>

Yi, Y., Wang, Z., & Yang, Z., «Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites», *Ecological Modelling*, vol. 221, n° 5, 2010, pp. 864-875.

Yorke, T. H., & Oberg, K. A., «Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers», *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 13, n°s 5-6, 2002, pp. 191-195.

Zarri, L. J., & Palkovacs, E. P., «Temperature, discharge and development shape the larval diets of threatened green sturgeon in a highly managed section of the Sacramento River», *Ecology of Freshwater Fish*, vol. 28, n° 2, 2019, pp. 257-265.