



REVER 10 — 10^E COLLOQUE DU RÉSEAU D'ÉCHANGE
ET DE VALORISATION EN ÉCOLOGIE DE LA RESTAURATION
PARIS, 19-21 MARS 2019

Édité par Philippe GOURDAIN

Principes fondamentaux et exemple d'application du « Guide pour l'élaboration des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau »

Anne VIVIER, Marlène ROLAN-MEYNARD, Sophie TUAUX,
Benoît RIGAULT, Yorick REYJOL, Gabriel MELUN & Stéphane JOURDAN

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION / *PUBLICATION DIRECTOR*: Bruno David,
Président du Muséum national d'Histoire naturelle

RÉDACTEUR EN CHEF / *EDITOR-IN-CHIEF*: Jean-Philippe Siblet

ASSISTANTE DE RÉDACTION / *ASSISTANT EDITOR*: Sarah Figuet (naturae@mnhn.fr)

MISE EN PAGE / *PAGE LAYOUT*: Sarah Figuet

COMITÉ SCIENTIFIQUE / *SCIENTIFIC BOARD*:

Luc Abbadie (UPMC, Paris)
Luc Barbier (Parc naturel régional des caps et marais d'Opale, Colémbert)
Aurélien Besnard (CEFE, Montpellier)
Vincent Boulet (Expert indépendant flore/végétation, Frugières-le-Pin)
Hervé Brustel (École d'ingénieurs de Purpan, Toulouse)
Patrick De Wever (MNHN, Paris)
Thierry Dutoit (UMR CNRS IMBE, Avignon)
Éric Feunteun (MNHN, Dinard)
Romain Garrouste (MNHN, Paris)
Grégoire Gautier (DRAAF Occitanie, Toulouse)
Olivier Gilg (Réserves naturelles de France, Dijon)
Frédéric Gosselin (Irstea, Nogent-sur-Vernisson)
Patrick Haffner (PatriNat, Paris)
Frédéric Hendoux (MNHN, Paris)
Xavier Houard (OPIE, Guyancourt)
Isabelle Leviol (MNHN, Concarneau)
Francis Meunier (Conservatoire d'espaces naturels – Hauts-de-France, Amiens)
Serge Muller (MNHN, Paris)
Francis Oliveau (DREAL Centre, Orléans)
Laurent Poncet (PatriNat, Paris)
Nicolas Poulet (OFB, Vincennes)
Jean-Philippe Siblet (PatriNat, Paris)
Laurent Tillon (ONF, Paris)
Julien Touroult (PatriNat, Paris)

COUVERTURE / *COVER*:

Vue aérienne du nouveau tracé de la Hem en amont du moulin de la Leulenne à Tournehem sur la Hem (62). Crédit photo: FDPPMA62.



Naturae est une revue en flux continu publiée par les Publications scientifiques du Muséum, Paris
Naturae is a fast track journal published by the Museum Science Press, Paris

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi / *The Museum Science Press also publish*:

Adansonia, *Zoosystema*, *Anthropozoologica*, *European Journal of Taxonomy*, *Geodiversitas*, *Cryptogamie* sous-sections *Algologie*, *Bryologie*, *Mycologie*, *Comptes Rendus Palevol*.

Diffusion – Publications scientifiques Muséum national d'Histoire naturelle
CP 41 – 57 rue Cuvier F-75231 Paris cedex 05 (France)
Tél.: 33 (0)1 40 79 48 05 / Fax: 33 (0)1 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr / <https://sciencepress.mnhn.fr>

© Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 2022
ISSN (électronique / *electronic*): 1638-9387

Principes fondamentaux et exemple d'application du « Guide pour l'élaboration des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau »

Anne VIVIER

Office français de la Biodiversité, Direction de la recherche et de l'appui scientifique,
Service mobilisation de la recherche, 5 Square Felix Nadar, F-94300 Vincennes (France)
anne.vivier@ofb.gouv.fr

Marlène ROLAN-MEYNARD

Inrae, Pôle de Recherche & Développement ECLA « Écosystèmes lacustres »,
3275 Route de Cézanne, CS 40061, F-13182 Aix-en-Provence Cedex 5 (France)
marlene.meynard@inrae.fr

Sophie TUAUX

Office français de la Biodiversité, Direction régionale Hauts-de-France,
56 rue Jules Barni, F-80040 Amiens Cedex1 (France)
sophie.tuaux@ofb.gouv.fr

Benoît RIGAULT

Fédération du Pas-de-Calais pour la Pêche et la Protection du Milieu aquatique,
Rue des Alpes, 62510 Arques (France)
benoit.rigault@peche62.fr

Yorick REYJOL

PatriNat (OFB-CNRS-MNHN), Muséum national d'Histoire naturelle,
57 rue Cuvier, boîte postale 41, F-75231 Paris cedex 05 (France)
yorick.reyjol@mnhn.fr

Gabriel MELUN

Office français de la Biodiversité, Direction de la recherche et de l'appui scientifique,
Service mobilisation de la recherche, 5 Square Felix Nadar, F-94300 Vincennes (France)
gabriel.melun@ofb.gouv.fr

Stéphane JOURDAN

Agence de l'eau Artois-Picardie, Service milieux aquatiques et maîtrise d'ouvrage,
Centre tertiaire de l'Arsenal, 200 rue Marceline, BP 80818, F-59508 Douai Cedex (France)
s.jourdan@eau-artois-picardie.fr

Soumis le 13 septembre 2019 | Accepté le 9 juillet 2020 | Publié le 16 mars 2022

Vivier A., Rolan-Meynard M., Tuaux S., Rigault B., Reyjol Y., Melun G. & Jourdan S. 2022. — Principes fondamentaux et exemple d'application du « Guide pour l'élaboration des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau », in Gourdain P. (éd.), REVER 10 – 10^e Colloque du Réseau d'Échange et de Valorisation en Écologie de la Restauration, Paris, 19-21 mars 2019. *Naturae* 2022 (5): 101-111. <https://doi.org/10.5852/naturae2022a5>

RÉSUMÉ

Le « Guide pour l'élaboration des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau » a pour objectifs d'appuyer les gestionnaires dans l'évaluation de l'efficacité de leurs travaux et de produire des données de suivis homogènes et bancarisées afin de documenter scientifiquement les effets des travaux de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Fruit d'un long processus

MOTS CLÉS
Reméandrage,
effacement d'ouvrage
en travers,
suivis standardisés,
évaluation,
la Hem.

KEY WORDS
Remeandering,
barrier removal,
standardized monitoring,
assessment,
Hem river.

collaboratif, le suivi proposé (aussi appelé Suivi scientifique minimal ou SSM) a été construit autour de grands principes structurants tels qu'une conception de type BACI, un suivi sur le long terme et le recours à des protocoles standardisés. Il est applicable en France métropolitaine sur les cours d'eau petits à moyens, prospectables à pied et a été décliné pour sept types d'opérations de restauration hydromorphologique. L'exemple d'application sur le site de restauration de la Hem à Tournehem-sur-la-Hem montre comment ce suivi peut être mis en œuvre sur le terrain. Ce projet, qui comprend l'effacement de l'ouvrage du Moulin de la Leulenne et le reméandrage de la Hem, a deux objectifs principaux : la recolonisation du tronçon amont par les grands migrateurs d'une part, et la reprise de processus hydromorphologiques naturels d'autre part. La volonté d'évaluer la réussite de l'opération a conduit à la mise en œuvre du SSM, complété par d'autres suivis, dans le cadre d'un dispositif partenarial. Dès la première année post-travaux le suivi montre déjà des résultats intéressants sur l'hydromorphologie et la biologie.

ABSTRACT

Guide for standardized monitoring of hydromorphological restoration operations in rivers. Fundamentals and example of application.

The guide for a standardized monitoring of hydromorphological restoration works in rivers aims to support managers in the evaluation of the efficiency of their work and produce homogeneous, stored and traceable monitoring data, to fuel science on the effects of hydromorphological restoration works in rivers. Resulting from a long collaborative process, this monitoring (also called Minimal Scientific Monitoring or MSM) was built around major structuring principles such as BACI-type design, long-term monitoring and the use of standardized protocols. It is applicable in mainland France on the wadeable watercourses with at least one meter of wetted width and has been adapted to seven types of hydromorphological restoration works. The example of application at the restoration site at La Hem in Tournehem-sur-la-Hem (northern France) shows how this monitoring can be implemented in the field. The Moulin de la Leulenne's weir removal and the Hem river remeandering aim to allow recolonization of the upstream section by migratory fishes and to revitalize hydromorphological processes. The willingness to evaluate the success of the operation led to the implementation of the MSM, completed by other follow-ups. The first results show a very positive response of anadromous fish communities. Thanks to high flow periods during the winter following restoration works, the remobilization of coarse sediments occurred upstream the removed weir, allowing European river lamprey to spawn in the restored river section. One of the keypoints of the MSM project is the constant updates, thus riparian vegetation and river restoration co-benefits monitoring will be shortly investigated.

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années et l'adoption de la Directive cadre sur l'eau (DCE) le 23 octobre 2000, la mise en œuvre d'opérations de restauration de l'hydromorphologie en cours d'eau connaît un essor important (Morandi 2014; Dos Reis Oliveira *et al.* 2020). Reméandrage, reconstitution du matelas alluvial, effacement d'ouvrages transversaux sont aujourd'hui des actions régulièrement menées par les gestionnaires des cours d'eau afin, par exemple, de réactiver les processus hydromorphologiques, de diversifier les habitats des cours d'eau (et ainsi favoriser le retour d'une flore et d'une faune diversifiées) ou encore de réduire le risque inondation (Onema *et al.* 2010; Feld *et al.* 2011; Morandi 2014; Dos Reis Oliveira *et al.* 2020).

Chercheurs et gestionnaires étudient ensemble les effets de ces travaux sur les processus hydromorphologiques dans les cours d'eau ainsi que sur les communautés vivantes qui y résident. L'objectif est de mieux comprendre les trajectoires de récupération des écosystèmes et d'évaluer la réussite des opérations de restauration. De nombreux travaux mettent en

évidence la difficulté à tirer des enseignements rigoureux en ce sens (Friberg *et al.* 2011; Dos Reis Oliveira *et al.* 2020). Les milieux aquatiques et les processus auxquels ils sont soumis sont complexes : temps de récupération des milieux – résilience –, variabilité des conditions naturelles caractérisant les cours d'eau, diversité des travaux de restauration mis en œuvre, liens entre hydromorphologie et biologie (Feld *et al.* 2011; Navel & Belliard 2018). Par ailleurs, il est souvent difficile d'analyser les données et d'interpréter les résultats des suivis écologiques, notamment en raison de l'absence de suivi avant travaux et de l'insuffisante prise en compte des données de contexte (Morandi *et al.* 2014; England & Wilkes 2018; Weber *et al.* 2018). Enfin malgré une bonne connaissance des stratégies de suivi efficaces dans le cadre de la restauration (Fiers 2003; Malavoi & Souchon 2010; RRC 2011; Souchon 2012), la conception des suivis mis en œuvre aujourd'hui demeure globalement insuffisante pour produire des données exploitables et informatives (Morandi 2014; Dos Reis Oliveira *et al.* 2020). Le « Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau » (Rolan-Meynard *et al.* 2019) propose donc aux

gestionnaires un suivi adapté et opérationnel de la biologie et de l'hydromorphologie, pour sept types d'opérations de restauration. L'objectif est de permettre aux gestionnaires de concevoir et mettre en œuvre des suivis afin de produire des données de suivi homogènes et collectées de manière rigoureuse, permettant leur analyse critique et leur interprétation.

Nous allons aborder le processus d'élaboration du guide et les grands principes qui ont orienté sa rédaction. Puis nous présenterons un exemple de mise en œuvre du guide sur l'opération de restauration hydromorphologique de la Hem à Tournehem-sur-la-Hem, visant à la fois la recolonisation de six kilomètres de cours d'eau par les poissons migrateurs et la reprise des processus hydromorphologiques naturels sur le site.

Cet article s'inscrit dans le cadre de la publication des Actes issus du 10^e Colloque du Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration (REVER) organisé à Paris en 2019 (Dutoit *et al.* 2021).

PRÉSENTATION DU GUIDE

MÉTHODE DE TRAVAIL

Le constat de la difficulté à évaluer les effets des opérations de restauration est à l'origine du projet de Suivi scientifique minimal (SSM). Il s'agissait donc de poser les bases d'un suivi standardisé, rigoureux et reproductible sur des opérations de restauration suffisamment ambitieuses pour espérer un effet significatif sur le fonctionnement du cours d'eau et les communautés qui y vivent. Malavoi & Souchon (2010) ont ainsi rédigé un premier document de cadrage sur les suivis, complété ensuite par Navarro *et al.* (2012). Les préconisations exposées dans ces premiers documents ont été mises en œuvre sur une dizaine de sites de restauration.

En 2015, un état des lieux de la mise en œuvre du SSM sur ces sites a été réalisé (Tales 2017). Il n'a pas remis en cause les concepts exposés dans ces premiers documents de cadrage, mais il a permis de montrer une grande hétérogénéité dans leur appropriation et dans la mise en œuvre effective des suivis sur le terrain, rendant l'analyse des données et l'interprétation des résultats particulièrement délicates.

Certains protocoles, peu développés dans le document initial, ou peu adaptés, n'étaient que partiellement ou pas du tout mis en œuvre. Les parties consacrées à la biologie, notamment, étaient peu développées dans les documents initiaux et les protocoles d'échantillonnage laissés en partie à la libre appréciation des opérateurs.

Suite à la mise en évidence de ces écueils, des groupes de travail se sont réunis pour rendre plus opérationnel le SSM. Au fil des discussions, il s'est avéré que la rédaction d'un guide complet, « clés-en-mains », semblait la meilleure solution. Ainsi, les opérateurs, à l'aide d'un guide, pourraient mettre en place un suivi de leur opération de restauration de la façon la plus standardisée et reproductible possible.

Le guide de suivi des opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau est paru en mai 2019 (Rolan-Meynard *et al.* 2019).

PRINCIPES RETENUS ET OBJECTIFS

L'ambition du guide est de proposer un protocole de suivi permettant de générer des données standardisées et informatives suite à une opération de restauration. Ces données ainsi récoltées permettront, à l'échelle d'un site, de détecter les effets des travaux de restauration sur le fonctionnement du milieu physique et des communautés biologiques (animales et végétales) qui y vivent. Il s'agit également de rendre les données de suivi facilement accessibles pour, dans un second temps, par de l'analyse de données inter-sites, étudier à plus large échelle les effets de la restauration sur les milieux aquatiques.

À terme, ces éléments devraient permettre d'élaborer des recommandations pour mieux cibler les techniques et les modalités de restauration et de suivi les plus efficaces.

Pour répondre à cette ambition, le guide se base sur quatre grands principes :

- le suivi doit inclure des stations témoin (temporelles et spatiales) ;
- il doit être mis en place sur une échelle de temps suffisamment longue ;
- il doit se baser sur des protocoles standardisés ;
- il doit inclure les données de contexte physique et anthropique.

En effet, dans la littérature, les écueils pointés sont un suivi sans témoin (pas de suivi avant et/ou pas de témoin), l'hétérogénéité des protocoles mis en œuvre, le manque de prise en compte des éléments de contexte, et enfin le manque de suivis sur le long terme (Roni *et al.* 2008 ; Kail *et al.* 2015 ; Lorenz *et al.* 2018).

La conception du suivi se base donc sur les principes du BACI (Stewart-Oaten *et al.* 1986 ; Kibler *et al.* 2010), soit « Before-after-control-impact ». Il s'agit de suivre de manière systématique plusieurs stations en parallèle, avant et après les travaux de restauration (*Before-after*). Ces stations sont composées d'une ou plusieurs stations « Restaurées » (*Impact* – sur le linéaire qui sera restauré) et d'une ou plusieurs stations « Témoin » (*Control* – Non altérée : station ne subissant pas l'altération de la station restaurée, et/ou *Control* – Altérée : station subissant l'altération et n'étant pas restaurée). Ce principe permet d'attester de manière fiable des effets d'une pression déterminée sur les différents éléments du système (Kibler *et al.* 2010). En l'absence de stations « Témoin », par exemple, il est difficile de savoir si les évolutions observées sont liées à la restauration ou à d'autres éléments affectant le bassin versant (changements d'occupation du sol du bassin versant, pollutions, etc.).

Le suivi proposé s'inscrit sur une durée d'une dizaine d'années, avec des campagnes organisées régulièrement, d'un à trois ans avant les travaux, puis après travaux suivant une fréquence biennale pendant au moins sept ans. Cette chronique de données permettra de prendre en compte les effets des variations interannuelles (hydrologie, température, physico-chimie, etc.) mais aussi les trajectoires d'évolution du milieu et des communautés. Le plus souvent, dans les suivis d'opérations de restauration de cours d'eau, une seule itération de suivi post-travaux est réalisée (Morandi *et al.* 2017). Il est alors difficile de savoir si les résultats obtenus ne sont pas le simple fait de la

variabilité interannuelle naturelle du cours d'eau (hydrologie, température atypique, dynamique de population des espèces), des perturbations de l'écosystème dues aux travaux ou des effets de l'opération de restauration. Les connaissances sur le temps de récupération des cours d'eau restaurés étant aujourd'hui lacunaires, il est également très difficile de déterminer a priori la durée du suivi après restauration ; dans ce contexte, en nous basant sur les préconisations initiales de Malavoi & Souchon (2010) il est proposé dans ce travail un suivi sur une durée minimale de sept ans après travaux. Cette durée sera susceptible d'évoluer en fonction de l'amélioration des connaissances : récemment, certains auteurs ont par exemple suggéré d'assurer un suivi pendant au moins dix ans après la fin des travaux (Kail *et al.* 2015 ; Weber *et al.* 2018).

Les éléments suivis concernent l'hydromorphologie, les éléments biologiques, la physico-chimie et l'hydrologie. Un suivi photographique y est également associé. Pour chacun de ces compartiments, des protocoles standardisés sont préconisés. Dans le cadre de la Directive cadre sur l'eau, des protocoles de suivis standardisés ont été développés pour la mise en œuvre des différents réseaux de surveillance. Ces protocoles détaillés, reproductibles et réalisables en routine par de nombreux opérateurs, ont été retenus dans le cadre de notre travail. Ainsi, l'hydromorphologie, les différents éléments biologiques (invertébrés, poissons voire macrophytes et diatomées) sont suivis en tout ou partie par ces protocoles issus de la DCE. Lorsqu'aucun protocole standardisé n'existe ou n'est utilisable, une fiche protocole dédiée a été rédigée (i.e. suivi photo, suivi du profil en long et des faciès) ou *a minima* des préconisations et recommandations sont proposées (i.e. suivi de l'hydrologie, suivi des connexions avec la nappe).

L'inclusion des données de contexte a semblé indispensable étant donné la diversité des milieux et des opérations. Si certaines de ces données de contexte font partie intégrante du suivi (données de physico-chimie et hydrologie), d'autres sont collectées séparément. Il peut s'agir des caractéristiques du cours d'eau (localisation, toponyme, code hydro, etc.), mais aussi des éléments concernant l'opération elle-même : quel type d'opération ? Quelles modalités de mise en œuvre ? Quelles mesures d'accompagnement (mise en défens, plantations, travaux de modifications des réseaux d'eaux pluviales, etc.) ? Les événements survenus au cours du suivi (retards dans la mise en place des travaux, pollution ponctuelle, etc.) sont également consignés (Rolan-Meynard *et al.* 2019).

Les données de suivi ainsi que les éléments de contexte doivent être systématiquement et rigoureusement bancarisés afin d'éviter la perte de données et d'en faciliter l'accès et l'analyse. Le guide propose des éléments d'aide à la bancarisation, depuis les informations liées à l'opération de restauration jusqu'aux données de chaque campagne. Enfin, des éléments d'analyse et d'interprétation sommaires sont proposés sur les principaux éléments suivis. Bien sûr, l'analyse des données et l'interprétation des résultats ne doivent pas se limiter à ces propositions et leur approfondissement est fortement encouragé.

Ce document offre ainsi à toute personne impliquée dans la gestion des milieux aquatiques (gestionnaires, bureaux d'études, services de l'état, collectivités, établissements publics, etc.) un

guide de suivi opérationnel des opérations de restauration de l'hydromorphologie. Il permet de se familiariser avec les concepts du suivi en général, et plus particulièrement sur les principes du suivi proposé. Son organisation en « fiches » se veut pratique et d'une appropriation facile.

CONTENU ET ORGANISATION DU GUIDE

Le guide s'organise en quatre parties : les principes généraux, les fiches par type d'opération, les fiches suivis et les annexes.

La première partie rappelle les principes et définitions du suivi proposé, présente le cadre général du suivi et décrit la procédure de bancarisation. Le domaine d'application y est notamment précisé : le guide s'adresse aux cours d'eau permanents prospectables à pied, d'une largeur mouillée d'au moins un mètre. Il concerne les opérations de restauration selon sept grands types : reméandrage, effacement d'ouvrage, contournement de plan d'eau, remise dans le talweg, reconstitution du matelas alluvial, suppression des contraintes latérales et modification de la géométrie du lit.

La deuxième partie est composée de fiches par type d'opération. Ces fiches décrivent le suivi proposé pour les sept grands types cités précédemment. Elles présentent les objectifs généraux auxquels peut répondre le projet de restauration et le suivi, puis explicitent ensuite la mise en œuvre du suivi en trois étapes : positionnement des stations et des points de prélèvements, choix des compartiments à suivre et organisation temporelle des campagnes de prélèvements.

Dans la troisième partie, les fiches suivis reprennent en détail les différents protocoles à utiliser. Lorsqu'il est décrit par ailleurs, un simple renvoi vers le protocole standardisé (protocoles DCE ou guides d'application par exemple) est indiqué, ainsi que les adaptations nécessaires le cas échéant. Sinon, un protocole ou des préconisations développées spécifiquement pour le SSM sont proposés. Le processus de bancarisation est indiqué, et des compléments d'informations ainsi que des éléments d'interprétation sont mis à disposition.

Enfin, les annexes comportent un glossaire des termes utilisés ainsi que la bibliographie.

EXEMPLE D'APPLICATION SUR L'EFFACEMENT D'UN OUVRAGE ET LE REMÉANDRAGE DE LA HEM À TOURNEHEM-SUR-LA-HEM (62)

PRÉSENTATION DU SITE

La Hem, cours d'eau situé dans le département du Pas-de-Calais (62), représente un axe d'intérêt majeur du bassin Artois-Picardie en matière de colonisation par plusieurs poissons migrateurs amphihalins : Truite de mer (*Salmo trutta* Linnaeus, 1758), Saumon atlantique (*Salmo salar* Linnaeus, 1758), Anguille européenne (*Anguilla anguilla* Linnaeus, 1758), Lamproie marine (*Petromyzon marinus* Linnaeus, 1758) et Lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis* Linnaeus, 1758) (Aquatic 2016 ; SYMVAHEM 2017 ; FDPPMA 62 2017, 2018). Cette rivière est classée en liste 2 de l'article L214-17 du Code de l'Environnement, c'est-à-dire qu'il y est nécessaire d'assurer le transport suffisant des

sédiments et la circulation des poissons migrateurs. Ainsi, la Hem fait l'objet depuis 2012 d'un vaste programme de restauration de la continuité écologique afin d'assurer le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leurs abris (SYMVAHEM 2018). Ce programme vise à rendre accessible et à recréer des habitats propices à l'accomplissement des cycles biologiques de l'ensemble des espèces présentes sur le bassin. Depuis 2016, sur le tronçon classé en liste 2 au titre du L214-17 du Code de l'environnement, neuf ouvrages ont été traités : le moulin Bleu, la minoterie de Recques, l'ancien moulin de Nordausques, le moulin de Zouafques, le moulin de la Leulenne, le moulin de Delzoïdes, le moulin de Vandroy et enfin l'ancienne pisciculture du Hamel (Georgeon *et al.* 2019). L'un des projets les plus ambitieux, à l'échelle du bassin, concerne la restauration hydromorphologique engagée au droit du moulin de la Leulenne sur la commune de Tournehem-sur-la-Hem. Avant les travaux, en amont du moulin, la Hem s'écoulait principalement dans un bief perché équipé de trois vannes en bois d'environ 1 m de hauteur. Au niveau de cet ouvrage, le dénivelé à franchir évoluait de 1,45 m à 1,47 m entre le débit d'étiage (QMNA5 à 0,33 m³/s) et le module (1,59 m³/s) et la zone de remous liquide à l'amont s'étendait sur 600 mètres linéaires pour une largeur mouillée moyenne de neuf mètres (Aquatec 2016).

Les ouvrages hydrauliques de ce moulin :

- constituaient initialement une barrière infranchissable vers l'amont pour les populations piscicoles et la limite amont du front de colonisation pour les principales espèces de poissons migrateurs (FDPPMA 62 2017 ; 2018) ;
- engendraient des impacts négatifs sur l'hydromorphologie du cours d'eau de par la banalisation des faciès d'écoulement dans l'emprise de la retenue de l'ouvrage (« effet bief ») ;
- provoquaient des altérations de la qualité physico-chimique de la rivière (phénomènes d'eutrophisation).

Étant donné les objectifs d'atteinte du bon état écologique des masses d'eau fixés par la DCE, et les impacts générés par les ouvrages hydrauliques de cet ancien moulin, l'Agence de l'eau Artois-Picardie a procédé à l'acquisition foncière du site, rendant possible sur ce secteur la définition d'un projet ambitieux, mobilisateur de l'ensemble des acteurs, et pour lequel des gains écologiques sont attendus.

PRÉSENTATION DE L'OPÉRATION

Ce projet a consisté en l'effacement des ouvrages hydrauliques (seuil, vannage et bief) du moulin, en la création d'un nouveau lit méandriforme sur un linéaire de 350 mètres en amont de l'ouvrage, en la reconstitution du matelas alluvial du nouveau lit et en la reconnexion de zones humides attenantes.

OBJECTIFS DE L'OPÉRATION

Dans le cadre du programme général de restauration de la continuité de la Hem et au vu du potentiel d'accueil et de la dynamique du cours d'eau, les principaux objectifs fixés du projet sont :

- la recolonisation de six kilomètres de cours d'eau par les poissons migrateurs amphihalins par l'accès et la récréation d'habitats favorables à leurs cycles de vie en amont du moulin de la Leulenne ;
- la réactivation des processus hydromorphologiques du cours d'eau dans le nouveau lit méandriforme et la reprise du transport solide.

CHOIX DU SUIVI

De par l'ambition de cette opération de restauration écologique (suppression d'un obstacle constituant la limite du front de colonisation pour les principales espèces de poissons migrateurs, couplée à un reméandrage de plus de 300 mètres) et dès le lancement des études de conception, les différents acteurs impliqués dans le projet – Agence de l'eau, Parc naturel régional des Caps et Marais d'Opale, Fédération de pêche du Pas-de-Calais, Syndicat mixte de la Vallée de la Hem, Conservatoire botanique national de Bailleul, Agence française pour la biodiversité (aujourd'hui intégrée à l'Office français de la biodiversité) – ont jugé pertinent de mettre en place un SSM sur ce site afin d'évaluer de manière rigoureuse les gains attendus vis-à-vis de l'hydromorphologie, des communautés biologiques et de l'état physico-chimique du milieu (Tuaux 2016).

LOCALISATION DES STATIONS

Conformément aux préconisations du guide SSM, l'hydromorphologie, les éléments biologiques et la physico-chimie sont suivis sur trois stations (Fig. 1) :

- la station « restaurée amont » située dans l'emprise de l'ancien bief du moulin ;
- la station « restaurée aval » située en aval de l'ancienne fosse de dissipation du moulin ;
- la station « témoin non altérée » située au lieu-dit Guémy en amont de la commune de Tournehem-sur-la-Hem.

Les deux stations « restaurées » ont pour objectif de suivre l'évolution de l'hydromorphologie et des communautés biologiques au niveau des travaux et en aval immédiat, avant et après les travaux. La station « témoin non altérée » est une station qui ne subit pas l'altération du site faisant l'objet de travaux de restauration et qui ne sera a priori pas ou peu influencée par les travaux. Elle a pour objectif de détecter les modifications du système pouvant avoir un effet sur l'hydromorphologie ou les communautés biologiques mais n'étant pas liées aux travaux. Elle pourra également servir de « référence locale », pour connaître le fonctionnement hydromorphologique et les peuplements qui seront attendus sur les stations restaurées après travaux (Kibler *et al.* 2010 ; Rolan-Meynard *et al.* 2019).

Lors de la définition du suivi et après une journée de reconnaissance sur le terrain, il a été décidé d'ajouter une station complémentaire de suivi des paramètres physico-chimiques à l'aval de la commune de Tournehem-sur-la-Hem, soit en amont du projet de restauration. En effet, le diagnostic des pressions engagé à l'échelle du bassin versant a identifié une problématique de rejets d'eaux usées au cours d'eau dans cette commune. Il est donc apparu nécessaire

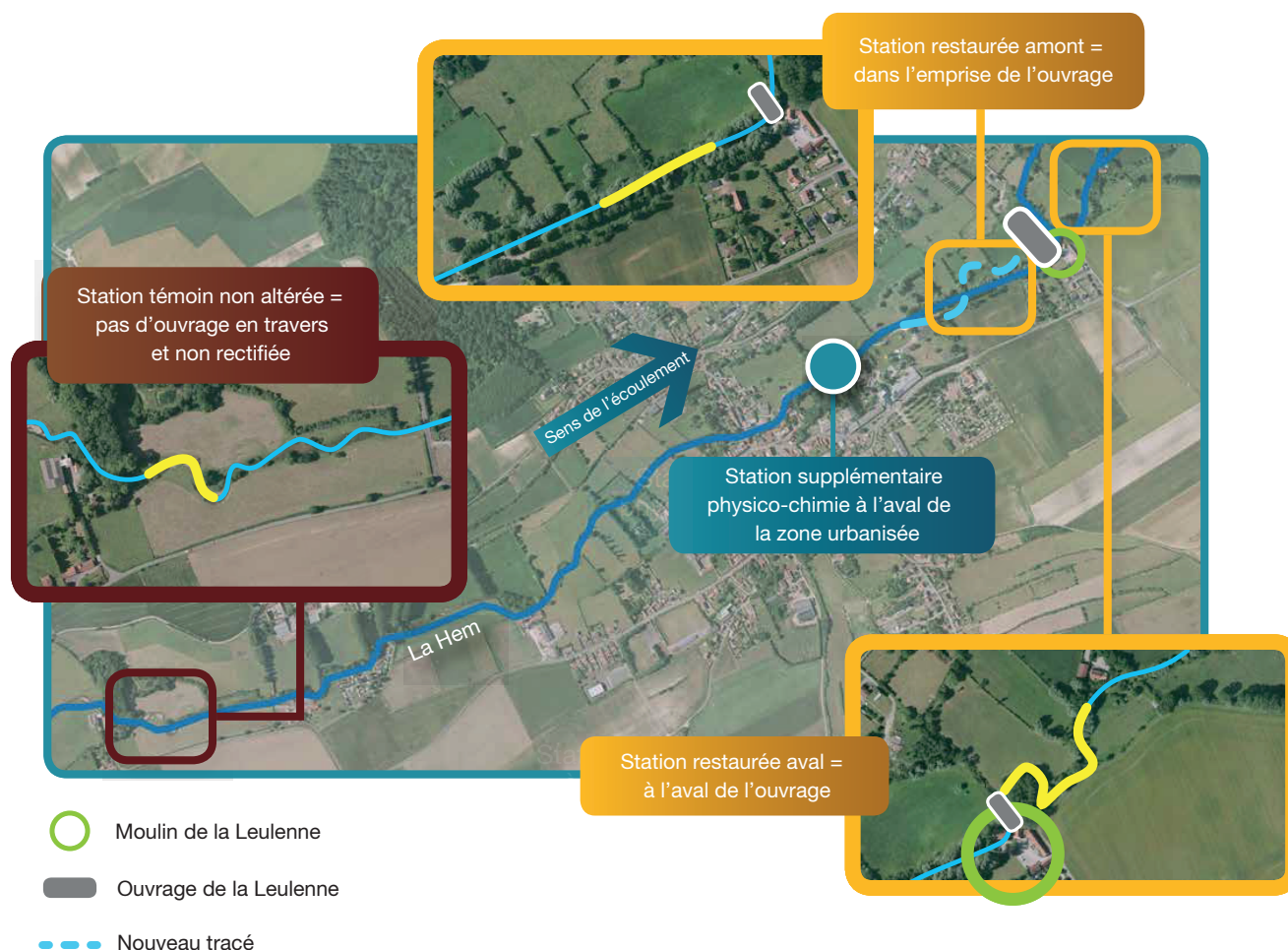


Fig. 1. — Localisation des stations de suivi de l'opération de restauration de la Hem. Crédits : © IGN – 2015 ; mars 2019 – Agence française pour la biodiversité.

de quantifier cet impact et ainsi de pouvoir mesurer son incidence sur le succès de la restauration hydromorphologique (Tuaux 2016).

Un suivi est également mis en œuvre le long du linéaire restauré (depuis la limite amont du remous solide jusqu'au retour à la pente d'équilibre à l'aval), notamment pour quantifier l'évolution des faciès et du profil en long après les travaux.

Enfin, des prospections plus larges sont mises en œuvre pour suivre la recolonisation de l'axe par les migrateurs amphihalins (suivi des frayères potentielles et/ou effectives), sur la Hem et ses affluents, depuis le Gué d'Audenfort jusqu'à la commune de Polincove et sur les affluents Locquin et Alquines.

PLANNING DES SUIVIS

Une seule campagne de suivi avant travaux a pu être réalisée, ce qui correspond à l'exigence minimale du guide (Fig. 2). Dans les documents de cadrage initiaux de Malavoi & Souchon (2010) et Navarro *et al.* (2012), trois années de suivi de la biologie et de la physico-chimie, avant travaux, étaient obligatoires afin de bien prendre en compte la variabilité intrinsèque des dynamiques écologiques. Cependant, l'évaluation à mi-parcours du projet (Tales 2017) a montré que cette proposition n'était pas réaliste face aux contraintes de

la plupart des maîtres d'ouvrages (dossiers réglementaires, disponibilité des financements, aléas hydroclimatiques, etc.). Ainsi il est proposé dans le guide une seule année de suivi obligatoire avant travaux mais sur un minimum de trois stations (contre une ou deux stations dans les préconisations des documents initiaux).

L'état initial des stations suivies au titre du SSM a été réalisé fin juin 2017 pour un démarrage des travaux en septembre 2017 (Fig. 2). Afin d'être cohérent avec les protocoles préconisés par le guide (pêche complète, deux passages, Carhyce, etc.), l'échantillonnage aurait dû avoir lieu dans la mesure du possible entre mi-juillet et mi-octobre, en veillant à ne prélever qu'après une période de stabilité du débit d'au moins dix jours. Compte-tenu de différentes contraintes d'organisation, la période d'échantillonnage a été légèrement avancée par rapport aux préconisations du guide. Le critère de stabilité hydrologique a cependant été bien respecté (présence d'une station de mesure hydrométrique à Tournehem-sur-la-Hem). Les suivis post-travaux ont quant à eux débuté en 2019 et se poursuivront tous les deux ans *a minima* jusqu'en 2025, toujours selon les préconisations du guide (Rolan-Meynard *et al.* 2019).

En ce qui concerne les recensements d'actes de fraie (nids de ponte) des agnathes et des grands salmonidés, ils sont

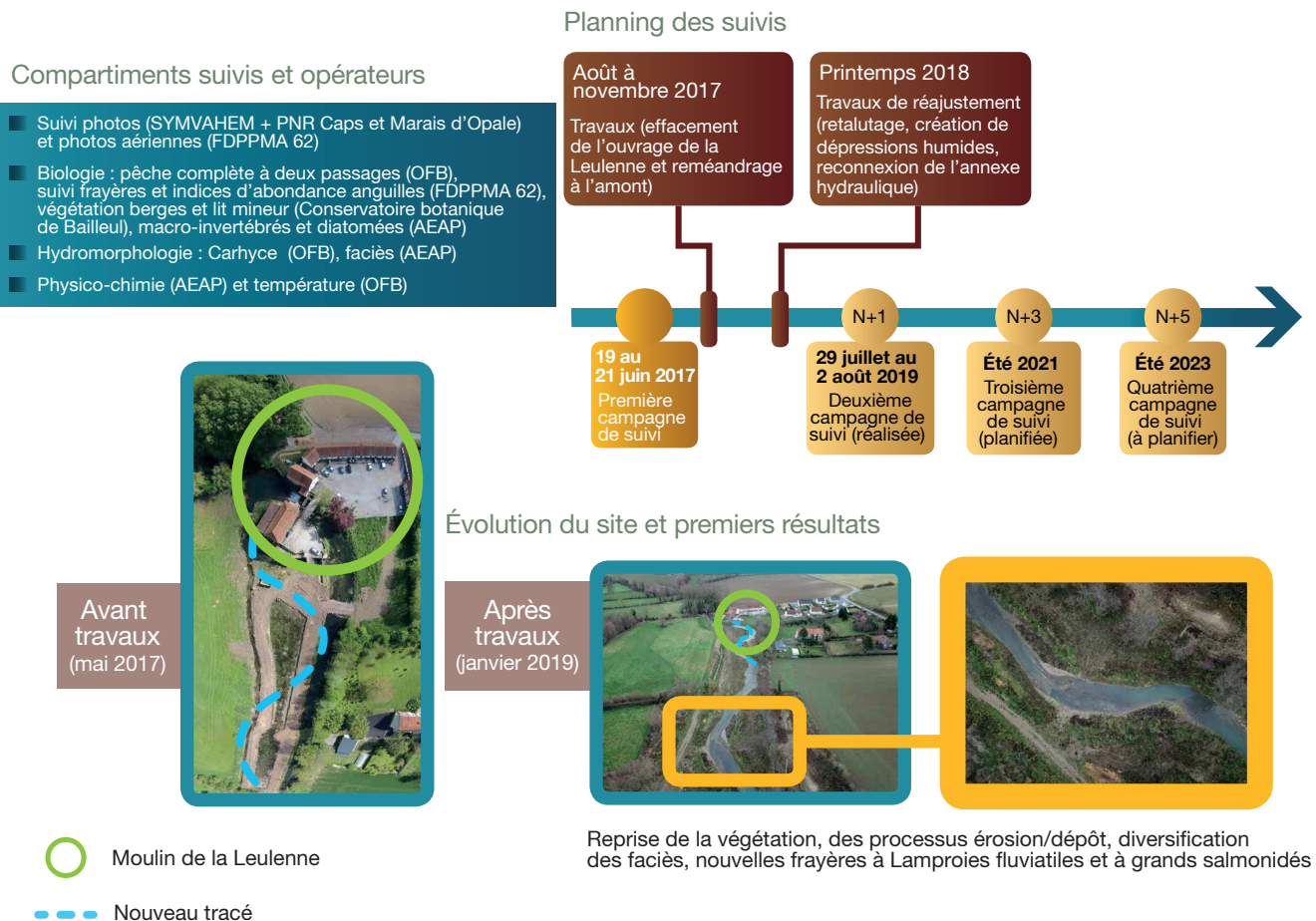


FIG. 2. — Planning des suivis de l'opération de la Hem, opérateurs et premiers résultats. Crédit: mars 2019 – Agence française pour la biodiversité. Crédits photos: FDPPMA 62.

dans la mesure du possible réalisés chaque année et ce depuis 2011 (FDPPMA 62 2017 ; 2018). En l'absence de protocoles standardisés, ces recensements ont lieu lorsque les conditions déclenchant l'acte de reproduction sont réunies (photopériode, thermie, hydrologie). Cela permet de réaliser un comptage plutôt qualitatif et semi-quantitatif, parfois perturbé par des problèmes de turbidité excessive (campagne de 2016). Pour les grands salmonidés, une veille sur les conditions hydroclimatiques est effectuée à partir du mois de décembre. En effet, sur ce bassin versant, l'expérience des suivis long-terme a montré que la majorité des grands salmonidés fraie aux alentours de la mi-janvier (Keith 2011 ; FDPPMA 62 2017 ; Georgeon *et al.* 2019). Dans le cas particulier de la Lamproie marine, le suivi et l'identification des frayères effectives d'une année sur l'autre reste compliquée (durée de leur cycle biologique variable) sachant que la population demeure encore relictuelle.

COMPARTIMENTS SUIVIS

Suivant les préconisations du guide SSM (Rolan-Meynard *et al.* 2019), plusieurs compartiments biologiques sont suivis sur chaque station : les invertébrés aquatiques (AFNOR 2016), les diatomées (AFNOR 2007) et les poissons (pêche complète à deux passages selon Belliard *et al.* 2012, recensement des nids de ponte pour les agnates et grands salmonidés

et indices d'abondance anguille). L'hydromorphologie du cours d'eau est évaluée par la mise en œuvre du protocole de Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau (Carhyce) (Baudoin *et al.* 2017) et le suivi de faciès sur le linéaire restauré (Rolan-Meynard *et al.* 2019). La physico-chimie et la température sont mesurées sur chaque station et sur la station complémentaire (Fig. 2).

En complément aux préconisations du guide, un suivi de la végétation rivulaire et du lit mineur est également mis en œuvre sur chaque station par le Conservatoire botanique national de Bailleul (CBNBL).

Enfin, un suivi photographique et la réalisation de photos aériennes permettent de mesurer l'évolution du tracé du cours d'eau.

PREMIERS RÉSULTATS

Dès les premières crues post-travaux à l'hiver 2017-2018, une reprise de la dynamique sédimentaire et des processus hydromorphologiques a pu être observée au sein du nouveau lit. Les constatations visuelles et le suivi photo ont mis en évidence la formation de bancs alluviaux, de zones de radiers et une diversification intéressante des faciès d'écoulement (Fig. 3A). Ceci a pu être confirmé par les relevés Carhyce de juin 2017 (avant travaux) et juillet 2019 (après travaux) qui montrent

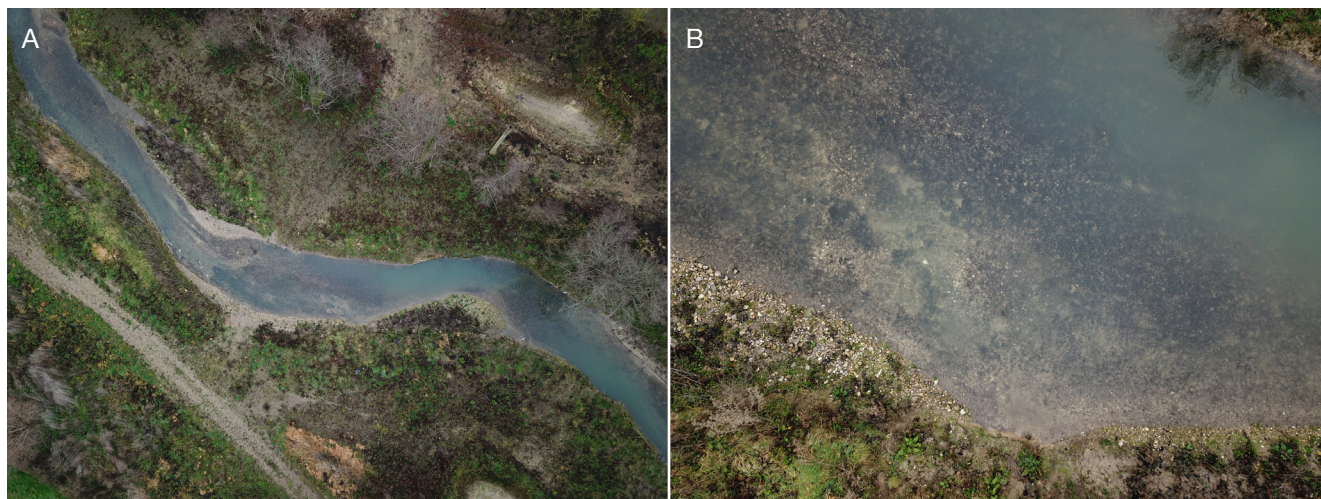


FIG. 3. — Lit restauré de la Hem en janvier 2019 présentant des zones d'érosion et de dépôt suite aux crues post-travaux (A) ainsi que des frayères de grands salmonidés (B). Crédits photos : FDPPMA 62.

TABEAU 1. — Nombre de nids de ponte de grands salmonidés (GS) et de Lamproies fluviatiles (LPF) depuis le Gué d'Audenfort jusqu'à la commune de Polincove et sur les affluents Locquin et Alquines de 2011 à 2019.

Taxons	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
GS	10	7	9	12	8	13	28	—	45
LPF	71	74	98	17	47	—	133	156	175

notamment une évolution importante de la granulométrie sur la station « restaurée amont » avec une diminution des fines (70 % en 2017) au profit de graviers et cailloux (80 % en 2019) (Figs 4A, B).

Cette diversification des faciès d'écoulement s'est traduite par la restauration d'habitats lotiques, pour lesquels les relevés de végétation du CBNBL ont montré l'implantation rapide de peuplements macrophytiques.

De plus, la recolonisation du bassin par les migrateurs amphihalins suite à l'effacement du moulin a été immédiate. En effet, dès la fin des travaux, des frayères de grands salmonidés (Fig. 3B) et de Lamproies fluviatiles ont été recensées dans l'emprise du nouveau lit créé. Ce constat a été confirmé lors de la campagne de suivi 2019 où de nombreuses truitelles et des ammocètes ont été capturés au droit de la station « restaurée amont ». Sur l'ensemble du linéaire prospecté, depuis le début du programme de restauration de la continuité écologique sur la Hem en 2016, le nombre de nids de ponte de grands salmonidés et de lamproies fluviatiles a été multiplié par trois par rapport à la période 2011-2015 (Tableau 1)(SYMVAHEM 2019; Georgeon *et al.* 2019).

En ce qui concerne l'hydromorphologie (Figs 4C, D), sur la station « restaurée amont », on note une légère amélioration de l'indice morphologique global (IMG), notamment guidée par l'augmentation de la pente de la ligne d'eau (disparition de la zone de remous liquide provoquée par le vannage).

Ces premiers résultats biophysiques sont donc encourageants pour l'atteinte des objectifs fixés en amont de la réalisation du projet. Néanmoins, il faudra la survenue de crues morpho-

gènes et plusieurs années de suivi post-travaux, pour évaluer les trajectoires d'évolution du milieu et des communautés, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

Par ailleurs, le programme de restauration de la continuité écologique de la Hem a permis sur le territoire une meilleure appréhension des enjeux environnementaux et des co-bénéfices qui résultent de ces opérations de restauration, notamment en termes de prévention des inondations (Agence française pour la biodiversité 2018; SYMVAHEM 2018).

DISCUSSION

L'élaboration d'un guide opérationnel d'appui à l'élaboration de suivi d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau répondait à un besoin fort exprimé par les praticiens et les scientifiques. Il a ainsi été développé pour améliorer la conception des suivis, les rendre plus rigoureux scientifiquement et plus informatifs. Les principes de conception retenus dans le guide et notamment la standardisation des suivis ont conduit à réduire le domaine d'application du guide. Ainsi il ne couvre pas encore exhaustivement tous les milieux concernés par ces opérations de restauration (zones humides attenantes, annexes hydrauliques, etc.), ni tous les types d'opérations de restauration écologique. Le suivi a, par ailleurs, été conçu autour d'objectifs très génériques poursuivis par la mise en œuvre de chacun des sept types d'opération de restauration hydromorphologique retenus. Ainsi, même si le guide a été conçu pour être le plus opérationnel possible, sa prise en main implique donc une expertise terrain et une réflexion de la part du maître d'ouvrage des suivis afin de juger de la pertinence et de la faisabilité de la mise en œuvre du SSM sur son site. Les objectifs génériques du SSM doivent également être complétés, précisés, en fonction du contexte local et des résultats attendus (RRC 2011). Le socle que constitue le SSM pourra alors être complété par la mise en œuvre de

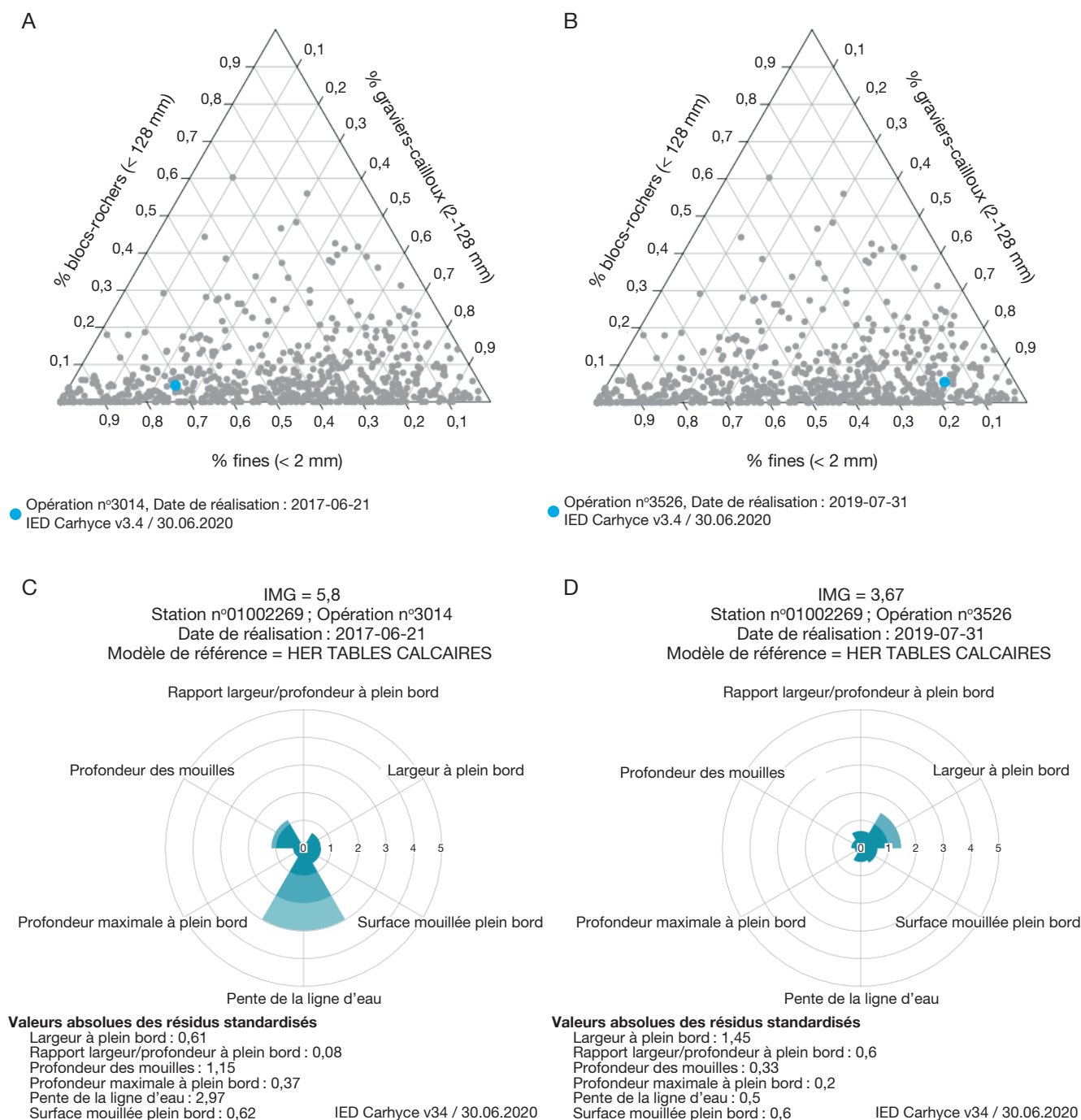


FIG. 4. — Diagramme granulométrique triangulaire sur la station « restaurée amont » en juin 2017 avant travaux (A) et juillet 2019 après travaux (B) et indice morphologique global (IMG) issu des relevés Carhyce sur la station « restaurée amont » en juin 2017 avant travaux (C) et juillet 2019 après travaux (D) provenant de l'interface d'exploitation des données Carhyce (<http://194.57.254.11/IED/>, dernière consultation le 30 juin 2020). Sur le diagramme triangulaire la position du point renseigne sur la granulométrie dominante de la station (point bleu) parmi l'ensemble des stations de l'hydroécocorégion (HER, points gris). L'IMG permet d'appréhender l'écart d'une station aux références régionales, plus on s'écarte du centre, plus l'écart au modèle pour une variable donnée est important.

suivis spécifiques au site de restauration. C'est d'ailleurs la démarche poursuivie sur la Hem : tout en respectant les principes du SSM, les maîtres d'ouvrage du suivi ont complété le dispositif soit par l'ajout de compartiments suivis (ripisylves, photos aériennes, etc.) ou de station de mesure (physico-chimie en aval du bourg) afin d'évaluer au mieux l'atteinte de leurs objectifs.

CONCLUSION

L'élaboration du guide a constitué un travail collaboratif exigeant. Sa publication n'est que le premier pas d'un travail de transfert aux opérateurs scientifiques et techniques. Le guide est ainsi porté à connaissance des gestionnaires par le biais de colloques et de journées techniques (asso-

ciations de gestionnaires, Rever 2018 et 2019, Journées de l'Union des professionnels du génie écologique, etc.), de formations et d'articles dans des revues techniques (Vivier *et al.* 2018 ; Melun *et al.* 2019). Les présentations lors de colloques scientifiques internationaux ont également permis les échanges et la mise en lumière de ce projet au niveau européen (Isrivers et SERE en 2018, ISRS et SEFS en 2019, etc.).

Par ailleurs, le transfert et la mise en œuvre du SSM, comme sur la Hem, permet d'identifier des besoins complémentaires en termes de suivi sur des sujets peu ou mal pris en compte. Ainsi, des pistes de travail pour le développement de nouveaux suivis sont en cours d'examen tels que les suivis des ripisylves ou des co-bénéfices de la restauration (amélioration du cadre de vie, réduction du risque inondation, etc.). Un travail sur les complémentarités avec la boîte à outils (BAO) de suivi des zones humides (Porteret 2017) a également été engagé. Une mise en application conjointe SSM et BAO sur un site de restauration est envisagée.

Aujourd'hui, les sites sur lesquels sont mis en œuvre le SSM (une quarantaine en 2019, dont la Hem) ont vocation à intégrer le réseau des sites de démonstration pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau, projet phare de l'OFB, mené en partenariat avec les agences de l'eau et Inrae (Vivier *et al.* 2018). Les démarches de collecte et d'analyse de données multi-sites se révèlent en effet très efficaces (Cavaillé *et al.* 2018 ; Tisserant *et al.* 2020) afin d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes. À terme, grâce à la production, la bancarisation et l'analyse de données de suivi standardisées sur un réseau de sites de restauration, il sera possible de mieux comprendre les effets de la restauration sur les écosystèmes et donc d'agir avec une meilleure efficacité sur les milieux, dans une optique de retour au bon état écologique DCE et de restauration de la biodiversité. Des démarches convergentes émergent aussi dans d'autres pays, par exemple en Suisse (*Programmatic monitoring and evaluation* ; Weber *et al.* 2018) ou sur d'autres milieux naturels, tels que les plans d'eau (Taubaty *et al.* 2019) ou encore les estuaires.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les rédacteurs et contributeurs ayant participé à l'élaboration du guide cité dans l'article, ainsi que l'ensemble des opérateurs ayant mis en œuvre ces suivis sur le terrain et dont l'expérience a permis l'amélioration et l'opérationnalisation du document. Nous tenons également à remercier les structures contribuant à la réalisation et au suivi de l'opération de restauration de la Hem à Tournehem-sur-la-Hem (62) et qui participent ainsi à la reconquête d'une biodiversité en danger.

Nous remercions enfin la revue *Naturae* et les rapporteurs et relecteurs Nicolas Poulet et Frederick Jacob pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture, leurs remarques pertinentes et constructives ayant permis la consolidation de notre manuscrit et la valorisation de nos travaux.

RÉFÉRENCES

- AFNOR 2007. — *NF T90-354 – Qualité de l'eau – Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD)*. AFNOR Éditions, La Plaine Saint-Denis, 119 p.
- AFNOR 2016. — *NF T90-333 – Qualité de l'eau – Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes*. AFNOR Éditions, La Plaine Saint-Denis, 39 p.
- AQUATEC 2016. — *Maîtrise d'œuvre des travaux de rétablissement de la continuité écologique de la Hem, Moulin Leulenne (ROE 15322 et 15324), Commune de Tournehem-sur-la-Hem*. Dossier d'autorisation Loi sur l'eau, Viry-Châtillon, 86 p.
- AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ 2018. — *Les sites de démonstration pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau: la Hem, quand la rivière préserve des inondations et favorise la biodiversité*. <https://youtu.be/Dm91L7uVLEw>, dernière consultation le 23 février 2022.
- BAUDOIN J.-M., BOUTET-BERRY L., CAGNANT M., GOB F., KREUTZENBERGER K., LAMAND F., MALAVOI J.-R., MARMONIER P., PÉNIL C., RIVIÈRE C., SADOT M., TAMISIER V. & TUAL M. 2017. — *Carhyce. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied. Guides et protocoles*. Agence française pour la biodiversité, Vincennes, 56 p.
- BELLIARD J., DITCHE J.-M., ROSET N. & DEMBSKI S. 2012. — *Guide pratique de mise en œuvre des opérations de pêche à l'électricité dans le cadre des réseaux de suivi des peuplements de poisson*. Onema, Vincennes, 31 p.
- CAVAILLÉ P., DUMONT B., VAN LOOY K., FLOURY M., TABACCHI E. & EVETTE A. 2018. — Influence of riverbank stabilization techniques on taxonomic and functional macrobenthic communities. *Hydrobiologia* 807 (1): 19-35. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3380-3>
- DOS REIS OLIVEIRA P. C., VAN DER GEEST H. G., KRAAK M. H. S., WESTVEER J. J., VERDONSCHOT R. C. M. & VERDONSCHOT P. F. M. 2020. — Over forty years of lowland stream restoration: Lessons learned? *Journal of Environmental Management* 264: 110417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110417>
- DUTOIT T., GALLET S., HECKENROTH A. & BUISSON É. 2021. — 2008-2019, plus d'une décennie d'échanges et de débats autour de la restauration écologique en France, in GOURDAIN P. (éd.), REVER 10 – 10^e Colloque du Réseau d'Échange et de Valorisation en Écologie de la Restauration, Paris, 19-21 mars 2019. *Naturae* 2021 (19): 271-276. <https://doi.org/10.5852/naturae2021a19>
- ENGLAND J. & WILKES M. A. 2018. — Does river restoration work? Taxonomic and functional trajectories at two restoration schemes. *Science of The Total Environment* 618: 961-970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.014>
- FDPPMA 62 2017. — *Suivi des frayères de grands salmonidés sur le bassin de la Hem, Hiver 2016/2017*. Rapport d'étude, Fédération de pêche du Pas-de-Calais, Arques, 9 p.
- FDPPMA 62 2018. — *Suivi des frayères de lamproies fluviatiles (Lamprolaima fluviatilis) et de lamproies marines (Petromyzon marinus) sur le bassin de la Hem 2011-2017*. Rapport d'étude, Fédération de pêche du Pas-de-Calais, Arques, 9 p.
- FELD C. K., BIRK S., BRADLEY D. C., HERING D., KAIL J., MARZIN A., MELCHER A., NEMITZ D., PEDERSEN M. L., PLETTERBAUER F., PONT D., VERDONSCHOT P. F. M. & FRIBERG N. 2011. — From natural to degraded rivers and back again, advances in ecological research. *Advances in Ecological Research* 44: 119-209. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374794-5.00003-1>
- FIERS V. 2003. — *Études scientifiques en espaces naturels. Cadre méthodologique pour le recueil et le traitement de données naturalistes*. Cahiers techniques de l'ATEN n°72, Réserves Naturelles de France, Montpellier, 96 p.
- FRIBERG N., BONADA N., BRADLEY D. C., DUNBAR M. J., EDWARDS F. K., GREY J., HAYES R. B., HILDREW A. G., LAMOUROUX N., TRIMMER M. & WOODWARD G. 2011. — Biomonitoring of human impacts in freshwater ecosystems: the good, the bad and the ugly.

- Advances in ecological research* 44: 1-68. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374794-5.00001-8>
- GEORGEON M., BLAZEJEWSKI B., RIGAUT B. 2019. — *Restauration du bassin versant de la Hem dans le Nord Pas de Calais. Fédération du Pas de Calais pour la pêche et la protection des milieux aquatiques*. Communication orale au Colloque international Renaissance de la Vallée de la Sélune, Avranches. https://www.rivernet.org/general/dams/decommissioning_fr_hors_poutes/pdf/2543-MGEORGEON_BassinVersantHem_colloqueSELUNE2019_bd.pdf, dernière consultation le 23 février 2022.
- KAIL J., BRABEC K., POPPE M. & JANUSCHKE K. 2015. — The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: a meta-analysis. *Ecological Indicators* 58: 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.011>
- KEITH P. 2011. — *Les poissons d'eau douce de France*. Muséum national d'Histoire naturelle – Biotope Éditions, Paris, 552 p.
- KIBLER K. M., TULLOS D. D. & KONDOLF G. M. 2010. — Learning from dam removal monitoring: challenges to selecting experimental design and establishing significance of outcomes. *River Research and Applications* 27 (8): 967-975. <https://doi.org/10.1002/rra.1415>
- LORENZ A. W., HAASE P., JANUSCHKE K., SUNDERMANN A. & HERING D. 2018. — Revisiting restored river reaches – Assessing change of aquatic and riparian communities after five years. *Science of The Total Environment* 613-614: 1185-1195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.188>
- MALAVOI J.-R. & SOUCHON Y. 2010. — *Éléments pour une harmonisation des concepts et des méthodes de suivi scientifique minimal, volets hydromorphologie-hydroécologie*. Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref, Lyon, 82 p.
- MELUN G., ARNAUD F., ARNAUD-FASSETTA G., BERTRAND M., BILODEAU C., BORNIET L., BOUTAULT F., BROUSSE G., CASSEL M., DEPRET T., DUFOUR S., GOB F., GRIVEL S., KREUTZENBERGER K., LE BIHAN M., LE BISSONNAIS Y., LIEBAULT F., LOIRE R., MAGAND C., MALAVOI J. R., PIEGAY H., ROLAN-MEYNARD M., ROLLET A. J., TAMISIER V., THOMMERET N. & VIVIER A. 2019. — Dossier: L'hydromorphologie. *La Houille Blanche* 105 (2): 5-25. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019037>
- MORANDI B. 2014. — *La restauration des cours d'eau en France et à l'étranger: de la définition du concept à l'évaluation de l'action. Éléments de recherche applicables*. Thèse (Volumes 1 et 2), École normale supérieure, Lyon, 647 p.
- MORANDI B., KAIL J., TOEDTER A., WOLTER C. & PIEGAY H. 2017. — Diverse approaches to implement and monitor river restoration: a comparative perspective in France and Germany. *Environmental Management* 60 (5): 931-946. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0923-3>
- MORANDI B., PIEGAY H., LAMOUROUX N. & VAUDOR L. 2014. — How is success or failure in river restoration projects evaluated? Feedback from French restoration projects. *Journal of Environmental Management* 137: 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.02.010>
- NAVARRO L., PERESS J. & MALAVOI J.-R. 2012. — *Aide à la définition d'une étude de suivi – recommandations pour des opérations de restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau*. Onema – Agences de l'eau, Vincennes, 48 p.
- NAVEL S. & BELLIER J. 2018. — *Relation entre les caractéristiques morphologiques des cours d'eau et les communautés biologiques: application aux données CARHYCE*. Rapport final, Irstea, Boissy-le-Châtel, 104 p.
- ONEMA, MEEDDM & AGENCES DE L'EAU 2010. — *La restauration des cours d'eau – Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie et mises à jour 2012 et 2018*. Onema, Agence française pour la biodiversité, Vincennes. <https://professionnels.ofb.fr/node/217>
- PORTERET J. 2017. — *La boîte à outils de suivi des zones humides, guide méthodologique d'utilisation des indicateurs pour le suivi des travaux de restauration*. CEN Savoie, Le Bourget-du-Lac, 28 p.
- ROLAN-MEYNARD M., VIVIER A., REYJOL Y., BOUTET-BERRY L., BOUCHARD J., MANGEOT P., NAVARRO L., MELUN G., MOREIRA-PELLET B., BRAMARD M., LE BIHAN M., MAGAND C., LEURENT T., VIGNERON T., CAGNANT M., BOURRAIN X., MOREL A. & KREUTZENBERGER K. 2019. — *Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité*. Agence française pour la biodiversité (Coll. Guides et protocoles), Vincennes, 190 p. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.18966.80963>
- RONI P., HANSON K. & BEECHIE T. 2008. — Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques. *North American Journal of Fisheries Management* 28 (3): 856-890. <https://doi.org/10.1577/M06-169.1>
- RRC 2011. — *Practical river restoration appraisal guidance for monitoring options (PRAGMO): guidance document on suitable monitoring for river and floodplain restoration projects*. The river restoration centre, Cranfield, 330 p.
- SOUCHON Y. 2012. — *Restauration des cours d'eau: que nous apprennent les suivis écologiques documentés?* Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema – Irstea Lyon, 87 p.
- STEWART-OATEN A., MURDOCH W. W. & PARKER K. R. 1986. — Environmental impact assessment: 'Pseudoreplication' in time? *Ecology* 67 (4): 929-940. <https://doi.org/10.2307/1939815>
- SYMVAHEM 2017. — Reflets sur la Hem. *Le Journal de la Vallée de la Hem* 9: 1-4.
- SYMVAHEM 2018. — Reflets sur la Hem. *Le Journal de la Vallée de la Hem* 11: 1-4.
- SYMVAHEM 2019. — Reflets sur la Hem. *Le Journal de la Vallée de la Hem* 13: 1-4.
- TALES E. 2017. — *Cadre d'analyse et d'interprétation du suivi scientifique minimal mis en œuvre pour évaluer l'efficacité des opérations de restauration de cours d'eau*. Irstea – Onema, Vincennes, 55 p.
- TAUBATY M., MEYNARD M., ARGILLIER C., RAYMOND J. C., MARCHAND C. & WESTRELIN S. 2019. — *Guide et protocoles pour le suivi d'actions de restauration hydromorphologique du littoral en plans d'eau. Rapport intermédiaire*. Pôle de recherche & développement ECLA « Écosystèmes lacustres » Irstea-AFB, Aix-en-Provence, 100 p.
- TISSERANT M., JANSSEN P., EVETTE A., GONZÁLEZ E., CAVAILLÉ P. & POULIN M. 2020. — Diversity and succession of riparian plant communities along riverbanks bioengineered for erosion control: a case study in the foothills of the Alps and the Jura Mountains. *Ecological Engineering* 152: 105880. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105880>
- TUAUX S. 2016. — *Proposition d'un site de suivi sur la Hem dans le but d'évaluer les gains des opérations de restauration de la continuité écologique, mise en place d'un suivi scientifique minimal (SSM) au droit du site du Moulin de Leulenne – Bassin Artois-Picardie*. Note d'information, relevé de décisions et fiches reconnaissance terrain. Onema, Vincennes, 20 p.
- VIVIER A., MANGEOT P., ROLAN-MEYNARD M., MELUN G., TALES E., REYJOL Y., PERESS J., BOUCHARD J., GAUTIER J.-N. & DUPONT P. 2018. — Réseau de sites de démonstration pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau: vers une production mutualisée de données de suivi au service de la connaissance et de l'action. *Techniques Sciences Méthodes* 2018 (3): 43-54. <https://doi.org/10.1051/tsm/201803043>
- WEBER C., ÅBERG U., BUIJSE A. D., HUGHES F. M. R., MCKIE B. G., PIEGAY H., RONI P., VOLLENWEIDER S. & HAERTEL-BORER S. 2018. — Goals and principles for programmatic river restoration monitoring and evaluation: collaborative learning across multiple projects: Programmatic river restoration monitoring and evaluation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 5 (1): e1257. <https://doi.org/10.1002/wat2.1257>

Soumis le 13 septembre 2019;
 accepté le 9 juillet 2020;
 publié le 16 mars 2022.