Guide technique



ATTÉNUER LES IMPACTS ÉCOLOGIQUES DES ÉCLUSÉES HYDROÉLECTRIQUES

TOME 2 : MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES MESURES D'ATTÉNUATION

BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE

Octobre 2026

SECRÉTARIAT TECHNIQUE
BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE

IMPORTANT

Le SDAGE Rhône-Méditerranée, dans sa disposition 6A-10, appelle à réduire les impacts des éclusées hydroélectriques sur les cours d'eau pour une gestion durable des milieux et des espèces. Ceci doit se faire dans un cadre concerté, avec l'ensemble des acteurs et usagers du territoire et en tenant compte des enjeux socio-économiques et énergétiques[1].

Ce tome II s'inscrit dans la continuité du tome I relatif à l'état des connaissances sur les effets des éclusées sur les milieux aquatiques. Ce deuxième tome présente une méthode d'identification des mesures d'atténuation des impacts des éclusées. Cette méthode peut être adaptée au contexte local dans le cadre d'une concertation entre les parties prenantes. Un retour d'expérience de sa mise en œuvre sur plusieurs sites aux caractéristiques variés pourra permettre de l'améliorer.

Ce guide technique s'adresse principalement aux maitres d'ouvrages des aménagements hydro-électriques fonctionnant par éclusées, aux structures compétentes pour la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) sur des cours d'eau concernés par ce type d'aménagement, ainsi qu'aux bureaux d'étude et aux services de l'État et ses établissements publics. Il est mis à disposition sur le site internet du bassin Rhône-Méditerranée : http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr.

Les guides du secrétariat technique de bassin Rhône-Méditerranée sont des documents visant à accompagner les parties prenantes dans la mise en œuvre des préconisations du SDAGE afin de préserver ou de restaurer le bon état et le bon fonctionnement des milieux aquatiques, dans le cadre de démarches concertées. Ils s'appuient sur l'état des connaissances disponibles lors de leur édition.

Les guides du secrétariat technique de bassin n'ont pas de valeur prescriptive ni réglementaire. Les références mentionnées sont à jour à la date de publication du guide.

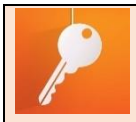
[1] Notamment en lien avec la loi relative à la transition énergétique

Ce document a été rédigé par Philippe Baran (ECOGEA), Jean-René Malavoi (expert indépendant) et Benoit Terrier (AERMC), en collaboration avec un comité technique que nous remercions vivement pour les échanges fructueux. La méthode proposée est le fruit de ces réflexions et d'arbitrages collégiaux qui n'engagent pas pour autant individuellement les membres du comité technique. Nous remercions également Loïc Grosprêtre (Dynamique Hydro) ainsi que Jean-Paul Mallet (Aralep) pour leur contribution.

Membres du comité technique :

- Administrations :
    - OFB Lyon : Pascal Roche, Marion Langon ; Pôle écohydraulique OFB-IMFT : Dominique Courret ;
    - DREAL Auvergne-Rhône-Alpes délégation de bassin : Pierre-Jean Martinez
    - Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse : délégation de Besançon : Vincent Porteret ; délégation de Montpellier : Fabrice Cathelin ; délégation de Marseille : Isabelle Chouquet ; délégation de Lyon : Florence Javion ;
- Union des Fédérations de pêche du bassin Rhône-Méditerranée et Corse : Fabien Chiri ;
- Universités et laboratoires de recherche : INRAE Lyon : Hervé Capra, Maria Alp, INRAE Aix-en-Provence : Yann le Coarer.

Eléments de lecture : cinq types de mise en évidence de texte.



Point clé



Point de vigilance

ENCADRE TECHNIQUE

Paragraphe technique plus développé hors texte sur un point particulier

ENCADRE METHODOLOGIQUE

Présentation d'un protocole ou d'une méthodologie

EXEMPLES DIVERS

Retours d'expérience ; Application méthodologique ; Autres exemples

SOMMAIRE

Synthèse 7

INTRODUCTION 9

1. Etape préalable : identification des sites à risque 11

1.1. Contextualisation générale (hors hydrologie) 12
1.1.1. Description de l'aménagement hydroélectrique 12
1.1.2. Périmètre initial identifiÉ grâce à l'état des lieux 2019 13
1.1.3. Géomorphologie 16
1.1.4. Physico-chimie 23
1.1.5. *BIOLOGIE* 24
1.1.6. Continuité écologique 32

1.2. Quantification des altérations hydrologiques liées aux éclusées 33

1.3. Choix des stations d'étude 36

2. Etape 1 : Diagnostic des altérations liées aux éclusées 37

2.1. Démarche de diagnostic des altérations morphoécologiques 37

2.2. Quantification des descripteurs des altérations morphoécologiques 41
2.2.1. Mobilité des substrats 42
2.2.2. Habitabilité 44
2.2.3. Variabilité de l'habitabilité 47
2.2.4. Exondation des habitats favorables 47
2.2.5. Franchissabilité des obstacles 49

2.3. Quantification de l'évolution des descripteurs morphoécologiques en fonction du débit 49
2.3.1. Mesures successives sur le terrain 49
2.3.2. Modélisation hydraulique 49

2.4. Quantification des indicateurs d'altération morphoécologique 52
2.4.1. L'Indicateur mobilité des substrats 56
2.4.2. Indicateur habitabilité 58
2.4.3. Indicateur variabilité de l'habitabilité 60
2.4.4. Indicateur exondation des habitats favorables 61
2.4.5. Indicateur franchissabilité des obstacles 64

2.5. Quantification des altérations physico-chimiques 65

2.6. Synthèse de la gravité des altérations pour chaque station 67

3. Etape 2 : Détermination des objectifs d'atténuation 69

3.1. Contextualisation des altérations morphoécologiques liées aux éclusées 69

3.2. Hiérarchisation des altérations 72

3.3. Définition des objectifs d'atténuation 72

4. Etape 3. Choix et dimensionnement des mesures d'atténuation 74

4.1. Mesures hydrologiques 76

4.2. Mesures constructives 77

***4.3.* Mesures morphologiques** 77

5. Etape 4 : Chiffrage des mesures d'atténuation ____ *79*

5.1. Les coûts à intégrer ____ **79**

5.2. Intégration des differents enjeux et usages ____ **79**

6. Etape 5. Pilotage, suivi et bilan des mesures d'atténuation ____ *80*

6.1. Pilotage ____ **80**

6.2. Suivi des mesures mises en œuvre ____ **83**

6.3. Bilan des mesures mises en œuvre ____ **87**

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE ____ *88*

ANNEXE 2 : ÉLÉMENTS DE CONNAISSANCE SUR LES ESPECES PISCICOLES CIBLES ____ *89*

Listes des espèces piscicoles cibles pré-selectionnées ____ 89

Exigences écologiques ____ 90

Calendrier biologique ____ 93

ANNEXE 3 : QUANTIFICATION DES ALTERATIONS HYDROLOGIQUES LIEES AUX ECLUSEES _ *94*

Contexte hydrologique général ____ 96

Quantification des altérations hydrologiques ____ 96

SYNTHESE

Le SDAGE Rhône-Méditerranée (2022-2027) impose de réduire les impacts des éclusées hydroélectriques sur les milieux aquatiques, dans un cadre concerté avec les acteurs locaux. En complément du tome I relatif à l'état des connaissances sur ce sujet, ce tome II propose une méthode opérationnelle pour atténuer ces impacts.

Cette méthode s'articule autour de six étapes permettant d'évaluer les impacts des éclusées et de proposer des mesures d'atténuation :

- **Une étape préalable pour caractériser finement le linéaire affecté par les éclusées**, en s'appuyant sur les données de l'état des lieux du SDAGE, des études locales et des retours d'expérience. Lors de cette phase, on identifie les espèces piscicoles cibles, c'est-à-dire particulièrement vulnérables aux éclusées, et leurs habitats critiques (frayères et zones de croissance).
- **Une étape 1 pour diagnostiquer les altérations morphoécologiques** inhérentes aux altérations hydrologiques via des indicateurs. Ces indicateurs sont associés à cinq types d'altérations morphoécologiques (i) mobilité des substrats, ii) habitabilité, iii) variabilité de l'habitabilité, iv) exondation des frayères et v) franchissabilité. Ils sont estimés pour chaque espèce cible et sont croisés avec la fréquence des éclusées pour évaluer la gravité des altérations.
- **Une étape 2 pour définir des objectifs d'atténuation** et les hiérarchiser selon leur gravité et leur impact biologique.
- **Une étape 3 pour sélectionner et dimensionner les mesures d'atténuation**. Les mesures proposées sont hiérarchisées en fonction de leur potentiel d'atténuation et de leur faisabilité technique et économique. Les mesures hydrologiques (par exemple, la réduction des débits maximums) sont à privilégier, mais des solutions morphologiques (par exemple, le remodelage des berges) ou constructives (par exemple, la création d'un bassin de démodulation) peuvent être envisagées si nécessaire.
- **Une étape 4 pour chiffrer les mesures sélectionnées** et intégrer tous les enjeux socio-économiques associés aux éclusées (production d'énergie, tourisme, irrigation, etc.).
- **Une étape 5 pour piloter et suivre le bilan des mesures** mises en place sur une période de 3 à 5 ans. Le suivi post-mesures peut inclure un monitoring hydrologique et thermique continu et des échantillonnages biologiques pour évaluer l'efficacité. La réalisation de bilans annuels permet d'envisager des ajustements si les objectifs ne sont pas atteints.

INTRODUCTION

Le fonctionnement par éclusées de certains ouvrages hydro-électriques peut affecter le fonctionnement des cours d'eau et perturber les communautés biologiques.

L'état des lieux réalisé en 2019 sur le bassin Rhône-Méditerranée, préalablement à l'élaboration du Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) 2022-2027 et de son programme de mesures, a permis d'identifier les cours d'eau à risque de non atteinte du bon état écologique en raison du fonctionnement par éclusées. Plus de 1 200 km de cours d'eau appartenant à 73 secteurs de rivières sont concernés par un fonctionnement par éclusées sur le bassin Rhône-Méditerranée et 47 masses d'eau sont à risque de non atteinte du bon état écologique de ce fait. Dans le cadre du SDAGE et son programme de mesures, il est demandé que, sur ces secteurs, des études soient conduites pour préciser les causes du risque et les impacts puis dimensionner, le cas échéant, les mesures à mettre en œuvre pour réduire ces impacts.

Jusqu'à présent, en France, aucun document technique public ne propose de cadre méthodologique sur le type d'études à mener pour identifier et réduire les impacts des éclusées. S'il reste encore de nombreuses connaissances techniques et scientifiques à acquérir pour améliorer notre compréhension des impacts écologiques liés aux éclusées, Hayes et al. (2023) constatent néanmoins que « *il existe déjà une bonne compréhension de l'impact écologique des éclusées et des techniques d'atténuation efficaces pour soutenir une hydroélectricité durable. Cependant, un décalage subsiste dans leur mise en œuvre opérationnelle* ».

Ce document permet de décliner de manière opérationnelle la disposition 6A-10 du SDAGE 2022-2027 « Réduire les impacts des éclusées sur les cours d'eau pour une gestion durable des milieux et des espèces » sur les sites identifiés par le programme de mesures comme devant faire l'objet d'une mesure d'atténuation des impacts des éclusées en raison du risque de non atteinte du bon état écologique. Il est structuré en deux tomes.

Le Tome 1, publié en juin 2026, rassemble un état des connaissances scientifiques et techniques des impacts des éclusées hydro-électriques sur le fonctionnement des hydrosystèmes d'eau courante.

Le Tome 2, objet du présent document, propose une méthode et des outils pour la réalisation d'études de tronçons de rivière soumis à un fonctionnement par éclusées. Ces études visent à établir des diagnostics de fonctionnement, à proposer des objectifs d'atténuation des altérations identifiées et à déterminer les mesures d'atténuation les plus adaptées, en tenant compte des enjeux socio-économiques et des autres usages locaux.

Ce document propose une démarche s'appuyant sur l'état des connaissances décrit dans le tome 1. Une concertation avec l'ensemble des parties prenantes, aux différentes étapes, apparait essentielle pour assurer la prise en compte de l'ensemble des enjeux et des usages locaux.

La mise en œuvre des étapes successives de cette démarche est illustrée dans le logigramme présenté ci -après (Figure 1) :

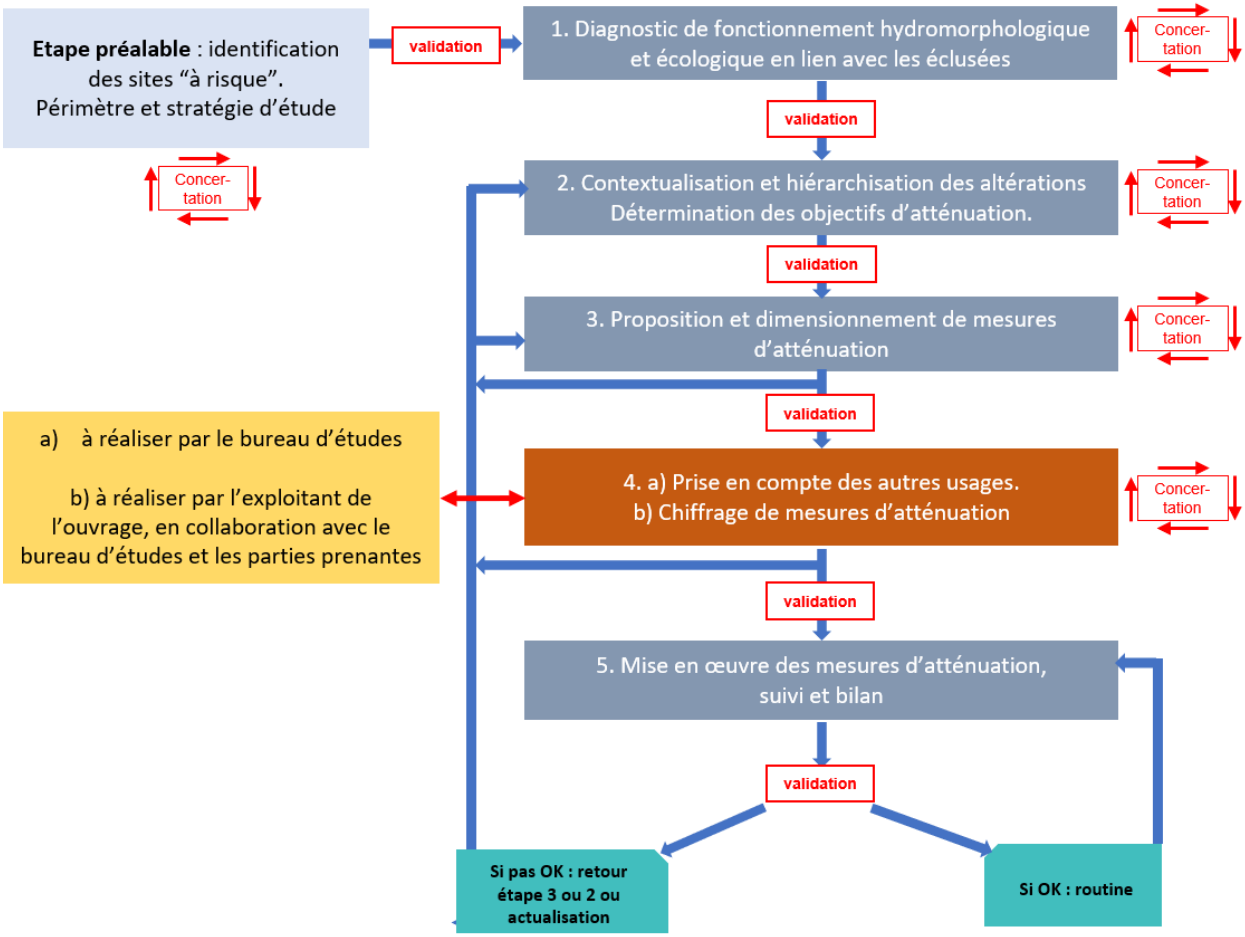


Figure 1 : Logigramme d'une étude de l'impact des éclusées sur un tronçon de cours d'eau : depuis le diagnostic de fonctionnement jusqu'à la mise en œuvre de mesures d'atténuation.

1. ETAPE PREALABLE : IDENTIFICATION DES SITES A RISQUE

Cette étape préalable consiste à identifier, parmi l'ensemble des tronçons de cours d'eau du bassin soumis à un régime d'éclusées, les tronçons pour lesquels les risques d'impacts écologiques sont les plus importants.

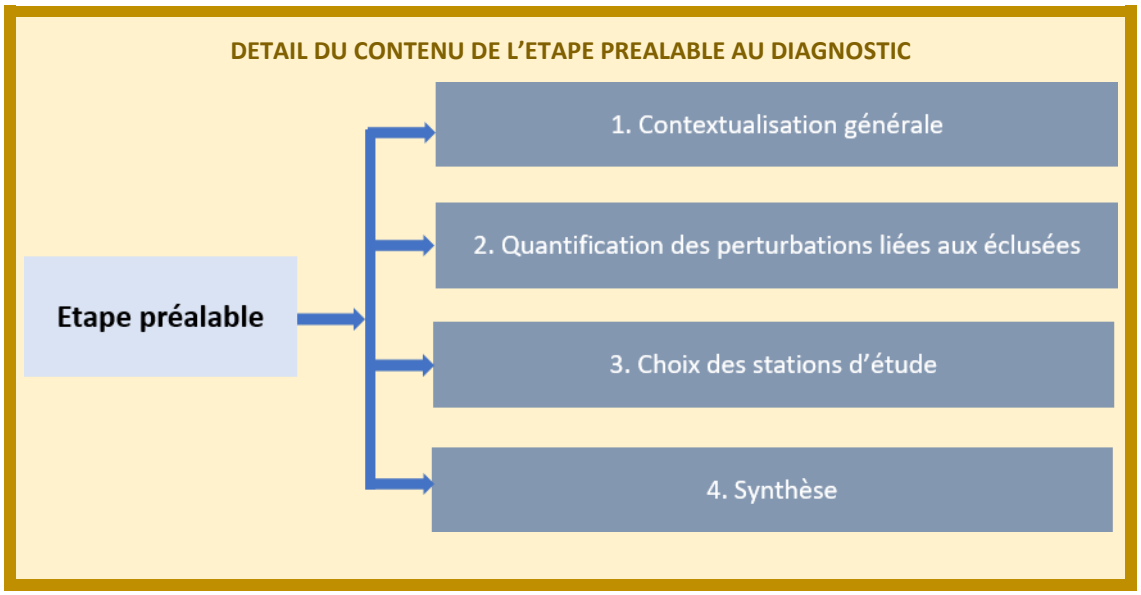
Un premier niveau d'analyse de risque a été réalisé sur le bassin Rhône-Méditerranée dans le cadre de l'élaboration de l'état des lieux en 2019 du SDAGE 2022-2027 (Baran et Ville, 2018). Cet état des lieux a été actualisé en 2025, préalablement à l'élaboration du SDAGE 2028-2033.

Il importe de l'affiner au travers d'une contextualisation générale (contextes hydromorphologique, écologique, physico-chimique) des sites concernés et d'une analyse plus précise des altérations hydrologiques.



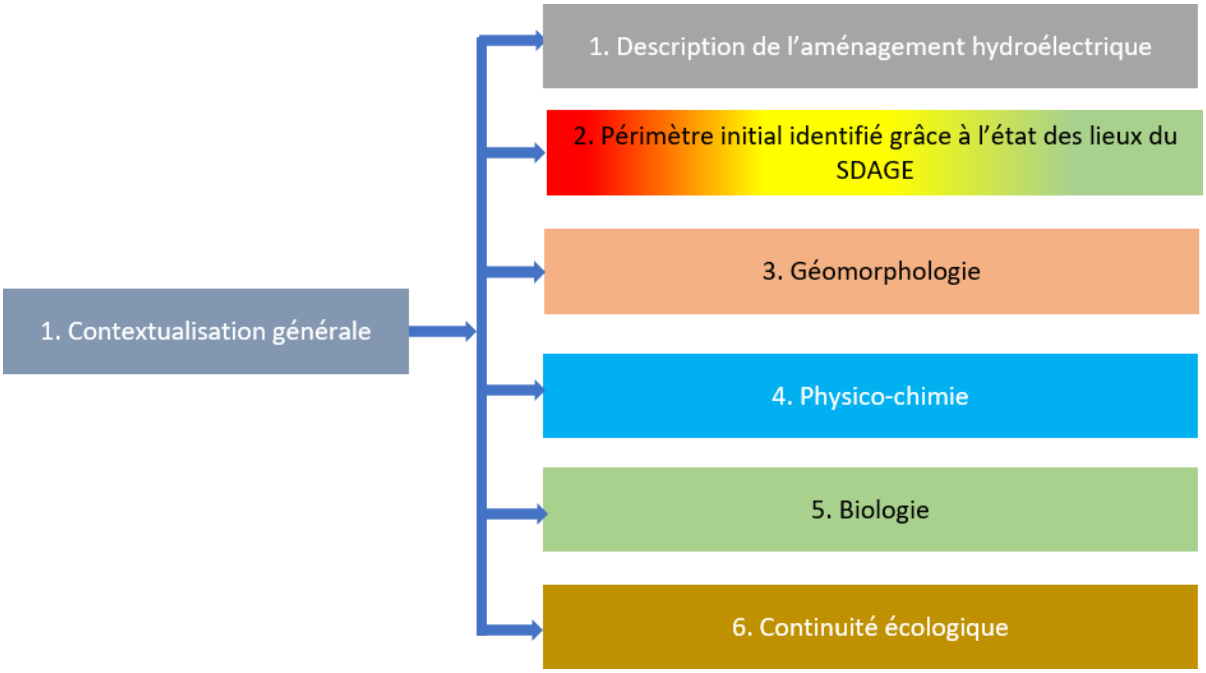
Les résultats attendus de l'étape préalable sont :

- Une analyse des altérations hydrologiques liées aux éclusées ;
- Une identification du linéaire sur lequel devra être menée l'étude ;
- Une contextualisation générale (hydromorphologique, écologique, physico-chimique) du linéaire, et des autres pressions anthropiques s'y exerçant ;
- Une sectorisation de ce linéaire en tronçons homogènes afin de choisir des stations représentatives ;
- Un choix d'espèces cibles et la définition d'un calendrier biologique correspondant aux périodes de plus fortes sensibilités ;
- Un choix des stations d'étude.



1.1. CONTEXTUALISATION GENERALE (HORS HYDROLOGIE)

Les informations disponibles dans l'état des lieux du SDAGE permettent de définir le périmètre initial d'étude sur lequel la contextualisation va être réalisée. Ce périmètre peut être ajusté en s'appuyant sur les connaissances locales.



1.1.1. DESCRIPTION DE L'AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE

Les informations peuvent être recueillies dans le règlement d'eau ou les arrêtés d'autorisation (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales caractéristiques à recueillir concernant l'aménagement hydroélectrique concerné.

Schéma hydraulique de l'aménagement ou de la vallée
Débit d'équipement de l'aménagement
Débit réservé en aval de la ou les prises d'eau
Bassin versant capté
Bassin versant intermédiaire[2] (prises d'eau-restitution)
Altitudes des retenues
Altitude de la restitution
Captages sur autres bassins hydrographiques si existants
Volumes utiles des retenues
Contraintes de gestion de l'aménagement (cotes minimales, maximales, cotes touristiques et marnage de la retenue, gradients de hausse et de baisse de la restitution, débit maximal de restitution…)

[2] Différence entre le bassin versant de la prise d'eau et le bassin versant du point où se fait la restitution.

1.1.2. PERIMETRE INITIAL IDENTIFIÉ GRACE A L'ETAT DES LIEUX 2019

Le travail conduit dans l'état des lieux 2019 du SDAGE a permis de délimiter, pour chaque aménagement, des secteurs influencés par les éclusées en s'appuyant sur l'analyse des données de débits des stations hydrométriques disponibles, croisée avec une expertise locale. Au sein de ces secteurs influencés, un découpage en tronçons a été réalisé par croisement des données hydrologiques et des caractéristiques géomorphologiques.

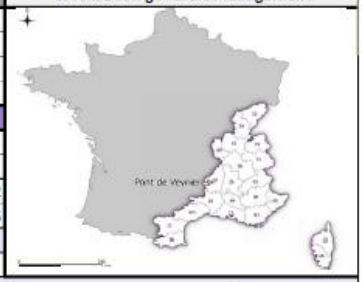
Des analyses de risque ont été conduites pour chaque tronçon des secteurs influencés. Les résultats ont été synthétisés sous forme de fiches (exemple sur la Figure 2)[3]. Les informations sont également disponibles sous format cartographique SIG.

Fiche résumée	PONT_DE_VEYRIERES_0	Dpt	7

SITE

Aménagement	PONT_DE_VEYRIERES
Unité hydrographique	AG_14_01__Ardèche
Rivière	La Fontolière
SAGE	

Localisation général aménagement



CARACTERISTIQUES GENERALES

Linéaire impacté (m)		3 586.0	Pente %	1.37
Largeur moyenne (m)		19.5	Module m³/s	16.50
Limites	X Amont	800 814.8	X Aval	802 150.2
	Y Amont	6 399 810.1	Y Aval	6 397 496.5
Linéaire Tronçon fonctionel %		Gorge	Montagnard	Plateau
		0%	42%	58%

		1	2	3
MasseEau concernées	Code	FRDR1308		
	Nom	La Fontaulière		

Tronçons	1	2	3	4	5	6	7
SYRAH	59 720						

Localisation du secteur



Distance Aménagement - St Hydrologique (km)

3.9

Remarques secteurs

ENJEUX ECOLOGIQUES

ETAT	ME	FRDR1308			Classement L214-17	Liste 1
Etat écologique ME	Etat	Bon				
Etat chimique ME	Etat	Bon				

Zones natura 2000

1	2	3	4

Nombre d'espèces présentes	7	Espèces dominantes	TRF ANG

Période		
	vulnérabilité EF	Automne - Hiver
	vulnérabilité EP	Printemps
	vulnérabilité IH	Printemps
	vulnérabilité générale	Automne - Hiver - Printemps

[3] https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/fr/notice/caracterisation-des-risques-ecomorphologiques-associes-au-fonctionnement-par-eclusee-des-masses-d-eau-des-bassins-rhone-mediterranee-et-corse-synthese-80932

VULNERABILITE (Vul.)

Exondation de Frayères (EF)

SGF potentielle (%)	Part en eau (%)	Part hors eau %	VULNERABILITE : EF
0%	96%	4%	Faible

Echouage / Piégeage (EP)

Indice CS	Indice Bancs +	Indice Macro-Formes	VULNERABILITE : EP
0.16	0.10	0.26	Moyen

Instabilité Hydraulique (IH)

Paramètres de pondérations

Pondérateur		Classe	Pondérateur			Classe
Abris hydraulique / km	3.00	Faible	Digitation de berge	Faible	0%	Fort
Part facies de Profond %	33%	Faible		Moyen	20%	
Part Blocs dans granulo dominante %	41%	Moyen		Fort	80%	

Puissance		Pondération Oui ou Non	VULNERABILITE	
Printemps	Eté		Printemps	Eté
58.2	40.3	Non	Moyen	Moyen

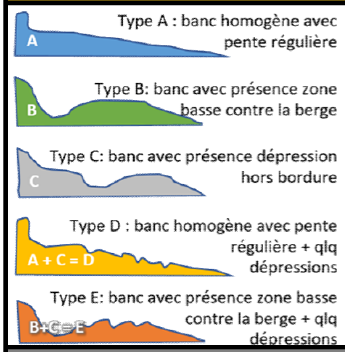
PERTURBATION HYDROLOGIQUE - ALEA (calcul sur 3 années)

Période	Indicateur	Aléa	Type de calcul	QTVAR
Annuel	5	Fort	Commentaires:	
Automne	5	Fort	Nombre d'éclusées très forts (>1000/an). Saisonnalité du régime avec moins d'éclusées en été. Débit de base moyen (20% du module). Amplitude forte (120% du module)	
Hiver	5	Fort		
Printemps	5	Fort		
Eté	3-	Moyen		

EVALUATION DU RISQUE

Exondation de frayères		Echouage/Piégeage		Instabilité hydraulique		Risque Alevin (EP * IH)
Vul.	Faible	Vul.	Moyen	Vul. Print.	Moyen	Fort
Aléa Aut.	Fort	Aléa Print.	Fort	Vul. Eté	Moyen	**Risque éclusées**
Aléa Hiver	Fort	Aléa Eté	Moyen	Aléa Print.	Fort	
Risque	Faible	**Risque**	Fort	Aléa Eté	Moyen	Fort
				Risque	Fort	

Eléments d'interpretations



Expertise terrain du potentiel de piégeage des bancs et CS

Type de bancs	
Type A %	5%
Type B %	58%
Type C %	37%
Type D %	0%
Type E %	0%

Expertise de l'intensité des surface piégeantes		
Macro forme	% surface Bancs	% surface CS
Faiblement	5%	0%
Modérement	0%	0%
Fortement	95%	100%

Perturbation morphologique

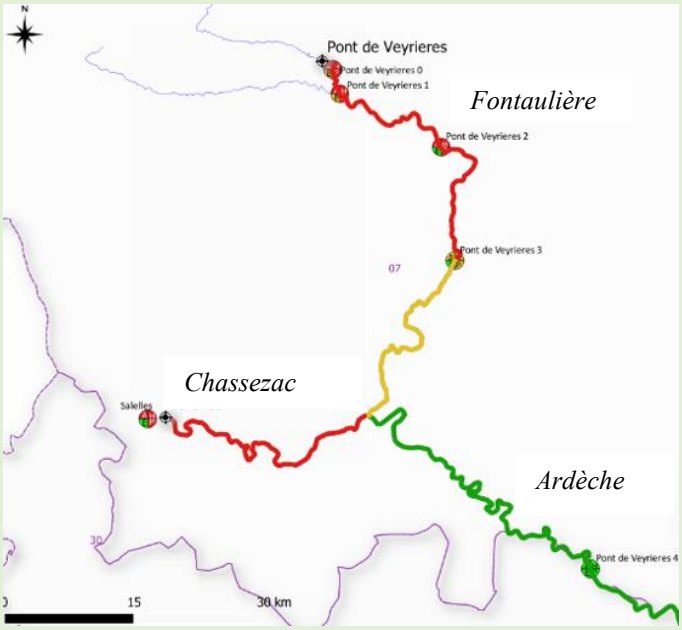
Taux d'étagement	0.26
Linéaire de ligne d'eau artificialisé (%)	23.5
Chenalisation du cours principal	1

COMMENTAIRES BILAN

Secteur dominé par les troçons de type montagnard avec une succession de faciès chenaux lotiques/radier ou escalier. Les substrats sont dominés par les blocs et les galets avec des affleurements rocheux. Présence de bancs et chenaux. Lit ponctuellementy contraint dans les traversées de villages et par la présence de route. Ligne d'eau artificialisée sur 23% du linéaire par les présence de seuils

Figure 2 : Exemple de fiche de synthèse de l'analyse de risque pour le tronçon amont de l'aménagement de Pont de Veyrières sur la Fontaulière (état des lieux Rhône-Méditerranée, 2019)

EXEMPLE : UTILISATION DES RESULTATS DE L'ANALYSE DE RISQUE DE L'ETAT DES LIEUX POUR LA DEFINITION DU PERIMETRE DE L'ETUDE



Exemple des rivières de la Fontaulière, de l'Ardèche et du Chassezac (07), sur les aménagements de Pont de Veyrières et Salelles :

- Pour l'aménagement de Pont de Veyrières sur la Fontaulière, les risques associés aux éclusées ont été identifiés comme moyens (jaune) à forts (rouge), de la restitution de l'usine (Pont de Veyrières 0) à la confluence avec le Chassezac soit un total de 50 km sur 101 km identifiés initialement comme « secteur influencé ».
- Pour le Chassezac, le tronçon en risque fort (rouge) couvre la totalité du cours d'eau de la restitution à la confluence avec l'Ardèche soit 27 km.

Le périmètre initial d'une étude à réaliser sur la Fontaulière et l'Ardèche devrait s'étendre de la restitution de Pont de Veyrières à la confluence du Chassezac. Une étude sur le Chassezac devrait couvrir la totalité du secteur entre la restitution de Salelles et la confluence avec l'Ardèche.

Les données relatives à l'état écologique et chimique des masses d'eau du bassin Rhône-Méditerranée permettent d'identifier l'état, les objectifs et les principales pressions et altérations. Dans l'exemple ci-après (Figure 3), la masse d'eau présente un état, appelé pour les masses d'eau fortement modifiées « potentiel écologique », moyen du fait d'altérations morphologiques.

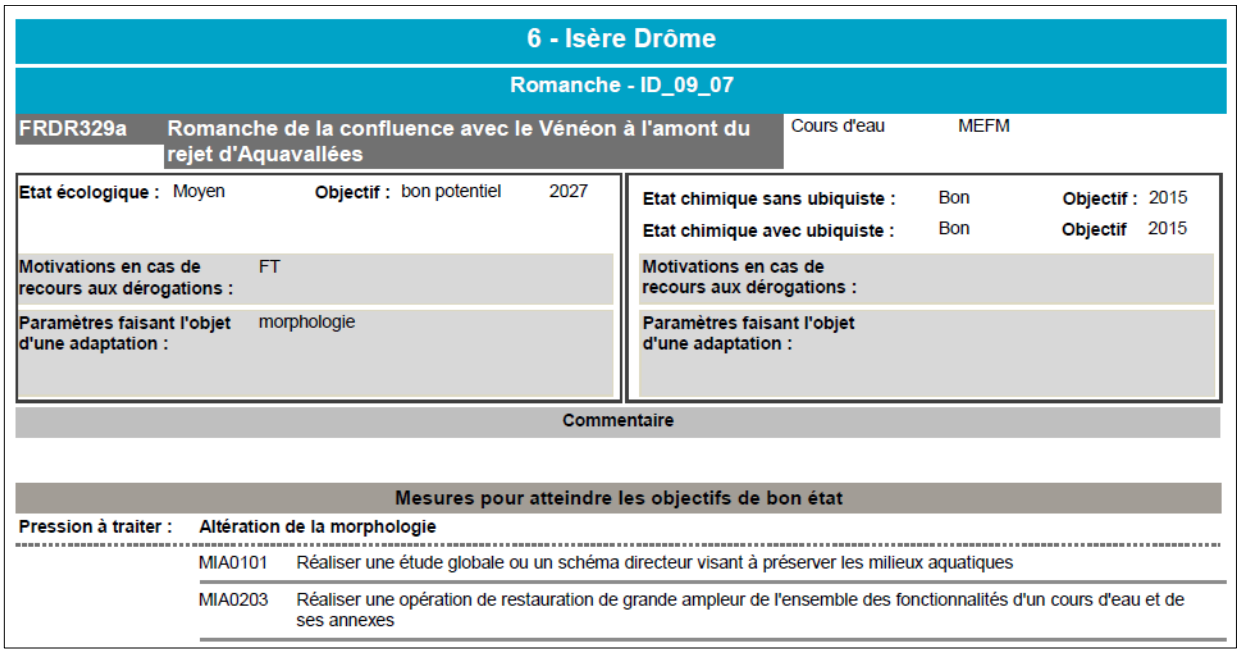


Figure 3 : exemple de fiche de synthèse de l'état d'une masse d'eau (MEFM : masse d'eau fortement modifiée ; FT : faisabilité technique)

Les données d'état et de qualité détaillées sont disponibles sur les liens fournis dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Sources des données disponibles pour qualifier l'état des masses d'eau.

Type de données	Sources
État et objectifs masse d'eau	https://rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion-de-leau/sdage-2022-2027-elaboration/donnees-techniques-de-reference-du-sdage-2022-2027*
Qualité des cours d'eau	https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/surveillance-des-eaux/qualite-des-cours-deau/donnees-detat-des-cours-deau-superficiels

*Sera mise à jour en 2028 avec les données techniques de référence pour le projet de SDAGE 2028-2033

1.1.3. GEOMORPHOLOGIE

Les données sur la géomorphologie sont disponibles sur les liens fournis dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Sources disponibles pour les caractéristiques géomorphologiques des tronçons.

Type de données	Sources
Tronçons et caractéristiques morphologiques	Couches SIG - Réseau Hydrologique Théorique(RHT) (Pella et al. 2012) ; SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie (SYRAH)(Valette et al, 2008) Carte et photos aériennes IGN https://www.geoportail.gouv.fr/carte IED Carhyce (site internet)
Transport solide et granulométrie des fonds	Etudes spécifiques disponibles dont étude diagnostic continuité écologique Suivis opérations de chasse et transparence retenue

Dans le cadre de l'état des lieux de 2019, des données géomorphologiques sont disponibles en couche SIG et dans les fiches par tronçon (Figure 2).

Les cours d'eau présentent généralement une physionomie et un fonctionnement qui varient le long de leur parcours. Cette évolution amont-aval peut être brutale, lors d'un passage brusque de la montagne à la plaine ou de gorges à un vaste lit majeur, ou continue, avec une augmentation progressive de la largeur ou une réduction progressive de la pente.

Pour en permettre l'étude et la gestion, y compris dans un contexte d'éclusées, le cours d'eau peut être segmenté en un certain nombre d'entités emboîtées.

De nombreuses méthodes de sectorisation ont été proposées dont celle de Malavoi et Bravard (2010), qui distingue neuf entités emboîtées présentant, chacune à leur échelle, une homogénéité des processus géomorphologiques et des processus écologiques. Par ordre décroissant de taille, les entités vont du secteur au micro-habitat (les ordres de grandeur des longueurs de ces entités sont exprimés en nombre de fois la largeur à pleins bords = lpb).

* cours d'eau
  * secteur (≥ 1000 lpb)
    * unité (≥ 1000 lpb)
      * **tronçon (100 à 1000 lpb) : nommé ici tronçon de contrôle géomorphologique (TCG)**
        * **sous-tronçon (100 à 1000 lpb) : nommé ici tronçon géomorphologique fonctionnel (TGF)**
          * segment (10 à 100 lpb)
            * faciès (1 à 10 lpb)
              * sous-faciès (1 à 10 lpb)
                * micro-habitat (≤ 1 lpb)

Les deux entités supérieures, secteurs et unités, n'ont d'intérêt que pour les très grands cours d'eau (plusieurs centaines de km) traversant des entités géologiques ou hydroclimatiques très contrastées. Dans le cadre de la démarche proposée, il est recommandé une sectorisation à deux niveaux : le tronçon nommé tronçon de contrôle géomorphologique (TCG) et le sous-tronçon nommé tronçon géomorphologique fonctionnel (TGF).



Les trois entités inférieures, faciès, sous-faciès et microhabitats, bien que discriminées sur des caractéristiques physiques, sont des entités qui correspondent davantage à l'habitat des organismes aquatiques. Il sera généralement nécessaire de descendre jusqu'au niveau faciès d'écoulement afin de choisir au mieux les stations représentatives sur lesquelles seront menées les investigations de quantifications des altérations.

Un TCG est un tronçon de vallée caractérisé par trois variables géomorphologiques naturelles, immuables à notre échelle de temps et qui vont en grande partie conditionner le fonctionnement du cours d'eau :

1. la largeur de la vallée (ou sa forme) représente l'extension maximale du lit majeur et permet d'appréhender l'espace de bon fonctionnement du cours d'eau ainsi que la quantité de sédiments potentiellement mobilisable. Une limite de tronçon est placée à chaque changement important et brutal de la largeur du fond de vallée (élargissement ou réduction). En cas d'évolution progressive de cette largeur, il convient de déterminer s'il y a une modification du fonctionnement hydromorphologique ;

2. la pente du fond de vallée rend compte de l'énergie du cours d'eau et notamment de sa capacité de mobilisation et de transport des sédiments ;
3. le rang de Strahler indique la position d'un cours d'eau dans le réseau hydrographique et sert de proxy de « l'hydrologie morphogène » : une limite de tronçon est placée à chaque changement de rang de la rivière, c'est-à-dire après chaque confluence avec un affluent de taille équivalente. Pour les cours d'eau de taille importante, les confluences avec des cours d'eau de rangs inférieurs intéressants en termes d'apports liquides ou solides, marquent également des limites de tronçons. En pratique, à partir du rang 4, les confluences avec les cours d'eau de rang n-1 délimitent des tronçons. A partir du rang 5, les confluences avec les rivières de rang n-2 sont également prises en compte.



Ces variables de contrôle ont été utilisées pour établir une sectorisation nationale en TCG dans le cadre du projet SYRAH (Valette et al., 2008). Cette sectorisation, réalisée sur plus de 200 000 km de cours d'eau français, est disponible en ligne sous forme de couche SIG au format shapefile[4]. Nous proposons que le premier niveau de sectorisation d'un cours d'eau dans le cadre d'une étude des altérations liées aux éclusées soit réalisé en utilisant comme point de départ ces TCG bancarisés.

NB : la sectorisation SYRAH ayant été réalisée de manière semi-automatique, il peut arriver que des limites de TCG soient approximatives. Dans ce cas, il est souhaitable de les corriger manuellement.

L'outil PRHYMO[5], la plateforme Pressions et risques d'impacts hydromorphologiques, va remplacer le SYRAH en 2027 avec une mise à jour de la sectorisation.

Un TCG représente le « cadre physique » qui contrôle la morphologie et la dynamique du cours d'eau. Celui-ci devrait en théorie présenter des caractéristiques hydromorphologiques relativement homogènes : style fluvial, géométrie (largeur et profondeur à pleins bords), pente du lit mineur (profil en long), séquence type de faciès d'écoulement, etc. Il arrive cependant que ces caractéristiques hydromorphologiques de réponse ne soient pas homogènes au sein d'un TCG pour des raisons le plus souvent liées à la présence de pressions anthropiques (barrage, endiguements, etc.).

Une fois les TCG identifiés, il convient de définir les tronçons géomorphologiques fonctionnels (TGF) (Figure 4).

Ce niveau de sectorisation utilise des critères hydromorphologiques :

- le style fluvial principalement, ainsi qu'éventuellement la largeur de la bande active ;
- la présence d'aménagements anthropiques structurants : endiguement, rectification du tracé, seuils et ponts, anciennes extractions ayant provoqué l'incision du lit, protections de berges continues, etc.

[4] https://www.data.gouv.fr/datasets/syrah-ce-systeme-relationnel-daudit-de-lhydromorphologie-des-cours-deau
[5] https://hal.science/hal-05733704

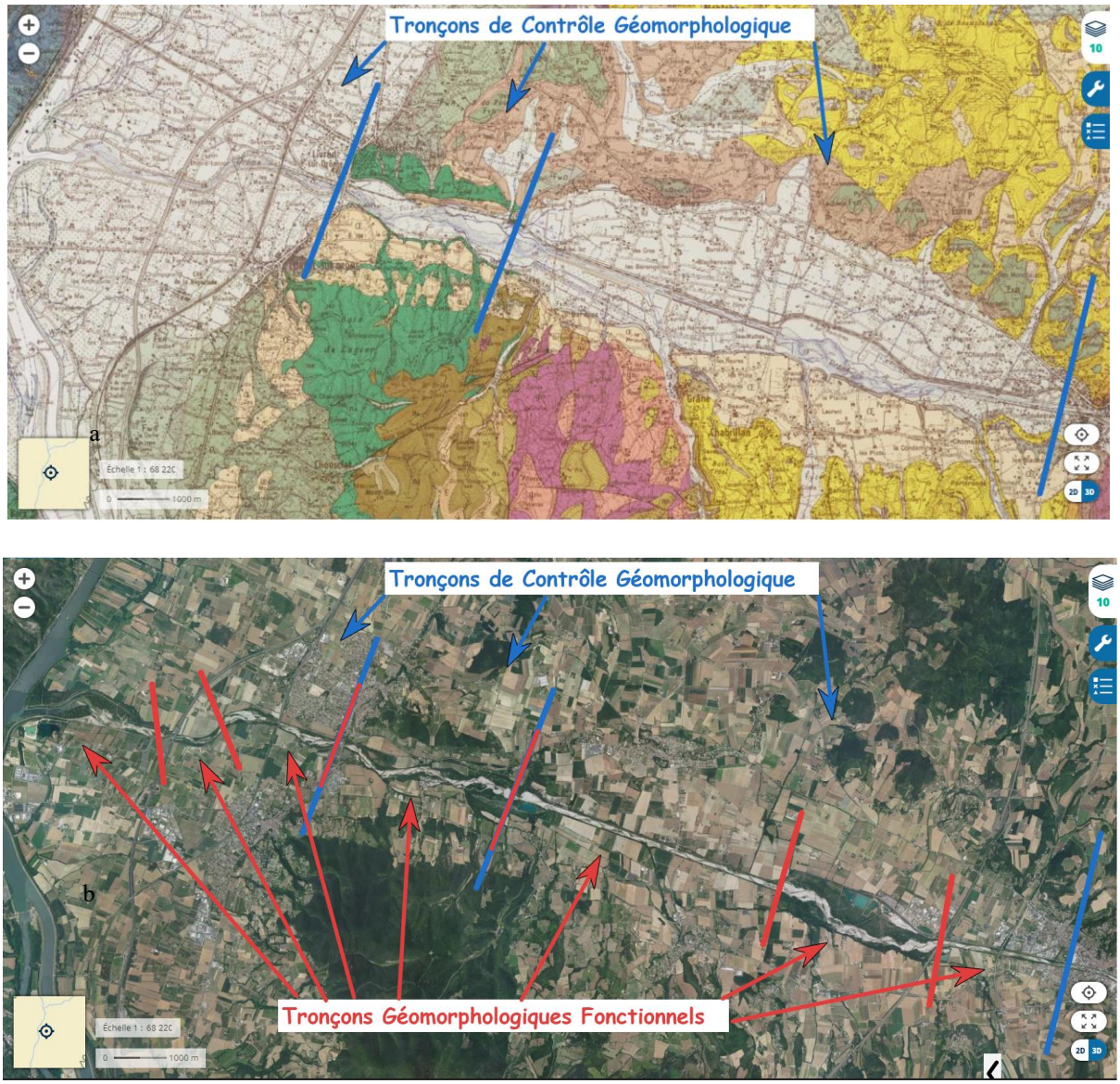


Figure 4 : Exemple de sectorisation sur la Drôme aval a) en tronçons de contrôle géomorphologique (TCG) et b) en tronçons géomorphologiques fonctionnels (TGF), ici en lien avec un endiguement étroit. Notez qu'en cas de TCG homogènes sur le plan des variables de réponse, les limites des TCG et TGF se confondent.

Dans le cadre spécifique d'une étude « éclusées », le point de restitution en rivière des débits turbinés peut être utilisé comme un critère de modification hydrologique, pour éventuellement subdiviser en deux un TCG. Ex : TCG amont/TCG aval restitution.

Pour chacun des TCG et TGF étudiés, on fournira les caractéristiques géomorphologiques associées (surface du bassin versant amont, altitude et pente du lit, de la vallée, largeur de la vallée, géométrie en travers du lit, etc.). Pour les TCG, ces données sont disponibles dans la base SYRAH (Figure 5), pour les TGF il conviendra de les calculer.



Figure 5 : Exemple de données disponibles pour les TCG dans la base SYRAH (extrait de QGIS).

A minima, une évaluation des proportions des divers types de faciès d'écoulement est réalisée. Les faciès sont considérés comme des méso-habitats. Une cartographie plus complète peut être souhaitable, pour évaluer au mieux les habitats disponibles et les biocénoses aquatiques, et par conséquent pour choisir les stations représentatives.

LES FACIES D'ECOULEMENT

Les faciès d'écoulement sont de petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à pleins bords environ) présentant une homogénéité, à l'échelle de quelques m^2 à quelques centaines de m^2, en matière de vitesses, de profondeurs, de granulométrie, de pente du lit et de ligne d'eau, de profils en travers (Malavoi, 1989, Malavoi et Souchon, 2002). L'identification de ces faciès peut être difficile car, dans la réalité, il existe très peu de faciès cas « d'école ». Certains auteurs privilégient la composition du substrat, ou bien la pente de la ligne d'eau, quand d'autres utilisent la répartition des hauteurs et vitesses, le nombre de Froude (rapport adimensionnel de la vitesse moyenne à la hauteur d'eau) ou encore les caractéristiques de la surface de l'eau. Plusieurs travaux proposent une description détaillée des faciès pour limiter les biais d'interprétation (Malavoi (1989) ; Malavoi et Souchon (2002) ; Delacoste et al. (1995)) (Figure 6).

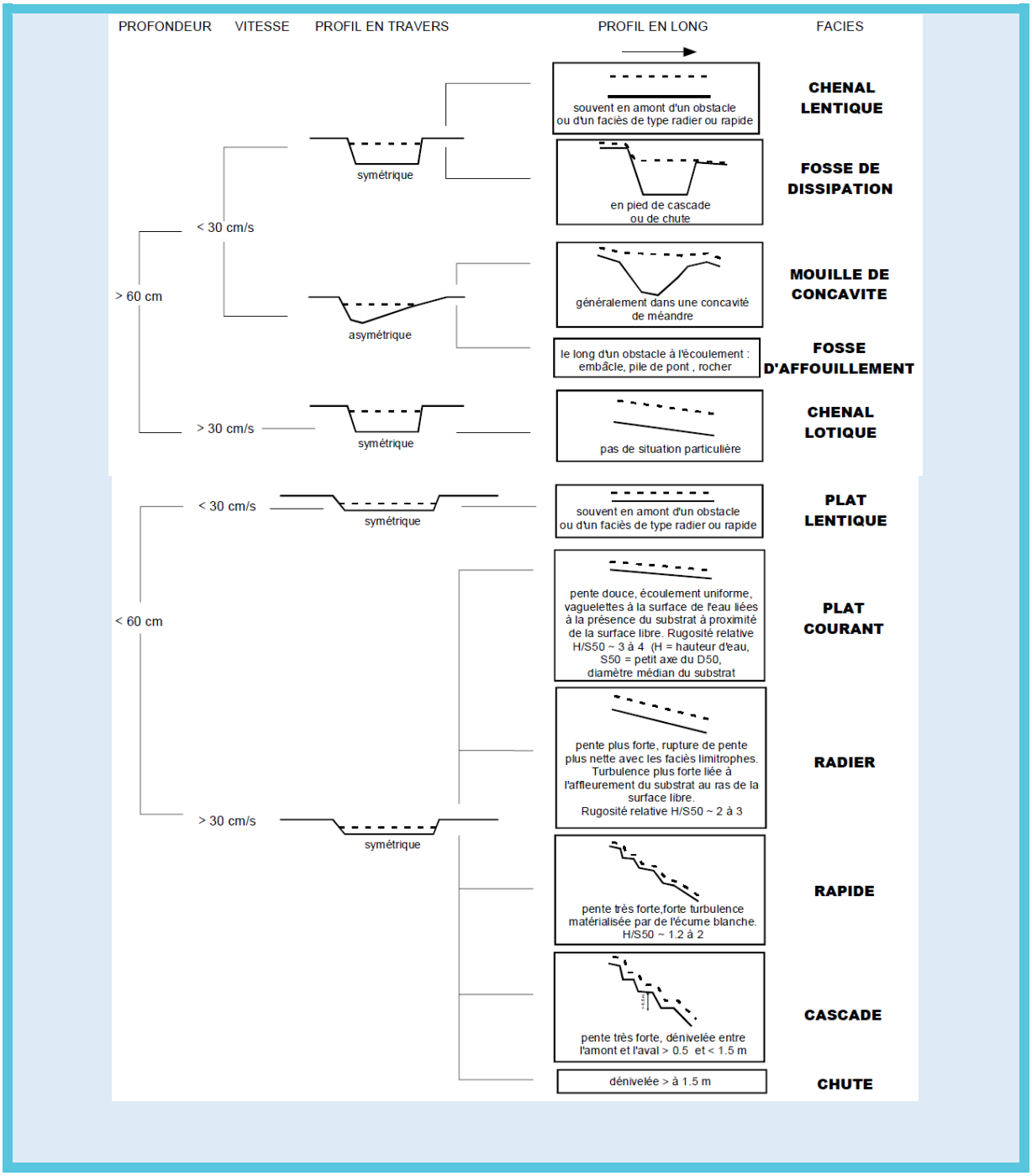


Figure 6 : Exemple de clé de détermination simplifiée des faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002).

Une caractérisation de la granulométrie dominante, au minimum sur les radiers, complètera cette approche (méthode quantitative Wolman (Wolman 1954) ou description visuelle EVHA (CEMAGREF, 1995). On pourra affiner la caractérisation granulométrique des tronçons par une évaluation des superficies pavées ou constituées de substratum rocheux. Enfin, il serait souhaitable de réaliser une évaluation, voire une cartographie, des SGF (Surface Granulométriques Favorables à la reproduction des poissons lithophiles) présentes sur les différents tronçons, notamment ceux soumis à éclusées. Ces SGF sont en effet l'un des point clés du diagnostic d'altérations morphoécologiques liées aux éclusées, notamment celles en lien avec l'exondation des frayères et la mobilité sédimentaire.

De plus, pour alimenter le diagnostic des altérations morphoécologiques, on quantifiera les abris hydrauliques : Ils jouent un rôle majeur pour beaucoup d'espèces piscicoles, notamment la truite commune. Pour cela, on peut s'appuyer sur la méthode de Binns (1982) qui quantifie les surfaces occupées par les abris minéraux (blocs), les abris ligneux, les sous-berges et les herbiers. Des informations concernant les abris hydrauliques de grande taille sont disponibles dans les fiches de synthèse de l'état des lieux 2019 du SDAGE.

Parce qu'elles peuvent aggraver ou atténuer les effets des éclusées, on identifiera aussi les pressions et altérations hydromorphologiques présentes sur le tronçon , par exemple en sept types (Tableau 4).

Tableau 4 : Qualification des interactions entre les altérations de la morphologie et les altérations morphoécologiques liées aux éclusées

Pressions/altérations hydromorphologiques	Effets aggravant les altérations liées aux éclusées	Effets atténuant les altérations liées aux éclusées
Extractions de granulats	Pertes : de surfaces de frayères (SGF) pour les espèces lithophiles, de fonctionnalité des frayères, de capacités d'accueil pour les espèces piscicoles benthiques et les invertébrés pétricoles	Moindres superficies de zones potentiellement piégeantes
Rectification du lit	Perte de diversité des habitats du chenal, augmentation des vitesses d'écoulement, réduction des dépôts de sédiments de granulométrie moyenne (sable à petits graviers), pertes de diversité des habitats de berges	Moindres superficies de zones potentiellement piégeantes
Recalibrage / surélargissement	Favorise la sédimentation et donc les risques de développement de surfaces piégeantes (bancs).	Réduction des vitesses à Qmax
Suppression de la ripisylve	Favorise l'instabilité des berges, perte d'ombrage, perte d'abris	Peut réinjecter des alluvions grossières favorables à la création de SGF
Survégétalisation du lit	Augmentation potentielle des surfaces piégeantes dans les végétaux	Augmentation des abris en berge
Protection des berges	Perte de capacité de recharge alluviale	Refuge éventuel dans les interstices si les enrochements sont libres (non jointoyés)
Seuils et ouvrages transversaux	Perte de diversité des habitats lotiques du fait des retenues. Piégeage des sédiments et déficit en aval, donc perte de qualité d'habitat, notamment de reproduction (SGF).	

1.1.4. PHYSICO-CHIMIE

La caractérisation de la thermie permet d'identifier des conditions thermiques défavorables aux espèces, soit pour leur développement et leur survie (température estivale chaude ou température hivernale froide), soit pour la réalisation de leur reproduction (température inférieure au seuil de déclenchement de la reproduction) (Tableau 5).

Tableau 5 : Indicateurs de caractérisation du régime thermique pour les différentes phases du cycle biologique des poissons.

Phase du cycle biologique	Indicateurs
Reproduction	Nombre de jours > valeurs seuils de déclenchement
Développement des œufs	Nombre de jours < valeurs seuils de mortalité Nombre de °C jour depuis les dates de début, milieu et fin de ponte
Emergence des alevins	Nombre de jours < valeurs seuils de mortalité Nombre de °C jours cumulés jusqu'à l'émergence
Croissance des alevins, juvéniles et adultes	Température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds Nombre de jours > valeurs létales Nombre de jours > valeurs critiques
Maladie PKD[6] (truite commune)	Nombre de jours > 15°C en été

Les données, si elles sont disponibles sur les tronçons, sont issues du réseau de suivi de l'Office français de la biodiversité (OFB) ou d'études spécifiques conduites le plus souvent par l'exploitant de l'aménagement ou par les Fédérations départementales des associations agréées de pêche et de protection des milieux aquatiques (FDAAPPMA). Leur interprétation doit s'appuyer sur les valeurs seuils fournies par la bibliographie pour les différentes espèces de poissons cibles. Ces valeurs sont rassemblées dans l'annexe 2.

La caractérisation physicochimique permet de confronter les valeurs des concentrations de certains paramètres aux exigences des espèces. Il s'agit d'identifier la présence de facteurs susceptibles d'influencer les communautés biologiques (azote minéral, nitrite, ammoniaque, matières organiques, déficit en oxygène). De nombreuses données sont disponibles sur le portail Naiades[7].

Une attention particulière peut aussi être portée aux variations de minéralisation de l'eau notamment dans les situations de restitution d'eau provenant de haute altitude. Ces variations peuvent avoir des incidences sur la physiologie des poissons.

[6] La PKD (ou Maladie Rénale Proliférative) est une infection parasitaire grave qui touche les jeunes salmonidés (comme les truites). Elle est causée par le parasite Tetracapsuloides bryosalmonae et s'active lorsque l'eau dépasse 15 °C.
[7] Naiades.eaufrance.fr

1.1.5. BIOLOGIE

Les éléments présentés ici permettent de :

- sélectionner les espèces piscicoles cibles ou focales (cf. définitions dans l'encadré ci-dessous) utilisées pour le diagnostic et le dimensionnement des mesures d'atténuation ;
- construire un calendrier biologique servant au diagnostic des altérations, notamment hydrologiques ;
- identifier les habitats particuliers utilisés par les espèces sélectionnées pour le diagnostic des altérations morphoécologiques ;
- sous-sélectionner parmi ces espèces piscicoles cibles ou focales, un sous ensemble représentatif.



L'analyse des altérations morphoécologiques repose sur des indicateurs reliés à chaque phase du cycle biologique. **Une sous-sélection des espèces est indispensable pour réduire le nombre d'indicateurs**.

CHOIX DES ESPECES

Les travaux d'études et de recherche sur les impacts des éclusées portent essentiellement sur les poissons et dans une moindre mesure sur les invertébrés benthiques (cf. Tome 1 Atténuation des éclusées). Dans le cadre des diagnostics d'impacts, il est proposé de retenir en priorité les communautés piscicoles comme cible biologique. Selon les contextes, il peut être néanmoins intéressant d'intégrer les communautés d'invertébrés, les plantes ou les espèces à enjeu (cas du Desman des Pyrénées ou d'oiseaux utilisant les bancs alluviaux).

Le diagnostic des impacts des éclusées repose sur l'identification d'une ou plusieurs espèces cibles (appelées aussi représentatives, témoins ou clés) (Tableau 6), sélectionnées pour représenter les espèces locales et conduire à préserver les éléments nécessaires aux autres espèces. Dans le cas des éclusées, la recherche des impacts porte surtout sur des phases clés du cycle biologique : reproduction, développement des œufs et des alevins, émergence des alevins. Les espèces cibles retenues doivent permettre d'appréhender tous les habitats vulnérables aux variations de débits (ex : la gamme des granulométries utilisées par les poissons lithophiles pour déposer leurs pontes).

Il est également possible de sélectionner des espèces focales (appelées aussi centrales ou prioritaires). Il s'agit d'un ensemble d'espèces connues pour être les plus vulnérables aux différentes pressions subies notamment aux variations de débits.

Tableau 6 : Stratégies de sélection d'espèces pour la conservation d'après Albert et Chaurand (2018).

Dénomination des espèces	Définition
Espèce cible, représentative, témoin, clé	Espèce ou groupe d'espèces représentatif des espèces locales.
Espèce focale, centrale, prioritaire	Ensemble d'espèces les plus vulnérables aux différentes pressions subies, dans différents habitats (ex. : grand domaine vital, dispersion limitée, ressources spécifiques).

ÉLÉMENTS GENERAUX SUR LA DEFINITION DU CALENDRIER BIOLOGIQUE DES ESPECES

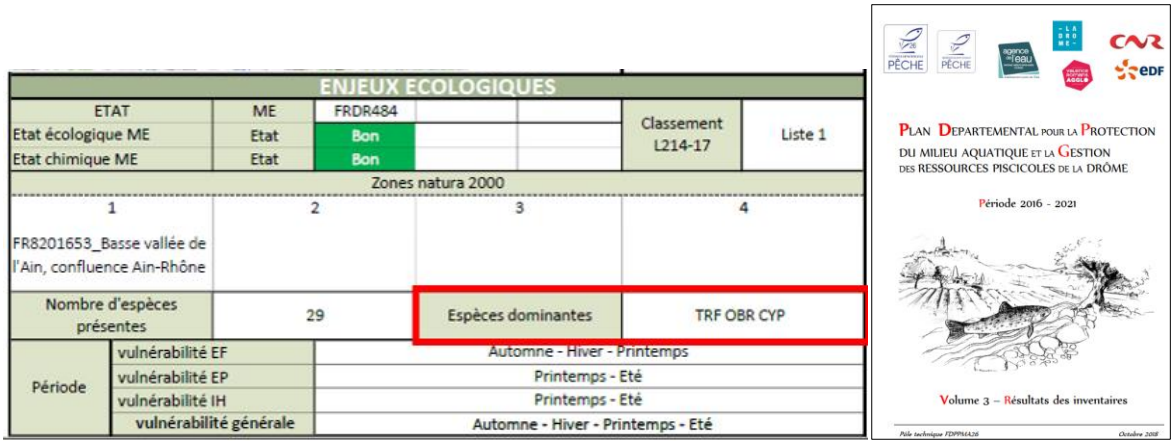
Le choix des espèces cibles et focales permet de construire le diagnostic reposant sur les exigences biologiques de ces espèces (Tableau 7). Il est indispensable de définir les différentes périodes biologiques clés de leur cycle de vie. La définition des périodes repose sur deux facteurs environnementaux : i) la durée et ii) la température de l'eau.

Tableau 7 : Présentation des différentes phases des cycles biologiques des espèces de poissons.

Phases biologiques	Description
Reproduction	Phase d'accouplement, de fécondation et de dépose des œufs par les géniteurs
Développement des œufs et des larves	Phase de développement des œufs jusqu'à l'éclosion puis des larves jusqu'à l'émergence
Émergence des alevins	Phase d'émergence des alevins (avec sac vitellin) ou des alevins depuis les zones de ponte
Post-émergence des alevins	Phase de début de nutrition des alevins présentant de faibles capacités de nage
Croissance des alevins, juvéniles et phase adulte	Phase de croissance des alevins, juvéniles et phase adulte

Dans le cadre des analyses de risques conduites dans l'état des lieux 2019 du SDAGE, les espèces piscicoles cibles ou focales ont été identifiées dans les différents secteurs étudiées. Cette identification a reposé sur les données provenant du réseau de surveillance des milieux et sur les études de l'Office français pour la biodiversité (OFB), des Fédérations départementales des associations agréées pour la pêche et la protection des milieux aquatiques (FDAAPPMA) et de maîtres d'ouvrages (producteurs d'électricité, collectivités territoriales). Ces données sont disponibles dans les fiches récapitulatives de l'état des lieux du SDAGE sous la dénomination espèces dominantes.

Les informations disponibles dans l'analyse de risque conduite dans l'état des lieux 2019 du SDAGE sont très générales, notamment en ce qui concerne les cyprinidés. De plus, certaines espèces cibles ou focales ne sont pas identifiées, comme l'apron, le chabot ou la lamproie de planer. Il peut alors être nécessaire de s'appuyer sur d'autres données. Par exemple, les Plans départementaux pour la protection du milieu aquatique et la gestion des ressources piscicoles (PDPG) établis par les FDAAPPMA contiennent des informations concernant à la fois des espèces piscicoles cibles ou focales dites repères, dont la truite commune, et un bilan des altérations et des impacts vis-à-vis de ces espèces (Figure 7), cf. exemple de la Bourne (Figure 8).



ENJEUX ECOLOGIQUES						
ETAT	ME	FRDR484			Classement L214-17	Liste 1
Etat écologique ME	Etat	Bon				
Etat chimique ME	Etat	Bon				
Zones natura 2000						
1	2		3		4	
FR8201653_Basse vallée de l'Ain, confluence Ain-Rhône						
Nombre d'espèces présentes	29		Espèces dominantes		TRF OBR CYP	
Période	vulnérabilité EF	Automne - Hiver - Printemps				
	vulnérabilité EP	Printemps - Eté				
	vulnérabilité IH	Printemps - Eté				
	vulnérabilité générale	Automne - Hiver - Printemps - Eté				

Figure 7 : Exemples d'informations disponibles dans l'état des lieux 2019 et présentation d'un exemple de PDPG de la Drôme.

Une fois les espèces cibles ou focales déterminées (Tableau 8), il est nécessaire de définir leur calendrier biologique. Ce calendrier est défini sur la base des connaissances disponibles (voir le détail en annexe 2).

Tableau 8 : Etapes à suivre pour sélectionner les espèces cibles et focales

METHODE DE SELECTION DES ESPECES CIBLES

Etape 1 : utiliser la liste d'espèces pré-identifiées à l'échelle du bassin	Une première liste d'espèces cibles et focales est proposée dans l'annexe 2 « connaissances biologiques des espèces cibles et focales ».
Etape 2 : exploiter les données disponibles localement	Liste d'espèces susceptibles de coloniser le tronçon en s'appuyant sur le type écologique et la zonation. Données issues des pêches électriques (réseaux et études OFB et FDAAPPMA, maîtres d'ouvrages) et expertise des acteurs locaux.
Etape 3 : choix les espèces cibles et focales sur la base de critères de sélection	Les espèces cibles et focales sont sélectionnées en s'appuyant sur le potentiel du type écologique, leur présence et absence, et l'occurrence lorsque plusieurs échantillonnages sont disponibles. Pour les espèces focales, une expertise est nécessaire pour intégrer ou non les espèces appartenant au type écologique mais absentes actuellement (évaluer les potentialités de recolonisation via les réservoirs biologiques proches et les actions de restauration de la continuité dans le périmètre proche). Pour les espèces cibles, il peut être pertinent de sélectionner des espèces dont l'occurrence est au minimum de 25%.

EXEMPLE : IDENTIFICATION DES ESPECES CIBLES OU FOCALES

Exemple de la **Bourne à l'aval Pont en Royans**, avec des inventaires par pêche électrique et des données issues de l'OFB, SAGE Environnement et des Fédérations de Pêche de la Drôme et de l'Isère.

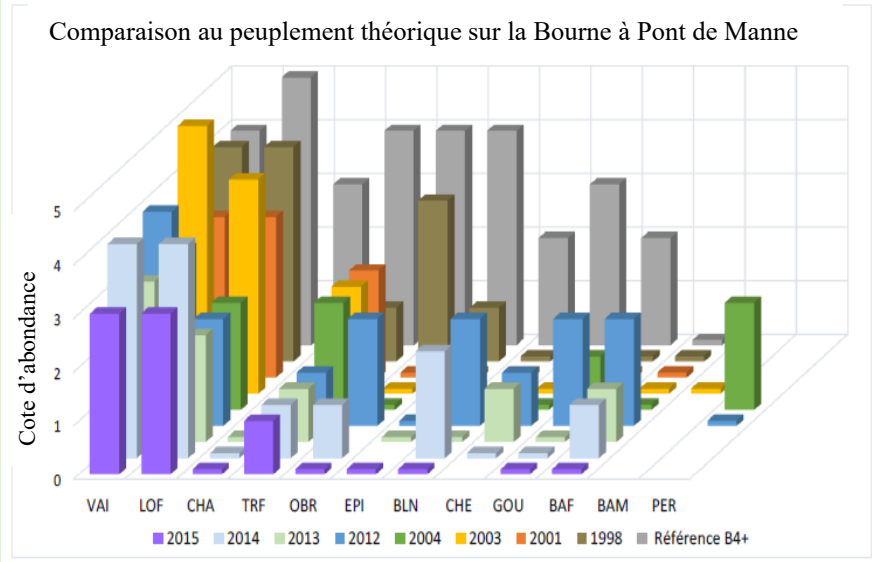


Figure 8 : Classes d'abondance des espèces piscicoles échantillonnées sur la Bourne de 1998 à 2015 (données OFB, FDAAPPMA 38 et 26, SAGE Environnement (2016)).

Espèces cibles présentes (croisement entre occurrence et exigences écologiques) : BAF (barbeau commun), BAM (barbeau méridional), BLN (blageon), CHA (chabot), TRF (truite fario), OBR (ombre commun)
Occurrence : BAF (100%), BAM (10%) ; BLN (100%), CHA (60%), TRF (100%), OBR (90%)
Espèces focales (croisement entre occurrence et niveau de vulnérabilité aux éclusées) : BLN, OBR, CHA

La phase d'émergence est très courte. Les alevins entrent très rapidement dans leur phase de post-émergence. Il nous semble donc pertinent de ne considérer que la phase de post-émergence dans la construction du calendrier biologique.

Pour les études des impacts des éclusées, nous préconisons de simplifier le calendrier biologique comme suit (La Figure 9 donne un exemple de calendrier biologique pour la truite) :

Phases du cycle biologique	**Caractéristiques de la phase**	**Type d'altérations morpho-écologiques pouvant affecter cette phase**
Reproduction	Ponte des œufs sur et dans le substrat	Mobilité des substrats Pertes d'habitabilité
Développement des œufs et des larves	Développement des œufs, éclosion des larves, développement des larves avec leur sac vitellin	Mobilité des substrats Exondation des frayères
Post-émergence	Emergence des larves et développement des alevins dans les habitats abrités du courant	Exondation des habitats (piégeage-échouage) Pertes d'habitabilité (dérive forcée) Variabilité de l'habitabilité
Croissance	Développement des alevins nageants, des juvéniles et des adultes	Exondation des habitats (piégeage-échouage) Pertes d'habitabilité Variabilité de l'habitabilité

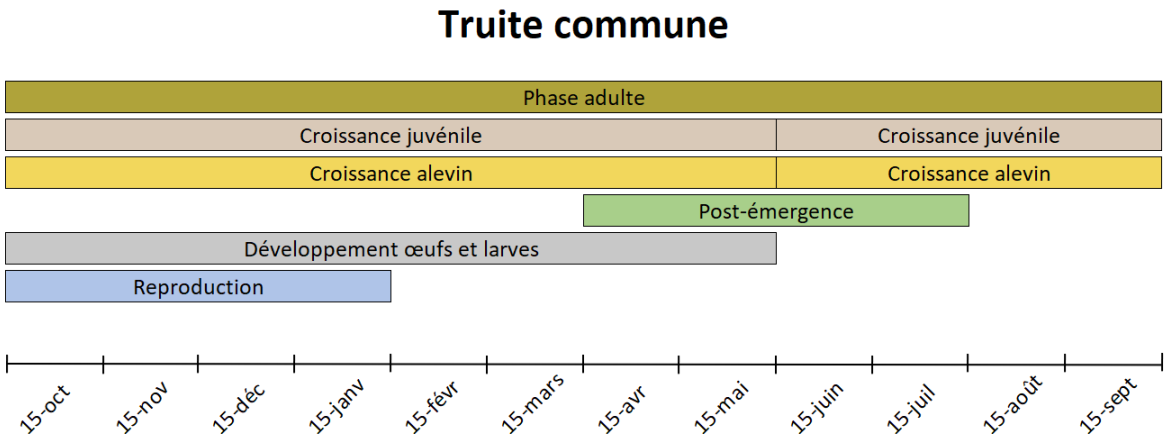


Figure 9 : Exemple de découpage simplifié des phases du cycle biologique de la truite

Un calendrier plus précis et plus adapté localement pour les différentes espèces peut être constitué en s'appuyant sur :

- Les connaissances locales et notamment les observations en matière d'activité de reproduction ;
- Le régime de température. Grâce aux températures moyennes journalières ou aux moyennes mensuelles, il est possible de calculer les dates d'émergence des alevins si l'on connaît les degrés jours nécessaires au développement des œufs et des alevins des espèces cibles.

Le choix des espèces cibles ou focales doit également permettre d'identifier les habitats spécifiques aux différentes phases du cycle biologique, habitats qui serviront de proxy dans le diagnostic des altérations morphoécologiques (cf. encadré ci-après).

EXEMPLE : DEFINITION DES CARACTÉRISTIQUES DES HABITATS

Rivière : Bourne - **Secteur** : Aval Pont en Royans

Espèces sélectionnées	Habitat de reproduction	Habitat alevins post-émergentes	Habitats des alevins	Habitats des adultes
Truite commune	Plage de graviers et petits galets (0,2-7 cm) – 10-70 cm/ 10-50 cm/s	Zones de berges (Vit <10-15 cm/s)	Radier-plat courant	Profond, plat courant, chenaux lotiques avec abris
Blageon	Plage de graviers (0.2-3 cm) – 10-35 cm/s	Zones peu profondes à courant très faible (<15 cm/s)	Plat courant/radier	Plat courant, chenaux lotiques, chenaux lentiques
Barbeau commun	Plage de graviers et petits galets (0,2-7 cm) - 20-40 cm/20-60 cm/s	Zones très proches des berges puis bancs galets (<15 cm/s)	Radier/plat courant	Chenaux lotiques, plat courant
Chabot	Radier à galets et petits blocs	Radier à galet	Rapide/radier/plat courant	Rapide/radier/plat courant

Une fois l'identification des espèces réalisée, leur calendrier biologique ainsi que leur habitat cible définis, il est indispensable de réaliser une nouvelle sélection (sous-sélection) qui permet de limiter le nombre d'espèces sur lesquelles fonder l'analyse des altérations morphoécologiques.

Cette sous-sélection s'appuie sur le croisement :

- Des calendriers biologiques ;
- Des caractéristiques des habitats cibles ;
- Du niveau de connaissances sur les différentes espèces, par exemple sur les habitats de reproduction ou de développement des alevins.

La qualification de l'état piscicole du tronçon peut constituer une approche complémentaire à celle proposée, reposant sur la sous-sélection d'espèces cibles ou focales. Toutefois, il est actuellement difficile de proposer une méthode standardisée permettant de quantifier les impacts des éclusées via l'état piscicole en raison du poids potentiellement important d'autres facteurs dans cet état. Mais il est tout à fait pertinent de réaliser l'état piscicole initial et d'analyser les évolutions après la mise en œuvre de mesures pour évaluer les gains associés, tout en prenant soin de quantifier également les variations des caractéristiques environnementales hors éclusées.

L'analyse d'un état piscicole peut être abordé par **trois approches** distinctes mais complémentaires (Tableau 9) :

- L'approche ponctuelle et par comparaison à un référentiel ;
- L'approche pluriannuelle, avec analyse de la dynamique de la population ;
- L'approche pluriannuelle, avec analyse de la dynamique du recrutement.

Pour ces trois approches , il peut être intéressant de compléter la caractérisation par une comparaison à une ou des stations de « référence » non soumises aux perturbations hydrologiques liées aux éclusées. Toutefois, cette configuration est très rare sur le réseau hydrographique du bassin. Les stations non influencées se situent souvent très en amont du tronçon d'étude, dans des contextes géomorphologiques et biotypologiques très différents.

Pour les approches pluriannuelles, il peut être intéressant de disposer d'une station témoin qui permet de quantifier l'effet de la variabilité saisonnière des débits sur le peuplement en dehors de l'influence des éclusées.

Tableau 9 : Principes, avantages et inconvénients des trois approches possibles pour l'analyse de l'état piscicole.

Types d'approche	Bases du diagnostic	Avantages	Inconvénients
Approche ponctuelle et comparaison à un référentiel	Données quantitatives ou semi quantitatives acquises une année donnée sur des stations représentatives de la diversité morphologique. **Principe** : qualifier l'état piscicole en comparant les abondances observées des espèces par rapport à des abondances théoriques évaluées selon les caractéristiques mésologiques de la station	Permet de quantifier les déficits d'abondances.	Vision ponctuelle sur une année donnée. Nécessité de replacer le contexte hydrologique de l'année d'étude par rapport au régime global des débits. Forte influence des références utilisées pouvant introduire un biais dans la qualification des déficits d'abondance. Difficulté à diagnostiquer l'origine des déficits observés en termes de fonctionnement des populations.
Approche pluriannuelle, dynamique de la population	Données quantitatives ou semi-quantitatives acquises sur plusieurs années sur une ou plusieurs stations **Principe** : qualifier l'état piscicole en évaluant les variations des abondances des différentes classes d'âge des espèces de poissons	Quantifier le fonctionnement des populations (relations entre les classes d'âge) pour identifier les « goulets » d'étranglement dans la dynamique des populations. Quantifier les déficits d'abondances par comparaison aux référentiels.	Difficile de conduire des suivis sur plusieurs stations représentatives. En général, les suivis se concentrent sur 1 ou 2 sites avec des limites de représentativité de la diversité morphologique. Forte influence des valeurs de références utilisées
Approche pluriannuelle, dynamique du recrutement	Données quantitatives ou semi-quantitatives sur les jeunes stades (alevins) acquises sur plusieurs années sur une ou plusieurs stations **Principe** : qualifier le recrutement piscicole (variations des abondances des alevins)	Quantifier précisément le recrutement en alevins avec la possibilité d'échantillonner plusieurs stations représentatives de la diversité morphologique et biologique.	Vision ciblée sur une phase du cycle biologique ne permettant pas d'identifier des problèmes de fonctionnalité au-delà de la production d'alevins.

Dans le cas des éclusées, la majorité des impacts identifiés dans la bibliographie portent sur le recrutement piscicole (abondance d'individus d'une espèce atteignant une classe d'âge). Il peut donc être pertinent de circonscrire l'évaluation de la situation piscicole à cette phase biologique et donc de privilégier l'approche pluriannuelle de la dynamique de recrutement.

L'interprétation de l'état piscicole fait appel à une analyse multifactorielle afin d'identifier le poids des différents facteurs naturels et anthropiques. Il n'est pas question ici de détailler l'ensemble des outils d'analyse. Seuls sont présentés ici des éléments spécifiques au cas des éclusées (Tableau 10).

Tableau 10 : Eléments d'interprétation des niveaux d'abondance et de variabilité du recrutement d'une espèce de poissons

ÉLÉMENTS POUR L'INTERPRETATIONS DES DONNEES D'ETAT PISCICOLE

Pour une espèce donnée, les deux métriques suivantes peuvent être utilisées :

- Variabilité d'abondances en alevins (coefficient de variation des abondances)
- Niveau d'abondance en alevins (individus/unité de surface ou d'échantillonnage)

Situation du recrutement	Interprétations
Faible abondance et peu de variabilité du recrutement	Présence d'un facteur limitant très stable dans le temps
Abondance moyenne et forte variabilité	Présence de facteurs limitants avec une variabilité interannuelle importante couplée à un ou des facteurs stables
Abondance et variabilité fortes	Présence quasi unique de facteurs limitants présentant une très forte variabilité interannuelle

L'analyse du recrutement peut être approfondie en extrayant de la variabilité interannuelle la part des variations naturelles (Qjmax, Q_{90}, Q_{10}). Si le recrutement en alevins suit la variabilité naturelle de l'hydrologie, il est probable que l'impact des éclusées soit limité. En revanche, si le recrutement reste faible dans des gammes de variations hydrologiques jugées favorables (faible intensité des crues), il est possible que cela traduise un effet des éclusées.

La mise en œuvre d'investigations visant à qualifier l'état piscicole peut apporter des éléments complémentaires aux diagnostics. Pour ce faire, la méthode de qualification des états doit être partagée entre les différents acteurs. L'état piscicole, en particulier le recrutement des alevins, est pertinent comme outil de suivi de l'efficacité des mesures d'atténuation. Le recours à l'état piscicole réclame, a minima, des chroniques sur plusieurs années afin de quantifier la variabilité interannuelle ainsi que la dynamique des populations.

VARIABILITE DES REFERENCES D'ABONDANCE DE TRUITES DANS LE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE

La définition de références d'abondance repose sur une analyse des distributions des densités numériques et pondérales des espèces piscicoles (notamment de la truite, voir par exemple le Tableau 11) permettant d'identifier des limites définissant des classes d'abondances (Degiorgi et Raymond, 2000). Cette approche permet de comparer le niveau d'abondance observé avec un niveau théorique en tenant compte des caractéristiques du site étudié. Ce niveau théorique varie donc en fonction des sites. Il est important que les acteurs du territoire s'accordent sur la référence utilisée.

Tableau 11 : Exemples de valeurs d'abondances de truites fréquemment utilisées comme références dans différents contextes géographiques

Type de référentiels	Limites de classes	
	Densité numérique très forte	Densité pondérale très forte
Département Haute-Savoie	>6000 ind./ha	>180 kg/ha
Département Jura-Doubs	>4500 ind./ha	>400 kg/ha
Départements Pyrénées	>5000 ind./ha	>200 kg/ha
Bassin Rhône-Méditerranée en entier	>3500 ind./ha	>150 kg/ha

ATTENTION : *ces valeurs ne sont pas des références absolues et doivent être révisées à l'aune du changement climatique et des dynamiques de prédation par les mammifères semi-aquatiques et les oiseaux piscivores.*

1.1.6. CONTINUITE ECOLOGIQUE

La connectivité du tronçon soumis aux éclusées hydroélectriques avec un tronçon amont (non soumis aux éclusées, mais souvent court-circuité) ou des affluents est essentielle. En effet, ces milieux peuvent constituer des réservoirs biologiques (zones de nurserie et de refuges). Leur connectivité et leur fonctionnalité sont à prendre en compte dans l'analyse des tronçons soumis aux éclusées.

Concernant les réservoirs biologiques, les informations sont disponibles sur le site de bassin[8].

Les linéaires de réservoirs biologiques identifiés peuvent être complétés par une expertise locale permettant d'ajouter des milieux non répertoriés (par exemple des adoux). D'autres données peuvent être disponibles dans des études ponctuelles et auprès des Fédérations départementales des associations agréées pour la pêche et la protection du milieu aquatique (FDAAPPMA).

[8] https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/preservation-et-restauration-des-milieuxcours-deau/reservoirs-biologiques

A large échelle, il est possible, pour chaque tronçon soumis aux éclusées, de calculer le linéaire (ou la surface) de réservoirs biologiques confluant dans le secteur ou immédiatement en amont. Ce linéaire peut être ramené au linéaire du tronçon comme présenté dans l'exemple ci-dessous, ou à sa surface en eau.

EXEMPLE DE QUANTIFICATION DES LINEAIRES ET DE SURFACES DE RESERVOIRS BIOLOGIQUES

Rivière	Secteur	Réservoir biologique (km/km de rivière principale)	Réservoir biologique (ha/km de rivière principale)
Isère	Aval Bathie/Randens	6,6	0,75
Romanche	Aval St-Guillerme II	6,1	1,25
Arc	Aval Villarodin	0,18	0,05
Drac	Aval Drac Inf.	0	0
Chassezac	Aval Salelles	3,7	0,84

Concernant la montaison, en complément de l'approche quantitative, une analyse de la connectivité intra- et inter-réservoirs peut être conduite en croisant les données du Registre des obstacles à l'écoulement (ROE) avec celles provenant des analyses de franchissabilité piscicole conduites via l'information sur la continuité écologique (ICE avec accès par identifiant et mot de passe).

Dans le cas des réservoirs biologiques pour lesquels la franchissabilité des obstacles à la montaison n'a pas été évaluée, le travail peut être conduit lors des phases de diagnostic.

Pour la dévalaison, actuellement, les données sur la franchissabilité des obstacles et plus particulièrement des ouvrages hydroélectriques ne sont pas disponibles dans l'information sur la continuité écologique. Seules des informations provenant d'études sur un axe complet ou sur un ouvrage, conduites dans le cadre de renouvellement d'autorisation ou de mise en conformité pour les classements L214-17, peuvent éventuellement être mobilisées.

1.2. QUANTIFICATION DES ALTERATIONS HYDROLOGIQUES LIEES AUX ECLUSEES

L'objectif de cette phase est de :

- Caractériser l'hydrologie de façon à identifier ce que serait le régime hydrologique naturel du cours d'eau sans l'aménagement hydroélectrique ;
- Quantifier les altérations hydrologiques liées aux éclusées ;
- Finaliser la sectorisation en tronçons qui serviront de base au choix de stations représentatives sur lesquelles seront menées les investigations.



Cette approche hydrologique est détaillée en **annexe 3.**

A l'issue de cette analyse des altérations hydrologiques, une synthèse est réalisée présentant :

- La note de l'indicateur de niveau de perturbation hydrologique (INPH) par phases de cycle biologique des espèces cibles (ou focales) retenues, ce qui permet de visualiser les périodes potentiellement les plus affectées par les altérations de l'hydrologie (cf. encadré ci-après) ;

EXEMPLE : APPLICATION DE L'INDICATEUR DE NIVEAU DE PERTURBATION HYDROLOGIQUE (INPH)

Tableau 12 : Exemple de synthèse des niveaux d'altération hydrologique pour les différentes phases du cycle biologique d'une espèce cible sur 5 années de données.

	Indicateur d'altération hydrologique (INPH)				
Phases cycle biologique	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5
Reproduction	3+	3+	3-	3+	2
Vie sous graviers	5	5	4+	5	4-
Émergence	4+	4+	3+	4+	4-
Croissance estivale	3+	2	2	2	3+

L'INPH permet de qualifier par année et par phase de cycle biologique un niveau de perturbation selon 5 classes sur la base de 4 variables (nombre d'éclusées, 1er décile des débits de base, dernier décile des amplitudes et des gradients), allant de très faible (1/5) à très sévère (5/5). Les classes 2, 3 et 4 ont été divisées en 2 sous-classes, « - » et « + ».

- La note de gravité de l'altération hydrologique résulte du croisement des trois grandeurs des régimes d'éclusées ci-après avec leur fréquence sur le tronçon de cours d'eau (cf. encadré ci-après) :
  - Le ratio du débit maximal/débit minimal ;
  - Le ratio des débits maximaux/module ;
  - Les gradients de hausse et de baisse en % du module.

Ces grandeurs sont utilisées pour quantifier les altérations morphoécologiques.

GRILLES D'EVALUATION DE LA GRAVITE DE L'ALTERATION HYDROLOGIQUE POUR LES TROIS GRANDEURS DES RÉGIMES D'ECLUSEES ETUDIEES

Tableaux 13, 14 et 15 : Classes de gravité pour les différents indicateurs spécifiques d'altération hydrologique.

	Ratio Qmax/Qbase				
Fréquence sur la période	<1	1 à 3	3 à 5	5 à 10	>10
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

	Qmax en % du module				
Fréquence sur la période	<1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	>4
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

	Gradient de hausse (en % du module/h)				
Fréquence sur la période	<15%	15-25%	25-50%	50-100%	>100%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					



En l'absence de données hydrologiques sur le secteur d'étude, les indicateurs d'altération hydrologique seront estimés grâce aux informations disponibles :

- Le débit maximal des éclusées correspondra au débit maximal turbiné par l'aménagement ;
- Le débit de base correspondra à la valeur des débits réservés à l'amont et à la reconstitution du débit d'étiage lié au bassin versant intermédiaire entre les prises d'eau et la restitution ;
- Les classes de nombre d'éclusées seront évaluées grâce aux informations du nombre d'éclusées annuelles fournies par l'exploitant.

1.3. CHOIX DES STATIONS D'ETUDE

Cette dernière phase de l'étape préalable a pour objectif d'identifier les sites sur lesquels seront conduites les investigations.

Celles-ci seront réalisées pour l'essentiel à l'échelle de stations représentatives de la morphologie et de l'hydrologie de ces tronçons. Les investigations biologiques de type « comptage des frayères exondées », pourront être réalisées de manière plus exhaustive, sur tout ou partie du linéaire concerné.

Les stations sont de dimensions « classiques » pour ce type d'étude, soit d'une longueur de 15 à 20 fois la largeur du cours d'eau à pleins bords (méthodes CARHYCE, EVHA, ESTIMHAB, etc.).

Pour les tronçons de faible linéaire (moins de 5 km) une station par TCG est un minimum.

Pour les tronçons d'un linéaire supérieur à 5 km, il peut être utile, afin d'améliorer la représentativité des observations, d'investiguer plus d'une station par TCG et au minimum une par TGF si le TCG a été découpé en TGF.

Si la restitution des débits turbinés se fait au milieu d'un TCG, il peut être intéressant d'investiguer la partie amont de la restitution à titre de « référence ».



Il pourra être décidé, au cas par cas par les parties prenantes, de choisir, en plus des stations représentatives de la morphologie et de l'hydrologie du cours d'eau, des stations « non représentatives » mais disposant de caractéristiques morphoécologiques ou biologiques particulières, essentielles à son fonctionnement (forte concentration en zones de fraie par exemple) de manière à apprécier les impacts sur les habitats et les peuplements.

2. ETAPE 1 : DIAGNOSTIC DES ALTERATIONS LIEES AUX ECLUSEES

2.1. DEMARCHE DE DIAGNOSTIC DES ALTERATIONS MORPHOECOLOGIQUES

Le diagnostic des altérations liées aux éclusées s'intègre dans une chaîne de causalité (voir Figure 10) qui traite successivement des altérations hydrologiques, hydrauliques, morphoécologiques et en parallèle des altérations physico-chimiques. Ces altérations se traduisent en impacts biologiques ou écologiques directs et indirects, qui doivent être contextualisés en intégrant les caractéristiques naturelles et l'ensemble des pressions anthropiques exercées.

Les altérations hydrauliques vont se traduire par :

- Des conditions de vitesses d'écoulement, de hauteur d'eau et de surface mouillée spécifiques aux débits caractéristiques des éclusées (débit de base et débit maximal) ;
- Des variations des conditions hydrauliques entre les débits caractéristiques des éclusées.

Ces altérations vont induire des altérations morphoécologiques, c'est-à-dire des inondations et des exondations du lit mineur, des dégradations des conditions d'habitat à faible et fort débit, des variations non naturelles des habitats sur de courts laps de temps et des difficultés de franchissement d'obstacles.

Ces altérations morphoécologiques vont elles-mêmes générer des impacts biologiques directs (cf. Tome I) :

- Du stress physiologique pouvant induire des réductions de croissance, des diminutions de fécondité et une sensibilité accrue aux maladies ;
- Des modifications d'activité de reproduction, de nutrition ou de repos ;
- Des dérives forcées de larves d'invertébrés ou de poissons ;
- Des arrêts de migration ou des déplacements plus fréquents et de plus grandes amplitudes ;
- Des mortalités d'œufs, d'alevins, de juvéniles et d'adultes de poissons ainsi que des mortalités d'invertébrés.

Ces impacts biologiques directs pourront affecter le fonctionnement des communautés biologiques et plus largement la dynamique des populations (impacts biologiques indirects) (Figure 10).

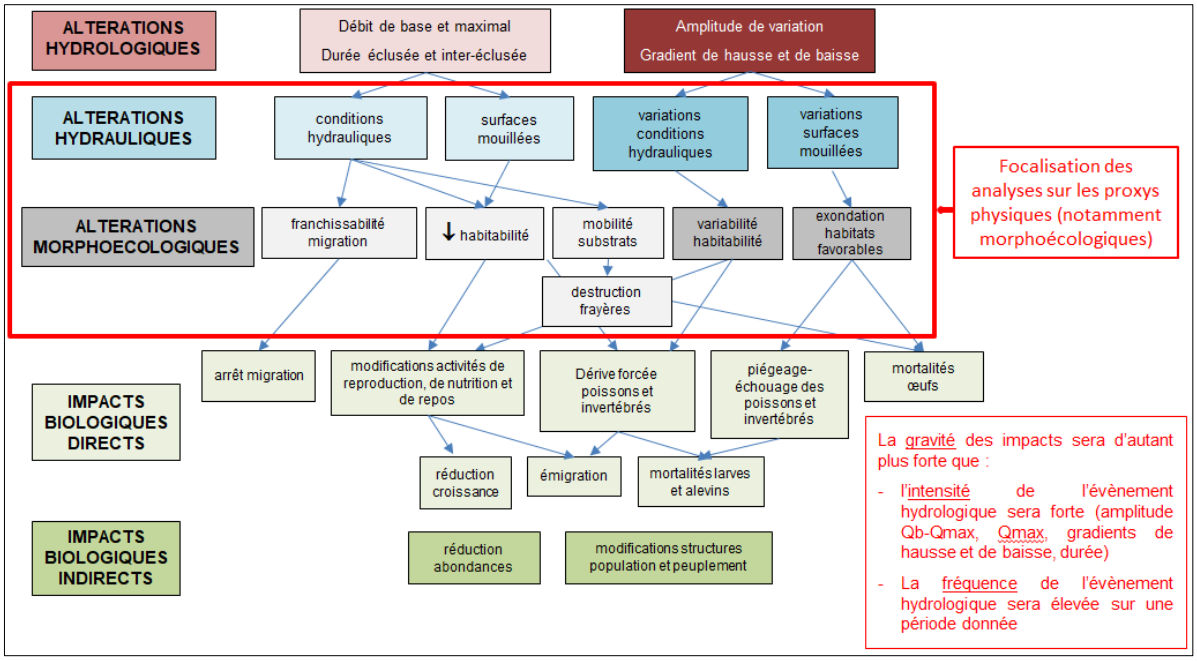


Figure 10 : Détail de la chaîne des altérations/impacts sur le compartiment physique (les altérations de la physico-chimie sont traitées indépendamment).

La démarche proposée s'intéresse principalement aux incidences des éclusées sur les conditions d'habitat des poissons et des invertébrés, c'est-à-dire aux altérations morphoécologiques qui constituent des proxys des impacts biologiques.

Les altérations morphoécologiques peuvent être scindés en deux grands types (Figure 11) :

- Les altérations induites par les conditions hydrauliques et les surfaces mouillées aux débits caractéristiques des éclusées (débit de base et débit maximal) provoquant des dégradations des conditions de vie (mobilité substrat, habitabilité, franchissabilité) ;
- Les altérations induites par les variations de ces conditions hydrauliques provoquant des exondations d'habitat ou par des variations de conditions hydrauliques générant de la variabilité de l'habitabilité.



La gravité des altérations morphoécologiques, et par conséquent des impacts biologiques associés aux éclusées, va dépendre de :

- L'intensité de l'événement hydrologique d'éclusée : débit maximal, amplitude entre le débit de base et ce débit de pointe, vitesse de passage de l'un à l'autre (gradient), ratio de l'un à l'autre, durée de l'éclusée, et surtout l'intensité de ses effets sur l'altération des paramètres morphoécologiques (habitats) ;
- La fréquence de cet événement au cours d'une période donnée.

Leur poids vis-à-vis de l'impact biologique varie en fonction du type de communautés biologiques et de la phase des cycles de vie. Par exemple, pour le piégeage-échouage, la gravité de l'impact dépend des surfaces d'habitat inondées puis exondées à chaque éclusée et du nombre de fois où l' événement se déroule sur une période donnée. Pour l'exondation des frayères, l'impact dépend davantage de l'intensité que du nombre d'événements : au moment de la vie larvaire sous-graviers, une seule exondation pourra provoquer une mortalité totale des alevins.

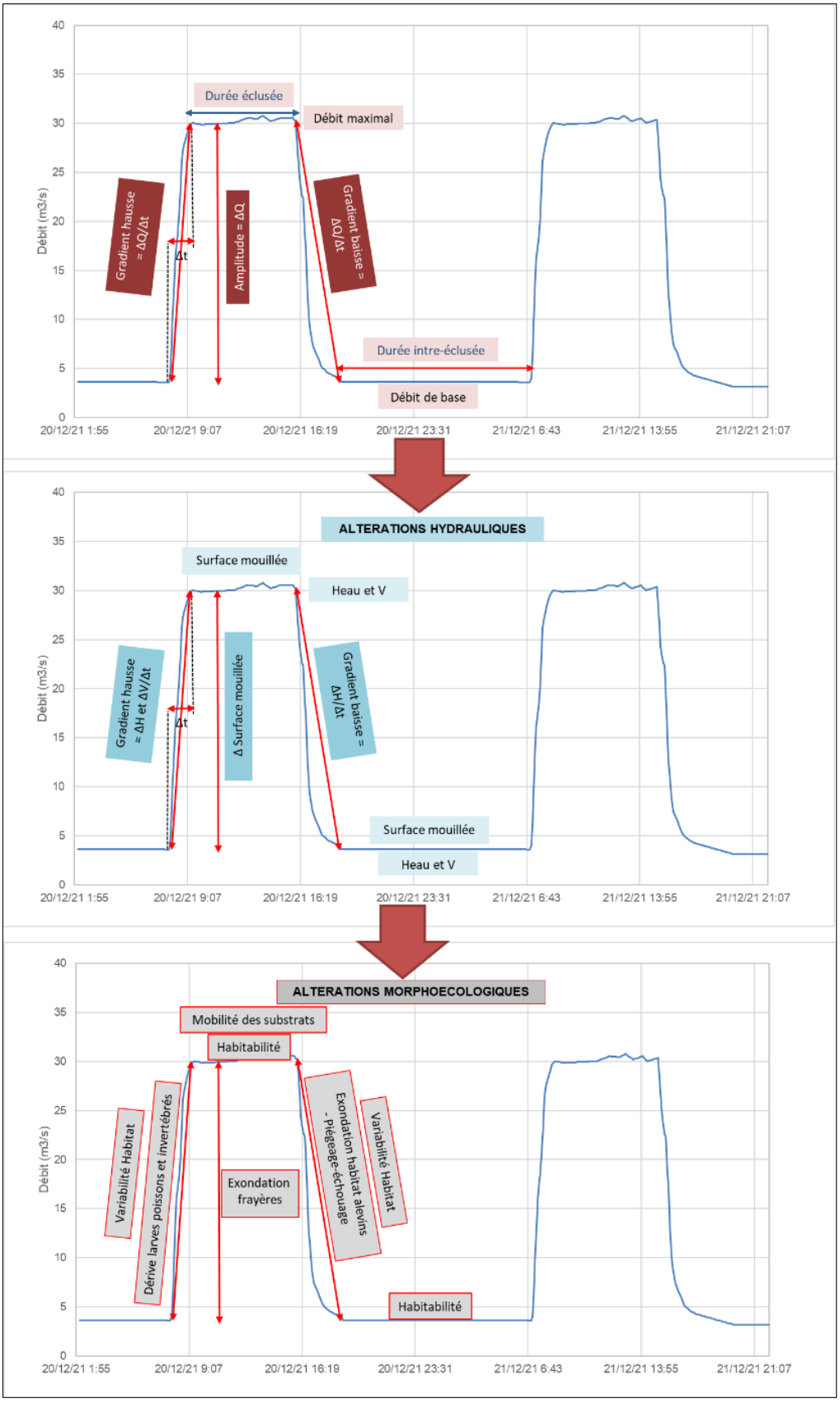


Figure 11 : Détail des altérations sur un hydrogramme d'éclusée « type ».

RAPPEL : il a été fait le choix, tant pour la phase de diagnostic que pour l'identification de mesures d'atténuation, de travailler principalement sur les altérations morphoécologiques, considérés comme des proxys des impacts biologiques, directs et indirects. En complément, certains descripteurs biologiques (exondations de frayères effectives par exemple) et leurs indicateurs associés, pourront être utilement relevés.

La quantification des altérations morphoécologiques et de leur gravité s'appuie sur une démarche en plusieurs étapes (cf. encadré ci-contre) :

1. Identification et caractérisation de chaque éclusée (Qbase, Qmax, Gradients) par période du cycle biologique de chaque espèce cible ;
2. Quantification des descripteurs morphoécologiques et détermination de leur évolution en fonction des débits ;
3. Extraction des caractéristiques des descripteurs servant à construire les indicateurs (voir 2.2) ;
4. Positionnement de chaque éclusée dans un graphe d'intensité d'altération pour chaque indicateur (voir 2.4) ;
5. Détermination de la gravité de chacune des altérations de l'ensemble des éclusées, pour chaque indicateur utilisé, dans une grille croisant l'intensité avec la fréquence des événements ;
6. Synthèse par station pour chaque indicateur de chaque altération.

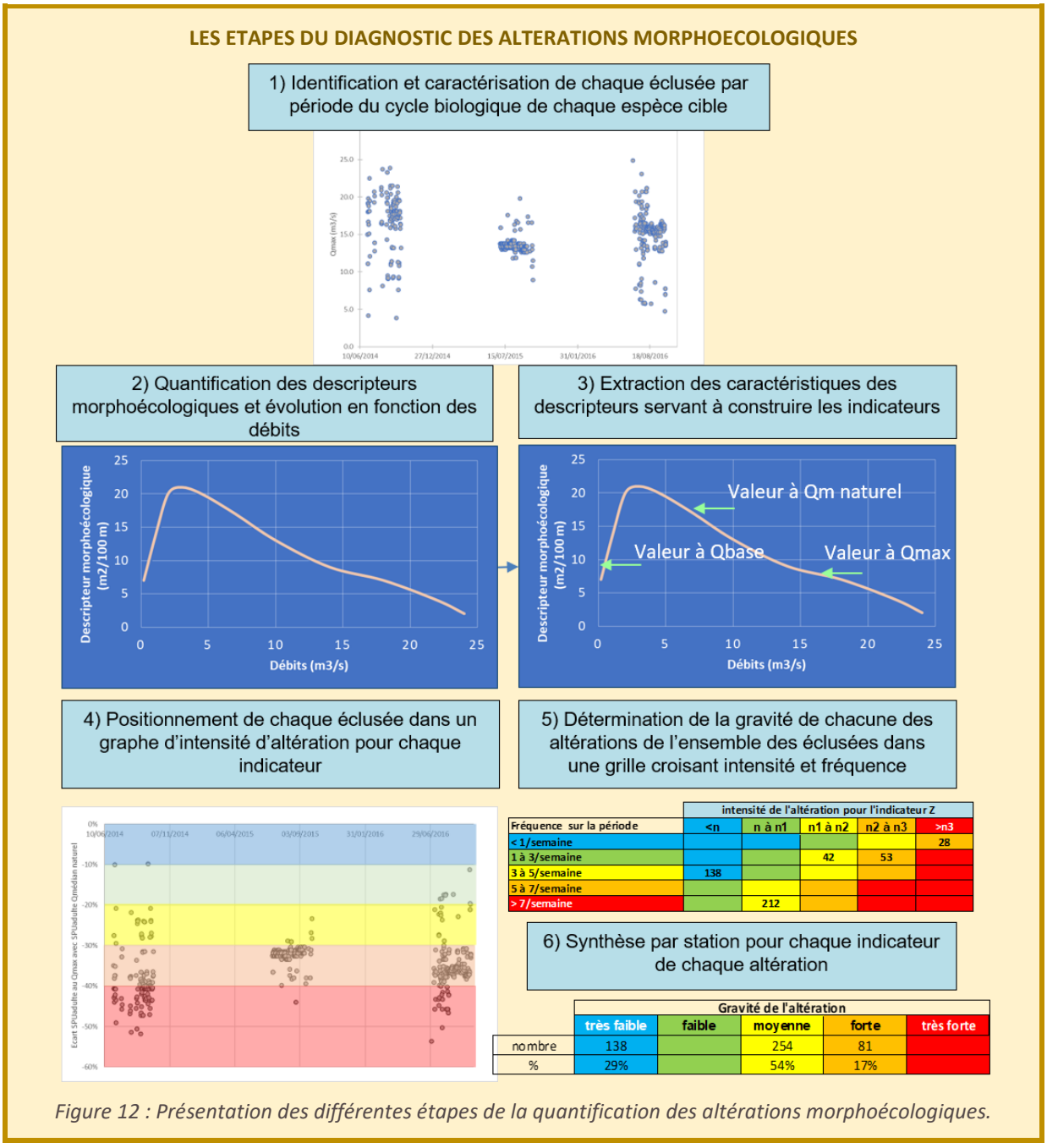


Figure 12 : Présentation des différentes étapes de la quantification des altérations morphoécologiques.

Une fois l'ensemble des indicateurs traités et l'ensemble des altérations évaluées en termes de gravité, celles-ci sont analysées et interprétées au regard des autres pressions pouvant s'exercer sur les tronçons concernés.

2.2. QUANTIFICATION DES DESCRIPTEURS DES ALTERATIONS MORPHOECOLOGIQUES

Cinq grands types d'altérations liées aux éclusées hydroélectriques sont identifiés, eux-mêmes subdivisés en sous-types **(**Tableau 16**).**

Pour chacun de ces sous-types sont proposés des descripteurs, traduits ensuite en indicateurs, pour évaluer la gravité des altérations.

Tableau 16 : Types et sous-types d'altérations morphoécologiques et leurs descripteurs.

Type	Sous-type	Phase	Descripteurs
Mobilité des substrats	Mobilité du substrats De reproduction	Reproduction et vie sous graviers	Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF)
	Mobilité des autres substrats	Habitat en général (poisson + macrofaune benthique)	Zones alluviales du lit mineur
Habitabilité	Habitabilité pour la reproduction des espèces cibles	Reproduction	Surface d'Habitat Favorable à la Reproduction (SFR)
	Habitabilité pour les alevins des espèces cibles	Emergence et post émergence	Surface d'Habitat Favorable aux alevins des espèces cibles (SPUlal.)
	Habitabilité pour les adultes des espèces cibles	Croissance	Surface d'Habitat Favorable aux adultes des espèces cibles (SPUad.)
Variabilité habitabilité	Variabilité de l'habitabilité pour les alevins	Emergence et post émergence	Ratio de débit Gradient Ratio Valeurs Habitat
	Variabilité de l'habitabilité pour les adultes	Croissance	Ratio de débit Gradient Ratio Valeurs Habitat
Exondation habitat favorable	Exondations des frayères de poissons lithophiles	Vie sous gravier	SGF hors en eau
	Exondation des habitats des larves	Emergence et post émergence	Surfaces mouillées Surfaces piégeantes Gradient
Franchissabilité piscicole obstacle	Franchissabilité piscicole Obstacle à la montaison	Migration	Conditions hydrauliques sur l'obstacle

2.2.1. MOBILITE DES SUBSTRATS



Même si elle est évoquée par de nombreux auteurs comme une altération morphoécologique majeure, la mobilité des substrats alluviaux du lit mineur au cours des cycles d'éclusée ne fait pas encore l'objet de méthode de mesure standardisée et encore moins de grilles d'évaluation de sa gravité vis-à-vis du fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux.

Néanmoins, l'importance de cette altération conduit à proposer dans ce guide quelques éléments d'appréciation. Ils pourront être revus au cours du temps, en fonction de l'amélioration des connaissances.

Dans le cadre de l'évaluation des altérations liées aux éclusées, il est préconisé de travailler prioritairement sur la mobilité des substrats des zones de frayères des poissons lithophiles, habitats parmi les plus fragiles (Tableau 17).

Tableau 17 : Granulométries des zones de frayères des principales espèces lithophiles du bassin Rhône Méditerranée.

Espèces	Diamètres médians du substrat des frayères	Espèces	Diamètres médians du substrat des frayères
Truite commune	[2-5 cm]	Spirlin	[1-5 cm]
Ombre commun	[1-3 cm]	Blageon	[1-3 cm]
Hotu	[7-15 cm]	Vandoise	[5-10 cm]
Toxostome	[5-10 cm]	Chabot	[15-25 cm]
Barbeau commun	[1-5 cm]	Apron du Rhône	[1-5 cm]
Barbeau méridional	[1-5 cm]	Lamproie de planer	[0.5-3 cm]

Sera aussi pris en compte de manière secondaire, le substrat alluvial dominant, habitat majeur d'une grande partie des biocénoses aquatiques.

Il est proposé d'évaluer l'altération de la mobilité des substrats au moyen de deux descripteurs des substrats alluviaux :

- La mobilité des Surfaces granulométriquement favorables à la reproduction (SGF) ;
- La mobilité des zones alluviales du lit mineur.

Deux types de méthodes permettent de quantifier la mobilité des substrats alluviaux :

- Des mesures directes sur le terrain : suivi du déplacement de particules marquées (pit tags, chaîne d'érosion, placettes peintes), suivi de l'évolution de la topographie de zones de frayères, suivi des impacts des particules sur un géophone positionné dans la rivière ;
- Une modélisation hydraulique (cf. encadré ci-dessous) permettant le calcul de la mobilité théorique des particules en croisant leur granulométrie et les forces tractrices qui s'exercent en phase d'éclusée (critère adimensionnel de Shields[9] notamment).

EXEMPLE : MODELISATION DE LA MOBILITE DES SUBSTRATS DE ZONES DE FRAYERES DE TRUITES

Sur la Garonne à l'aval du barrage du Plan d'Arem, pour un débit de 75 m³/s (à droite sur la Figure 13), le diamètre des particules mobilisées du substrat peut atteindre, dans certaines zones du tronçon, plus de 10 cm.

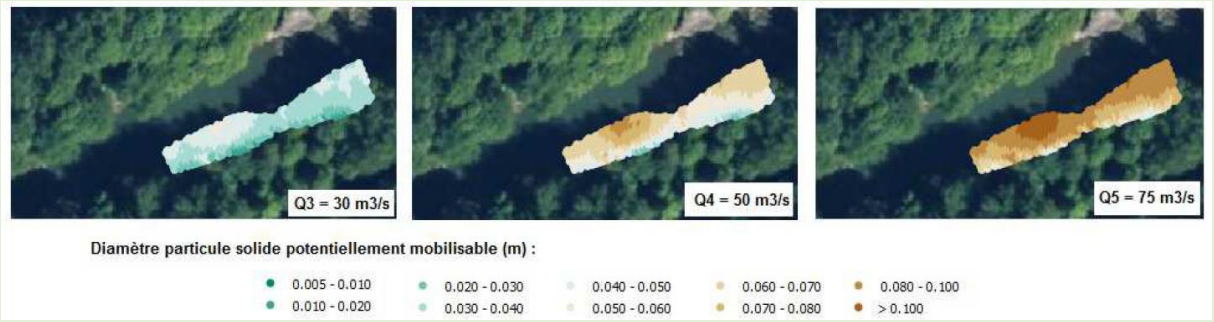


Figure 13 : Exemple d'application d'une modélisation hydraulique caractérisant les diamètres des substrats mobilisables sur une frayère de truite à différents débits sur la base du critère de Shield (ECOGEA, 2017).

[9] Le critère de Shields représente le rapport entre les forces déstabilisantes exercées par l'écoulement (la contrainte de cisaillement au fond) et les forces stabilisantes liées au poids des matériaux dans l'eau.

2.2.2. HABITABILITE

Habitats pour la croissance des alevins et des adultes

L'habitabilité recouvre la disponibilité en zones favorables à différentes activités biologiques d'une espèce donnée et d'un stade de développement donné. Deux descripteurs morphoécologiques décrivant les habitats de croissance des alevins et des adultes peuvent être utilisés :

- Les valeurs d'habitat (VHA)[10] provenant de la méthode des microhabitats ;
- Les surfaces pondérées utiles (SPU) provenant de la même méthode.

Il est proposé d'utiliser la méthode des microhabitats, la plus couramment utilisée, pour quantifier ces descripteurs de l'habitabilité pour les alevins et les adultes. Les principes et les détails de mise en œuvre de cette méthode ont été largement décrits (Sabaton et Miquel, 1993, Sabaton et al., 1995 ; Pouilly et al., 1995). L'outil actuel permettant la mise en œuvre de cette méthode est la plateforme HABBY, développée par l'INRAE[11].

METHODE DE QUANTIFICATION DE L'HABITABILITE

La méthode des microhabitats consiste à croiser des caractéristiques physiques de l'habitat aquatique (généralement la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la granulométrie en place), modélisées pour la gamme de débits étudiée (de Qbase à Qmax dans le cas des éclusées), avec les préférences des différentes espèces/stades de poissons vis-à-vis de ces caractéristiques (Figure 14). La plateforme HABBY développée par INRAE permet de réaliser ces modélisations.

L'utilisation de modèles hydrauliques bi-dimensionnels (modèles 2D) est aujourd'hui préconisée pour améliorer la qualité des modélisations.

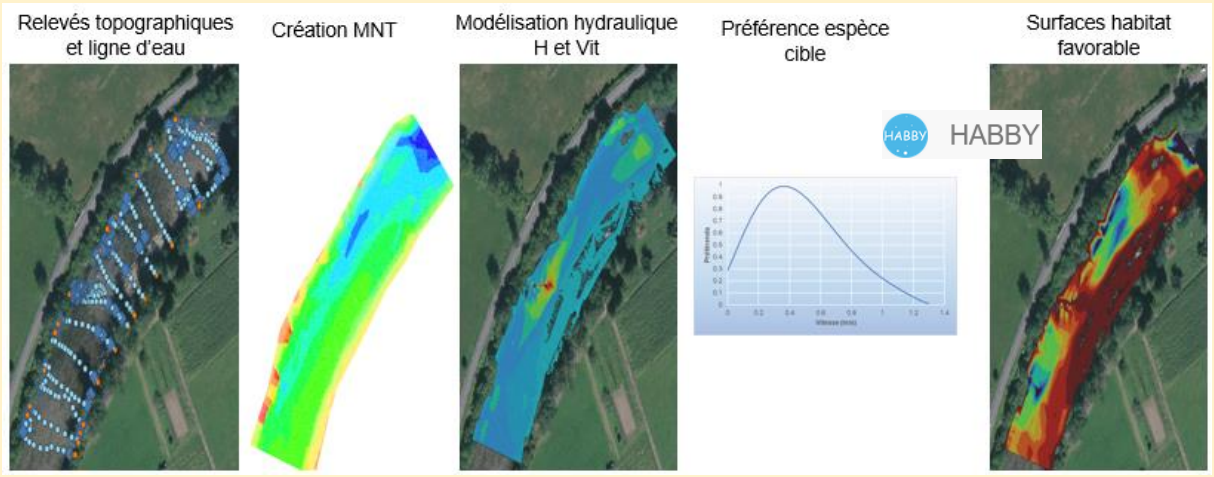


Figure 14 : les étapes de modélisation des descripteurs de l'habitabilité du milieu

Notons que les modèles sont plus précis si l'on dispose d'un MNT (Modèle numérique de terrain) provenant d'un Lidar ou de semis de points de densité suffisante, plutôt que de mesures sur transects. Rappelons l'importance de décrire *in situ* les abris hydrauliques qui jouent un rôle important dans l'atténuation de l'impact des éclusées.

[10] SPU : surface pondérée utile, soit la surface potentiellement utilisable pour un stade biologique considéré et VHA : Valeur d'Habitat, soit le rapport entre la SPU et la surface mouillée totale, grandeur adimensionnelle qui exprime la qualité du milieu pour un stade biologique donné.

[11] https://habby.wiki.inrae.fr

PRISE EN COMPTE DE PHASES SPECIFIQUES D'ACTIVITÉ D'UNE ESPECE DANS LA QUANTIFICATION DE L'HABITABILITE

Dans les quantifications de surfaces d'habitat favorable par la méthode des microhabitats, les courbes de préférence utilisées regroupent généralement les différentes activités du poisson que sont la nutrition et le repos (courbes dîtes généralistes). Or, pour chacune de ces phases, les habitats utilisés sont souvent différents. Les deux types d'habitat sont bien décrits chez la truite commune, moins bien chez d'autres espèces. L'habitat de nutrition se caractérise par des conditions de vitesse assurant l'apport en nourriture par la dérive et une limitation de la dépense d'énergie. L'habitat de repos se caractérise par des zones plus profondes à faible vitesse.

Pour les habitats de nutrition, il est possible d'utiliser un descripteur de type VHA ou SPU en utilisant des courbes de préférence établies spécifiquement pour la nutrition (Shirvell et Dungey, 1983 ; Raleigh et al., 1984 ; Roussel et al., 1999 ; Vismara et al., 2001 ; Hayes et Jowett, 1994).

Pour les habitats de repos, il est possible d'utiliser comme descripteur les surfaces occupées par les faciès profond à faible vitesse d'écoulement (<50 cm/s en surface).

Le choix entre quantification d'un habitat généraliste (courbes de préférence) ou d'un habitat spécifique (nutrition ou repos) dépendra du contexte local. Même si actuellement, seules des courbes généralistes sont disponibles dans la plate-forme HABBY, il est tout à fait possible d'intégrer des courbes de préférence par type d'activité dès l'instant où celles-ci sont issues de la littérature scientifique et que leur utilisation a été validée par les expert(e)s du territoire.

Habitats pour la reproduction des espèces

Les frayères potentielles disponibles au moment de la reproduction peuvent être caractérisées par les Surfaces granulométriquement favorable (SGF) qui correspondent à des surfaces de granulométrie homogène compatibles avec les préférences des espèces lithophiles. Les Surfaces favorables à la reproduction (SFR) correspondent aux SGF couplées avec les préférences hydrauliques (hauteur d'eau et vitesse) des espèces pour la reproduction (Figure 15).

METHODE DE QUANTIFICATION DE L'HABITABILITE POUR LA REPRODUCTION

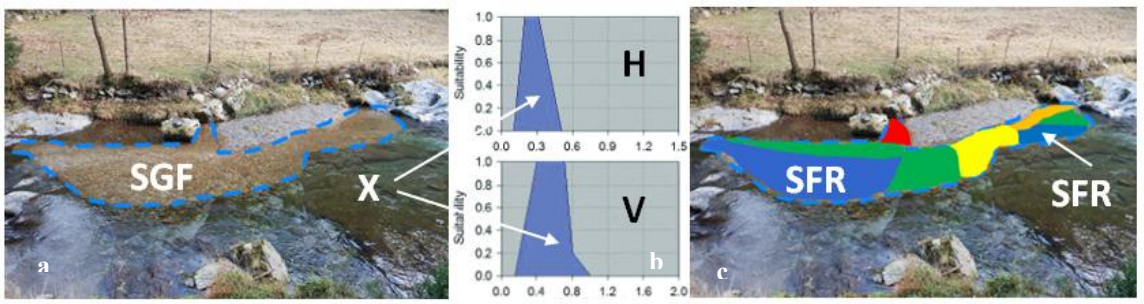


Figure 15 : Une SGF (a) croisée avec des préférences d'habitats (hauteurs d'eau (H) et vitesses d'écoulement (V)) pour une espèce de poisson donne (b) une SFR (en bleu sur la photographie de droite) (c). La SFR est évaluée pour chaque valeur de débit et notamment pour les débits maximaux et minimaux des éclusées.

Pour évaluer l'habitabilité du tronçon pour la reproduction des espèces (SGF ou SFR), il est important de tenir compte de la durée de disponibilité en habitat, c'est-à-dire de la durée de conditions hydrauliques stables.

Les durées minimales nécessaires à l'acte de reproduction (creusement de la frayère et ponte) dépendent des espèces. Peu de données sont disponibles à date. Spoon (1985) a observé des durées de construction de nids et de pontes allant de 5-6 heures à plus de 96 heures chez la truite ; seulement 22 % des nids ont été construits en moins de 24 h et 50 % en moins de 48 h. Chez les salmonidés, la ponte peut être très fractionnée ce qui peut conduire à des durées totales de plusieurs jours. En moyenne, la 1ère ponte a lieu entre 4 et 7 heures après le début de construction du nid (Cavaller, 2005). Le Tableau 18 présente, pour quelques espèces lithophiles, les comportements de ponte, le type de substrats mobilisés et les dimensions minimales nécessaires pour la reproduction.

Tableau 18 : Principales caractéristiques des zones favorables à la reproduction des espèces lithophiles.

Espèces	Comportement ponte	Type de substrats	Dimensions minimales
Truite commune < 20 cm	Creusement nids et enfouissement œufs	Petit galet- gravier	0,15 m²
Truite commune 20-30 cm		Petit galet- gravier	1 m²
Truite commune >30 cm		Petit galet- gros galet	1,5 m²
Ombre commun	Creusement nids et dépôt œufs	Gravier	0,5 m²
Hotu	Dépôt œufs – adhérence substrat	Galet	0,5 m²
Toxostome	Creusement nids et dépôt œufs	Gravier-petit galet	0,25 m²
Barbeau commun	Creusement nids et dépôt œufs -	Gravier-petit galet	0,5 m²
Barbeau méridional	Creusement nids et dépôt œufs	Gravier-petit galet	0,15 m²
Spirlin	Dépôt œufs – adhérence substrat	Gravier-petit galet	0,15 m²
Blageon	Dépôt œufs – adhérence substrat	Gravier	0,15 m²
Vandoise	Dépôt œufs – adhérence substrat	Gravier-Galet	1 m²
Chabot	Dépôt œufs – adhérence substrat	Galets – petits blocs	Non connue
Apron du Rhône	Dépôt œufs – adhérence substrat	Gravier	Non connue
Lamproie de planer	Creusement nids et dépôt œufs	Gravier	0,5 m²

Les méthodes de quantification des SGF et SFR sont bien définies pour les salmonidés, en particulier pour la truite. En revanche, elles restent à construire pour les cyprinidés et leuciscidés lithophiles.



La faiblesse des surfaces de granulométrie favorables à la reproduction (SGF) est souvent liée à des causes indépendantes des éclusées : présence de barrages en amont qui piègent la charge grossière ou anciennes extractions de matériaux en lit mineur, par exemple. Cependant, si ces SGF sont peu présentes dans les tronçons influencés par les éclusées, il est d'autant plus important de veiller à ce que celles-ci soient fonctionnelles, c'est-à-dire :

- Qu'elles ne soient pas exondées lorsqu'elles sont utilisées comme frayères effectives (altération : exondation de frayère) ;
- Qu'elles ne soient pas mobilisées par les débits d'éclusées (altération : mobilité du substrat alluvial).

2.2.3. VARIABILITE DE L'HABITABILITE

A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature scientifique et technique de descripteurs permettant de quantifier la variabilité temporelle infra-journalière des habitats et les relations entre les phases instationnaires de l'éclusée (phase de hausse ou de baisse entre deux phases stationnaires de débit de base et de plateau d'éclusée) et les communautés biologiques.

Les descripteurs utilisables sont :

- **Des descripteurs de l'hydrologie** : gradients de hausse des vitesses et des hauteurs d'eau, gradients de baisse des hauteurs d'eau, amplitudes, ratio débit maximal/minimal. Ces descripteurs sont calculés dans l'outil indicateur éclusée (INPH) pour chaque variation non naturelle ;
- **Des descripteurs de l'habitat** au travers de ratio entre les surfaces favorables (SPU) au débit de base de l'éclusée et au débit maximal. Les surfaces favorables proviennent des calculs réalisés pour la quantification de l'habitabilité.

2.2.4. EXONDATION DES HABITATS FAVORABLES

Deux descripteurs sont proposés pour **l'exondation des frayères de poissons lithophiles** :

- Le descripteur proposé pour l'exondation des habitats favorables est **la Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF)**. En effet, la quantification de la SFR exondée en fonction des débits, bien que plus précise que la SGF car intégrant les conditions hydrauliques, réclame une spatialisation fine et une modélisation hydraulique. La SGF est un descripteur plus général (Figure 16).

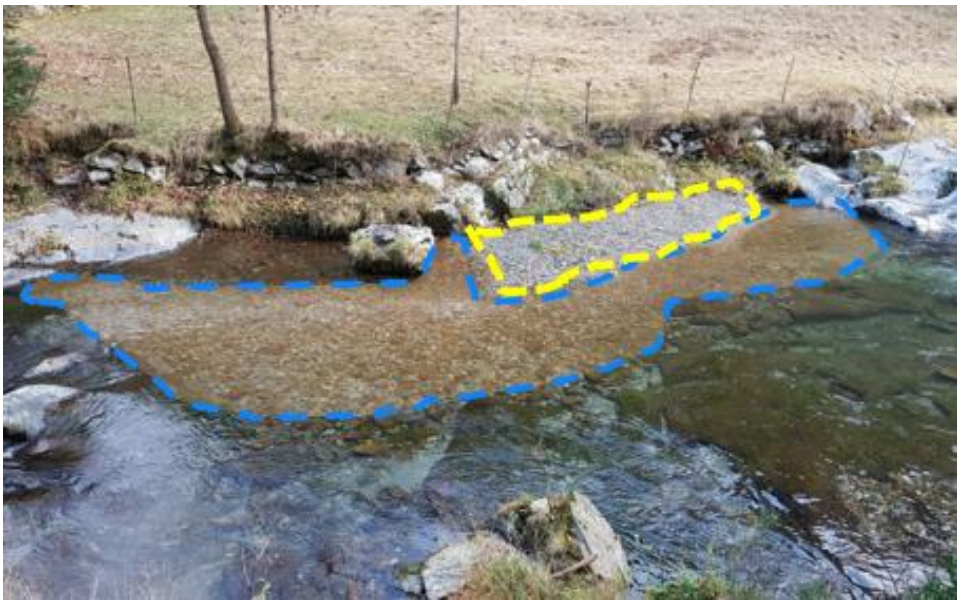


Figure 16 : Délimitation d'une SGF en eau (délimitée par le trait bleu) et hors d'eau (délimitée par le trait jaune) (©ECOGEA).

- L'activité de reproduction des espèces de poissons lithophiles peut être appréhendée par le dénombrement des structures créées par les géniteurs pour enfouir ou déposer leurs œufs. Ces structures sont souvent appelées **nids ou frayères effectives** en opposition aux frayères potentielles modélisées et représentées par les surfaces favorables (SGF ou SFR).

LE SUIVI DES FRAYERES EFFECTIVES COMME DESCRIPTEUR BIOLOGIQUE DE L'EXONDATION

Selon le comportement des espèces, l'identification des frayères effectives sera plus ou moins aisée (Tableau 19). Les structures les plus facilement dénombrables sont les nids creusés par les femelles et constituées soit d'une succession marquée d'un creux et d'un dôme (Figure 17), soit uniquement d'un creux.

Tableau 19 : Caractéristiques permettant la détection de frayères effectives de différentes espèces de poissons

Espèces	Caractéristiques des frayères effectives
Truite commune < 20 cm	Présence d'un creux de graviers -petits galets
Truite commune >20 cm	Présence d'une succession de creux (petits galets) et dôme (graviers-petits galets)
Ombre commun	Présence de zones de substrats grattés (disparition des diatomées)
Barbeau commun	Présence d'une succession de creux très marqué (petits galets) et dôme (graviers-petits galets)
Lamproie de planer	Présence d'un creux de graviers - petits galets

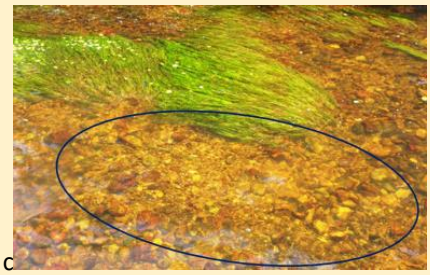
a  b  c 

Figure 17 : exemples de frayères effectives de truite commune(a), d'ombre commun(b) et de barbeau(c) (©ECOGEA).

Pour les autres espèces piscicoles lithophiles (blageon, vandoise, spirlin et hotu), la détection des pontes est plus difficile. Les comptages ne seront donc possibles que pour la truite, l'ombre commun, le barbeau et la lamproie de planer. Pour les autres espèces, il est possible, par une prospection méthodique de détecter des œufs exondés de vandoise qui restent collés en surface au substrat ou des œufs de chabots en soulevant des galets dans des zones de radiers.

Les méthodes de comptage reposent sur une prospection de stations d'étude ou de tronçon de cours d'eau en berge et dans le lit. Les nids sont repérés par la présence de géniteurs ou des « tâches » plus claires correspondant à des substrats nettoyés de leur couverture d'algues par le grattage des géniteurs.

Plusieurs campagnes de comptage sont nécessaires pour suivre la dynamique des pontes. Au minimum trois passages sont nécessaires au cours de la saison de reproduction. Lors de chaque campagne, il est recommandé d'établir des cartographies et des comptages des nids. Dans le cas des tronçons soumis à éclusées, les dénombrements doivent être réalisés dans les zones en eau et hors d'eau. Pour cela, il est préférable d'intervenir à bas débit, même si des prospections lors des éclusées sont également pertinentes.

La surface mouillée est le descripteur proposé **pour évaluer la mise en eau et l'exondation des habitats des alevins**. Elle peut être décrite assez facilement et son évolution avec le débit peut être appréhendée par des modélisations ou par des mesures directes de terrain (mesure de la largeur en eau par des opérateurs ou par survol d'un drone). Elle reste toutefois un descripteur très général ne prenant pas en compte la distribution spatiale des habitats. Son utilisation pour la quantification des impacts reste limitée et la précision fournie par cet indicateur est insuffisante pour le dimensionnement des mesures d'atténuation des impacts.

2.2.5. FRANCHISSABILITE DES OBSTACLES

Les difficultés de franchissement d'obstacles naturels (cascades ou zones rapides) ou artificiels (seuils) peuvent être quantifiées par des mesures directes en situation de débit de base et de débit maximal en utilisant les protocoles et les critères de l'outil d'Informations sur la continuité écologique de l'OFB (ICE).

Dans le cas d'un dispositif de franchissement piscicole (passe à poisson, rivière de contournement), un diagnostic de fonctionnalité hydraulique doit être effectué aux deux conditions de débits afin de comparer les conditions hydrauliques dans le dispositif avec les critères de franchissabilité des espèces cibles du tronçon.

2.3. QUANTIFICATION DE L'EVOLUTION DES DESCRIPTEURS MORPHOECOLOGIQUES EN FONCTION DU DEBIT

Pour quantifier les impacts des éclusées, il est indispensable de disposer de l'évolution de chaque descripteur morphoécologique en fonction de la valeur de débit.

Deux approches sont possibles :

1) Des mesures successives sur le terrain à plusieurs valeurs de débits ;

2) Une modélisation hydraulique d'après la topographie des fonds, des berges et des lignes d'eau de stations d'étude.

2.3.1. MESURES SUCCESSIVES SUR LE TERRAIN

Les mesures successives sur le terrain à plusieurs valeurs de débits sont relativement faciles à conduire pour évaluer la surface mouillée via des mesures directes depuis la berge lorsque le cours d'eau est de dimensions réduites (<20 m de largeur de lit mineur) ou par imagerie drone.

Pour les autres types d'habitats (frayères potentielles, zones de piégeages et habitats de croissance), les mesures sont plus difficiles, notamment du fait des difficultés d'identification depuis l'imagerie aérienne et de la variabilité des débits mobilisés lors des éclusées et parce que ces habitats intègrent une composante hydraulique qu'il faut avoir pour quantifier. C'est pourquoi il est préconisé l'utilisation d'une modélisation hydraulique.

2.3.2. MODELISATION HYDRAULIQUE

La modélisation hydraulique de stations d'étude, si possible au moyen de modèles bidimensionnels (2D), est la méthode la plus adaptée à la quantification des relations descripteurs morphoécologiques et débit du cours d'eau.

Elle s'organise en deux étapes de travail :

Tout d'abord, l'acquisition des données topographiques par différents outils :

- Relevés LIDAR ;
- Relevés topographiques de terrain ;
- Photogrammétrie.

Les outils LIDAR utilisant des trains d'onde vert et infrarouge (Allouis et al., 2010 ; Riegl et al., 2020) fournissent des relevés topographiques précis, que ce soit pour les lits hors d'eau mais aussi en eau. Les données topographiques collectées permettent la construction d'un Modèle numérique de terrain (MNT), utilisé ensuite pour la modélisation hydraulique, notamment 2D.

Ensuite, avec la plateforme HABBY développée par INRAE, il est possible d'utiliser plusieurs types de modèles hydrauliques (1D, 2D) et de les croiser avec de nombreux modèles biologiques. Il est notamment possible de conduire des approches spatialisées comme préconisées dans ce guide, c'est-à-dire des approches identifiant certains types d'habitat particulier dans le lit de la rivière (frayères potentielles, zones piégeantes, habitats des alevins, etc.).

Les modélisations 1D peuvent être suffisantes pour quantifier des surfaces ennoyées en fonction des débits. Dans le cas de système à topographie complexe, les modèles 2D permettent de mieux restituer les variations de surfaces mouillées et d'obtenir une cartographie des conditions hydrauliques (hauteur et vitesse) plus réalistes. De plus, les modèles 2D permettent une spatialisation des habitats, essentielle pour les espèces dont les habitats de reproduction ou ceux des alevins présentent des distributions spatiales particulières. Cette spatialisation est également importante dans le dimensionnement des mesures d'atténuation que ce soit pour la fixation de valeur de débit d'ennoiement ou pour réaliser des travaux de remodelage de la topographie.

ETAPES DE LA MODELISATION HYDRAULIQUE

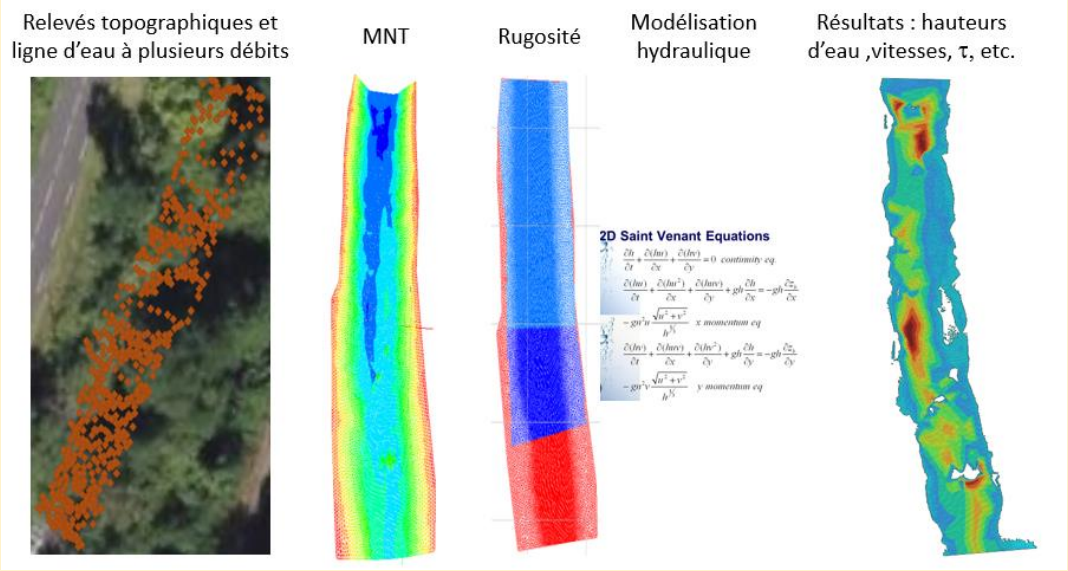


Figure 18 : Etapes successives pour la mise en œuvre d'une modélisation hydraulique.

MNT : modèle numérique de terrain

La modélisation des conditions hydrauliques pour des débits supérieurs à 1,5 fois, 2 fois voire 3 fois le module peut se révéler délicate. En effet, les modèles hydrauliques ont été développés pour des situations de débordement et d'inondation dans des plaines alluviales avec des mailles très larges ou pour la caractérisation d'habitats aquatiques en étiage, pour le choix de valeurs de débit réservé. Dans cette gamme de débits, la modélisation 2D paraît plus pertinente pour estimer des vitesses d'écoulement et une spatialisation des conditions hydrauliques.

Toutefois, dans des environnements fortement rugueux avec un substrat dominé par les rochers et les blocs, ainsi que dans des habitats à fortes couverture végétale, il est très probable que les modèles 2D ne permettent pas d'évaluer correctement l'intensité de la réduction des surfaces favorables à fort débit.

La modélisation hydraulique 2D couplée à des modèles d'habitat est une méthode pertinente pour étudier les altérations morphoécologiques liées aux éclusées car :

- Elle permet de réaliser un diagnostic précis des altérations subies par le tronçon de cours d'eau soumis aux éclusées ;
- Elle permet de proposer des mesures d'atténuation adaptées.

Elle présente cependant des limites en termes d'incertitudes de la modélisation hydraulique dans les torrents à forte pente et à granulométrie dominée par des blocs et rochers.

La détermination des relations entre les débits et la valeur des descripteurs permet d'obtenir pour chaque caractéristique hydrologique (débit naturel, débit maximal ou minimal d'éclusée, etc.), la valeur des descripteurs d'altérations morphoécologiques. La Figure 19 illustre cette étape pour la surface favorable aux truites adultes (SPU) au débit maximal d'éclusée (Qmax) pour la période de croissance.

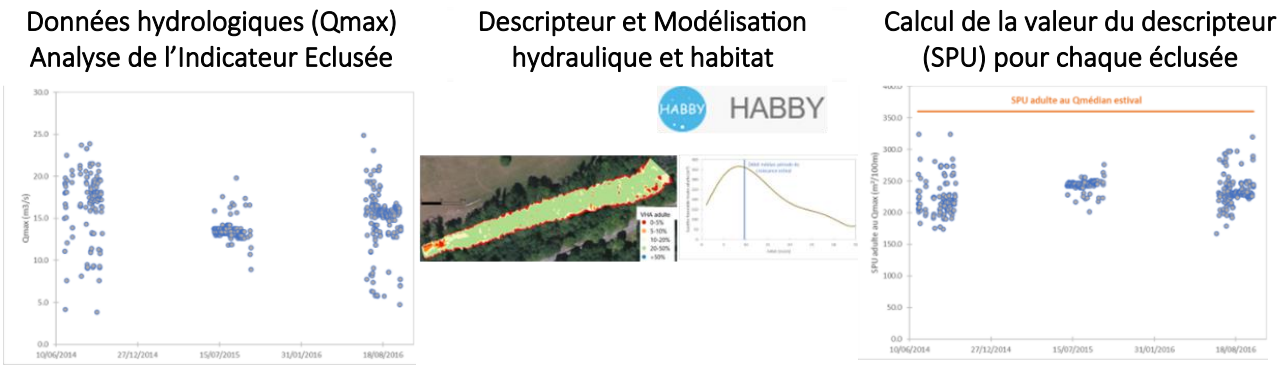


Figure 19: Calcul de la surface favorable aux truites adultes (SPU) au débit maximal d'éclusée (Qmax) pour la période de croissance estivale pour chaque éclusée. Chaque point correspond à une éclusée, pour laquelle le descripteur est calculé et utilisé par la suite pour le calcul d'indicateur.

2.4. QUANTIFICATION DES INDICATEURS D'ALTERATION MORPHOECOLOGIQUE

Nous proposons une méthode de diagnostic reposant sur l'analyse d'un nombre limité de descripteurs et d'indicateurs associés, associés aux cinq altérations morphoécologiques décrites dans la section précédente :

- 10 indicateurs morphoécologiques ;
- 6 indicateurs hydrologiques;
- 1 indicateur biologique ;
- 2 indicateurs de libre circulation piscicole.



Ce nombre d'indicateurs correspond à une analyse pour **une seule espèce de poisson** cible. Si plusieurs espèces cibles sont identifiées, les indicateurs devront être calculés pour chacune d'entre elles.

Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Types et sous-types d'altérations morphoécologiques et leurs descripteurs et indicateurs.

Indicateurs d'altérations morphoécologiques
Indicateurs d'altérations hydrologiques
Indicateurs d'impacts biologiques
Indicateurs d'impacts libre circulation piscicole

Type d'altération morphoécologique	Sous-type d'altération morphoécologique	Phase du cycle biologique concernée	Descripteurs	Indicateurs	Altérations hydrologiques impactantes
Mobilité des substrats	Mobilité substrats reproduction	Vie sous graviers	Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF)	Qmax exprimé en % du module	Qmax
				Nb d'impacts/mn sur plaque impact	
				Superficie de SGF mobilisée / Superficie de SGF totale (% SGF mobilisée)	
	Mobilité autres substrats	Habitat en général (poissons + macrofaune benthique)	Zones alluviales du lit mineur	Fraction granulométrique max. mobilisée	
Habitabilité	Habitabilité pour la reproduction des espèces cibles	Reproduction	Surface d'Habitat Favorable à la Reproduction (SFR)	[SFR Qmédian naturel - SFR Qmax] / SFR Qmedian naturel [SFR Qmédian naturel - SFR Qbase] / SFR Qmedian naturel	Qmax et/ou Qbase
	Habitabilité pour les alevins des espèces cibles	Post-émergence	Surface d'Habitat favorable aux alevins des espèces cibles (SPUal.)	[SPUal. Qmédian naturel - SPUal. Qmax] / [SPUal. Qmédian naturel]	
	Habitabilité pour les adultes des espèces cibles	Croissance	Surface d'Habitat favorable aux adultes des espèces cibles (SPUad.)	[SPUad. Qmédian naturel - SPUad. Qmax]/[SPUad. Qmédian naturel] [SPUad. Qmédian naturel - SPUad. Qbase]/[SPUad. Qmédian naturel]	
Variabilité habitabilité	Variabilité de l'habitabilité pour les alevins	Post-émergence	Ratio de débit	Qmax /Qbase	Qmax et Qbase
			Gradient	Gradient hausse (en % du module)	Gradient
			Variabilité des surfaces d'Habitat Favorable	Valeur d'Habitat al. max./Valeur d'habitat al. min	Qmax et Qbase
	Variabilité de l'habitabilité pour les adultes	Croissance	Ratio de débit	Qmax /Qbase	Qmax et Qbase
			Gradient de hausse vertical (Grd h.)	Grd h. vertical (en % du module)	Gradient
			Variabilité des surfaces d'Habitat Favorable (VHA)	VHA ad. max/VHA ad. min entre Qmax et Qbase	Qmax et Qbase
Exondation habitat favorable	Exondation des frayères de poissons lithophiles	Vie sous gravier	Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF) hors en eau	[SGFmédiane Qmax éclusée reproduction - SGF Qbase vie sous gravier]/ SGFmédiane Qmax éclusée reproduction	Qmax et Qbase
			Nombre de frayères effectives (nids)	% de frayères effectives exondées	Qmax et Qbase
	Exondation des habitats des alevins (piégeage/échouage)	Post-émergence	Surfaces mouillées (Surf. mouil.)	[Surf mouil. Qmax - Surf. mouil. Qbase]/Surf. mouil. Qmax	Qmax et Qbase
			Gradient de baisse vertical (Grd b.)	Grd b vertical(cm/h)	Gradient de baisse
Franchissabilité piscicole obstacle	Franchissabilité piscicole obstacle à la montaison	Migration	Conditions hydrauliques sur l'obstacle	Indice ICE	Qmax et Qbase
	Franchissabilité passe à poissons à la montaison		Conditions hydrauliques dans une passe à poissons	Franchissabilité des passes à poissons	

Attention : le pourcentage de frayères effectives est considéré comme un indicateur biologique, car si une frayère présentant des œufs enfouis ou des larves post-éclosion est exondée, on a directement un impact biologique (mortalité des œufs ou des larves) et non une altération morphoécologique (ce qui est le cas quand on parle de SGF ou de frayère potentielle exondée).

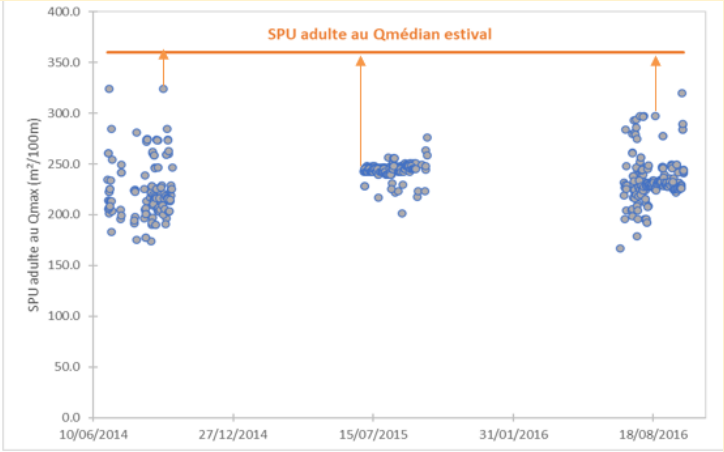
Le calcul des indicateurs d'altérations morphoécologiques repose sur deux types d'évaluation :

- La valeur du descripteur associé à un débit donné ou les variations du descripteur entre deux débits d'éclusée ;
- L'écart entre la valeur du descripteur à un débit donné du régime d'éclusées (Qmax par exemple) et sa valeur à un débit caractéristique du régime naturel de la période considérée (Qmédian par exemple).
  Dans l'exemple décrit dans l'encadré ci-dessous (Figure 20), le descripteur retenu est la surface pondérée utile (SPU) qui correspond à la capacité d'accueil pour les différents stades en fonction de variables physiques (hauteur d'eau, vitesse de courant et substrat). L'écart entre la SPU au Qmédian et la SPU au Qmax du régime d'éclusées est évaluée chez la truite fario. Cet écart constitue l'indicateur d'altération présenté dans le tableau 38.

Ce calcul est réalisé pour chaque éclusée sur une durée minimale d'un an (l'idéal étant trois ans).

DES DESCRIPTEURS AUX INDICATEURS

Quantification du **descripteur** : ex : SPU TRF adulte au Qmax



Transformation en **indicateur** : Ecart entre [SPU TRF adulte au Qmax] et [SPU TRF adulte au Qmédian naturel estival]



Figure 20 : Exemples de calcul d'indicateurs morphoécologiques sur 3 années : différentiel de surfaces favorables aux truites fario TRF adultes entre Qmax d'éclusée et Qmédian naturel (SPU : Surface pondérée utile)

L'évaluation de la gravité des altérations morphoécologiques est réalisée en croisant deux grandeurs :

- L'intensité de l'altération ;
- La fréquence d'apparition de l'altération sur une période donnée (nombre d'éclusées par semaine).

Il est proposé pour chaque indicateur une grille « guide » de qualification de la gravité de l'altération déterminée en croisant intensité et fréquence. Ces propositions reposent sur des recherches bibliographiques, notamment sur les pratiques en Suisse, Autriche, Norvège et Portugal (cf. Tome I) ainsi que sur des retours d'expériences de terrain.

Pour ce qui concerne l'intensité, 5 classes sont proposées, échelonnées de manière variable selon les indicateurs (en pourcentages ou en valeurs brutes).

très faible	faible	moyenne	forte	très forte

Pour ce qui concerne la fréquence d'éclusées, 5 classes sont aussi proposées, reposant sur le nombre d'éclusées par semaines, avec des classes échelonnées par intervalle de 2 éclusées par semaine.

La gravité de l'altération, au croisement de l'intensité de l'altération et de la fréquence d'éclusées, est présentée elle aussi catégorisée en 5 classes, de très faible à très forte (Tableau 21).

Tableau 21 : Grille type d'évaluation de la gravité des altérations.
Les chiffres dans les cases correspondent au nombre d'éclusées sur la période analysée.

	intensité de l'indicateur				
Fréquence sur la période	<n	n à n1	n1 a n2	n2 à n3	>n3
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

Pour une station donnée, les résultats peuvent ensuite être synthétisés, sous la forme d'une grille ou d'un histogramme, présentant la répartition des valeurs de l'indicateur (en nombre ou en pourcentage) dans les différentes classes de gravité.

DES INDICATEURS A L'EVALUATION DE LA GRAVITE DES ALTERATIONS MORPHOECOLOGIQUES

La Figure 21 représente pour une station donnée et pour l'indicateur de la surface pondérée utile (SPU) (relatif à l'altération morphoécologique de l'habitabilité), le tableau synthétique de gravité de l'altération, qui intègre le croisement avec la fréquence (en bas à droite), et les différentes étapes pour aboutir à ce tableau.

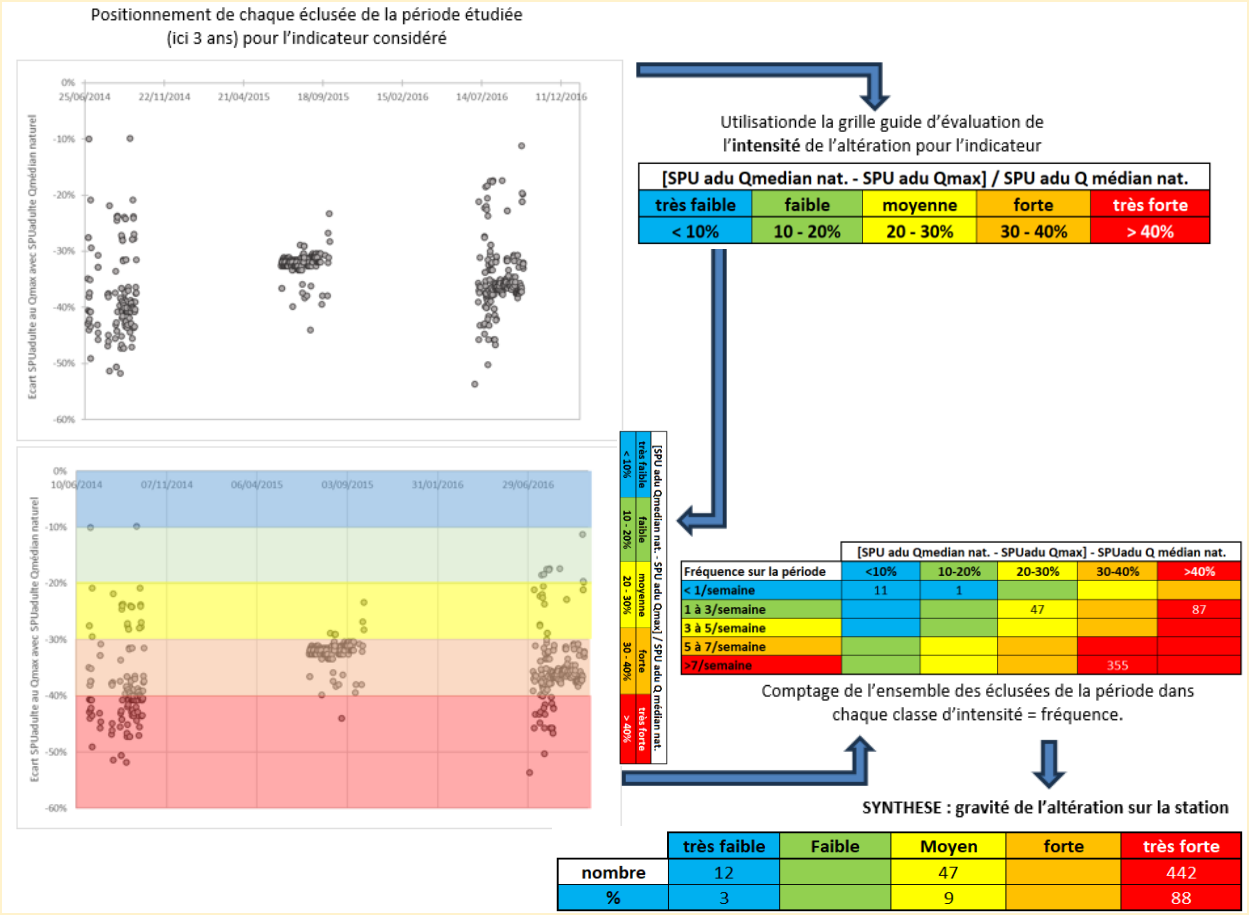


Figure 21 : Etapes successives d'évaluation de la gravité des altérations morphoécologiques.

Ces grilles « guide » n'ont aucune valeur règlementaire ni prescriptive. Il s'agit d'outils permettant d'appréhender les différentes altérations au moyen d'échelles de gravité. Elles seront précisées et améliorées au fur et à mesure de l'avancée des connaissances.

2.4.1. L'INDICATEUR MOBILITE DES SUBSTRATS

L'évaluation du niveau d'altération morphoécologique mobilité des substrats alluviaux repose sur quatre indicateurs :

- Un proxy hydrologique correspondant au rapport du débit maximal des éclusées sur le module (Tableau 22). Pour rappel, un débit correspondant à 2 fois le module correspond fréquemment à la mise en mouvement des particules alluviales de granulométrie moyenne (c'est-à-dire entre 2 et 5 cm) (cf. Tome I) ;

Tableau 22 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique « mobilité des substrats » d'après l'indicateur hydrologique Qmax/module (en%).

	Proxy hydrologique : Qmax en % du module				
Fréquence sur la période	<50%	50-100	100 à 200	200 à 300	>300%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

- Le nombre d'impacts relevés par des dispositifs enregistreurs (plaque d'impact, géophone) lors des éclusées (Tableau 23). Pour ce dernier indicateur, nous ne disposons pas de retours d'expérience suffisants pour fixer les limites de classes d'intensité sur des bases solides, mais nous pouvons néanmoins proposer une grille « guide ». Il s'agit de comptabiliser, sur la durée du plateau au débit maximum d'éclusée, le nombre moyen d'impacts par minute sur une plaque géophone calibrée à 1 cm (c'est-à-dire qui ne détecte que les cailloux de plus de 1 cm de diamètre).

Tableau 23 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique « mobilité des substrats » d'après le nombre moyen d'impacts par minutes sur un géophone (moyenne calculée sur la durée du plateau à partir du début de mouvement des premières particules).

	Nb impacts/mn				
Fréquence sur la période	<4 (<1 imp/15 s)	4 à 12 (<1 imp/5 s)	12 à 30 (<1 imp/2 s)	30 à 60 (<1 imp/s)	>60 (>1 imp/s)
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

- La superficie de SGF mobilisée par rapport à la superficie de SGF totale sur la station d'étude grâce à des observations de terrain (particules marquées ou peintes) ou de modélisations (Tableau 24).

Tableau 24 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique « mobilité des substrats » sur la base de la SGF mobilisée par rapport à la SGF totale.

	SGF mobilisée / SGF totale (en %)				
Fréquence sur la	<5%	5 à 10	10 à 20	20 à 30	>30%
<1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>50%					

- La fraction granulométrique maximale mobilisée grâce à des observations de terrain (particules marquées ou peintes) ou de modélisations (Tableau 25), qui donne une indication de l'altération à l'échelle du substrat alluvial en général et non plus seulement des granulométries de reproduction des poissons lithophiles.

Tableau 25 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique « mobilité des substrats » sur la base de la granulométrie maximale mobilisée.

	Granulométrie maximale mobilisée (mm)				
Fréquence sur la	<2mm	2 à 16	16 à 32	32 à 64	> 64
<1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>50%					

2.4.2. INDICATEUR HABITABILITE

L'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique habitabilité du lit mouillé en période d'éclusée repose sur des ratios de Surfaces favorables à la reproduction (SFR) et de Surfaces pondérées utiles (SPU) pour les alevins et les adultes des espèces de poissons cibles. Sont ainsi calculées les SFR et SPU pour les débits caractéristiques de chaque éclusée (débit de base et/ou débit maximal) qui sont rapportées aux SFR et SPU au débit médian naturel de la période biologique concernée :

- La perte de SFR au Qbase d'éclusée : $\frac{SFR_{Qmédian\ naturel} - SFR_{Qbase\ éclusée}}{SFR_{Qmédian\ naturel}}$;
- La perte de SFR au Qmax d'éclusée : $\frac{SFR_{Qmédian\ naturel} - SFR_{Qmax\ éclusée}}{SFR_{Qmédian\ naturel}}$;
- La perte de SPU pour les alevins au Qmax d'éclusée : $\frac{SPUal._{Qmédian\ naturel} - SPUal._{Qmax\ éclusée}}{SPUal._{Qmédian\ naturel}}$;
- La perte de SPU pour les adultes au Qbase d'éclusée : $\frac{SPUad._{Qmédian\ naturel} - SPUad._{Qbase\ éclusée}}{SPUad._{Qmédian\ naturel}}$;
- La perte de SPU pour les adultes au Qmax d'éclusée : $\frac{SPUad._{Qmédian\ naturel} - SPUad._{Qmax\ éclusée}}{SPUad._{Qmédian\ naturel}}$.

Ces indicateurs sont calculés pour toutes les espèces cibles choisies.

La grille-type d'évaluation ci-dessous (Tableau 26) s'applique à chacun des cinq indicateurs susmentionnés avec des classes d'intensité de pertes de surfaces favorable échelonnées par pas de 10 %.

Tableau 26 : Grille d'évaluation type de la gravité des altérations morphoécologique habitabilité du milieu pour les cinq indicateurs.

	Pertes Surface fav. au Qx d'éclusée/Surface fav. au Qx naturel				
Fréquence sur la période	<10%	10-20%	20-30%	30-40%	>40%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

Les abris hydrauliques peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation des impacts biologiques des éclusées, principalement vis-à-vis des altérations de l'habitabilité à fort débit et de la variabilité de cette habitabilité.

Ces abris (ou refuges) hydrauliques correspondent aux structures minérales de type rochers et blocs ainsi qu'aux embâcles de bois, aux petites encoches sous berges (ou anses) et aux sous-berges, qui offrent des conditions hydrauliques plus favorables aux poissons que celles rencontrées dans la majorité du lit vif. Il est très difficile à l'heure actuelle de modéliser finement, même au moyen de puissants modèles hydrauliques bidimensionnels, la microtopographie et la micro hydraulique de ces abris. Une approche simplifiée semi-quantitative peut être proposée, reposant sur la quantification des surfaces occupées par ces structures par rapport à la surface mouillée au débit maximal d'éclusée. Cette démarche peut être facilitée par l'utilisation d'images aériennes prises par un drone.

Une pondération de l'intensité d'altération de l'habitabilité du fait de la présence d'abris hydrauliques est proposée pour les deux indicateurs d'altération morphoécologique concernant la SPU pour les poissons adultes. Ainsi, une surface d'abris supérieure à 5 % conduit à réduire l'intensité de l'altération (Tableau 27).

Tableau 27 : Grille pondérée de la gravité des altérations morphoécologique habitabilité pour l'indicateur SPU des poissons adultes si la station présente plus de 5% d'abris hydrauliques

	indicateur d'habitabilité pondéré si >5% d'abris				
Fréquence sur la période	<10%	10-20%	20-30%	30-40%	>40%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

La mise en œuvre d'une pondération de la valeur d'altération de l'habitabilité par les abris hydrauliques pourrait conduire à rapidement envisager des solutions d'aménagements morphologiques comme mesures d'atténuation des impacts des éclusées. Il paraît important de préciser que ce type de mesures peut être difficile à mettre en œuvre sur un long linéaire de rivière et nécessite des études permettant d'évaluer :

- Le style fluvial naturel et la granulométrie associée qui peut être peu compatible avec des apports d'abris minéraux grossiers (blocs et rochers);
- Les contraintes foncières ;
- Les contraintes hydrauliques (risques de débordement et d'érosion latérale notamment).

EXEMPLE : MISE EN ŒUVRE DE LA QUANTIFICATION DE L'INDICATEUR PERTE DE SURFACE FAVORABLE AUX ALEVINS DE TRUITE.

Rivière : Exemple, **Module** : 14 m^3/s
Période : Emergence et post-émergence sur trois années – durée 10 semaines par an

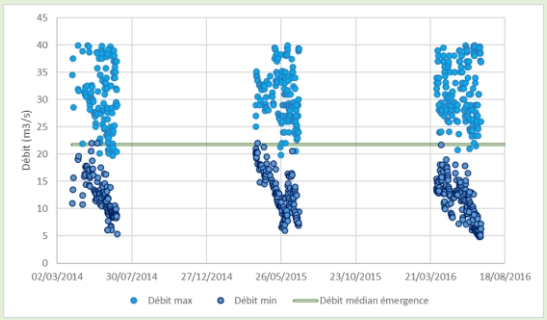
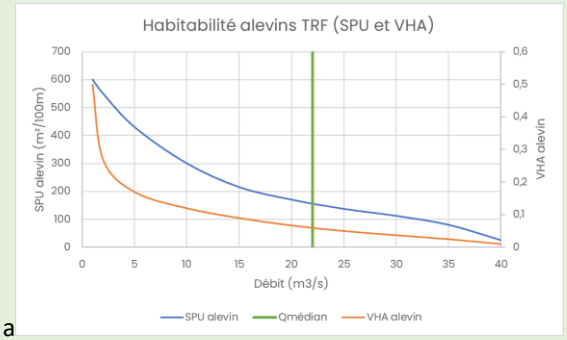
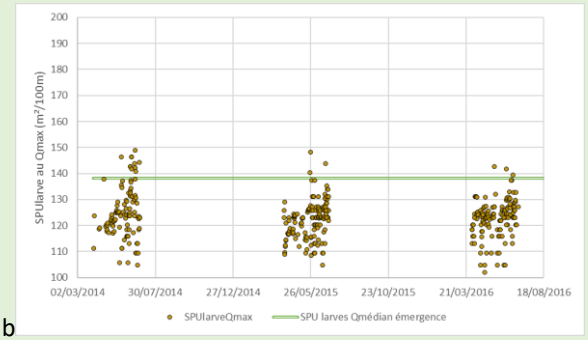


Figure 22 : Débit maximal (bleu clair) et minimal (bleu foncé) de toutes les éclusées de la période d'émergence et post-émergence des truites.

a



b



Figures 23 : a) évolution du descripteur surfaces favorables aux alevins de truites émergentes et post-émergentes sur le tronçon en fonction du débit (en vert le débit médian) et b) calcul du descripteur SPU pour les alevins pour chaque valeur de Qmax des éclusées identifiées.

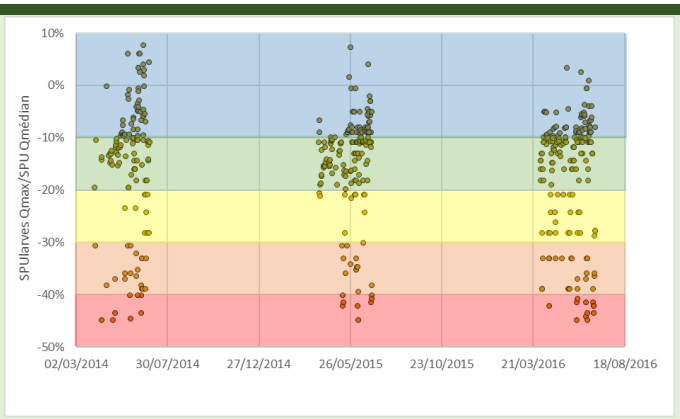


Figure 24 : Valeur de l'indicateur (SPUalevins au Qmax/SPU_alevins Qmédian naturel) pour chaque éclusée identifiée et catégorisation selon l'écart calculé.

Le nombre d'occurrences dans chaque catégorie est ensuite reporté dans un tableau et sous forme d'histogramme :

	SPUlarv Qmax/SPUlarv Qmédian nat. émergence				
Fréquence sur la période	<10%	10-20%	20-30%	30-40%	>40%
< 1/semaine					28
1 à 3/semaine			42	53	
3 à 5/semaine	138				
5 à 7/semaine					
> 7/semaine		212			

	Gravité de l'altération				
	très faible	faible	moyenne	forte	très forte
nombre	138		254	81	
%	29%		54%	17%	

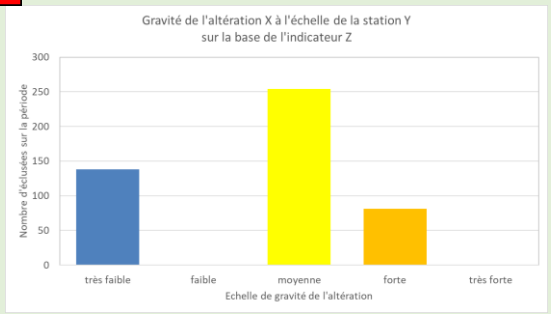


Figure 25 : a) grille d'évaluation de l'altération morphoécologique habitabilité des alevins de truites (dans les cases est indiqué le nombre d'éclusées de la période considérée) b) grille et histogramme représentant la gravité (croisement entre l'indicateur et la fréquence d'éclusées) des différentes éclusées de la période d'après cet indicateur.

2.4.3. INDICATEUR VARIABILITE DE L'HABITABILITE

L'évaluation du niveau d'altération morphoécologique variabilité des habitats repose sur quatre indicateurs considérés comme essentiels :

- Le gradient de hausse (en % du module/heure) (Tableau 28) ;
- Le rapport du débit maximal des éclusées sur le débit de base (Tableau 29) ;
- Le ratio des valeurs d'habitat maximales et minimales pour les stades alevins des espèces cibles, entre le débit de base et le débit maximal (Tableau 30) ;
- Le ratio des valeurs d'habitat maximales et minimales pour les stades adultes des espèces cibles, entre le débit de base et le débit maximal de chaque éclusée (Tableau 30).

Tableau 28 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique variabilité de l'habitabilité d'après l'indicateur gradient de hausse des éclusées

	Gradient de hausse (en % du module/h)				
Fréquence sur la période	<15%	15-25%	25-50%	50-100%	>100%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

Tableau 29 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique variabilité de l'habitabilité d'après l'indicateur Qmax/Qbase.

	Proxy hydrologique : Qmax/Qbase				
Fréquence sur la période	<1,5	1,5 à 3	3 à 4,5	4,5-6	>6
<1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>50%					

Tableau 30 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique variabilité de l'habitabilité d'après l'indicateur de ratio entre les valeurs d'habitat maximales et minimales pour les différents stades de développement de poisson des espèces cibles, entre le débit de base et le débit maximal d'éclusée.

	VHA max / VHA min entre Qbase et Qmax				
Fréquence sur la période	< 2	2 à 3	3 à 5	5 à 8	> 8
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>7/semaine					

Comme pour l'habitabilité, il est possible de pondérer la gravité de l'indicateur de ratio entre les valeurs d'habitat maximales et minimales pour les différents stades de développement de poisson pour des contextes à fortes densités de surfaces d'abris (>5 %) (Tableau 31).

Tableau 31 : Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique variabilité de l'habitabilité de l'indicateur de ratio entre les valeurs d'habitat maximales et minimales pour les différents stades de développement de poisson pondérée dans les contextes à surfaces d'abris >5 %.

	VHA max / VHA min entre Qbase et Qmax si > 5% d'abris				
Fréquence sur la période	< 2	2 à 3	3 à 5	5 à 8	> 8
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>7/semaine					

2.4.4. INDICATEUR EXONDATION DES HABITATS FAVORABLES

L'altération morphoécologique liée à l'inondation puis l'exondation d'habitats favorables, se subdivise en deux sous-types :

- **L'exondation des frayères potentielles** de poissons lithophiles (Tableau 32 et Tableau 33) ;
- **L'exondation des habitats favorables** aux alevins (et souvent aux juvéniles), entrainant un phénomène de piégeage/échouage, souvent létal (Tableau 34 et Tableau 35).

L'évaluation de la gravité de **l'exondation des frayères potentielles** s'appuie sur la différence entre la SGF (Surface granulométriquement favorable) au débit de base durant toute la vie sous gravier et la SGF médiane au débit maximum des éclusées en période de reproduction, exprimée sous forme de pourcentage.

*Tableau 32: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique exondation de **frayères potentielles** d'après les pertes de SGF entre la période de reproduction et la période de vie sous gravier.*

	Perte de SGF [SGF médiane Qmax éclusée reproduction - SGF Qbase vie sous gravier] / SGF médiane Qmax éclusée reproduction				
Fréquence sur la période	< 5%	5 - 10%	10 - 20%	20 - 30%	> 30%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>7/semaine					

Un indicateur biologique complémentaire, comptabilisant les frayères effectives (nids) exondées par rapport au nombre total de frayères effectives, peut compléter l'indicateur d'exondation de frayères potentielles. Reposant sur une ou plusieurs observations au débit minimal durant la vie sous gravier, son évaluation est délicate, la variabilité des débits d'éclusée nécessitant un grand nombre d'observations. Pour pallier ce problème, on peut utiliser un modèle hydraulique après avoir géoréférencé les nids. S'agissant d'un indicateur observé, et non comme précédemment d'un potentiel qui constitue une valeur majorée, les limites de classes sont plus restrictives (Tableau 33).

*Tableau 33: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération biologique exondation de **frayère effective** d'après la comptabilisation des frayères effectives exondées.*

Observations : % frayères effectives exondées/frayères effectives totales			
<5%	5-10%	10-20%	>20%

Deux indicateurs essentiels de l'altération morphoécologiques **exondation des habitats favorables aux alevins** sont utilisés dans la littérature (voir Tome 1) :

- La perte de surface mouillée pour chaque éclusée correspondant à la différence de surface mouillée entre Qmax et Qbase, rapportée à la surface mouillée à Qmax (en % de celle-ci). Notons que la grille que nous proposons ici, élaborée en s'appuyant sur une synthèse bibliographique et des retours de terrain, présente des valeurs intermédiaires entre celle de l'OFEV (2017) et celle de Bakken (2021) (Tableau 34) ;
- Le gradient de baisse d'éclusée (en cm/h) (Tableau 35).

Tableau 34: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique exondation d'habitats favorables aux alevins d'après l'indicateur différentiel de surface mouillée.

	Perte de surfaces mouillées [Surf. Mouil. Qmax - Surf. Mouil. Qbase] / Surf. Mouil.Qmax				
Fréquence sur la période	< 10%	10 - 20%	20 - 30%	30 - 40%	> 40%
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>7/semaine					

Tableau 35: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique exondation d'habitats favorables aux alevins d'après l'indicateur gradients de baisse.

	Gradient de baisse pour les larves et alevins (cm/h)				
Fréquence sur la période	<5 cm/h	5 à 12	12 à 20	20 à 30	>30 cm/h
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

EXEMPLE : MISE EN ŒUVRE DE LA QUANTIFICATION DE L'INDICATEUR « PERTE DE SURFACE MOUILLEE ».

Rivière : Exemple **Module** : 10 m^3/s

Période : Emergence et post-émergence sur 3 années – 10 semaines par années soit 30 semaines sur la période d'étude

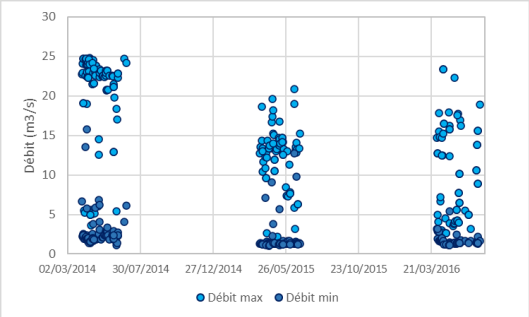
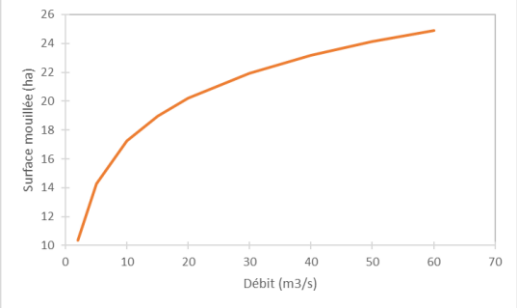
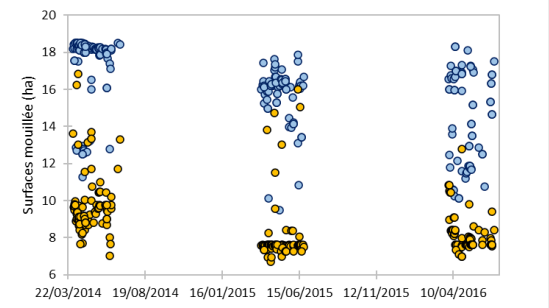


Figure 26 : Débit maximal (bleu clair) et minimal (bleu foncé) de toutes les éclusées de la période d'émergence et post-émergence des truites.





Figures 27 et 28: Evolution du descripteur surfaces mouillées sur le tronçon en fonction du débit et pour chaque éclusée identifiée à débit minimal (en jaune) et à débit maximal d'éclusée (en bleu clair).

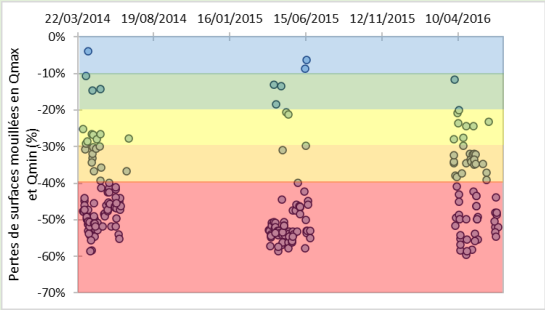


Figure 29 : Valeur de l'indicateur perte de surface mouillée pour chaque éclusée identifiée et catégorisation en fonction du niveau de perte.

	[Surf. Mouil. Qmax - Surf. Mouil. Qbase] / Surf. Mouil.Qmax				
Fréquence sur la période	**< 10%**	**10 - 20%**	**20 - 30%**	**30 - 40%**	**> 40%**
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
>7/semaine					

	Delta surf.mou. Qmax-Qbase / surf.mou. Qmax (%)				
	très faible	faible	moyenne	forte	très forte
nombre	11	19	0	33	169
%	5	8	0	14	73

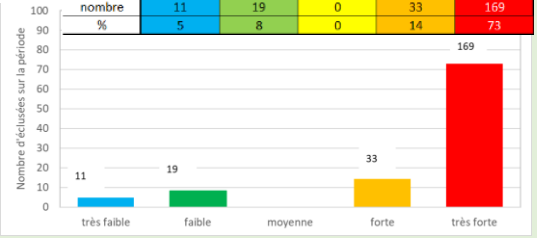


Figure 30 : a) grille d'évaluation de l'altération des surfaces mouillées (dans les cases est indiqué le nombre d'éclusées de la période considérée, ici sur 3 ans) b) grille et histogramme final représentant, sur la station étudiée, la gravité des différentes éclusées de la période, sur la base de cet indicateur.

2.4.5. INDICATEUR FRANCHISSABILITE DES OBSTACLES

Les altérations morphoécologiques de la franchissabilité piscicole sont évaluées au niveau des obstacles (barrages, seuils, radiers de pont) et des passes à poissons.

Pour les obstacles, la grille d'évaluation croise la classe de franchissabilité de la méthode Informations sur la continuité écologique (ICE) obtenue pour chaque débit d'éclusée (débit minimal, débit maximal) avec la fréquence des événements sur la période (Tableau 36).

Tableau 36: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique franchissabilité piscicole d'après l'indicateur ICE.

	Indice ICE - Impact de l'ouvrage sur la franchissabilité				
Fréquence sur la période	Aucun	Limité	Significatif	Majeur	Total
< 1/semaine					
1 à 3/semaine					
3 à 5/semaine					
5 à 7/semaine					
> 7/semaine					

Pour les passes à poissons, la grille repose sur le croisement de l'évaluation de franchissabilité du dispositif au travers de sa fonctionnalité hydraulique (compatibilité des conditions hydrauliques dans la passe avec les capacités de nage et de saut des espèces cibles) avec la fréquence des éclusées (Tableau 37). Trois classes d'intensité sont proposées. Cette approche s'inspire, pour les fréquences, de celle généralement utilisée pour évaluer la fonctionnalité des passes à poissons (de l'ordre de 80 à 90 % du temps).

Tableau 37: Grille d'évaluation de la gravité de l'altération morphoécologique franchissabilité piscicole d'après un indicateur de fonctionnalité hydraulique des passes à poissons.

	Fonctionnalité hydraulique de la passe à poissons		
Fréquence sur la période	Conforme	Partiellement	Non conforme
< 1/semaine			
1 à 3/semaine			
3 à 5/semaine			
5 à 7/semaine			
> 7/semaine			

2.5. QUANTIFICATION DES ALTERATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

La quantification des altérations du régime thermique repose sur des données de température de l'eau enregistrées à un pas de temps de moins d'1 heure si possible ceci au minimum sur un cycle annuel complet. Si aucune donnée n'est disponible, il convient d'instrumenter le cours d'eau à l'échelle des différentes stations d'étude sélectionnées pour le diagnostic. Les outils de quantification des perturbations thermiques induites par les éclusées sont encore peu développés et ils nécessitent de disposer de régime de température de référence.

Nous proposons ici une démarche reposant sur deux étapes successives.

Selon le nombre d'éclusées et la configuration du site, le travail peut viser :

- Une identification des variations non naturelles de débit ;
- Pour chacune des variations identifiées, une caractérisation du régime de température. Il s'agit de vérifier si les caractéristiques thermiques sont susceptibles d'affecter les cycles biologiques des espèces cibles. Les indicateurs proposés pour quantifier les altérations thermiques sont présentés dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Indicateurs d'altération des régimes de températures.

Indicateurs altérations thermiques
Médiane température maximale
3ème quartile des températures maximales
Dernier décile température maximale
Médiane température minimale
3ème quartile des températures minimales
Dernier décile température minimale
Médiane amplitude
3ème quartile des amplitudes
Dernier décile des amplitudes

La qualification de l'intensité de l'altération repose sur la confrontation des valeurs des indicateurs (températures maximales et minimales, amplitudes) avec les connaissances sur les exigences thermiques des espèces cibles (voir annexe 2).

Les éclusées ne génèrent pas directement d'altérations de la qualité chimique de l'eau. Celles-ci sont liées à la qualité des eaux de la retenue, notamment au niveau de la prise d'eau.

Les éclusées générant des variations horaires des débits, il convient d'acquérir des données physico-chimiques en aval de la restitution à des pas de temps correspondant à ceux des variations de débits. Les paramètres devront donc être analysés sur des cycles de 24 heures.

EXEMPLE D'APPLICATION.

Rivière : Exemple, **Module** : 1,5 m^3/s

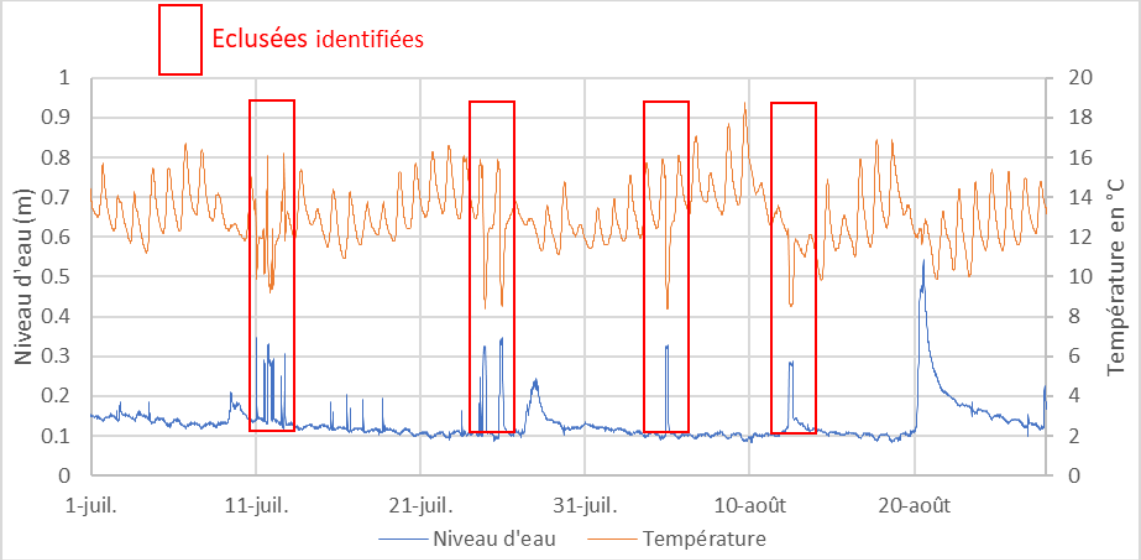


Figure 31 : Identification des éclusées et des variations de température associées

Sur les deux mois de juillet et août, 11 éclusées ont été identifiées et isolées afin de caractériser les conditions de températures pendant ces événements (Figure 31). Les caractéristiques thermiques des éclusées ont été comparées avec celles des périodes hors éclusée.

Tableau 39 : Valeurs des indicateurs d'altérations du régime thermique

Indicateurs altérations thermiques	Eclusées	Hors éclusées
Médiane température maximale	15,9	15,1
3ème quartile des températures maximales	16,1	15,9
Dernier décile température maximale	16,1	16,7
Médiane température minimale	8,6	11,9
3ème quartile des températures minimales	9,0	12,4
Dernier décile température minimale	9,3	13,1
Médiane amplitude	7,1	3,3
3ème quartile des amplitudes	7,4	4,0
Dernier décile des amplitudes	7,6	4,6

Les températures maximales atteintes lors des journées avec éclusées ne sont pas significativement différentes de celles des périodes hors éclusée. Les valeurs sont compatibles avec les exigences de l'espèce cible, la truite commune. Les températures minimales journalières sont nettement plus faibles de 2,5 à 3,8°C. Les amplitudes journalières sont également plus élevées ; elles peuvent atteindre plus de 7°C. Ces valeurs ne semblent toutefois pas impactantes pour l'espèce cible.

Les caractéristiques physico-chimiques susceptibles d'impacter les espèces sont présentées dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Descripteurs de la qualité physico-chimiques

Descripteurs de la qualité physico-chimique
Concentration en oxygène dissous
Conductivité électrique
pH
DBO et DCO
Ammoniac et nitrites
MES

Les valeurs des descripteurs de la qualité physico-chimique obtenues sur des cycles de 24 heures doivent être analysées en référence aux exigences des espèces cibles (voir annexe 2).

2.6. SYNTHESE DE LA GRAVITE DES ALTERATIONS POUR CHAQUE STATION

Au terme du diagnostic, l'ensemble des résultats est présenté sous forme d'une matrice générale par station, reprenant les tableaux de synthèse de la gravité des altérations réalisés pour chaque indicateur (Figure 32). Cette synthèse est accompagnée d'une première interprétation des résultats. Ceux-ci seront analysés plus finement lors de la phase suivante qui permettra de les hiérarchiser.

Indicateurs	Nombre et % d'éclusées par classe de gravité				
MOBILITE SUBSTRATS					
Qmax en % module	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	0	138	254	53	28
	0%	29%	54%	11%	6%
Nb impacts/mn	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
% SGF mobilisée	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
Dmax mobilisé (mm)	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
HABITABILITE					
Surface Favorable à la Reproduction	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	11	0	19	33	169
	5%	0%	8%	14%	73%
Surface Favorable aux adultes	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
etc					
⬇	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc

Figure 32 : Exemple de matrice de synthèse des grilles de gravité d'altération

Pour une meilleure lisibilité, on peut aussi représenter les résultats sous forme d'histogrammes de synthèse.



Figure 33 : Exemple de de synthèse des grilles de gravité d'altération représentée sous forme d'histogramme

Cette phase de synthèse est à réaliser pour chaque station représentative des différents tronçons concernés par les éclusées.

3. ETAPE 2 : DETERMINATION DES OBJECTIFS D'ATTENUATION

L'objectif de cette étape est de hiérarchiser les altérations morphoécologiques en s'appuyant sur la synthèse réalisée précédemment et sur les connaissances locales, puis de déterminer des objectifs d'atténuation.

3.1. CONTEXTUALISATION DES ALTERATIONS MORPHOECOLOGIQUES LIEES AUX ECLUSEES

Il est important que la quantification des altérations morphoécologiques liées aux éclusées soit contextualisée à la fois vis-à-vis des caractéristiques naturelles du cours d'eau, notamment son hydrologie naturelle (crues et étiages), mais également vis-à-vis des autres pressions et altérations sur la morphologie du cours d'eau, dont celles générées par l'aménagement hydroélectrique (lacs et barrages), et sur la qualité des eaux, qui peuvent atténuer ou aggraver l'effet des éclusées.

La présence de **réservoirs biologiques** connectés (affluents, tronçons en amont de la restitution, annexes hydrauliques alimentées par des sources ou des nappes) peut conduire à pondérer les impacts des éclusées sur la reproduction et sur le développement des larves de poissons, tout particulièrement pour la truite commune.
Il est difficile de proposer une grille de pondération des altérations de l'habitabilité pour la reproduction ou de l'exondation des zones de frayères. Le travail devra s'appuyer sur une expertise locale reposant sur l'analyse de la connectivité et sur les surfaces de frayères disponibles dans ces réservoirs biologiques, comparativement à celles présentes dans les tronçons soumis aux éclusées, en intégrant également la surface en eau des tronçons.

Certaines **altérations hydromorphologiques** sur le tronçon peuvent avoir une incidence directe ou indirecte sur la gravité des altérations liées aux éclusées. La chenalisation va aggraver les altérations d'habitabilité, la régulation des crues va augmenter les piégeage-échouages tandis que les déficits de transport solide aggraveront l'exondation des frayères.

Le Tableau 41 présente quelques effets liés à des altérations hydromorphologiques autres que celles liées aux éclusées sur les altérations liées aux éclusées.

La prise en compte de certaines **modifications hydrologiques hors éclusées** (écrêtage des crues et soutien des étiages) est importante dans l'analyse de la gravité des altérations. Ces modifications sont très souvent liées à la présence d'aménagements fonctionnant par éclusées et à la présence des réservoirs stockant d'importants volumes d'eau.

La réduction des amplitudes de crues aura à la fois des incidences sur la morphologie (altération de la mobilité des substrats) et sur la biologie, notamment sur le développement des jeunes stades de poissons (habitabilité et variation de l'habitabilité pour les larves) avec par conséquent des incidences sur le recrutement piscicole.

Tableau 41 : Qualification des interactions entre les altérations de la morphologie et les altérations morphoécologiques liées aux éclusées

Pressions/altérations hydromorphologiques	Effets aggravant les altérations liées aux éclusées	Effets atténuant les altérations liées aux éclusées
Extractions de granulats	Perte de surfaces de frayères (SGF) pour les espèces lithophiles, pertes de fonctionnalité des frayères, pertes de capacités d'accueil pour les espèces piscicoles benthiques et les invertébrés pétricoles	Moindres superficies de zones potentiellement piégeantes
Rectification du lit	Perte de diversité des habitats du chenal, augmentation des vitesses d'écoulement, réduction des dépôts de sédiments de granulométrie moyenne (sable à petits graviers), pertes de diversité des habitats de berges	Moindres superficies de zones potentiellement piégeantes
Recalibrage / surélargissement	Favorise la sédimentation et donc les risques de développement de surfaces piégeantes (bancs).	Réduction des vitesses à Qmax
Suppression de la ripisylve	Favorise l'instabilité des berges, perte d'ombrage, perte d'abris	Peut réinjecter des alluvions grossières favorables à la création de SGF
Survégétalisation du lit	Augmentation potentielle des surfaces piégeantes dans les végétaux	Augmentation des abris en berge
Protection des berges	Perte de capacité de recharge alluviale	Refuge éventuel dans les interstices si les enrochements sont libres (non jointoyés)
Seuils et ouvrages transversaux	Perte de diversité des habitats lotiques du fait des retenues. Piégeage des sédiments et déficit en aval, donc perte de qualité d'habitat, notamment de reproduction (SGF).	

EXEMPLE : ANALYSE DES MODIFICATIONS DE RÉGIME HYDROLOGIQUE LIÉES AUX STOCKAGE/DESTOCKAGE A PARTIR DE RETENUES.

Rivières : Salat (hydrologie peu modifiée) et Ariège (hydrologie modifiée) **Module**: Salat-36 m^3/s ; Ariège-39 m^3/s

Capacités de stockage : Ariège – fort (18 % du bassin versant dérivé par l'aménagement et 10 % des volumes stockés dans des retenues) ; Salat – faible (1 % du bassin dérivé)

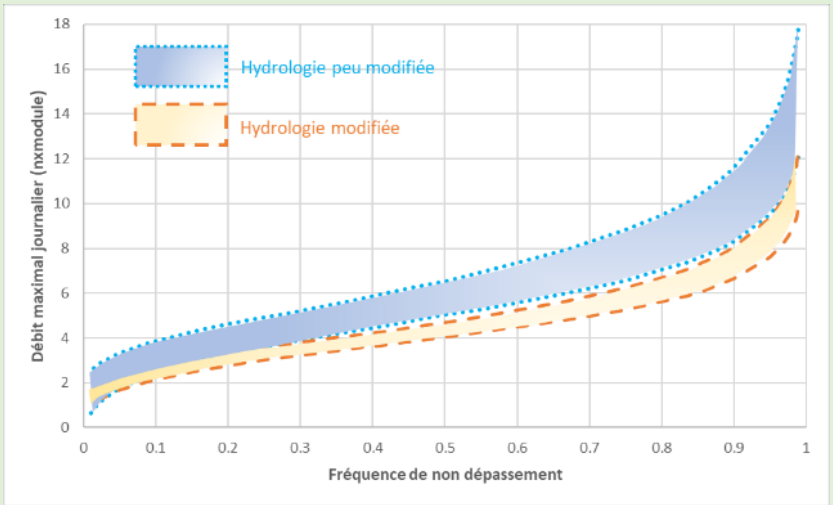


Figure 34 : Comparaison des débits de crues journaliers classés (intervalle de confiance 95%) entre un régime non modifié (Le Salat) et un régime modifié (Ariège).

La comparaison des débits de crue de deux bassins versants Pyrénéens proches (Ariège et Salat, affluents de la Garonne) mais présentant une forte différence d'équipements hydroélectriques, avec pour la rivière Ariège de grandes retenues conférant un niveau d'équipement important, et pour la Salat une capacité de stockage bien moindre et un faible niveau d'équipement. L'hydrologie est beaucoup plus « tamponnée » sur la rivière très équipée. Ainsi, les crues biennales passent de valeurs comprises entre 5 et 6,5 fois le module sur le Salat à des valeurs de 4 fois le module sur l'Ariège. De même pour les crues quinquennales qui passent de 6 à 9,7 fois le module sur le Salat à 5,8 et 6,5 fois sur l'Ariège.

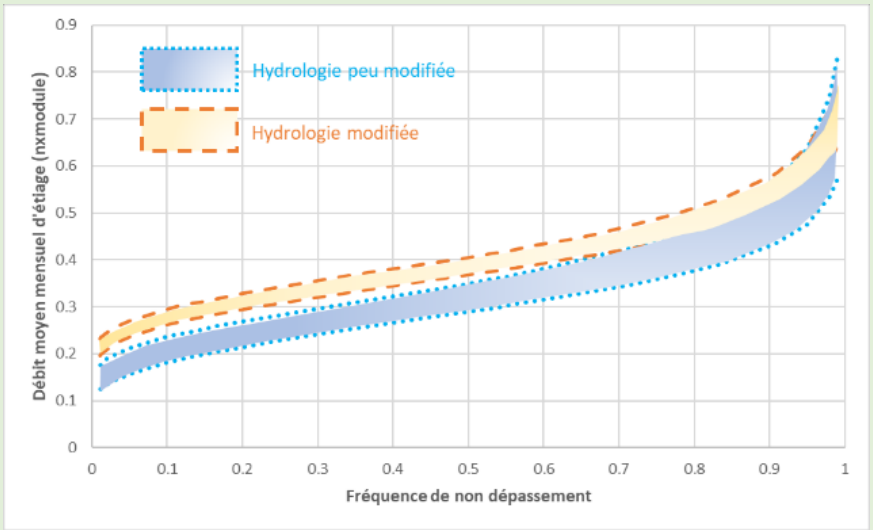


Figure 35 : Comparaison des débits moyens mensuels d'étiage classés (intervalle de confiance 95%) entre un régime non modifié (Le Salat) et un régime modifié (Ariège).

De même, la gestion des retenues modifie les débits d'étiage avec des valeurs plus soutenues sur l'Ariège : étiage biennal entre 35 et 40 % du module sur l'Ariège contre 30 à 35 % sur le Salat ; étiage quinquennal entre 30 et 32 % sur l'Ariège contre 22 à 26 % sur le Salat.

La prise en compte des crues naturelles est un élément important de contextualisation. En effet, les crues naturelles jouent un rôle substantiel vis-à-vis de la variabilité du recrutement piscicole. Cette prise en compte des crues naturelles pourra conduire :

- A relativiser la gravité des altérations liées aux éclusées dans des contextes hydrologiques de crues fréquentes naturellement impactantes ;
- Ou au contraire, à chercher à limiter au maximum les altérations liées aux éclusées, dans ces mêmes contextes déjà naturellement difficiles. Cette approche repose sur le principe d'assurer aux communautés biologiques des capacités de résilience face aux événements hydro-climatiques intenses qui seront de plus en plus fréquents du fait du changement climatique.

Troisièmement, il est important de caractériser les altérations éventuelles de la qualité chimique et de la thermie des eaux qui pourraient limiter les réponses biologiques des communautés à des mesures de réductions des altérations morphoécologiques.

3.2. HIERARCHISATION DES ALTERATIONS

Il s'agit de hiérarchiser les altérations liées aux éclusées selon leur gravité et leurs impacts biologiques supposés sur le cours d'eau, en particulier vis-à-vis des espèces cibles. Cette hiérarchisation est effectuée par type d'altération. On pourra reprendre les Figure 32 et Figure 33 pour présenter le résultat de la hiérarchisation.



La hiérarchisation a pour objectif de prioriser dans l'espace (tronçons les plus touchés) et dans le temps, les actions à mener. Elle ne signifie pas l'absence d'actions sur les altérations de moindre gravité. Il importe que les synthèses par station fassent apparaître toutes les altérations pour que l'instance de décision puisse, en concertation, les hiérarchiser et définir celles sur lesquelles agir.

3.3. DEFINITION DES OBJECTIFS D'ATTENUATION

La dernière phase de l'étape 2 consiste à reprendre chacune des synthèses hiérarchisées par station et à proposer des objectifs d'atténuation pertinents et adaptés à chaque situation. En pratique, ce travail consiste à proposer pour chaque altération, un niveau de réduction de celle-ci. Le plus simple est de fixer les objectifs en pourcentage (ou en nombre) sur la période d'éclusées, pour les différentes classes d'altération.

Un ordre de grandeur du nombre d'éclusées a priori concernées par ces objectifs d'atténuation est fourni grâce aux analyses conduites lors de l'étape 1, sur a minima 1 an et si possible 3 années de mesures.

Un exemple de définition d'objectifs (valeurs sans parenthèses présentées dans le tableau) est donné sur la Figure 36.

Indicateurs	Nombre et % d'éclusées par classe de gravité				
HABITABILITE					
Surface Favorable à la Reproduction	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	70 (11)	93 (0)	58 (19)	12 (33)	0 (169)
	30% (5%)	40% (0%)	25% (8)	5% (14%)	0% (73%)
Surface Favorable aux adultes	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
MOBILITE SUBSTRATS					
Qmax en % module	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	0 (0)	284 (138)	189 (254)	0 (53)	0 (28)
	0%	60% (29%)	40 (54%)	0 (11%)	0 (6%)
Nb impacts/mn	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
% SGF mobilisée	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
Dmax mobilisé (mm)	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc
etc					
⬇	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
	etc	etc	etc	etc	etc

Figure 36 : Exemple de synthèse des altération hiérarchisées et des objectifs d'atténuation proposés : en haut la priorité d'action la plus forte est sur l'habitabilité, en bas le niveau de priorité le plus faible est sur la mobilité du substrat. Entre parenthèses les valeurs actuelles, sans parenthèses, les valeurs « objectif » d'atténuation. Dans le cas ci-dessous, l'atténuation des impacts sur l'habitabilité à la reproduction vise à modifier les caractéristiques de 87% des éclusées de la période hivernale (73% de la classe très forte et 14% de la classe forte). C'est donc la majorité des éclusées de cette période qui seront modifiées par la mise en œuvre de mesures d'atténuation.

4. ETAPE 3. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT DES MESURES D'ATTENUATION

Dans cette étape, il s'agit de traduire les objectifs d'atténuation fixés par les parties prenantes en mesures qui permettront de les atteindre. Ces mesures peuvent être hydrologiques, morphologiques ou constructives (cf. Tome I).

Cette étape se déroule en deux temps :

- Une première phase détermine les altérations hydrologiques qu'il serait nécessaire d'atténuer pour atteindre les objectifs d'atténuation morphoécologique validés lors de l'étape précédente. Il s'agit de la phase d'identification des mesures hydrologiques ou constructives ;
- Si les mesures précédentes sont techniquement ou économiquement difficilement réalisables ou insuffisantes, il peut être proposé des mesures complémentaires morphologiques, c'est-à-dire des actions visant une adaptation de la morphologie du cours d'eau aux altérations hydrologiques engendrées par les éclusées : action sur les surfaces piégeantes, améliorations des abris hydrauliques, amélioration de la connectivité avec le chevelu hydrographique non impacté par les éclusées, etc.

Au terme de cette étape, il peut être estimé qu'il n'existe aucune mesure capable de répondre aux objectifs fixés lors de l'étape 2, ce qui nécessite de remonter à celle-ci et de réviser (généralement à la baisse), les objectifs à atteindre.

Pour rappel, la gravité d'une altération correspond au croisement de l'intensité de celle-ci avec sa fréquence.

Tout d'abord, la démarche consiste à réduire l'intensité des altérations hydrologiques qui ont conduit à des mauvais niveaux d'indicateurs, jusqu'à l'obtention de la classe de gravité correspondant à l'objectif fixé lors de l'étape 2. En reprenant le tableau des indicateurs d'altération, on y ajoute une colonne indiquant les mesures permettant de les atténuer (Tableau 42).

Cette démarche est notablement facilitée si l'on a mis en œuvre un modèle hydraulique couplé à un modèle d'habitats pour réaliser le diagnostic. Ce modèle est alors réutilisé pour évaluer les valeurs de débit appropriées, indicateur par indicateur, pour réduire l'intensité des altérations jusqu'à l'objectif visé (cf. partie 2.3.2).

Une réduction de la fréquence de l'altération peut aussi être envisagée. Il s'agit de réduire la fréquence des altérations hydrologiques pour descendre dans une classe permettant, croisée ou non avec une réduction de l'intensité de l'altération, l'atteinte des objectifs fixés. En combinant l'action sur l'intensité et la fréquence, il est possible d'obtenir des résultats plus efficaces.

Tableau 42 : Types et sous-types d'altérations morphoécologiques, leurs indicateurs de niveau d'altération et les mesures permettant de les atténuer.

Type d'altération morphoécologique	Sous-type d'altération morphoécologique	Phase du cycle biologique concernée	Descripteurs	Indicateurs	Altérations hydrologiques impactantes	Mesures d'atténuation
Mobilité des substrats	Mobilité substrats reproduction	Vie sous graviers	Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF)	Qmax exprimé en % du module	Qmax	↓Qmax
				Nb d'impacts/mn sur plaque impact		
				Superficie de SGF mobilisée / Superficie de SGF totale (% SGF mobilisée)		
	Mobilité autres substrats	Habitat en général (poissons + invertébrés)	Zones alluviales du lit mineur	Fraction granulométrique max. mobilisée		
Habitabilité	Habitabilité pour la reproduction des espèces cibles	Reproduction	Surface d'Habitat Favorable à la Reproduction (SFR)	SFR Qmax / SFR Qmédian SFR Qbase / SFR Qmédian	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
	Habitabilité pour les alevins des espèces cibles	Post-émergence	Surface d'Habitat favorable aux alevins des espèces cibles (SPUal.)	SPUal. Qmax / SPUal. Qmédian SPUal. Qbase / SPUal. Qmédian		↓Qmax
	Habitabilité pour les adultes des espèces cibles	Croissance	Surface d'Habitat favorable aux adultes des espèces cibles (SPUad.)	SPUad. Qmax / SPUad. Qmédian SPUad. Qbase/SPUad. Qmédian		↓Qmax ↑Qbase
Variabilité habitabilité	Variabilité de l'habitabilité pour les alevins	Post-émergence	Ratio de débit	Qmax /Qbase	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
			Gradient	Gradient hausse (en % du module)	Gradient	↓Gradient
			Variabilité des surfaces d'Habitat Favorable	Valeur d'Habitat al. max./Valeur d'habitat al. min.	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
	Variabilité de l'habitabilité pour les adultes	Croissance	Ratio de débit	Qmax /Qbase	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
			Gradient de hausse vertical (Grd H.)	Grd H. vertical (en % du module)	Gradient	↓Gradient
			Variabilité des surfaces d'Habitat Favorable (VHA)	VHA ad. max./VHA ad. min entre Qmax et Qbase	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
Exondation habitat favorable	Exondation des frayères de poissons lithophiles	Vie sous gravier	Surface granulométriquement favorable à la reproduction (SGF) hors en eau	[SGFmédiane Qmax éclusée reproduction - SGF Qbase vie sous gravier] / SGFmédiane Qmax éclusée reproduction	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
			Nombre de frayères effectives (nids)	% de frayères effectives exondées	Qmax et Qbase	
	Exondation des habitats des alevins (piégeage/échouage)	Post-émergence	Surfaces mouillées (Surf. mouil.)	[Surf. mouil. Qmax. -Surf mouil. Qbase]/Surf. mouil. Qmax	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
			Gradient de baisse vertical (Grd b.)	Grd b. vertical(cm/h)	Gradient de baisse	↓Gradient
Franchissabilité piscicole obstacle	Obstacle à la montaison	Migration	Conditions hydrauliques sur l'obstacle	Indice ICE	Qmax et Qbase	↓Qmax ↑Qbase
	Franchissabilité passe à poissons à la montaison		Conditions hydrauliques dans une passe à poissons	Franchissabilité des passes à poissons		↓Qmax ↑Qbase

4.1. MESURES HYDROLOGIQUES

Les mesures hydrologiques consistent en des mesures de gestion des débits turbinés directement et immédiatement réalisables par l'exploitant. Il s'agit principalement de :

- La mise en œuvre de nouvelles modalités de réalisation des éclusées (réduction du paramètre intensité de la gravité des altérations) :
  - Augmenter le Qbase jusqu'à la valeur souhaitée ;
  - Réduire le Qmax jusqu'à la valeur souhaitée ;
  - Augmenter la durée de montée et de descente de l'éclusée pour réduire les gradients ;
  - Augmenter ou réduire la durée inter-éclusées ou la durée des plateaux ;
- La modification de la fréquence des éclusées (réduction du paramètre fréquence de la gravité des altérations) :
  - Réduire le nombre d'éclusées d'une certaine intensité sur une période donnée ;
  - Voire les arrêter complètement sur une période donnée.

EXEMPLE : MODELISATION HYDRAULIQUE DANS L'AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE MESURES D'ATTENUATIONSUR LA DORDOGNE.

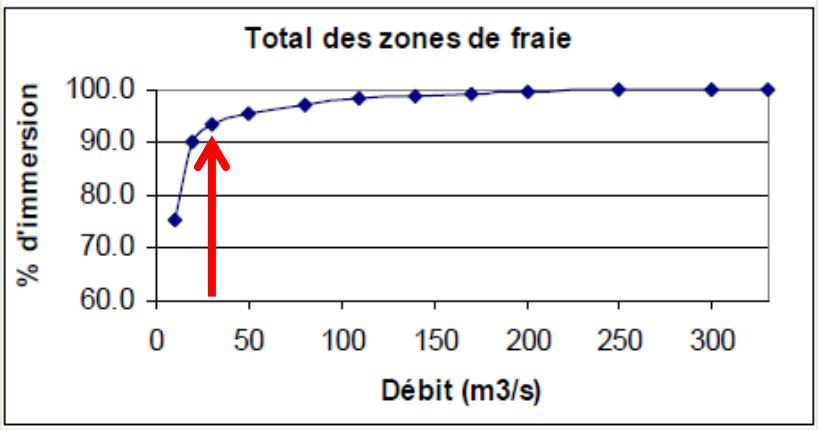


Figure 37 : Evolution des surfaces favorables à la fraie des grands salmonidés en fonction du débit sur la totalité de la Dordogne Corrézienne (Courret et al. 2006).

Dans l'exemple de la Dordogne Corrézienne, la modélisation hydraulique sur les zones de frayères favorables aux grands salmonidés permet de visualiser des seuils de débits assurant le maintien de l'ennoiement de ces frayères, seuils de débits qui peuvent constituer des valeurs guide pour des propositions de débits minimums. On voit ici qu'un seuil de débit à 35 m^3/s (flèche rouge) permet de conserver immergé 93% des zones de fraie.

Comme pour les frayères, la modélisation hydraulique permet de définir les plages de débits pour lesquelles les surfaces piégeantes évoluent très significativement et ainsi d'établir des valeurs guides pour proposer des mesures d'atténuation.

4.2. MESURES CONSTRUCTIVES

Les mesures constructives consistent à créer des ouvrages pour réduire les effets des éclusées :

- Construction de bassins de démodulation ;
- Construction de canaux de dérivation des débits turbinés vers un tronçon plus aval ;
- Modification lourde d'organes pour permettre la mise en œuvre des mesures hydrologiques.

4.3. MESURES MORPHOLOGIQUES

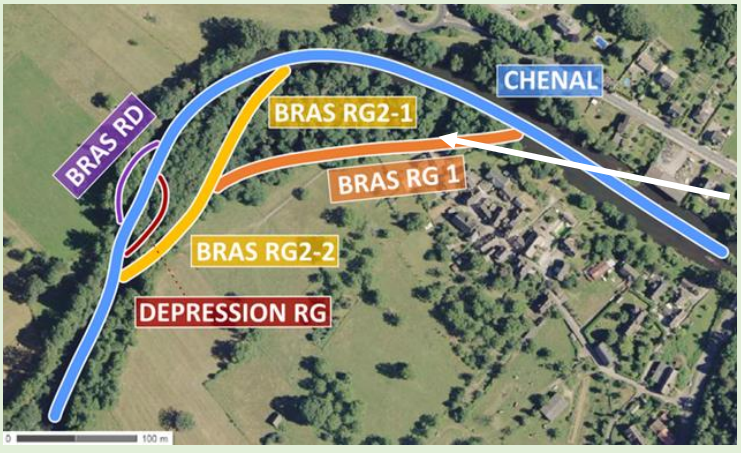
Les mesures morphologiques consistent en des travaux réalisés sur la morphologie du cours d'eau pour l'adapter aux altérations hydrologiques générées par les éclusées et réduire ainsi sa sensibilité.

La définition de mesures morphologiques consiste à :

- Localiser les secteurs du tronçon susceptibles d'en faire l'objet ;
- Proposer pour chacun de ces secteurs les mesures morphologiques les plus adaptées :
  - Réduction des surfaces piégeantes ;
  - Améliorations des abris et refuges hydrauliques (exemples Figure 38 et Figure 39);
  - Amélioration de la connectivité avec le chevelu hydrographique non impacté par les éclusées.
- Dimensionner ces mesures :
  - Réduire de n% les surfaces piégeantes dans le secteur X, de n% dans le secteur Y, etc. ;

EXEMPLE : MESURES MORPHOLOGIQUES DE RETABLISSEMENT DE LA CONNECTIVITE HYDRAULIQUE DE BRAS SUR LA MARONNE

Rivière : La Maronne (19)





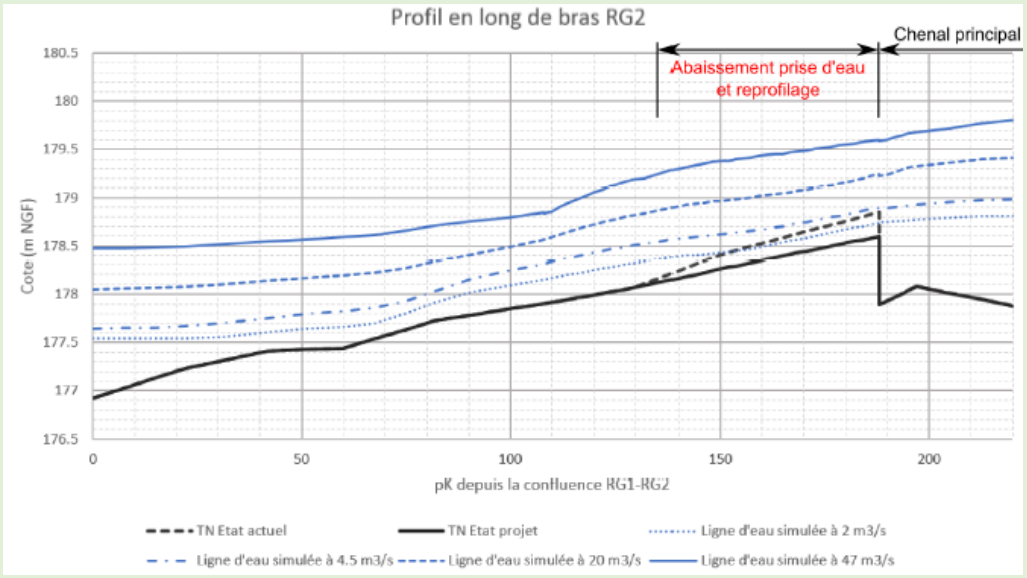


Figure 38 : Exemple de dimensionnement de travaux de réouverture de bras secondaires sur la Maronne afin de garantir une mise en eau à bas débit (TN : terrain naturel) (©ECOGEA).

Le trait en pointillé noir indique le profil en long du bras secondaire. On voit qu'il est déconnecté à une valeur de débit de 2 m^3/s et qu'il est connecté en permanence à une valeur de débit de 4,5m^3/s. Le projet consiste à rouvrir le bras secondaire pour qu'il soit toujours connecté à 2 m^3/s (profil en long en trait noir continu).

- Augmenter de n% les abris hydrauliques dans le secteur X, de n% dans le secteur Y, etc. ;
- Améliorer la connectivité avec les affluents.

EXEMPLE : MESURES D'ATTENUATION PAR POSE DE BLOCS CONSTITUANT DES ABRIS HYDRAULIQUES

Rivière : La Neste d'Aure (65)



Figure 39 : Exemple de pose de blocs dans le cadre de mesures d'atténuation de travaux hydrauliques sur la rivière Neste d'Aure (65) à la suite des crues de 2013 (©FDAAPPMA 65).

5. ETAPE 4 : CHIFFRAGE DES MESURES D'ATTENUATION

Les mesures hydrologiques, constructives et morphologiques choisies et dimensionnées lors de l'étape précédente sont analysées par les parties prenantes. Il importe qu'elles soient chiffrées et leurs effets sur d'autres usages évalués.

Au terme de cette analyse, le choix des mesures les plus efficientes, présentant le meilleur rapport cout/efficacité, et présentant le moins d'impacts sur les autres usages, est effectué par les parties prenantes. Les mesures sont alors dimensionnées plus précisément.

5.1. LES COUTS A INTEGRER

Les mesures hydrologiques peuvent se traduire par des pertes financières pour l'exploitant :

- Perte de production directement liée à la perte de productible générée par les mesures ;
- Désoptimisation, qui est plus complexe à évaluer car elle tient compte de la variabilité du cours du kWh à l'échelle de la journée, de la saison, de l'année. Le fait de ne pas réaliser une éclusée au moment où elle rapporte le plus engendre une perte financière.

Le coût des mesures constructives comprend le coût de construction et de fonctionnement, y compris le coût du foncier si nécessaire.

Une fois le dimensionnement des mesures morphologiques réalisé (linéaire à traiter et type de travaux à réaliser), on estime le coût de réalisation des travaux et si besoin d'entretien des structures (par exemple d'une passe à poissons réalisée sur un ouvrage pour améliorer la connectivité).



Compte tenu des spécificités techniques et des implications économiques et financières, le chiffrage et la proposition de mesures doivent être réalisés par le gestionnaire de l'ouvrage, en collaboration étroite avec les parties prenantes.

5.2. INTEGRATION DES DIFFERENTS ENJEUX ET USAGES

Cette première proposition de mesures est ensuite passée au crible des enjeux et usages qui pourraient être impactés, directement ou indirectement. Ce guide ne propose pas de méthode pour organiser la concertation ni la prise en compte du multi-usages, ceux-ci étant dépendants du contexte local. Cette étape n'en reste pas moins essentielle pour valider les mesures proposées ou les adapter, si nécessaire.

Dans un premier temps, il s'agit d'évaluer les incidences des mesures qui pourraient être mises en œuvre sur la production d'énergie en période de pointe pour pallier une baisse éventuelle de la production hydroélectrique. Les impacts des énergies de substitution potentiellement utilisées sur les émissions de gaz à effet de serre sont à intégrer dans cette évaluation.

Dans un deuxième temps, il s'agit d'évaluer les effets sur les usages associés à l'utilisation du tronçon de cours d'eau soumis aux éclusées et des retenues concernées :

- Incidences sur les usages associés au fonctionnement par éclusée de l'aménagement (prélèvements pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable, le soutien d'étiage, les sports d'eau vive, la pêche, etc.) ;
- Incidences sur les usages associés à la retenue délivrant les débits turbinés ou les démodulant (tourisme par exemple).

A l'aune des éléments évoqués précédemment, les parties prenantes sélectionnent les mesures les plus pertinentes et établissent leur chiffrage.



Au terme de l'étape 4, il peut être estimé que les mesures choisies ou leur dimensionnement ne sont pas techniquement réalisables, ou sont trop coûteuses ou trop impactantes sur d'autres usages et enjeux, ce qui nécessite de remonter vers les deux étapes précédentes :

- L'étape 3 en révisant le choix ou le dimensionnement des mesures (et en travaillant notamment sur des mesures morphologiques complémentaires) ;
- Voire l'étape 2 en révisant, généralement à la baisse, les objectifs d'atténuation à atteindre.

6. ETAPE 5. PILOTAGE, SUIVI ET BILAN DES MESURES D'ATTENUATION

6.1. PILOTAGE

La concertation avec les parties prenantes doit permettre de préciser si les mesures retenues peuvent, en tout ou partie, être définitives ou faire l'objet d'une expérimentation pendant une durée minimale de 3 ans. Ceci n'est évidemment pas valable pour des mesures constructives qui, par définition, ne peuvent faire l'objet d'expérimentation.

Si, *in fine*, les mesures d'atténuation des éclusées à mettre en œuvre sur un ou plusieurs aménagements ont vocation à être inscrites dans des documents réglementaires (règlements d'eau des concessions ou arrêtés d'autorisation des autres centrales), leur mise en œuvre pourra, dans un premier temps, faire l'objet d'une démarche contractuelle entre les parties prenantes. Cette dernière devrait faire mention du contexte, des objectifs, des mesures, des moyens et des outils de suivis. Elle devrait être établie pour une durée qui doit permettre d'évaluer l'efficacité des mesures (3 à 5 ans).

La mise en place d'une instance de pilotage ou de suivi de la mise en œuvre des mesures est indispensable à la bonne conduite de la démarche d'atténuation.

EXEMPLE : LA CONVENTION PLURIANNUELLE DE REDUCTION DE L'IMPACT DES ECLUSEES SUR LE BASSIN DE LA DORDOGNE.

Rivières : Dordogne, Maronne, Cère, Vézère

Contexte : A la suite de constats d'altérations et d'impacts biologiques des éclusées hydroélectriques sur les rivières Dordogne et Maronne entre 1995 et 2003 (mise en assec de pontes de poissons protégés dont certaines ont fait l'objet de procédures judiciaires), les acteurs du territoire (Etablissement public territorial du bassin de la Dordogne, EDF, Agence de l'Eau Adour-Garonne et Etat) se sont engagés depuis 2010 dans une démarche contractuelle visant à réduire les impacts des éclusées par la mise en œuvre de mesures d'atténuation accompagné d'un volet financier visant à réduire les impacts pour l'exploitant. Cette démarche a pris la forme d'une convention pluriannuelle (Figure 40).

Contenu de la convention : La convention pluriannuelle est établie pour une période de trois ans. Elle rappelle les objectifs, le rôle des parties, le pilotage et l'animation, les mesures, les suivis écologiques, les engagements financiers, les bilans énergétiques.



REDUCTION DE L'IMPACT DES ECLUSEES SUR LE BASSIN DE LA DORDOGNE

CONVENTION PLURIANNUELLE 2022-2024

SUR LES RIVIERES DORDOGNE, MARONNE, CERE ET VEZERE

CONCLUE ENTRE

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE,

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne,

L'Etablissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne,

ET L'ÉTAT

Sommaire

ARTICLE 1 - OBJET ET DUREE DE LA CONVENTION 6
ARTICLE 2 - DEFINITION DU ROLE DES PARTIES 6
ARTICLE 3 - COMITES DE SUIVI 7
ARTICLE 4 - DISPOSITIONS DE GESTION DE DEBITS MISES EN ŒUVRE PAR EDF EN VUE DE DIMINUER L'IMPACT DES ECLUSEES 8
ARTICLE 5 - RECAPITULATIF DES VALEURS CIBLES DE DEBITS ET GRADIENTS 11
ARTICLE 6 - INFORMATION A L'ATTENTION DES USAGERS 12
ARTICLE 7 - ANIMATION, SUIVI ET VALORISATION 12
ARTICLE 8 - SUIVIS ECOLOGIQUES 12
ARTICLE 9 - INFORMATIONS ENERGETIQUES 13
ARTICLE 10 - ETUDES ET RECHERCHE 13
ARTICLE 11 - MODALITES DE CALCUL DE LA REDEVANCE 13
ARTICLE 12 - AMENAGEMENTS ET TRAVAUX 14
ARTICLE 13 - MODIFICATION ET DENONCIATION DE LA CONVENTION 15
ARTICLE 14 - DIFFICULTES D'APPLICATION 15
ANNEXE 1 : EVOLUTION DES MESURES DE GESTION DES DEBITS DEPUIS 2004 17
ANNEXE 2 : RAPPEL DES PRINCIPALES MODALITES D'EXPLOITATION REGLEMENTAIRES 18

Figure 40 : Extrait de la convention pluriannuelle de réduction de l'impacts des éclusées sur le bassin de la Dordogne (https ://www.eptb-dordogne.fr/contenu/index/idcontenu/175).

EXEMPLE : REGLEMENT D'EAU APPLIQUE A L'ENSEMBLE DES AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES DU DOUBS FRANCO-SUISSE.

Rivière : Doubs

Contexte : A la suite de constats d'altérations et d'impacts biologiques des éclusées hydroélectriques sur la rivière Doubs entre 1985 et 1994 (mise en assec de pontes de poissons dont certaines espèces protégées, état piscicole dégradé), les acteurs du territoire (Etat Français et Suisse, Force Motrice du Chatelôt, Forces Motrices de la Goule, EDF, représentants des associations de pêche, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée) sont engagés depuis 2000 dans une démarche d'abord contractuelle (accord cadre pour l'amélioration des débits du Doubs) puis réglementaire visant à réduire les impacts des éclusées par la mise en œuvre de mesures d'atténuation.

Contenu du règlement d'eau : Le règlement d'eau définit des règles pour les trois aménagements hydroélectriques du territoire. Ces règles concernent les valeurs de débits réservés de chaque aménagement, des débits minimums en aval du dernier aménagement en fonction des périodes biologiques et du contexte hydrologique, les gradients des éclusées, les paliers de baisse et la démodulation par les aménagements aval. Le règlement d'eau précise les modalités de suivis et de contrôles des mesures, le monitoring écologique et les instances de pilotage (comité de suivi environnemental) (Figure 41).

Article 10 Débits à restituer par les aménagements

Les débits à l'aval de La Goule définis ci-dessous s'entendent au niveau de la station de mesure dénommée « Noirmont – La Goule ».

10.1. Pendant la période sensible définie à l'article 5 ci-dessus :

Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est égal ou supérieur à 5.6 m^3/s, le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule doit être au minimum de 7 m^3/s (les débits intermédiaires sont inclus).

Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est compris entre 5,6 et 2 m^3/s et que le lac de Moron est à une cote supérieure à 700 RPN, le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule doit être au minimum de 7 m^3/s (les débits intermédiaires sont inclus).

Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est compris entre 5.6 et 2 m^3/s avec une tendance à la baisse et que le lac de Moron est à une cote inférieure à 700 RPN, le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule doit faire l'objet d'une baisse d'au plus de 1 m^3/s tous les 2 jours jusqu'à atteindre 1.25 fois le débit à la sortie du lac des Brenets.

Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est inférieur à 2 m^3/s, le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule est au moins égal au débit entrant dans l'aménagement.

La transition entre le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule de la période sensible et celui défini en 10.2. s'effectue avec une baisse d'au plus de 1 m^3/s tous les 2 jours.

10.2. En dehors de la période sensible définie à l'article 5 :

Le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule est au moins égal à 5 m^3/s. Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est inférieur à 4 m^3/s le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule doit être au minimum égal à 1.25 fois le débit à la sortie du lac des Brenets.

Lorsque le débit à la sortie du lac des Brenets est inférieur à 2 m^3/s le débit instantané à restituer 7 jours sur 7 à l'aval de La Goule est au moins égal au débit entrant dans l'aménagement.

Article 13 Transition de débits après un turbinage continu

Après une période de turbinage continu d'au moins 5 jours, les dispositions suivantes doivent être appliquées lors qu'on repasse pour la première fois au-dessous de la valeur minimale durant cette période :

13.1. Châtelot

La baisse du débit turbiné à l'usine s'effectue par paliers et doit avoir lieu progressivement. Les valeurs de gradient de baisse sont les suivantes :

- Au-delà de 20 m^3/s : gradient de baisse maximal de 1.5 m^3/s par heure
- Entre 20 m^3/s et 7 m^3/s : gradient de baisse maximal de 1.5 m^3/s par 2 heures
- Entre 7 m^3/s et 0 m^3/s : aucun palier n'est actuellement techniquement applicable.

13.2. Refrain

La baisse du débit turbiné à l'usine du Refrain doit avoir lieu progressivement. Les valeurs de gradient de baisse sont les suivantes :

- Entre 23 m^3/s et 3 m^3/s : gradient maximal de 1 m^3/s par 2 heures.
- Entre 3 m^3/s et 0 m^3/s : un seul palier intermédiaire à 2 m^3/s est techniquement applicable, hors arrêt ou avarie du groupe 2 de l'usine du Refrain.

13.3. La Goule

Entre 23 m^3/s et 0.5 m^3/s, l'usine de La Goule reproduit le gradient de baisse du Refrain.

Figure 41 : Extrait du règlement d'eau du Doubs Franco-Suisse (https://sfv-fsp.ch/fileadmin/user_upload/Dossiers/Doubs/dfs_reglement_eau_final_publi_cle0142f7.pdf)

6.2. SUIVI DES MESURES MISES EN ŒUVRE

Une fois les mesures mises en œuvre, qu'elles soient définitives ou expérimentales, il importe qu'un suivi via des indicateurs, choisis par les parties prenantes, soit effectué pour vérifier que ces mesures permettent d'atteindre les objectifs fixés lors de l'étape 2.

Pour ce qui concerne le suivi biologique, par exemple le suivi du recrutement des poissons lithophiles, il doit être mené sur *a minima* pendant 2 années (si possible 3) avant la mise en œuvre des mesures et 3 à 5 années après pour tenir compte d'événements naturels (fortes crues ou étiages sévères) ou d'origine anthropique (pollution par exemple) pouvant influencer les peuplements.

Le suivi des mesures consiste en un suivi écologique (habitat et espèces), un suivi hydrologique et thermique et un suivi du fonctionnement des aménagements (turbinage et cotes des retenues).

Il est indispensable que le secteur de cours d'eau concerné par la mise en œuvre des mesures soit équipé de manière pérenne de dispositifs de mesures et d'enregistrement des débits et des températures de l'eau, de même que les retenues doivent être équipées de dispositifs de suivis des niveaux d'eau.

Les indicateurs choisis doivent permettre de valider le respect :

- Des valeurs de débit minimum et maximum ;
- Des valeurs de fréquence des événements.

Ces indicateurs font l'objet d'un bilan annuel précisant, le cas échéant, le nombre d'heures de non-respect des débits de bases, des gradients de montée et descente, des débits maximums et la justification du non-respect.

L'objectif de ce suivi est d'évaluer si les mesures mises en œuvre se traduisent par une atténuation des altérations hydrologiques identifiées dans le cadre de l'étude. Ce peut être réalisé a *minima* par le calcul de l'indicateur de niveau de perturbation hydrologique (INPH) de Courret (2014) (Figure 42).

Pré-mesures d'atténuation

Mise en place des mesures

Post mesures d'atténuation

	Secteur 3 - La Maronne au pont de Basteyroux					
Annee	P1	P2	P3	P4	P5	P6
2000	5	5	5	4+	5	5
2001	4+	3-	5	4+	5	5
2002	5	4+	5	5	5	5
2003	4+	4+	0	0	5	5
2004	4+	4+	5	5	5	5
2005	5	5	4-	2+	5	5
2006	5	5	2+	3+	4+	5
2007	5	5	4+	4+	5	4+
2008	5	3+	1	2+	5	5
2009	5	4-	3-	2+	5	5
2010	5	2+	2+	3-	4+	5
2011	4+	0	0	0	5	4-
2012	4+	0	1	0	0	4+
2013	3-	3+	1	0	5	4-
2014	1	0	1	2+	5	4+
2015	4-	3-	0	1	4+	3+
2016	3+	1	2+	3-	3-	4-
2017	5	0	1	2+	5	5
2018	2+	2+	0	2+	2+	4+
2019	5	1	1	0	0	3+
2020	5	0	0	1	1	5

	Secteur 1 - La Dordogne à Argentat					
Annee	P1	P2	P3	P4	P5	P6
2000	4-	4-	3+	1	3-	2+
2001	3+	3-	2+	2+	1	3+
2002	3+	3+	2-	1	3+	3+
2003	3+	3+	0	0	1	3+
2004	3+	3+	2-	0	2-	3-
2005	4-	3-	3-	0	2+	3-
2006	3+	3-	2+	1	1	3+
2007	3+	3-	0	1	3+	3-
2008	3+	0	2-	0	0	3+
2009	4-	3-	2+	0	2-	3+
2010	4-	3-	1	0	3-	4-
2011	4-	1	0	0	0	0
2012	3+	0	1	0	0	2-
2013	3+	1	1	0	1	3+
2014	2-	1	0	0	0	3+
2015	3+	1	0	0	1	2-
2016	2-	1	0	0	1	2+
2017	3-	1	0	0	1	3+
2018	1	0	0	0	0	2+
2019	3-	0	0	0	1	2+
2020	3+	0	0	0	2-	3+

Figure 42 : Exemple d'évolution des indicateurs de niveau de perturbations hydrologiques (INPH) après mise en place de mesures d'atténuation sur la Dordogne et la Maronne (Ladoux, 2021).

Au-delà des valeurs de l'INPH, l'analyse annuelle et surtout saisonnière des régimes d'éclusées doit permettre de quantifier les évolutions des paramètres en relation directe avec les mesures d'atténuation mises en œuvre (Figure 43 et Figure 44).

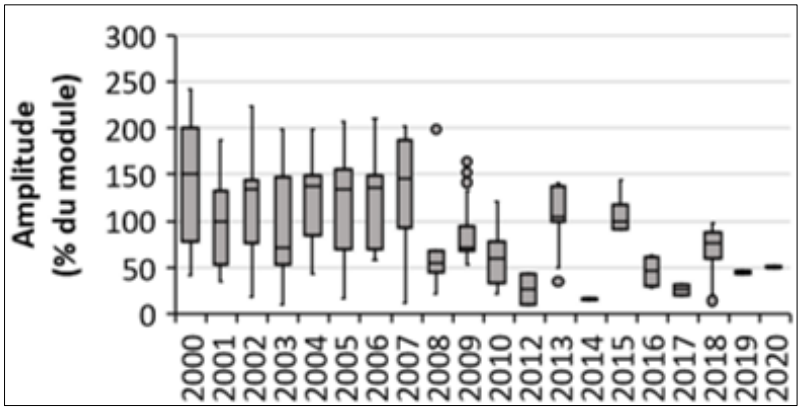


Figure 43 : Exemple d'évolution des amplitudes des baisses d'éclusées sur la Maronne à la suite de la mise en œuvre à partir de 2008 des mesures d'atténuation des éclusées (Ladoux, 2021).

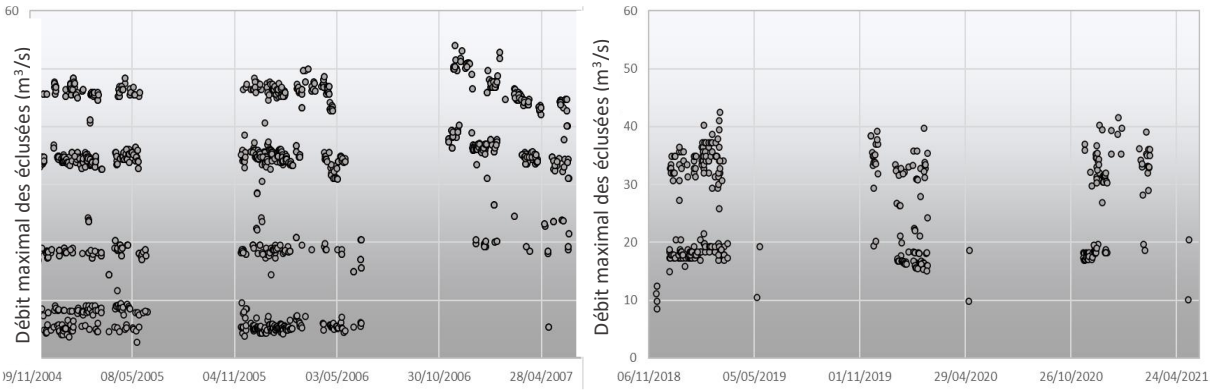


Figure 44 : Comparaison des débits maximaux des éclusées sur la Maronne à Basteyroux pour la période pré-mesures d'atténuation (à gauche) et la période post-mesures d'atténuation (à droite) (données Hydroportail).

Le recours à des indicateurs morphoécologiques permet de vérifier que l'atténuation des altérations hydrologiques se traduit par une réduction de l'intensité ou de la fréquence des altérations morphoécologiques.

Le plus simple consiste à positionner l'ensemble des éclusées réalisées après la mise en place des mesures sur les graphiques d'intensité par indicateur (Figure 45), puis à refaire les bilans de gravité par types d'altération, comme lors de la phase de diagnostic.

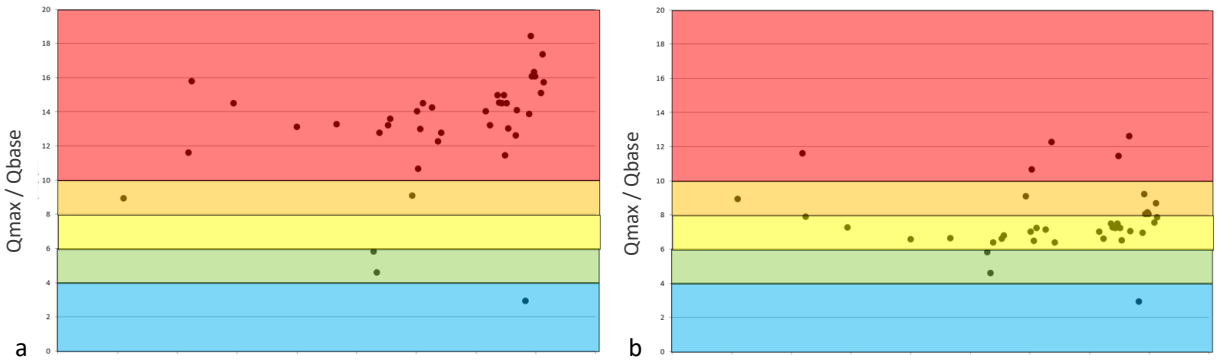


Figure 45 : Exemple fictif d'une saison d'éclusée. A) avant et b) après mise en place de mesures d'atténuation. L'indicateur est ici le rapport Qmax/Qbase.

Concernant le suivi des frayères effectives exondées, le protocole de suivi est similaire à celui présenté dans le cadre du diagnostic (voir partie 2.2.4).

Concernant le recrutement en alevins de poissons, l'indicateur le plus intéressant est l'abondance d'alevins de poissons lithophiles, qui peut être obtenue grâce à des échantillonnages ponctuels d'abondance (EPA, Protocole de Nelva et al. (1979) ; Copp 1992). Plusieurs suivis de ce type sont conduits actuellement sur différents cours d'eau, notamment la Dordogne (Cornu et al., 2022), le Gave de Pau (FDAAPPMA 65) et l'Ariège (FDAAPPMA 09).

Le protocole Vigitruite® (Roussel et al., 2022) est également une méthode qui cible l'échantillonnage d'alevins et de juvéniles de truites. Cette méthode a été développée pour les cours d'eau de Bretagne et Normandie. Les auteurs fournissent des abaques permettant de qualifier le niveau du recrutement en truitelles de l'année et en juvéniles d'1 an. Ces abaques sont fournis par classe de largeur de rivière avec une largeur maximale de 8 m.

Ces indicateurs du recrutement en poissons permettent de comparer les trajectoires d'évolution des espèces avec celle des métriques purement morphoécologique (SFR exondées, surfaces d'habitats favorables, surfaces exondées…).

METHODE D'ECHANTILLONNAGE DU RECRUTEMENT EN POISSONS PAR LA METHODE DES POINTS DE PECHES CIBLES

En 2024-2025, un travail bibliographique a été réalisé afin de proposer une méthode d'échantillonnage permettant le suivi des peuplements piscicoles dans des cours d'eau soumis aux éclusées hydroélectriques.

Objectifs	- Suivi du recrutement piscicole des espèces de poissons lithophiles avant et après modifications du régime hydrologique
Cible biologique	- Alevins des espèces de poissons lithophiles
Stratégie spatiale	Approche selon des échelles emboîtées - SECTEUR D'ETUDE : portion de cours d'eau soumis aux éclusées, - TRONÇON D'ÉTUDE : tronçons géomorphologiques de contrôle et fonctionnel ainsi que distance à la restitution de l'usine - STATION D'ECHANTILLONNAGE : succession de faciès radier/plat courant - TRAIT/POINT : ambiance au sein d'un faciès d'écoulement
Stratégie temporelle	- Échantillonnage en fin d'été - 7 à 8 années dont, si possible 2 à 3 années avant
Méthode d'échantillonnage	- Pêche électrique partielle par traits/points
Stratégie spatiale	- Stratégie privilégiée : 30 traits/points par station prospectés en zig-zag à équidistance - Adaptation possible avec stratégie ciblée sur microhabitats jugés les plus favorables sur des contextes où seule la truite est présente et où la même équipe réalisera le suivi
Biométrie	- Biométrie individualisée pour chaque trait/point + relevé de caractéristiques des habitats
Analyse des résultats	- Analyses sur la base de comparaison avant/après changements de régime hydrologique, entre tronçon, entre stations et entre année, - Intégration du contexte hydrologique (crue et perturbations liées aux éclusées) et thermique - Intégration des données d'habitat

Cette méthode est publiée dans un rapport technique (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse et ECOGEA, 2025).



Figure 46 : Vues du dispositif d'échantillonnage par points sur la Dordogne (©ECOGEA)

Les suivis écologiques s'appuient sur des observations réalisées annuellement avec pour les frayères plusieurs campagnes adaptées aux variations des débits.

Pour les descripteurs morphoécologiques, la fréquence des mesures est adaptée aux événements hydrologiques susceptibles de modifier la morphologie (crues morphogènes).

Pour l'hydrologie et la thermie, les suivis sont réalisés en continu.

6.3. BILAN DES MESURES MISES EN ŒUVRE

Le bilan des mesures d'atténuation est à réaliser au terme d'une période de mise en œuvre qui est à définir au cas par cas par les parties prenantes. Une durée de 3 à 5 ans semble pertinente, en particulier si des paramètres biologiques sont suivis.

Ce bilan comprend :

- L'évaluation, grâce au suivi présenté plus haut, du niveau d'atteinte des objectifs fixés lors de l'étape 2 et éventuellement revus lors des étapes suivantes. C'est la phase d'évaluation de l'efficacité des actions ;
- L'évaluation, optionnelle car complexe, de la contribution des différents types d'atténuation (réduction de l'intensité ou de la fréquence de diverses altérations morphoécologiques) mis en œuvre dans l'atteinte de ces objectifs ;
- L'analyse, optionnelle elle aussi, des moyens dépensés par action (coût financier et humain) pour atteindre (ou non) ces objectifs. C'est la phase d'évaluation de l'efficience des actions **;**
- L'évaluation des causes de non atteinte des objectifs pour tout ou partie d'entre eux, le cas échéant.

Il permet de décider, dans le cadre de la démarche concertée, s'il faut poursuivre en routine la mise en œuvre à long terme des mesures d'atténuation ou repasser par les étapes 3 (choix des mesures), voire 2 (définition des objectifs) pour les adapter ou en définir de nouvelles si les résultats sont jugés insatisfaisants, après avoir vérifié, bien évidemment, qu'il ne s'agit pas d'un défaut de mise en œuvre.

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE

Binns N. A., 1982. Habitat quality index procedures manual. Wyoming game and fishing department, 209p.

Cavaller M.E., 2005. Spawning behaviour of the Salmoninae subfamily members. A phylogenetic study. PhD Thesis, 202p.

Copp G., 1992. An empirical model for predicting microhabitat of 0 + juvenile fishes in a lowland river catchment. Oecologia, 91 : 338-345.

Courret D., Larinier P., Lascaux J.M., Chanseau M. et Larinier M., 2006. Etude pour une limitation des effets des éclusées sur la Dordogne en aval de l'aménagement du Sablier pour le saumon atlantique – secteur Argentat Saulières. Rapport MIGADO 8D-06-RT/GHAAPPE RA.06.02.

Courret D., 2014. Problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques sur les populations de poissons : caractérisation des régimes d'éclusées et du niveau de perturbation hydrologique. Thèse INP Toulouse, 218p.

Delacoste M., Baran P., Lek S., Lascaux J. M., 1995. Classification et clé de détermination des faciès d'écoulements en rivières de montagne. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, (337-338-339), 149–156.

ECOGEA, 2025. Elaboration d'une méthodologie standardisée pour évaluer la dynamique du recrutement de diverses espèces de poissons lithophiles dans un cours d'eau. Présentation de la méthodologie. Rapport ECOGEA pour Agence de l'Eau Rhône Méditerranée-Corse. 40p.

Hayes J.W., Jowett I., 1994. Microhabitat Models of Large Drift-Feeding Brown Trout in Three New Zealand Rivers. North American Journal of Fisheries Management 14(4):710-725.

Hayes D.S., Bruno M.C., Alp M., Boavida I., Batalla R.J., Bejarano M.D., Noack M., Vanzo D., Casas-Mulet R., Vericat D., Carolli M., Tonolla D., Halleraker J.H., Gosselin M.-P., Chiogna G., Zolezzi G., Venus T.E., 2023. 100 key questions to guide hydropeaking research and policy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 187, 2023, 113729, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113729.

Malavoi J.R., 1989. Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. Bull. Fr. Pêche Piscic., 315, 189-210.

Malavoi J.R., Souchon Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière. Clé de détermination qualitative et mesures physiques. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture. 365/366, 357-372.

Malavoi J., Bravard J.P., 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. Collection "Comprendre pour Agir", ONEMA (ed), 228p.

Pouilly M., Valentin S., Capra H., Ginot V., Souchon Y. 1995. Méthode des microhabitats, principes et protocoles d'application. Bull. Fr. Pêche Piscic. (1995) 336 : 41-54.

Raleigh R.F, Zuckerman L.D., Nelson P.C., 1984. Habitat suitability index models and instream flow suitability curve: brown trout. U.S. Fish Wildl. Serv. FWS/OBS-82/10.71., 71p.

Roussel J.M., Bardonnet A., 1999. Ontogeny of diel pattern of stream margin habitat use by emerging brown trout (Salmo trutta L.) in experimental channels: influence of food and predator presence. Environmental Biology of Fishes 56: 253–262.

Sabaton C., Miquel J., 1993. La méthode des microhabitats un outil d'aide au choix des débits réservés en aval des ouvrages hydroélectriques. Expérience d'Electricité de France. Hydroécol Appl., 5 vol , 127-163.

Sabaton C., Valentin S., Souchon Y., 1995. La méthode des micro-habitats. Protocoles d'application. EDF-DER HE-31/95/10.

Shirvell C.S., Dungey R.G, 1983. Microhabitats Chosen by Brown Trout for Feeding and Spawning in Rivers. Trans. Am. Fis Soc., 112(3): 355-367.

Valette L., Chandesris A., Mengin N., Malavoi J.-R., Souchon Y., Wasson J.-G., 2008. SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE. Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique. Cemagref, 27 p

Vismara R., Azzellino A., Bosi R., Crosa G., Gentili G., 2001. Habitat suitability curves for brown trout (Salmo trutta fario L.) in the River Adda, Northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches. Regulated Rivers Research & Management 17(1):37-50.

Wolman, M.G., 1954. A Method of Sampling Coarse River-Bed Material. Transactions—American Geophysical Union, 35, 951-956.

ANNEXE 2 : ÉLÉMENTS DE CONNAISSANCE SUR LES ESPECES PISCICOLES CIBLES

Dans le guide, plusieurs terminologies sont utilisées pour qualifier les différents stades de développement des poissons :

- Reproduction : phase de pontes des géniteurs ;
- Larves : phase correspondant au stade biologique allant de l'éclosion (larves avec le sac vitellin) jusqu'à la post-émergence (individus < 20-30 mm) ;
- Alevins : phase allant de la post-émergence jusqu'à la fin de la 1ère année (nommé également 0+) ;
- Juvéniles : individus non matures correspondant souvent aux poissons de 1 voire 2 ans (nommé également 1+) ;
- Adultes : individus mâtures

LISTES DES ESPECES PISCICOLES CIBLES PRE-SELECTIONNEES

Tableau 43 : Liste et statuts des espèces cibles présélectionnées

Nom commun	Nom latin	Code	Statut UICN France	Convention de Berne	Directive européenne "Habitats"	Arrêté protection œufs (8/12/1988)
Barbeau fluviatile	*Barbus barbus*	BAF	LC		Ann V	
Barbeau méridional	*Barbus meridionalis*	BAM	NT	Ann III	Ann II	x
Hotu	*Chondrostoma nasus*	HOT	LC	Ann III		
Toxostome	*Parachondrostoma toxostoma*	TOX	NT	Ann III	Ann II	
Vandoise et vandoise rostrée	*Leuciscus leuciscus et Leuciscus burdigalensis*	VAN	DD			x
Spirlin	*Alburnoides bipunctatus*	SPI	LC	Ann III		
Blageon	*Telestes souffia*	BLN	LC	Ann III	Ann II	
Truite fario	*Salmo trutta fario*	TRF	LC			x
Ombre commun	*Thymallus thymallus*	OBR	VU	Ann III	Ann V	x
Chabot commun	*Cottus gobio*	CHA	LC	Ann II	Ann II	
Lamproie de Planer	*Lampetra planeri*	LPP	LC	Ann III	Ann II	x
Apron du Rhône	*Zingel asper*	APR	EN	Ann III	Ann II	x

LC (Least Concern) : Préoccupation mineure ; NT : (Near Threatened) : Quasi menacée ; DD (Data Deficient) : Données insuffisantes ; VU (Vulnerable) : Vulnérable ; EN (Endangered) : En danger

Accès informations : https://professionnels.ofb.fr/fr/node/61#pois

EXIGENCES ECOLOGIQUES

Tableau 44 : Reproduction et développement des œufs

Espèces	Période de reproduction	Comportement ponte		T°C seuil	°C jours émergence	T°C létale	Type de substrats	Conditions hydrauliques
Truite commu	mi-octobre-fin décembre	Creusement nids et enfouissement œufs		<7°C	620-765 °C jour	12-16°C	Petit galet-gravier	10-70 cm/ 10-50 cm/s
Ombre commu	Mars-avril	Creusement nids et dépôt œufs		>6-10°C	276-320°C jour		Gravier	20-80 cm/ 20-100 cm/s
Hotu	avril à mi-mai	Dépôt œufs – adhérence substrat	Pontes non fractionnées	>9-10°C	150-200 °C jour	20°C	Galet	20- 80 cm / >60-70 cm/s
Toxostome	Mars-Mai	Creusement nids et dépôt œufs – adhérence substrat	Pontes non fractionnées	>12°C			Gravier-petit galet	
Barbeau commun	Mi-mai à fin juin	Creusement nids et dépôt œufs -	Fractionnement des pontes	>14°C	110-140°C jour		Gravier-petit galet	20-40 cm/20-60 cm/s
Barbeau méridional	Mai-juillet	Creusement nids et dépôt œufs	Fractionnement des pontes	>14°C	Non connu		Gravier-petit galet	20-40 cm/10-75 cm/s
Spirlin	Mai-juillet	Dépôt œufs – adhérence substrat	Fractionnement des pontes	>14°C	110-120°C jour		Gravier-petit galet ou bois morts	10-20 cm/20-50 cm/s
Blageon	Avril-Juin	Dépôt œufs – adhérence substrat	Pontes non fractionnées	>12°C	90-110°C jour		Gravier	15-35 cm/s
Vandoise	Mars-avril	Dépôt œufs – adhérence substrat	Pontes non fractionnées	>7-9°C	150-250°C jour	25°C	Gravier-Galet – substrat « très propre »	20-40 cm/20-90 cm/s
Chabot	Février-avril	Dépôt œufs - adhérence substrat		>8-10°C	275°C jour		Galets – petits blocs	
Apron du Rhô	Février-avril	Dépôt œufs – adhérence substrat	Fractionnement des pontes	>10-11°C	200-400°C jour		Gravier	20-30 cm
Lamproie de planer	Mars-avril	Creusement nids et dépôt œufs		>8-11°C			Gravier	3-30 cm/10-25 cm/s

Tableau 45 : émergence et post-émergence

Espèces	Période d'émergence	°C jours émergence	Habitats des alevins et alevins émergentes	Conditions hydrauliques
Truite commune	mi-mars - fin juin	620-765 °C jour	Zones très proches des berges	10-20 cm / <10-15 cm/s
Ombre commun	mi-avril - fin juin	276-320°C jour	Zones très proches des berges puis bancs galets	<20 cm / <20 cm/s
Hotu	Mai	150-200 °C jour	Zones très proches des berges – criques et anses abritées du courant	10-20 cm / <10 cm/s
Toxostome	Avril-Mai			
Barbeau commun	Juin-juillet	110-140°C jour + une semaine sup dans le gravier	Zones très proches des berges puis bancs galets	10-20 cm / <10-15 cm/s
Barbeau méridional	Juin-Juillet	Non connu	Bancs de galets	10-20 cm / <10-15 cm/s
Spirlin	Juin-juillet	110-120°C jour	Zones très proches des berges avec structures abris type bois mort/blocs	10-40 cm/0-15 cm/s
Blageon	Mai-juin	90-110°C jour	Zones peu profondes à courant très faible	10-30 cm/<15 cm/s
Vandoise	Mai-juin	150-250°C jour	Zones très proches des berges puis bancs galets	
Chabot	Avril-juin	275°C jour	Radier-rapide-plat courant - couche limite substrat de petits galets	<20 cm/10-40 cm/s
Apron du Rhône	Avril-juin	200-400°C jour	Faciès très peu courant	

Tableau 46 : juvéniles

Espèces	Type de faciès	Conditions hydrauliques	Type de substrat	Températures Opt min- max	Régime alimentaire	Type de comportement
Truite commune	Radier/plat courant/chenaux secondaires	10-30 cm – 10-50 cm/s		4-17°C	Alevins d'invertébrés	Espèce pleine eau mais à proximité du fond, nage statique pour la nutrition Territorial
Ombre commun	Plat courant/radier	40-60 cm – 20-40 cm/s			Alevins d'invertébrés	Espèce pleine eau mais à proximité du fond, nage statique pour la nutrition Territorial-banc
Hotu	Radier/rapide/plat courant			15-25°C	Alevins d'invertébrés puis algues	Espèce pleine eau mais à proximité du fond, déplacement en banc pour la nutrition Banc
Toxostome	Plat courant/plat					
Barbeau commun	Radier/plat courant	10-20 cm- 10-50 cm/s	Galet	13-24°C	Alevins d'invertébrés	Espèce pleine eau mais à proximité du fond, déplacement en banc pour la nutrition Banc
Barbeau méridional	Plat/plat courant/radier				Phyto et zooplancton puis d'invertébrés	
Spirlin	Radier/plat courant/plat			12-24°C	Alevins d'invertébrés	Espèce pleine eau, déplacement en banc pour la nutrition
Blageon	Plat courant/radier			13-15°C	Alevins d'invertébrés et insectes terrestres	Espèce pleine eau, déplacement en banc pour la nutrition Banc
Vandoise	Plat/plat courant/radier			12-25°C	Alevins d'invertébrés	
Chabot	Rapide/radier/plat courant	10-30 cm - 10-50 cm/s	Galet		Alevins d'invertébrés	Espèce benthique Territorial

Espèces	Type de faciès	Conditions hydrauliques	Type de substrat	Températures Opt min- max	Régime alimentaire	Type de comportement
Apron du Rhône	Rapide/radier	>20 cm/5->40 cm/s	Galet		Alevins d'invertébrés	Espèce benthique de jour et évoluant sur le fond la nuit Territorial
Lamproie de planer	Plat/profond/plat courant	5-70 cm – 0-10 cm/s	Sable/vase			Espèce vivant enfouie dans les substrats fins

Tableau 47 : adultes

Espèces	Type de faciès	Conditions hydrauliques	Températures Opt min- max	Régime alimentaire	Type de comportement
Truite commune	Profond, chenaux lotiques et lentiques, plat courant	>30 cm – 10-70 cm/s	12-17°C	Larves d'invertébrés, poissons, batraciens, insectes terrestres	Espèce pleine eau mais à proximité du fond, nage statique pour la nutrition Forte utilisation des abris Territorial
Ombre commun	Chenaux lotiques, plat profond courant	>60 cm – 40-110 cm/s		Larves d'invertébrés, insectes terrestres	Espèce pleine eau Faible utilisation des abris
Hotu	Chenaux lotiques, plat courant		15-24°C	Algues, larves insectes, crustacé	Espèce de pleine eau vivant en banc et se nourrissant en râclant les substrats
Toxostome	Chenaux lentiques, plat courant	>60 cm – 0.1-0.3 m/s	16-25°C	Larves d'invertébrés, Algues	Espèce de pleine eau vivant en banc et se nourrissant à la fois de la dérive et sur le fond
Barbeau commun	Chenaux lotiques, plat courant	>60 cm – 0.7-1.2 m/s	10-24°C	Larves d'invertébrés, Algues	Espèce de fond vivant en banc et se nourrissant en râclant les substrats
Barbeau méridional	Plat courant, profond	>60 cm – 0.5-0.8 m/s		Larves d'invertébrés, Algues	Espèce de fond vivant en banc et se nourrissant en râclant les substrats
Spirlin	Plat courant, radier/rapide	>10 cm – 0.1-1 m/s	12-24°C	Larves d'invertébrés, insectes terrestres	Espèce de pleine eau vivant en banc et se nourrissant de la dérive des larves
Blageon	Chenaux lotiques, plat courant	10-80 cm – 0.1-0.7 m/s	10-18°C	Larves d'invertébrés, insectes terrestres	Espèce de pleine eau vivant en banc et se nourrissant de la dérive des larves
Vandoise	Chenaux lentiques, plat courant	>80 cm – 0.1-0.4 m/s	10-25°C		
Chabot	Radier/rapide Plat courant	>20 cm – 30-100 cm/s	8-18°C	Larves d'invertébrés	Espèces benthique vivant au niveau des interstices du substrat
Apron du Rhône	Radier, plat courant		15-25°C	Larves d'invertébrés	Espèce benthique à alimentation surtout nocturne
Lamproie de planer	Zone de bordure avec des sédiments fins	<10 cm/s		Filtreur, larves, crustacés, mollusques	Vit enfouie dans les sédiments fins

CALENDRIER BIOLOGIQUE

Tableau 48 : Calendrier biologique des différentes espèces de poissons (NB : il s'agit d'une vision large pour l'ensemble des cours d'eau. Au sein de chaque bassin, les périodes réelles sont plus resserrées et seront à déterminer en fonction du contexte local).

	Périodes							
	Reproduction		**Vie sous-gravier**		**Emergence**		Post-émergence	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
Truite commune	15-oct	20-janv	15-oct	15-juin	15-mars	30-juin	01-mai	31-juil
Ombre commun	01-mars	30-avr	01-mars	31-mai	15-avr	15-juin	01-mai	31-juil
Hotu	01-avr	15-mai	01-avr	15-juin	01-mai	30-juin	15-mai	15-juil
Toxostome	01-mars	15-mai	01-mars	31-mai	01-avr	15-juin	01-mai	15-juil
Barbeau commun	15-mai	15-juil	15-mai	31-juil	01-juin	31-juil	01-juil	31-juil
Barbeau méridional	01-mai	15-juil	15-mai	31-juil	01-juin	31-juil	01-juil	31-juil
Spilrin	01-mai	15-juil	15-mai	31-juil	01-juin	31-juil	01-juil	31-juil
Blageon	01-avr	31-mai	01-avr	30-juin	01-mai	30-juin	15-mai	15-juil
Vandoise	01-mars	30-avr	01-mars	31-mai	01-mai	15-juin	01-juin	15-juil
Chabot	15-févr	15-avr	15-févr	31-mai	01-avr	15-juin	01-mai	31-juil
Apron du Rhône	01-févr	15-avr	01-févr	30-mai	01-avr	15-juin	01-mai	15-juil
Lamproie de planer	01-mars	30-avr						

ANNEXE 3 : QUANTIFICATION DES ALTERATIONS HYDROLOGIQUES LIEES AUX ECLUSEES

L'objectif de cette annexe est de présenter comment :

- préciser le régime hydrologique naturel du cours d'eau en dehors de l'aménagement hydroélectrique ;
- quantifier les altérations hydrologiques liées aux éclusées ;
- finaliser la sectorisation en tronçons qui serviront au choix de stations représentatives pour mener les investigations approfondies.

Pour ce faire, deux types de données sont à mobiliser :

- des données permettant de caractériser l'hydrologie actuelle sous la restitution par exemple, les données des stations hydrométriques DREAL ou d'EDF-DTG. Elles peuvent être complétées par des données de stations n'enregistrant que des hauteurs d'eau, des données d'exploitation de ou des centrales ou de suivis ponctuels mis en œuvre dans le cadre d'étude spécifiques ;
- des données permettant de caractériser l'hydrologie naturelle du ou des tronçons avant aménagement. Il peut être difficile de disposer de données historiques avant l'implantation de l'aménagement ou de données sur des tronçons amont non influencés par l'hydroélectricité ou d'autres usages.



En l'absence de données hydrologiques, on peut envisager une instrumentation du secteur d'étude en implantant des sondes de niveau. Ces suivis peuvent aider à caractériser les éclusées (nombre, d'amplitude et gradient de hauteur d'eau). Pour disposer de valeurs de débit, il est nécessaire de construire une courbe de tarage au niveau des sondes ce qui réclame des investigations plus longues et plus coûteuses. L'outil de caractérisation des perturbations hydrologiques (INPH, Courret 2014) ne fonctionne pas sur des données de hauteur d'eau.

La qualification des caractéristiques de l'hydrologie naturelle doit s'appuyer sur des chroniques longues (20 ans minimum) pour être représentatives. Il est possible d'utiliser des chroniques moins longues mais il faut rester prudent sur les valeurs de débits obtenus. Lorsque l'on utilise des données historiques, il convient de les analyser avec prudence en tentant de les recaler, le cas échéant avec de longues chroniques disponibles à proximité dans le bassin.

Pour appréhender la variabilité des régimes d'éclusée, nous préconisons d'analyser au minimum 3 années de données hydrologiques et plutôt 5 années si les informations sont disponibles.

L'analyse des données doit être conduite pour chaque période du cycle biologique des espèces cibles. Pour la croissance, l'analyse peut porter soit sur l'ensemble de l'année soit sur les périodes de plus forte activité de nutrition à savoir le printemps et l'été pour la majorité des espèces.

La recomposition des caractéristiques principales du régime hydrologique naturel peut être réalisée sur la base :

- de données historiques (avant aménagement) disponibles sur le tronçon (situation assez rare) ;

- de stations dans des tronçons peu ou pas influencés en amont ou sur des affluents en appliquant des corrections liées au bassin versant ;
- de modélisation pluie-neige-débit (modèle MORDOR (Paquet, 2004)).

La recomposition doit permettre *a minima* de disposer des débits moyens mensuels, des débits moyens journaliers et si possible des débits de crues et d'étiage caractéristiques (annuels, bisannuels et quinquennaux).

Il est important d'analyser à la fois les données hydrologiques disponibles et surtout leur représentativité par rapport aux différents tronçons identifiés (TCF et TGF) et aux altérations liées aux éclusées.

Il est ainsi nécessaire :

- de confronter le découpage entre tronçons de contrôle géomorphologique (TCG) et la présence des stations hydrométriques et de vérifier que les confluences importantes ont été prises en compte dans les découpages des tronçons et que les données hydrométriques sont disponibles en aval de ces confluences ;
- de savoir s'il est possible de caractériser l'hydrologie de chaque tronçon géomorphologique fonctionnel (TGF).

Si l'analyse de représentativité des stations hydrométrique montre que l'hydrologie de certains tronçons est mal caractérisée, il est nécessaire de la recomposer. Pour ce faire, l'ensemble des données hydrologiques disponibles à proximité (affluents, tronçon court-circuité amont) seront recherchées. Des données de fonctionnement des aménagements hydroélectriques pourront également apporter des informations. L'objectif n'est pas de recomposer les débits aux pas de temps variables mais plutôt de quantifier les caractéristiques des régimes d'éclusée à savoir les débits de base et les débits maximaux des éclusées

A chaque station hydrométrique disponible en aval de l'aménagement, il est nécessaire d'adjoindre les caractéristiques identifiées dans le tableau suivant.

Tableau 49 : Caractéristiques nécessaires à l'interprétation des données hydrologiques.

Type de données
Taille du bassin versant intermédiaire depuis la restitution de l'usine – identification des confluences
Taille du bassin versant intermédiaire depuis les points de restitution du ou des débits réservés
Distance à la restitution
Présence de restitutions d'autres aménagements
Présence de prélèvements et/ou dérivations supplémentaires
Tronçon(s) de contrôle géomorphologique associé(s)



La conduite du diagnostic des altérations repose sur la disponibilité en données hydrologiques permettant de qualifier la situation au minimum de tous les tronçons de contrôle géomorphologique (TCG) et de s'assurer que l'hydrologie représente l'ensemble des tronçons géomorphologiques fonctionnels (TGF). En cas d'absence de données ou de données peu représentatives (stations hydrométriques très éloignées de la restitution), nous proposons une approche « dégradée » pour l'évaluation des altérations hydrologiques. Des suivis par sondes de niveau peuvent être réalisés mais ils réclament une durée minimale et l'acquisition de données de débit demande des investigations plus lourdes.

CONTEXTE HYDROLOGIQUE GENERAL

Le diagnostic doit permettre de caractériser l'hydrologie non influencée du tronçon ainsi que certaines caractéristiques particulières du tronçon soumis aux éclusées. Ces caractéristiques à recueillir sont le module, le débit médian, les 1er et dernier déciles, et le débit maximal journalier annuel, biennal, quinquennal et décennal.

Chacune des caractéristiques hydrologiques correspond à des conditions hydrauliques et morphologiques susceptibles d'influencer les différentes phases du cycle biologique et la qualité des habitats. Des valeurs de débits, notamment des débits classés d'un tronçon non influencé, peuvent fournir des éléments comparatifs avec les débits d'éclusée. Plus les débits d'éclusées s'éloignent des valeurs médianes notamment, plus les impacts pourront être significatifs.

QUANTIFICATION DES ALTERATIONS HYDROLOGIQUES

La caractérisation précise des éclusées au cours des différentes périodes biologiques est indispensable afin :

- De quantifier le niveau d'altération du régime hydrologique pour chaque phase du cycle biologique des espèces cibles ;
- De qualifier les principales caractéristiques du régime d'éclusée (variabilité saisonnière, hebdomadaire et journalière) ;
- De préciser si le régime d'éclusée est plutôt pénalisant par la répétition d'événements ou par des évènements très intenses ;
- De conduire les mesures et observations de terrain dans les conditions les plus représentatives de la gestion par éclusée.

Les fiches récapitulatives par tronçon soumis aux éclusées, issues de l'analyse des risques réalisées pour les états des lieux 2019 des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse (Baran et Ville, 2018) fournissent des informations sur le niveau de perturbation hydrologique par saison. L'analyse a été conduite sur 3 années de 2014 à 2017.

Tableau 50 : évaluation de l'aléa hydrologique dans les EDL des bassins RM et Corse (2019- Baran et Ville , 2018)

PERTURBATION HYDROLOGIQUE - ALEA (calcul sur 3 années)				
Période	Indicateur	Aléa	Type de calcul	QTVAR
Annuel	4-	Fort	Commentaires:	
Automne	4+	Fort	150 à 200 éclusées annuelles. Régime d'éclusée saisonnalisé	
Hiver	3+	Moyen	avec peu de variations en été. Débit de base faible (15% du	
Printemps	3+	Moyen	module). Amplitudes fortes (110-130% du module)	
Eté	3+	Moyen		

L'identification des éclusées sur la base des données de débits ou de hauteur d'eau à pas de temps variable ou fixe est réalisée en utilisant la méthode développée par Courret (2014). L'outil disponible en ligne (https://www.researchgate.net/publication/352453221_Hydropeaking-Indicator-2020-06xlsm) est un classeur Excel permettant d'identifier les éclusées dans les hydrogrammes et de les caractériser (débit de base, amplitude, gradients, débit maximal).

La visualisation et l'analyse de l'hydrogramme disponible dans l'onglet Fiche de la feuille de calcul Excel permet une 1ère approche globale du régime d'éclusée, où on pourra reporter les différentes phases du cycle biologique du ou des espèces cibles.

EXEMPLE : CARACTERISATION DE L'HYDROLOGIE INFLUENCEE

Exemple de **la Dranse à l'aval de Bioge** sur la station hydrométrique de Reyvroz (module de 19.7 m^3/s) :

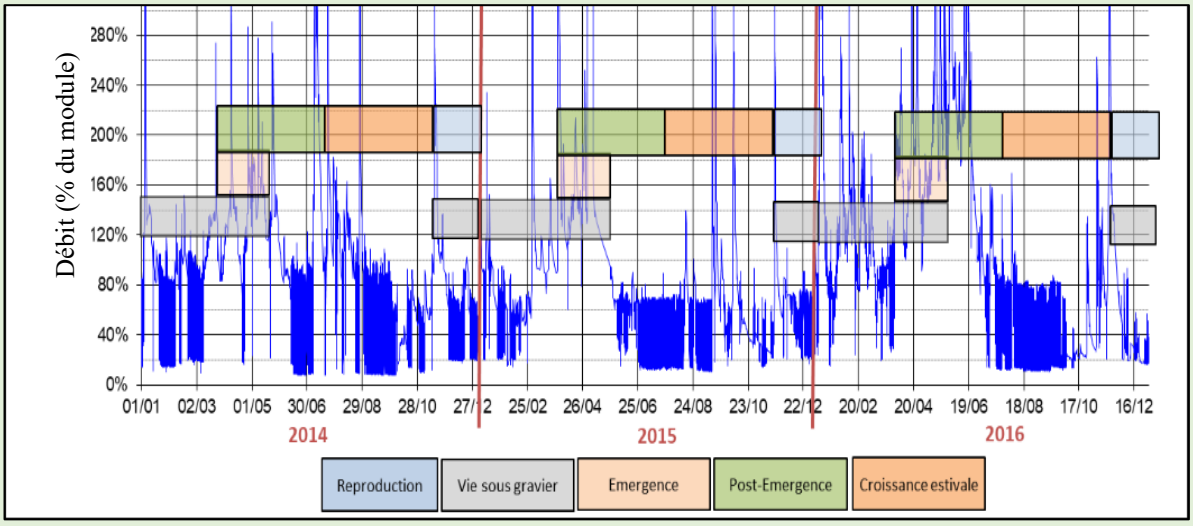


Figure 47 : Exemple d'hydrogramme produit par l'outil de caractérisation des éclusées et superposition des cycles biologiques (Courret, 2014)(La Dranse à Reyvroz (données Hydroportail)).

Le régime d'éclusées de la Dranse présente une variabilité saisonnière avec des éclusées tous les ans pendant la période de croissance estivale, la reproduction et le début de la vie sous-gravier. Durant les périodes d'émergence et de post-émergence, les éclusées sont moins nombreuses avec plus de variabilité interannuelle.

L'analyse des hydrogrammes des éclusées doit porter sur la saisonnalité du régime d'éclusées, la variabilité des éclusées (des débits de base et des débits maximaux), la variabilité interannuelle et la présence d'éclusée atypique (faible débit de base ou forte amplitude).

Les onglets Baisse et Hausse de la feuille de calcul Excel permettent de disposer de l'ensemble des éclusées identifiées avec l'ensemble de leurs caractéristiques. Le traitement de ces données permet de caractériser la variabilité interannuelle et saisonnière des régimes d'éclusées.

Identification d'éclusées atypiques

La 1ère analyse détaillée des régimes d'éclusées doit porter sur la recherche d'éclusées « atypiques » pouvant constituer des évènements très impactants. L'analyse doit s'appuyer sur les valeurs minimales et maximales des baisses et hausses disponibles dans les onglets CaractBaisse et CaractHausse de la feuille de calcul de l'indicateur éclusée ainsi que sur l'examen de l'hydrogramme.

EXEMPLE : RECHERCHE D'ECLUSEES ATYPIQUES

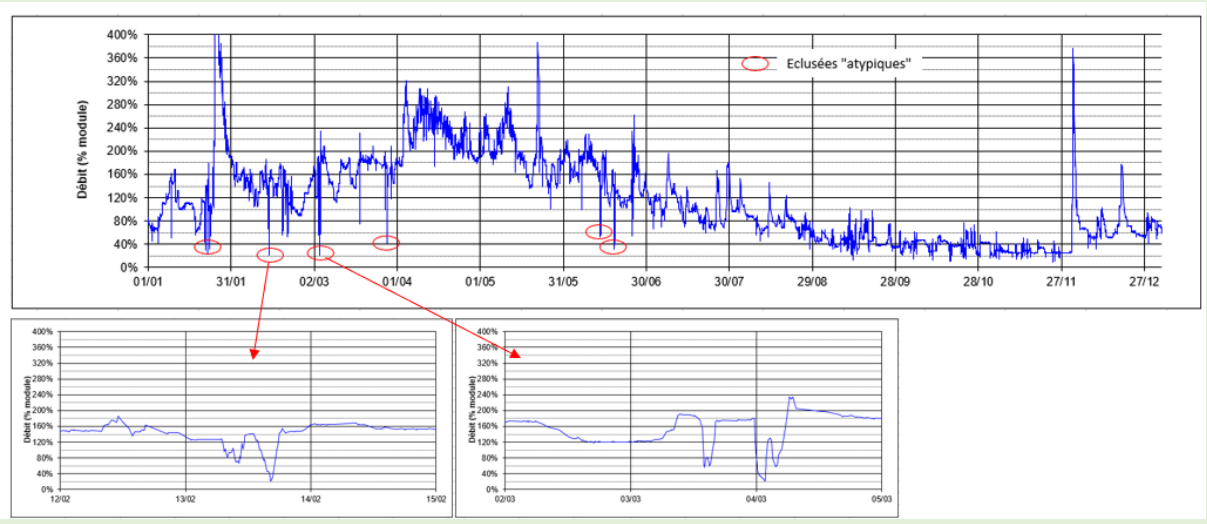


Figure 48 : Exemple de régime présentant des éclusées atypiques - module : 40 m/s (données Hydroportail)).

Commentaire : Le régime d'éclusées se caractérise par quelques évènements particuliers en hiver ou au printemps correspondant à des retours très ponctuels à des débits de base faible (20% du module), évènements pouvant induire des exondations de frayères et des échouages-piégeages importants.

Description détaillée du régime d'éclusées

L'onglet Fiche permet de visualiser en plus de l'hydrogramme l'ensemble des éclusées identifiées sous la forme de graphiques où chaque baisse et hausse d'éclusées est représentée par son débit de base, son amplitude et son gradient.

Les onglets CaractBaisse et CaractHausse permettent de disposer de statistiques des principales caractéristiques (nombre d'éclusée, débit de base, amplitude, débit maximal, gradients).

Valeurs caractéristiques des paramètres des baisses d'éclusées par année

	Nombre de baisses	Débit de base (m^3/s)								Débit maximum (m^3/s)								Amplitude (m^3/s)							
Année		Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9
2014	133	1.5	4.3	16.3	2.0	3.7	3.9	4.1	5.6	7.7	13.5	21.4	10.7	11.9	13.2	15.0	17.6	3.0	9.3	15.0	5.9	7.8	9.4	10.7	13.4
2015	126	2.9	7.7	17.6	3.4	4.3	6.1	11.1	14.1	5.8	15.4	24.9	9.7	12.9	14.2	18.2	21.4	2.0	7.7	18.8	3.4	4.4	7.4	10.1	12.4
2016	98	2.1	5.5	17.6	2.9	3.4	4.9	6.3	8.6	5.8	14.7	24.9	7.3	10.0	15.1	18.6	21.6	2.3	9.2	19.2	3.4	5.9	9.0	12.5	14.2

Valeurs caractéristiques des paramètres des baisses d'éclusées par année

	Gradient ($m^3/s/h$)								Rapport								Amplitude rapportée au débit de base							
Année	Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	Min	Moy	Max	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	Min	Moy	Max	Somme	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9
2014	0.3	6.1	24.4	1.3	1.9	4.1	9.1	12.6	1.21	3.78	8.41	2.05	2.97	3.45	4.44	5.83	0.21	2.78	7.41	369	1.05	1.97	2.45	3.44	4.83
2015	0.3	8.7	36.9	0.9	2.6	6.4	12.5	19.9	1.21	2.42	5.53	1.29	1.41	2.13	3.25	3.74	0.21	1.42	4.53	179	0.29	0.41	1.13	2.25	2.74
2016	0.3	8.0	32.2	1.5	2.9	4.8	12.0	16.3	1.33	2.93	8.11	1.64	2.11	2.95	3.48	4.01	0.33	1.93	7.11	188.98	0.64	1.11	1.95	2.48	3.01

Figure 49 : Extraits de l'onglet CaracBaisse de la feuille de calcul de l'Indicateur éclusée.

Ces données sont analysées pour chaque période du cycle biologique. Elles permettent d'identifier les caractéristiques des éclusées les plus pénalisantes à savoir celles présentant les plus faibles débits de base, les plus fortes amplitudes et gradients.

EXEMPLE : CARACTERISATION DES BAISSES ET HAUSSES D'ECLUSEES PÉRIODE DE REPRODUCTION DE LA TRUITE

Exemple de résultats pour la rivière d'Ain à l'aval de l'Allement, sur la station hydrométrique V2712010 – Pont d'Ain (module : 104 m^3/s)

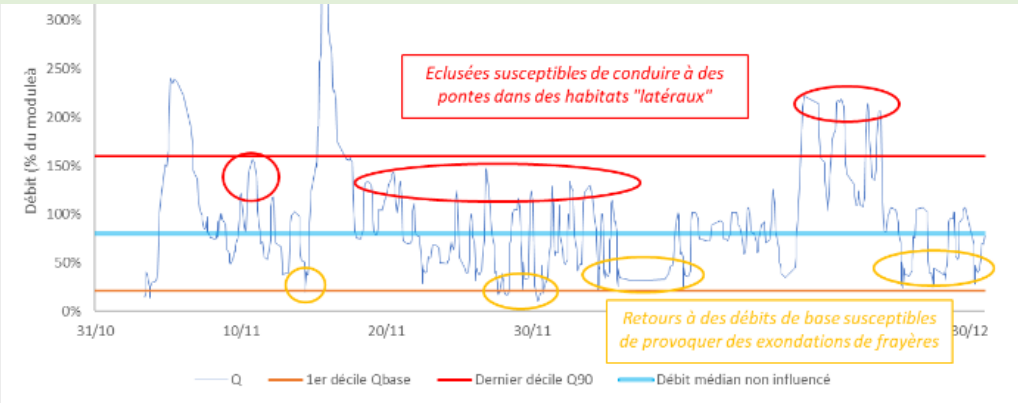
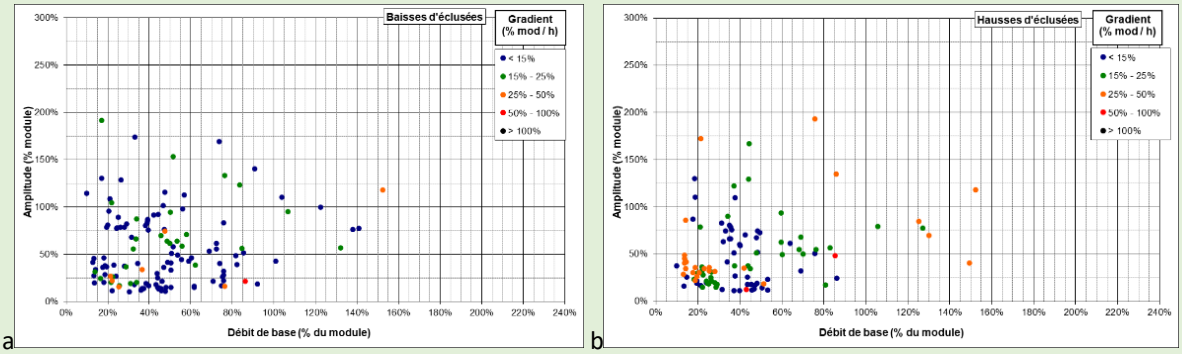


Figure 50: Régime d'éclusées sur l'Ain à Pont d'Ain pour la période de reproduction et de début de vie sous gravier des œufs de truites de l'automne 2013 (données Hydroportail)).



a b

Figure 51: caractérisation des hausses et baisses d'éclusées pendant a) les périodes de reproduction et b) de début de vie sous gravier des œufs de truite sur l'Ain à Pont d'Ain de 2013 à 2015 (données Hydroportail)

Préparation des données pour la phase de diagnostic des altérations morphoécologiques

La quantification des altérations morphoécologiques réalisée lors du diagnostic devra s'appuyer sur le tableau listant toutes les éclusées et leurs caractéristiques pour chaque phase du cycle biologique. Ce tableau sera composé en regroupant les deux onglets Baisse et Hausse du fichier Excel de l'indicateur éclusée.

Tableau 51 : Extraits des feuilles Baisse et Hausse qui permettent de récapituler toutes les éclusées et leurs caractéristiques de la Dranse à Bioge

Baisse d'éclusées

Débit avant baisse (m3/s)	Débit après baisse (m3/s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m3/s)	Gradient moyen ([m3/s]/h)
15.00	1.77	1/7/14 0:21	1/7/14 1:42	13.23	9.80
18.00	1.65	1/7/14 15:49	1/7/14 17:00	16.35	13.82
11.10	1.69	1/7/14 22:21	2/7/14 0:54	9.41	3.69
19.80	1.72	2/7/14 15:57	2/7/14 17:05	18.08	15.95
14.30	1.81	22/8/14 23:39	23/8/14 0:48	12.49	10.86
19.10	1.86	23/8/14 15:32	23/8/14 16:42	17.24	14.78
19.90	1.77	24/8/14 5:54	24/8/14 16:54	18.13	1.65
9.14	1.74	24/8/14 23:05	24/8/14 23:48	7.40	10.33

... | Baisse | CaractBaisse | CaractBaisse2 | Hausse | CaractHausse | Caract

Baisse d'éclusées

Débit avant baisse (m3/s)	Débit après baisse (m3/s)	Date Début (jour)	Date Fin (jour)	Amplitude totale (m3/s)	Gradient moyen ([m3/s]/h)
15.00	1.77	1/7/14 0:21	1/7/14 1:42	13.23	9.80
18.00	1.65	1/7/14 15:49	1/7/14 17:00	16.35	13.82
11.10	1.69	1/7/14 22:21	2/7/14 0:54	9.41	3.69
19.80	1.72	2/7/14 15:57	2/7/14 17:05	18.08	15.95
1.80	9.20	25/8/14 20:18	25/8/14 21:00	7.40	10.57
1.65	16.80	31/8/14 17:05	31/8/14 20:30	15.15	4.43
3.19	15.90	1/9/14 19:49	1/9/14 21:03	12.71	10.31
1.86	7.01	2/9/14 1:42	2/9/14 2:18	5.15	8.58

... | Baisse | CaractBaisse | CaractBaisse2 | Hausse | CaractHausse | CaractH



ATTÉNUER LES IMPACTS ÉCOLOGIQUES DES ÉCLUSÉES HYDROÉLECTRIQUES

TOME 2 : MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES MESURES D'ATTÉNUATION

Le SDAGE Rhône-Méditerranée, dans sa disposition 6A-10 (Réduire les impacts des éclusées sur les cours d'eau pour une gestion durable des milieux et des espèces), appelle à identifier des scénarios de gestion pour atténuer ou supprimer les impacts des éclusées hydro-électriques en tenant compte des enjeux socio-économiques et énergétiques, dans un cadre concerté avec l'ensemble des acteurs et usagers du territoire et en cohérence avec les objectifs de la loi relative à la transition énergétique.

Le secrétariat technique du bassin Rhône-Méditerranée publie un guide en deux tomes, en appui à la mise en œuvre de cette démarche.

Le tome 1, publié en mai 2026, établit un état de l'art de la connaissance des altérations et des impacts écologiques d'un fonctionnement par éclusées, ainsi qu'un bilan des méthodes utilisées pour évaluer ces impacts.

Ce tome 2 détaille les différentes étapes d'une démarche concertée d'atténuation des impacts des éclusées tenant compte du contexte local. Cette démarche consiste à établir un diagnostic des altérations et des impacts des éclusées sur les milieux aquatiques puis, en fonction de ces impacts et de leur gravité, à identifier, à dimensionner et à suivre dans le temps les mesures d'atténuation.

Ce document s'adresse aux maîtres d'ouvrages des aménagements hydro-électriques fonctionnant par éclusées, aux structures compétentes pour la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations (GEMAPI) sur des cours d'eau concernés par ce type d'aménagement mais aussi aux bureaux d'étude et aux services de l'État et ses établissements publics (agences de l'eau et Office français de la biodiversité) qui accompagnent les gestionnaires d'ouvrage et des milieux.

Il est mis à disposition sur le site internet du bassin Rhône-Méditerranée :
www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr

PRÉFET DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale de l'environnement,
de l'aménagement
et du logement Auvergne Rhône-Alpes
5 place Jules Ferry - Immeuble Lugdunum
69453 LYON CEDEX 06

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE

Agence de l'eau
Rhône Méditerranée Corse
2-4 allée de Lodz
69363 LYON CEDEX 07

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

OFB OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

Office Français de la Biodiversité -
Délégation régionale Auvergne-Rhône-Alpes
Parc de Parilly
Chemin des chasseurs
69500 Bron

© illustration couverture : © Veodis 3D