



- RAPPORT D'ETUDE -



© image utilisée sous licence stock.adobe.com

2021 N° 10/16

Dévalaison des anguilles sur les fleuves côtiers méditerranéens

Analyse du fonctionnement hydrologique des grands fleuves côtiers et proposition d'une méthodologie d'anticipation de la dévalaison

PERRIER C., RIVOALLAN D. • Mai 2022



Photo de couverture
(© MRM)

Référence à citer

PERRIER C., RIVOALLAN D., 2021. Dévalaison des anguilles sur les fleuves côtiers méditerranéens : Analyse du fonctionnement hydrologique des grands fleuves côtiers et proposition d'une méthodologie d'anticipation de la dévalaison- 17p.

1 Contexte et objectifs de l'étude

L'Anguille européenne (*Anguilla anguilla*, L., 1758) est un migrateur amphihalin soumis à de multiples pressions, qui ont conduit cette espèce au bord de l'extinction (réduction de plus de 95% des effectifs en 40 ans¹). Parmi ces pressions, plusieurs études ont montré un retard à la migration ou une surmortalité significative en lien avec la présence d'aménagements hydroélectriques^{2 3}.

Cette migration (appelée « dévalaison »), constitue la première étape vers l'aire de reproduction supposée des anguilles. Il est donc primordial d'obtenir des connaissances sur les mécanismes qui régissent ce comportement. Ces avancées permettront de mettre en place des mesures de gestion permettant de sécuriser la migration des futurs reproducteurs.

Toutefois, le sujet reste peu documenté sur la façade méditerranéenne, où les cours d'eau possèdent un fonctionnement particulier, avec des pics de crues très violents et brefs.

L'étude pilotée par MRM vise à répondre à ce besoin de connaissances, et *in fine* à proposer une méthode pour anticiper les périodes propices pour la dévalaison. Pour parvenir à ce résultat, les recherches de l'association combinent deux approches :

- Une expérimentation *in situ* sur un petit fleuve côtier des Alpes-Maritimes (la Cagne), avec un suivi de la dévalaison d'anguilles marquées par RFID (*rapport 2021 N°09/15*).
- Des analyses *ex situ* du comportement hydrologique des grands fleuves côtiers de Méditerranée, qui constitueront le cœur de ce rapport.

Les analyses menées ces dernières années ont d'ailleurs abouti à une proposition opérationnelle, avec la méthode « 2x le module ». L'hypothèse est qu'au-delà de ce seuil de débit, un épisode de dévalaison serait susceptible de se produire si le pic de débit a lieu durant la période de migration (septembre-avril). Cette approche a été testée avec succès sur la Cagne, puisque depuis le lancement du suivi, toutes les dévalaisons ont été enregistrées au-delà de ce seuil de débit. Des résultats similaires ont aussi été mis en avant par une analyse bibliographique réalisée en 2020⁴.

Néanmoins, la transposabilité de cette approche sur un bassin plus imposant pose question, d'autant que les résultats de 2020 montraient la nécessité d'intégrer le rôle des affluents sur les analyses ciblant les grands fleuves côtiers. Ces tributaires peuvent en effet restituer des anguilles dévalantes lors de pics de débits, qui peuvent ou non être synchrones avec ceux du fleuve.

Afin de mettre à l'épreuve l'approche « 2x le module », de nouveaux outils d'analyses doivent être utilisés. Le choix s'est porté sur « SilvRpeak », un modèle prédictif de la dévalaison développé par le *Muséum National d'Histoire Naturelle* et EDF R&D⁵. Il sera utilisé dans ce rapport pour confronter les résultats obtenus via la méthode « 2x le module ».

Les analyses 2021 se sont concentrées sur le fleuve Var et ses affluents, qui présentent des enjeux particulièrement forts en termes de dévalaison et de production hydroélectrique.

¹ : Dekker W., 2003. Worldwide decline of eel resources necessitates immediate action. *Fisheries*, 28(12): 28-30.

² : Winter H. V., Jansen H. M., Breukelaar A., 2007. Silver eel mortality during downstream migration in the River Meuse, from a population perspective. *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1444-1449.

³ : Dainys, J., Staknas, S., Gorfine, H., Ložys, L. 2018. Mortality of silver eels migrating through different types of hydropower turbines in Lithuania. *River Research and Applications*, 34(1): 52-59.

⁴ : Perrier C., Campton P., 2021. Dévalaison des anguilles sur les fleuves côtiers méditerranéens : Suivi 2019/2020 RFID sur la Cagne & Caractérisation du fonctionnement hydrologique des côtiers de grande envergure. - 52p. + Annexes.

⁵ : Teichert N., Tétard S., Trancart T., De Oliveira E., Acou A., Carpentier A., Bourillon B., Feunteun E., 2020. Towards transferability in fish migration models: A generic operational tool for predicting silver eel migration in rivers, *Science of The Total Environment*, Vol. 739: 140069.

2 Une approche *in situ* nécessaire pour améliorer les modèles théoriques

2.1 Des enjeux de gestion à court terme

Compte tenu de l'état critique de la population d'Anguilles européennes à l'échelle mondiale, des mesures de gestion à court terme doivent être proposées pour limiter immédiatement la mortalité des anguilles migrantes au droit des ouvrages hydroélectriques. Les approches proposées, qui pourront par exemple être utilisées pour cibler des périodes propices à des arrêts de turbinages, devront néanmoins être affinées progressivement par le retour d'expérience de futures études *in situ*.

Ce rapport sera centré sur la mise en situation des deux outils présentés dans la partie Contexte (le modèle *SilvRpeak* et la méthode « 2x le module »), pour prédire des événements de dévalaison sur le fleuve Var et ses affluents. Ces deux approches ont déjà fourni des résultats prometteurs, en prédisant avec succès des épisodes de dévalaison observés *in situ*, notamment dans le cadre de l'étude RFID de la Cagne conduite par MRM.

Cependant, le contexte hydrologique de la Cagne (petit fleuve côtier) reste très différent de celui d'un grand bassin côtier, ce qui incite à ne pas transposer tel quel les résultats, et à décliner ces analyses hydrologiques sur d'autres bassins côtiers.

2.2 Un objectif de connaissance à moyen-long terme

Pour mémoire, l'étude de la dévalaison des anguilles sur des fleuves côtiers méditerranéens de grande envergure avait été lancée dès 2015 par l'Association MRM, en partenariat avec EDF et la FDAAPPMA 06. L'objectif était de mettre en place une étude par télémétrie pour étudier *in situ* le comportement de migration. Malheureusement, sur ce type d'hydrosystème, les opérations de prospections visant à capturer des anguilles argentées avaient soulevées de fortes difficultés logistiques, à savoir :

- La difficulté à échantillonner assez d'anguilles argentées;
- Un comportement hydrologique très chaotique du Var, rendant complexe l'implantation d'un dispositif de suivi pérenne en situation de crue.

MRM a donc modifié son approche, en tentant de caractériser et de comparer *ex situ* le fonctionnement hydrologique des différents fleuves côtiers de Méditerranée. Plusieurs critères de caractérisation ont été proposés dans le rapport de 2019, à savoir :

- La cohérence amont-aval des débits sur un bassin versant ;
- L'estimation de la contribution des affluents aux crues observées à l'aval ;
- Le nombre moyen de crues saisonnières ;
- Les caractéristiques des deux premières crues automnales (dates, intensités, etc.)

L'objectif visé à long terme par cette approche est d'identifier un fleuve côtier dont le fonctionnement serait proche de celui du Var, tout en étant plus abordable d'un point de vue méthodologique. En effet, les données issues d'une expérimentation *in situ* sur un grand côtier de Méditerranée apporteraient des données indispensables pour certifier l'efficacité des approches théoriques proposées pour assurer une gestion de la dévalaison au droit d'ouvrages hydroélectriques. Ces investigations sont en cours.

3 Les fenêtres de dévalaison sur le Var

L'évolution journalière des conditions hydrologiques globales ou locales sur les grands bassins, associés à des problématiques de continuité écologique, peuvent engendrer des modalités de migrations différentes. Plusieurs études attestent de migrations fragmentées des anguilles argentées, avec des alternances de déplacements et de pauses^{6 7}.

Les dévalaisons observées sur la Cagne corroborent ce type de comportement. En effet, de multiples cas de dévalaisons « partielles » ont été notés, au cours desquels les anguilles dévalaient une partie du cours d'eau, puis stoppaient temporairement leur migration.

Ces différentes observations tendent à illustrer la capacité des anguilles à stopper leur dévalaison si les conditions deviennent moins favorables à celles-ci. Dès lors, il est pertinent de supposer que sur un bassin versant de grande taille, plusieurs crues successives seront nécessaires pour assurer un transit complet de la totalité des individus migrants.

3.1 Les différentes modalités de dévalaison possibles

- **Le temps et le nombre de crues nécessaires à la dévalaison :**

L'une des principales différences supposées entre des hydrosystèmes de petite et de grande taille réside dans le temps nécessaire à une anguille pour dévaler. En effet, la dévalaison prendrait logiquement plus de temps à une anguille sur un grand bassin aménagé comme le Var que sur un petit fleuve comme la Cagne, long de quelques kilomètres seulement et dépourvu d'obstacle majeur à la dévalaison.

- **Des plages horaires de migration plus étalées :**

L'étude de l'évolution horaire du débit sur la Cagne durant les pics de migration, permet d'observer à quel moment d'un pic de crue la dévalaison est la plus importante. Les résultats montraient une forte hétérogénéité, avec des détections ayant lieu aussi bien au moment de la montée des eaux que de la décrue. Ce résultat peut en partie s'expliquer par le temps nécessaire aux anguilles situées les plus à l'amont pour dévaler, mais aussi par des départs tardifs de certains individus.

Or, sur un grand bassin côtier, il est pertinent de supposer que ce phénomène sera d'autant plus amplifié que le bassin possède un linéaire à dévaler important. Par sécurité, il serait prudent de cibler l'ensemble d'un pic de crue lors d'actions de gestion.

- **La notion primordiale de la contribution des affluents au flux migratoire**

Également, l'étude de la Cagne ne permet pas d'intégrer la contribution des affluents au stock d'anguilles migrantes. Or, les analyses conduites dans le cadre de l'étude « Grands côtiers » ont montré que certains affluents peuvent présenter de forts enjeux en termes de migration sur ces systèmes de grande taille. Ils doivent par conséquent être pris en compte dans les projections de dévalaison.

⁶ : Bruijs M., Durif C., 2009. Silver Eel Migration and Behaviour. In: van den Thillart G., Dufour S., Rankin J.C. (eds) Spawning Migration of the European Eel. Fish & Fisheries Series, Vol. 30. Springer, Dordrecht

⁷ : Drouineau H., Bau F., Alric A., Deligne N., Gomes P., Sagnes P., 2017. Silver eel downstream migration in fragmented rivers: use of a Bayesian model to track movements triggering and duration. Aquat. Living Resour. Vol. 30., 19p.

Le retour d'expérience de la Cagne et la synthèse bibliographique publiée en 2020 permettent aussi d'avancer qu'une attention et une réactivité particulière doivent être portées aux premières crues, qui semblent particulièrement stimulantes pour la migration. Plusieurs cas de figures (présentés dans le *Tableau 1*) peuvent être distingués pour ces anguilles migrantes, en fonction de leur provenance et de l'homogénéité/hétérogénéité des conditions hydrologiques sur le bassin.

Tableau 1 : Rappel des différents scénario de dévalaison possibles sur un fleuve côtier de Méditerranée

Anguilles en provenance du fleuve		
N°	Contexte hydrologique	Enjeu en termes de migration
CAS N° 1	Une crue « éclair » a lieu sur le fleuve. Les anguilles situées les plus à l'amont ne peuvent dévaler qu'en partie avant le retour à la normale du débit. Elles peuvent stopper leur dévalaison ou la poursuivre	S'il s'agit d'une des premières crues de la saison, il y a un très fort enjeu de dévalaison.
CAS N° 2	Une crue de plusieurs jours a lieu sur le fleuve. Les anguilles ont le temps de dévaler la totalité du linéaire avant le retour à des conditions d'avant crue. Les conditions sont réunies pour que la migration se poursuive	On suppose ensuite que plus les crues se multiplient sur une saison, plus leur intérêt vis-à-vis de la dévalaison décroît (le système se vide progressivement de ses anguilles)
Anguilles en provenance d'un affluent		
N°	Contexte hydrologique	Enjeu en termes de migration
CAS N° 3	La première crue d'un affluent a lieu AVANT la première crue du fleuve : Les anguilles dévalantes de l'affluent peuvent potentiellement mettre en pause leur dévalaison si le fleuve n'est pas encore en crue, et la poursuivre lors de la hausse de débit suivante du fleuve.	Si l'affluent n'est pas pourvu d'ouvrages hydroélectriques, les mesures de gestions ne s'appliqueront que lors de des premières crues du fleuves Dans le cas contraire, il s'agit d'une adaptation à un affluent des CAS N° 1 ou 2
CAS N° 4	La première crue d'un affluent a lieu en même temps que l'une des premières crues du fleuve	Les mesures de gestion sont mises en place immédiatement sur le fleuve (ET sur l'affluent si des ouvrages sont présents)
CAS N° 5	La première crue d'un affluent a lieu APRES les deux premières crues du fleuve	Les mesures de gestion s'appliquent donc pour cette la crue du fleuve qui suit la première crue de l'affluent

3.2 Les prédictions de dévalaison obtenues

a) Fonctionnement et lecture du Modèle SilvRpeak

SilvRpeak est un outil de modélisation qui peut être utilisé avec le logiciel R, pour visualiser des périodes probables de dévalaison. Développé conjointement par le MNHN, EDF R&D et l'OFB ce modèle automatisé a été publié dans *Science of the Total Environment*. Il a été mis à disposition de MRM pour les besoins de l'étude.

Cette approche intègre indirectement les dévalaisons potentielles depuis les affluents, via la taille du bassin versant (programmée dans le logiciel). Ainsi, plus le bassin sera grand, plus le nombre de crue identifiées comme intéressantes sera élevé.

De fait, SilvRpeak n'établit pas réellement de corrélation entre les probabilités de dévalaison sur les affluents et celles du fleuve. Le modèle a donc été appliqué aux données de débit du fleuve puis à celles de trois affluents (Estéron, Tinée et Vesubie), qui sont également intégrés dans l'approche développée par MRM, présentée au paragraphe suivant. Cette approche permettra de comparer les prédictions de dévalaison des deux méthodes. La Figure 1 ci-dessous illustre un exemple de modélisation de SilvRpeak pour la saison de migration 2016-2017.

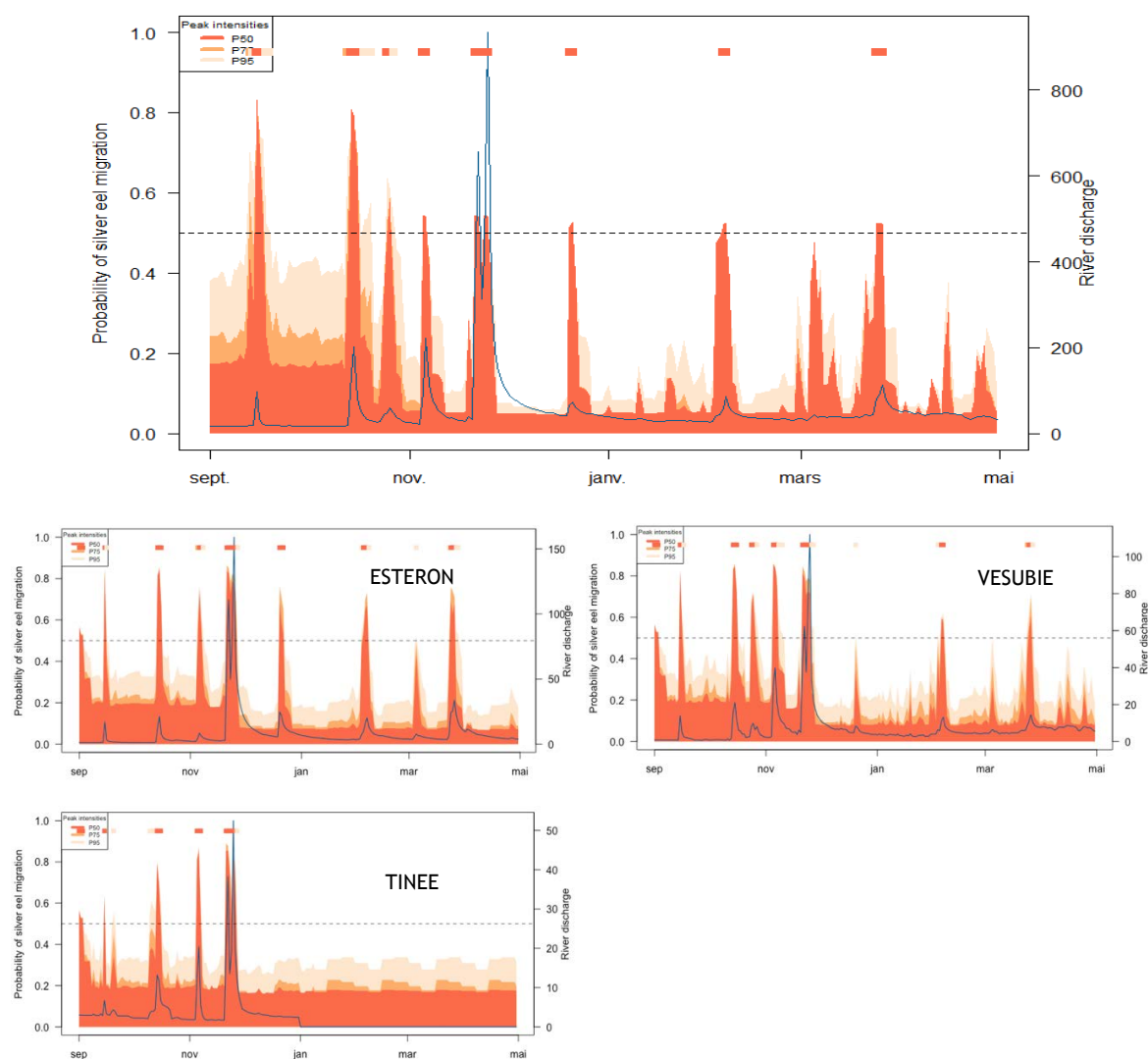


Figure 1 : Pics de dévalaison potentiels prédits par le modèle SilvRpeak sur le bassin du Var (saison 2016-2017)

Les courbes P50/P75/P95 estiment l'intensité (en pourcentage : 50, 75, 95) des pics de migration prédits par le modèle par rapport au débit maximum observé sur chaque pic. La ligne en pointillée symbolise une probabilité de 50% d'observer de la dévalaison et constitue la valeur minimale nécessaire pour prendre en compte le pic de migration. Les pics de débits franchissant ce seuil sont identifiés par des carrés orange sur le haut du graphique. De fait, les événements les plus intéressants sont donc ceux qui théorisent la plus forte probabilité de dévalaison (ici 80% pour les pics de fin octobre et fin novembre).

b) Fonctionnement et lecture de la méthode développée par MRM

Cette approche théorise un seuil à partir duquel le débit augmente suffisamment pour engendrer de la dévalaison, fixé à *2x la valeur du module du cours d'eau étudié*.

Le caractère « arbitraire » de cette approche constitue sa principale limite, mais les analyses présentées en 2020 attestent néanmoins de la cohérence de la démarche. En effet, la méthode a été expérimentée avec succès sur la Cagne et transposée à d'autres études dans le cadre d'une approche bibliographique.

Lorsque les données sont disponibles, cette approche permet donc de prendre en compte le rôle des affluents lors des différents pics de dévalaisons potentiels. La méthode « 2x le module » a également été appliquée à la saison 2016-2017 du Var (Figure 2).

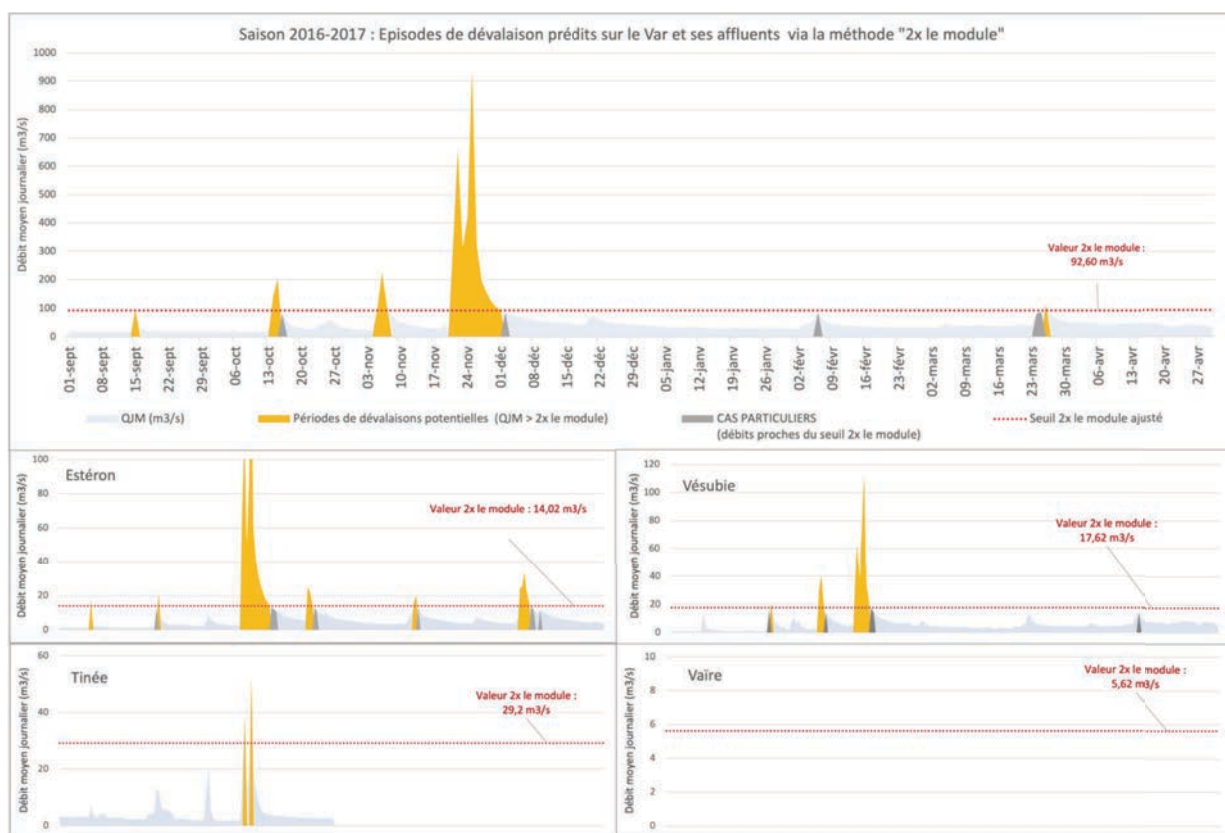


Figure 2 : Périodes probables de dévalaison prédites par la méthode 2x le module pour la saison 2016-2017 du bassin du Var. Les données sont indisponibles sur la Vaire pour cette saison.

Plusieurs notions sont impliquées dans la construction et la lecture de ce résultat :

Le seuil « *2x le module* » a été défini comme pouvant être assimilé à une crue « annuelle » à la suite d'échanges avec l'unité RiverLy de l'INRAe. Cette notion définit une fréquence de retour d'un an, soit la plus petite valeur possible pour définir une hausse de débit comme une crue.

Les périodes probables de dévalaison sont identifiées par les aires en orange, qui correspondent à tous les débits moyens journaliers franchissant ce seuil.

Comme abordé précédemment, la méthode « *2x le module* » établit aussi une certaine hiérarchie entre les différents pics de crue d'une saison, même si tous peuvent engendrer de la dévalaison.

Ce choix est justifié par les résultats obtenus sur la Cagne, ainsi que dans d'autres études décrites dans la recherche bibliographique de 2020. Ces approches *in situ* montrent une plus grande quantité d'anguilles dévalantes détectées lors de ces premiers pics de crues.

Cette priorisation rejoint le parti pris du modèle SilvRpeak, qui fait décroître l'intérêt des crues pour la dévalaison au fur et à mesure qu'elles se multiplient sur une saison.

Ainsi, les deux premiers pics sont considérés comme particulièrement critiques, dans la mesure où ils vont amorcer la saison de dévalaison. Les pics suivants ne doivent néanmoins pas être négligés, particulièrement sur un bassin de grande taille. Ils permettront la poursuite des migrations engagées lors des deux premiers pics de crues, mais pourront également stimuler des dévalaisons plus tardives dans la saison.

3.3 Comparaison des résultats des deux méthodes

a) Une approche globale saison par saison

Pour les 30 dernières saisons de migration du Var, le nombre de pics de dévalaisons prédits par chacune des deux méthodes a été comparé. Il faut toutefois garder à l'esprit que les périodes potentielles de dévalaisons sont identifiées différemment par les deux méthodes.

L'approche « 2x le module » identifie des périodes potentielles de dévalaison en définissant un seuil de débit journalier à atteindre. Un événement sera comptabilisé dès lors qu'il franchit ce seuil. L'approche SilvRpeak identifie quant à elle des périodes potentielles de dévalaison en associant une probabilité de dévalaison à chaque débit journalier. Par défaut, un événement sera considéré comme intéressant (et donc comptabilisé) lorsque la probabilité de dévalaison atteint 50% (comm. pers. Nils Teichert).

Le nombre d'événements de dévalaisons potentiels comptabilisés pour chaque saison par les deux méthodes est présenté dans la Figure 3 ci-dessous.

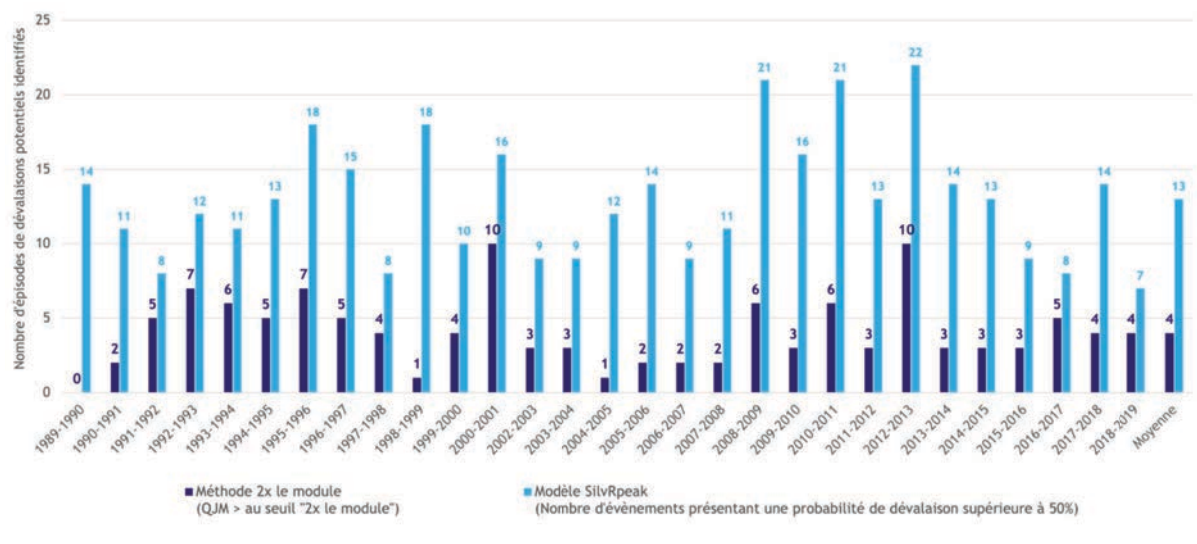


Figure 3 : Comparaison du nombre d'épisodes de dévalaisons potentiels identifiés avec les méthodes « 2x le module » et SilvRpeak.

Le modèle SilvRpeak identifie bien plus de fenêtres de dévalaisons potentielles que la méthode « 2x le module » (13 en moyenne par saison, contre 4 pour la méthode développée par MRM). Ce résultat s'explique par le fait que le modèle du MNHN se base sur les débits classés pour prédire la dévalaison. Il prend donc en compte des variations de débit bien plus faibles que celles de la méthode 2x le module. Néanmoins, les analyses montrent une certaine concordance des deux modèles sur le fleuve Var, puisque la totalité des épisodes de dévalaisons prédits par la méthode « 2x le module » sont identifiées par SilvRpeak.

b) Comparaison des deux approches sur une saison « classique » du Var

Compte tenu de la très grande variabilité interannuelle des débits sur un grand fleuve côtier comme le Var, il est délicat de définir des années « standard ». Toutefois, les analyses réalisées en 2019 avaient montré plusieurs caractéristiques récurrentes sur le bassin du Var :

Le fleuve présente un fonctionnement typique des cours d'eaux cévenols, avec des pics de crues brefs mais intenses, et des montées en crue suivies de décrues très rapides. La période de survenue la plus récurrente pour les premières crues saisonnières du Var se situe entre septembre et décembre, avec une moyenne de 4 crues par saison, présentant dans plus de 85% des cas un QJM max inférieur au seuil biennal (810 m³/s).

Dès lors, une saison « moyenne » présentant ces caractéristiques a été recherchée sur le Var. Les fluctuations de débit observées lors de la saison 2016-2017 (présentée lors de l'introduction des deux méthodes dans la partie précédente) sont proches de ces standards, avec des épisodes cévenols courts et bien définis, des premières crues positionnées sur la bonne période, et 5 crues sur la saison, dont 4 sont inférieures au seuil de crue biennal. Cette saison sera donc utilisée pour comparer les résultats des deux méthodes, en s'appuyant sur les modélisations présentées précédemment (Figures 1 et 2).

• Utilisation de l'approche « 2x le module »

La méthode permet d'identifier cinq fenêtres de dévalaison potentielles sur le Var (quatre entre septembre et décembre et une au mois de mars), mais aussi des dévalaisons d'anguilles sur 3 affluents en simultané avec les fluctuations de débits observées sur le fleuve. Cette simultanéité des événements de crue permet de supposer que les dévalaisons se produiront de façon synchrone sur l'ensemble du bassin, avec une importance particulière des premières crues attribuée par la méthode « 2x le module ».

• Utilisation de l'approche « SilvRpeak »

La méthode permet d'identifier huit fenêtres de dévalaisons potentielles (avec une probabilité de migration supérieure à 50%) sur le fleuve Var, et une probabilité de dévalaison plus élevée sur les deux premiers pics de débit, qui diminue ensuite progressivement.

Sur les affluents, huit fenêtres de dévalaisons sont identifiées pour les deux tributaires possédant un jeu de données complet (Estéron et Vésubie), et 5 sur la Tinée dont le jeu de données est incomplet. Les différents pics de dévalaisons potentiels sont identifiés sur les mêmes périodes pour le fleuve et les affluents.

On peut donc supposer que les dévalaisons se produiront simultanément sur l'ensemble du bassin d'après les résultats du modèle SilvRpeak, avec une importance particulière des cinq premières crues, pour lesquels la probabilité de dévalaison atteint 80% sur les affluents.

- **Comparaison des résultats.**

Les deux méthodes donnent des résultats comparables, en prédisant des épisodes de migration globaux et en simultané sur le Var et sur ses affluents pour la saison 2016-2017.

Le modèle du MNHN et la méthode développée par MRM s'accordent aussi sur l'importance des premiers pics de débit de la saison : la méthode 2x le module identifie systématiquement les premières crues comme particulièrement stimulantes pour la migration, tandis que le modèle Silvrpeak attribue aux cinq premiers événements des probabilités de dévalaison d'environ 80%. Les probabilités de migration sont particulièrement fortes sur les affluents.

On note néanmoins une sensibilité plus importante du modèle Silvrpeak vis à vis des variations journalières de débit. En effet, la saison a connu huit hausses de débits notables, mais seules cinq sont jugées pertinentes par la méthode « 2x le module », alors que Silvrpeak attribue à tous les pics de la saison une probabilité de dévalaison d'au moins 50%.

c) Focus sur des saisons avec des pics de débit tardifs sur les affluents

Comme évoqué précédemment, les affluents colonisés par l'anguille vont jouer un rôle important dans la dynamique migratoire d'un grand bassin côtier. Or, les approches Silvrpeak et « 2x le module » intègrent cet aspect de façon très différente, comme expliqué précédemment.

Les analyses réalisées en 2020 avaient montré que certains affluents du Var pouvaient connaître une première crue tardive et isolée dans la saison de dévalaison. Ce type de phénomène peut rendre intéressante des crues ultérieures (et donc potentiellement tardives) du fleuve, susceptibles de transporter les individus issus de l'affluent isolé.

Dès lors, il paraît pertinent d'étudier la façon dont les deux méthodes prennent en compte ce type de crue. Elles ont donc été appliquées à la saison 2007-2008 du bassin du Var, qui a enregistré une première crue tardive d'un affluent où la présence de l'anguille est attestée : la Vaire. Durant cette saison, le premier coup d'eau a été tardif sur le fleuve (23/11/2007). L'analyse des QJM de 5 stations hydrométriques du bassin montre que les deux premières crues n'ont pas concerné tous les affluents. En effet, la Vaire n'a connu sa première crue que début avril. Ce cas de figure correspond au cas n°5 du *Tableau 1* (p.4).

- **Utilisation de l'approche « 2x le module »**

Les périodes de dévalaisons potentielles mises en avant par la méthode « 2x le module » à l'échelle du bassin versant sont présentées dans la *Figure 4* en page suivante.

La méthode permet d'identifier :

- Deux fenêtres de dévalaisons potentielles sur le Var en novembre et janvier ;
- Des dévalaisons d'anguilles depuis deux affluents : L'Estéron et la Tinée, en simultané avec la deuxième crue du Var ;
- La première crue tardive survenue sur la Vaire en avril.
- La 3^e crue du Var qui succède à ce pic de la Vaire. Elle est *de facto* identifiée comme intéressante par la méthode. Elle a pour origine un pic de débit de l'Estéron, également identifié comme une période de dévalaison potentielle.

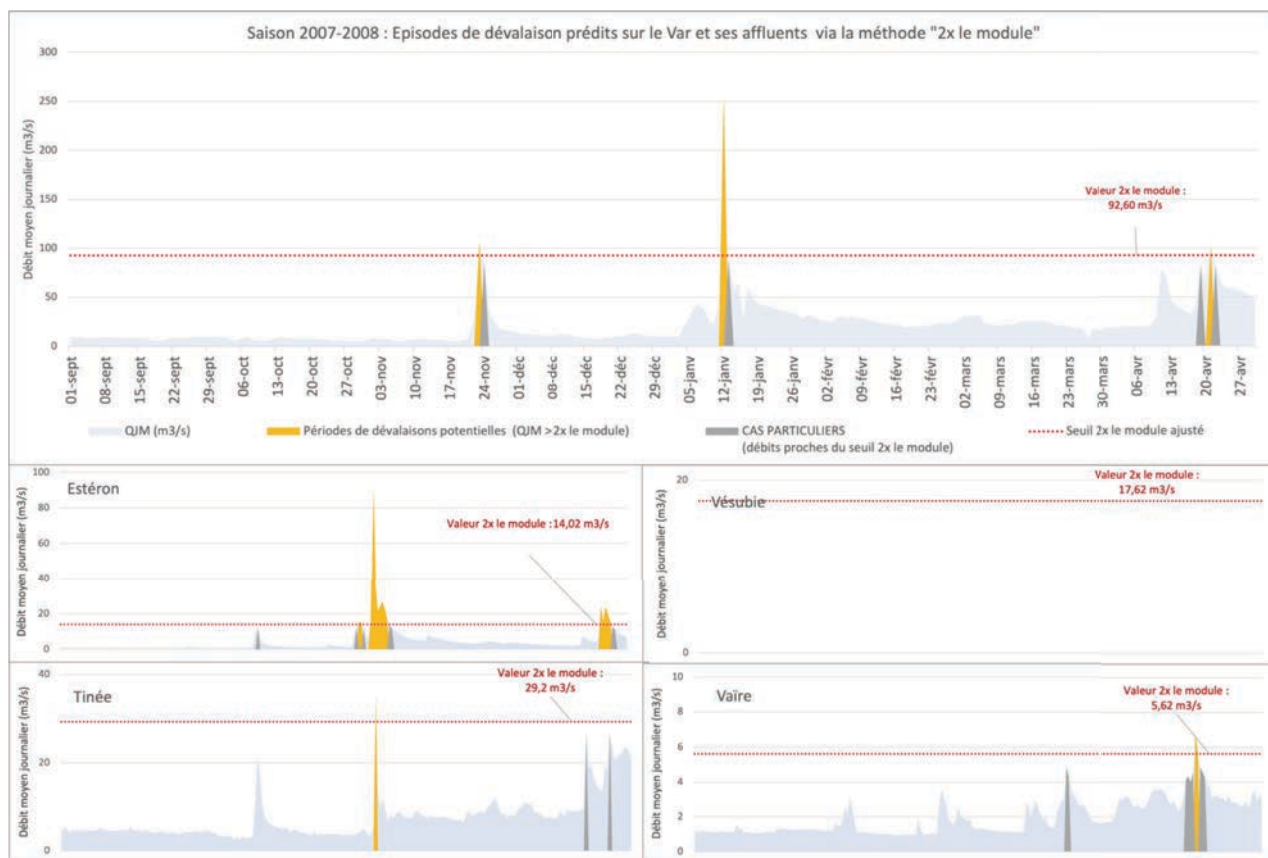


Figure 4 : Analyse des débits et des périodes de dévalaison potentielles sur le bassin du Var pour la saison 2007-2008, avec la méthode 2x le module développée par MRM (pas de données pour la Vésubie)

• Utilisation de l'approche « SilvRpeak »

Les périodes de dévalaisons potentielles mises en avant à l'échelle du bassin versant par le modèle du MNHN sont présentées dans la Figure 5 en page suivante.

La méthode permet d'identifier :

- Onze périodes de dévalaison potentielles (probabilité supérieure à 50 %) sur le fleuve Var, et entre 8 et 15 périodes de dévalaisons potentielles sur les différents affluents ;
- Deux pics de débit en novembre et janvier sur le Var, identifiées comme les fenêtres les plus favorables à la dévalaison (probabilité supérieure à 80 %). L'Estéron et la Tinée enregistrent des probabilités de dévalaison identiques aux mêmes dates ;
- Six pics de débits sur la première moitié de saison de la Vaire : ils présentent des probabilités de dévalaison de 60 à 80 % (les débits évoluent de 1 à 2 puis 3 m³/s). Cinq pics avec une probabilité plus réduite (50 %) sont identifiés en fin de saison.
- De multiples pics sur la Tinée au début de la saison, du fait de micro-variations de débits (4 à 5 m³/s) entre septembre et décembre.

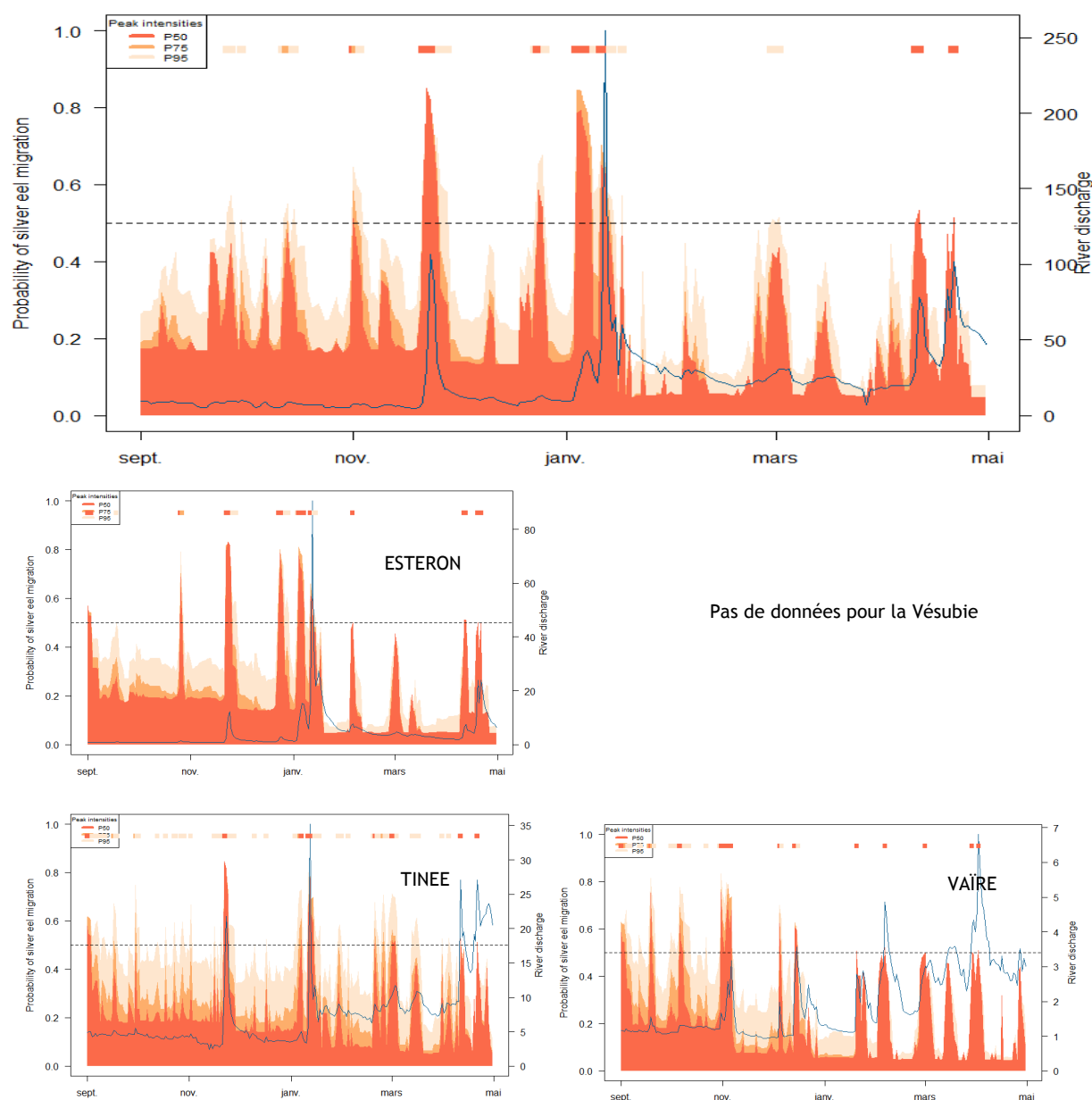


Figure 5 : Analyse des débits et des périodes de dévalaison potentielles sur le bassin du Var pour la saison 2007-2008, avec la méthode SilvRpeak développée par le MNHN

● Comparaison des résultats

Les résultats obtenus avec les deux méthodes présentent des similarités, mais également des différences majeures. Les points de concordance relevés sont les suivants :

- Les approches SilvRpeak et « 2x le module » détectent un fort intérêt pour la dévalaison sur les deux pics de débit principaux de la saison (novembre et janvier), sur le Var ainsi que sur deux de ses affluents (Estéron et Tinée).
- Sur l'Estéron, un pic de débit potentiellement intéressant est détecté en novembre via les deux méthodes.
- Également, les pics de débits tardifs du Var, de l'Estéron et de la Vaire sont jugés potentiellement intéressants par les deux approches.

- Enfin, les deux approches supposent que la dévalaison peut survenir à n'importe quel moment du pic de débit (montée des eaux ou décrue). En termes de gestion et de survie des futurs reproducteurs, une fenêtre plus large de dévalaison potentielle paraît pertinente dans le cas d'un grand fleuve, où le flux d'anguille migrante se présentera progressivement à proximité des ouvrages.

Des divergences de résultats importantes apparaissent néanmoins entre les deux approches. Le modèle SilvRpeak identifie encore beaucoup plus de périodes de dévalaisons potentielles que la méthode « *2x le module* ». L'utilisation des débits classés comme critère discriminant par SilvRpeak engendre une multitude de détections, particulièrement si de très faibles débits d'étiage perdurent en début de saison. La moindre variation de débit aura alors de grandes chances d'être comptabilisée par SilvRpeak.

Le résultat obtenu sur la Vaire est particulièrement frappant et incite à relativiser les prédictions issues de ces différentes approches théoriques. En effet, l'approche « *2x le module* » met en évidence une seule fenêtre de migration potentielle pour cet affluent, alors que SilvRpeak identifie une douzaine de fenêtres de dévalaison potentielles.

Sur ce point, le retour d'expérience du modèle sur la Cagne, ainsi que des discussions avec l'un des auteurs du modèle incitent à considérer ce résultat brut avec prudence (comm. pers. Nils Teichert). En effet, en présence de faibles débits, le modèle pourrait avoir tendance à surestimer l'impact de certaines micro-variations de débit sur la dévalaison.

De fait, de nombreuses périodes de dévalaisons potentielles sont détectées sur le Var et ses affluents sur la première moitié de saison avec SilvRpeak, ce qui n'est pas le cas avec l'approche développée par MRM.

Compte tenu du fait que ces observations sont réalisées dans des conditions de faibles débits, il est intéressant de se demander si des résultats similaires sont obtenus lorsque, à l'inverse, de forts débits se maintiennent sur une longue période. Ce cas de figure, assez rare sur un fleuve côtier comme le Var (surtout caractérisé par des crues éclair), peut néanmoins être retrouvé de façon ponctuelle sur certaines saisons.

d) Un cas particulier avec de forts débits qui perdurent : la saison 2013-2014

- Utilisation de l'approche « *2x le module* »

La saison 2013-2014 du fleuve Var et de quatre de ses affluents illustre bien le comportement souvent imprévisible des fleuves côtiers de Méditerranée (Figure 6 en page suivante).

En effet, alors que la majeure partie du temps, les débits diminuent très rapidement après une crue, il peut exceptionnellement arriver que de forts débits perdurent sur une longue période. Pour rappel, la méthode stipule que de la dévalaison peut survenir dès lors que le débit moyen journalier dépasse le seuil *2x le module*, symbolisé par les pointillés rouges.

Les débits sont restés inférieurs au module jusqu'en janvier, puis un premier pic de débit notable a été enregistré sur le Var et trois tributaires. De forts débits ont ensuite perduré de janvier à avril, en raison de précipitations localisées sur le Var et l'Estéron.

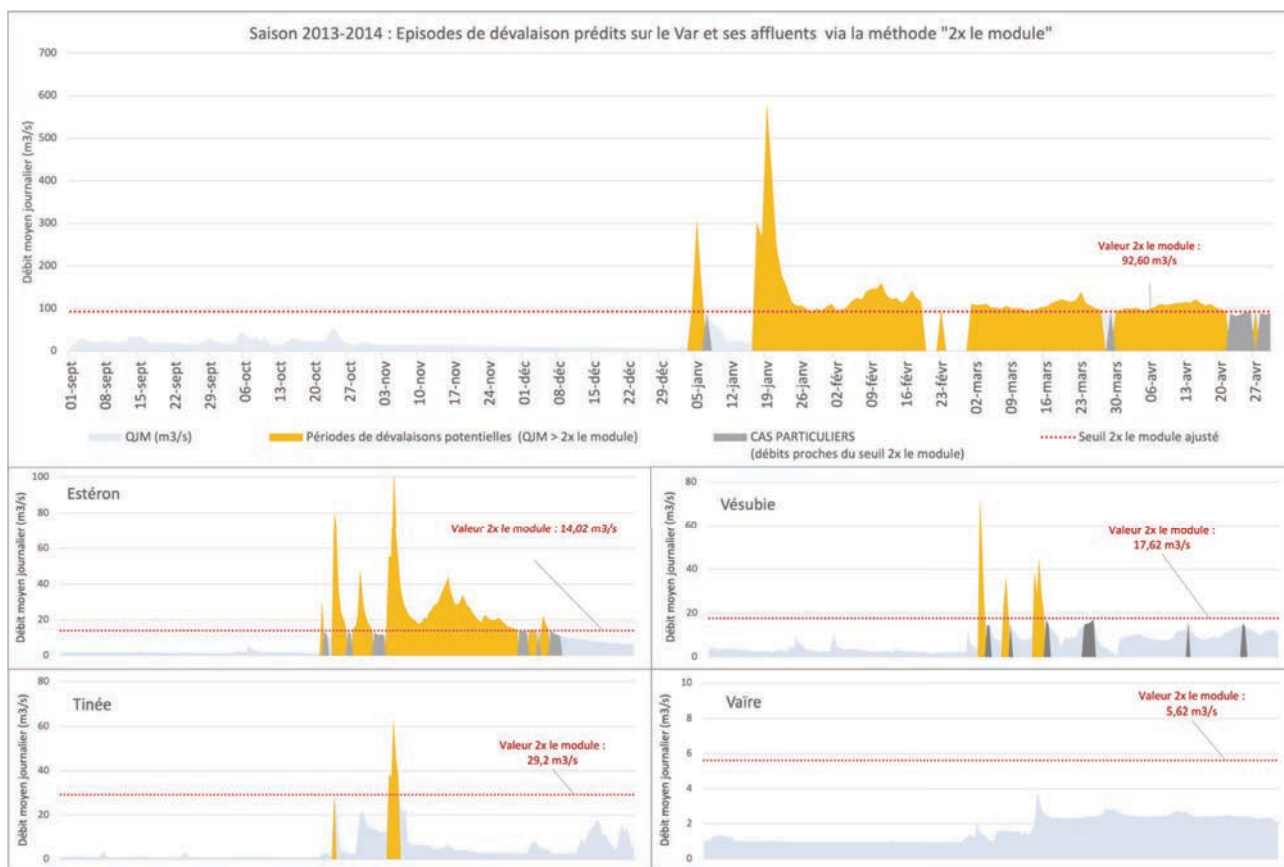


Figure 6 : Analyse des débits et des périodes de dévalaison potentielles sur le bassin du Var pour la saison 2013-2014, avec la méthode « 2x le module » développée par MRM

Dans ces conditions particulières, la méthode permet d'identifier :

- Deux épisodes de dévalaison potentiels en janvier, à l'occasion des deux premiers pics de crue de la saison ;
- Trois pics de débits d'intérêt sur la Vésubie, dont le premier a lieu en parallèle de la seconde crue du Var ; ainsi que deux pics de crue sur la Tinée.
- Une absence de pics de crues intéressants sur la Vaïre pour cette saison.
- Une longue période d'intérêt potentiel sur le Var et l'Estéron, consécutive au second pic de débit enregistré sur les deux cours d'eau.

Ce cas de figure particulier illustre l'une des limites de la méthode développée par MRM, qui ne parvient pas à distinguer des créneaux de migration précis pour le Var et l'Estéron. En effet, après le deuxième pic de crue, le débit est resté supérieur au seuil 2x le module.

Le reste de la saison du Var et de l'Estéron est donc faussement assimilée à un très long épisode de dévalaison potentiel, mais ne permet pas de cibler des périodes précises. Des périodes précises sont néanmoins mises en avant sur la Tinée et la Vésubie.

En présence de débits soutenus pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois, la méthode n'est donc pas adaptée pour définir des périodes précises de migration.

- Utilisation de l'approche « SilvRpeak »

Comme dans la partie précédente, le modèle SilvRpeak a aussi été décliné aux affluents du Var pour cette saison. Rappelons que le modèle obtenu pour le fleuve n'est pas basé sur les résultats des affluents. Le modèle a été appliqué indépendamment à chaque cours d'eau. Le résultat de la modélisation des probabilités de dévalaisons du Var et de ses affluents est détaillé en *Figure 7* ci-dessous.

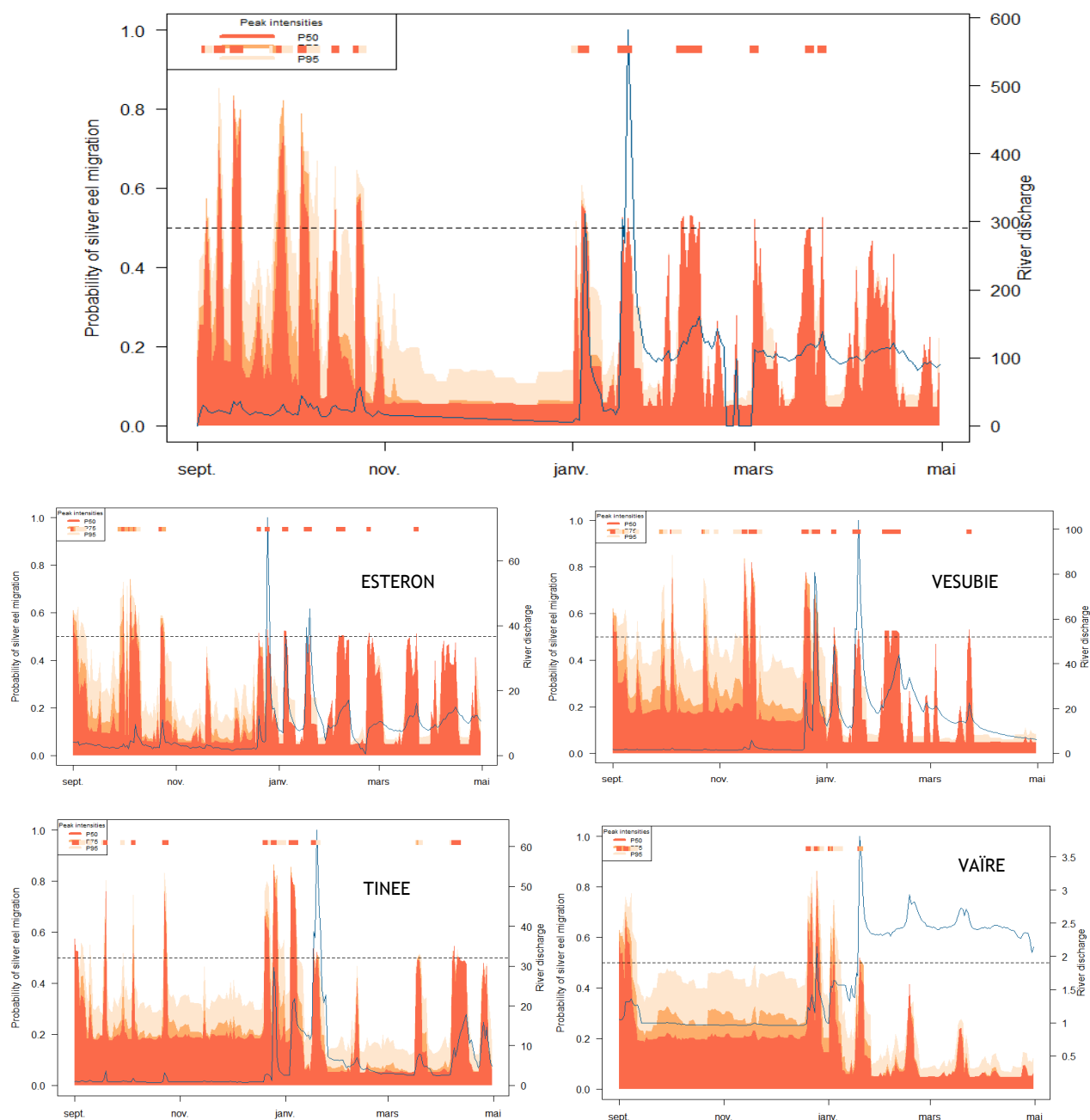


Figure 7 : Périodes potentielles de dévalaison identifiées par le modèle SilvRpeak pour la saison 2013-2014 du bassin du Var

Le modèle permet d'identifier :

- Une forte probabilité de dévalaison (60 à 80 %) dès le début de saison sur le Var et trois affluents (Estéron Tinée, Vesubie), en raison des fluctuations précoces de débit observées entre septembre et novembre. Sur cette période, les débits du fleuve oscillent globalement entre 15 et 30 m³/s, avec un pic à 56 m³/s fin octobre.

- Les pics de débits suivants (janvier-mars) présentent des probabilités de dévalaison d'environ 60% pour le modèle SilvRpeak. 8 périodes présentant une probabilité de dévalaison >50% sont identifiés sur le Var pour la deuxième moitié de saison.
- Des résultats comparables sont observés sur l'Estéron, la Tinée et la Vesubie sur la seconde moitié de saison.
- Une première hausse de débit en septembre sur la Vaire est associée à une forte probabilité de dévalaison (60 à 80 %). Une seconde hausse de débit en janvier présente un résultat similaire, puis la probabilité décroît avec les pics suivants.

- **Comparaison des résultats et synthèse de l'approche comparative**

Même si les deux approches s'accordent donc sur l'intérêt global de la période janvier-avril pour la dévalaison, les résultats obtenus montrent des différences majeures en présence débits soutenus sur une longue période.

Comme précédemment, le modèle SilvRpeak identifie beaucoup plus de périodes de dévalaisons potentielles que la méthode *2x le module*. De fait, le premier pic de la méthode « 2x le module » est prédit début janvier, alors que le modèle SilvRpeak identifie au moins 7 périodes de migration potentielles sur le Var au début de la saison.

- Sur la Vaire, plusieurs fenêtres de migration potentielles sont aussi identifiées par le modèle SilvRpeak, alors que la saison était jugée sans intérêt particulier par la méthode *2x le module*.
- Sur la seconde moitié de saison, le modèle SilvRpeak identifie des créneaux potentiels de dévalaison plus précis que la méthode *2x le module*.

Compte tenu du module du fleuve Var ($46,3 \text{ m}^3/\text{s}$), on peut légitimement se demander si les variations de débit enregistrées en début de saison (oscillations entre 15 et $30 \text{ m}^3/\text{s}$) sont suffisantes pour enclencher la dévalaison.

Cet exemple renforce la pertinence de l'hypothèse formulée dans la partie 3.3.c.), selon laquelle le modèle SilvRpeak pourrait surestimer au moins en partie l'importance de fluctuations de débit précoces vis à vis de la dévalaison. Ces variations mineures pourraient en partie « parasiter » le modèle SilvRpeak, dans la mesure où elles sont comptabilisées comme des périodes de dévalaison potentielles, et diminuent d'autant la probabilité de dévalaison attribuée à des pics de crues plus intenses et tardifs.

D'autres exemples permettent d'appuyer cette hypothèse. Sur la Vaire (module de $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$), les probabilités de dévalaison les plus fortes sont identifiées pour des variations de débit de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur la Vesubie (module de $8 \text{ m}^3/\text{s}$), le passage d'un débit de 2 à $6 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre engendre une probabilité de dévalaison supérieure à 80 %.

On ne peut cependant pas exclure que ces hausses de débit modérées puissent aussi engendrer réellement de la dévalaison. En termes de gestion, ces prédictions multiples du modèle SilvRpeak permettent de cibler un grand nombre d'événements potentiels, une stratégie prudente pour limiter au maximum la mortalité au moment de la dévalaison.

Ces questionnements pointent aussi les limites des approches théoriques présentées dans ce rapport, et mettent en avant la nécessité de poursuivre les investigations qui permettront de mettre en place une étude in situ sur un fleuve de grande envergure.

Conclusion

La double étude conduite par MRM depuis plusieurs années, sur la Cagne et sur les grands fleuves côtiers, vise à mieux comprendre les facteurs qui régissent la dévalaison des anguilles argentées. L'expérimentation *in situ* de la Cagne montre que les anguilles vont principalement dévaler lors des pics de crues d'automne, un résultat corroboré par d'autres études menées sur la façade atlantique.

Grâce à ces observations et à d'autres analyses menées sur des grands bassins côtiers, MRM a pu expérimenter et proposer une méthode baptisée « *2x le module* », visant à prédire les pics de crues susceptibles d'engendrer de la dévalaison. Les premiers résultats sont très encourageants, puisque la totalité des dévalaisons enregistrées sur la Cagne depuis 2017 ont eu lieu pour des conditions de débit supérieures au seuil proposé de 2x le module.

La transposabilité des résultats de la Cagne pose toutefois encore question, de même que la fiabilité de cette approche sur un bassin versant plus imposant, puisqu'aucune étude *in situ* n'a encore pu voir le jour sur un fleuve côtier de grande envergure.

L'obtention de ces informations *in situ* constitue l'objectif à moyen voir long terme pour cette étude de la dévalaison. Or, compte tenu de l'état actuel de la population d'Anguilles européennes, des solutions de gestion à court terme doivent être proposées, même si ces méthodes restent perfectibles.

La méthode « *2x le module* », présentée et expérimentée dans ce rapport, vise à répondre à cet objectif à court terme, tout comme le modèle SilVRpeak développé conjointement par le MNHN et EDF R&D. A ce titre, il était pertinent de comparer les prédictions issues des deux méthodes, afin de mettre évidence des résultats convergents et/ou différents, tout en observant les limites de ces approches théoriques.

Les analyses comparatives ont mis en avant plusieurs aspects :

Pour une saison de dévalaison à l'hydrologie « classique », les deux approches ont montré des résultats encourageants et assez convergents, avec des prédictions communes des deux modèles sur les plus forts pics de débits. Le modèle SilVRpeak montre cependant une sensibilité bien plus importante (et prédit donc plus d'évènements de dévalaison) que la méthode « *2x le module* ». Des analyses complémentaires sur d'autres saisons pourront compléter ce résultat préliminaire.

Pour les saisons présentant une hydrologie atypique (crues tardives des affluents ou débits soutenus sur une longue période), des limites propres à chaque approche ont aussi été mises en évidence :

- Le modèle SilVRpeak pourrait avoir une propension à surestimer le nombre d'évènements de dévalaisons potentiels, en accordant de l'importance à des variations parfois très mineures de débit. Cette hypothèse est appuyée par des observations similaires déjà réalisées lorsque le modèle SilVRpeak avait été confronté aux données de dévalaison de la Cagne.
- La méthode « *2x le module* », quant à elle, n'est pas adaptée pour identifier des créneaux précis de dévalaison lorsque les débits restent élevés sur une longue période, et pourrait aussi potentiellement sous-estimer le nombre de créneaux de migration sur une saison.

- Compte tenu de ces limites respectives, les deux approches paraissent complémentaires, puisque les défauts de l'une peuvent être contrebalancés par les avantages de l'autre. L'approche « 2x le module » permet de relativiser certaines prédictions potentiellement « parasites » du modèle SilvRpeak, tandis que ce dernier propose des créneaux de dévalaison plus précis sur des périodes de hautes eaux.

Les multiples différences observées entre les deux méthodes incitent toutefois à nuancer les résultats issus de ces différentes approches théoriques encore en cours de développement. Finalement, seule l'étude *in situ* du comportement de migration des anguilles sur un grand fleuve côtier permettra d'affiner ces modèles, qui restent des solutions intéressantes pour envisager des mesures de gestion à court terme.

L'identification d'un cours d'eau abordable méthodologiquement (et présentant un fonctionnement hydrologique proche de celui du Var) est donc une priorité et constituera le cœur des analyses qui seront effectuées par MRM en 2022.

Remerciements

L'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée (MRM) tient à remercier vivement tous ceux qui, par leur collaboration technique ou financière, ont contribué spécifiquement à la réalisation de cette étude.

PARTENAIRES FINANCIERS

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse
- Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur
- Département des Alpes-Maritimes et SMIAGE
- Fédération Nationale pour la Pêche en France
- Électricité de France

MEMBRES MRM

- Fédérations Départementales des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique (FDAAPPMA) de l'Ain, des Alpes de Haute Provence, des Hautes-Alpes, des Alpes-Maritimes, de l'Ardèche, de l'Aude, des Bouches-du-Rhône, de la Corse, de la Drôme, du Gard, de l'Hérault, de l'Isère, de la Loire, des Pyrénées-Orientales, du Rhône, de la Savoie, de Haute-Savoie, de Haute-Saône, de la Saône et Loire, du Var et du Vaucluse
- Association Régionale des Fédérations de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique PACA (ARFPPMA PACA)
- Association Régionale des Fédérations de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique Auvergne-Rhône-Alpes (ARPARA)

PARTENAIRES TECHNIQUES

- Fédération Départementale des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique (FDAAPPMA) des Alpes Maritimes
- EDF R&D et Unité production Rhône Méditerranée
- OFB pôle écohydraulique ;
- OFB DiR Sud PACA, Service départemental 06
- SMIAGE Maralpin
- Agence de l'Eau
- Propriétaires Riverains
- Association Nice Météo 06
- INRAe Unité RiverLy de Lyon Grenoble

Financeurs

L'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée ne pourrait agir sans l'engagement durable de ses partenaires financiers



Membres de l'Association Migrateurs Rhône-Méditerranée

Fédérations Départementales des Associations Agréées de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique :

- Ain
- Alpes de Haute-Provence
- Hautes-Alpes
- Alpes-Maritimes
- Ardèche
- Aude
- Bouches-du-Rhône
- Corse
- Drôme
- Gard
- Hérault
- Isère
- Loire
- Pyrénées-Orientales
- Rhône
- Haute-Saône
- Saône et Loire
- Savoie
- Haute-Savoie
- Var
- Vaucluse

Association Régionale des Fédérations de Pêche de PACA (ARFPPMA PACA)

Association Régionale des Fédérations de Pêche Auvergne Rhône-Alpes (ARPARA)

ASSOCIATION MIGRATEURS
RHÔNE-MÉDITERRANÉE

ZI Nord, rue André Chamson, 13200 Arles
contact@migrateursrhonemediterranee.org
Tél. : 04 90 93 39 32
www.migrateursrhonemediterranee.org

