



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2026/013

Région de la capitale nationale

Tester les points de référence fondés sur la mortalité propres à un site pour l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) dans un modèle de métapopulation

Madison E. Brook, Adam S. van der Lee, Marten A. Koops

Pêches et Océans Canada
Laboratoire des Grands Lacs pour les pêches et les sciences aquatiques
867 Lakeshore Rd.
Burlington (Ontario) L7S 1A1

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien des avis scientifiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

[http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/
DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca](http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/DFO.CSAS-SCAS.MPO@dfo-mpo.gc.ca)



© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2026

Ce rapport est publié sous la [Licence du gouvernement ouvert – Canada](#)

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-97840-6 N° cat. Fs70-5/2026-013F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Brook, M.E., van der Lee, A.S. et Koops, M.A. 2026. Tester les points de référence fondés sur la mortalité propres à un site pour l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) dans un modèle de métapopulation. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2026/013. iv + 92 p.

Also available in English :

Brook, M.E., van der Lee, A.S., and Koops, M.A. 2026. Testing Location-Specific Mortality Reference Points for American Eel (*Anguilla rostrata*) in a Meta-Population Model. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2026/013. iv + 87 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
INTRODUCTION	1
MÉTHODES.....	2
CYCLE BIOLOGIQUE.....	2
Taux de croissance	3
Probabilité d'argenteure	3
Relation longueur-poids	4
Survie	4
Fécondité	4
Proportion de femelles	5
Dispersion des larves leptocéphales.....	6
Dépendance à la densité	7
STRUCTURE DE LA POPULATION.....	8
Structure du modèle.....	8
Analyse du modèle de population	11
RÉSULTATS.....	13
VISUALISATION SUR 125 ANS	15
GESTION DES ZONES AVEC F_{50}	16
SURMORTALITÉ	27
RÉTABLISSEMENT	36
ANALYSE DE SENSIBILITÉ	39
DISCUSSION.....	43
UTILISATION DE POINTS DE RÉFÉRENCE INDÉPENDANTS FONDÉS SUR LA MORTALITÉ.....	43
SIMULATIONS DE SURMORTALITÉ ET DE RÉTABLISSEMENT	44
INCERTITUDES.....	45
RÉFÉRENCES CITÉES	47
DONNÉES COMPLÉMENTAIRES 1 – SIMULATIONS SUR 125 ANS.....	50
DONNÉES COMPLÉMENTAIRES 2 – AUTRES MÉCANISMES DE DÉPENDANCE À LA DENSITÉ	69
GESTION DES ZONES AVEC F_{50}	69
SURMORTALITÉ	81
RÉTABLISSEMENT	87

RÉSUMÉ

Malgré sa vaste répartition qui inclut la côte est du Canada et des États-Unis, l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) partage une aire de reproduction commune avec une structure de population panmictique. Un modèle matriciel structuré selon l'âge a été utilisé pour construire un modèle de métapopulation avec des zones définies le long de la côte est de l'Amérique du Nord afin de tester l'effet de la gestion de la métapopulation à l'échelle régionale. Diverses hypothèses possibles sur la dépendance à la densité, la survie et la dispersion des larves leptocéphales ont été examinées. Les points de référence fondés sur la mortalité qui ont entraîné une échappée d'anguilles argentées de 50 % (points de référence pour la mortalité F_{50}) ont été générés pour chaque zone en supposant l'indépendance, puis mis en œuvre dans le modèle de métapopulation afin d'observer l'échappée de la métapopulation totale et des zones individuelles. Alors que les valeurs F_{50} pour la pêche de la civelle ont généralement permis d'atteindre les objectifs d'échappée de 50 %, les valeurs F_{50} pour l'anguille ont plus souvent entraîné une chute des populations en dessous de leurs cibles, ce qui indique que les points de référence fondés sur la mortalité générés en supposant une indépendance des populations pourraient ne pas permettre d'atteindre les objectifs de gestion lorsque la structure de la métapopulation est prise en compte. Dans certains scénarios de dispersion des larves leptocéphales, les zones au nord présentaient systématiquement une faible échappée d'anguilles argentées et étaient donc considérées comme plus sensibles à l'état général de la métapopulation que les zones au sud.

INTRODUCTION

L'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) est une espèce très répandue présente tout le long de la côte est de l'Amérique du Nord, et aussi loin à l'intérieur des terres que le lac Ontario (COSEPAC 2012). Les caractéristiques de leur cycle biologique sont également très diversifiées d'une latitude à l'autre, avec des différences considérables, notamment dans le taux de croissance, la longueur à maturité et la fécondité (Cairns *et al.* 2014; Vélez-Espino & Koops 2010). Les larves leptocéphales (larves d'anguille) migrent des frayères de la mer des Sargasses le long de la côte est de l'Amérique du Nord, où elles se transforment en civelle (petite anguille transparente) lorsqu'elles atteignent le plateau côtier, puis en civelles pigmentées plus à l'intérieur des terres (Cairns *et al.* 2014). Les anguilles passent la majeure partie de leur vie au stade d'anguille jaune, vivant dans des milieux dulcicoles, saumâtres ou salins, jusqu'à ce qu'elles arrivent à maturité et se métamorphosent en anguille argentée (Cairns *et al.* 2014). Les anguilles argentées, de tous les sites, retournent dans la mer des Sargasses pour se reproduire, après quoi elles meurent (Cairns *et al.* 2014). L'absence de structure génétique des populations dans son aire de répartition géographique (Ulmo Diaz *et al.* 2023) permet de conclure que l'anguille d'Amérique est une espèce panmictique. Bien que la panmixie suggère de considérer l'espèce entière comme une seule population avec des sous-populations locales, il existe peu de connaissances sur la façon dont les larves leptocéphales se répartissent dans les eaux continentales (Ulmo Diaz *et al.* 2023).

Au Canada, le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) a évalué que l'anguille d'Amérique était une espèce menacée (COSEPAC 2012). Cependant, elle n'a pas été inscrite à l'Annexe 1 de la *Loi sur les espèces en péril*, et elle est pêchée à plusieurs endroits au Québec et le long de la côte est (Cairns *et al.* 2014). La gestion des espèces halieutiques par Pêches et Océans Canada (MPO) utilise un cadre pour des pêches durables qui comprend à la fois des points de référence fondés sur la mortalité et l'état du stock (MPO 2006). Les points de référence fondés sur la mortalité sont des taux de mortalité instantanée par pêche (F) visant à obtenir une taille de population qui atteint ou dépasse les points de référence de l'état du stock (MPO 2006). Pour l'anguille d'Amérique, l'échappée d'anguilles argentées a été utilisée pour estimer les points de référence fondés sur la mortalité pour l'anguille d'Amérique (Brook *et al.* 2024), où un rapport d'échappée de 50 % (E_{50}) est utilisé comme point de référence supérieur (point de référence fondé sur la mortalité de F_{50}), et un rapport d'échappée de 30 % (E_{30}) est utilisé comme point de référence limite (point de référence fondé sur la mortalité de F_{30}) (Brook *et al.* 2024). Le rapport reproducteurs-recrues (RR : proportion d'anguilles argentées par rapport aux recrues) a également été utilisé dans l'estimation des points de référence fondés sur la mortalité (Bradford *et al.* 2022; CIEM 2001). Des analyses antérieures ont estimé les valeurs F_{50} pour la pêche de la civelle à environ 0,67 (Brook *et al.* 2024; Bradford *et al.* 2022). Les points de référence prudents pour la mortalité de l'anguille se situent approximativement entre 0,07 et 0,23 pour les valeurs F_{50} , bien qu'ils puissent varier selon les zones géographiques au Canada et la taille minimale pour la pêche (Brook *et al.* 2024; Bradford *et al.* 2022; CIEM 2001). En outre, ces estimations dépendent fortement des hypothèses faites sur les mécanismes de dépendance à la densité dans le modèle : lorsqu'il y a plus de mécanismes de dépendance à la densité, les points de référence fondés sur la mortalité peuvent augmenter au-delà des plages indiquées ci-dessus (Brook *et al.* 2024).

Les pêches sont habituellement gérées à l'échelle régionale et d'une manière indépendante (MPO 2019; MPO 2012). Par conséquent, les points de référence fondés sur la mortalité sont généralement générés en supposant qu'il s'agit d'une population individuelle et isolée. Cela suppose que toutes les larves leptocéphales produites par l'anguille argentée à partir d'un site

donné reviennent au même endroit. En raison de la nature panmictique de l'anguille d'Amérique, cette supposition n'est pas nécessairement vraie. Alors que certaines larves leptocéphales retourneraient au même site que leur mère, d'autres peuvent se disperser dans des endroits différents. Au fil du temps, cela pourrait modifier le nombre de larves leptocéphales arrivant dans les différentes sous-populations, et faire en sorte que la pêche dans une zone ait un effet sur d'autres zones qui ne sont pas directement touchées. L'efficacité des points de référence fondés sur la mortalité générés sur des populations indépendantes n'a pas été directement testée lorsqu'ils sont mis en œuvre dans une structure de métapopulation. Ainsi, une interprétation complète de la population d'anguille d'Amérique serait une métapopulation avec des sous-populations le long de la côte est de l'Amérique du Nord (p. ex. Young & Koops 2014), idéalement en incluant des sites comme le Groenland et les Caraïbes (Ulmo Diaz *et al.* 2023; Cairns *et al.* 2014).

Les objectifs étaient les suivants :

1. Déterminer si la gestion des zones en tant que populations locales (c'est-à-dire des zones de pêche avec des points de référence fondés sur la mortalité calculés à partir d'hypothèses de population indépendantes) produit des résultats cohérents lorsqu'elle est appliquée à une structure de métapopulation.
2. Évaluer la façon dont la métapopulation réagit à la surmortalité dans certaines zones, et si l'intervention dépend du stade de vie touché (c'est-à-dire anguille vs civelle).
3. Étudier la façon dont la métapopulation réagit si la mortalité est réduite dans une ou plusieurs zones.

La sensibilité générale de la métapopulation aux caractéristiques du cycle biologique de chacune des zones a également été examinée. Une métapopulation matricielle structurée selon l'âge a été utilisée, avec sept zones le long de la côte est de l'Amérique du Nord. D'autres hypothèses de dispersion des larves leptocéphales ont été appliquées afin d'examiner leur incidence sur les interventions liées à la mortalité par pêche.

MÉTHODES

La structure et la paramétrisation du modèle de métapopulation présenté ici sont fondées sur les modèles de population individuelle utilisés par Brook *et al.* (2024) afin de déterminer les points de référence fondés sur la mortalité des sites canadiens en fonction du cycle biologique. Bien que le modèle de métapopulation s'étende au-delà de la couverture géographique des modèles de Brook *et al.* (2024), une structure de modèle cohérente a été appliquée avec une paramétrisation propre au site tirée de la littérature.

CYCLE BIOLOGIQUE

En raison de la disponibilité des données, le modèle est principalement basé sur les données relatives aux anguilles femelles d'eau douce. Les zones géographiques précédemment définies étaient fondées sur des limites de gestion approximatives et le cycle biologique (figure 1; Cairns *et al.* 2014). Les caractéristiques du cycle biologique propres à la zone ont été déterminées principalement à partir de données tirées de la littérature (tableau 1; Cairns 2020; Cairns *et al.* 2014). Les quatre zones canadiennes (SL, NG, SG et SF) représentent approximativement le bassin du Saint-Laurent, Terre-Neuve, l'Île-du-Prince-Édouard et la Nouvelle-Écosse, respectivement (figure 1). Les zones américaines représentent les bassins versants de l'océan Atlantique le long de la côte est. Vu le manque de données, aucune zone n'a été définie au nord de la zone NG (p. ex. le Groenland) ni au sud des États-Unis (p. ex. les Caraïbes).

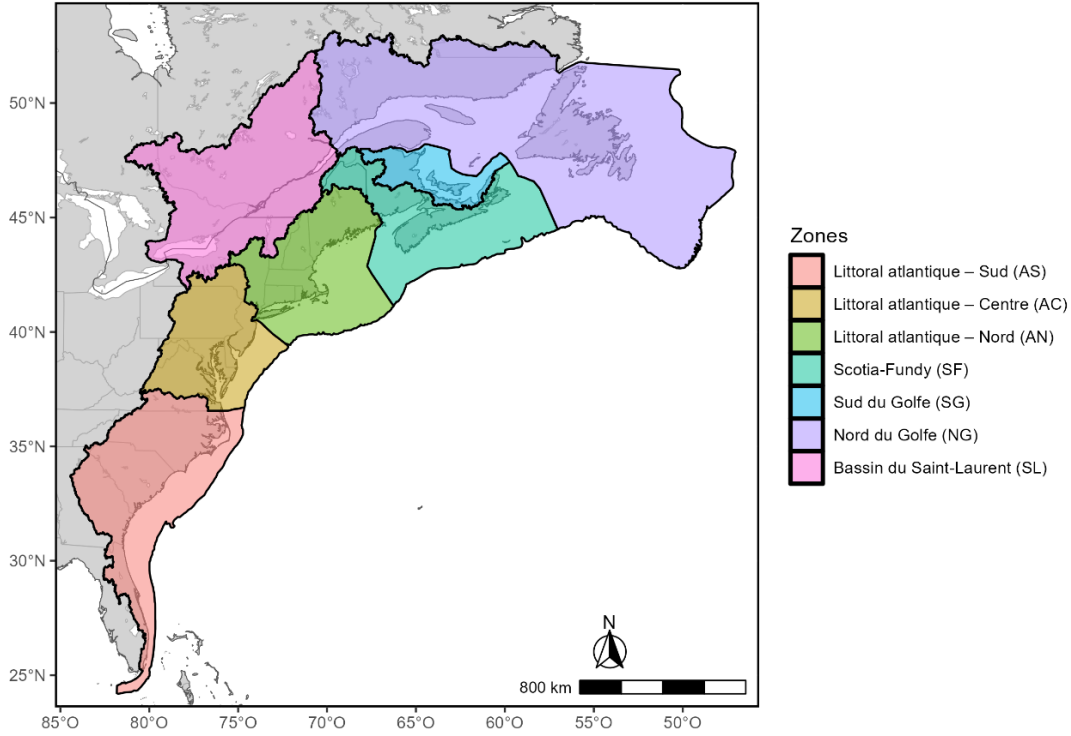


Figure 1. Limites utilisées pour définir les zones dans le modèle de métapopulation (données de Cairns et al. 2014).

Taux de croissance

Une courbe de croissance biphasique a été utilisée pour modéliser la longueur selon l'âge a (Brook et al. 2024) :

$$longueur_{a,x} = \begin{cases} tc_x \times a + lc_x & a < a_{b,x} \\ tc_x \times a_{b,x} + lc_x & a \geq a_{b,x} \end{cases} \quad (1)$$

où tc_x est le taux de croissance annuel en mm/an pour la zone x , lc est la longueur de la civelle en mm dans la zone x , et $a_{b,x}$ est le point d'inflexion de la fonction définie par morceaux pour la zone x . La longueur moyenne de l'anguille argentée pour une zone donnée est égale à la seconde moitié de la fonction définie par morceaux. Pour les zones SF, SG et NG, les données étaient suffisantes pour calculer directement une équation de croissance biphasique en utilisant les données de Cairns (2020). Pour les autres sites, les taux de croissance ont été calculés en convertissant les taux de croissance tirés de la littérature (Cairns et al. 2014) en taux de croissance biphasiques (Brook et al. 2024), et les longueurs des anguilles argentées étaient égales à la moyenne des valeurs de la littérature (Cairns et al. 2014). Il a été supposé que tous les sites avaient la même longueur moyenne de civelle, soit 63 mm (Jessop 2010).

Probabilité d'argenture

La probabilité d'argenture dans une zone donnée à un âge donné ($\gamma_{a,x}$) détermine le nombre d'anguilles susceptibles de devenir des anguilles argentées et de migrer hors des zones pour frayer dans la mer des Sargasses. L'inverse est la probabilité de rester au stade d'anguille jaune ($1-\gamma_{a,x}$). Le mécanisme sous-jacent de détermination de la probabilité d'argenture suppose que toutes les zones commencent avec une probabilité d'argenture de 10 % à l'âge 5 (le plus jeune âge d'argenture possible, en dessous duquel $\gamma_{a,x}$ est fixé à 0), qui augmente de 1 % par

année par la suite (Brook *et al.* 2024). Il y a ensuite une conversion en une équation logistique pour donner la probabilité d'argenture à l'âge a en utilisant une simulation avec des taux de croissance et des longueurs d'anguille argentée propres à la zone de sorte que :

$$\gamma_{a,x} = \frac{1}{(1 + e^{-0.5(a - \text{int}_x)})} \quad (2)$$

où le paramètre int_x contrôle le point d'inflexion le long de l'axe des x de l'équation pour chaque zone, et la pente de la courbe est constante entre les sites (-0,5) (Brook *et al.* 2024).

Relation longueur-poids

Une relation longueur-poids à l'échelle de la population a été dérivée de l'ajustement des relations à des sous-ensembles d'un vaste ensemble de données de longueur-poids canadiennes, en raison d'un manque de données de longueur-poids provenant de sites américains (Brook *et al.* 2024; Cairns 2020). La relation finale permettant de générer des estimations de poids à partir de la longueur était la suivante :

$$P = 2.0 \times 10^{-7} (L^{3.35}) \quad (3)$$

où P est le poids en grammes et L la longueur en mm.

Survie

La mortalité pour un âge donné a et une zone x ($M_{a,x}$) a été estimée à l'aide de l'équation de Lorenzen (1996) (Brook *et al.* 2024; ASMFC 2012). L'équation de Lorenzen modélise le taux de mortalité instantanée en fonction du poids, de telle sorte que :

$$M_{a,x} = \eta \times 3.00 \times P_{a,x}^{-0.288} \quad (4)$$

où η est un facteur d'ajustement qui influe sur la forme et la survie maximale de la courbe (Brook *et al.* 2024; ASMFC 2012). Cette équation a été utilisée pour estimer la survie de l'anguille jaune et de l'anguille argentée en raison du manque de données sur les taux de survie de l'anguille d'Amérique. La survie annuelle de la civelle (σ_C) a été fixée à 0,0055 (Jessop 2000).

La survie des larves leptocéphales a été calculée sur la base de la stabilité de la population (p. ex. pour que le taux de croissance de la population, λ , soit égal à 1). Les données ne permettant pas de savoir comment la survie des larves leptocéphales peut varier d'une zone à l'autre, deux scénarios ont été étudiés. Dans le scénario 1, la survie des larves leptocéphales a été calculée indépendamment dans chaque zone, ce qui donne à chaque zone une valeur de survie unique. Ce scénario reproduit étroitement la structure des modèles de populations indépendantes (Brook *et al.* 2024). Dans le scénario 2, un taux de survie unique des larves leptocéphales a été calculé, et mis à l'échelle par la durée approximative de la migration de la mer des Sargasses vers chaque zone (p. ex. la migration de la mer des Sargasses vers la zone AS prend environ 11 mois, tandis que la migration vers SL prend environ 17-18 mois; Cairns *et al.* 2014). La survie des larves leptocéphales a été mise à l'échelle de manière à ce que la constante d'échelle soit égale à 1 dans la zone AS (la zone la plus proche de la mer des Sargasses) et égale à 0,5 dans la zone SL (la zone la plus éloignée de la mer des Sargasses); la valeur des autres zones a été interpolée en fonction de la distance (*Échelle_{L,x}*; tableau 1).

Fécondité

La fécondité a été définie sur la base d'une relation fécondité-longueur dans l'ensemble de l'aire de répartition. En utilisant les données canadiennes de Tremblay (2009) et les données américaines de Barbin & McCleave (1997), les données semblent avoir une tendance

commune, et les différences entre les relations propres au site sont probablement dues à une plage différente de longueurs. La fécondité d'une femelle d'une zone donnée (f_x) est définie comme suit :

$$\log_{10}(f_x) = 2.05 + 2.56(\log_{10}(la_x)), \quad (5)$$

où la est la longueur moyenne de l'anguille argentée dans la zone en cm.

Proportion de femelles

Il existe une grande variation dans la proportion de femelles au sein des sous-populations d'anguille d'Amérique dans toute sa répartition géographique (Cairns *et al.* 2014). Bien que l'avis général soit qu'il n'y a pas de mâles présents naturellement dans la zone SL, des mâles ont été trouvés dans toutes les autres zones (Cairns *et al.* 2014). Les rapports mâles-femelles seraient touchés par certaines variables, telles que la salinité ou la densité, mais il n'a pas été prouvé qu'elles provoquaient des changements significatifs (Côté *et al.* 2015; Cairns *et al.* 2014). Les rapports mâles-femelles moyens des sites d'eau douce ont été utilisés pour la proportion de femelles de chaque zone (Cairns *et al.* 2014), bien que ces moyennes reflètent les sites testés pour les rapports mâles-femelles, et pourraient ne pas être représentatifs d'une zone dans son ensemble (tableau 1).

*Tableau 1. Caractéristiques moyennes du cycle biologique pour chaque zone. Pour les zones AS, AC, AN et SL, les taux de croissance ont été obtenus en utilisant la conversion entre les taux de croissance tirés de la littérature et les taux de croissance biphasiques (Brook *et al.* 2024). Les proportions d'attraction aquatique proviennent de Young & Koops (2014). Échelle_{L,x} fait référence à l'échelle de survie des larves leptocéphales qui pourrait être appliquée à la valeur de survie commune basée sur la distance par rapport à la mer des Sargasses.*

Zone	Taux de croissance (mm/an)	Longueur de l'anguille argentée (mm)	Proportion de femelles	Proportion de l'attraction aquatique	Échelle_{L,x}	Cycle biologique Sources
AS	113,8	629	0,923	0,1901	1	Cairns <i>et al.</i> (2014)
AC	86,9	740	0,734	0,1217	0,95	Cairns <i>et al.</i> (2014)
AN	53,3	510	0,328	0,09880	0,86	Cairns <i>et al.</i> (2014)
SF	42,6	489	0,868	0,06270	0,75	Cairns (2020); Cairns <i>et al.</i> (2014)
SG	52,4	692	0,986	0,02740	0,64	Cairns (2020); Cairns <i>et al.</i> (2014)
NG	50,3	666	0,978	0,2340	0,63	Cairns (2020); Cairns <i>et al.</i> (2014)
SL	66,9	918	1	0,2653	0,5	Cairns <i>et al.</i> (2014)

Dispersion des larves leptocéphales

Le mécanisme de dispersion des larves leptocéphales entre les zones est très peu connu, si ce n'est qu'il existe un mélange génétique suffisant pour être considéré comme panmictique sans structure de population déterminée (Ulmo Diaz *et al.* 2023; Miller *et al.* 2015). Pour tenter de couvrir un éventail réaliste de possibilités, trois variables principales ont pu être modifiées pour changer la façon dont les larves leptocéphales se sont dispersées dans les eaux continentales entre les zones : si chaque zone de la métapopulation avait une valeur de survie des larves leptocéphales indépendante ou si la métapopulation avait une valeur de survie des larves leptocéphales commune mise à l'échelle (voir la section sur la survie ci-dessus), la dispersion sous-jacente des larves leptocéphales (*répart*) vers les zones, et si des effets maternels contribuent à la répartition (*m*).

Young & Koops (2014) ont examiné divers mécanismes de dispersion des larves leptocéphales dans leur modèle de métapopulation d'anguilles d'Amérique, dont la possibilité d'effets maternels. Les effets maternels (*m*) décrivent une mesure du retour à la frayère natale, où les descendants sont plus susceptibles de retourner dans la zone maternelle que dans d'autres zones. Par exemple, si *m* était égal à 0,9 (effets maternels de 90 %), alors 90 % des descendants produits par les femelles d'une zone donnée retourneront dans cette zone, les 10 % restants étant répartis selon la répartition sous-jacente.

La dispersion sous-jacente des larves leptocéphales (*répart*) dans le modèle était l'attraction aquatique. L'attraction aquatique suppose que les larves leptocéphales se répartissent en fonction de la taille de l'habitat d'eau douce disponible dans chaque zone : plus l'espace d'eau de chaque zone est grand, plus les larves leptocéphales vont dans cette zone (Young & Koops 2014) (tableau 1). La dispersion par attraction aquatique pourrait être utilisée comme mécanisme principal de dispersion, ou être utilisée en conjonction avec les effets maternels. Un mécanisme de dispersion par « remplissage » a également été examiné. La dispersion par remplissage incluait également l'attraction aquatique comme moyen de dispersion sous-jacent, mais à mesure que la densité des larves leptocéphales diminuait, moins de larves leptocéphales réussissaient à se déplacer vers le nord en remontant la côte est. Un effet maternel de 5 % a été utilisé dans les scénarios de remplissage afin que la population ne dépende pas uniquement du mécanisme de remplissage. Au total, six scénarios de dispersion des larves leptocéphales ont été testés (tableau 2).

Tableau 2. Scénarios de dispersion des larves leptocéphales examinés.

Options de survie pour les larves leptocéphales		
	Paramètre unique de survie des larves leptocéphales	Paramètre commun et mis à l'échelle de survie des larves leptocéphales
Options de dispersion des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Effets maternels de 90 %
	Attraction aquatique	Attraction aquatique
	Remplissage	Remplissage

Dépendance à la densité

La dépendance à la densité dans la survie des civelles a eu un effet sur les zones individuelles selon l'équation de Beverton-Holt :

$$d_{x,t} = \frac{\sigma_{C,x,\lambda=\max} / \sigma_{C,x,\lambda=1}}{1 + b_{dd,x} / K_{C,x} \times N_{C,x,t}} \quad (6)$$

où $d_{x,t}$ est la compensation appliquée aux civelles dans la zone x , $b_{dd,x}$ est le facteur de dépendance à la densité qui est calculé de telle sorte que lorsqu'une zone donnée est à sa capacité de charge en civelles K_C , $d_{x,t}$ est égal à 1. Cette méthode d'attribution de la dépendance à la densité comporte deux mesures de la survie des civelles σ_C : une lorsque le taux de croissance de la population en temps discret (λ) pour une zone est égal à 1 (la population est stable et ne change pas au fil du temps) et une lorsque la survie des civelles est telle que $\lambda = \lambda_{\max}$. La variable $\lambda_{\max}$ est le taux de croissance maximal théorique de la métapopulation, et a été estimée en utilisant une équation allométrique (Randall & Minns 2000). $N_{C,x,t}$ est le nombre de civelles dans une zone au temps t .

Puisque la dépendance à la densité dans la survie des civelles se produit pendant le stade de civelle, il faut faire une hypothèse sur le moment de la pêche de la civelle par rapport au moment de la dépendance à la densité. Si la dépendance à la densité se produit après la pêche, $N_{C,x,t}$ est réduit en fonction de la mortalité par pêche dans cette zone (Brook *et al.* 2024). Cette hypothèse peut avoir des répercussions dramatiques sur les pêches et les points de référence fondés sur la mortalité (Brook *et al.* 2024), c'est pourquoi les deux hypothèses ont été examinées dans le modèle de métapopulation.

La dépendance à la densité a également été incluse de manière facultative dans le taux de croissance somatique (Brook *et al.* 2024). En partant de la présomption qu'une densité plus faible entraîne une moindre concurrence pour les ressources, et donc une croissance plus rapide (comme possiblement observé en Ontario; EPRI 2018), le nombre d'anguilles jaunes dans chaque zone pourrait avoir un effet sur le taux de croissance dépendant de la densité $tc_{a,x,t}$ de telle sorte que :

$$tc_{a,x,t} = \begin{cases} tc_{\max,x} - tc_{K,x} * \frac{Na_{a,x,t}}{K_{J,x}} & \frac{Na_{a,x,t}}{K_{J,x}} < \frac{tc_{\min,x} - tc_{\max,x}}{-tc_{K,x}} \\ tc_{\min,x} & \frac{Na_{a,x,t}}{K_{J,x}} \geq \frac{tc_{\min,x} - tc_{\max,x}}{-tc_{K,x}} \end{cases} \quad (7)$$

D'après Brook *et al.* (2024), le taux de croissance d'une anguille d'âge a dans la zone x au temps t ($tc_{a,x,t}$) est déterminé par son taux de croissance lorsque la zone est à K ($tc_{K,x}$), son taux de croissance maximal ($tc_{\max,x}$; égal à $tc_{K,x} * 2$) et son taux de croissance minimal ($tc_{\min,x}$; égal à $tc_{K,x} / 2$). $Na_{a,x,t}$ est la densité moyenne d'anguilles jaunes que la classe d'âge a présentait au cours de sa vie, et $K_{J,x}$ est le nombre d'anguilles jaunes lorsque la zone x est à K . Lorsque le rapport entre le nombre d'anguilles jaunes et la capacité de charge est supérieur au point d'intersection entre la première moitié de la fonction définie par morceaux et le taux de croissance minimal, le taux de croissance est égal à ce taux de croissance minimal.

La modification du taux de croissance chaque année en fonction de la densité peut avoir un effet sur la probabilité d'argenture et la survie selon l'âge. Pour changer la probabilité d'argenture, le paramètre du point d'inflexion *int* (équation 2) dépend à la fois de l'âge et du temps :

$$int_{a,x,t} = e^{(\alpha_x * \frac{Na_{a,x,t}}{K_{J,x}})} + \beta_x, \quad (8)$$

où α_x et β_x sont des paramètres dépendants du cycle biologique qui sont calculés de sorte que lorsque $Na_{a,x,t}$ est égal à K_{Jx} , $int_{a,x}$ est égal à sa valeur au $tc_{K,x}$. Lorsque la survie est touchée par la modification des taux de croissance en fonction de la densité, le taux de croissance dépendant de la densité ($tc_{a,x,t}$) pour chaque âge est utilisé pour calculer la longueur moyenne à l'âge a , qui est convertie en poids (équation 3) et utilisée dans l'équation de survie (équation 4). Dans l'ensemble, les trois différents scénarios avec dépendance à la densité étaient « DD des civelles » (dépendance à la densité uniquement pour la survie de la civelle), « DD des civelles + Arg. » (dépendance à la densité pour la survie de la civelle et probabilité d'argenture) et « DD des civelles + Arg. + Mort. » (dépendance à la densité pour la survie de la civelle, probabilité d'argenture et mortalité).

STRUCTURE DE LA POPULATION

Structure du modèle

La métapopulation a été créée comme un modèle matriciel structuré selon l'âge, à l'exception des stades d'anguille argentée (Ar_x), qui comprenaient plusieurs classes d'âge. Le modèle a été structuré comme un modèle précédant la reproduction, de sorte que les individus sont recrutés en tant que civelles et que les stades d'œuf et de leptocéphale sont inclus dans le terme « recrutement ». Toutes les zones ont un stade de civelle (C_x) qui a duré un an, et le stade d'anguille jaune (J_x) qui a représenté la majorité de la durée de vie de l'anguille d'Amérique (équation 10). Chaque zone a le même âge maximal (a_{max}) de 25, ce qui signifie que les dimensions de la matrice de chaque zone sont égales à 25 + 1 sur 25 + 1. Pour chaque zone, le stade-1 représente les civelles dans cette zone, et le stade-26 le nombre d'anguilles argentées dans cette zone. Le modèle comporte sept zones, correspondant à la figure 2. Bien que chaque zone ait son propre cycle biologique, les processus qui se sont déroulés dans toutes les zones sont les mêmes.

La matrice démographique d'une zone donnée a l'équation suivante :

$$M_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & R_{e\ x \rightarrow x} \\ C_x & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{2\ x} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{3\ x} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & J_{a_{max}-1\ x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Ar_{a_{max}-1\ x} & Ar_{a_{max}\ x} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

où $R_{e,x \rightarrow x}$ correspond aux larves leptocéphales produites par les anguilles argentées de la zone x qui retournent dans la zone x , C_x est le passage au stade de civelle, les stades J_x passent aux âges de l'anguille jaune et Ar_x est le stade d'anguille argentée.

La matrice de dispersion D détermine la manière dont les larves leptocéphales se déplacent entre les différents stades :

$$D_{x \rightarrow y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & R_{e\ x \rightarrow y} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

où $R_{e,x \rightarrow y}$ correspond aux larves leptocéphales produites par les anguilles argentées de la zone x qui se dispersent dans la zone y .

Les matrices démographiques et de dispersion sont combinées dans la matrice de projection A :

$$A = \begin{bmatrix} M_{AS} & D_{AC \rightarrow AS} & D_{AN \rightarrow AS} & D_{SF \rightarrow AS} & D_{SG \rightarrow AS} & D_{NG \rightarrow AS} & D_{SL \rightarrow AS} \\ D_{AS \rightarrow AC} & M_{AC} & D_{AN \rightarrow AC} & D_{SF \rightarrow AC} & D_{SG \rightarrow AC} & D_{NG \rightarrow AC} & D_{SL \rightarrow AC} \\ D_{AS \rightarrow AN} & D_{AC \rightarrow AN} & M_{AN} & D_{SF \rightarrow AN} & D_{SG \rightarrow AN} & D_{NG \rightarrow AN} & D_{SL \rightarrow AN} \\ D_{AS \rightarrow SF} & D_{AC \rightarrow SF} & D_{AN \rightarrow SF} & M_{SF} & D_{SG \rightarrow SF} & D_{NG \rightarrow SF} & D_{SL \rightarrow SF} \\ D_{AS \rightarrow SG} & D_{AC \rightarrow SG} & D_{AN \rightarrow SG} & D_{SF \rightarrow SG} & M_{SG} & D_{NG \rightarrow SG} & D_{SL \rightarrow SG} \\ D_{AS \rightarrow NG} & D_{AC \rightarrow NG} & D_{AN \rightarrow NG} & D_{SF \rightarrow NG} & D_{SG \rightarrow NG} & M_{NG} & D_{SL \rightarrow NG} \\ D_{AS \rightarrow SL} & D_{AC \rightarrow SL} & D_{AN \rightarrow SL} & D_{SF \rightarrow SL} & D_{SG \rightarrow SL} & D_{NG \rightarrow SL} & M_{SL} \end{bmatrix} \quad (11)$$

A est une matrice de 182 par 182 (sept zones multipliées par l'âge maximal de $25 + 1$). Le vecteur de la population n a également cette longueur de 182, où l'abondance de la population de chaque zone fait l'objet d'un suivi (les 26 premières valeurs sont les abondances de chaque classe d'âge dans la zone 1, les 26 suivantes sont celles de la zone 2, etc.).

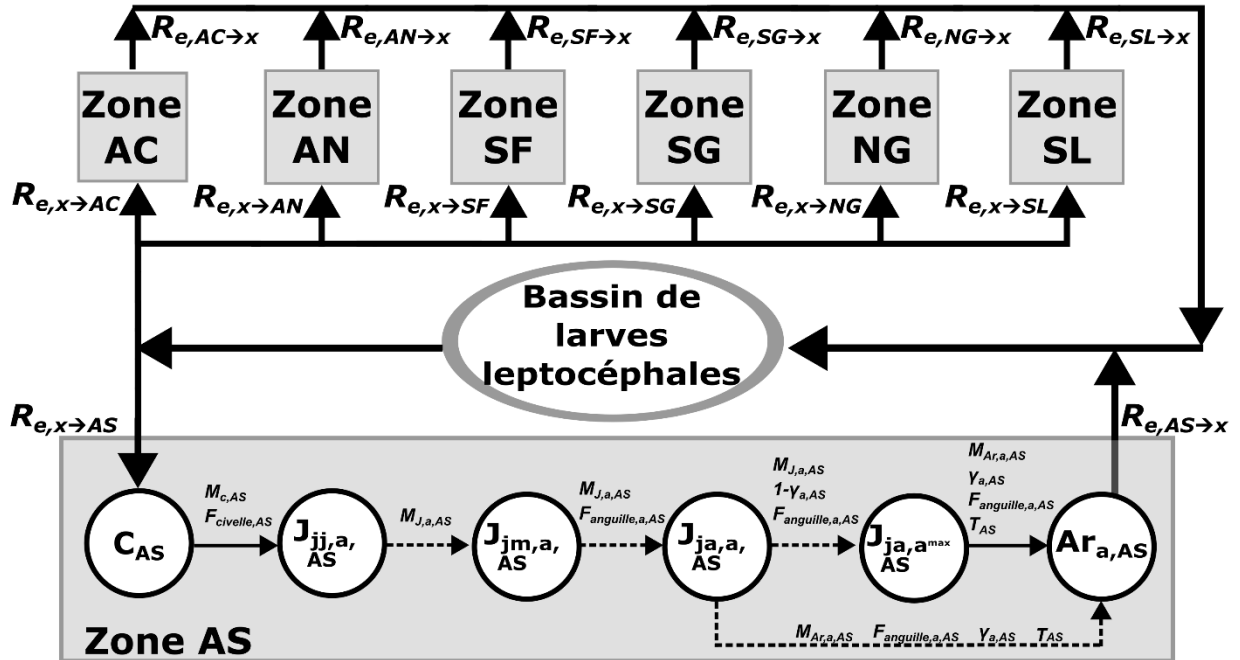


Figure 2. Diagramme du modèle de métapopulation. Les processus survenant dans chaque matrice M (équation 9) ont été développés pour la zone AS, mais toutes les zones ont les mêmes équations et processus. L'indice jj désigne les jeunes anguilles jaunes, l'indice jm désigne les anguilles jaunes modérément âgées qui ne sont pas assez âgées pour être argentées et l'indice ja désigne les anguilles jaunes assez âgées pour être argentées.

La métapopulation se déplace dans le temps par incréments annuels t selon l'équation suivante :

$$n_{t+1} = A_N t n_t \quad (12)$$

La matrice A change chaque année en fonction de la densité au moment t .

Les paramètres de recrutement (R_e), le site et le nombre de descendants de chaque zone qui vont dans toutes les zones, sont déterminés par différentes combinaisons des variables ci-dessus. Le nombre de larves leptocéphales qui retournent dans la même zone x d'où proviennent les anguilles argentées est calculé de cette façon :

$$Re_{x \rightarrow x} = f_x \times \sigma_{Lx} \times m + f_x \times \sigma_{Lx} \times (1 - m) \times \text{répart}_x \quad (13)$$

et le nombre de larves leptocéphales produites par des anguilles argentées dans la zone x , mais dispersées dans la zone y est :

$$Re_{y \rightarrow x} = f_y \times \sigma_{Lx} \times (1 - m) \times \text{répart}_x \quad (14)$$

où f_y est la valeur de la fécondité dans la zone y , répart_x est la répartition des larves leptocéphales allant dans la zone x , m est l'effet maternel et σ_{Lx} est la survie des larves leptocéphales dans la zone x (calculée indépendamment ou mise à l'échelle à partir d'une valeur commune).

Chaque zone reçoit chaque année un nombre de larves leptocéphales en fonction du nombre d'anguilles argentées ($N_{Ar,x,t}$) dans la population :

$$N_{Lx,t} = Re_{x \rightarrow x} \times N_{Ar,x,t} + \sum_{y=1}^6 (Re_{y \rightarrow x} \times N_{Ar,y,t}) \quad (15)$$

Lorsque le nombre d'anguilles argentées est égal au nombre d'anguilles argentées quand la métapopulation est à K ($N_{Ar,x,t} = K_{Ar,x}$) dans l'équation 15, l'équation 15 est alors utilisée pour calculer le nombre de larves leptocéphales que chaque zone reçoit lorsque la population est à K ($K_{L,x}$). Le nombre total de larves leptocéphales dans la métapopulation à K ($K_{L,total}$) est la somme de $K_{L,x}$ dans toutes les zones.

Il est important de connaître le nombre total de larves leptocéphales dans la métapopulation lorsque l'on utilise le scénario de dispersion par remplissage (tableau 2), dans lequel la densité de larves leptocéphales a un effet sur les probabilités de dispersion vers les zones. Le nombre de larves leptocéphales dans l'ensemble de la métapopulation au moment t est égal à :

$$N_{L,total,t} = \sum_{x=1}^7 (N_{Lx,t}) \quad (16)$$

En partant de la zone la plus au sud (AS, $x=1$) et en allant vers le nord (jusqu'à SL, $x=7$), le nombre de larves leptocéphales se dispersant vers la zone x à K ($K_{L,x}$) est soustrait du nombre de leptocéphales disponibles ($N_{L,dispo,x,t}$), ce qui donne le nouveau total de larves leptocéphales disponibles. Pour la zone AS, le nombre de larves leptocéphales disponibles est $N_{L,total,t}$, car il s'agit de la zone la plus au sud. En soustrayant $K_{L,1}$ de ce total, on obtient le nombre de larves leptocéphales qui pourraient aller dans la zone la plus au nord suivante, AC, et ainsi de suite :

$$N_{L,dispo,x+1,t} = N_{L,dispo,x,t} - K_{L,x} \quad (17)$$

Le rapport entre $N_{L,dispo,x,t}$ et $K_{L,x}$ est utilisé pour déterminer le modificateur de la répartition des larves leptocéphales pour la zone x (mod_x). Si le nombre de larves leptocéphales disponibles est inférieur à $K_{L,x}$, le modificateur était égal au nombre de larves leptocéphales disponibles pour cette zone, divisé par la valeur $K_{L,x}$ pour cette zone. Toutes les zones où le nombre de larves leptocéphales disponibles était inférieur à 5 % de la proportion à K ont été fixées avec un modificateur minimal de 0,05 :

$$mod_{x,t} = \begin{cases} 1 & \frac{N_{L,dispo,x,t}}{K_{L,x}} \geq 1 \\ \frac{N_{L,dispo,x,t}}{K_{L,x}} & \frac{N_{L,dispo,x,t}}{K_{L,x}} < 1 \text{ ET } \frac{N_{L,dispo,x,t}}{K_{L,x}} > 0,05 \\ 0,05 & \frac{N_{L,dispo,x,t}}{K_{L,x}} \leq 0,05 \end{cases} \quad (18)$$

où $mod_{x,t}$ est le modificateur à appliquer à la dispersion sous-jacente des larves leptocéphales. Les valeurs mod sont multipliées par la dispersion sous-jacente par attraction aquatique des larves leptocéphales (tableau 1), puis remises à l'échelle pour que la somme soit égale à 1 :

$$répart_{x,t} = (mod_{x,t} \times attr, aqua_x) / \sum_{y=1}^7 (mod_{y,t} \times attr, aqua_y) \quad (19)$$

Avec le scénario de dispersion par remplissage, la valeur $répart_{x,t}$ est recalculée à chaque pas de temps. Pour les autres options, la valeur reste statique pendant les simulations.

Bien que le cycle biologique varie d'un site à l'autre, les équations qui déterminent la matrice de transition pour chaque stade/âge sont cohérentes, et identiques à celles de Brook *et al.* (2024). Le stade de civelle dans la zone x est obtenu avec :

$$C_x = (prop_f x \times e^{-(F_{civelle x})} \times \sigma_{C x}) \times d_{x,t} \quad (20)$$

où $\sigma_{C,x}$ est le taux annuel de mortalité naturelle de la civelle, $F_{civelle,x}$ est le taux de mortalité instantanée par pêche de la civelle dans la zone x, $prop_f$ est la proportion de femelles dans la zone x (tableau 1, Cairns *et al.* 2014) et $d_{x,t}$ est la compensation pour la dépendance à la densité (équation 6). Le stade d'anguille jaune dans la zone x est obtenu avec :

$$Y_{a,x} = (1 - \gamma_{a,x}) \times e^{-(M_{y,a,x} + F_{anguille a,x})} \quad (21)$$

où $1 - \gamma_{a,x}$ est la probabilité de non-argenteure, $M_{y,a,x}$ est le taux de mortalité naturelle propre à l'âge de l'âge a dans la zone x (équation 4). $F_{anguille,a,x}$ est le taux de mortalité instantanée par pêche propre à l'âge et à la zone. Chaque âge avait sa propre valeur $F_{anguille}$, selon la proportion d'anguilles censées être plus grandes que la taille minimale pour la pêche (voir Brook *et al.* 2024 pour obtenir plus de détails). La transition vers l'anguille argentée à l'âge a est calculée comme suit :

$$Ar_{a,x} = \gamma_{a,x} \times e^{-(M_{ar,a,x} + F_{anguille a,x} + T_x)} \quad (22)$$

où $\gamma_{a,x}$ est la probabilité d'argenteure, $M_{ar,a,x}$ est le taux de mortalité naturelle pour l'anguille argentée selon l'âge et la zone, et T est le taux de mortalité due aux turbines propre à la zone.

Analyse du modèle de population

Analyse stochastique

Pour tenir compte de l'incertitude dans la paramétrisation du cycle biologique, la stochasticité a été incluse pour plusieurs variables clés, leur valeur étant tirée de façon aléatoire de distributions précisées pour chaque répétition de la simulation. L'incertitude du taux de croissance et de la longueur de l'anguille argentée a été basée sur les écarts-types à l'échelle du Canada (7,95 mm/an et 89 mm, respectivement; Brook *et al.* 2024). Sur la base d'environ deux multipliés par l'écart-type, les taux de croissance ont été tirés d'une distribution uniforme où le taux de croissance à K était égal à la valeur moyenne du tableau 1 ± 15 mm/an, et la longueur moyenne de l'anguille argentée était de ± 175 mm. La proportion de femelles dans chaque zone a été tirée d'une distribution bêta, qui limite la prédiction entre 0 et 1. Un écart-type de 0,025 a été utilisé pour toutes les zones, ce qui correspondait à une plage approximative de $\pm 0,1$ par rapport à la proportion moyenne de femelles (tableau 1), à l'exception de la zone SL qui a été maintenue constante avec 100 % de femelles pour toutes les simulations. Il est généralement admis qu'aucun mâle n'est présent dans la zone SL, sauf des anguilles qui ont été déplacées lors d'une expérience sur le transport (Pratt & Threader 2011).

L'incertitude sur les autres variables du cycle biologique a suivi les méthodes de Brook *et al.* (2024). La fécondité a été calculée à l'aide de l'équation 5, puis variée en supposant une distribution normale et un coefficient de variation (CV) de 10 % (Brook *et al.* 2024). La valeur

λ_{max} a été tirée d'une distribution uniforme, allant de 1,2 à 1,5 (Randall & Minns 2000, Brook *et al.* 2024), bien que chaque zone ait la même valeur λ_{max} pour une répétition de simulation donnée. Chaque zone avait une longueur de civelle unique, qui suivait une distribution uniforme, avec une taille minimale de 57 mm et un maximum de 69 mm (Brook *et al.* 2024; Jessop 2010). Les valeurs de survie étaient indépendantes entre les zones, le paramètre η étant tiré d'une distribution uniforme entre 0,063 et 0,21, ce qui donne une valeur de survie maximale comprise entre ~90 et 97 % (équation 4). Le taux de survie de la civelle varie uniformément entre 0,0052 et 0,0057 (Jessop 2000).

Calcul des points de référence fondés sur la mortalité F_{50}

Le point de référence fondé sur la mortalité F_{50} a été déterminé pour chaque zone, en supposant qu'il s'agissait d'une population indépendante (Brook *et al.* 2024; Bradford *et al.* 2022). Pour ce faire, le cycle biologique a été généré de manière aléatoire comme décrit ci-dessus (tableau 1) et des simulations ont été effectuées jusqu'à ce que chaque zone ait une taille d'échantillon de 50 points de données avec une valeur d'échappée d'anguilles argentées comprise entre 0,49 et 0,51. La valeur médiane F de cet échantillon a été utilisée comme valeur F_{50} (mêmes méthodes que Brook *et al.* 2024). Pour la pêche de l'anguille, il a été supposé que chaque zone avait la même taille minimale d'anguille de 300 mm, qui a été choisie comme une taille minimale modérée, tout en s'assurant qu'aucune répétition de la simulation n'avait une longueur d'anguille argentée inférieure à la taille minimale de pêche. La médiane de $F_{extinction}$ a également été calculée selon les méthodes de Brook *et al.* (2024), représentant le plus petit taux de mortalité par pêche qui entraînerait la disparition de la population (Brook *et al.* 2024).

Pour observer la façon dont les options de dispersion des larves leptocéphales influent sur les capacités de charge par zone et la réaction des populations face au taux de mortalité par pêche, une simulation de 125 ans a été réalisée en utilisant les données moyennes sur le cycle biologique (sans stochasticité dans le cycle biologique). La chronologie de ces simulations a commencé en 1900, avec toutes les populations pêchées selon leurs valeurs calculées pour l'anguille F_{50} . Après 75 ans (en 1975), une mortalité annuelle due aux turbines de 40 % a été ajoutée dans la zone SL (COSEWIC 2012). En 2000, la pêche de la civelle dans les zones AN et SF (représentant le Maine et la Nouvelle-Écosse) (Cairns *et al.* 2014) a également été appliquée à F_{50} , et la simulation a continué jusqu'en 2025. Cette simulation avait comme objectif de visualiser les effets de divers ajouts séquentiels de différentes sources de mortalité anthropiques, ainsi que les options variées de survie et de dispersion des larves leptocéphales. Il ne s'agissait pas d'imiter directement une chronologie historique de la mortalité d'origine anthropique.

Gestion avec F_{50} dans une métapopulation

Chaque simulation stochastique avait une exploitation avec les valeurs F_{50} dérivées indépendamment pendant 50 ans pour la pêche de l'anguille et la pêche de la civelle. Cent essais stochastiques ont été réalisés pour chaque scénario de larves leptocéphales et de dépendance à la densité. L'échappée d'anguilles argentées des zones et des populations a été enregistrée, où l'échappée (échap) de la zone est :

$$\text{Échap}_x = \frac{N_{Ar\ x\ après}}{N_{Ar\ x\ avant}} \quad (23)$$

où $N_{Ar,x}$ est le nombre d'anguilles argentées dans la zone x , qui est déterminé avant et après l'application de la mortalité par pêche à la population. L'échappée de l'ensemble de la métapopulation correspond à :

$$\text{Échap}_{totale} = \frac{\sum_{i=1}^7 N_{Ar\ x\ après}}{\sum_{i=1}^7 N_{Ar\ x\ avant}} \quad (24)$$

Les valeurs d'échappée proches de 0,5 indiquent que les valeurs F_{50} générées indépendamment peuvent être utilisées afin de gérer la métapopulation pour le même objectif d'échappée.

Simulation de surmortalité et de rétablissement

Des simulations ont été utilisées pour étudier comment une surmortalité survenant dans une ou plusieurs zones peut avoir un effet sur l'état de la métapopulation ou d'autres zones. Ces simulations permettent d'estimer le nombre de zones qui doivent être fortement touchées avant que les effets ne soient observés à l'échelle de la métapopulation, ainsi que de déterminer la réponse de chacune des zones lorsque de plus en plus de zones présentent une surmortalité. L'abondance de la métapopulation après l'exploitation de l'anguille à F_{50} pendant 50 ans a été le point de départ des simulations. La surmortalité a été simulée en fixant le niveau de pêche d'une zone aléatoire à $F_{extinction}$ (c'est-à-dire juste après le seuil de surpêche). Cette zone a été exploitée à sa valeur $F_{extinction}$ pendant 50 années supplémentaires, et l'échappée a été mesurée. Ensuite, toujours à partir de l'abondance de l'essai à F_{50} , une zone supplémentaire a été choisie au hasard pour être exploitée à $F_{extinction}$ (pour un total de deux zones subissant une surmortalité), et la simulation s'est déroulée sur une période de 50 ans. Cette opération a été répétée jusqu'à ce que les sept zones soient soumises à une surmortalité. La surmortalité a été appliquée aux stades de vie de la civelle et de l'anguille afin de déterminer si l'effet du stade de vie influait sur la réponse de la population. Lors des essais sur la civelle, l'anguille continuait d'être exploitée à sa valeur F_{50} .

Les simulations de rétablissement ont été effectuées de la même manière, mais dans l'ordre inverse de la simulation de surmortalité. Ces simulations ont été utilisées pour déterminer s'il existe un nombre seuil de zones qui doivent se rétablir avant que des effets soient observés au niveau de la zone et de l'ensemble de la métapopulation. L'abondance de départ utilisée était le résultat de la pêche de toutes les zones à leur valeur $F_{extinction}$ (anguille ou civelle) après 50 ans. Dans un ordre aléatoire, l'une des zones a plutôt été choisie pour être exploitée à sa valeur F_{50} (pour les essais sur l'anguille) ou pour que la pêche cesse (pour les essais sur la civelle) pendant 50 ans de plus, jusqu'à ce qu'aucune zone ne connaisse de surmortalité. Cent simulations stochastiques ont été effectuées pour les deux simulations.

Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer la sensibilité de l'échappée (à la fois à l'échelle de la métapopulation et de l'échappée propre à la zone) aux changements dans le cycle biologique dans l'une des zones. D'après une analyse de sensibilité antérieure (Brook *et al.* 2024), cinq paramètres du cycle biologique ont été sélectionnés pour être perturbés, à savoir le taux de croissance, la longueur de l'anguille argentée, la fécondité, la survie de l'anguille jaune et de l'anguille argentée ainsi que la proportion de femelles dans chaque zone. Une matrice a été générée de manière aléatoire et, un par un, chaque paramètre du cycle biologique de la zone a été perturbé, et les échappées qui en ont résulté ont été enregistrées. Chaque cycle biologique a été perturbé de $\pm 10\%$, à l'exception de la proportion de femelles, en raison de sa distribution bêta. La proportion de femelles a plutôt été perturbée en utilisant les quantiles 2,5 et 97,5 % en supposant une distribution bêta, en utilisant la valeur choisie aléatoirement comme moyenne et un écart-type de 0,025. Cette opération a été répétée jusqu'à ce que chaque variable du cycle biologique ait été testée cent fois pour chaque zone.

RÉSULTATS

Les valeurs F_{50} calculées de la zone indépendante variaient en fonction des mécanismes de dépendance à la densité et du type de pêche. Le modèle « DD des civelles » présentait les

valeurs F_{50} les plus faibles, et les points de référence fondés sur la mortalité augmentaient à mesure que le nombre de mécanismes de dépendance à la densité augmentait (tableaux 3 et 4). Lorsque la dépendance à la densité apparaissait après la pêche de la civelle, les valeurs F_{50} étaient beaucoup plus élevées que si la dépendance à la densité apparaissait avant la pêche. Les valeurs $F_{extinction}$ montrent l'inverse de cette tendance; des mécanismes supplémentaires avec dépendance à la densité ont abaissé les valeurs $F_{extinction}$. Pour les simulations, les valeurs $F_{extinction}$ pour la civelle ont été calculées en supposant que la pêche de l'anguille était gérée à sa valeur F_{50} , ce qui, occasionnellement, a engendré des valeurs $F_{extinction}$ inférieures aux valeurs F_{50} lorsque seule la civelle était pêchée. Le but était de s'assurer que la valeur $F_{extinction}$ pour la pêche de la civelle prenne en compte la mortalité de l'anguille dans les essais sur la surmortalité : si $F_{extinction}$ était calculée en supposant uniquement la mortalité de la civelle, la valeur $F_{extinction}$ surestimerait la mortalité que la population pourrait supporter tout en étant capable de se remplacer lorsque la pêche de l'anguille était incluse dans la simulation.

Tableau 3. Résumé des valeurs F_{50} et $F_{extinction}$ de la pêche de la civelle calculées en supposant des zones indépendantes, à utiliser dans les simulations. La valeur $F_{extinction}$ a été calculée en supposant que l'anguille était pêchée à sa valeur F_{50} .

Modèle de densité	Moment de la pêche	Zone	F_{50}	$F_{extinction}$
DD des civelles	DD se produit APRÈS la pêche de la civelle	AS	2,3	2,03
		AC	2,99	1,93
		AN	2,86	2,25
		SF	2,88	2,14
		SG	3,14	2,13
		NG	3,44	2,32
		SL	3,67	2,25
	DD se produit AVANT la pêche de la civelle	AS	0,646	2,03
		AC	0,657	1,93
		AN	0,661	2,25
		SF	0,667	2,14
		SG	0,671	2,13
		NG	0,672	2,32
		SL	0,676	2,25
DD des civelles + Arg.	DD se produit APRÈS la pêche de la civelle	AS	2,11	2,05
		AC	2,20	2,26
		AN	1,95	2,35
		SF	2,46	2,29
		SG	2,47	2,46
		NG	2,45	2,14
		SL	2,39	2,19
	DD se produit AVANT la pêche de la civelle	AS	0,709	2,05
		AC	0,749	2,26
		AN	0,827	2,35
		SF	0,915	2,29
		SG	0,899	2,46
		NG	0,915	2,14
		SL	0,828	2,19
DD des civelles + Arg. + Mort.		AS	2,08	1,88
		AC	2,22	2,18

Modèle de densité	Moment de la pêche	Zone	F_{50}	$F_{extinction}$
	DD se produit APRÈS la pêche de la civelle	AN	2,26	2,20
		SF	2,37	1,96
		SG	2,65	2,41
		NG	2,81	2,59
		SL	2,78	2,35
	DD se produit AVANT la pêche de la civelle	AS	0,89	1,88
		AC	1,01	2,18
		AN	1,12	2,20
		SF	1,25	1,96
		SG	1,33	2,41
		NG	1,25	2,59
		SL	1,21	2,35

Tableau 4. Résumé des valeurs F_{50} et $F_{extinction}$ de la pêche de l'anguille calculées en supposant des zones indépendantes, à utiliser dans les simulations.

Modèle de densité	Zone	F_{50}	$F_{extinction}$
DD des civelles	AS	0,0976	0,528
	AC	0,0890	0,587
	AN	0,125	1,08
	SF	0,153	1,15
	SG	0,0832	0,773
	NG	0,0810	0,777
	SL	0,0682	0,638
DD des civelles + Arg.	AS	0,105	0,463
	AC	0,101	0,51
	AN	0,133	0,727
	SF	0,174	0,860
	SG	0,105	0,589
	NG	0,110	0,579
	SL	0,0906	0,540
DD des civelles + Arg. + Mort.	AS	0,118	0,469
	AC	0,115	0,497
	AN	0,162	0,691
	SF	0,224	0,942
	SG	0,129	0,552
	NG	0,130	0,568
	SL	0,109	0,516

VISUALISATION SUR 125 ANS

Parmi les mécanismes de survie et de dispersion des larves leptocéphales utilisés, lesquels ont influé sur la répartition initiale stable de la métapopulation (figure 3; données complémentaires)? Lorsqu'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales était utilisée, la population de la zone AS était souvent la zone la plus importante; cependant, lorsque la dispersion se faisait selon le scénario avec des effets maternels de 90 %, la zone SL était de loin la plus importante. Quand chaque zone avait sa propre survie de larves leptocéphales, la zone NG avait systématiquement la population la plus importante et, en général, les abondances des zones étaient davantage similaires. Alors que les scénarios de remplissage et

d'attraction aquatique présentait des conditions initiales similaires, leur comportement a changé dans des conditions de pêche différentes. Notamment, après l'application de la mortalité d'origine anthropique, les zones les plus au nord, telles que SL et NG, présentaient des tailles de population finales plus petites avec les scénarios de remplissage qu'avec les scénarios d'attraction aquatique.

Si le comportement des scénarios était différent, les tendances générales étaient semblables entre eux. Lorsque l'anguille était exploitée à sa valeur F_{50} , le nombre d'anguilles argentées diminuait rapidement avant de se stabiliser (figure 3; données complémentaires). En 1975, lorsque la mortalité due aux turbines a été ajoutée dans la simulation pour la zone SL, le nombre d'anguilles argentées dans cette zone a diminué. En 2000, l'introduction de la pêche de la civelle dans les zones AN et SF n'a touché en grande partie que ces zones. Ces tendances générales étaient cohérentes, quels que soient les mécanismes de dépendance à la densité dans le modèle et le moment où la dépendance à la densité se produisait pour la civelle (données complémentaires 1).

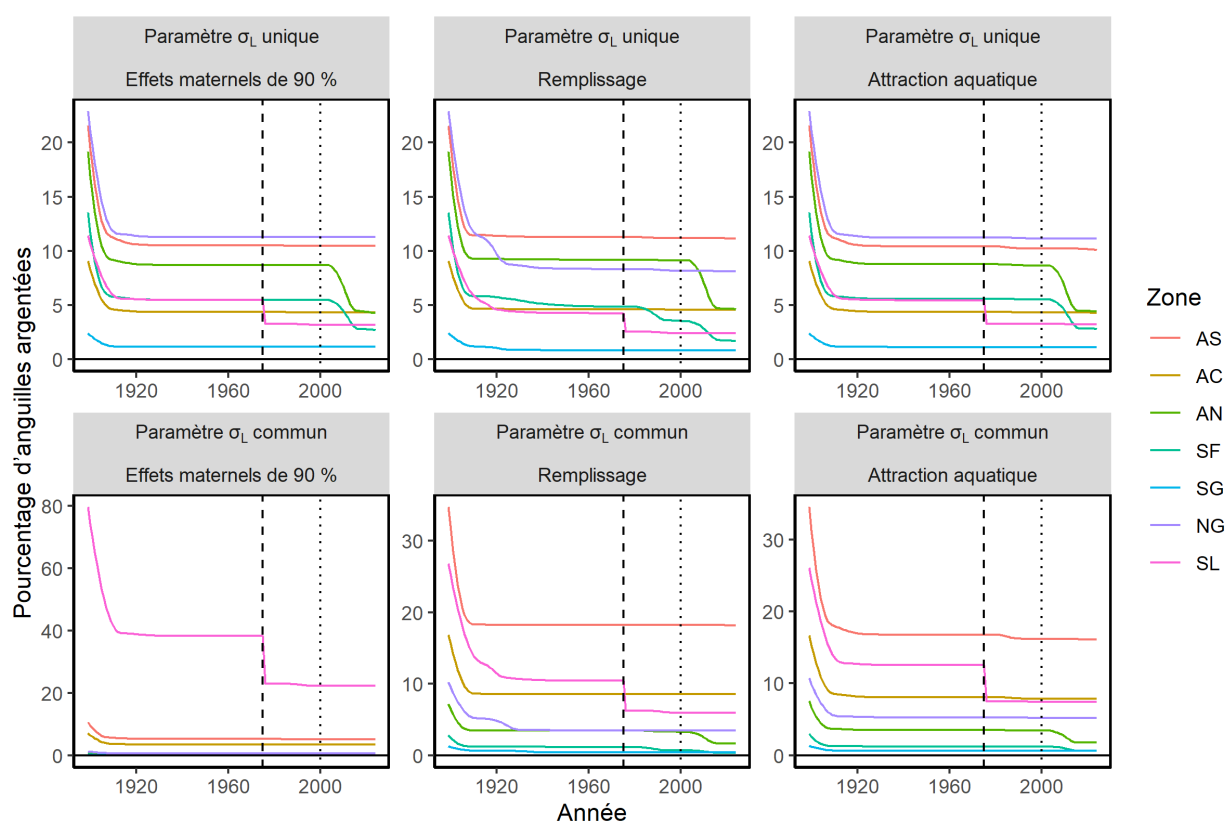


Figure 3. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

GESTION DES ZONES AVEC F_{50}

Dans la plupart des scénarios, la gestion de la métapopulation à l'aide des valeurs F_{50} calculées à partir des populations indépendantes engendre une échappée de l'ensemble de la métapopulation égale ou près de 50 %, en particulier lorsque la dépendance à la densité n'a joué que dans la survie de la civelle. Pour la pêche de la civelle, lorsque la dépendance à la

densité se produisait avant la pêche, les valeurs d'échappée étaient presque toutes à 50 %, à l'exception de l'hypothèse sur la dispersion par remplissage (tableau 5; figure 4). Avec l'hypothèse du remplissage, les quatre zones les plus au nord (SL, NG, SG et SF) sont systématiquement en dessous de leur objectif (figure 5). En revanche, les valeurs d'échappée sont beaucoup plus variables lorsque la dépendance à la densité dans la survie de la civelle se produit après la pêche (tableau 6, figure 6). Avec cette hypothèse, l'échappée de l'ensemble de la métapopulation était aussi faible que 0 % pour la plupart des hypothèses de dispersion et de survie des larves leptocéphales (figure 6). La variance dans les valeurs d'échappée pour les zones individuelles était très élevée, bien qu'elles montrent les mêmes tendances générales que lorsque la dépendance à la densité se produit avant la pêche (figure 7).

La pêche de l'anguille était plus variable que la pêche de la civelle lorsque la dépendance à la densité se produit avant la pêche, mais moins variable que la pêche de la civelle lorsque la dépendance à la densité se produit après la pêche. Une fois encore, l'hypothèse de dispersion par remplissage a donné les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation les plus faibles (figure 8), et les zones les plus au nord étaient systématiquement en dessous de leur objectif (figure 9). Toutefois, les valeurs d'échappée avaient également tendance à être inférieures à leur objectif dans les zones AN et SF lorsque l'exploitation était à la valeur F_{50} de l'anguille (tableau 7; figure 9). Pour toutes les pêches, la variabilité dans les résultats augmentait à mesure que des mécanismes de dépendance à la densité étaient inclus dans le modèle, et, avec le mécanisme de dispersion par remplissage, les valeurs d'échappée des zones au nord avaient tendance à être plus faibles (données complémentaires 2).

Pour la plupart des hypothèses relatives à la survie et à la dispersion des larves leptocéphales, il n'y a pas eu de grandes différences dans les résultats propres aux zones (p. ex. la zone SG ne s'est pas comportée différemment de la zone NG), à l'exception des zones AN et SF qui ont été constamment inférieures à leur objectif pour la pêche de l'anguille. Cependant, avec l'hypothèse de la dispersion par remplissage, les valeurs d'échappée des zones au nord (SL, NG, SG et SF) étaient systématiquement inférieures à celles des autres zones (figures 5, 7 et 9). Ce schéma s'est présenté à la fois pour la pêche de l'anguille et de la civelle, et pour tous les mécanismes de dépendance à la densité (données complémentaires 2). Toutefois, avec l'hypothèse de dispersion par remplissage, il est peu probable que la pêche dans toutes les zones avec la valeur F_{50} calculée en supposant des populations indépendantes engendre une échappée d'anguilles argentées de 50 % dans la portion nord de la répartition de l'anguille d'Amérique.

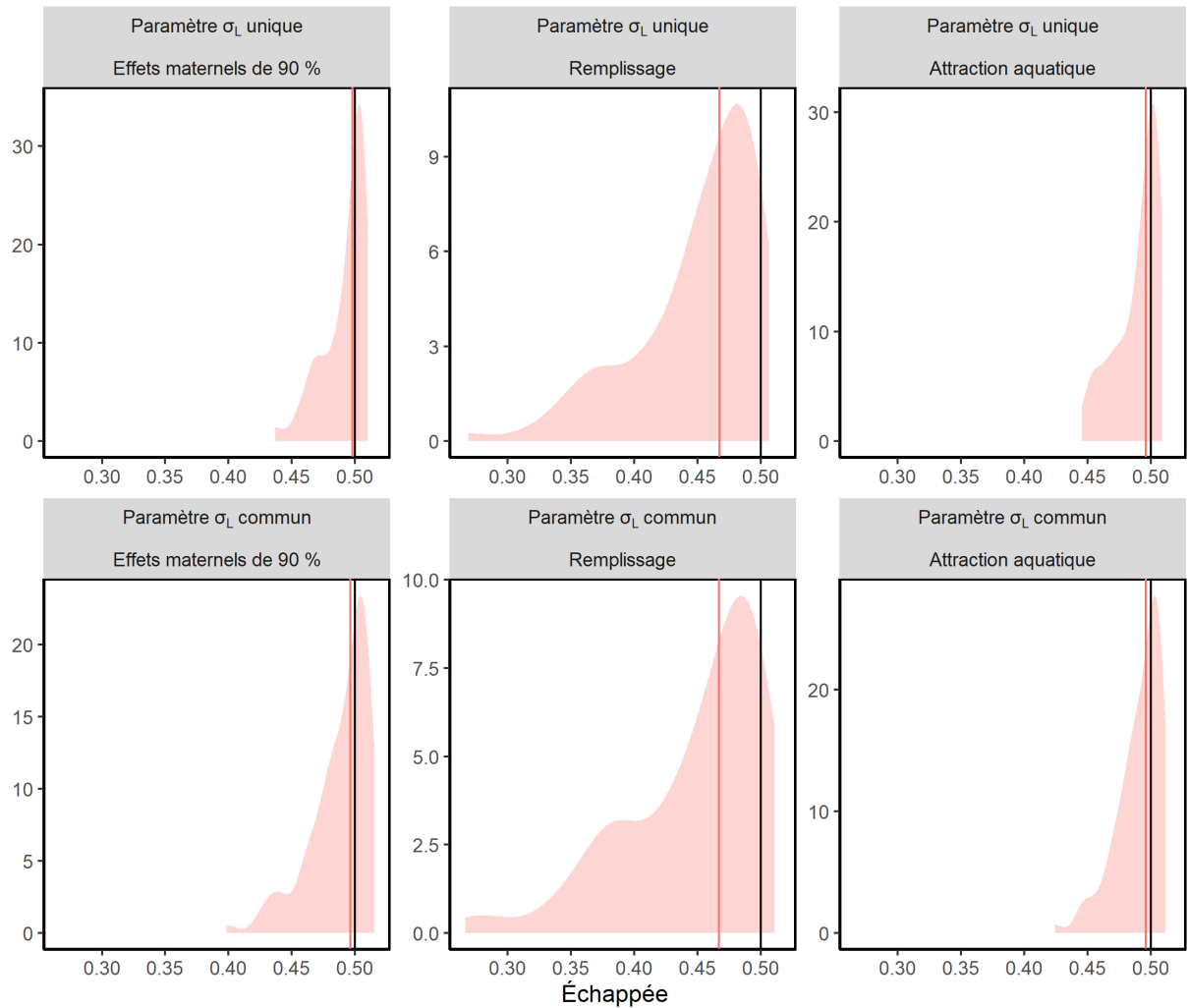


Figure 4. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles », et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée $_{50}$, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

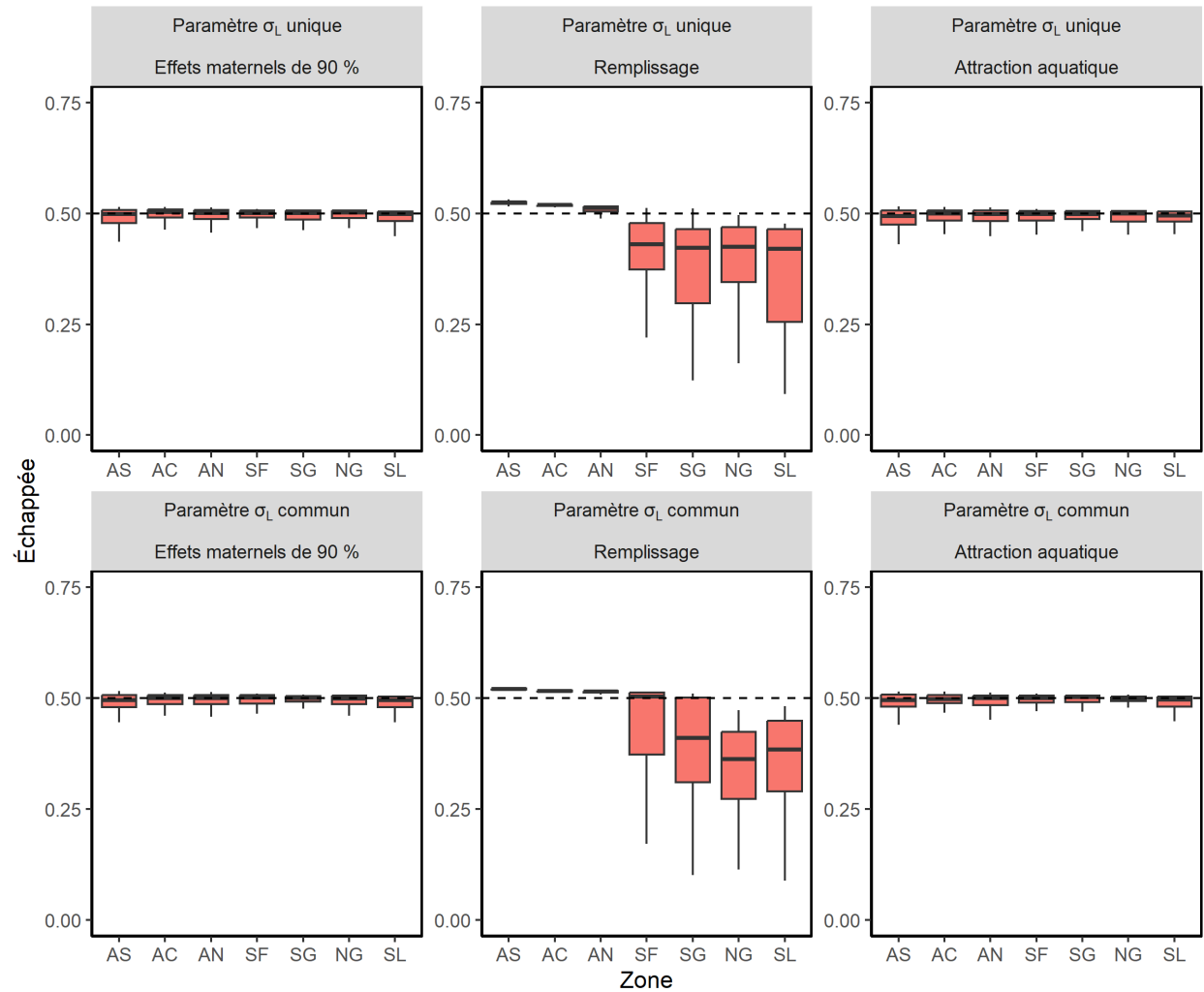


Figure 5. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles », et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche.

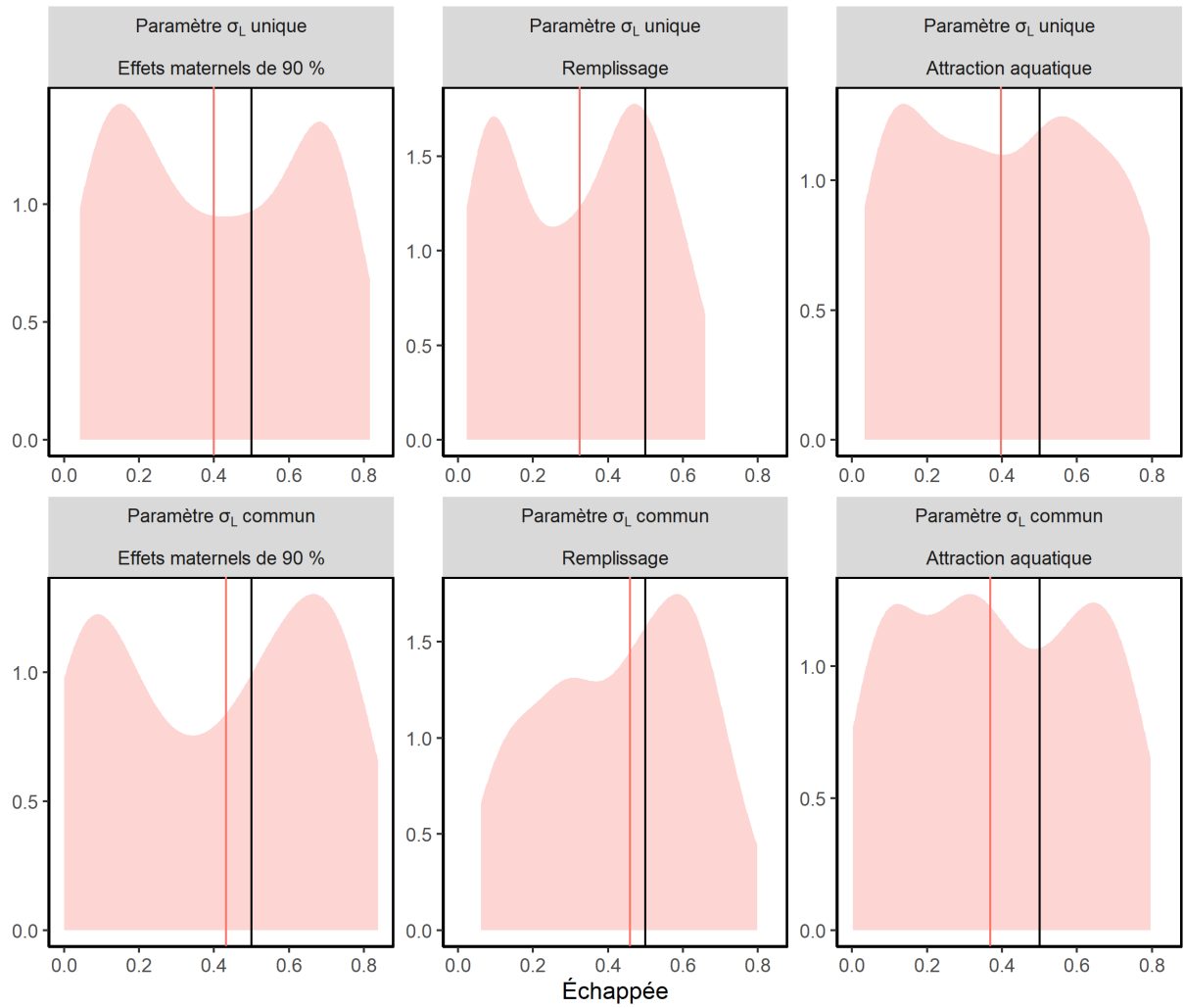


Figure 6. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles », et que la dépendance à la densité se produit après la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée $_{50}$, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

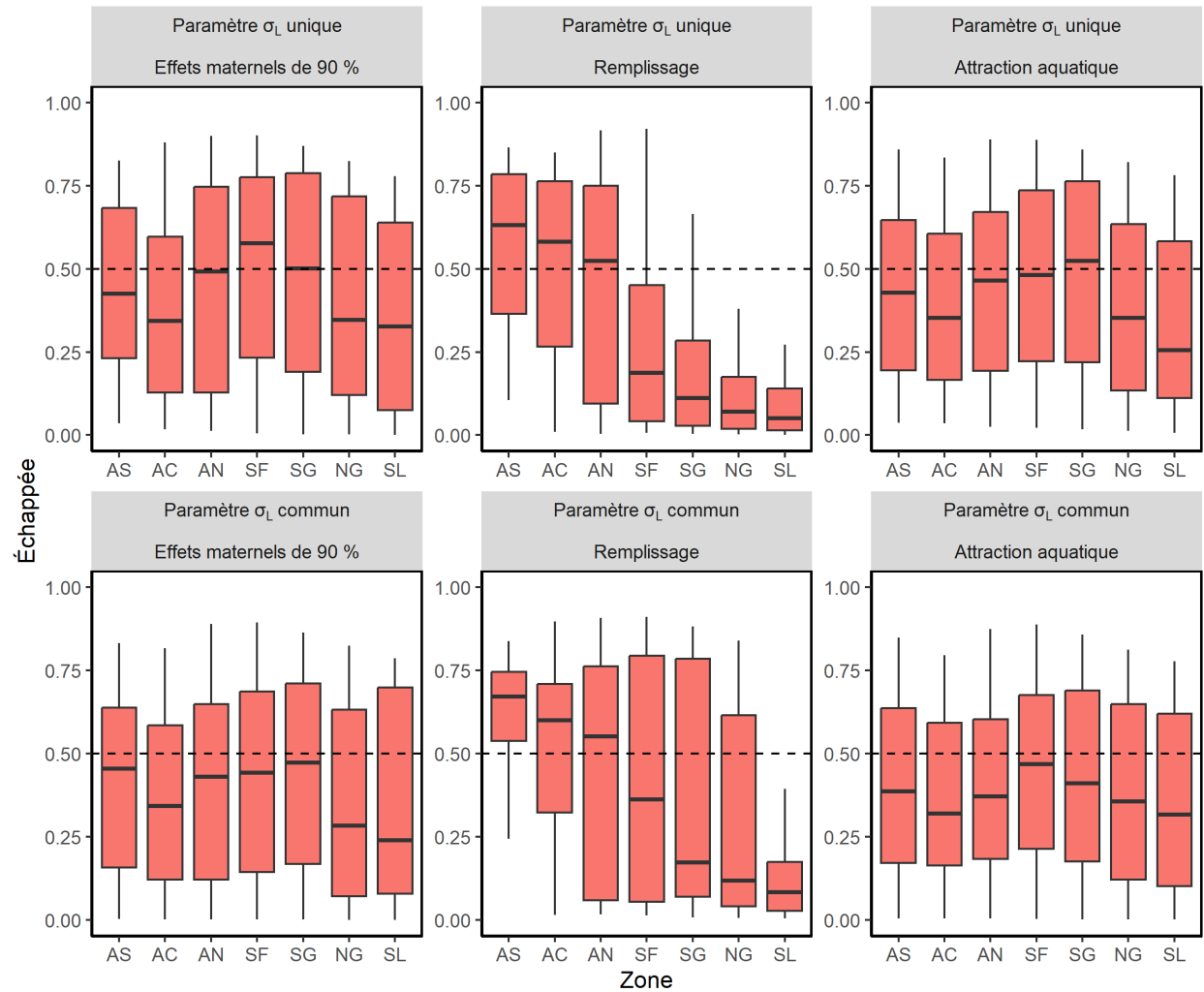


Figure 7. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles », et que la dépendance à la densité se produit après la pêche.

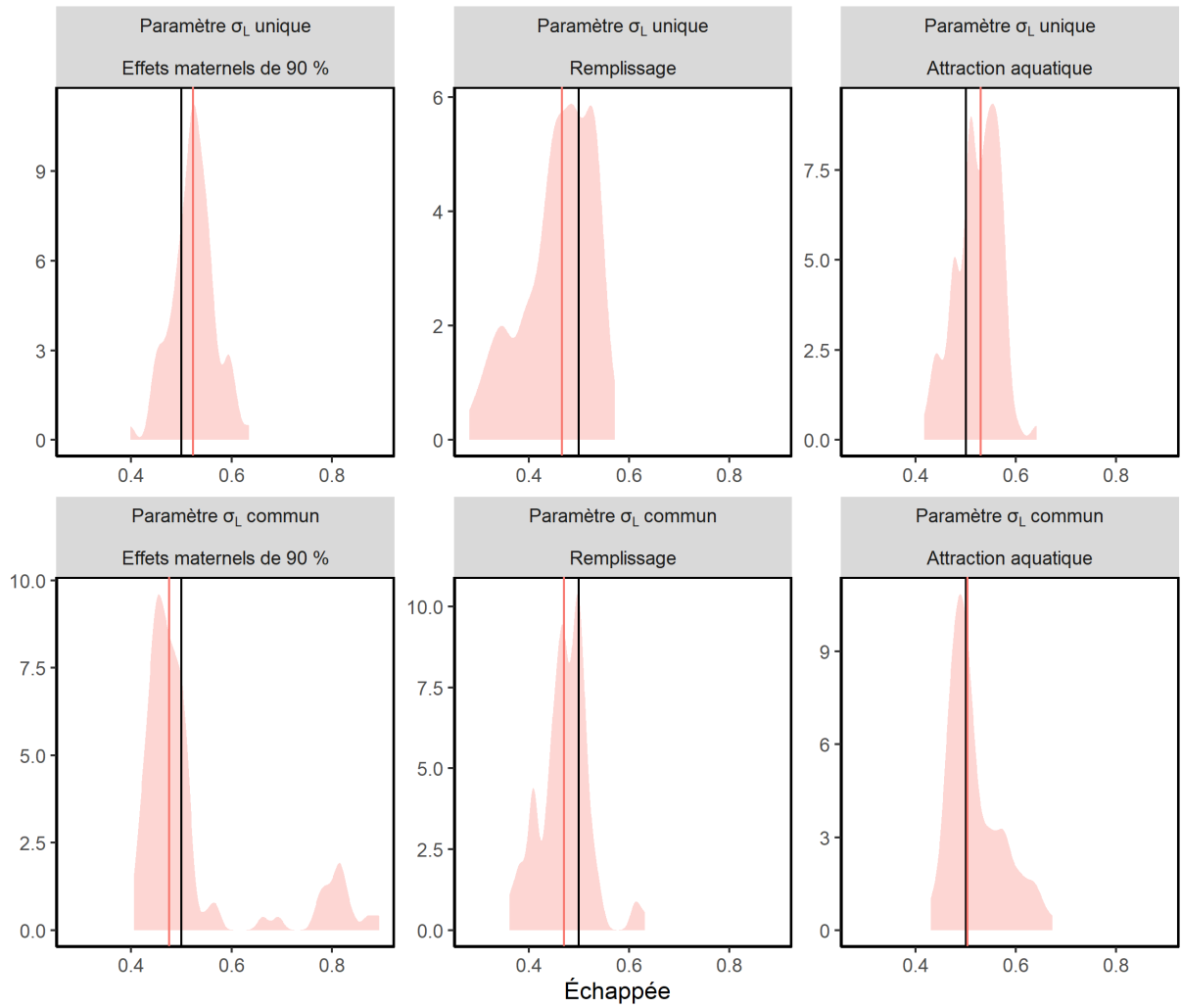


Figure 8. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles ». La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

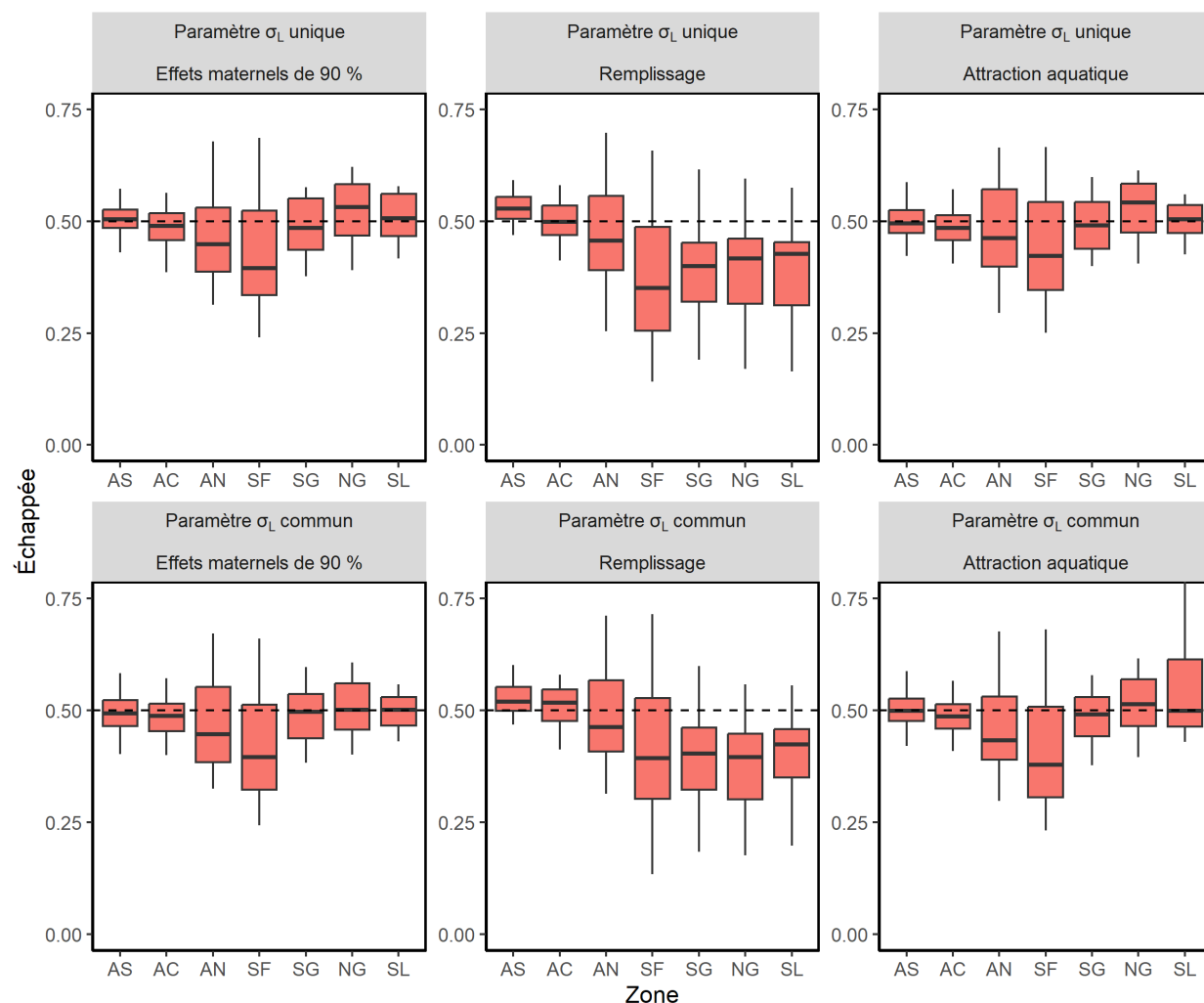


Figure 9. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles ».

Tableau 5. Résultats médians des zones lorsque la pêche de la civelle se fait à F_{50} pendant 50 ans. Ces résultats supposent que la dépendance à la densité se produit avant la pêche. La zone « Totale » fait référence à la métapopulation dans son ensemble. Les valeurs en italique se situent 5 % en dessous de leur objectif; celles en gras, 10 % en dessous de leur objectif.

Survie	Répartition	Zone	DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
			Échappée	Échappée	Échappée
Paramètre unique de survie des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Totale	0,50	0,49	0,50
		AS	0,50	0,49	0,46
		AC	0,50	0,50	0,49
		AN	0,50	0,50	0,48
		SF	0,50	0,48	0,55
		SG	0,50	0,48	<i>0,44</i>
		NG	0,50	0,48	0,50
		SL	0,50	0,49	0,45
		Totale	0,50	0,49	0,49

Survie	Répartition	Zone	DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
			Échappée	Échappée	Échappée
Paramètre commun de survie des larves leptocéphales	Attraction aquatique	AS	0,49	0,49	0,48
		AC	0,50	0,49	0,48
		AN	0,50	0,49	0,47
		SF	0,50	0,49	0,52
		SG	0,50	0,47	0,44
		NG	0,50	0,46	0,49
		SL	0,49	0,48	0,44
		Totale	0,47	0,37	0,38
	Remplissage	AS	0,52	0,53	0,51
		AC	0,52	0,53	0,53
		AN	0,51	0,50	0,49
		SF	0,43	0,22	0,22
		SG	0,42	0,23	0,18
		NG	0,43	0,22	0,20
		SL	0,42	0,23	0,19
		Totale	0,50	0,48	0,42
	Effets maternels de 90 %	AS	0,50	0,49	0,45
		AC	0,50	0,50	0,46
		AN	0,50	0,49	0,48
		SF	0,50	0,48	0,48
		SG	0,50	0,48	0,42
		NG	0,50	0,46	0,46
		SL	0,50	0,49	0,42
		Totale	0,50	0,48	0,45
	Attraction aquatique	AS	0,50	0,49	0,46
		AC	0,50	0,50	0,48
		AN	0,50	0,49	0,50
		SF	0,50	0,48	0,50
		SG	0,50	0,47	0,46
		NG	0,50	0,48	0,49
		SL	0,50	0,49	0,44
		Totale	0,47	0,41	0,37
	Remplissage	AS	0,52	0,53	0,51
		AC	0,52	0,53	0,51
		AN	0,51	0,51	0,40
		SF	0,50	0,22	0,17
		SG	0,41	0,20	0,15
		NG	0,36	0,21	0,15
		SL	0,38	0,26	0,17
		Totale	0,47	0,41	0,37

Tableau 6. Résultats médians des zones lorsque la pêche de la civelle se fait à F_{50} pendant 50 ans. Ces résultats supposent que la dépendance à la densité se produit après la pêche. La zone « Totale » fait référence à la métapopulation dans son ensemble. Les valeurs en italique se situent 5 % en dessous de leur objectif; celles en gras, 10 % en dessous de leur objectif.

Survie	Répartition	Zone	DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
			Échappée	Échappée	Échappée
Paramètre unique de survie des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Totale	0,40	0,50	0,47
		AS	0,43	0,42	0,45
		AC	0,34	0,47	0,55
		AN	0,49	0,65	0,60
		SF	0,58	0,51	0,61
		SG	0,50	0,44	0,34
		NG	0,35	0,49	0,38
		SL	0,33	0,51	0,34
	Attraction aquatique	Totale	0,40	0,52	0,44
		AS	0,43	0,49	0,47
		AC	0,35	0,55	0,50
		AN	0,46	0,62	0,51
		SF	0,48	0,53	0,57
		SG	0,52	0,51	0,48
		NG	0,35	0,49	0,37
		SL	0,26	0,51	0,34
	Remplissage	Totale	0,32	0,40	0,26
		AS	0,63	0,63	0,59
		AC	0,58	0,67	0,59
		AN	0,52	0,73	0,43
		SF	0,19	0,15	0,083
		SG	0,11	0,10	0,050
		NG	0,07	0,083	0,033
		SL	0,05	0,087	0,039
Paramètre commun de survie des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Totale	0,43	0,46	0,32
		AS	0,45	0,44	0,43
		AC	0,34	0,44	0,50
		AN	0,43	0,59	0,40
		SF	0,44	0,41	0,40
		SG	0,47	0,45	0,44
		NG	0,28	0,46	0,31
		SL	0,24	0,48	0,25
	Attraction aquatique	Totale	0,37	0,45	0,36
		AS	0,39	0,45	0,38
		AC	0,32	0,47	0,39
		AN	0,37	0,54	0,42
		SF	0,47	0,43	0,42
		SG	0,41	0,45	0,35
		NG	0,36	0,45	0,34
		SL	0,32	0,43	0,25
	Remplissage	Totale	0,46	0,43	0,43
		AS	0,67	0,62	0,65
		AC	0,60	0,65	0,67
		AN	0,55	0,72	0,64
		SF	0,36	0,17	0,12

			DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
Survie	Répartition	Zone	Échappée	Échappée	Échappée
		SG	<i>0,17</i>	<i>0,12</i>	<i>0,094</i>
		NG	<i>0,12</i>	<i>0,072</i>	<i>0,048</i>
		SL	<i>0,083</i>	<i>0,084</i>	<i>0,051</i>

Tableau 7. Résultats médians des zones lorsque la pêche de l'anguille se fait à F_{50} pendant 50 ans. La zone « Totale » fait référence à la métapopulation dans son ensemble. Les valeurs en italique se situent 5 % en dessous de leur objectif; celles en gras, 10 % en dessous de leur objectif.

			DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
Survie	Répartition	Zone	Échappée	Échappée	Échappée
Paramètre unique de survie des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Totale	0,52	0,52	0,52
		AS	0,50	0,50	0,49
		AC	<i>0,49</i>	0,49	0,51
		AN	<i>0,45</i>	0,48	0,50
		SF	0,39	<i>0,45</i>	<i>0,44</i>
		SG	<i>0,48</i>	0,50	0,51
		NG	0,53	0,48	0,51
		SL	0,51	0,50	0,51
	Attraction aquatique	Totale	0,53	0,51	0,51
		AS	0,49	0,51	0,49
		AC	0,48	0,50	0,51
		AN	0,46	0,48	0,47
		SF	<i>0,42</i>	<i>0,44</i>	<i>0,42</i>
		SG	0,49	0,51	0,49
		NG	0,54	0,48	0,51
		SL	0,50	0,51	0,50
	Remplissage	Totale	0,47	<i>0,41</i>	<i>0,43</i>
		AS	0,53	0,53	0,52
		AC	0,50	0,52	0,53
		AN	0,46	0,48	0,49
		SF	0,35	0,25	0,22
		SG	0,40	0,29	0,31
		NG	<i>0,42</i>	0,28	0,31
		SL	<i>0,43</i>	0,29	0,32
Paramètre commun de survie des larves leptocéphales	Effets maternels de 90 %	Totale	0,48	0,49	0,48
		AS	0,49	0,50	0,50
		AC	0,49	0,50	0,51
		AN	<i>0,45</i>	0,48	0,48
		SF	0,40	<i>0,45</i>	<i>0,41</i>
		SG	0,50	0,50	0,48
		NG	0,50	0,48	0,51
		SL	0,50	0,50	0,51
	Attraction aquatique	Totale	0,50	0,51	0,50
		AS	0,50	0,50	0,51
		AC	0,49	0,50	0,49
		AN	<i>0,43</i>	0,49	0,50
		SF	0,38	0,46	0,40

Survie	Répartition	Zone	DD des civelles	DD des civelles + Arg.	DD des civelles + Arg. + Mort.
			<i>Échappée</i>	<i>Échappée</i>	<i>Échappée</i>
		SG	0,49	0,50	0,50
		NG	0,51	0,50	0,50
		SL	0,50	0,50	0,51
		Totale	0,47	0,44	0,45
		AS	0,52	0,53	0,53
		AC	0,52	0,52	0,52
		AN	0,46	0,52	0,47
	Remplissage	SF	0,39	0,31	0,30
		SG	0,40	0,28	0,31
		NG	0,40	0,28	0,30
		SL	0,42	0,32	0,33

SURMORTALITÉ

Les résultats de la surmortalité aux stades d'anguille et de civelle ont montré des schémas similaires dans les valeurs d'échappée de l'ensemble de la population (figures 10, 13 et 16). Lorsque le nombre de zones subissant une surmortalité augmentait, l'échappée à l'échelle de la métapopulation diminuait. Bien que les médianes varient selon le mécanisme de dépendance à la densité (données complémentaires 2), les tendances sont similaires. Les hypothèses concernant la survie et la dispersion des larves leptocéphales ont influé sur le taux et la variabilité des déclin. Les scénarios de dispersion par remplissage et par attraction aquatique ont pour la plupart diminué de façon linéaire, tandis que le scénario des effets maternels de 90 % a eu un effet de plateau lorsqu'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales a été utilisé (figures 10, 13 et 16). Selon cette hypothèse, lorsque seules quelques zones subissaient une surmortalité (c'est-à-dire 1-3), les valeurs médianes de l'échappée ne changeaient pas de manière spectaculaire (figure 16). Au fur et à mesure que le nombre de zones subissant une surmortalité augmentait, la variabilité augmentait seulement après qu'environ deux zones aient été touchées, et ce, jusqu'à ce que toutes les zones soient touchées. Cela s'explique probablement par les différences entre les zones qui ont été touchées par la surmortalité.

Le stade biologique touché n'a pas modifié le schéma des valeurs d'échappée propres à la zone (figures 11, 12, 14, 15, 18 et 20). Lorsqu'une seule zone subissait une surmortalité, les valeurs médianes d'échappée des différentes zones variaient très peu en général. Cependant, lorsqu'environ deux à cinq zones de la métapopulation subissaient une surmortalité, la plupart des zones présentaient une grande variabilité. Plus le nombre de zones présentant une surmortalité augmente, plus il est probable qu'une zone donnée subisse la mortalité, ce qui conduit à la plage de variation. Au-delà d'environ cinq zones subissant une surmortalité, les valeurs d'échappée de toutes les zones ont tendance à diminuer pour devenir très faibles.

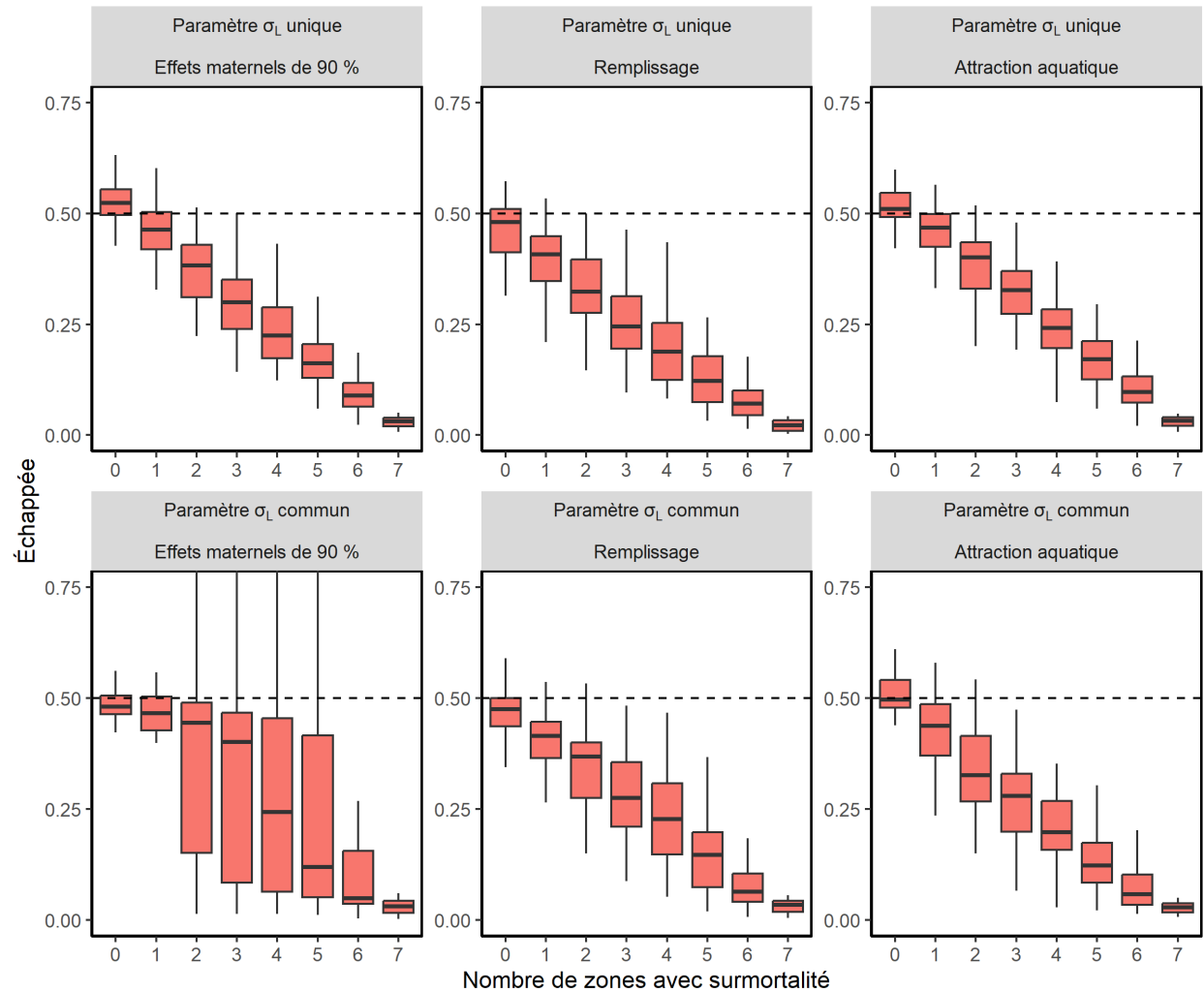


Figure 10. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle.

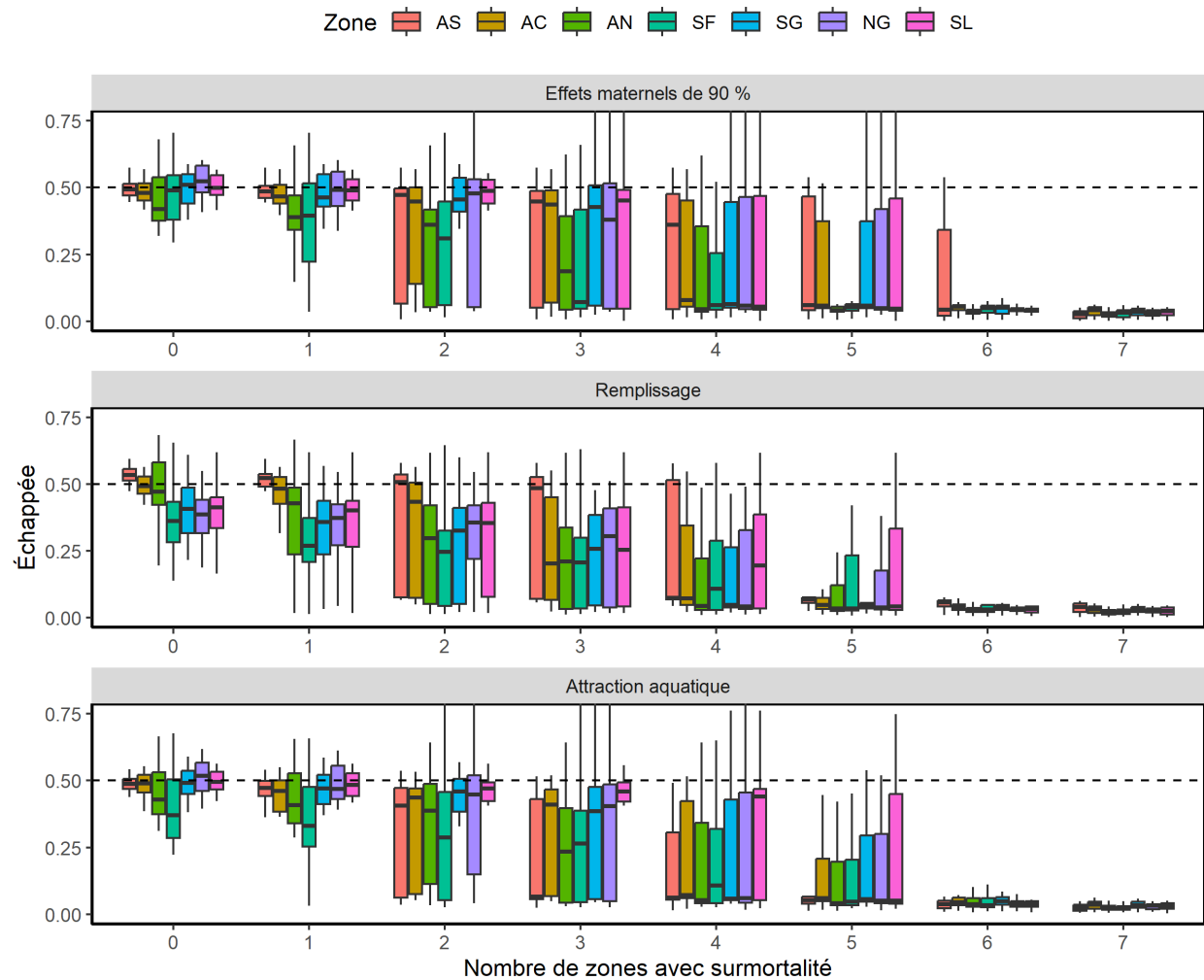


Figure 11. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle.

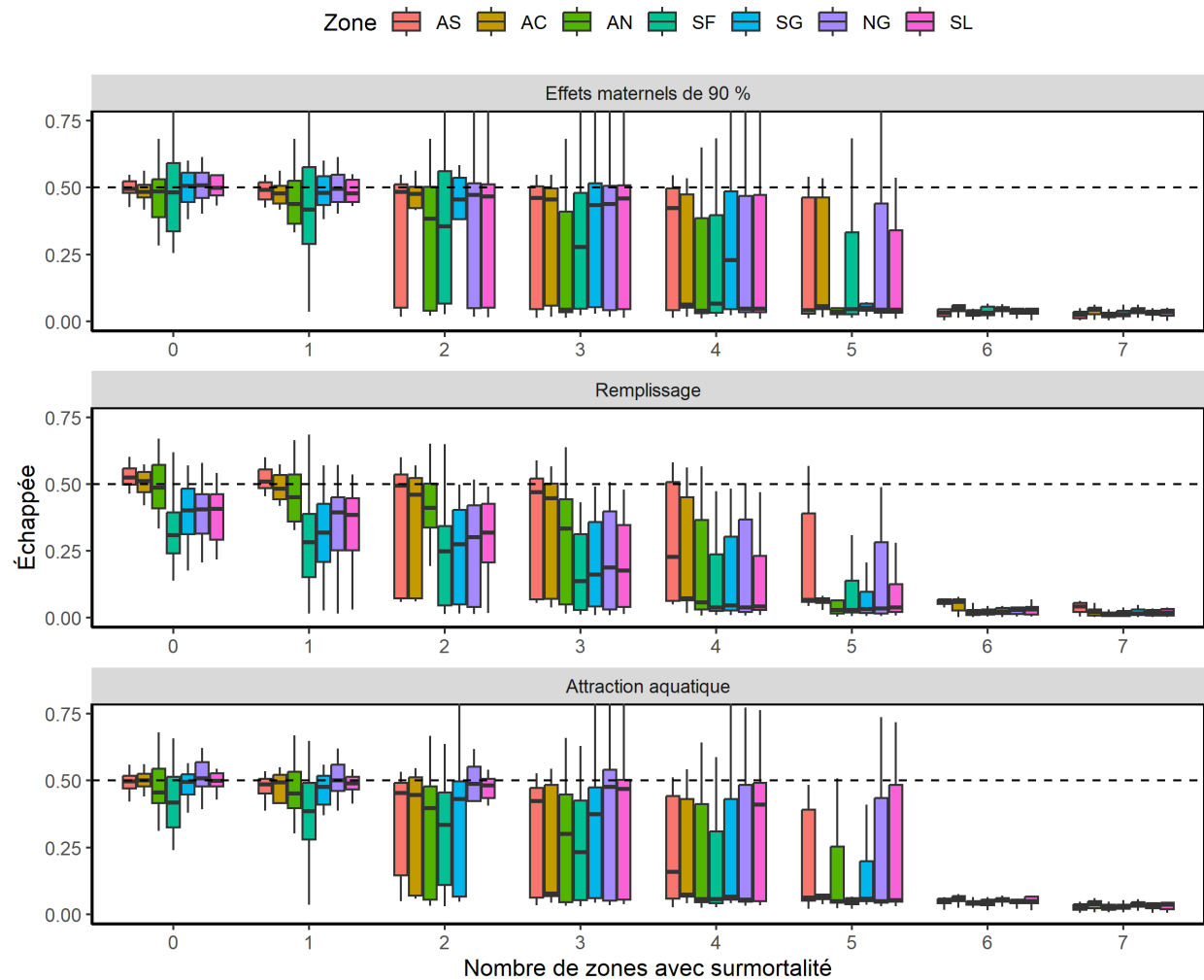


Figure 12. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre unique de survie des larves leptocéphales pour chaque zone et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle.

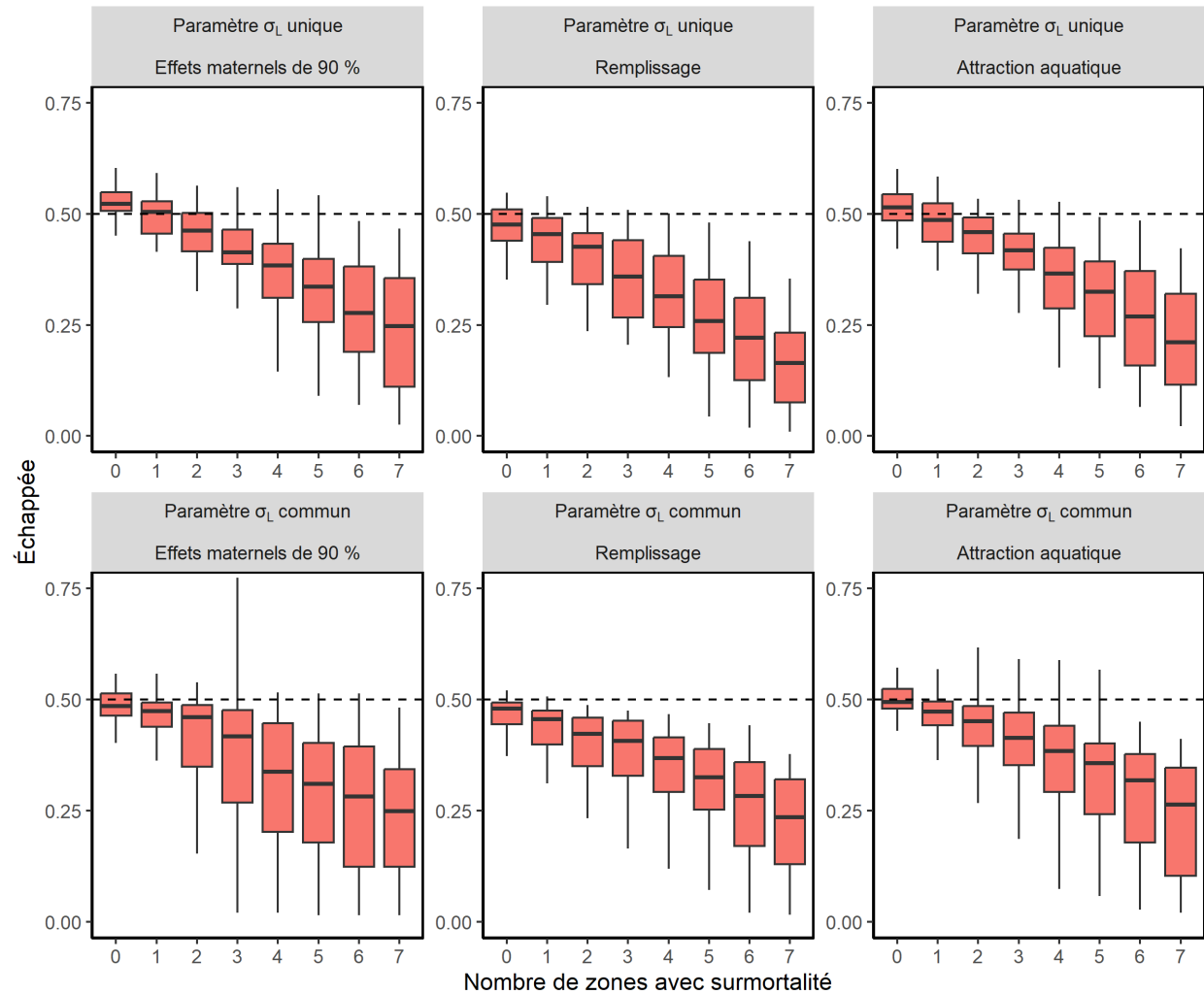


Figure 13. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle.

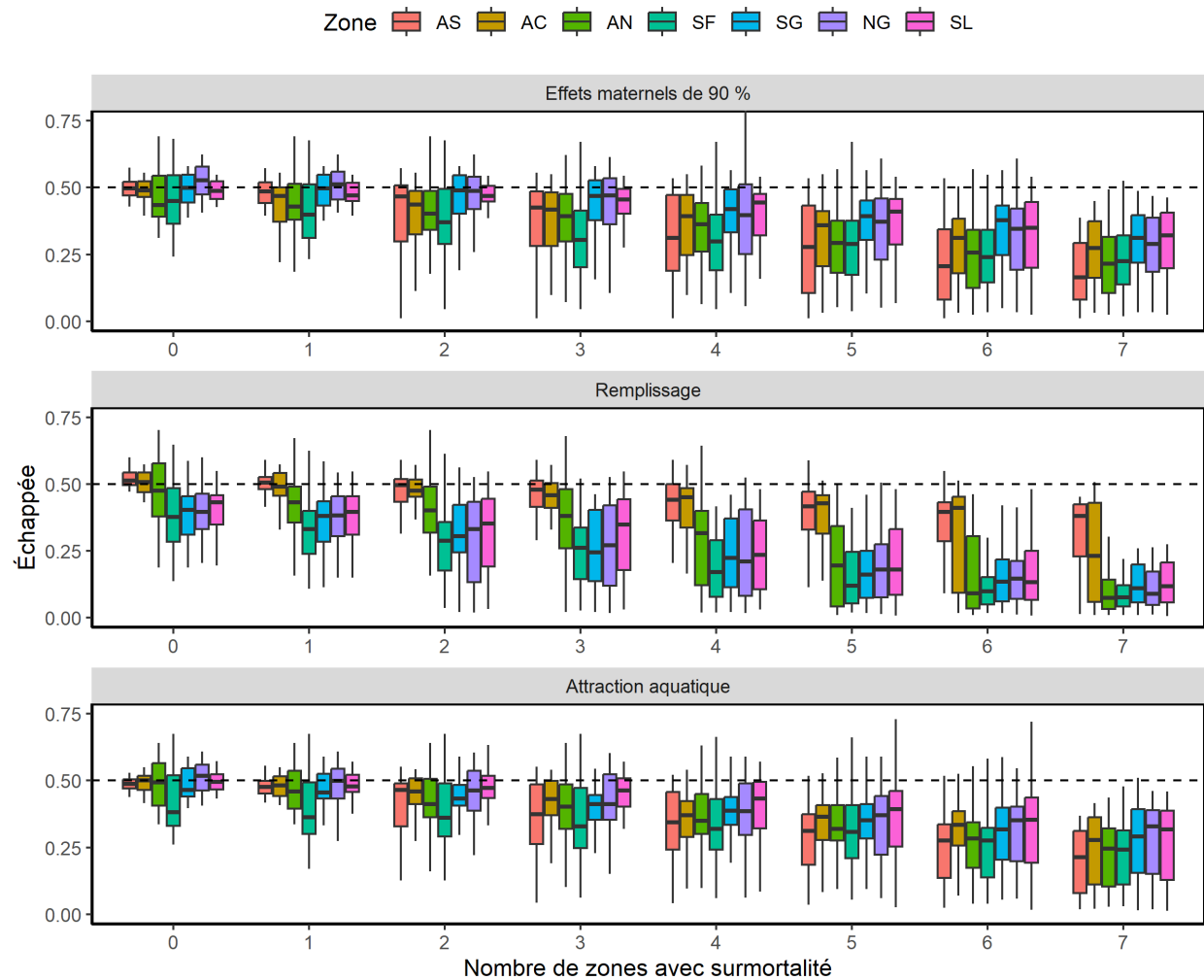


Figure 14. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle.

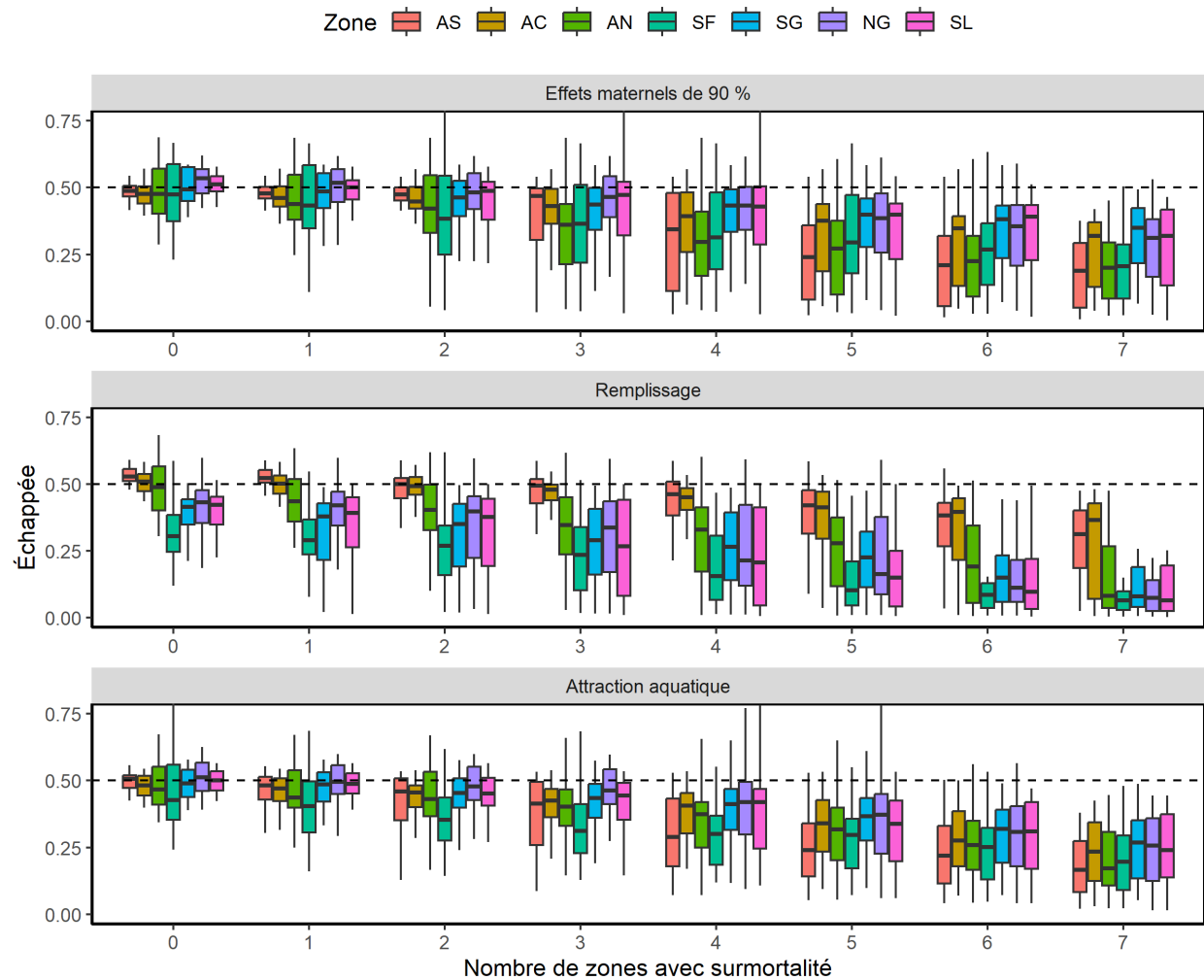


Figure 15. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre unique de survie des larves leptocéphales pour chaque zone et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle.

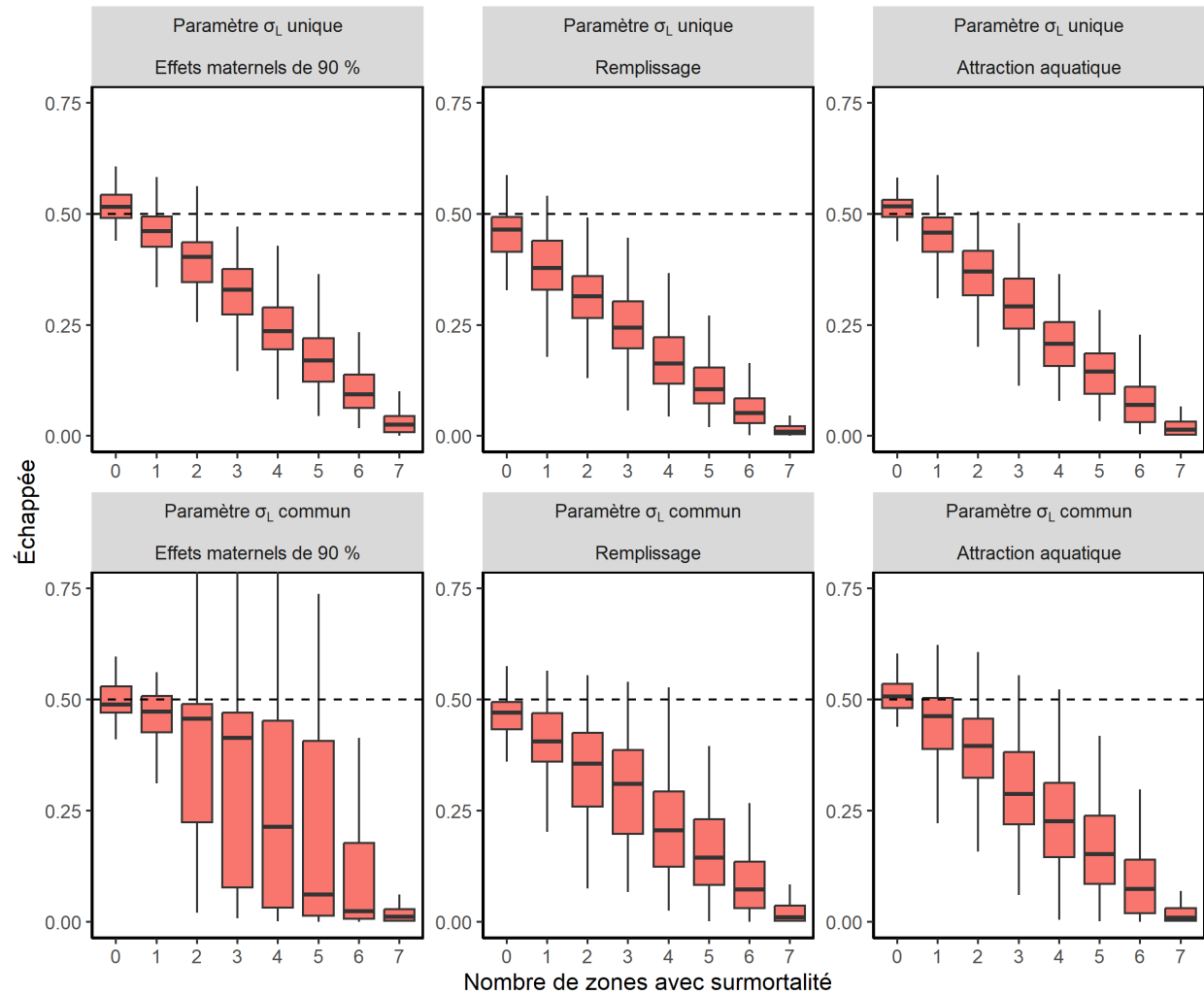


Figure 16. Effets de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ».

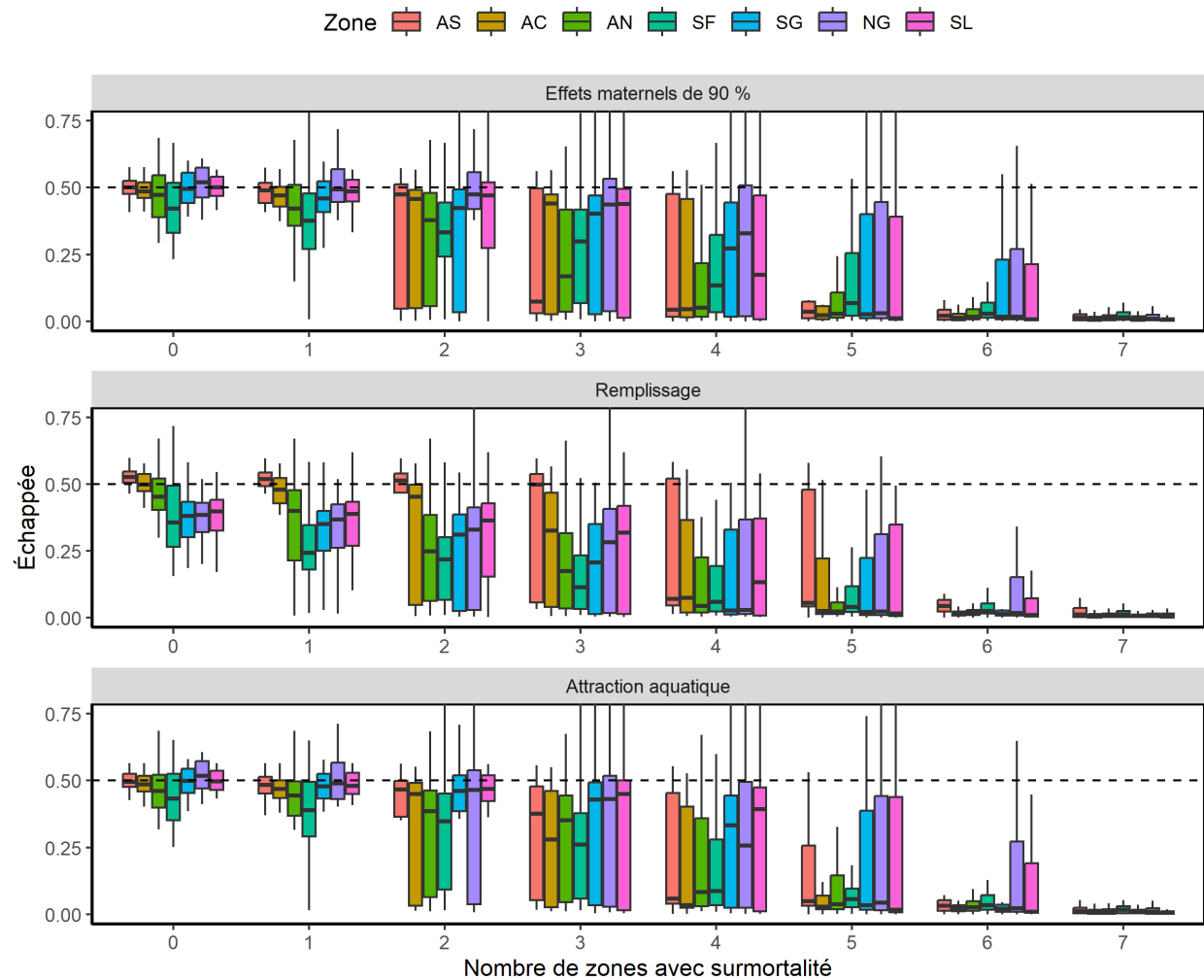


Figure 17. Effets de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ».

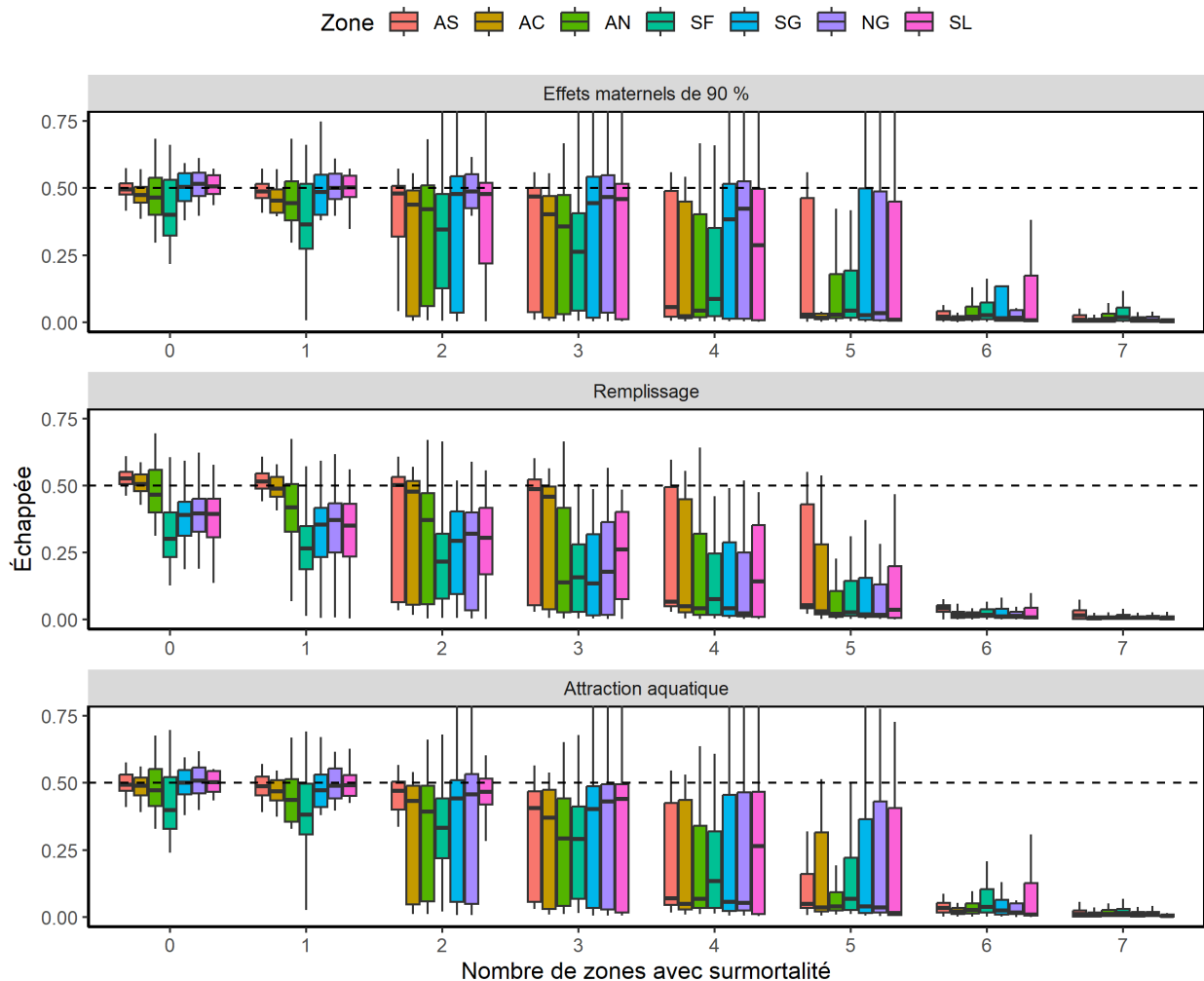


Figure 18. Effets de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée par zone de la métapopulation avec l'utilisation d'un paramètre unique de survie des larves leptocéphales pour chaque zone et du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ».

RÉTABLISSEMENT

Les simulations de rétablissement ont montré des résultats semblables aux simulations de surmortalité, mais de façon inverse, indépendamment des mécanismes de dépendance à la densité ou du type de pêche (figures 19 à 21; données complémentaires 2). Au fur et à mesure que le nombre de zones présentant une surmortalité diminuait (donc que davantage de zones se rétablissaient), les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation augmentaient (figures 19 à 21). Dans les scénarios de dispersion par remplissage et par attraction aquatique, l'échappée à l'échelle de la métapopulation augmente généralement de manière linéaire à mesure que le nombre de zones rétablies augmente, tandis que les effets maternels de 90 % combinés à un scénario commun de survie des larves leptocéphales présentent souvent un schéma non linéaire. Selon cette hypothèse, il y avait souvent une grande variabilité au fur et à mesure que le nombre de zones rétablies augmentait avant que la médiane de la population ne se rapproche de l'objectif d'échappée de 50 %. Lorsque la dépendance à la densité se produisait après la pêche de la civelle (figure 20), l'échappée qui en résultait était plus variable

et moins marquée, semblable à ce qui était observé dans les simulations de surmortalité (figure 13).

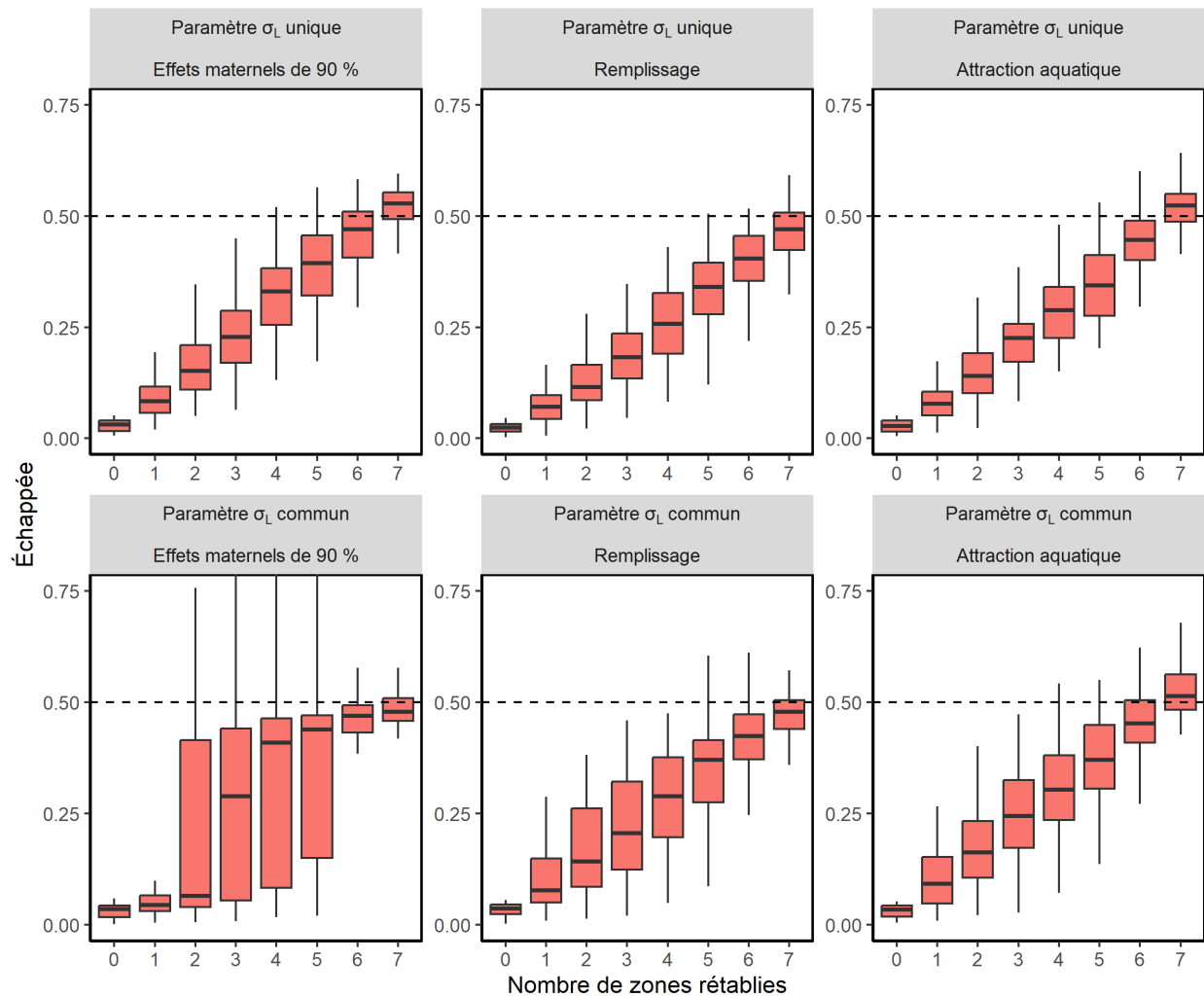


Figure 19. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche.

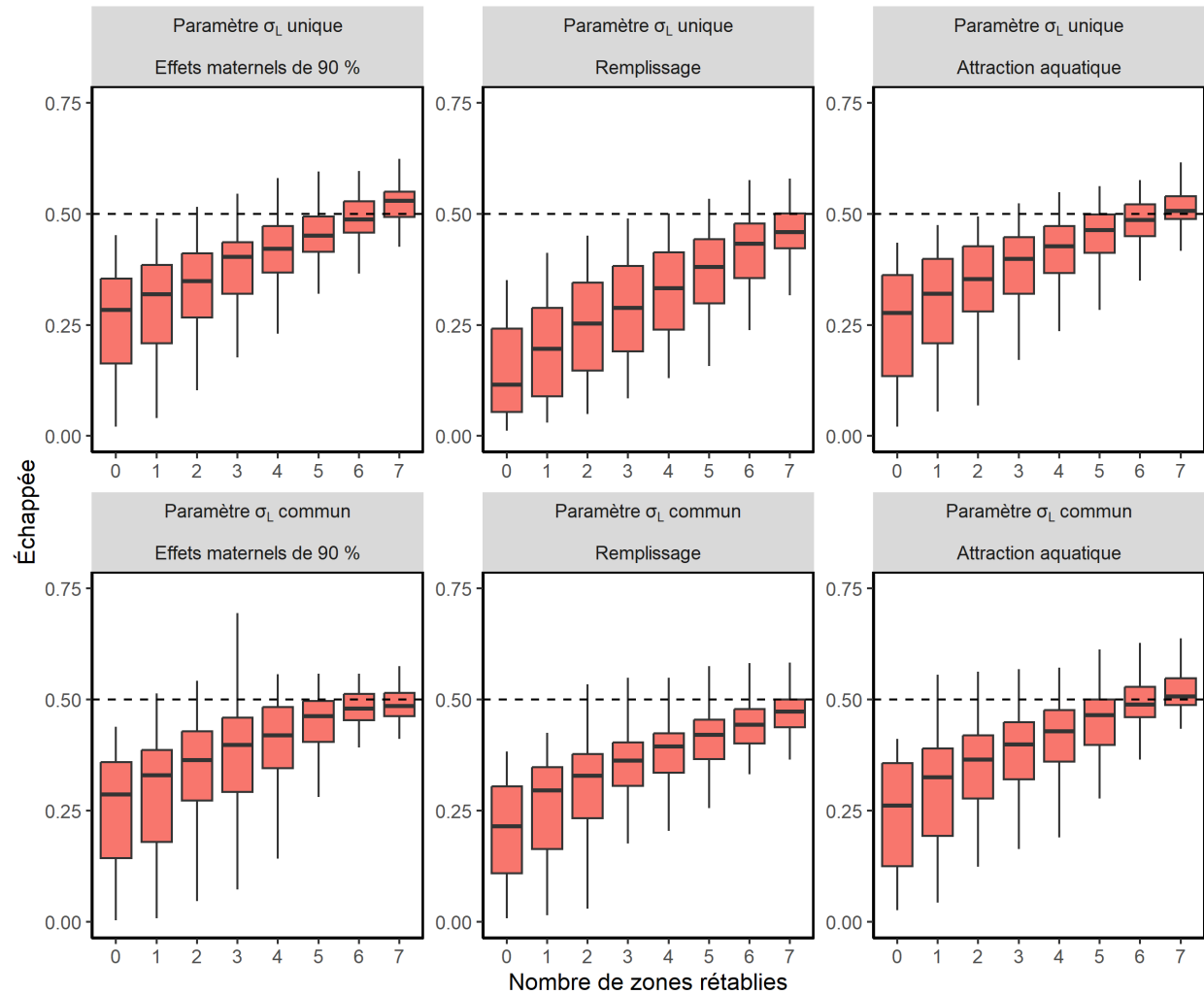


Figure 20. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche.

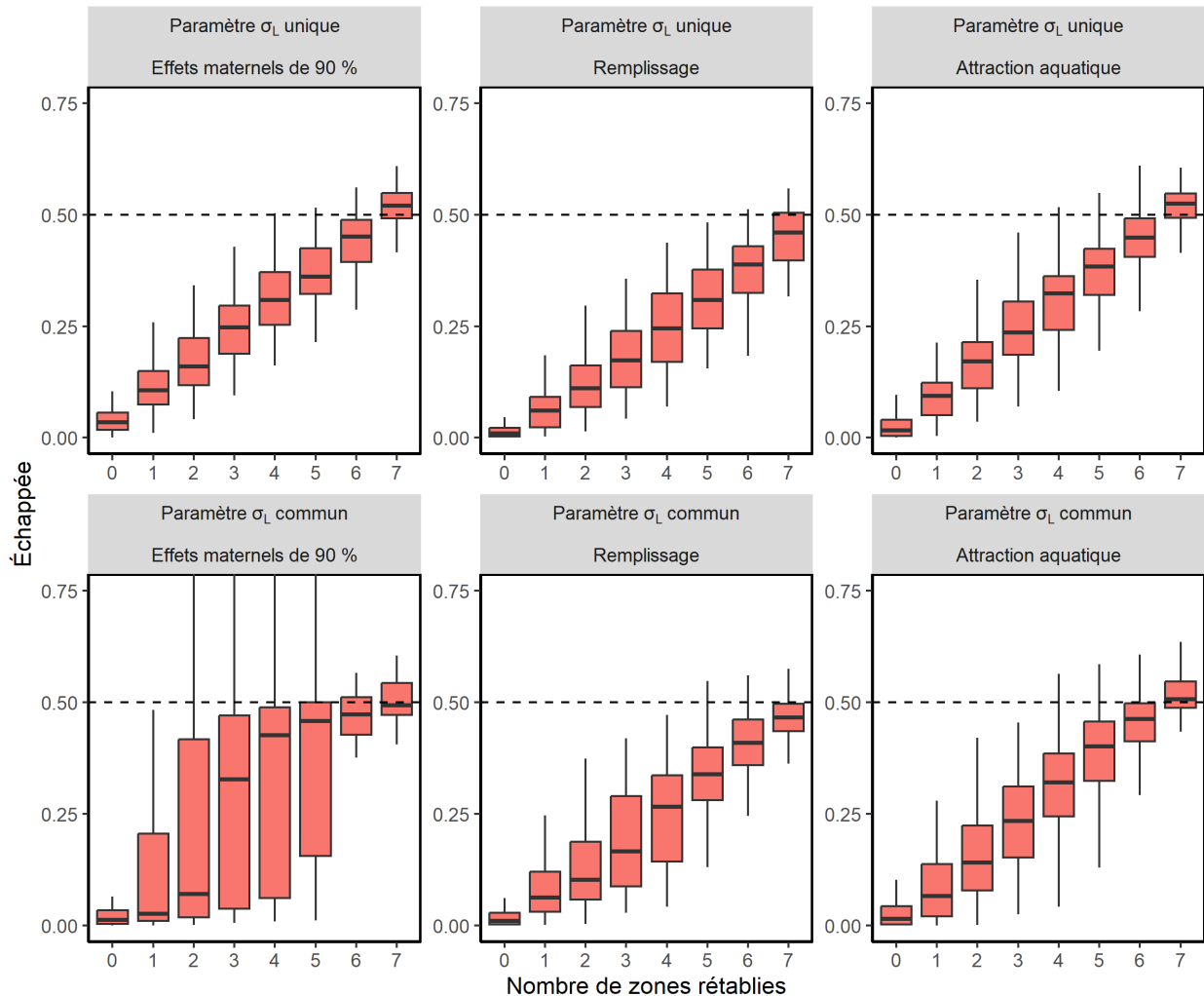


Figure 21. Effets de la réduction de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ».

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

En général, les résultats de l'analyse de sensibilité étaient grandement variables selon les hypothèses de survie et de dispersion des larves leptocéphales (figures 22, 23 et 24). Les résultats des simulations avec la dispersion par remplissage étaient très semblables à ceux obtenus avec l'option de dispersion par attraction aquatique; seuls les résultats pour l'attraction aquatique sont présentés ici. Le changement dans les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation était plus variable avec l'utilisation d'un paramètre unique et indépendant de survie des larves leptocéphales, et était généralement plus variable avec les effets maternels de 90 % (figure 22). Avec l'option de dispersion par attraction aquatique, c'est la modification du taux de croissance ou de la longueur de l'anguille argentée dans l'une des zones qui avait l'effet potentiel le plus important sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation. La fécondité, la proportion de femelles et la survie avaient un effet beaucoup plus faible. Bien que le pourcentage médian de variation des valeurs d'échappée soit très près de 0, les perturbations du taux de croissance ou de la longueur de l'anguille argentée pourraient

occasionnellement entraîner des changements plus importants pour la métapopulation dans son ensemble.

Dans le cas d'une dispersion des larves leptocéphales avec des effets maternels de 90 %, les autres variables du cycle biologique étaient également plus sensibles (figure 22). La variabilité était relativement faible lorsque la métapopulation était associée à un paramètre commun de survie des larves leptocéphales, mais les variations étaient importantes, peu importe le paramètre du cycle biologique perturbé, lorsque chaque zone avait un paramètre unique de survie des larves leptocéphales. Globalement, la proportion de femelles et la fécondité semblaient avoir relativement moins d'effet sur les valeurs d'échappée de la métapopulation que le taux de croissance, la longueur de l'anguille argentée et la survie des anguilles.

Un schéma similaire de l'effet des paramètres du cycle biologique sur le modèle a été observé dans les valeurs d'échappée de chaque zone (figures 23 et 24). Les deux scénarios de survie des larves leptocéphales ont été combinés en raison de leurs similitudes. Avec le scénario de dispersion par attraction aquatique (figure 23), les changements dans le taux de croissance et la longueur de l'anguille argentée ont eu le plus d'effet sur le pourcentage de variation des valeurs d'échappée. La fécondité et la proportion de femelles n'ont pas eu d'effets importants sur les valeurs d'échappée, et la survie des anguilles se situait entre ces deux extrêmes. Dans l'hypothèse d'une dispersion avec des effets maternels de 90 %, la plupart des paramètres du cycle biologique étaient très variables (figure 24). Toutefois, dans les deux hypothèses, les modifications de la variable du cycle biologique d'une zone donnée ont eu l'effet le plus important sur cette zone, bien que certaines modifications aient pu avoir une incidence sur d'autres zones. Par exemple, la modification de la longueur de l'anguille argentée dans la zone SL était plus susceptible de toucher les autres zones que la modification de la longueur dans la zone SF (figures 23 et 24). En général, les zones AN, SF et SG étaient les moins susceptibles d'avoir un effet sur d'autres zones lorsque leur cycle biologique était perturbé (figures 23 et 24).

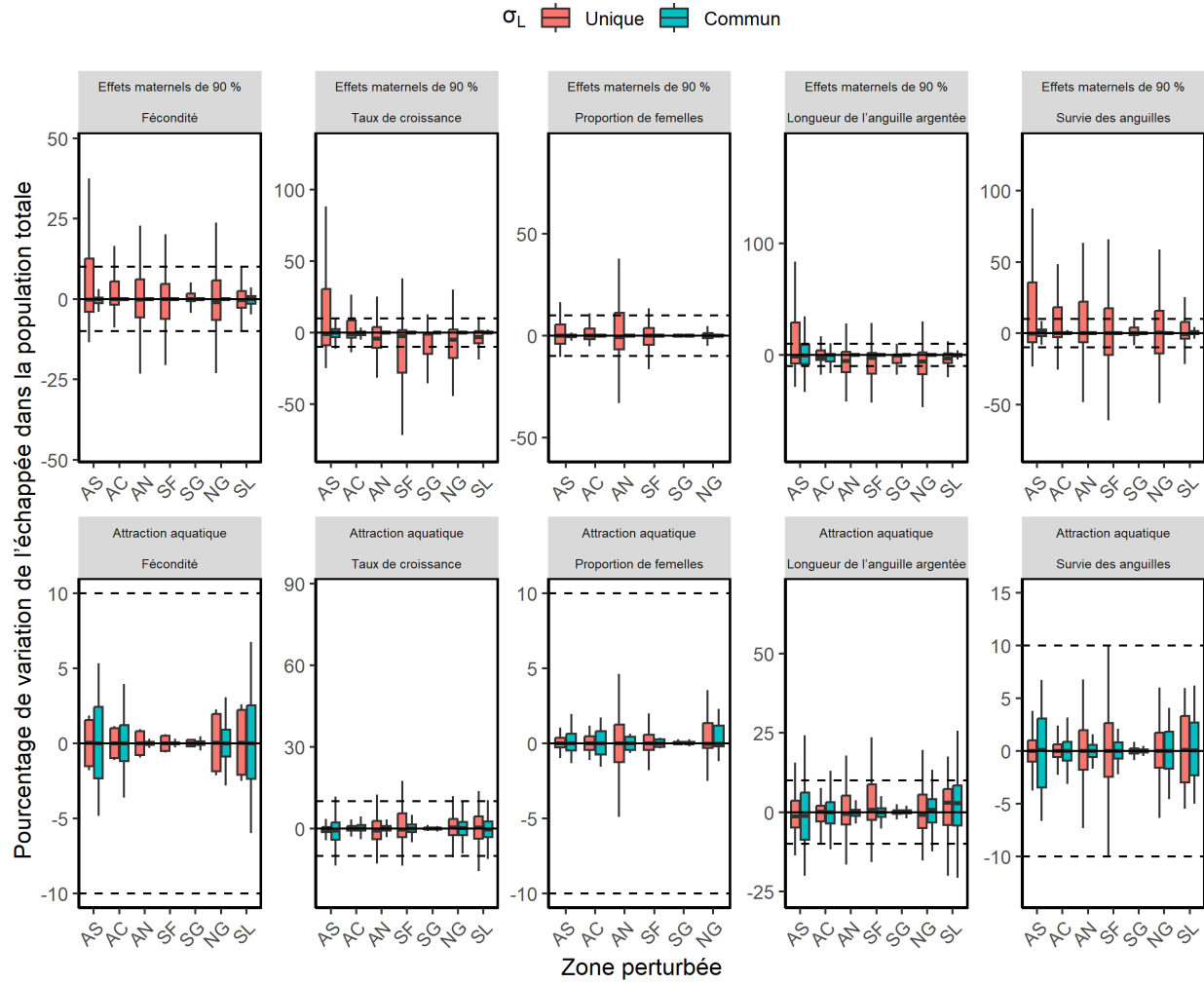


Figure 22. Pourcentage de variation des valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation selon différentes combinaisons de variables du cycle biologique et de perturbations dans la zone. Chaque variable a été modifiée de $\pm 10\%$, sauf la proportion de femelles qui a été modifiée selon ses quantiles 2,5 et 97,5 %.

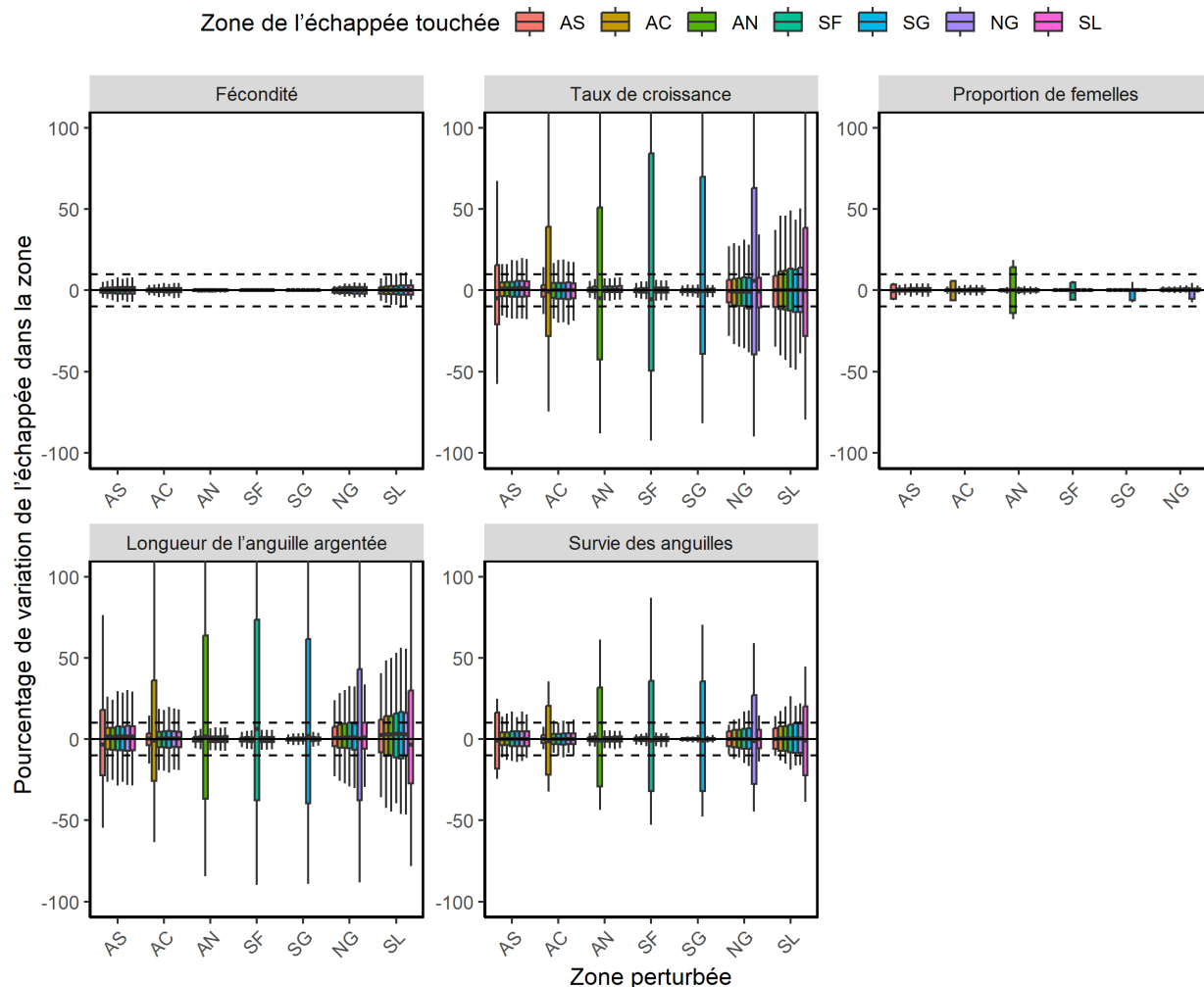


Figure 23. Pourcentage de variation des valeurs d'échappée de chaque zone selon le scénario de dispersion par attraction aquatique, avec différentes combinaisons de variables du cycle biologique et de perturbations dans la zone. Chaque variable a été modifiée de $\pm 10\%$, sauf la proportion de femelles qui a été modifiée selon ses quantiles 2,5 et 97,5 %.

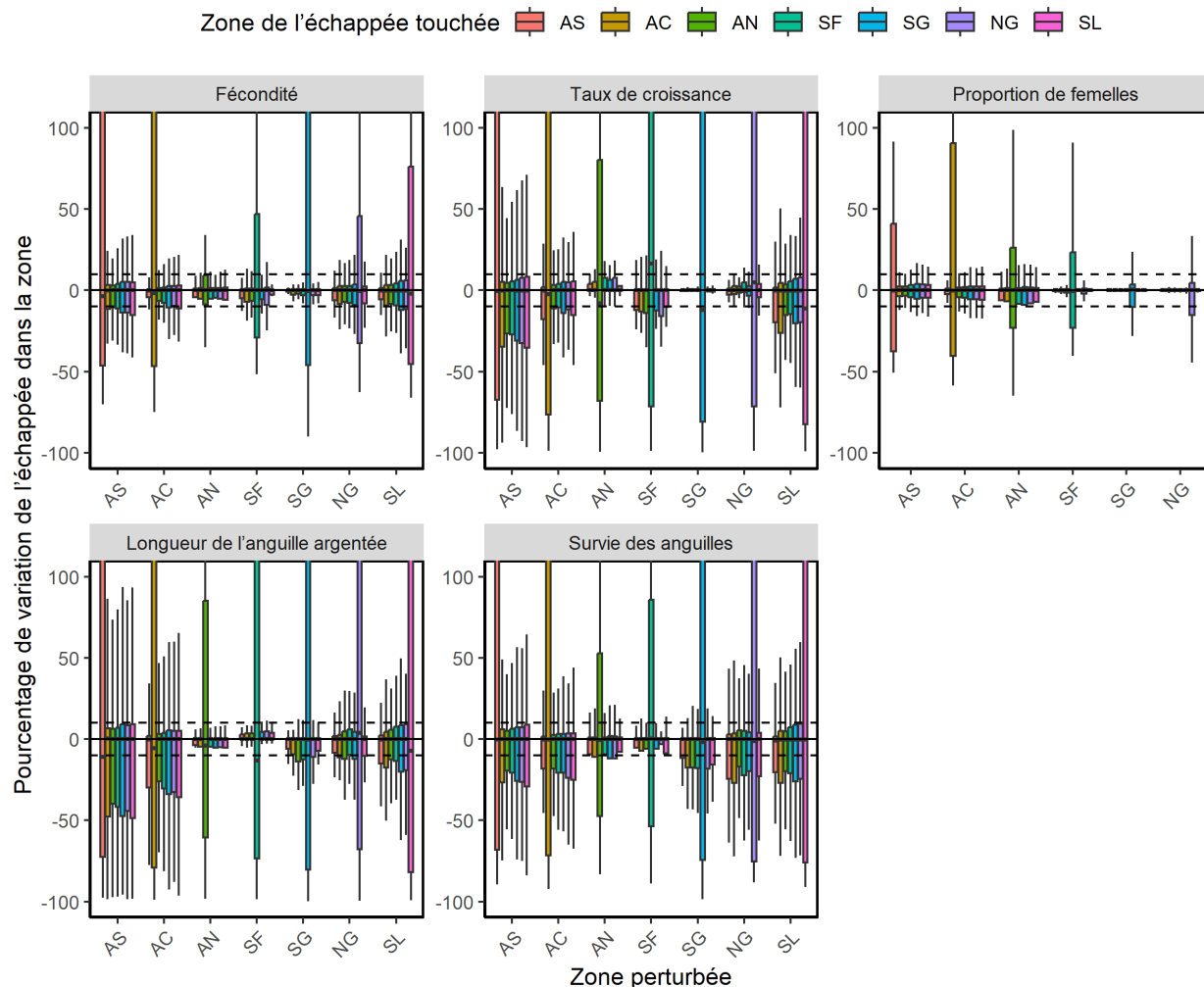


Figure 24. Pourcentage de variation des valeurs d'échappée de chaque zone selon le scénario de dispersion par effets maternels de 90 %, avec différentes combinaisons de variables du cycle biologique et de perturbations dans la zone. Chaque variable a été modifiée de $\pm 10\%$, sauf la proportion de femelles qui a été modifiée selon ses quantiles 2,5 et 97,5 %.

DISCUSSION

UTILISATION DE POINTS DE RÉFÉRENCE INDÉPENDANTS FONDÉS SUR LA MORTALITÉ

La question de savoir si la pêche à des valeurs F_{50} calculées de manière indépendante a permis d'obtenir une échappée de 50 % pour l'ensemble de la métapopulation ou pour des zones données dépendait en grande partie du type de pêche. Pour la pêche de la civelle, lorsqu'il a été supposé que la compensation pour la dépendance à la densité dans la survie de la civelle se produisait avant toute activité de pêche, les valeurs d'échappée étaient généralement très proches de l'objectif de 50 % à la fois pour l'ensemble de la métapopulation et pour les zones individuelles (tableau 5, figures 4 et 5). Ce résultat indique que F_{50} a fonctionné comme prévu malgré une structure de métapopulation. Cependant, avec la supposition que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, les résultats sont beaucoup plus variables. Les estimations des valeurs d'échappée par zone

étaient régulièrement inférieures à 40 % (tableau 6), et il y avait une grande variance entre les estimations médianes des valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation et par zone entre les répétitions (figures 6 et 7). Cela est cohérent avec les résultats de Brook *et al.* (2024) qui ont trouvé que les valeurs F_{50} étaient beaucoup plus grandes et plus variables lorsque la dépendance à la densité se produisait après la pêche de la civelle. Comme les valeurs F_{50} étaient beaucoup plus élevées lorsqu'il était supposé que la dépendance à la densité se produisait après la pêche, il est plus prudent de supposer que la dépendance à la densité se produit avant la pêche.

Les résultats relatifs à la pêche de l'anguille n'étaient pas aussi cohérents que ceux de la pêche de la civelle. Alors que la plupart des zones atteignaient approximativement leur objectif d'échappée de 50 %, les zones SF et AN étaient souvent en dessous de cet objectif (tableau 7, figure 9). Ces zones présentaient les valeurs F_{50} les plus élevées (tableau 4) et les longueurs d'anguilles argentées les plus faibles de toutes les zones (tableau 1). Il est possible que la fixation des valeurs F_{50} selon l'hypothèse d'indépendance des zones ait entraîné des surestimations des points de référence fondés sur la mortalité, plus que dans les autres zones. Dans les deux pêches, le nombre de zones où les estimations des valeurs d'échappée étaient inférieures à 50 % a augmenté lorsqu'un plus grand nombre de mécanismes de dépendance à la densité étaient inclus dans la simulation. Cette augmentation pourrait être due à la variabilité accrue des points de référence fondés sur la mortalité à mesure que le nombre de mécanismes de dépendance à la densité augmente (Brook *et al.* 2024).

Le scénario de dispersion des larves leptocéphales par remplissage a eu un comportement unique par rapport aux autres options de répartition lors de la prise en compte des valeurs d'échappée de chaque zone avec une pêche à F_{50} . Avec le scénario de remplissage, et indépendamment du type de pêche, du degré de dépendance à la densité ou de la survie des larves leptocéphales, les zones canadiennes au nord (SL, NG, SG et SF) présentaient systématiquement des valeurs d'échappée inférieures à celle des autres zones (tableaux 5, 6 et 7). Cette différence indique que, s'il existe un mécanisme qui limite la migration des larves leptocéphales vers le nord, la taille de la population dans les zones plus au nord dépendra davantage de l'état relatif de l'ensemble de la métapopulation que dans les zones au sud. Cela signifie également que, même si toutes les autres zones avaient des valeurs d'échappée égales ou proches de 50 %, certaines parties du nord pourraient ne pas être en mesure d'atteindre le même objectif.

SIMULATIONS DE SURMORTALITÉ ET DE RÉTABLISSEMENT

Les stades de vie touchés et les mécanismes de dépendance à la densité dans la simulation ne semblaient pas avoir de répercussions sur la sensibilité de la métapopulation à la surmortalité (figures 10, 13 et 16) ou à la capacité de rétablissement (figures 19 à 21). Toutefois, les hypothèses émises sur la survie et la dispersion des larves leptocéphales ont influé sur le « point de bascule » de la métapopulation, à savoir le nombre de zones qui doivent subir une surmortalité ou se rétablir avant qu'une tendance ne soit observée dans l'ensemble de la métapopulation. Dans le cas des effets maternels de 90 % avec un paramètre commun de survie des larves leptocéphales (ces simulations comportaient une zone beaucoup plus grande que les autres en matière de capacité de charge relative; figure 3 et données complémentaires 1), les valeurs d'échappée n'étaient variables seulement après que quelques zones aient connu une surmortalité ou un rétablissement (au lieu de montrer un effet immédiat). Ce résultat est probablement attribuable au fait que plus il y a de zones touchées, plus la probabilité que la zone la plus vaste soit touchée augmente, ce qui explique en grande partie les tendances des valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation.

Les valeurs d'échappée propres aux zones pour les simulations de surmortalité, à quelques exceptions près, n'étaient pas nettement différentes d'une zone à l'autre (figures 11, 12, 14, 15, 17 et 18). Lorsqu'un nombre intermédiaire de zones (p. ex. 3-5) étaient soumises à une surmortalité, les valeurs d'échappée étaient très variables, probablement en fonction de la combinaison de zones ayant subi une surmortalité. Cependant, plus le nombre de zones (p. ex. 6-7) soumises à une surmortalité était élevé, plus cette variabilité diminuait et plus les valeurs d'échappée baissait. Cette différence indique que dans la plupart des hypothèses de survie et de dispersion des larves leptocéphales, la métapopulation était relativement résiliente si quelques zones connaissaient une surmortalité. Les zones au nord constituent par contre une exception à cette tendance dans le scénario de dispersion par remplissage, dont les valeurs d'échappée sont systématiquement inférieures à celles des autres zones. De façon générale, selon les résultats, si toutes les zones ou la plupart d'entre elles sont bien gérées de manière indépendante, la métapopulation dans son ensemble se porte bien.

INCERTITUDES

La méthode de dispersion des larves leptocéphales dans les eaux continentales et leur taux de survie étant largement inconnus, divers mécanismes de dispersion et hypothèses de survie ont été testés. Bien que tous les scénarios testés aient un fondement raisonnable, il est difficile de savoir lesquels (ou quelles combinaisons) sont les plus réalistes, ni si d'autres mécanismes non testés sont possibles. Les résultats communs à tous les scénarios (p. ex. la pêche de la métapopulation de civelles à une valeur F_{50} qui entraîne généralement des valeurs proches de 50 %) donnent une certaine confiance dans les inférences malgré les incertitudes. Tous les scénarios ont montré une diminution des valeurs d'échappée totale lorsque le nombre de zones touchées par la surmortalité augmentait, bien qu'ils diffèrent quant au nombre de zones devant être touchées avant que des changements à l'ensemble de la population ne soient observés. En cas d'effets maternels élevés (c'est-à-dire lorsque les zones sont largement indépendantes et que les mélanges sont limités), les effets sur l'ensemble de la population pourraient ne pas être visibles jusqu'à ce que plusieurs zones soient touchées. Les effets des dommages d'origine anthropique sur les zones au nord sont les résultats qui diffèrent le plus d'un scénario à l'autre. Par exemple, avec l'hypothèse d'une dispersion par remplissage, les valeurs d'échappée des zones au nord ont diminué beaucoup plus que celles des autres zones, même avant les essais sur la surmortalité (p. ex. figure 9). Bien que ce schéma ne se soit produit que dans deux des six scénarios, il vaut la peine d'être souligné étant donné le statut de l'anguille d'Amérique dans la zone SL (Cornic *et al.* 2021; COSEPAC 2012).

Bien qu'un éventail raisonnable d'hypothèses ait été testées concernant la dispersion des larves leptocéphales, il n'était pas possible de tester toutes les possibilités. Tous les scénarios testés utilisaient une hypothèse sous-jacente d'attraction aquatique, même lorsque le remplissage ou les effets maternels modifiaient sa force relative dans le modèle. Cependant, il est également possible que la répartition sous-jacente soit basée sur la distance, les larves leptocéphales étant moins susceptibles de migrer plus au nord, quelle que soit la densité. Les scénarios avaient également tous comme hypothèse une dispersion constante des larves leptocéphales, bien qu'il soit probable que les conditions environnementales aient un effet sur la dispersion des larves leptocéphales d'une année sur l'autre (Jessop 2020). Les effets potentiels à long terme attribuables aux changements climatiques n'étaient pas non plus inclus dans le modèle, bien que les modifications des courants océaniques puissent influencer les schémas et le succès de la migration des larves leptocéphales (Drouineau *et al.* 2018; Rypina *et al.* 2016).

Alors que le taux de croissance somatique et la longueur de l'anguille argentée présentaient systématiquement une sensibilité relativement élevée aux valeurs d'échappée du modèle, la variation de ces valeurs de sensibilité dépendait des hypothèses de survie et de dispersion des

larves leptocéphales (figure 22). C'est également le cas lorsqu'on examine la sensibilité des modifications du cycle biologique entre les zones (figures 23 et 24), où les valeurs de sensibilité sont parfois très élevées (en particulier pour les zones où le cycle biologique a été modifié pour le test de sensibilité). Cette variabilité fait en sorte qu'il est difficile de tirer des conclusions générales sur la sensibilité de ces paramètres et d'autres paramètres du modèle, vu l'incertitude sous-jacente concernant la dispersion et la survie des larves leptocéphales.

Les mâles n'ont pas été inclus dans la structure du modèle, en partant de l'hypothèse qu'il y aura un nombre suffisant de mâles qui atteindront la mer des Sargasses pour fertiliser les œufs, et que seul le nombre d'anguilles femelles est pertinent pour l'état de la population. Toutefois, il est possible que le succès reproductif global de la métapopulation soit sensible au nombre de mâles disponibles, créant ainsi un éventuel goulot d'étranglement du taux de croissance de la population si le nombre de mâles survivants est insuffisant pour migrer vers la mer des Sargasses. Les connaissances actuelles sur l'origine des mâles sont incomplètes. Les données accessibles indiquent que certains sites produisent très peu de mâles (voire aucun), alors que la zone AN est principalement composée de mâles (tableau 1). Si la majorité des anguilles mâles proviennent seulement de quelques sites de la métapopulation, la population pourrait être plus sensible à la mortalité d'origine anthropique dans ces zones que dans d'autres. La raison derrière ces ratios mâles-femelles très variables n'est pas bien comprise; la densité (Cairns *et al.* 2014; Krueger & Oliveira 1999) est proposée comme mécanisme possible (bien que Côté *et al.* 2015 n'aient trouvé aucune relation entre la densité et le ratio mâles-femelles). Il est nécessaire de déterminer ce qui engendre la répartition des sexes chez les anguilles, à la fois pour recueillir des données supplémentaires sur le cycle biologique des anguilles mâles afin de les inclure dans les futurs modèles, mais aussi pour mieux comprendre la répartition des anguilles d'Amérique mâles.

Cette analyse inclut uniquement la mortalité par pêche anthropique comme source d'augmentation de la mortalité des populations d'anguilles d'Amérique, mais il existe une variété de facteurs qui pourraient influencer sur leur mortalité. Les simulations supposaient une capacité de charge (K) constante dans chaque zone, mais la dégradation de l'habitat ou l'inaccessibilité due à la construction d'un barrage peuvent réduire les valeurs K . De plus, la construction d'un barrage, même si certaines jeunes anguilles et civelles peuvent le franchir, peut introduire des effets supplémentaires dépendants de la densité dans la population (Camhi *et al.* 2021), et la mortalité due aux turbines peut être une source importante de mortalité d'origine anthropique pendant les migrations de retour vers des sites comme la zone SL (COSEPAC 2012).

En raison du manque de données disponibles pour ajuster les courbes de croissance, les taux de croissance pour les zones de l'Atlantique (AS, AC et AN) et pour la zone SL ont été estimés en utilisant la conversion des taux de croissance de Brook *et al.* (2024). Cette méthode utilise les taux de croissance de la littérature (généralement calculés en supposant une croissance constante pendant la durée de vie de l'anguille) et les convertit en taux de croissance biphasiques (Brook *et al.* 2024). Toutefois, cette conversion vient avec une erreur, et aucune donnée ne permet d'en vérifier l'exactitude. Cette méthode a donné un taux de croissance très élevé pour la zone AS (bien que cette zone ait habituellement des taux de croissance plus élevés que les autres zones; Cairns *et al.* 2014). En outre, les données étaient insuffisantes pour inclure des zones dans l'aire de répartition plus au sud de l'anguille d'Amérique, comme les Caraïbes (Ulmo Diaz *et al.* 2023) ou les zones encore plus au nord comme le Groenland (Cairns *et al.* 2014); par conséquent, le modèle de métapopulation n'englobe pas la totalité de l'aire de répartition géographique de l'anguille d'Amérique. De même, seules les données relatives à l'eau douce ont été utilisées dans le modèle en raison des données limitées.

La population d'anguille d'Amérique au Canada a diminué au fil du temps (van der Lee & Koops 2024). Dans l'ensemble, les résultats des simulations avec la métapopulation semblent indiquer

que cette situation pourrait être attribuable à une combinaison d'effets, dont la mortalité d'origine anthropique à l'intérieur et à l'extérieur du Canada. Bien que les pêches soient gérées de manière indépendante, l'effet de la structure de la population panmictique de l'anguille d'Amérique sur les points de référence fondés sur la mortalité et la possibilité d'atteindre les objectifs de gestion doivent être pris en compte si le but ultime est le rétablissement et la protection des pêches durables de l'anguille d'Amérique.

RÉFÉRENCES CITÉES

- ASMFC (Atlantic States Marine Fisheries Commission). (2012). American eel benchmark stock assessment. ASMFC, Stock Assessment Report No. 12-01. Washington, D.C. 342 p.
- Barbin, G.P., and McCleave, J.D. (1997). Fecundity of the American eel *Anguilla rostrata* at 45° N in Maine, U.S.A. J. Fish Biol. 51: 840-847.
- Bevacqua, D., Melia, P., De Leo, G.A., and Gatto, M. (2011). Intra-specific scaling of natural mortality in fish: the paradigmatic case of the European eel. Oecologia, 165: 333-339. doi : 10.1007/s00442-010-1727-9
- Bradford, R.G., Cook, A.M., et Smith, S. (2022). Évaluation des pêches de l'anguille d'Amérique et de la civelle dans la région des Maritimes. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2022/009. v + 80 p.
- M. E. Brook, A. S. van der Lee et M. A. Koops. (2025). Prédiction des points de référence fondés sur la mortalité pour l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2025/nnn. iv + 60 p.
- Cairns, D.K. (2020) Landings, abundance indicators, and biological data for a potential range-wide American eel stock assessment. Rapport statistique canadien des sciences halieutiques et aquatiques. N° 1311 : v + 180 p.
- Cairns, D.K., Chaput, G., Poirier, L.A., Avery, T.S., Castonguay, M., Mathers, A., Casselman, J.M., Bradford, R.G., Pratt, T., Verreault, G., Clarke, K., Veinott, G., and Bernatchez, L. (2014). Recovery Potential Assessment for the American Eel (*Anguilla rostrata*) for eastern Canada: life history, distribution, reported landings, status indicators, and demographic parameters. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/134. xiv + 157 p.
- Camhi, M., Bednarski, M., LaBelle, J., & Waldman, J. (2021). Abundance and distribution of American eel in a heavily dammed urban river. North American Journal of Fisheries Management, 41(4), 1131-1140. doi : 10.1002/nafm.10620
- Caswell, H. (2001). Matrix population models: construction, analysis, and interpretation. 2nd Edition. Sinauer Associates, Sunderland, MA. 722 p.
- Cornic, M., Zhu, X., Cairns, D.K. (2021). Cadre d'évaluation de l'anguille d'Amérique à l'échelle du stock : examen des tendances et approches en matière d'évaluation. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/032. xi + 81 p.
- COSEPAC. (2012). Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xii + 127 p.
- Côté, C. L., Pavey, S. A., Stacey, J. A., Pratt, T. C., Castonguay, M., Audet, C., Bernatchez, L. (2015). Growth, female size, and sex ratio variability in American eel of different origins in both controlled conditions and the wild: implications for stocking programs. Transactions of the American Fisheries Society, 144(2), 246-257. doi : 10.1080/00028487.2014.975841

-
- MPO. (2019). Évaluation des pêches à l'anguille d'Amérique et à la civelle dans la région des Maritimes. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis sci. 2019/054.
- Drouineau, H., Durif, C., Castonguay, M., Mateo, M., Rochard, E., Verreault, G., Yokouchi, K., Lambert, P. (2018). Freshwater eels: A symbol of the effects of global change. *Fish and Fisheries*, 19(5), 903-930. doi : 10.1111/faf.12300
- ICES. (2001) Report of the Working Group on Eels St. Andrews, N.B., Canada, 28 August – 1 September 2000. ICES CM 2001/ACFM:03.
- Jessop, B. M. (2020). Oceanic environmental effects on American eel recruitment to the East River, Chester, Nova Scotia. *Marine and Coastal Fisheries*, 12(4), 222-237. doi : 10.1002/mcf2.10121
- Jessop, B.M. (2010). Geographic effects on American eel (*Anguilla rostrata*) life history characteristics and strategies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67(2), 326-346. doi : 10.1139/F09-189
- Jessop, B. M. (2000). Estimates of population size and instream mortality rate of American eel elvers in a Nova Scotia river. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2), 514-526. doi : 10.1577/1548-8659(2000)129<0514:EOPSAI>2.0.CO;2
- Krueger, W. H., Oliveira, K. (1999). Evidence for environmental sex determination in the American eel, *Anguilla rostrata*. *Environmental Biology of Fishes*, 55, 381-389.
- Lorenzen, K. (1996). The relation between body weight and natural mortality in juvenile and adult fish: a comparison of natural ecosystems and aquaculture. *Journal of Fish Biology*, 49: 627-647. doi : 10.1111/j.1095-8649.1996.tb00060.x
- Mace, P. M. & M. P. Sissenwine. (1993). How much spawning per recruit is enough? p. 101-118. In S. J. Smith., J. J. Hunt and D. Rivard [ed.] Risk evaluation and biological reference points for fisheries management. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 1 20.
- Miller, M. J., Bonhommeau, S., Munk, P., Castonguay, M., Hanel, R., & McCleave, J. D. (2015). A century of research on the larval distributions of the Atlantic eels: a re-examination of the data. *Biological Reviews*, 90(4), 1035-1064. doi : 10.1111/brv.12144
- Pratt, T. C. & Threader, R. W. (2011). Preliminary evaluation of a large-scale American eel conservation stocking experiment. *North American Journal of Fisheries Management*, 31(4), 619-628. doi : 10.1080/02755947.2011.609003
- Randall, R. G., & Minns, C. K. (2000). Use of fish production per unit biomass ratios for measuring the productive capacity of fish habitats. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(8), 1657-1667. doi : 10.1139/f00-103
- Rypina, I. I., Pratt, L. J., Lozier, M. S. (2016). Influence of ocean circulation changes on the inter-annual variability of American eel larval dispersal. *Limnology and Oceanography*, 61(5), 1574-1588. doi :10.1002/lno.10297
- Sissenwine, M. P., Shepherd, J. G. (1987). An alternative perspective on recruitment overfishing and biological reference points. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(4), 913-918.
- Tremblay, V. (2009). Reproductive strategy of female American eels among five subpopulations in the St. Lawrence River watershed. In *Eels at the edge: science, status, and conservation concerns*. American Fisheries Society, Symposium (Vol. 58, pp. 85-102).
-

-
- Ulmo Diaz, G., A. Engman, W.O. McLarney, C.A. Lasso Alcalá, D. Hendrickson, E. Bezault, E. Feunteun, F.L. Prats Léon, J. Wiener, R. Maxwell, R.S. Mohammed, T.J. Kwak, J. Benchetrit, B. Bougas, C. Babin, E. Normandeau, H.H.V. Djambazian, S. H. Chen, S.J. Reiling, J. Ragoussis, and L. Bernatchez. (2023). Panmixia in the American eel extends to its tropical range of distribution: biological implications and policymaking challenges. *Evolutionary Applications*, doi : 10.1111/eva.13599.
- van der Hammen, T., Soudijn, F., Volwater, J., van Rijssel, J. C., Griffioen, A. B., Chen, C., & Winter, H. V. (2021). European Eel (*Anguilla anguilla*) stock size, anthropogenic mortality and silver eel escapement in the Netherlands 2006-2020. (CVO report; No. 21.023). Centre for Fisheries Research (CVO). <https://doi.org/10.18174/556153>
- van der Lee, A.S. and Koops, M.A. (2024). American Eel (*Anguilla rostrata*) Population Trajectory in Canada. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2024/nnn. iv + xx p.
- Vélez-Espino, L. A., & Koops, M. A. (2010). A synthesis of the ecological processes influencing variation in life history and movement patterns of American eel: towards a global assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 20, 163-186.
- Young, J.A.M., & Koops, M.A. (2014). Recovery Potential Assessment for the American Eel (*Anguilla rostrata*) for eastern Canada: recovery potential assessment population modelling. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/131. vi + 65 p.

DONNÉES COMPLÉMENTAIRES 1 – SIMULATIONS SUR 125 ANS

Les simulations sur 125 ans incluaient la pêche de l'anguille et de la civelle, ainsi que la mortalité due aux turbines dans la zone SL. Elles ont été réalisées pour visualiser la façon dont les hypothèses sur la survie et la dispersion des larves leptocéphales influent sur le nombre d'anguilles jaunes et argentées et sur le nombre de civelles arrivant dans chaque zone. Le nombre de civelles et d'anguilles a été mis à l'échelle de manière à ce que, lorsque la métapopulation atteint sa capacité de charge, le nombre total soit égal à 100 (c'est-à-dire « 100 % » du nombre à K). Ces hypothèses ont également un effet sur les capacités de charge relatives entre les zones quand la métapopulation dans son ensemble est dans son état stable. En général, lorsqu'un paramètre commun de survie des larves leptocéphales était utilisé, la zone AS présentait le plus grand nombre d'anguilles jaunes, en raison de la mise à l'échelle de la survie des larves leptocéphales. Quand un paramètre unique de survie des larves leptocéphales était utilisé pour chaque zone, c'est la zone NG qui avait le plus grand nombre d'anguilles jaunes. La zone SG avait toujours le plus petit nombre d'anguilles jaunes par rapport aux autres zones.

Dans la plupart des cas, le nombre de civelles allant dans chaque zone n'a pas diminué de façon dramatique avec une pêche de l'anguille à F_{50} . Comme les valeurs F_{50} sont généralement bien supérieures à $F_{extinction}$, le nombre de larves leptocéphales réduit causé par la pêche est largement remplacé par la compensation de la dépendance à la densité de la civelle (et de la croissance dépendante de la densité si elle est incluse), de sorte que le nombre de civelles ne diminue pas considérablement. Les scénarios de remplissage constituent une exception à cette règle : la zone SL et les autres zones au nord peuvent présenter une diminution des civelles en raison de la baisse du nombre total de larves leptocéphales dans la métapopulation. D'une manière générale, les tendances entre les options dépendantes de la densité sont similaires.

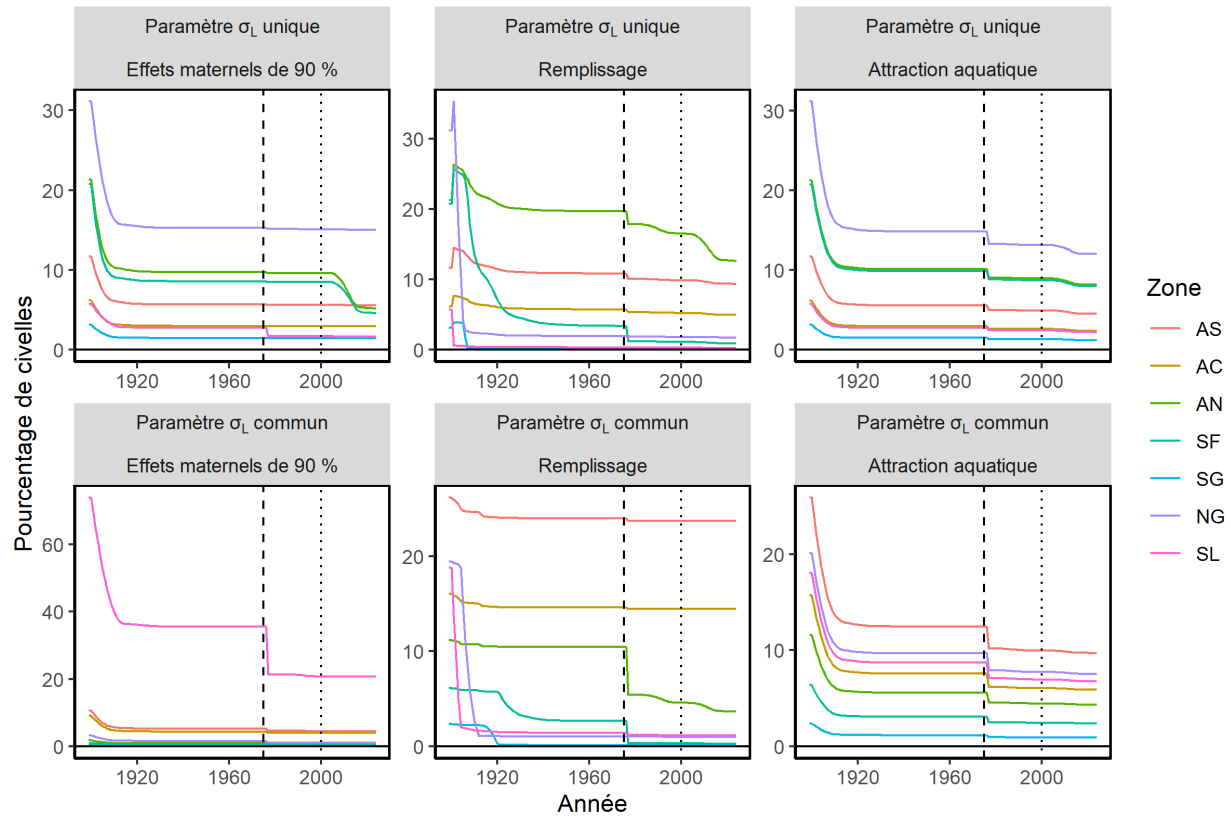


Figure S1.1. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

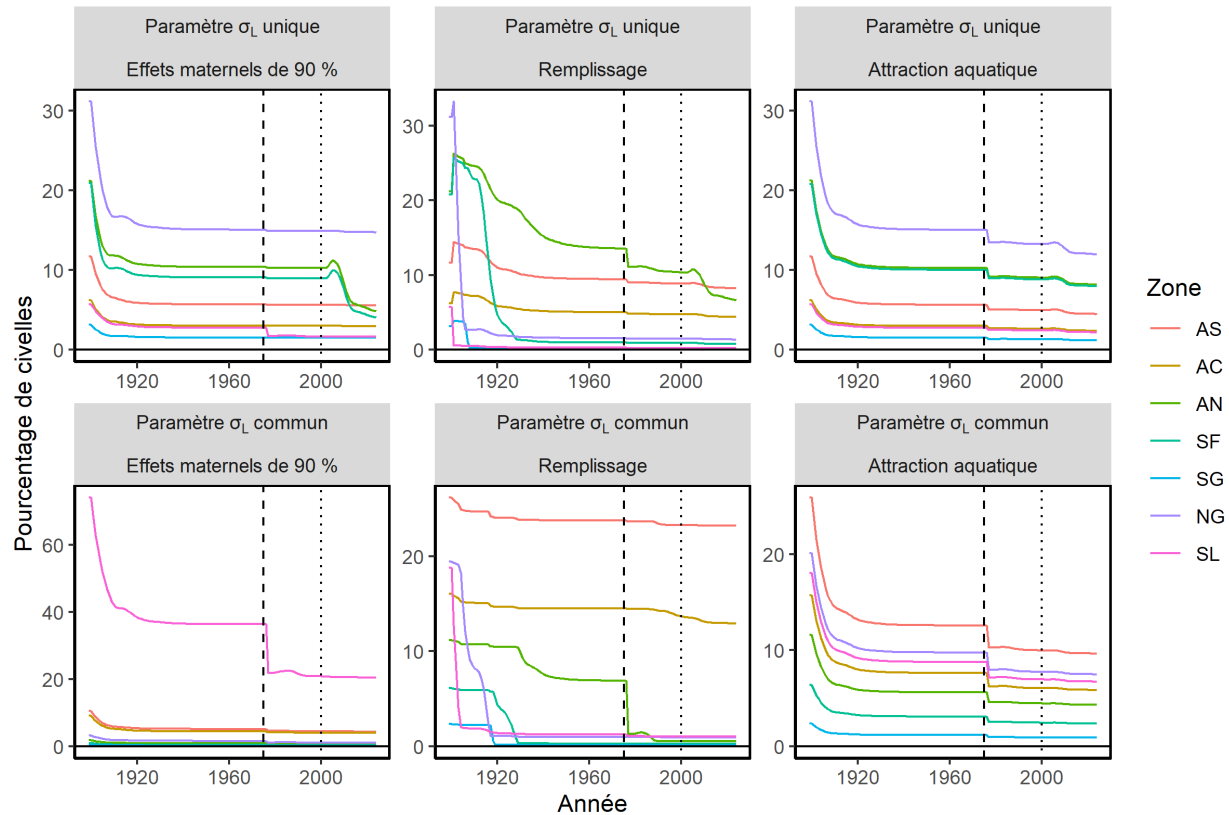


Figure S1.2. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

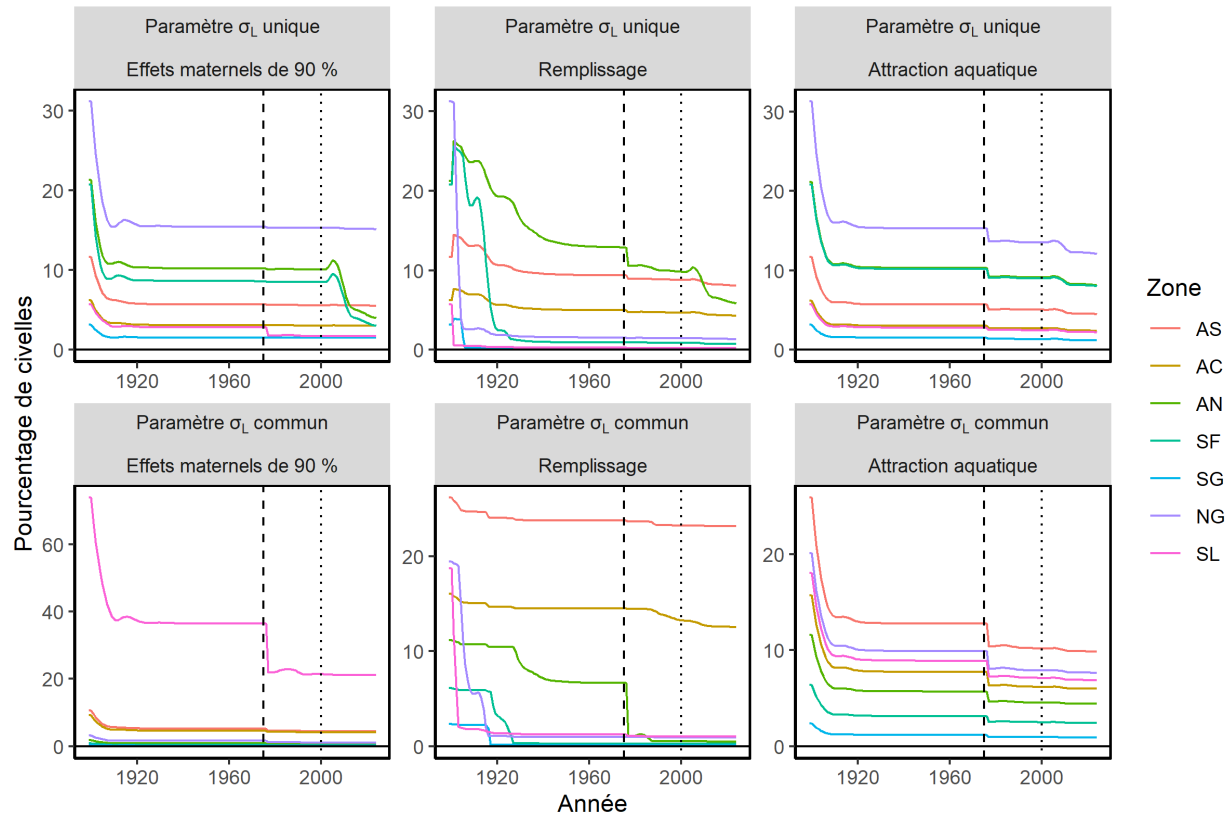


Figure S1.3. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

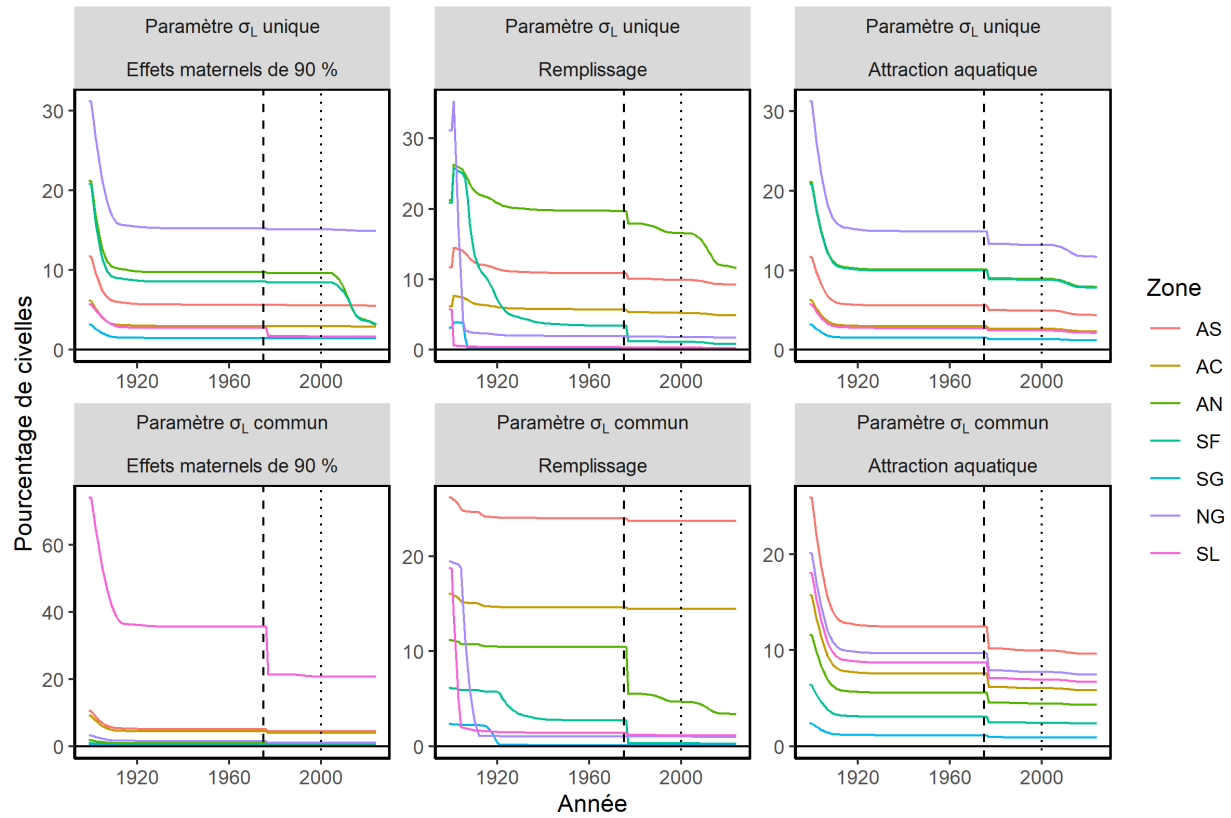


Figure S1.4. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

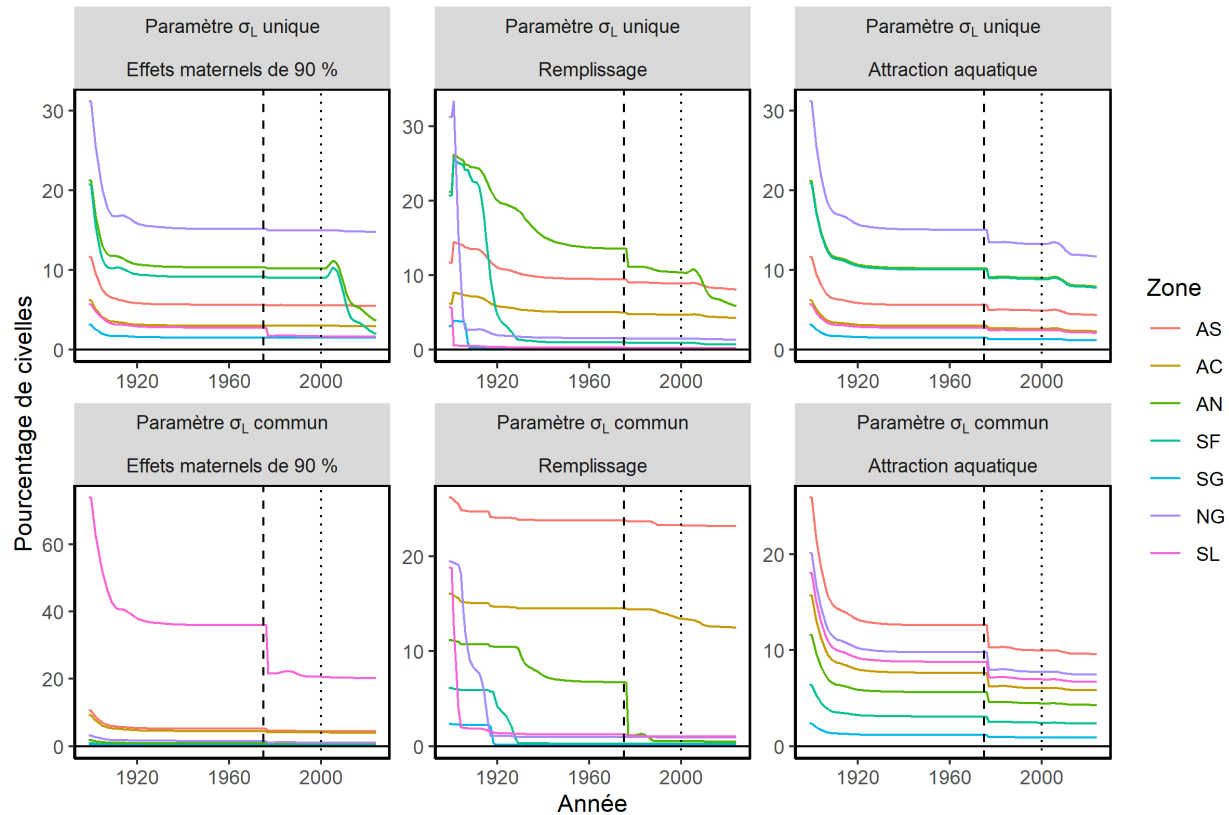


Figure S1.5. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

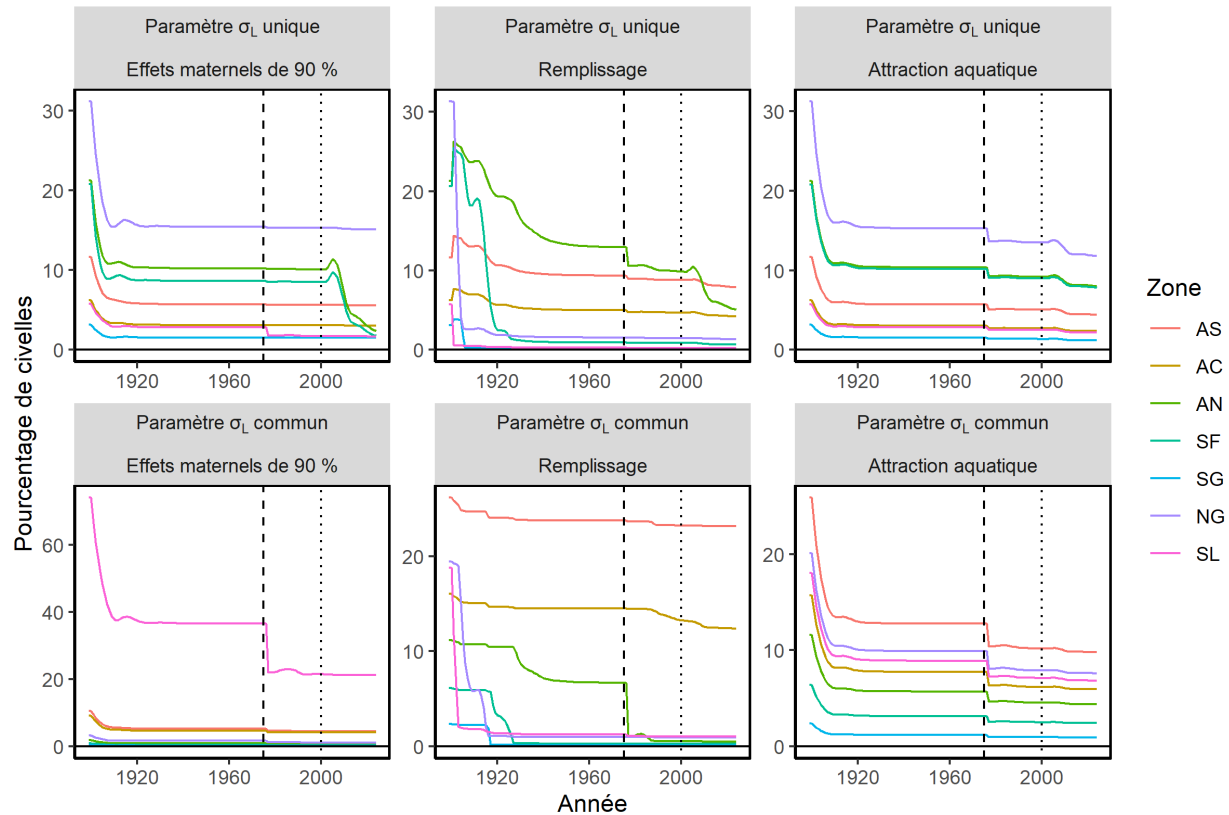


Figure S1.6. Pourcentage relatif de civelles lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

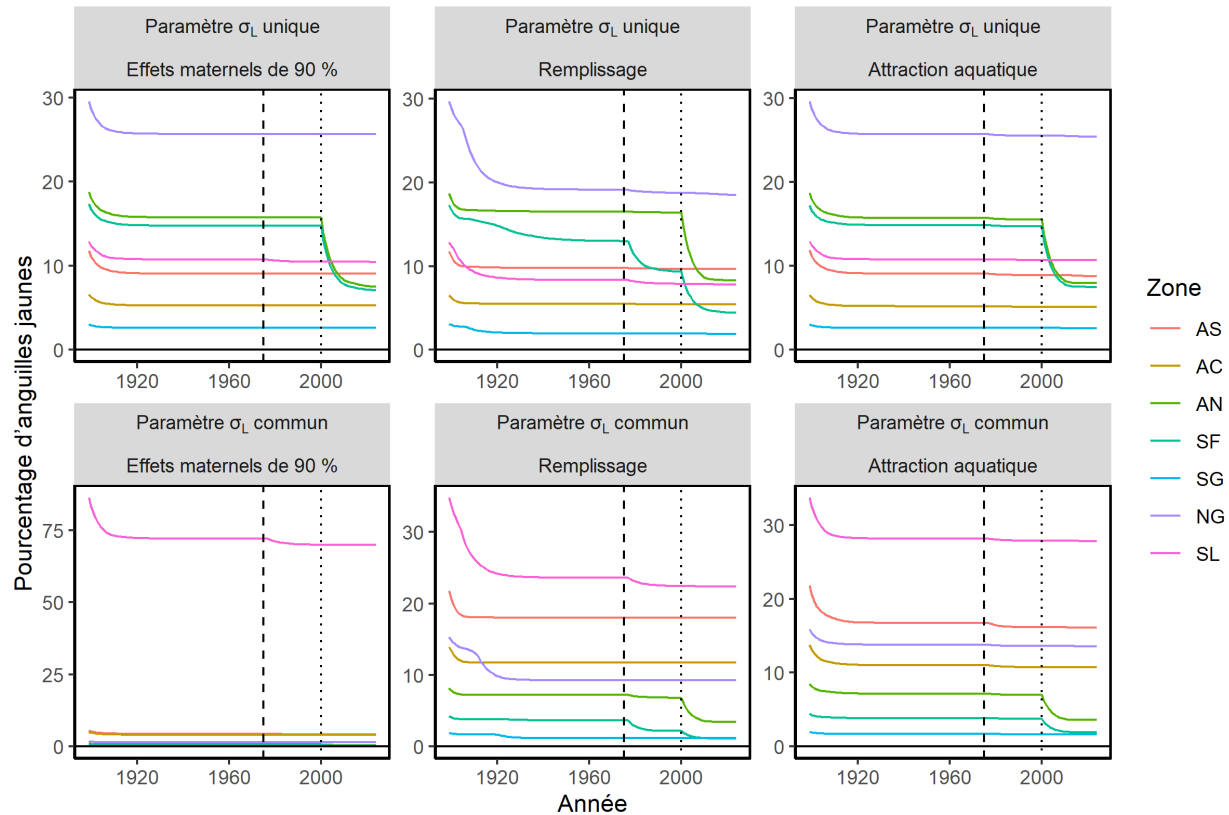


Figure S1.7. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

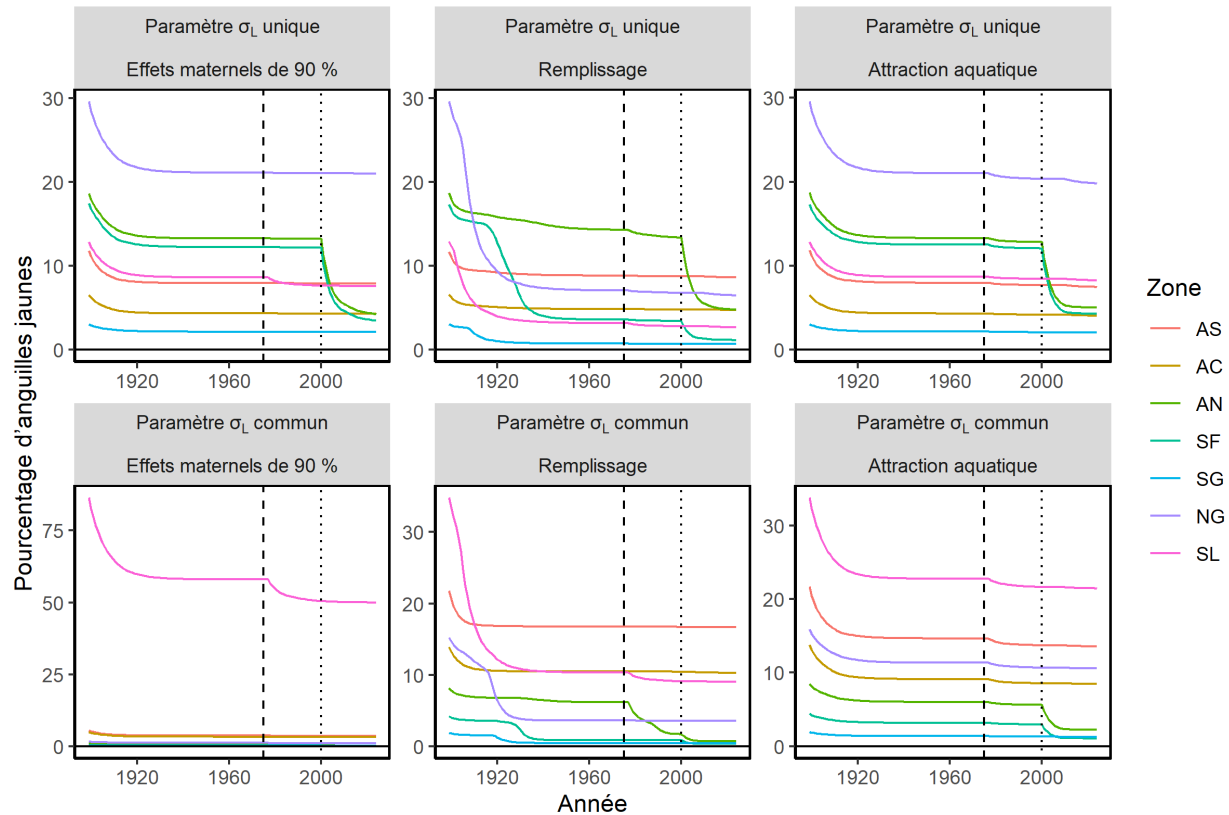


Figure S1.8. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

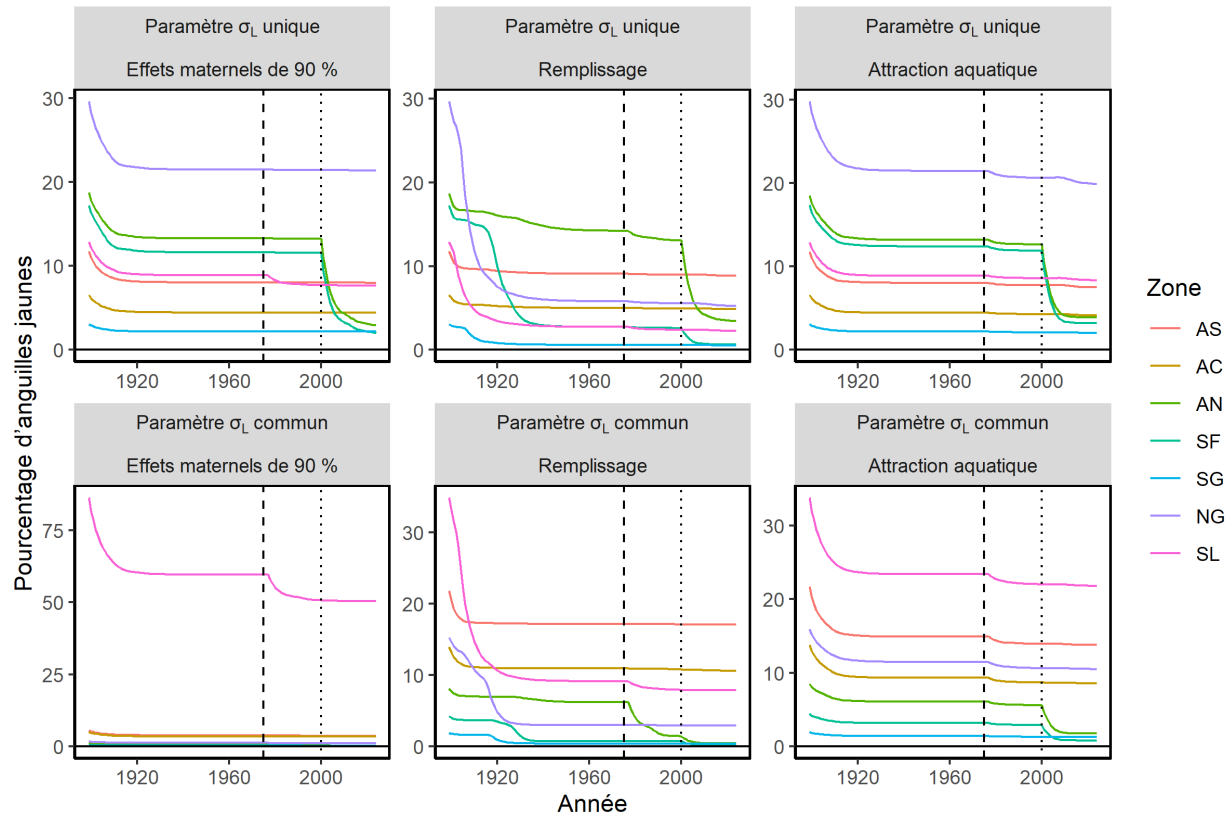


Figure S1.9. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

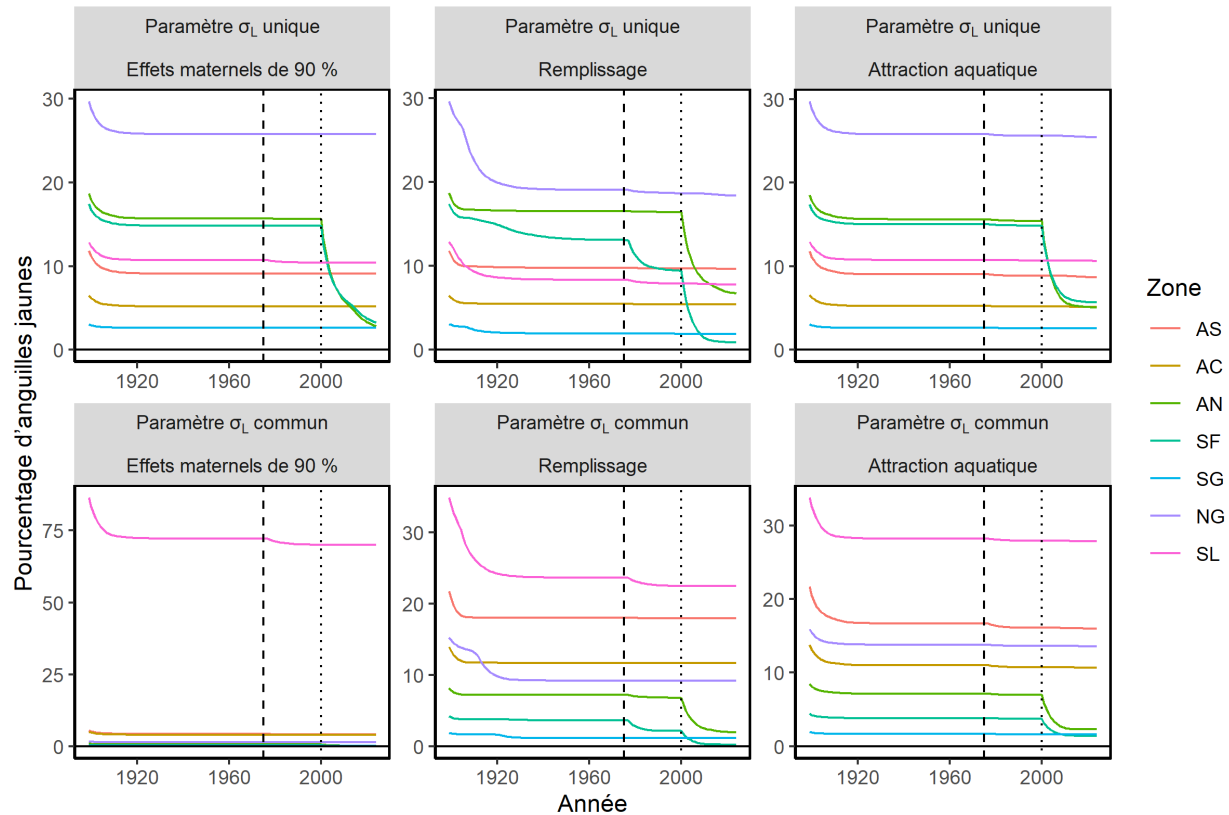


Figure S1.10. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

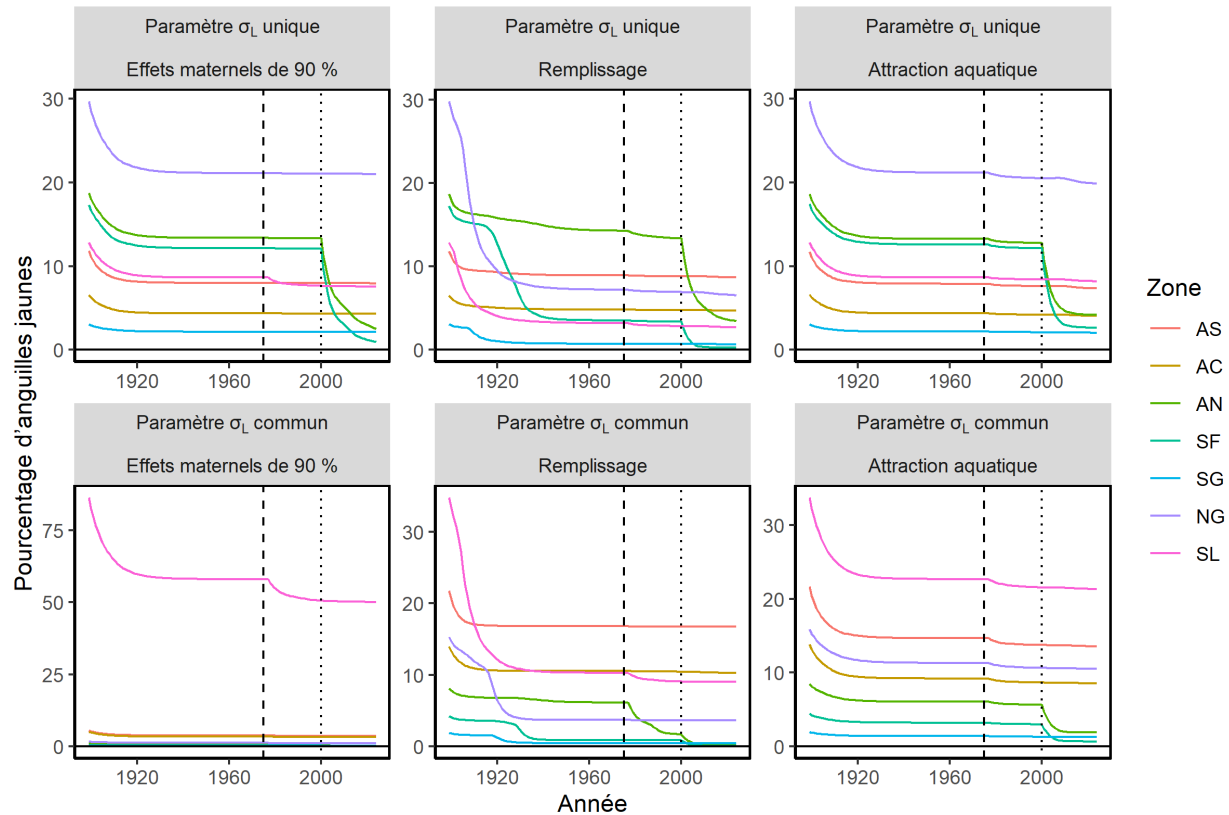


Figure S1.11. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

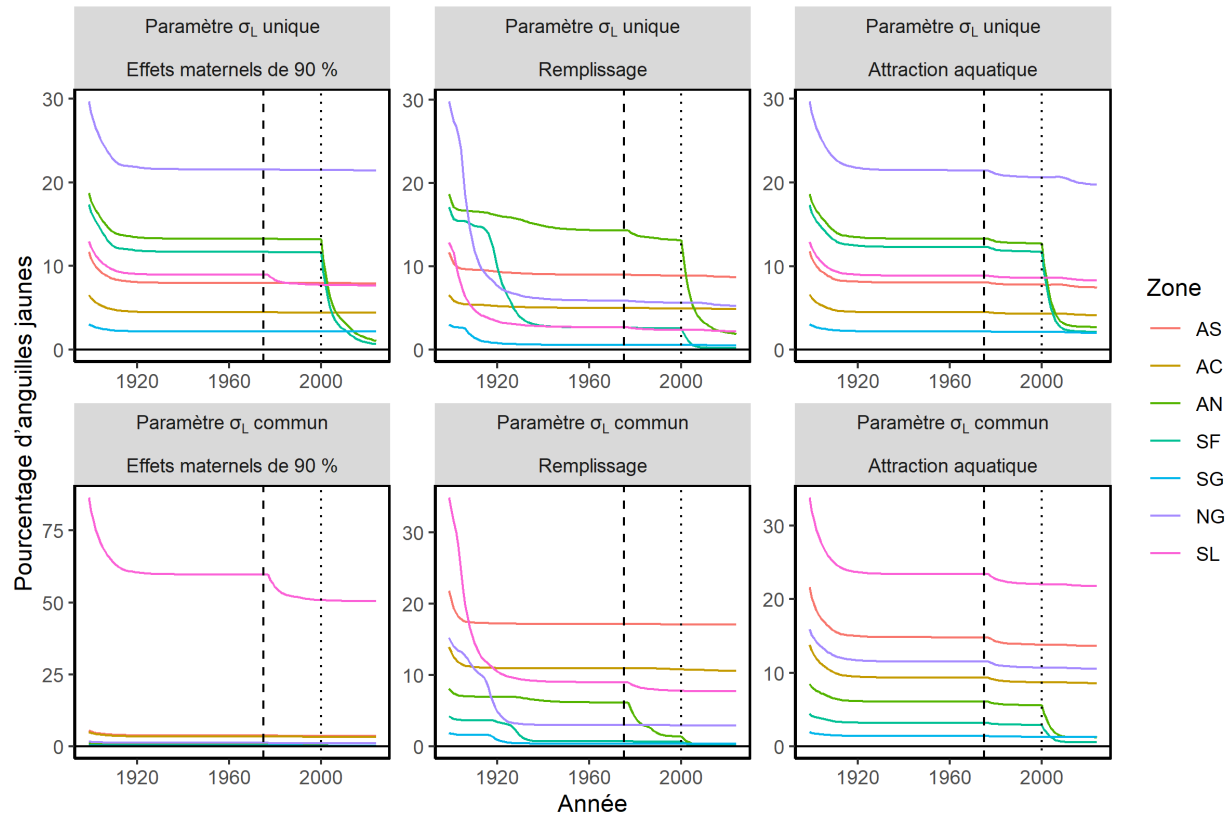


Figure S1.12. Pourcentage relatif d'anguilles jaunes lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

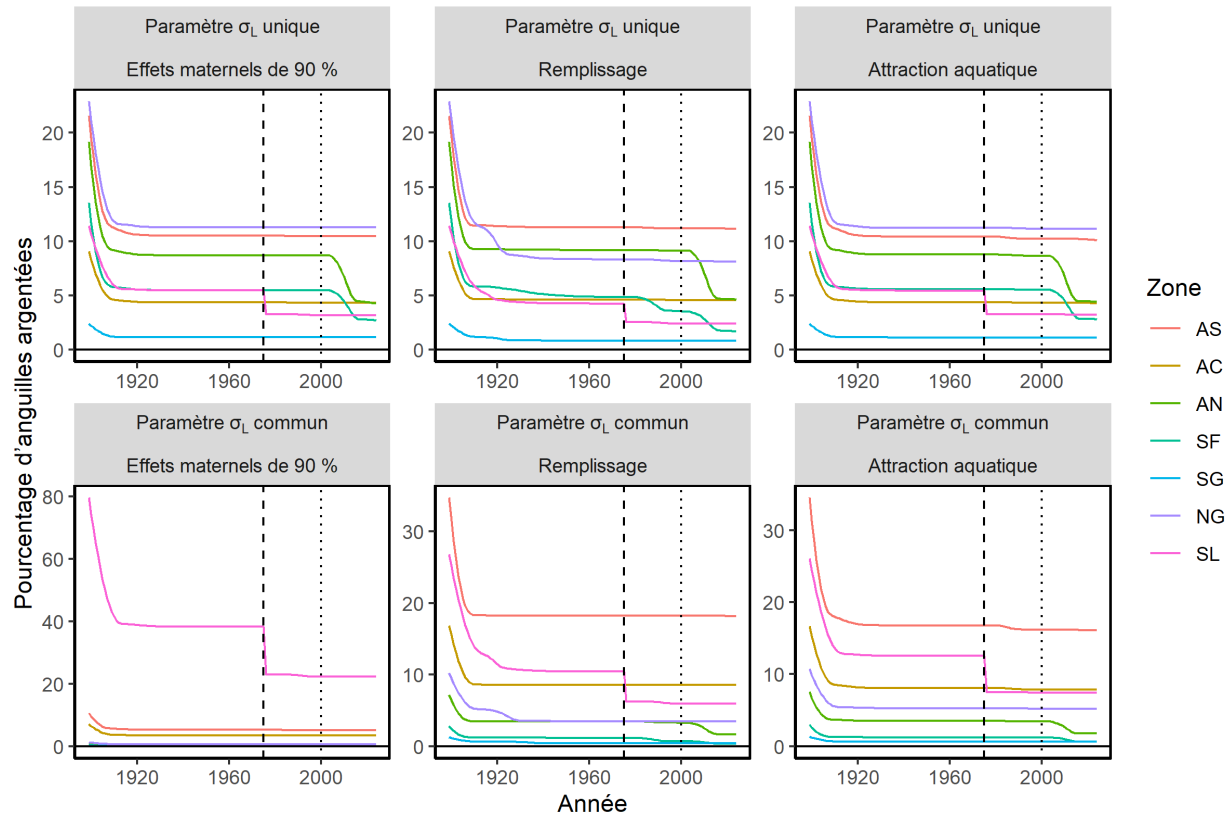


Figure S1.13. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

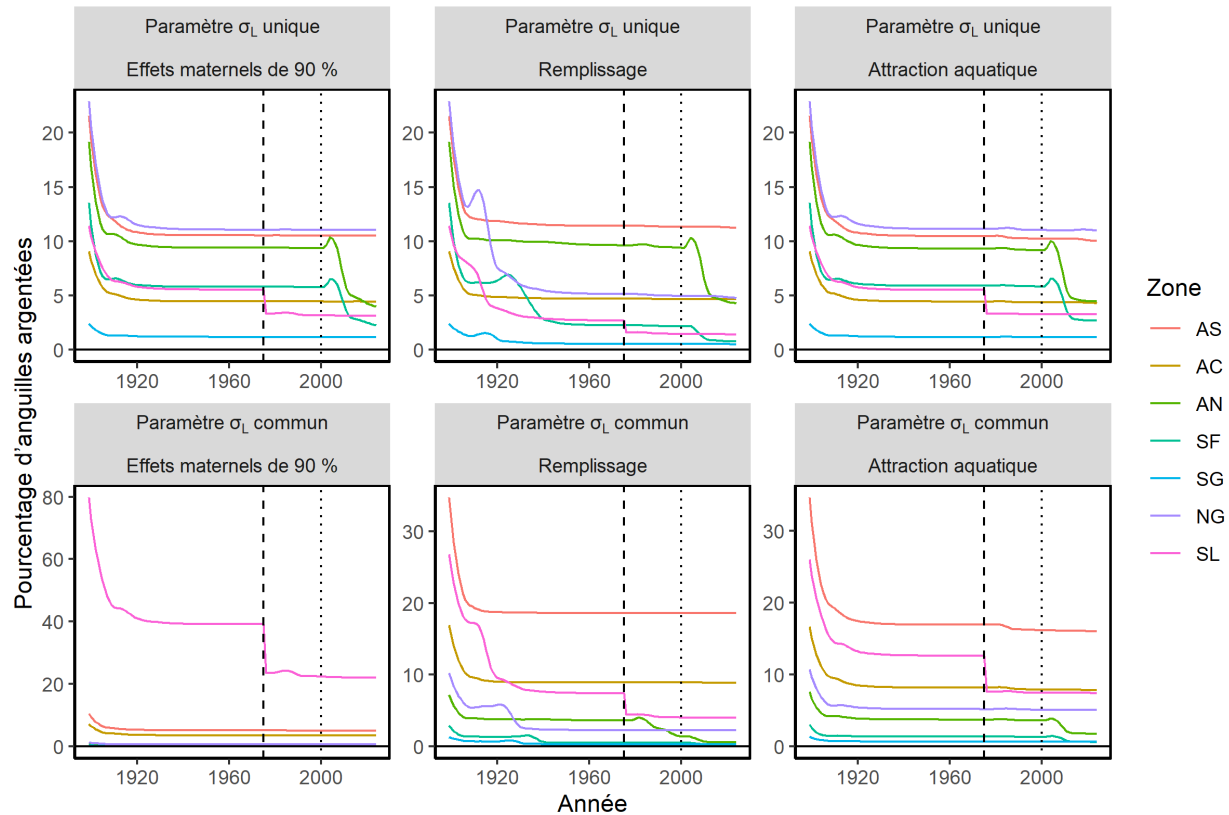


Figure S1.14. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

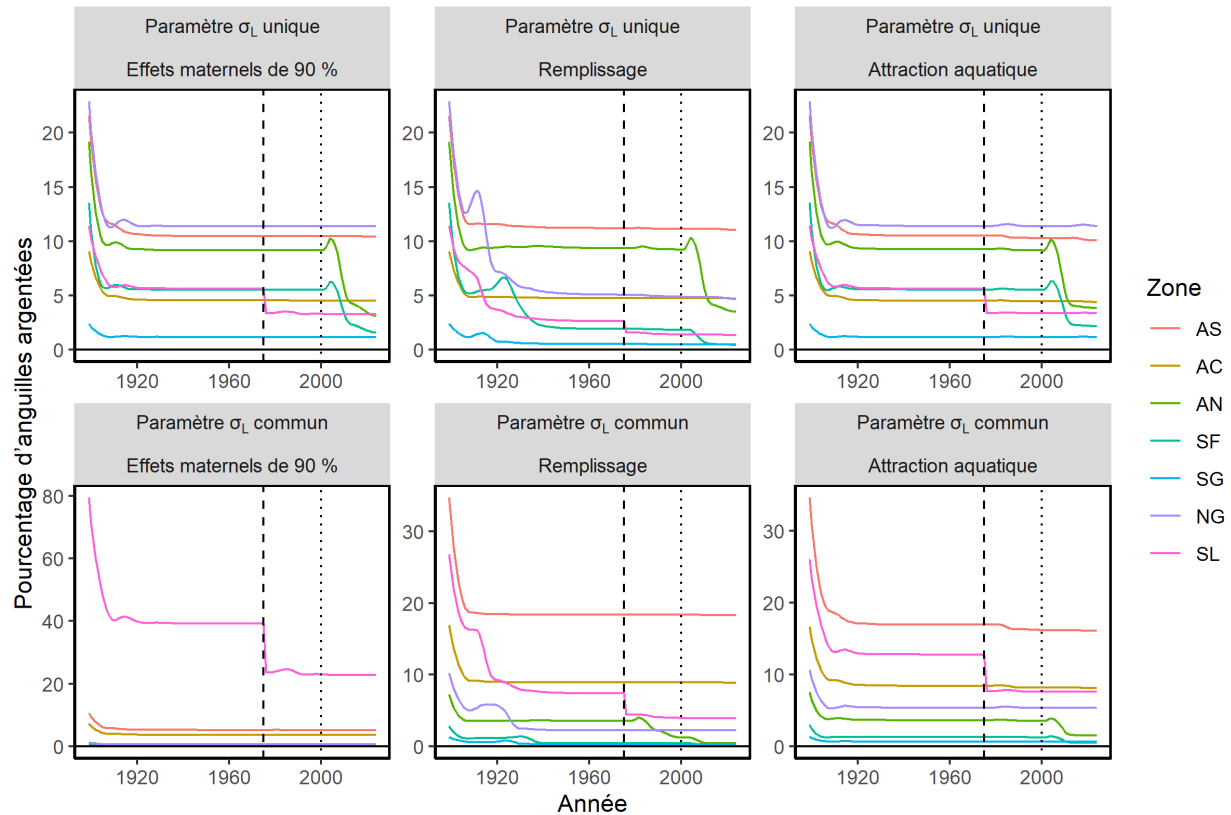


Figure S1.15. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

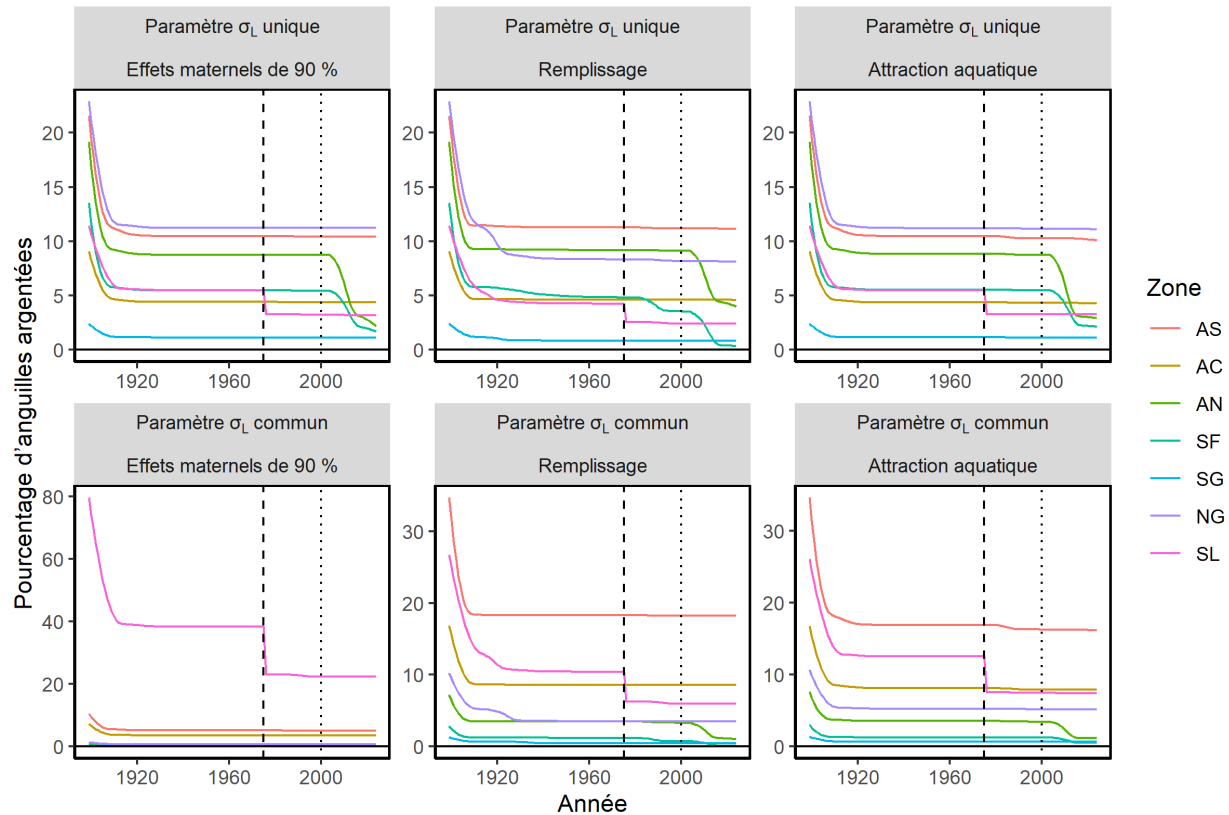


Figure S1.16. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

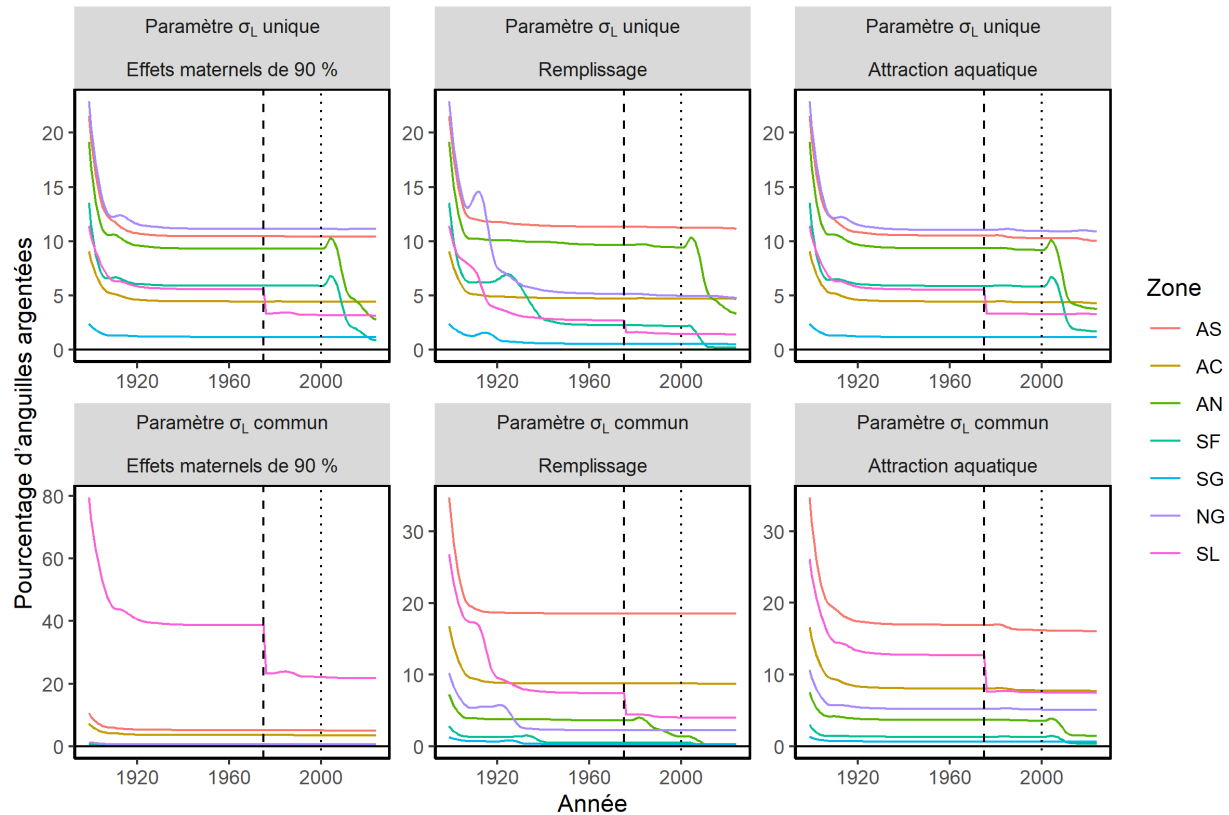


Figure S1.17. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

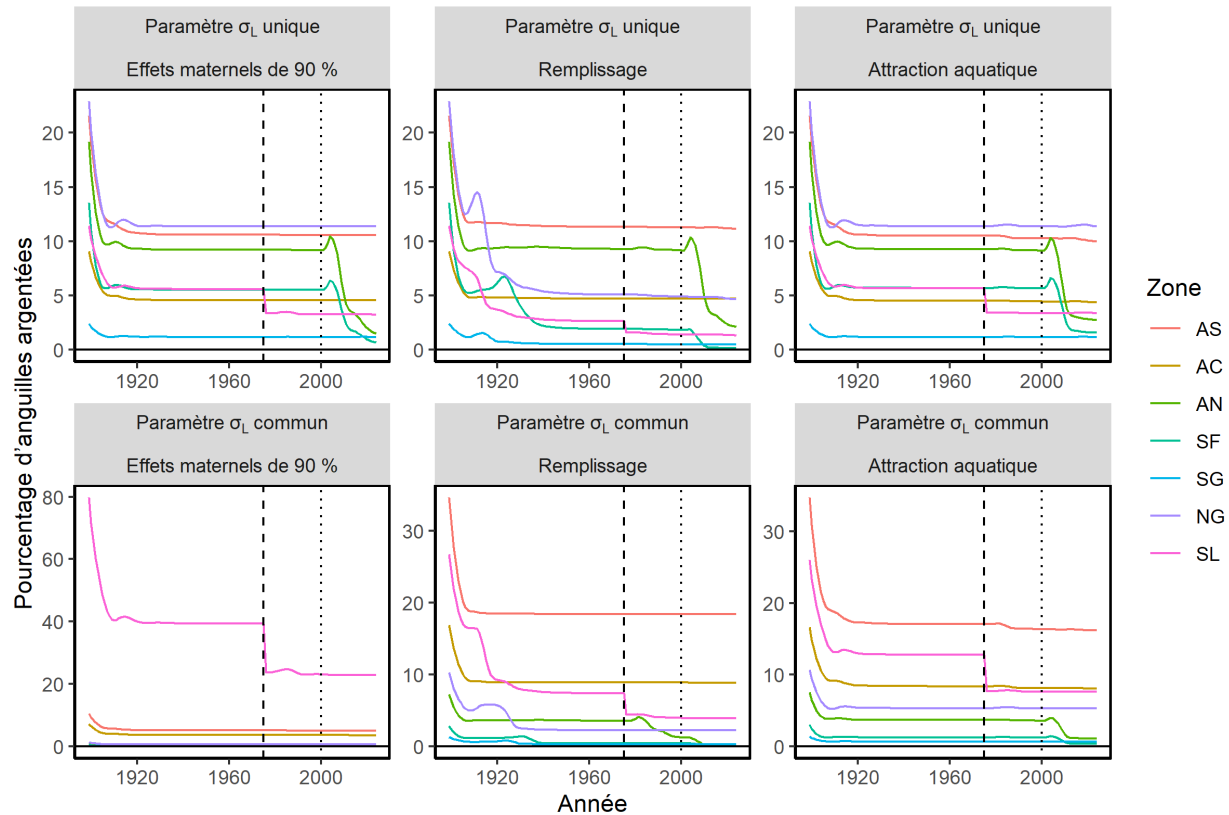


Figure S1.18. Pourcentage relatif d'anguilles argentées lorsque l'anguille est exploitée à F_{50} , avec le modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle, le cas échéant. La ligne tiretée indique la date à laquelle la mortalité due aux turbines a été introduite dans la zone SL; la ligne pointillée indique la date à laquelle la pêche de la civelle a commencé dans les zones AN et SF.

DONNÉES COMPLÉMENTAIRES 2 – AUTRES MÉCANISMES DE DÉPENDANCE À LA DENSITÉ

Dans l'ensemble, les résultats des simulations n'ont pas été énormément différents lorsque des mécanismes de dépendance à la densité ont été ajoutés au modèle. L'ajout de mécanismes de dépendance à la densité a généralement accru la variabilité des résultats, mais, dans le cas des simulations avec la valeur F_{50} , de la surmortalité et de rétablissement, les schémas globaux ne différaient pas entre les essais « DD des civelles », « DD des civelles + Arg. » ou « DD des civelles + Arg. + Mort. ».

GESTION DES ZONES AVEC F_{50}

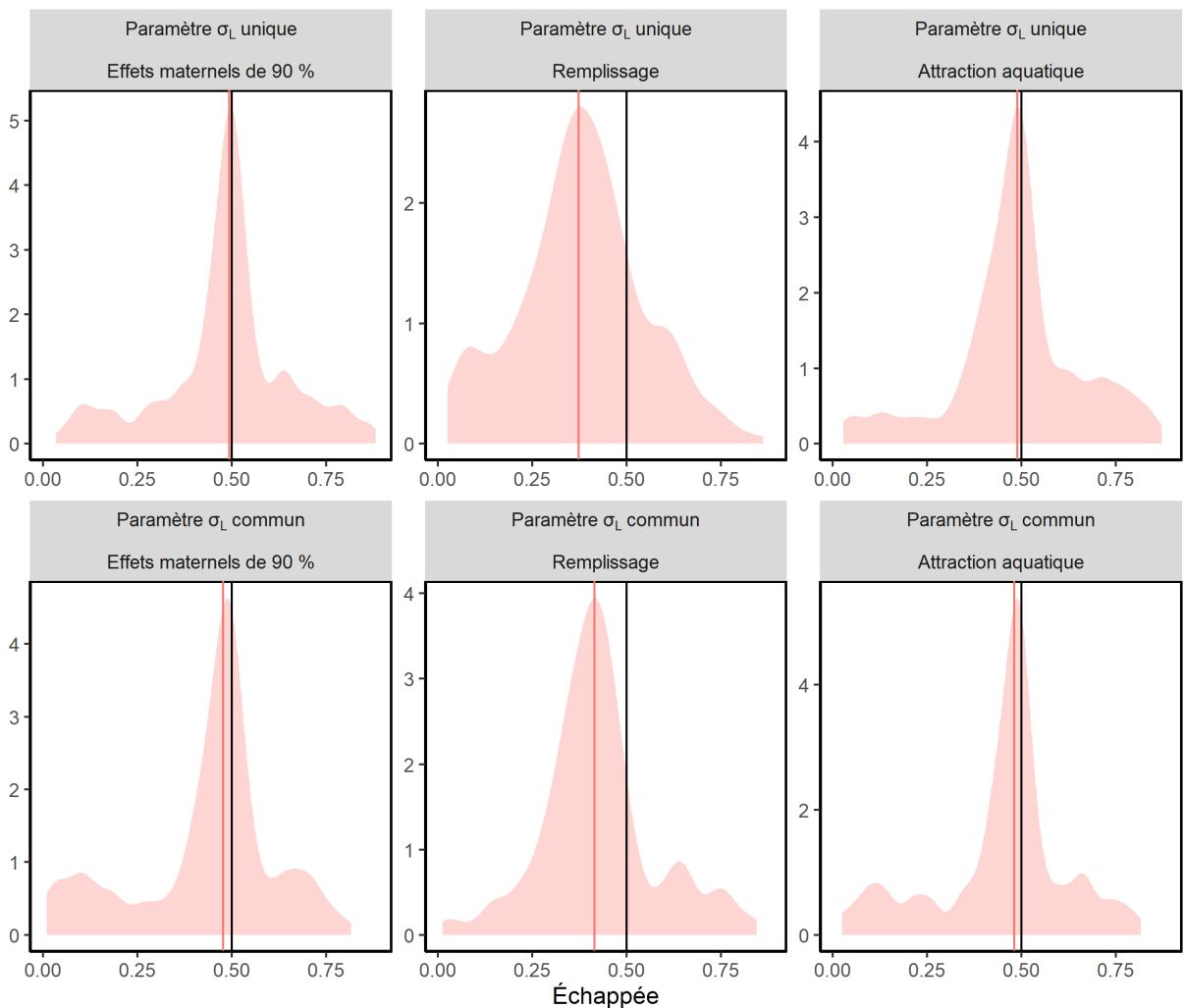


Figure S2.1. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. » et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

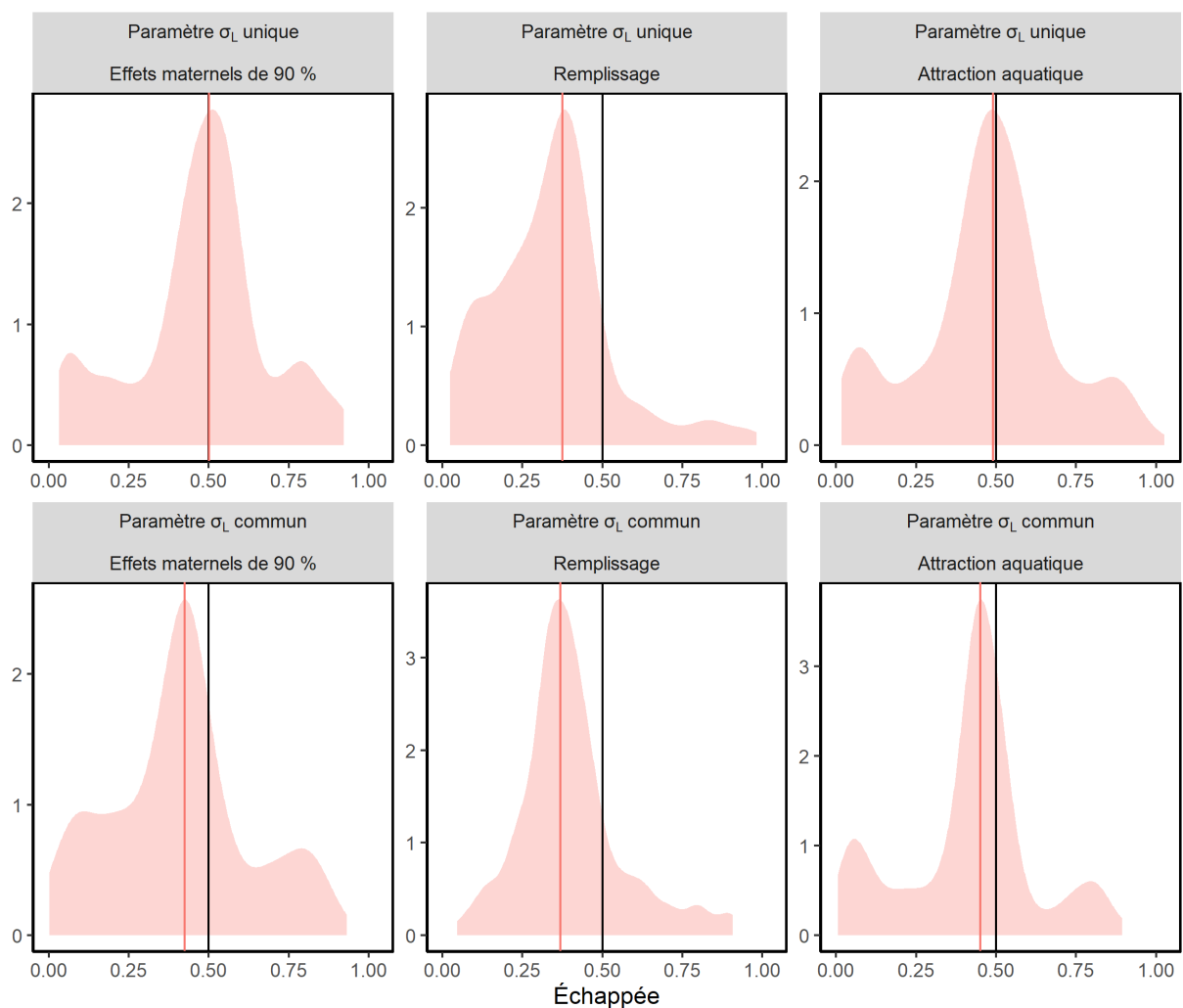


Figure S2.2. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. » et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

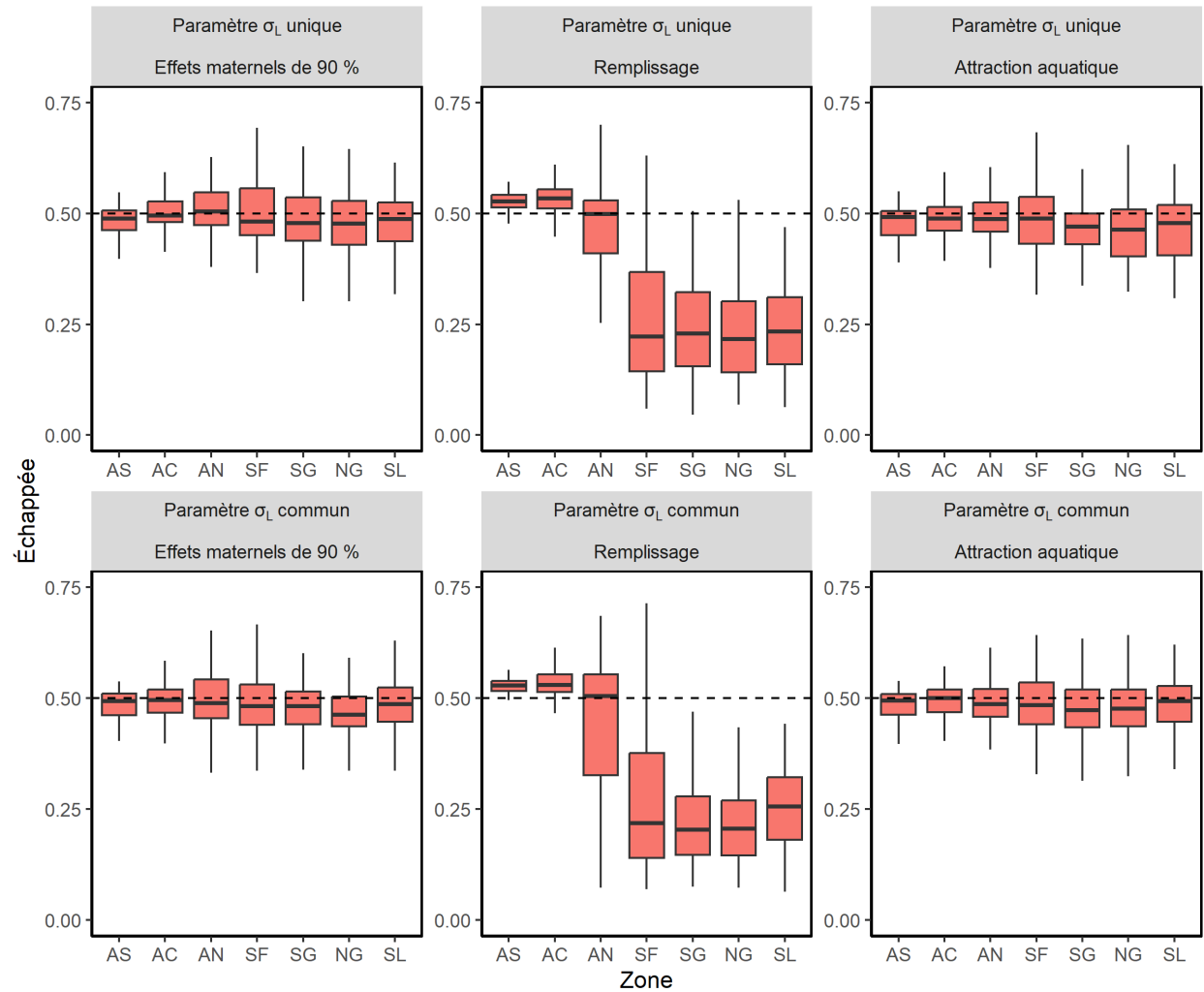


Figure S2.3. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. » et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche.

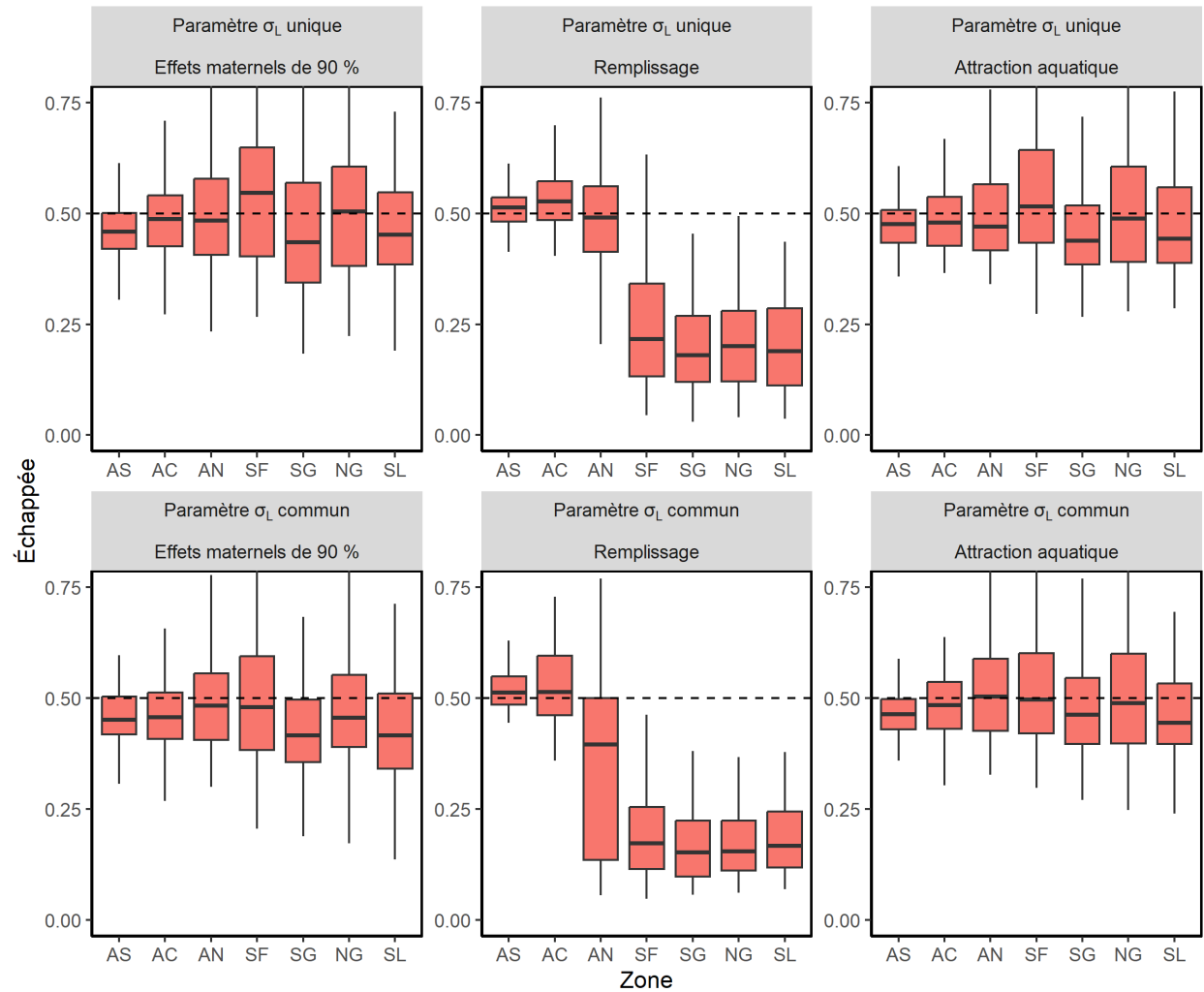


Figure S2.4. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. » et que la dépendance à la densité se produit avant la pêche.

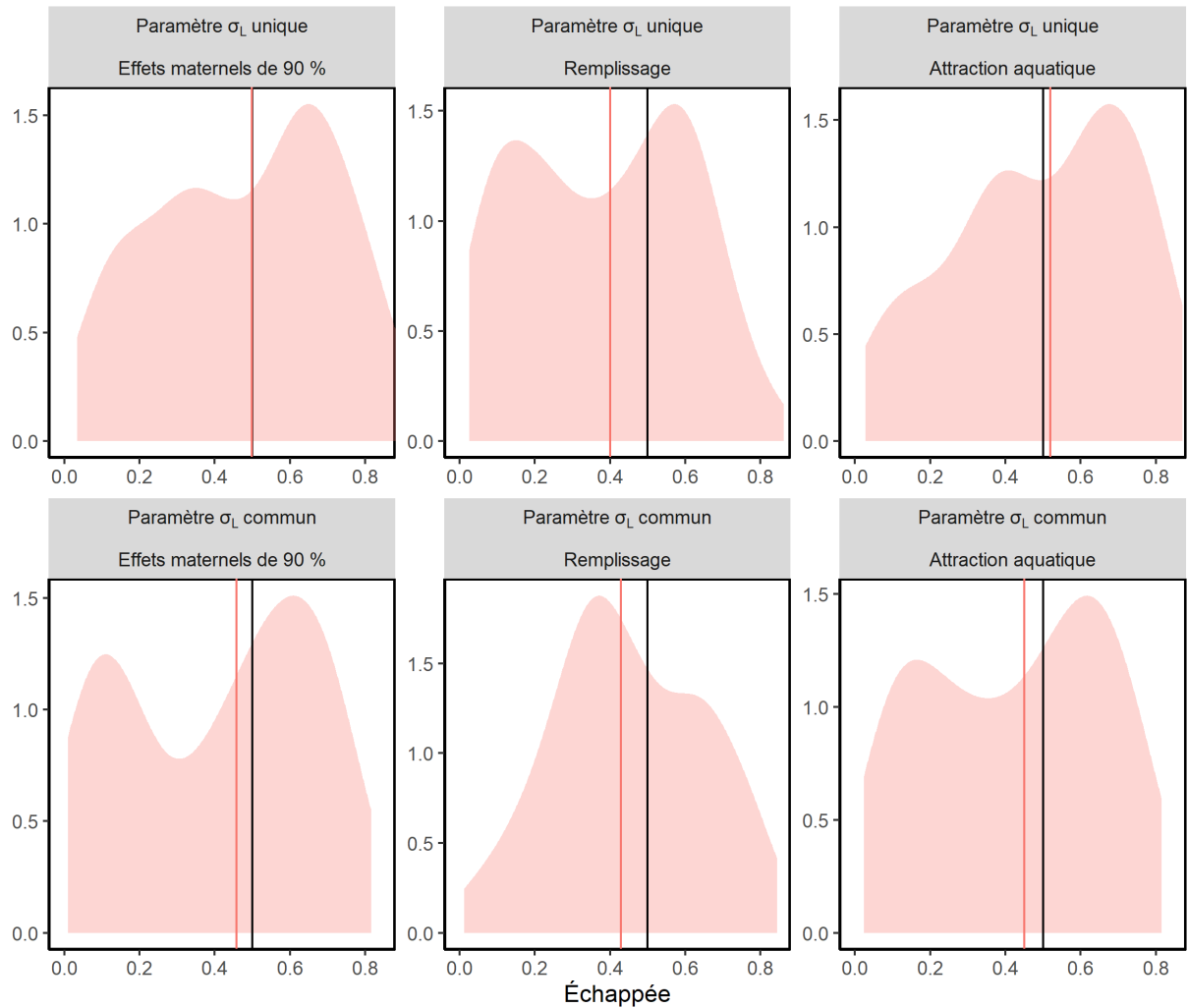


Figure S2.5. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. » et que la dépendance à la densité se produit après la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

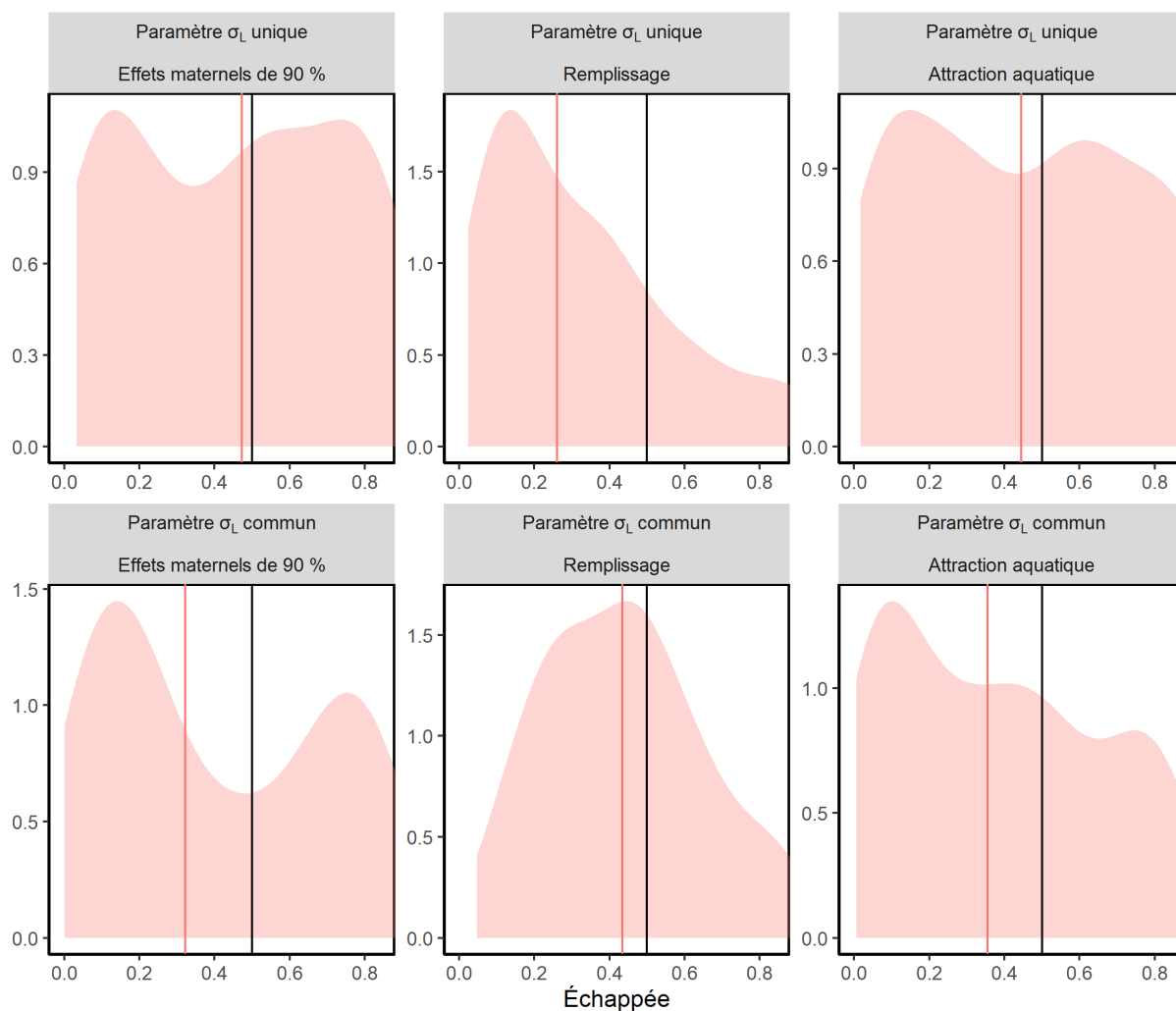


Figure S2.6. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. » et que la dépendance à la densité se produit après la pêche. La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

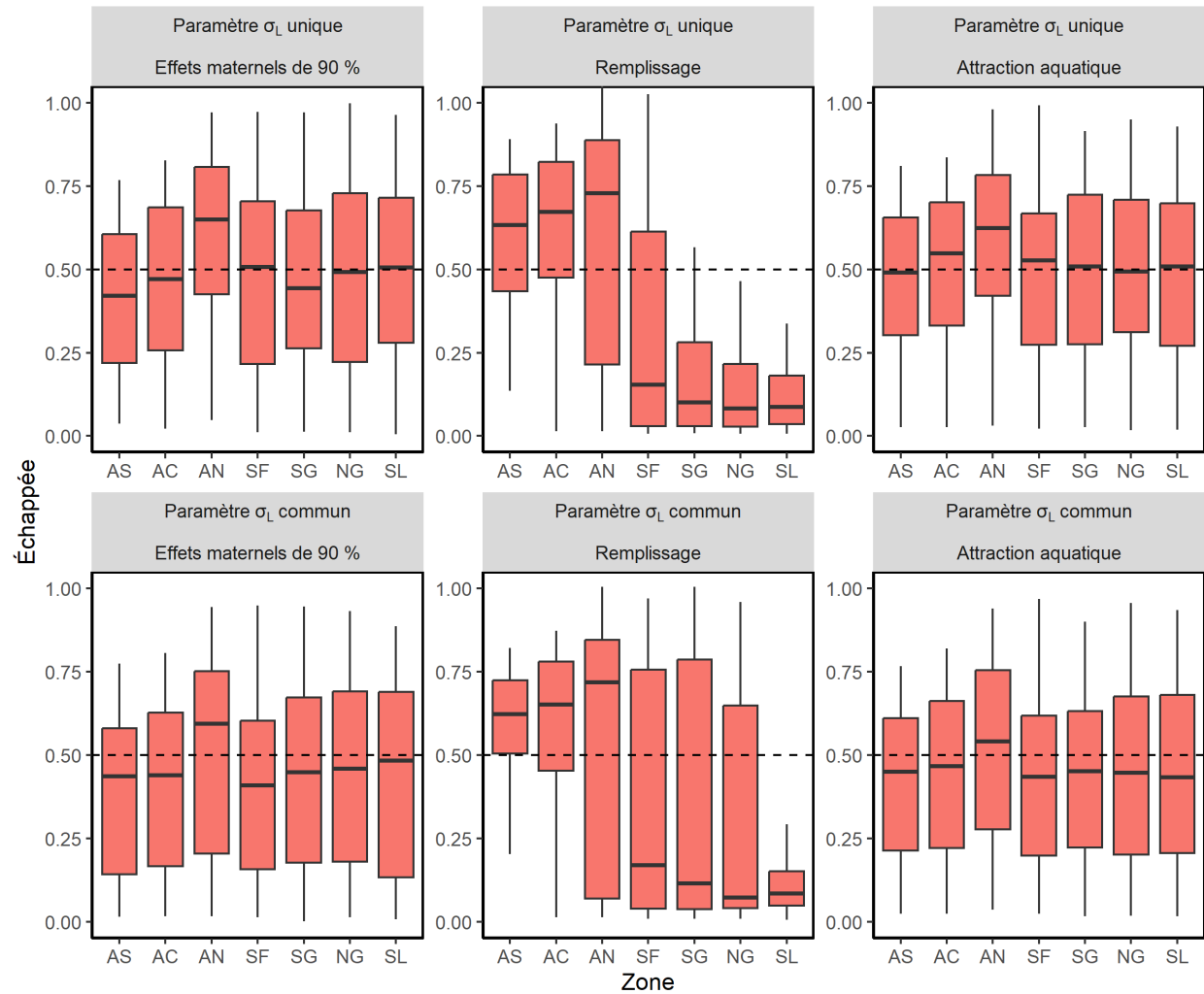


Figure S2.7. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. » et que la dépendance à la densité se produit après la pêche.

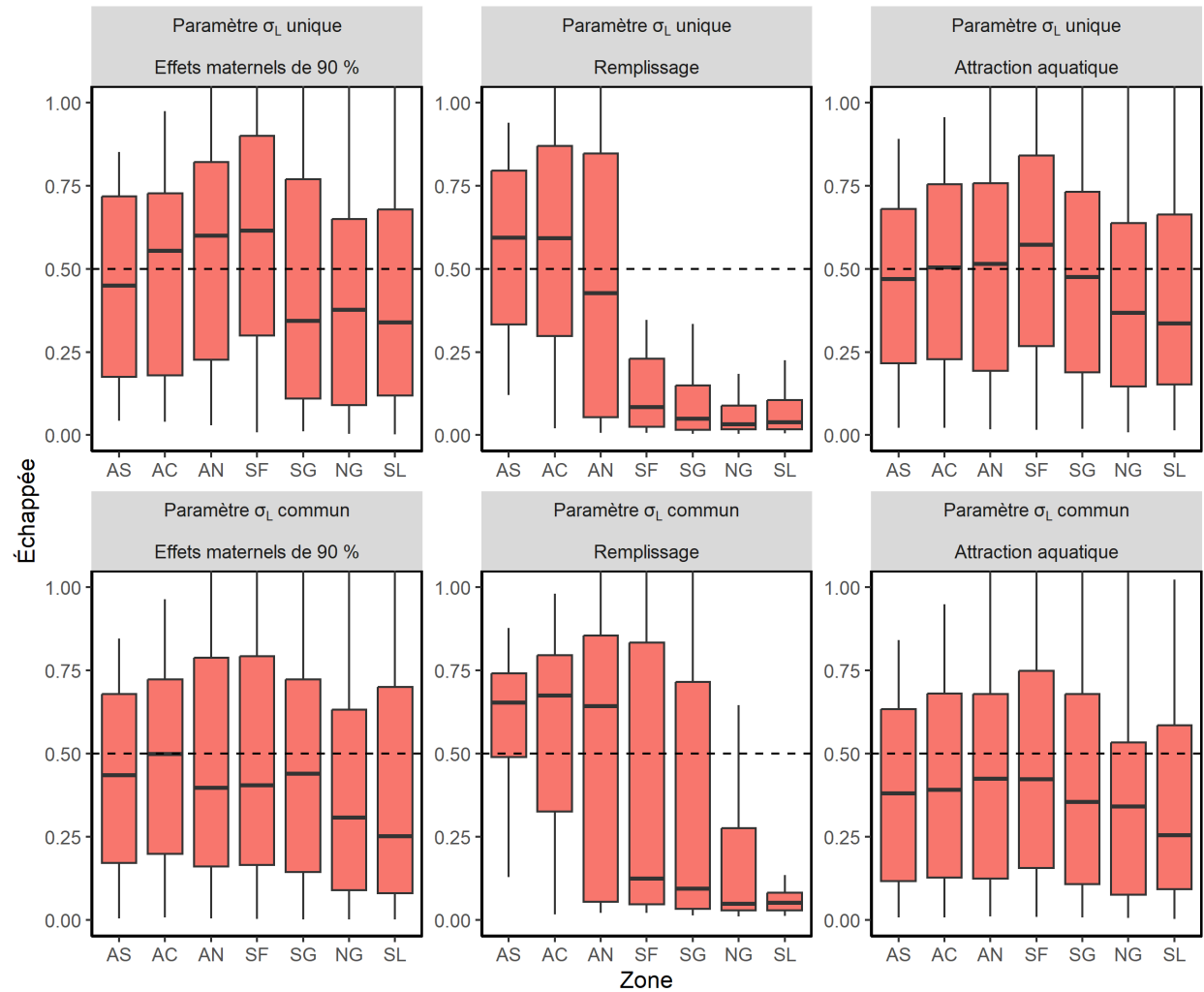


Figure S2.8. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour la civelle quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. » et que la dépendance à la densité se produit après la pêche.

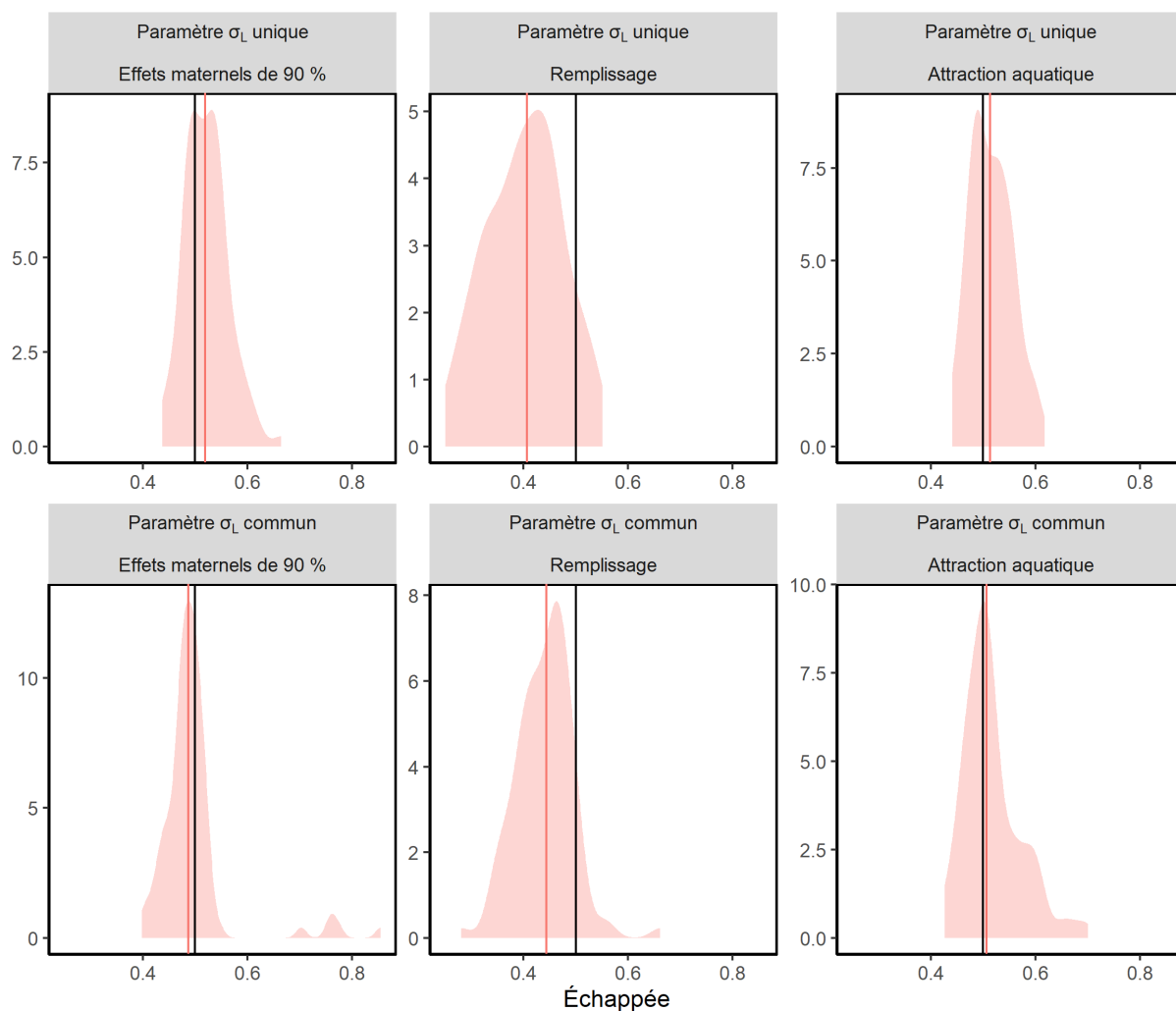


Figure S2.9. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. ». La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

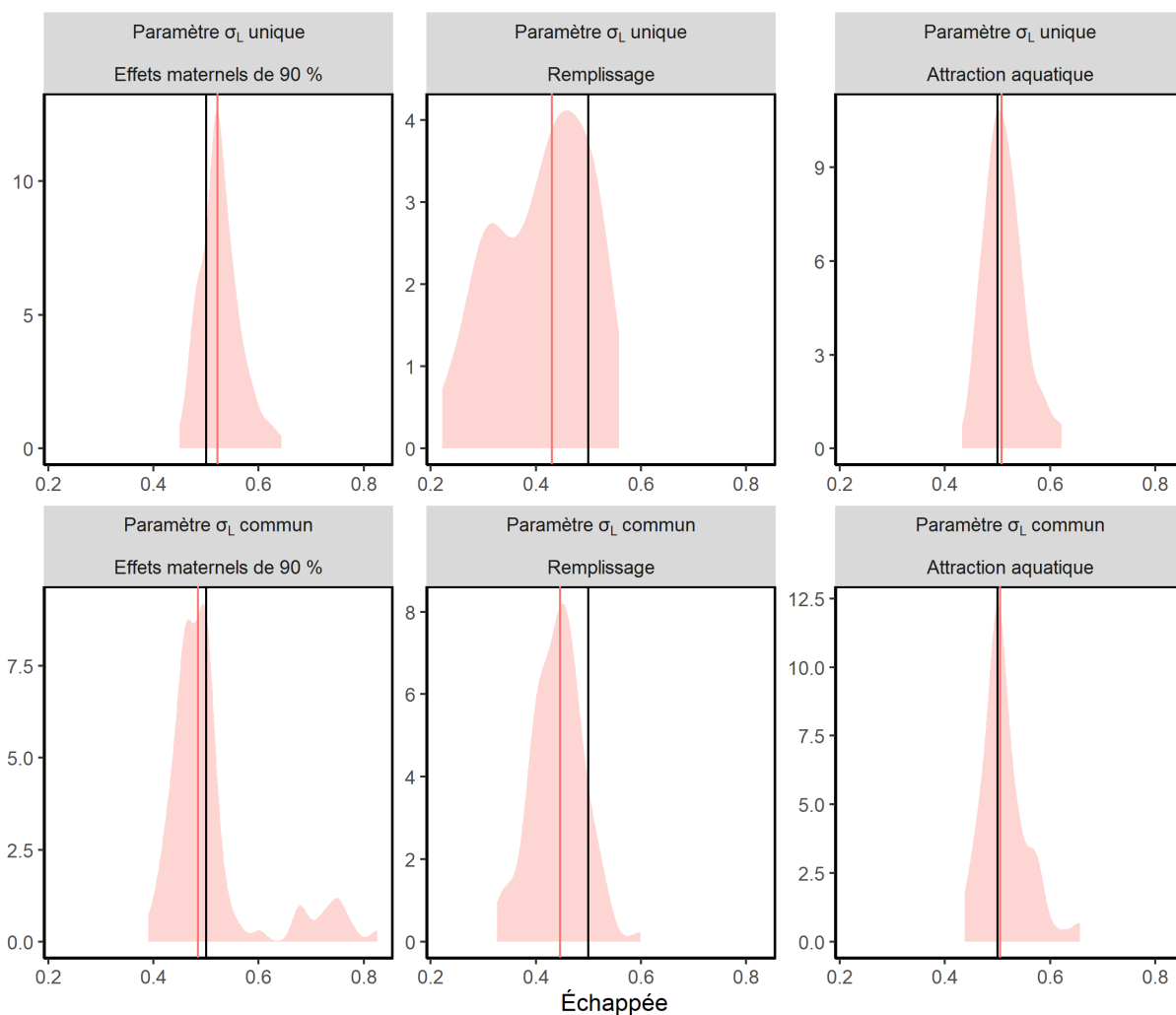


Figure S2.10. Distribution des valeurs d'échappée pour l'ensemble de la métapopulation lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. ». La ligne noire continue est l'objectif d'échappée₅₀, et la ligne rouge continue est la médiane de la distribution.

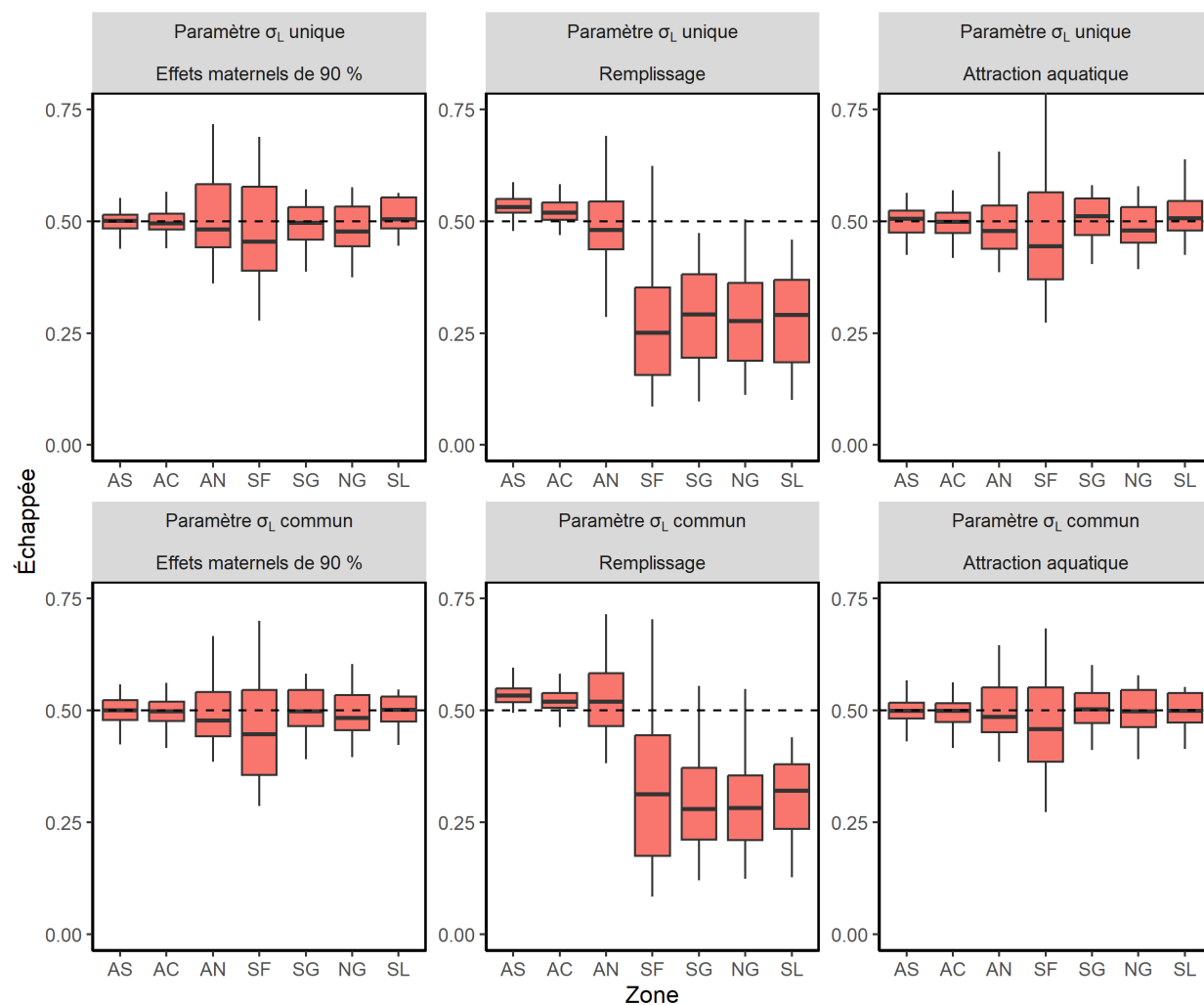


Figure S2.11. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. ».

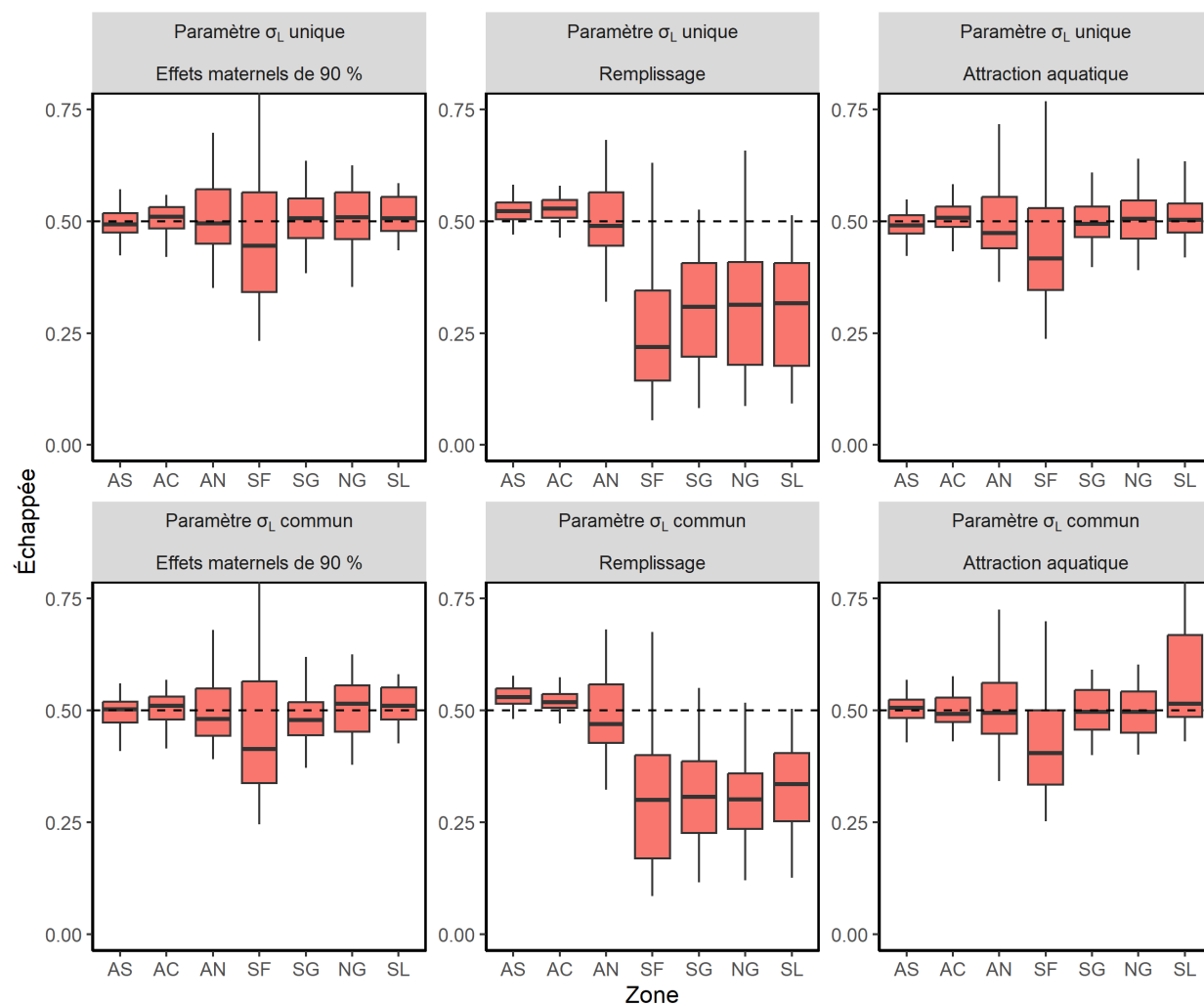


Figure S2.12. Distribution des valeurs d'échappée de chaque zone lorsque chaque zone est exploitée à sa valeur F_{50} pour l'anguille quand le modèle de dépendance à la densité est « DD des civelles + Arg. + Mort. ».

SURMORTALITÉ

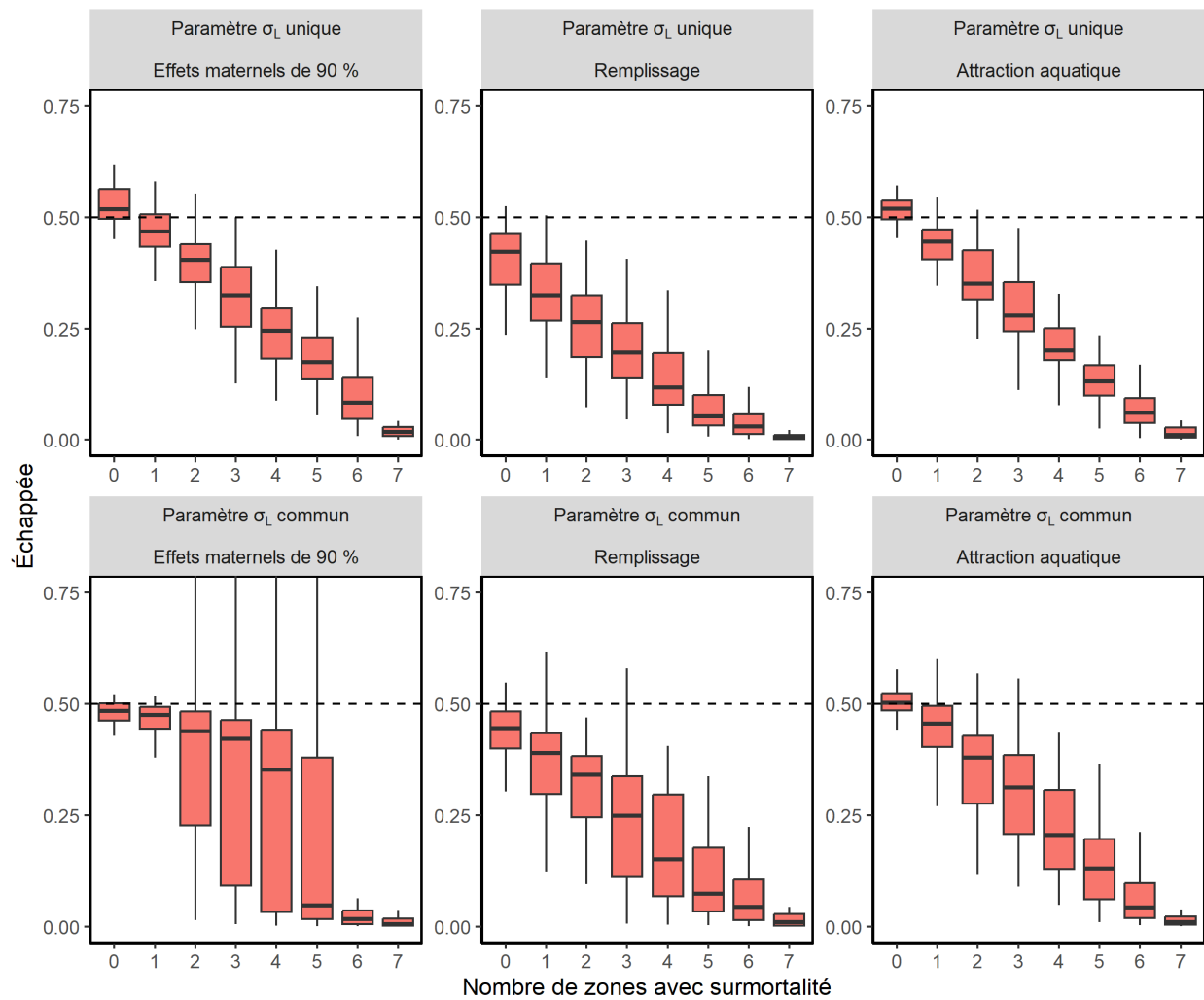


Figure S2.13. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle.

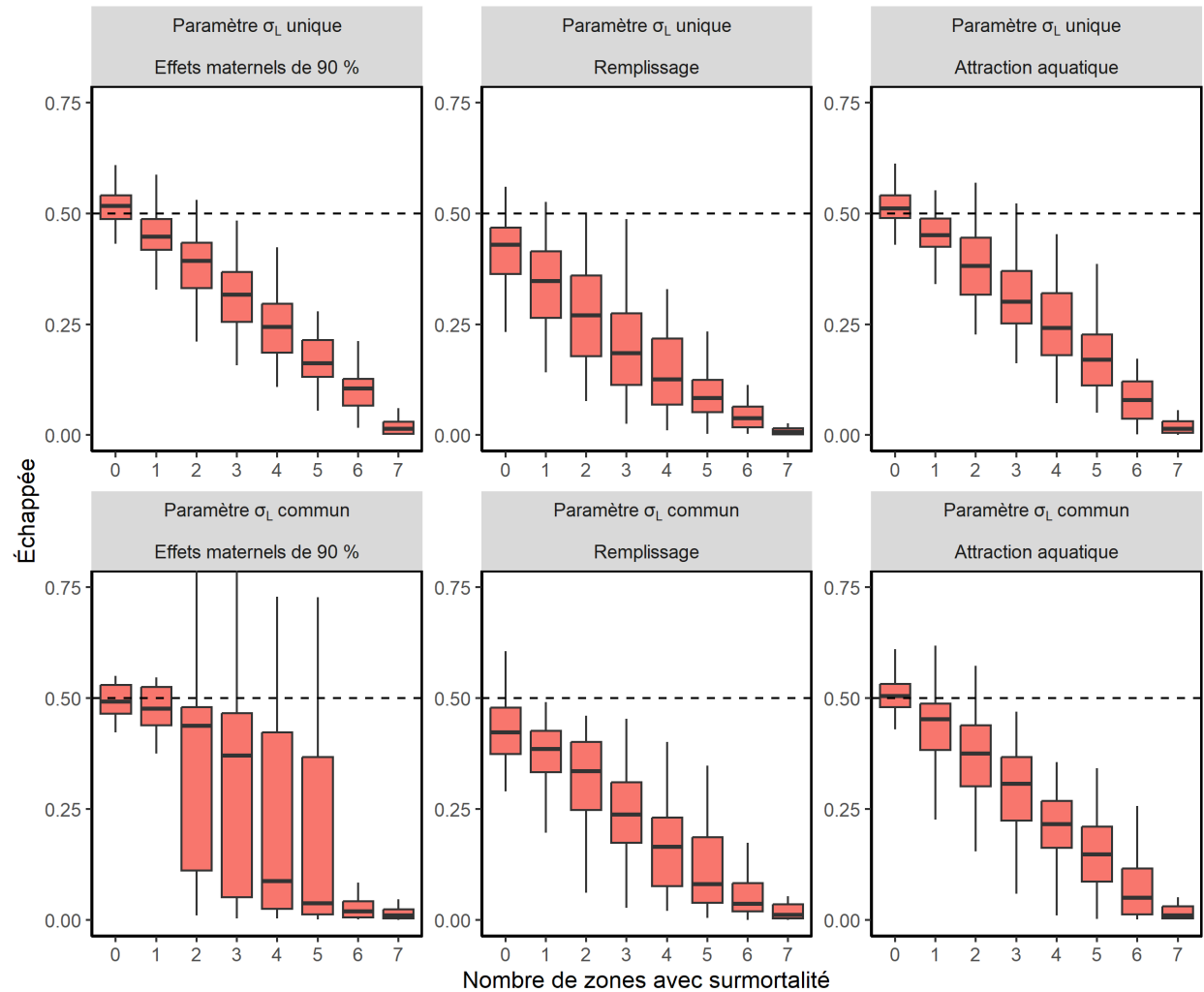


Figure S2.14. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche de la civelle.

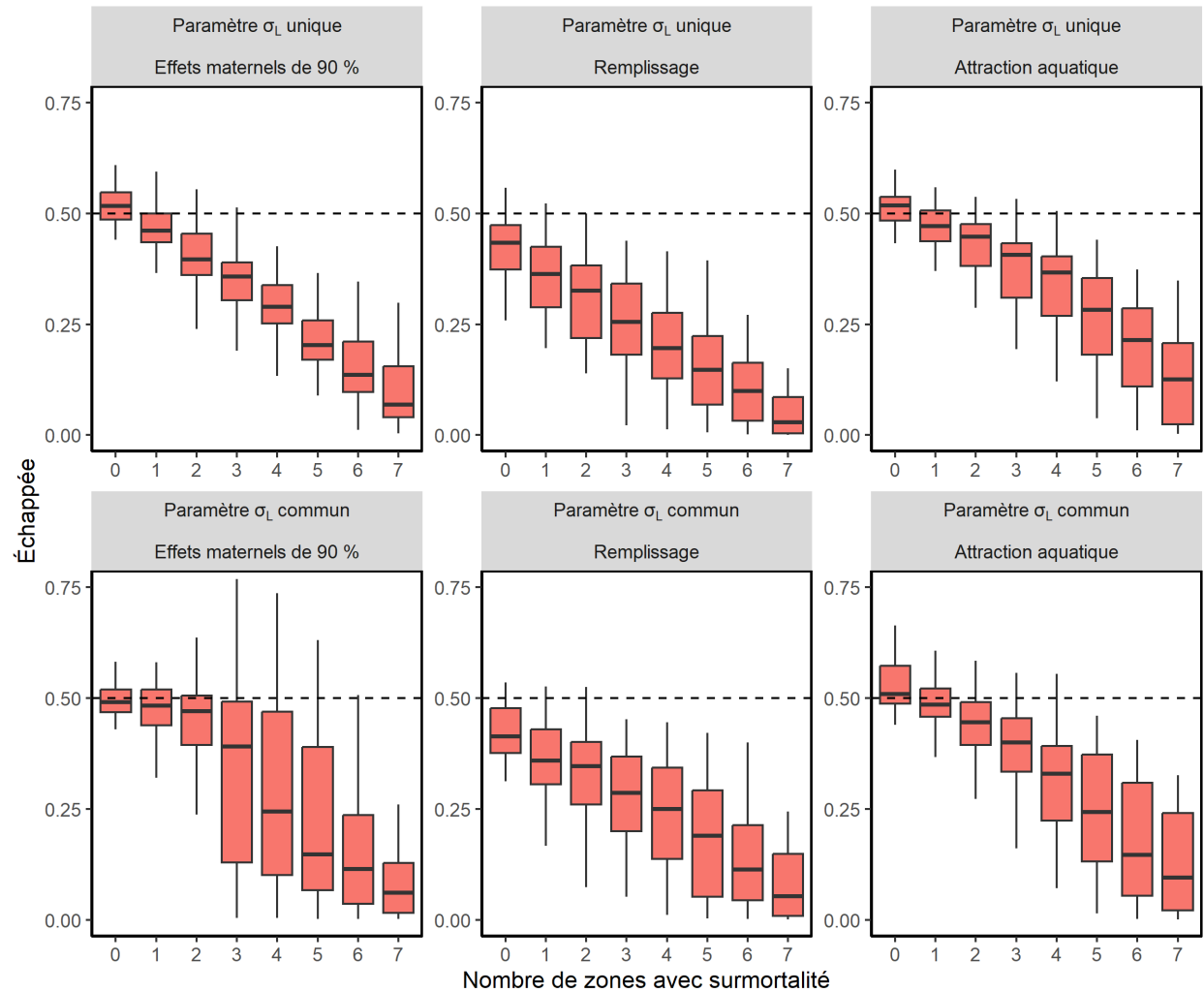


Figure S2.15. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle.

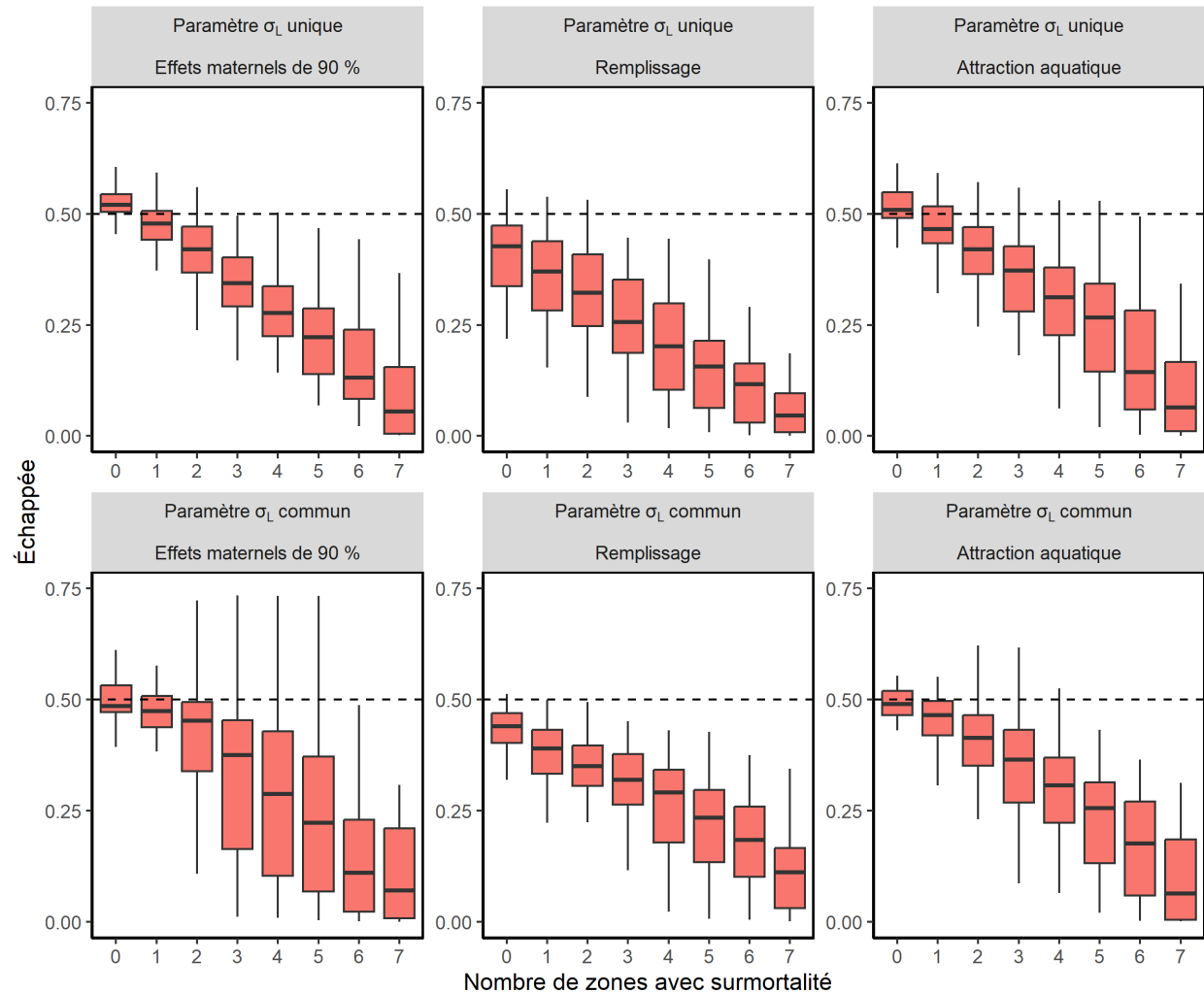


Figure S2.16. Effets de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche de la civelle.

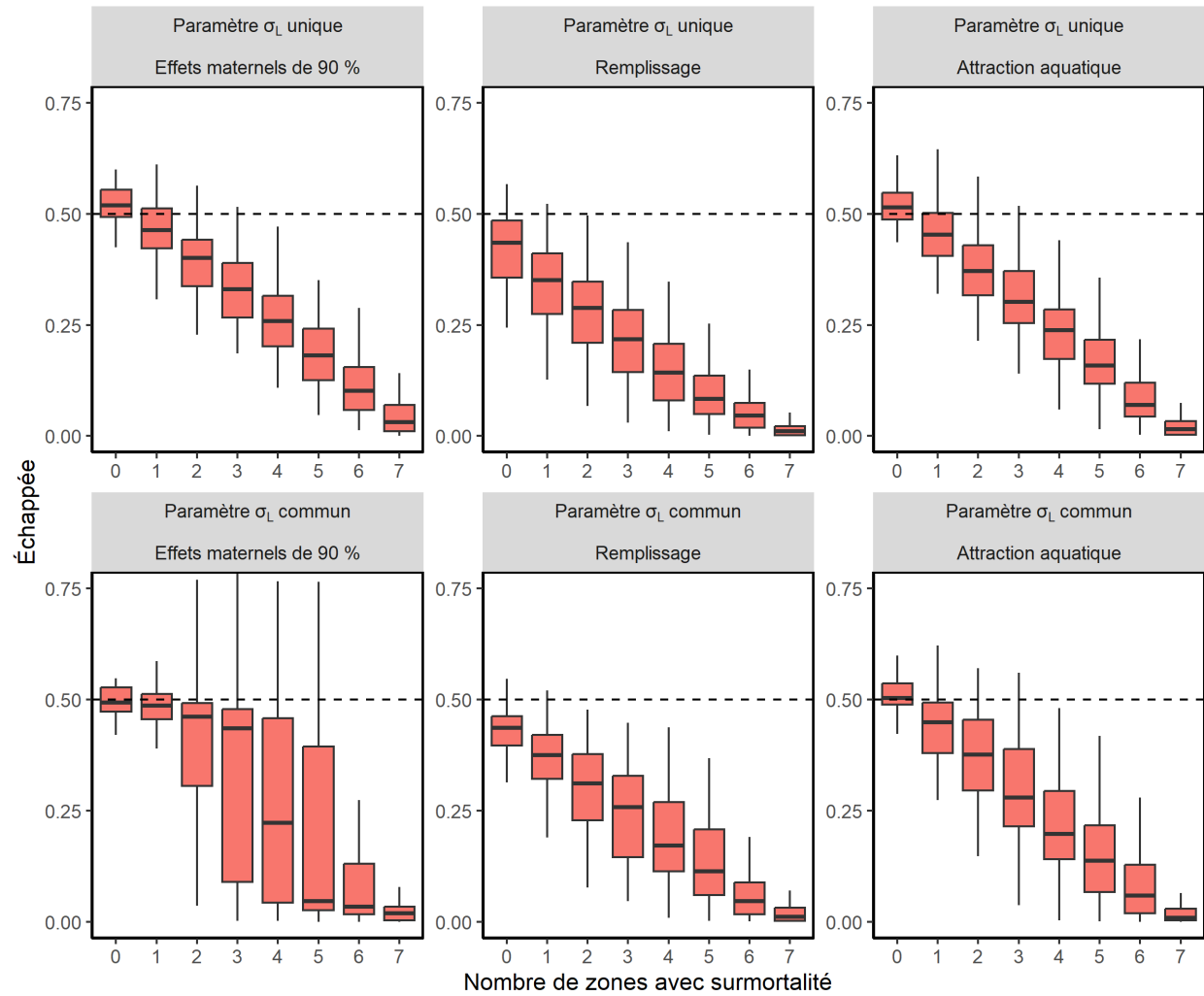


Figure S2.17. Effets de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ».

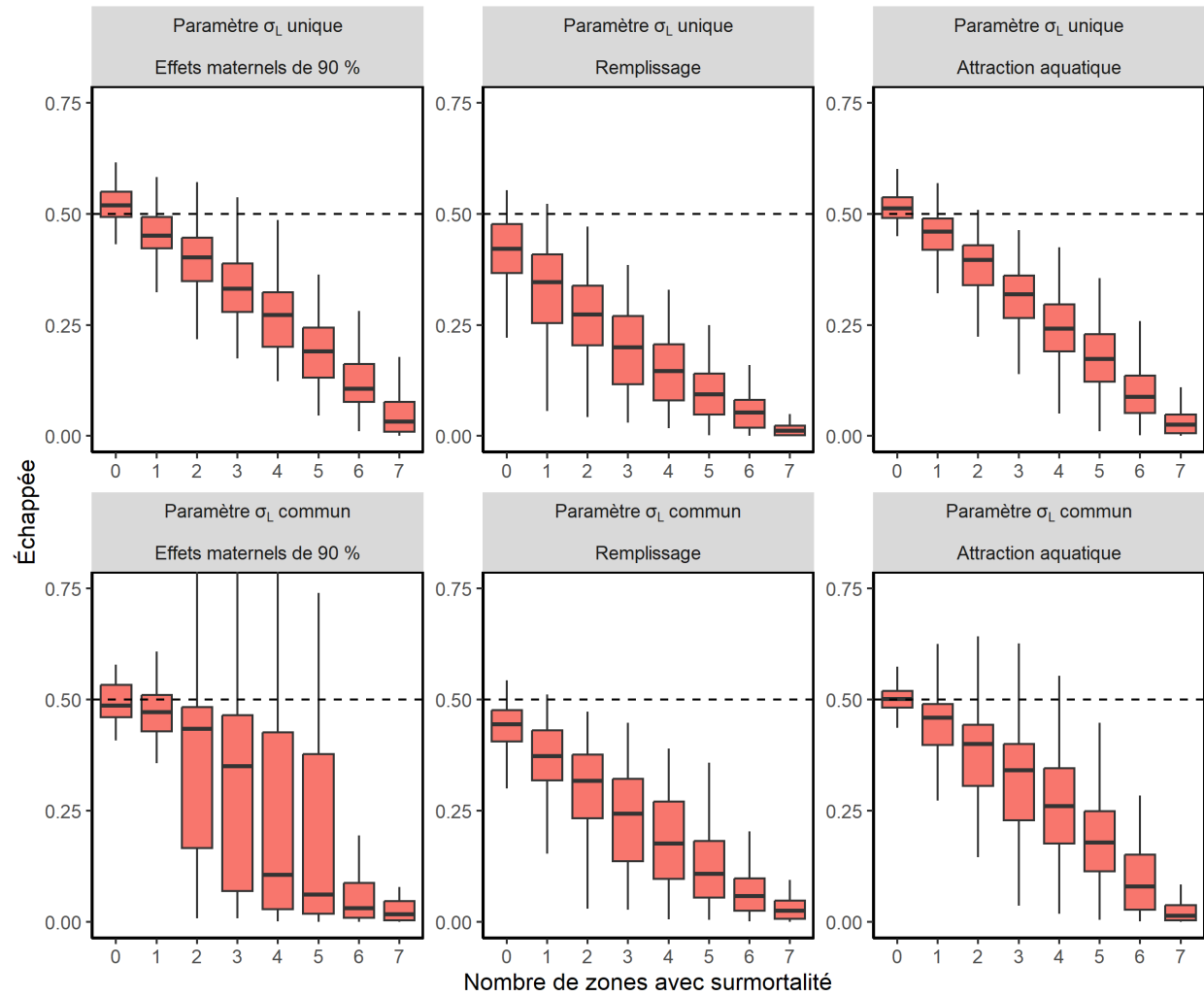


Figure S2.18. Effets de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée des zones de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ».

RÉTABLISSEMENT

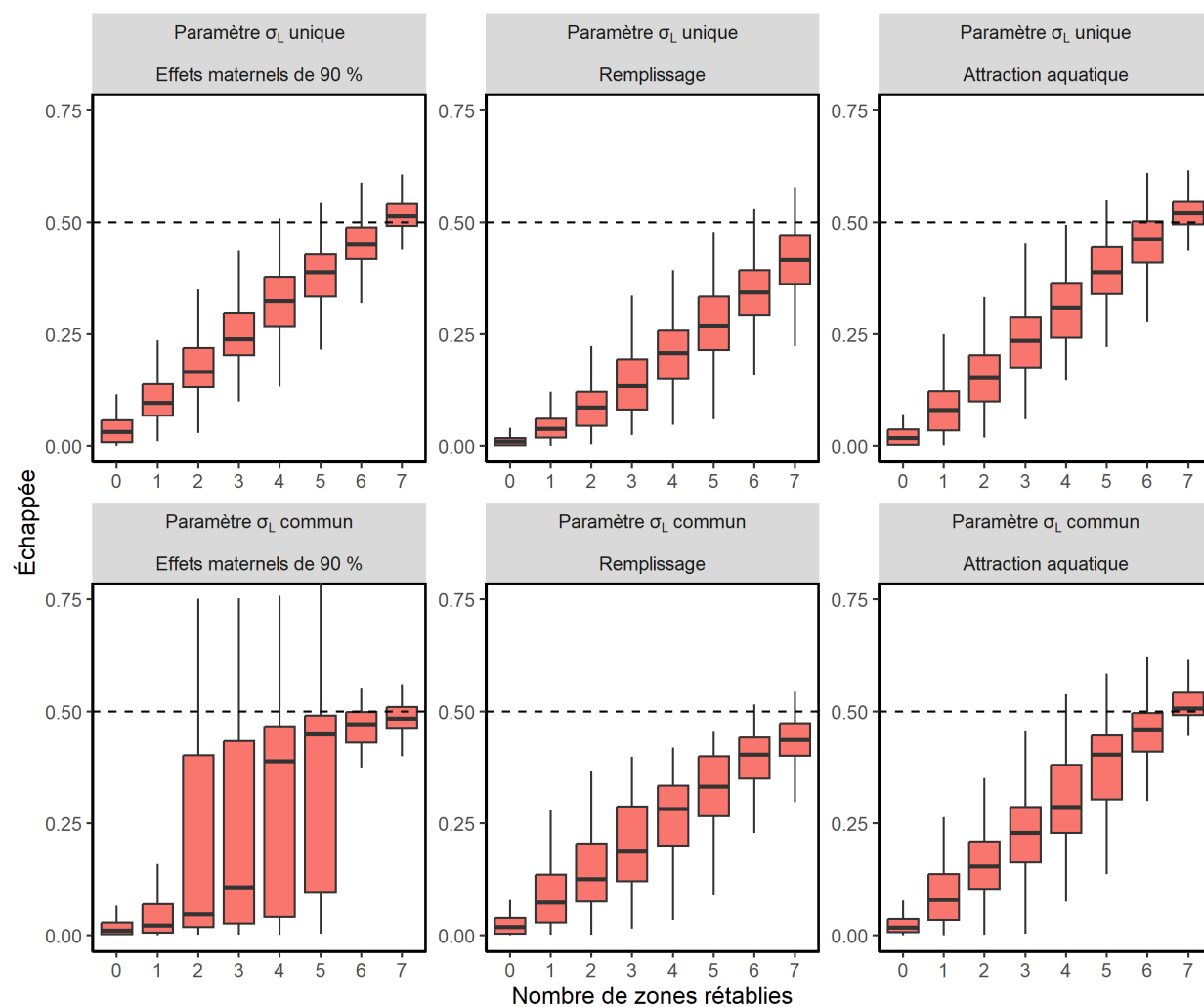


Figure S2.19. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche.

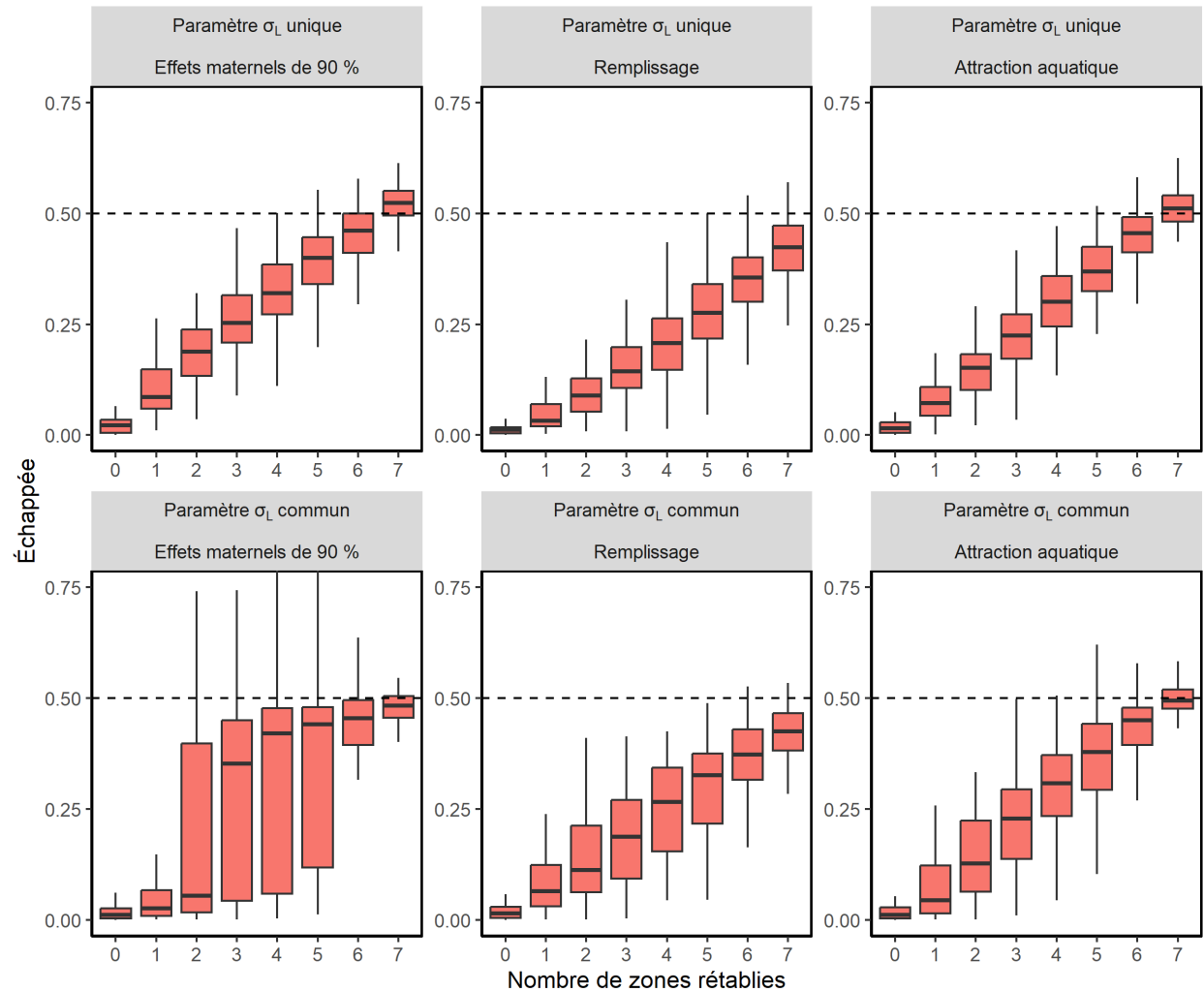


Figure S2.20. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit avant la pêche.

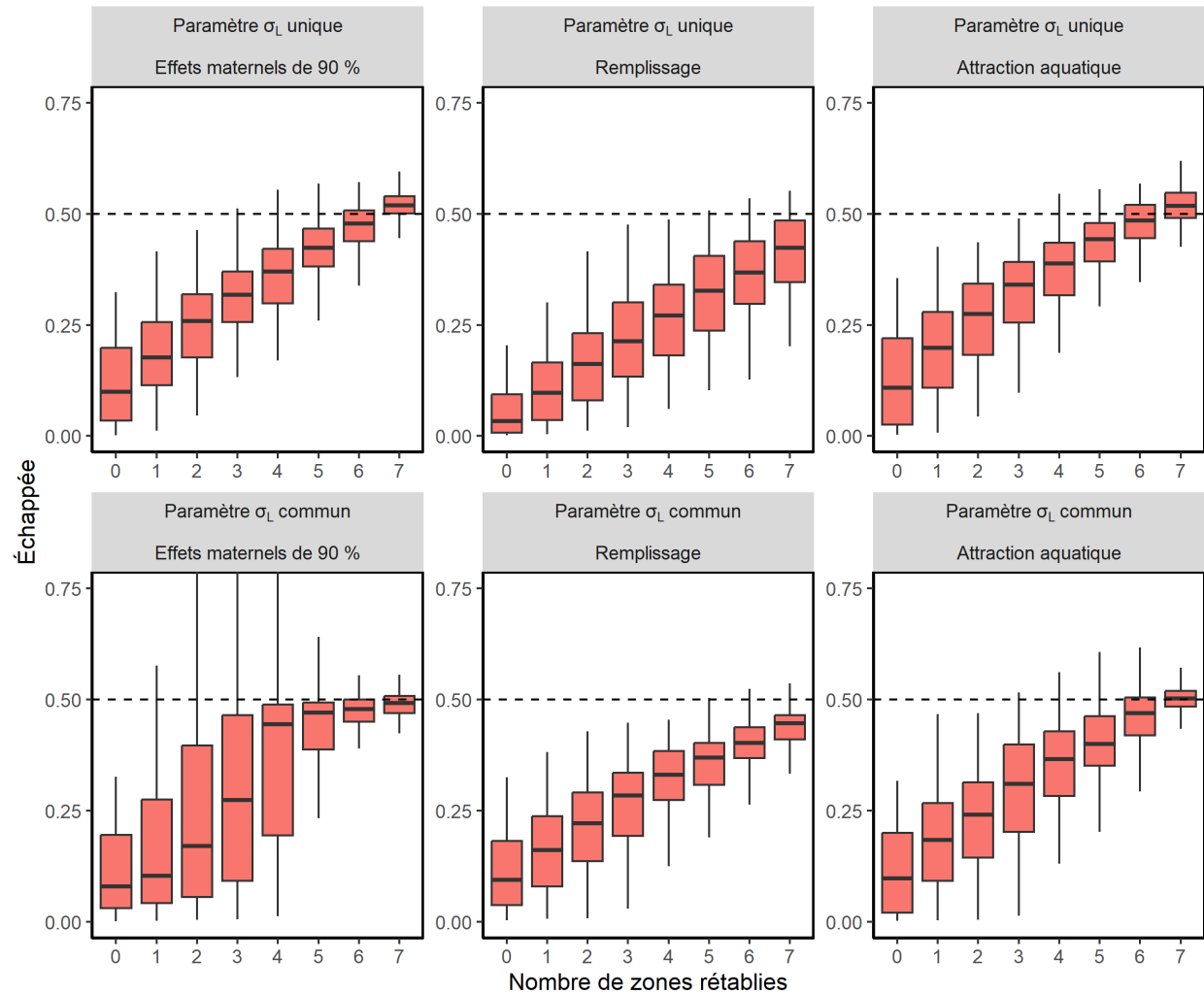


Figure S2.21. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche.

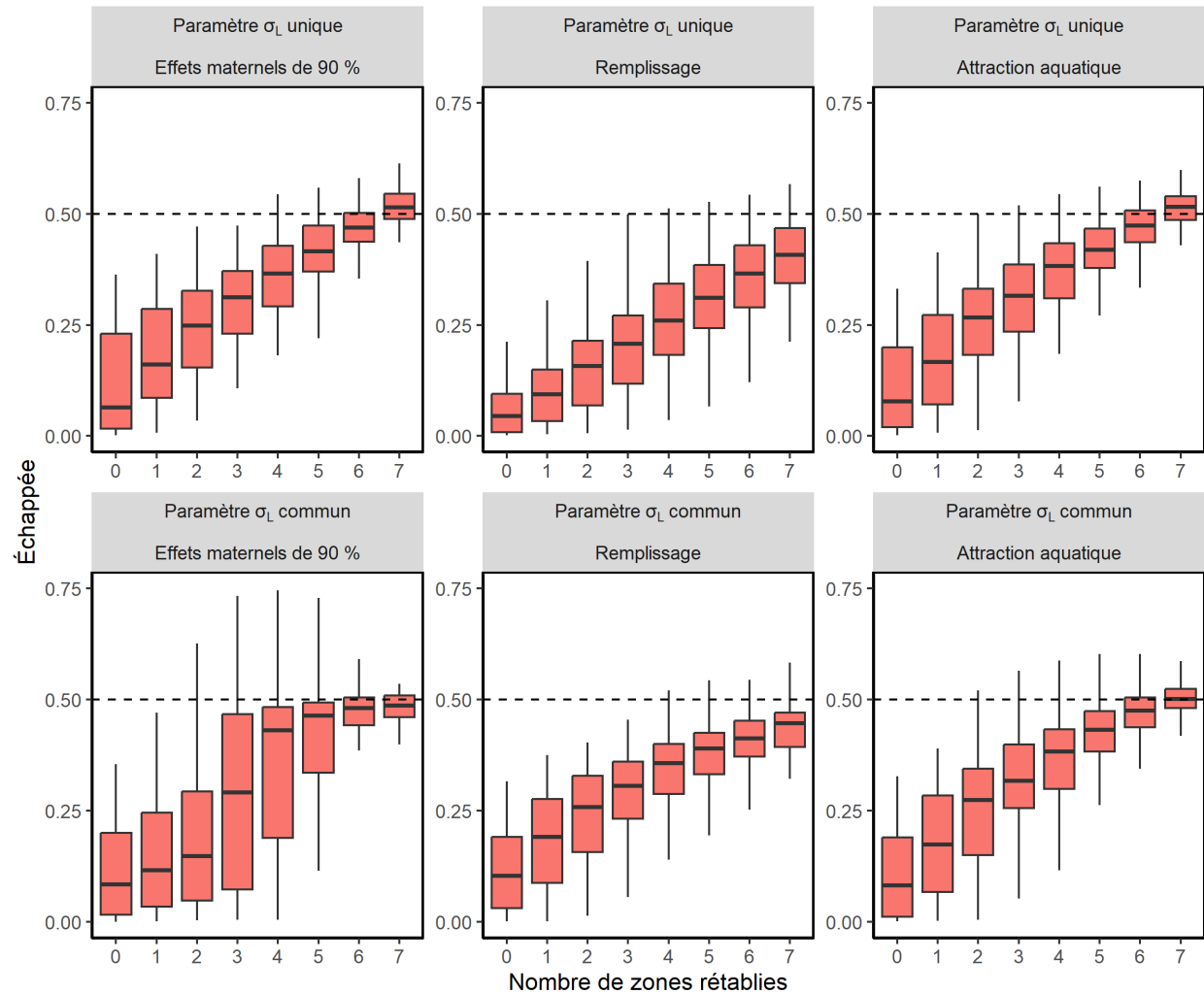


Figure S2.22. Effets de la réduction de la surmortalité au stade de civelle sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. ». Cette simulation suppose que la dépendance à la densité de la civelle se produit après la pêche.

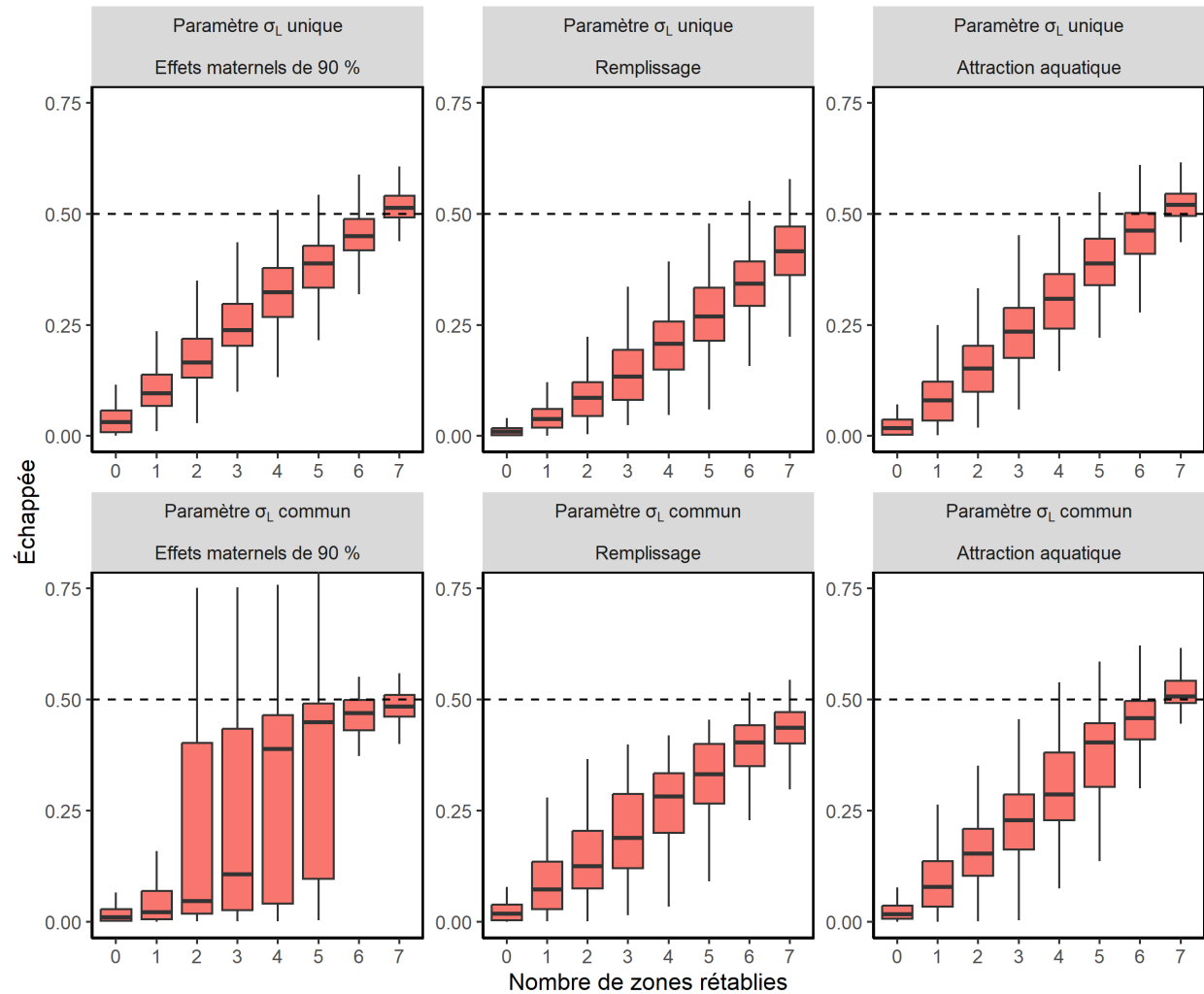


Figure S2.23. Effets de la réduction de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. ».

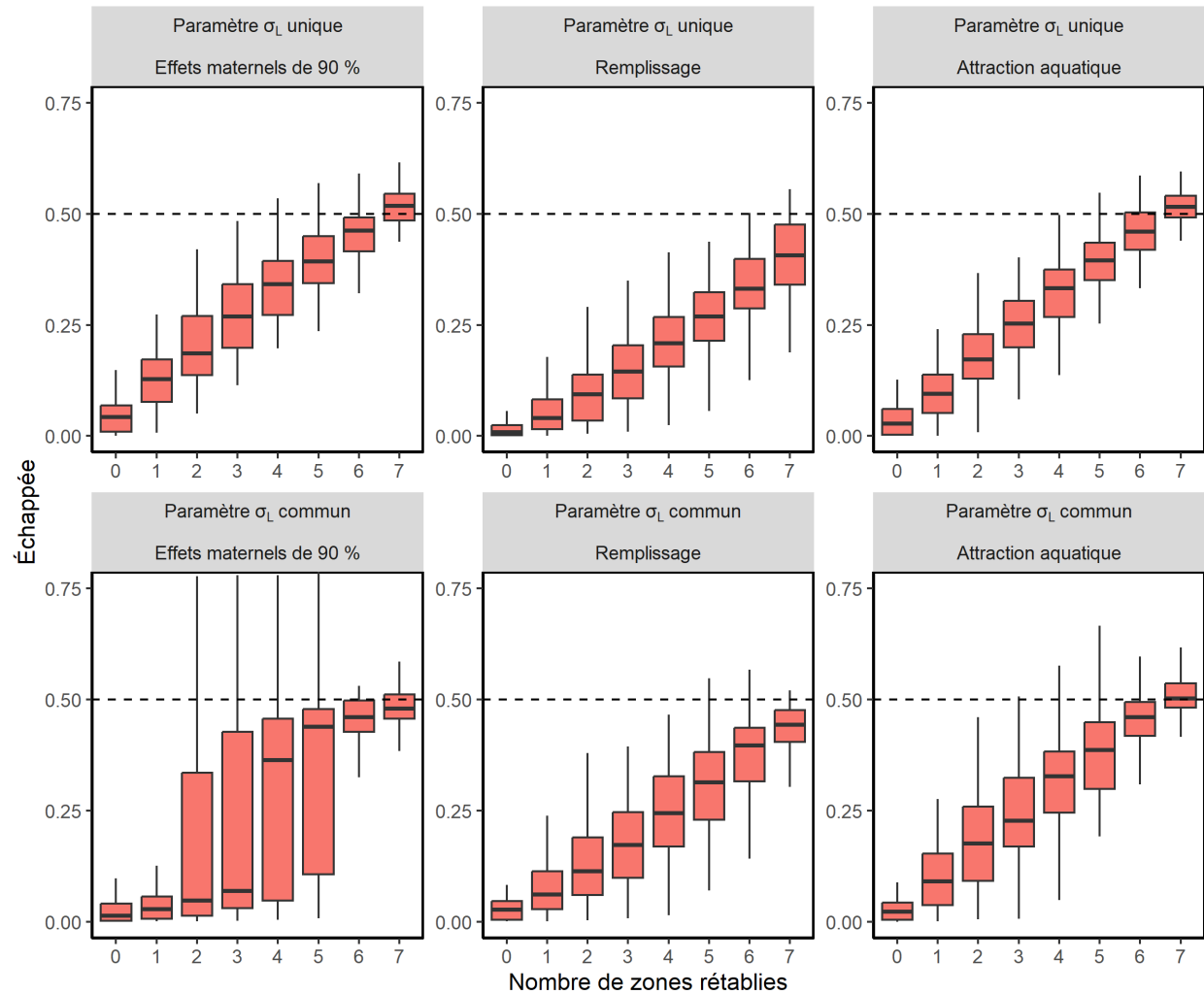


Figure S2.24. Effets de la réduction de la surmortalité au stade d'anguille sur les valeurs d'échappée de l'ensemble de la métapopulation pour différentes options de survie et de répartition des larves leptocéphales à l'aide du modèle de dépendance à la densité « DD des civelles + Arg. + Mort. »