

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Effet du transport ferroviaire sur la survie embryonnaire du saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Nipissis

Normand Bergeron, Roxanne Bérubé, Jérôme Simon, Francis Bérubé, Bernard Giroux



Remis à
Association de protection de la rivière Moisie
Fondation pour la Conservation du Saumon Atlantique



Référence à citer :

Bergeron NE, Bérubé R, Simon J, Bérubé F, Giroux B (2024) Effet du transport ferroviaire sur la survie embryonnaire du saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Nipissis, 19 avril 2024. Rapport de recherche. INRS, Eau Terre et Environnement, Québec. 26 pages.

Contexte

Contrairement à la population de saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Moisie qui est plutôt stable, celle de la rivière Nipissis est en décroissance importante depuis bon nombre d'années. Pourtant, ces deux rivières sont plutôt similaires d'un point de vue hydrogéomorphologique. À la différence de la Moisie, la rivière Nipissis est cependant longée sur ses 65 derniers kilomètres par la voie ferrée qui relie Sept-Îles à Schefferville (Figure 1). Or, cette voie ferrée est utilisée deux fois par jour par la compagnie minière IOC pour transporter le minerai vers Sept-Îles et ensuite ramener le train à Schefferville. On remarque qu'au fil des ans, la charge et la vitesse des trains s'est accrue considérablement et que le passage de ceux-ci engendre de très importantes vibrations du sol.

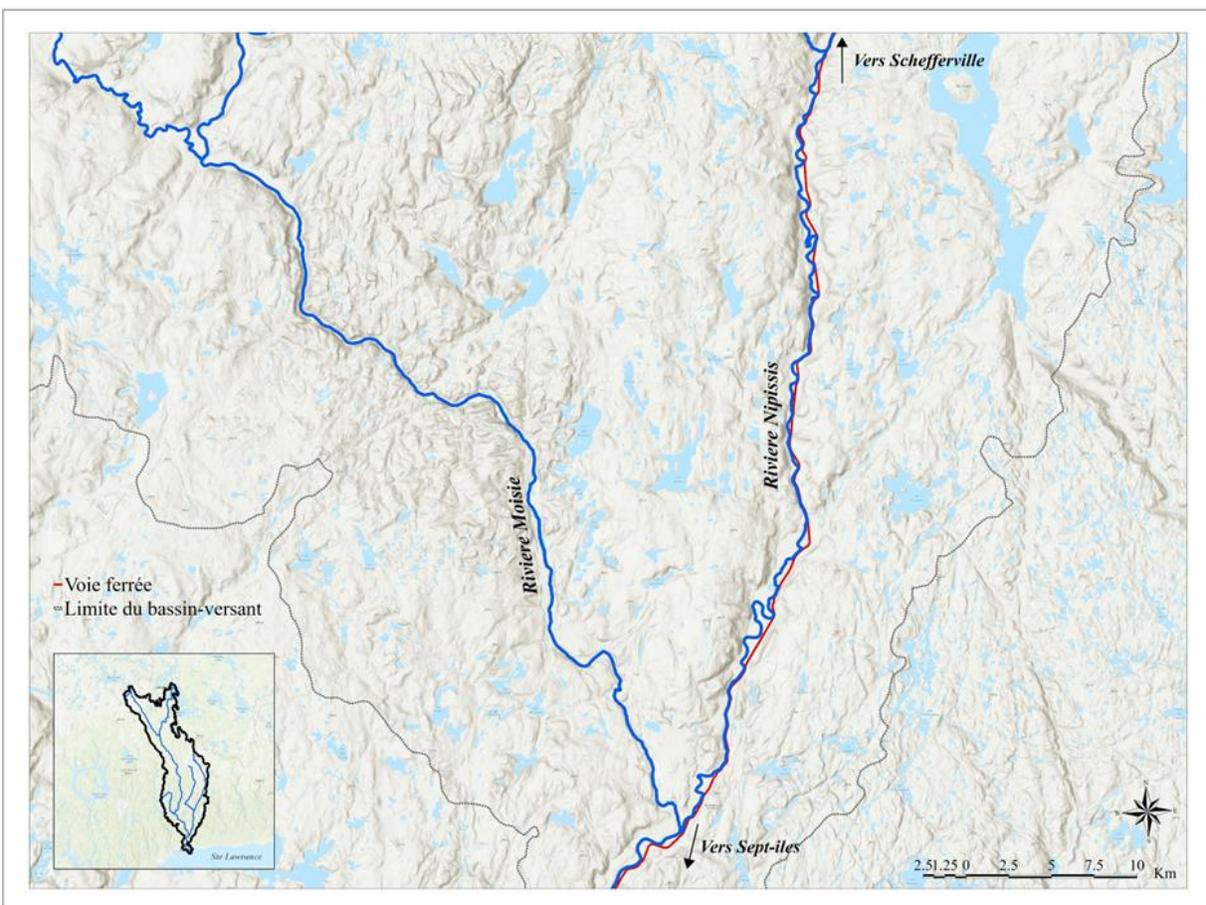


Figure 1. Carte de localisation de la rivière Nipissis et de la voie ferrée qui longe les derniers 65 km de la rivière avant que celle-ci se joigne à la rivière Moisie.

Il est connu depuis longtemps que les œufs de saumon sont fragiles pendant la période d'incubation, plus spécifiquement jusqu'à ce qu'ils atteignent le stade oeilé de leur développement embryonnaire (MAPAQ 1996) (Figure 2). Cette fragilité préoccupe les

gestionnaires de la rivière Nipissis qui s'interrogent sur l'effet potentiellement négatif des passages répétés de trains sur la survie des œufs de saumons le long des 65 km de rivière longés par la voie ferrée.

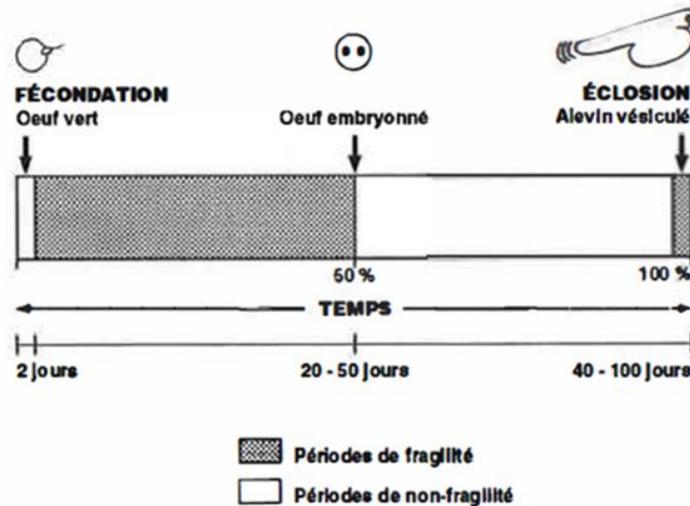


Figure 2. Périodes de fragilité des œufs de salmonidés pendant l'incubation selon les stades de développement (Tirée de MAPAQ 1996, Figure 15).

Cette préoccupation est légitime puisqu'il est depuis longtemps connus que les chocs mécaniques peuvent causer la mort des œufs de poissons ou entraîner des lésions susceptibles d'affecter leurs chances de survies (Battle 1944, Okada 1960). Les connaissances concernant ce phénomène proviennent presque entièrement de recherches portant sur l'effet potentiellement négatif de l'utilisation d'explosifs près de cours d'eau pendant la période d'incubation. Des explosifs sont couramment utilisés pour la réalisation de diverses activités, tel que l'exploration géophysique, l'exploitation des mines, la construction de barrages et autres développements de types industriels (Faulkner et al. 2008). Une explosion produit des ondes sismiques qui, lorsqu'elles se propagent, entraînent un changement soudain de la pression (suppression), mesuré en kPa, ainsi que la vibration des particules du sol, habituellement quantifié par une mesure de PPV (*peak particle velocity*) en mm/s (Faulkner et al. 2006). Bien que les changements soudains de pression soient principalement reconnus pour affecter les poissons juvéniles et adultes en causant une rupture de la vessie natatoire, ce sont les vibrations du sol qui sont les plus dommageables aux œufs en incubation (Wright 1982). Au Canada, le ministère des Pêches et Océan a produit des lignes directrices concernant les valeurs maximums permises de surpression (100 kPa) et de PPV (13 mm/s) afin de protéger les poissons et les œufs en incubation (Wright et Hopky 1988). Aux États-Unis, l'état de l'Alaska possède également des normes semblables mais avec des valeurs un peu plus permissives de 500 kPa pour la surpression et de 50 mm/s pour le PPV (Timothy 2013).

La valeur seuil de PPV de 13 mm/s du MPO reposant sur peu d'évidences scientifiques (Faulkner 2006), plusieurs études ont été réalisées afin de quantifier l'impact de différentes valeurs de PPV sur la mortalité des œufs de poissons à différents stades de développement. La méthode de la hauteur de chute (drop height) est celle qui a été le plus souvent utilisée (Faulkner 2006). Celle-ci consiste à exposer des petits groupes d'œufs à une série de chocs d'intensité variables en les laissant tomber depuis différentes hauteurs, à calculer la vitesse finale des œufs au moment de l'impact à partir de la hauteur de chute, et à déterminer les mortalités subséquentes. En utilisant cette méthode, Jensen (2003) a estimé qu'une exposition à une valeur de PPV de 140 mm/s engendre 10% de mortalité des œufs de saumon Chinook. Il en a donc conclu que la norme de 13 mm/s offre une marge de protection au moins 10 fois supérieure à ce qui est nécessaire. Faulkner (2006) a amélioré la technique de quantification des vibrations en utilisant un géophone pour mesurer directement l'ampleur et la variation temporelle des PPV lors de deux études, l'une sur le terrain et l'autre en laboratoire. Dans la première étude, des œufs de truite grise ont été déposés dans une frayère en bordure d'un lac pour être exposé à des explosions provenant de la mine Lac de Gras au Territoire du Nord-Ouest (Faulkner et al 2006). La plus forte explosion ayant eu lieu pendant l'incubation a généré un PPV de 28,5 mm/s, soit plus de deux fois la valeur de la ligne directrice, mais n'a causé aucune différence de mortalité par rapport au contrôle. Pour l'étude en laboratoire, Faulkner et al. (2008) ont développé un nouvel appareil permettant de mieux simuler les caractéristiques d'une explosion. Les auteurs ont soumis des œufs de truite arc-en-ciel à des PPV allant jusqu'à 245 mm/s et n'ont noté une augmentation de la mortalité des œufs que pour des valeurs de PPV supérieurs à 132 mm/s, concluant que le maximum permissible de 13 mm/s offre une bonne protection aux œufs en incubation.

Étonnamment, bien que les trains soient reconnus pour engendrer de fortes vibrations lors de leurs passages, leurs effets potentiels sur les œufs de poissons en incubation n'a encore jamais été analysé.

Objectifs

L'objectif principal du projet était donc de déterminer si le passage répété de trains le long de la rivière Nipissis est susceptible de causer une mortalité accrue des œufs de saumon déposés dans le lit de la rivière. Plus spécifiquement, le projet avait pour but de :

1. Quantifier les vibrations du lit de la rivière Nipissis causées par le passage des trains.
2. Quantifier grâce à une expérience de laboratoire l'effet d'une gamme de vibrations d'ampléurs différentes sur la survie des embryons de saumon atlantique
3. Formuler, s'il y a lieu, des recommandations de gestion permettant de limiter l'impact du passage des trains sur la survie des œufs de saumon.

Quantification des vibrations du sol liées au passage des trains le long de la rivière Nipissis

Méthodologie

L'ampleur des vibrations du lit de la rivière causées par le passage des trains a été mesurée *in situ* pour 3 sites localisés à différentes distances de la voie ferrée (Figure 2) ainsi que pour 70 passages de trains dont les données d'heures de passage, de vitesses de roulement et de charge (poids) ont été mesurés et fournis par la compagnie de transport IOC. Les sites d'enregistrement étaient situés en bordure de la rivière Nipissis, à l'exception du site 1, situé sur un banc d'alluvions dans la rivière à une trentaine de mètres de la rive Est. Les sites 1, 2 et 3 sont situés à respectivement 90 m, 540 m et 740 m de la voie ferrée. Les enregistrements aux différents sites ont été effectués de façon successive, sur une période de 7 jours. À chaque site, les vibrations ont été enregistrées en continu par 24 géophones disposés au sol perpendiculairement à la voie ferrée (Figure 3).

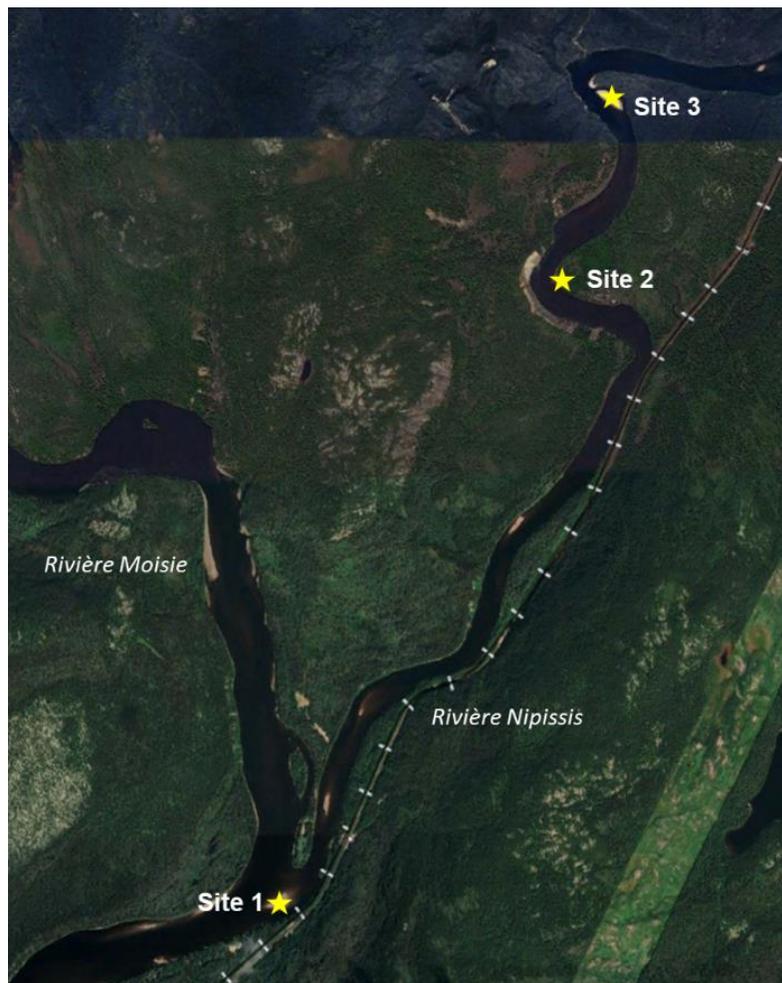


Figure 2. Localisation des sites de mesures des vibrations à l'aide des géophones.



Figure 3. Géophones utilisés pour l'enregistrement des vibrations du sol.

Résultats

Du 5 au 12 août 2019, 70 passages de trains ont été documentés (site 1, n= 21 ; site 2, n= 24 ; site 3, n=25). Ceux-ci avaient une charge moyenne de 9 582 050 kg (charge maximum 29 161 301 kg) et une vitesse moyenne de 38,2 km/h (vitesse maximum 63,1 km/h) lors du passage au site d'étude. L'annexe 1 présente les caractéristiques des passages individuels.

La figure 4 présente un exemple des valeurs de PPV enregistrées lors du passage d'un train au site 1 le 5 août 2019. Ce passage a donné lieu à une valeur de PPV maximum de 111 mm/s soit 8.5 fois supérieure à la valeur permise de 13 mm/s (ligne horizontale orange sur la figure) du MPO. Pendant le passage de ce train, les PPV ont excédé 13 mm/s pendant une période de 200 secondes consécutives.

Des 70 passages documentés, 50 (71,4 %) ont excédés la valeur de PPV permise pendant une durée totale de 9 805 secondes soit 163,4 minutes. La plus forte valeur de PPV enregistrée lors de l'étude a été de 265 mm/s (20 x supérieure à la limite de 13 mm/s) au site 1, le 6 août 2019 à 1h55 du matin par un train dont la charge était de 17 936 763 kg et qui se déplaçait à une vitesse de 48,3 km/h. Voir l'annexe 1 pour les valeurs associées à chacun des passages.

Site 1 – charge 8 410 466 kg – vitesse 51.3 km/h

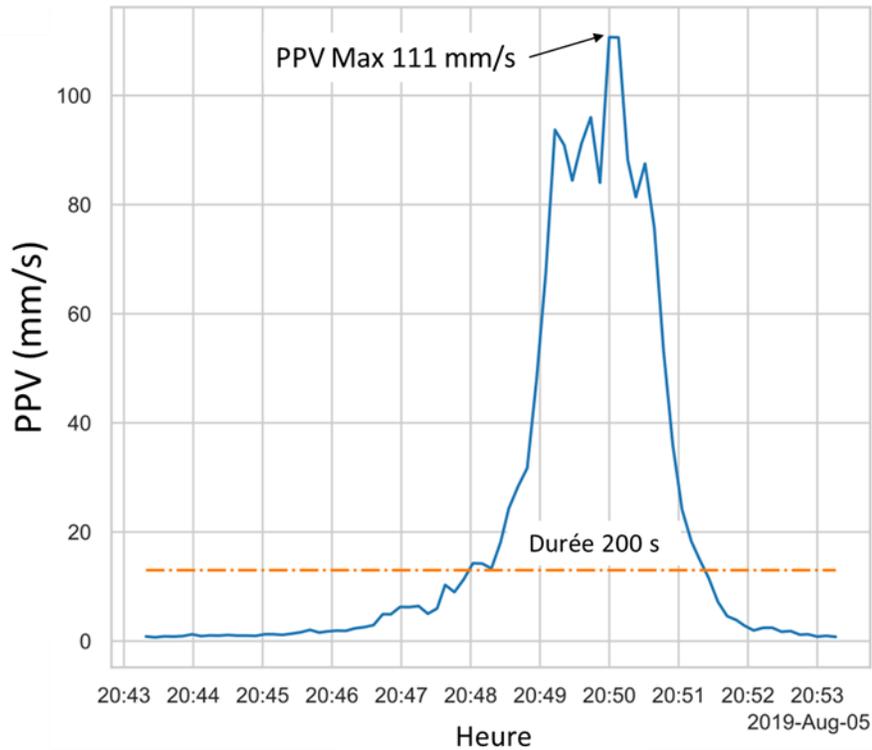


Figure 4. Exemple de variation temporelle de la vibration du sol lors du passage d'un train. La ligne pointillée orange correspond à la limite permmissible de 13 mm/s du MPO.

Le regroupement des passages par site indique que le site 1 est celui où les PPV Maximums enregistrés sont les plus élevés (moyenne 149,5 mm/s), comparativement à 48,7 mm/s au site 2 et 9,6 mm/s au site 3. Ce résultat semble indiquer un fort effet de la distance à la voie ferrée sur les valeurs de vibrations du sol.

Tableau 1. Caractéristiques moyennes des passages de trains et des vibrations enregistrées selon aux 3 sites d'étude.

Site	Trains (n)	Distance voie ferrée (m)	PPV Max moy (mm/s)	% Trains > 13 mm/s	Durée moy > 13 mm/s (sec)	Poids moy (kg)	Vitesse moy (km/h)
1	21	90	149,5	100	270	10 326 171	42,6
2	24	540	48,7	100	149	10 079 412	42,3
3	25	740	9,6	24	47	8 479 520	30,6

Modèle prédictif

Une analyse statistique de type Bayésienne a été utilisée afin de vérifier l'effet indépendant de la distance à la voie ferrée, de la charge du train et de la vitesse de déplacement sur l'ampleur des vibrations mesurées. Les résultats présentés à la figure 5 indiquent que les vibrations s'atténuent lorsque l'on s'éloigne de la voie ferrée et qu'augmenter la vitesse ou le poids du train a pour effet d'augmenter l'amplitude des vibrations, conformément à ce qui était attendu.

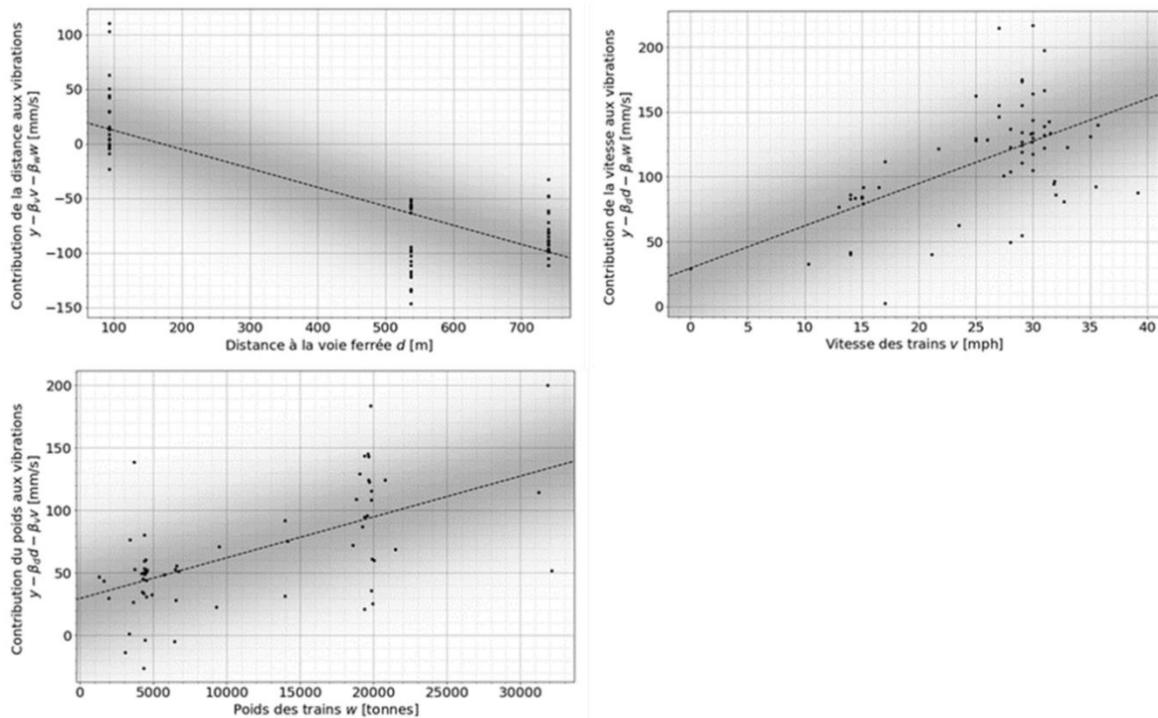


Figure 5. Estimation de la contribution de la distance à la voie ferrée, de la vitesse et du poids du train par inférence bayésienne.

Conclusions de la partie géophysique

L'analyse des vibrations du sol engendrées par le passage des trains indique qu'aux sites 1 et 2, les plus proches de la voie ferrée, tous les passages de trains ont généré des valeurs de PPV supérieures à la limite permise de 13 mm/s prescrite par le MPO dans le contexte du contrôle des effets d'explosifs sur la survie et la santé des œufs de poissons durant leur incubation. Il n'est pas clair que cette valeur limite est directement transposable à l'analyse de l'effet des vibrations liées au passage de train puisque ces derniers se produisent de façon récurrente, souvent plusieurs fois par jour, tandis que l'utilisation d'explosifs est généralement beaucoup plus sporadique. La plus forte valeur de PPV enregistrée pendant l'étude, d'une amplitude de 265 PPV, laisse cependant planer peu de doutes sur son effet possiblement nocif pour les œufs de saumons en incubation qui y seraient soumis. 40 des 70 (57%) passages ont généré une valeur maximum de PPV au moins deux fois supérieure à la norme du MPO.

Les résultats de l'analyse Bayésienne confirme que la vitesse de roulement et la charge des trains contribuent de façon indépendante à l'augmentation des vibrations du sol et que leur contrôle pourrait constituer un moyen efficace d'atténuer les effets négatifs sur la survie des œufs de saumon en fonction de la distance locale séparant la rivière à la voie ferrée.

Effets des vibrations ferroviaires sur la survie, le développement et le stress oxydatif des embryons de saumon atlantique

Méthodologie

Les œufs de saumon atlantique utilisés dans cette expérience ont été fournis par la Société Saumon de la Rivière Romaine et par le LARSA (Université Laval, QC, Canada). Les œufs ont été fécondés par des employés du LARSA (Université Laval, Canada) et immédiatement placés dans le système d'exposition, situé dans une pièce environnementale sombre à 4°C. Le système était composé de cinq bassins d'eau, chacun contenant cinq cylindres avec des sédiments reproduisant la distribution granulométrique d'un nid de saumon atlantique typique. Quatre bassins reposaient sur une plate-forme dont l'une des extrémités était équipée d'un appareil vibrant produisant des vibrations de magnitude différente pour chacun des quatre traitements (29, 64, 127, 525 mm/s). Un autre bassin reposant à côté de la plate-forme n'a pas été soumis aux vibrations et a donc servi de groupe de contrôle (Figure 6).



Figure 6. Dispositif expérimental, avec quatre bassins sur la plate-forme vibrante, avec un renouvellement constant de l'eau. Le groupe témoin n'apparaît pas sur l'image, il a été placé plus loin dans la pièce pour éviter les vibrations de l'appareil.

Les œufs ont été répartis de manière égale, par lot de 50 par cylindre et les vibrations ont été induites automatiquement deux fois par jour avec un intervalle de 12 heures. Après 280 degrés-jours de développement, lorsque les œufs ont atteint le stade oëillé, ils ont été délicatement retirés des cylindres, les œufs morts ont été comptés et jetés, les œufs vivants ont été comptés et la moitié a été conservée pour l'imagerie, les autres ont été immédiatement placés dans de l'azote liquide, puis conservés à -80 °C pour des analyses ultérieures.

Imagerie, mesures et indice de condition

Le jour de la collecte, les œufs ont été délicatement déchorionnés et photographiés un par un (stéréomicroscope Zeiss discovery V8, logiciel Zen 2.3). Les images ont ensuite été utilisées pour mesurer la longueur et la hauteur de la tête, de l'œil et du cristallin des embryons, afin d'observer la progression du développement (Gorodilov 1996). Chaque mesure a été effectuée sur au moins trois œufs par cylindre pour un total de 15 par traitement. Les malformations, telles que les hémorragies, l'œdème du sac vitellin et la déviation du squelette, ont été dénombrées dans chaque traitement et présentées sous forme de pourcentages, et pour chaque traitement, les pourcentages de poissons normaux et malformés ont été dénombrés. L'indice de condition a été calculé pour chaque traitement en attribuant un chiffre de 1 à 3 à chaque poisson ; 1 correspondait aux poissons ayant les meilleures chances de survie sans malformations ou avec des malformations mineures qui n'affecteraient pas la survie ; 2 correspondait aux poissons avec des malformations qui pourraient avoir un impact sur la survie mais qui ne tueraient pas nécessairement le poisson et 3 correspondait aux poissons avec des malformations importantes qui n'auraient presque aucune chance de survie.

Activité enzymatique antioxydante

L'activité de deux enzymes a été mesurée, la superoxyde dismutase (SOD) et la catalase (CAT), à l'aide de kits de dosage de Cayman Chemicals (Ann Arbor, Michigan, États-Unis). Les embryons congelés ont été pesés individuellement puis placés dans un tube d'homogénéisation, où le chorion a été percé pour faciliter l'homogénéisation. Ensuite, 3 billes d'acier inoxydable et un tampon d'homogénéisation glacé ont été ajoutés. Les embryons ont été homogénéisés avec le BeadBug™ 6 pendant 45 sec, deux fois avec 10 sec de pause entre les deux à 4000 rpm. L'homogénat a été divisé en deux fractions égales avant centrifugation (SOD : 1500 g, 5 min ; CAT : 10 000 g, 15 min, à 4 °C). Les surnageants ont été prélevés et conservés à -80 °C jusqu'à l'analyse. La quantification des activités enzymatiques a été réalisée en suivant les instructions du fabricant (SOD n° 706002, CAT n° 707002). L'activité totale a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre (Varian Cary 100 ; Varian Inc., Palo Alto, CA). L'activité enzymatique a été normalisée avec la concentration en protéines de l'échantillon, mesurée avec le test de Bradford (Pierce™ Coomassie Plus Assay Kit, ThermoFisher).

Analyses statistiques

L'analyse statistique et les figures ont été réalisées avec le logiciel R (V 4.0.0). Les différences entre le traitement et le contrôle ont été évaluées à l'aide de l'ANOVA et du test posthoc de

Tukey ou de l'équivalent non paramétrique, Kruskal-Wallis, et du test de Dunn. Les données sont présentées sous forme de boxplot (quartiles) ou d'histogramme.

Résultats et discussions

Mortalité

La mortalité a été évaluée à la fin de l'expérience lorsque tous les embryons avaient atteint le oeillé (Figure 7). L'analyse statistique a montré que les trois vibrations les plus fortes (64, 127 et 525 mm/s) induisaient un taux de mortalité plus élevé que le groupe témoin ($p = 0,014$, $p = 0,005$ et $p = 0,001$, respectivement). Les deux traitements aux vibrations les plus faibles n'ont pas entraîné un taux de mortalité significativement différent de celui du groupe témoin.

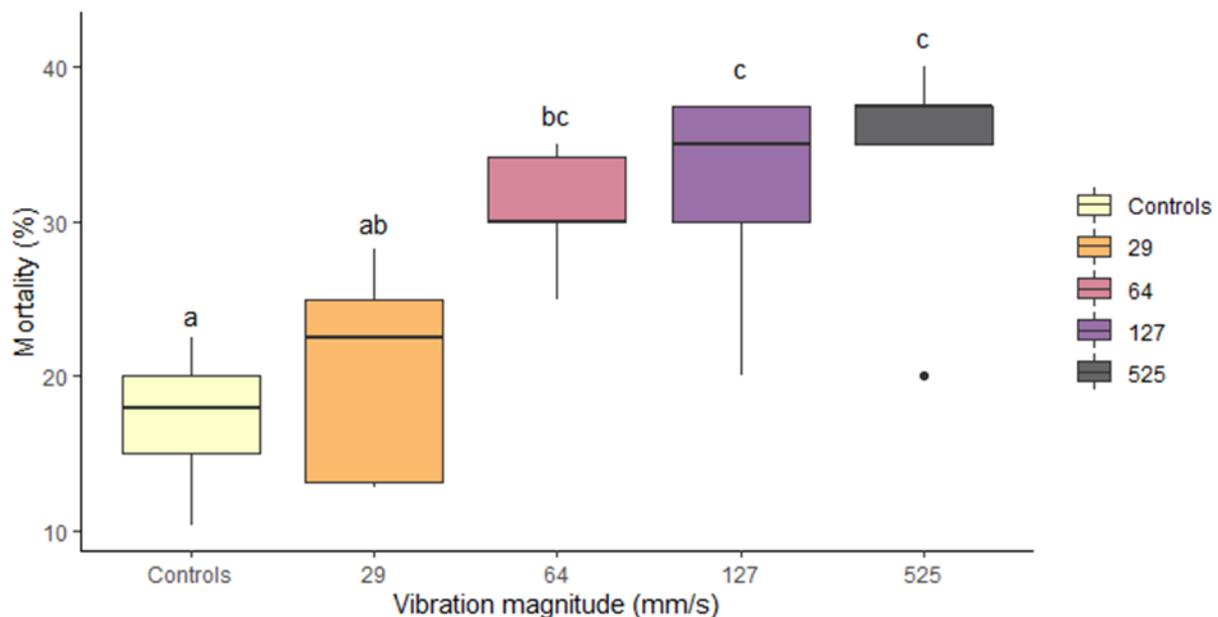


Figure 7. Pourcentage de mortalité des embryons de saumon atlantique exposés à 5 magnitudes de vibrations (mm/s) imitant les vibrations du train. Les différences significatives entre chaque traitement et le groupe témoin ont été identifiées par une analyse de Kruskal-Wallis et une analyse de Dunn (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,001$; *** $p \leq 0,0001$).

Croissance et développement

Les mesures de la tête, de l'œil et du cristallin ont été obtenues et comparées entre chaque traitement (Figure 8 et Figure S2 à l'annexe 2). La tête et les yeux s'allongent au cours du développement du poisson, au fur et à mesure que l'embryon grandit (Gorodilov 1996). Nos résultats montrent que la hauteur de la tête n'a pas changé, mais que la tête était plus longue après l'exposition à une magnitude de vibration de 64 mm/s, par rapport à tous les autres groupes. En ce qui concerne les mesures des yeux, la longueur et la hauteur semblaient augmenter pour les traitements avec une magnitude de vibration de 29 et 64 mm/s, puis

diminuer pour les traitements avec une magnitude de 127 et 525 mm/s. Cependant, aucun traitement n'a induit de changement dans les mesures de l'œil qui soit différent des contrôles. La hauteur des yeux des embryons du groupe de traitement de 29 mm/s était plus grande que celle du groupe de traitement de 525 mm/s et la longueur des yeux des groupes de traitement de 29 et 64 mm/s était plus grande que celle du traitement le plus élevé, qui avait la plus petite taille d'œil dans l'ensemble (longueur et hauteur). Enfin, aucune différence n'a été observée entre les traitements en ce qui concerne la longueur de la lentille. La hauteur du cristallin était plus importante chez les embryons du groupe de traitement de 29 mm/s que chez ceux du groupe de contrôle.

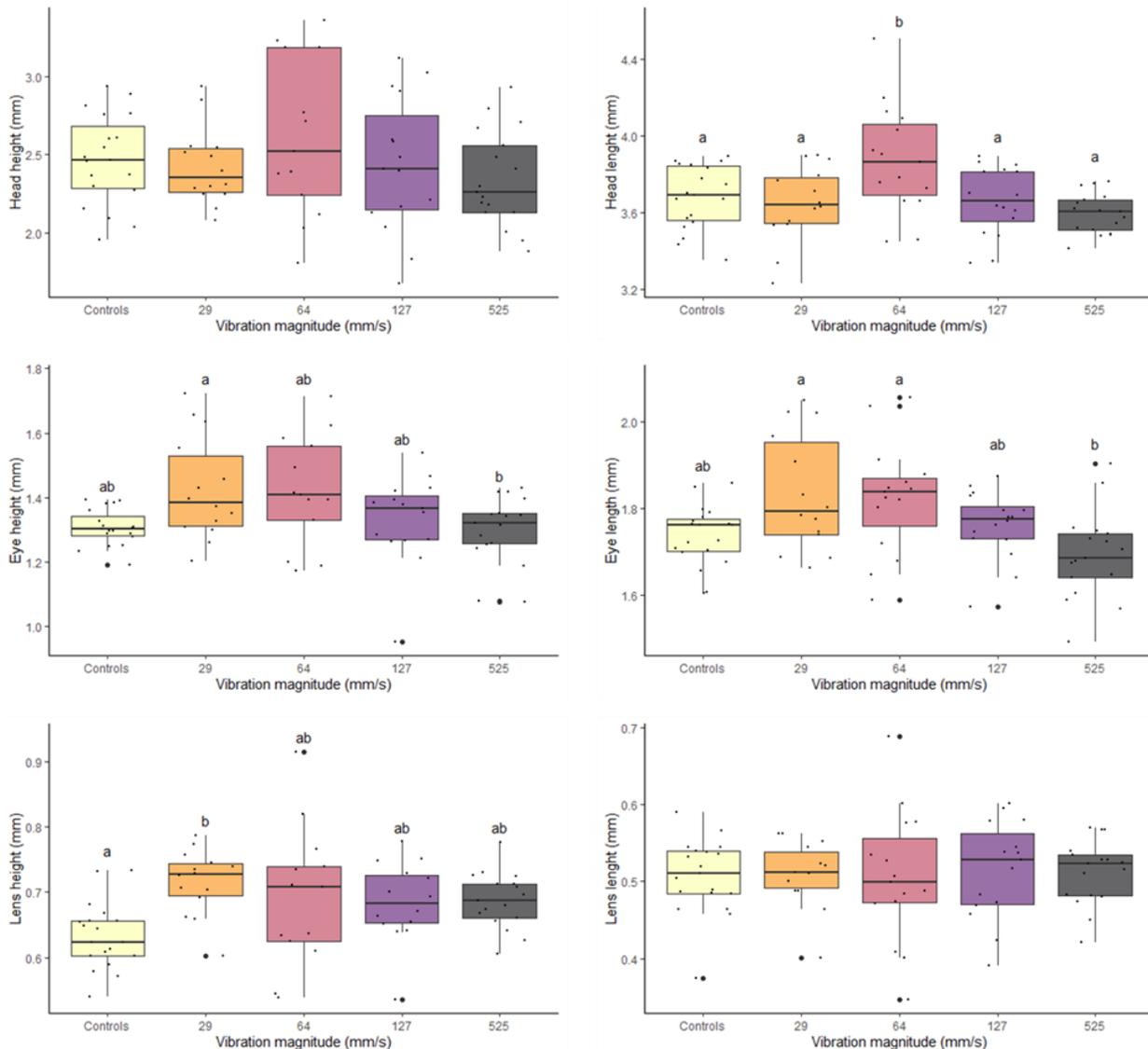


Figure 8. Mesures de la longueur (colonne de gauche) et de la hauteur (colonne de droite) de la tête (A), de l'œil (B) et du cristallin (C) des embryons à 280 degrés-jours.

Effets physiologiques

Pour chaque traitement, les hémorragies, les œdèmes et les malformations du squelette ont été comptés pour chaque embryon (Figure 9 et Figure S1 à l'annexe 2). Il est intéressant de noter que les deux traitements vibratoires les plus forts (127 et 525 mm/s) ont induit un pourcentage égal d'embryons malformés par rapport au groupe témoin (environ 40 %), tandis que les deux traitements vibratoires les plus faibles (29 et 64 mm/s) ont induit le plus grand nombre de malformations chez les embryons, avec 65 % et 68 %, respectivement. Les hémorragies dans les embryons ont été observées principalement dans la tête, autour de l'œil et dans le sac vitellin. Le groupe exposé à des vibrations de 64 mm/s a présenté le plus grand nombre d'embryons hémorragiques et le groupe exposé à des vibrations de 29 mm/s a présenté le plus petit nombre d'embryons hémorragiques. Des œdèmes ont été observés dans le groupe témoin, dans le groupe témoin et dans les traitements avec des vibrations de 64 et 525 mm/s, le groupe témoin en contenant le moins et les deux traitements en contenant une quantité équivalente. Enfin, les malformations du squelette étaient présentes dans chaque traitement sauf le plus élevé, avec le plus de vibrations à 29 mm/s et le moins de vibrations à 127 mm/s.

Un indice de condition a été attribué aux poissons en fonction de la gravité des malformations, 1 étant les malformations les moins nocives et 3 les malformations les plus graves avec un risque élevé de mort des embryons. Dans le groupe de contrôle, les poissons traités à 127 et 525 mm/s ont tous été classés avec un indice de condition de 1,6 à 1,5, tandis que pour le traitement à 29 et 64 mm/s, l'indice de condition obtenu était d'environ 2. Dans l'ensemble, l'analyse des malformations peut suggérer que les vibrations de 29 et 64 mm/s sont les plus nocives pour les embryons de saumon. Cependant, les résultats de la mortalité ont montré que la mortalité était la plus élevée dans les trois magnitudes de vibration les plus élevées (64, 127 et 525 mm/s). Il est très probable que les embryons présentant les malformations les plus dommageables sont morts dans ces traitements. Les poissons survivants présentaient le moins de malformations et étaient globalement plus résistants. Par conséquent, les embryons survivants dans les traitements avec des magnitudes de vibration de 29 et 64 mm/s ont développé plus de malformations, mais ces malformations étaient moins létales que celles induites par les deux traitements à haute vibration.

Activité des enzymes antioxydantes

Les activités de la superoxyde dismutase (SOD) et de la catalase (CAT) sont présentées pour chaque traitement dans les figures 10 et 11. L'analyse ANOVA et le test post hoc ont montré que l'activité CAT n'a pas changé de manière significative entre les traitements, mais que l'activité SOD était significativement plus faible pour les traitements avec une magnitude de vibration de 127 et 525 mm/s par rapport au groupe témoin. Une telle diminution de l'activité SOD peut suggérer une diminution de l'activité métabolique, qui peut être nécessaire lorsque les organismes sont soumis à un stress entraînant des dommages à l'ADN. Le cycle cellulaire s'arrête pour permettre aux mécanismes de réparation de l'ADN de fonctionner, ce qui ralentit la division

cellulaire, mais empêche l'accumulation de mutations de l'ADN ou d'autres types de dommages cellulaires (Pucci et al. 2000).

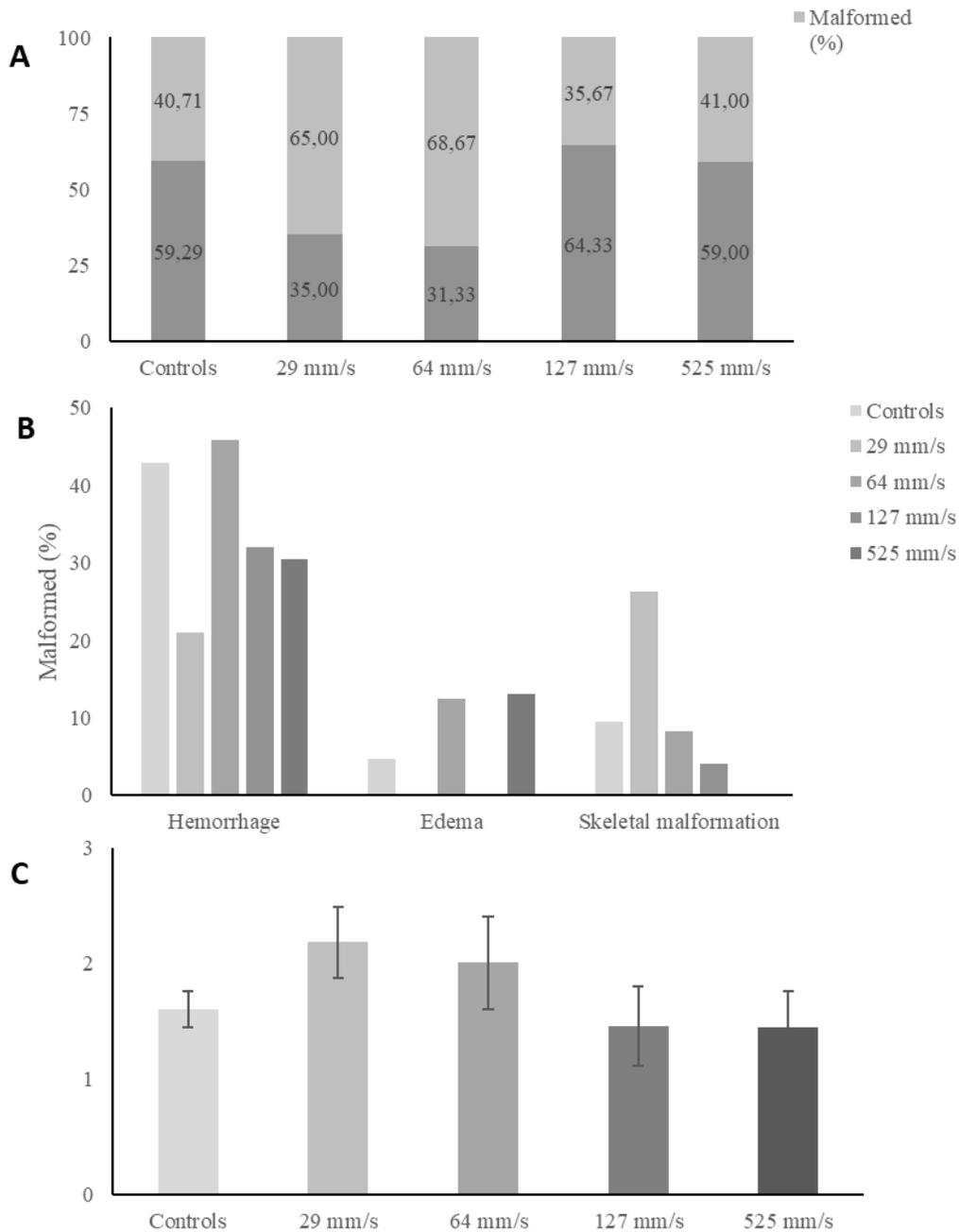


Figure 9. État physiologique des embryons exposés aux vibrations des trains pendant leur développement observé par le pourcentage de poissons normaux et malformés (A), le type de malformations observées (B) et l'indice de condition (C).

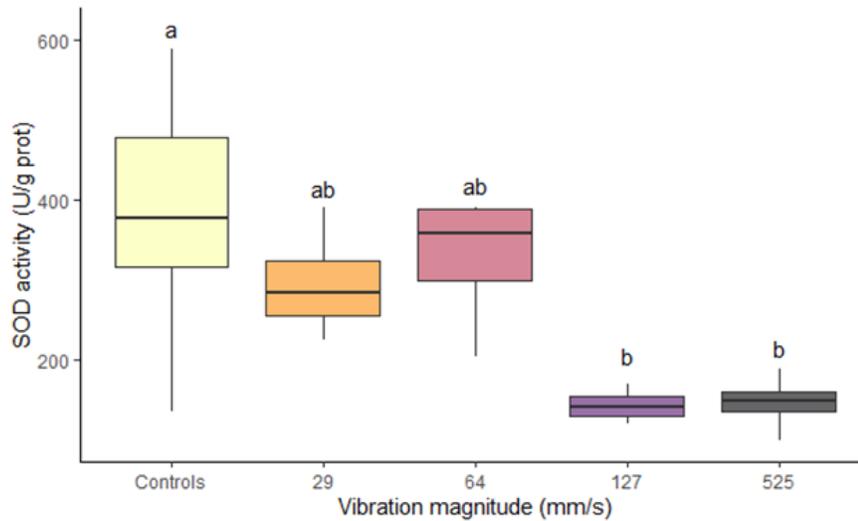


Figure 10. Activité enzymatique de la superoxyde dismutase (U/g) en fonction de l'amplitude des vibrations. Les données sont présentées sous forme de moyennes \pm SEM avec une ligne de régression, si elle est statistiquement significative ($p = 0,05$).

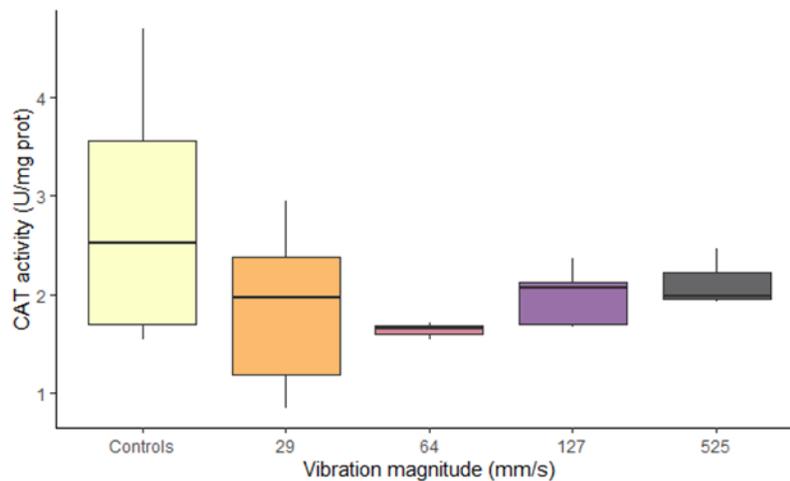


Figure 11. Activité enzymatique de la catalase dismutase (U/g) en fonction de l'amplitude de la vibration. Les données sont présentées sous forme de moyennes \pm SEM avec une ligne de régression, si elle est statistiquement significative ($p = 0,05$).

Conclusions de la partie biologique

Les embryons de saumon atlantique exposés à cinq intensités d'exposition chronique à de faibles vibrations ont connu une augmentation de la mortalité pour les deux traitements les plus forts. Une réduction de la taille des yeux des embryons a été observée entre le traitement le plus faible et le traitement le plus fort, mais les deux traitements n'ont pas montré de différence significative de taille par rapport au groupe de contrôle. Des malformations ont été observées dans chaque traitement, mais il est intéressant de noter que les traitements 2 et 3 ont induit le pourcentage le plus élevé de poissons malformés avec un indice de condition plus élevé que tous les autres traitements. Il est possible que les traitements 4 et 5 aient induit des malformations plus néfastes, qui ont conduit à la mort des embryons, mais les embryons morts n'ont pas été photographiés en raison de leur état de décomposition. Globalement, tous les traitements vibratoires ont induit des malformations chez les embryons de saumon, mais les vibrations les plus élevées ont induit des malformations létales, tandis que les vibrations plus faibles ont induit des malformations plus petites qui peuvent nuire à la survie ou avoir un impact sur la condition physique du poisson plus tard dans sa vie. L'activité de l'enzyme antioxydante SOD était également réduite pour les embryons soumis aux deux traitements les plus élevés, ce qui suggère une diminution de l'activité métabolique entraînant une réduction de la croissance (comme cela a été observé pour la taille des yeux).

Conclusions générales et recommandations

Les travaux de géophysique réalisés sur les rives de la rivière Nipissis ont permis d'établir que les passages de trains génèrent des vibrations du sol importantes qui dépassent de façon récurrente la limite permmissible de 13 mm/s préconisée par le MPO pour garantir la sécurité des embryons de poissons en incubation (Wright et Hopky 1988). Les résultats de l'analyse statistique ayant montré la contribution indépendante de la distance à la voir ferrée, de la vitesse de roulement du train et de sa charge, il est possible d'entrevoir des stratégies permettant d'atténuer les effets négatifs du passage des trains sur les œufs de saumon de la rivière Nipissis.

Puisque l'éloignement physique de la voir ferrée par rapport à la rivière n'est pas une avenue envisageable, l'atténuation des vibrations ne peut être envisagée que par une réduction de la vitesse de roulement ou de la charge transportée ou d'une combinaison des deux.

Puisque la plus grande période de fragilité des œufs de salmonidés débute environ deux jours après la fertilisation pour se poursuivre jusqu'à l'atteinte du stade oeillé, des limitations de la vitesse et de la charge des trains pourrait n'être applicable que pour cette période (Figure 2). Le stade oeillé correspond à 50% du développement des œufs de salmonidés dont la progression est fonction de la température de l'eau servant à l'incubation (MAPAQ 1996). Si une série temporelle de la température journalière de l'eau est disponible, les données du Tableau 2 peuvent être utilisées pour calculer le nombre de jours nécessaires à l'attente du stade oeillé. Par mesure de précaution, les limitations de vitesses et de charges des trains pourraient débiter deux semaines avant le début de la fraie et continuer un mois après la date estimée d'atteinte du stade oeillé.

Tableau 2. Pourcentages de développements journaliers des œufs de saumon atlantique pendant l'incubation en fonction de la température de l'eau. Tirée de MAPAP (1996), Tableau 7.3).

Température (C)	Développement (%)	Température (C)	Développement (%)	Température (C)	Développement (%)
2.0	0.60	5.0	1.01	8.0	1.60
2.1	0.61	5.1	1.03	8.1	1.62
2.2	0.62	5.2	1.04	8.2	1.64
2.3	0.63	5.3	1.06	8.3	1.67
2.4	0.64	5.4	1.08	8.4	1.69
2.5	0.66	5.5	1.10	8.5	1.71
2.6	0.67	5.6	1.11	8.6	1.74
2.7	0.68	5.7	1.13	8.7	1.76
2.8	0.69	5.8	1.15	8.8	1.78
2.9	0.71	5.9	1.17	8.9	1.81
3.0	0.72	6.0	1.19	9.0	1.83
3.1	0.73	6.1	1.21	9.1	1.86
3.2	0.74	6.2	1.22	9.2	1.88
3.3	0.76	6.3	1.24	9.3	1.91
3.4	0.77	6.4	1.26	9.4	1.93
3.5	0.78	6.5	1.28	9.5	1.96
3.6	0.80	6.6	1.30	9.6	1.98
3.7	0.81	6.7	1.32	9.7	2.01
3.8	0.83	6.8	1.34	9.8	2.03
3.9	0.84	6.9	1.36	9.9	2.06
4.0	0.86	7.0	1.38	10.0	2.08
4.1	0.87	7.1	1.40	10.1	2.11
4.2	0.89	7.2	1.42	10.2	2.14
4.3	0.90	7.3	1.44	10.3	2.16
4.4	0.92	7.4	1.47	10.4	2.19
4.5	0.93	7.5	1.49	10.5	2.22
4.6	0.95	7.6	1.51	10.6	2.24
4.7	0.96	7.7	1.53	10.7	2.27
4.8	0.98	7.8	1.55	10.8	2.30
4.9	0.99	7.9	1.57	10.9	2.33

Ces limitations pourraient être appliquées soit de façon égale sur l'ensemble des 65 km de la rivière Nipissis longée par la voie ferrée, soit moduler spatialement en fonction de la distance locale séparant la voie ferrée de la rivière et de la vitesse de propagation locale de sondes sismiques. En effet, plusieurs facteurs géologiques affectent la variation spatiale de propagation de ces ondes et une étude de géophysique serait appropriée afin de peaufiner la modulation des limitations de vitesses et de charges le long de la rivière.

Bien que la vitesse limite de PPV préconisée par le MPO soit de 13 mm/s, les quelques études visant à quantifier le lien entre les PPV et la mortalité suggèrent que cette valeur est très conservatrice puisque peu de mortalité est observée en dessous d'une gamme de valeurs entre 132 et 245 mm/s (Jensen 2003, Faulkner et al 2006, 2008). Il faut cependant noter que ces résultats sont obtenus dans le contexte de l'évaluation des effets délétères des explosions sur les œufs de poissons et qu'il n'inclut pas d'exposition permettant d'estimer l'effet de la répétition chronique d'une vibration sur les œufs.

L'étude de survie des embryons de saumon atlantique réalisée dans le cadre du projet est dans ce sens plus représentative de l'effet possible des passages répétés des trains puisque les vibrations ont été programmées pour se produire deux fois par jour. Les résultats indiquent un accroissement graduel de la mortalité des embryons de saumon atlantique avec l'augmentation de l'intensité des vibrations (Figure 7) avec une différence significative de mortalité pour les traitements de 127 et 525 mm/s par rapport au contrôle. Un taux de mortalité supérieur à 30 % est cependant observé pour les trois traitements de 64 mm/s et plus. Puisqu'aucune différence significative de mortalité n'a été observée entre le contrôle et le traitement de 29 mm/s, nous suggérons qu'une valeur cible maximum de PPV de 30 mm/s devrait être utilisée dans la planification des limitations des caractéristiques de passage des trains. L'utilisation de la valeur de 13 mm/s préconisée par le MPO offrirait cependant une confortable marge de sécurité.

Remerciements

Les auteurs remercient : la Pourvoirie Moisie Nipissis Inc pour l'accueil, l'hébergement et l'aide sur le terrain ; Charles Fiset pour sa participation aux travaux de terrain ; le personnel du LARSA (Laboratoire de recherche en sciences aquatiques) ; Younes Khosravi pour la réalisation de la carte de localisation de la rivière.

Le projet a été financé par des contributions de l'Association de protection de la rivière Moisie inc et de la Fondation pour la conservation du saumon atlantique (FCSA). Le support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) et le Programme de bourses d'études supérieures du Canada Vanier est également remercié.

Références

- Battle, H. I. (1944). Effects of dropping on the subsequent hatching of teleostean ova. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 6(3), 252-256.
- Dufour-Beauséjour, S., Bernier, M., Simon, J., Homayouni, S., Gilbert, V., Gauthier, Y., ... & Roth, A. (2021). Tenuous correlation between snow depth or sea ice thickness and C-or X-band backscattering in Nunavik Fjords of the Hudson Strait. *Remote Sensing*, 13(4), 768.
- Faulkner, S. G. (2006). Blasting effects on incubating salmonid eggs. MSc thesis, Department of Biological Sciences, University of Alberta, 67 p.
- Faulkner, S. G., Tonn, W. M., Welz, M., & Schmitt, D. R. (2006). Effects of explosives on incubating lake trout eggs in the Canadian Arctic. *North American Journal of Fisheries Management*, 26(4), 833-842.
- Faulkner, S. G., Welz, M., Tonn, W. M., & Schmitt, D. R. (2008). Effects of simulated blasting on mortality of rainbow trout eggs. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(1), 1-12.
- Franz-Odenaal, T. and S. C. Edsall (2018). "Long-Term Effects of Simulated Microgravity and Vibration Exposure on Skeletal Development in Zebrafish." *Stem Cells and Development* 27(18): 1278-1286.
- Jensen, J. O. T. (2003). New mechanical shock sensitivity units in support of criteria for protection of salmonid eggs from blasting or seismic disturbance. Fisheries & Oceans Canada, Pacific Region, Science Branch, Pacific Biological Station.
- Gorodilov, Y.N (1996). Description of the early ontogeny of the Atlantic salmon, *Salmo salar*, with a novel system of interval (state) identification. *Environ Biol Fish* 47, 109–127. <https://doi.org/10.1007/BF00005034>.
- Mackay DJC (2005) *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Version 7.2. Cambridge University Press. 640 pp.
- MAPAQ (1996) *Guide: Élevage des salmonidés; Fascicule 3: Reproduction, incubation et alevinage*. Publication du Québec, Qc, Canada.
- Normandeau Associates, I. (2012). "Effects of Noise on Fish, Fisheries, and Invertebrates in the U.S. Atlantic and Arctic from Energy Industry Sound-Generating Activities." Workshop Report for the U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. Contract # M11PC00031. 72 pp. plus Appendices.
- Okada, S. (1960). Studies on the Critical Period of Susceptibility of the Developing Fish Eggs to Mechanical Disturbances. *Journal of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University*, 51(2), 343-379.
- Pucci, B., M. Kasten and A. Giordano (2000). "Cell cycle and apoptosis." *Neoplasia* (New York, N.Y.) 2(4): 291-299.

- Timothy, J (2013) Alaska blasting standard for the proper protection of fish. Alaska Department of Fish and Game, Technical Report No. 13-03, Douglas, Alaska.
- Vandenberg, L. N., C. Stevenson and M. Levin (2012). "Low Frequency Vibrations Induce Malformations in Two Aquatic Species in a Frequency-, Waveform-, and Direction-Specific Manner." PLOS ONE 7(12): e51473.
- Wright, D. G. (1982) A discussion paper on the effects of explosives on fish and marine mammals in the waters of the Northwest Territories. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 1052.
- Wright, D. G., and G. E. Hopky (1998) Guidelines for the use of explosives in or near Canadian fisheries waters. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2107.

Annexe 1

Site	Heure	Poids (kg)	Vitesse (km/h)	Durée (s) > 13 mm/s	PPV Max (mm/s)
1	2019-08-05 20:48:23	8 410 466	51,3	200	111
1	2019-08-05 21:16:31	3 348 401	43,5	176	211
1	2019-08-06 01:14:35	4 101 361	46,7	192	123
1	2019-08-06 01:55:45	17 936 763	48,3	333	265
1	2019-08-06 03:33:19	17 587 499	45,1	271	170
1	2019-08-06 05:20:25	4 060 538	48,3	185	142
1	2019-08-06 06:44:33	5 927 514	48,3	247	110
1	2019-08-06 07:25:31	17 449 607	46,7	280	166
1	2019-08-06 09:22:52	3 962 562	48,3	184	162
1	2019-08-06 10:03:34	16 848 147	44,1	421	145
1	2019-08-06 14:53:05	17 838 788	46,7	421	221
1	2019-08-06 12:51:13	4 082 310	46,7	198	109
1	2019-08-06 17:32:36	12 815 732	0,0	586	54
1	2019-08-06 19:36:43	3 847 350	49,9	185	120
1	2019-08-06 20:32:47	3 418 254	0,0	150	75
1	2019-08-06 22:17:16	3 287 620	53,1	174	118
1	2019-08-06 23:54:13	3 957 119	45,1	208	135
1	2019-08-07 00:52:51	17 814 294	46,7	304	203
1	2019-08-07 04:07:34	28 352 097	45,1	434	190
1	2019-08-07 04:38:02	17 888 682	43,5	338	194
1	2019-08-07 06:05:48	3 914 482	48,3	185	116
2	2019-08-07 17:43:19	17 778 914	40,2	186	98
2	2019-08-07 20:49:35	2 028 454	0,0	68	25
2	2019-08-07 21:55:55	4 038 765	49,9	115	25
2	2019-08-07 22:20:24	1 758 115	57,5	67	18
2	2019-08-07 23:16:04	5 883 062	48,3	185	22
2	2019-08-07 23:54:55	18 843 036	27,4	245	51
2	2019-08-08 00:11:24	18 010 245	41,8	186	65
2	2019-08-08 01:11:28	3 945 326	48,0	126	19
2	2019-08-08 03:41:56	28 900 940	49,9	245	173
2	2019-08-08 04:36:44	4 109 525	48,3	126	20
2	2019-08-08 11:59:20	17 081 292	40,2	210	62
2	2019-08-08 13:11:11	12 647 904	40,2	151	45
2	2019-08-08 14:54:44	2 383 162	0,0	67	41
2	2019-08-08 15:12:12	3 066 268	49,9	80	49
2	2019-08-08 16:23:26	18 014 780	34,9	222	58
2	2019-08-08 17:31:32	3 888 173	49,9	114	18
2	2019-08-08 19:56:38	8 576 480	50,5	126	45
2	2019-08-08 20:26:45	17 578 427	46,7	174	110
2	2019-08-09 01:56:05	4 416 152	56,3	127	18
2	2019-08-09 03:41:15	3 966 191	46,7	103	20
2	2019-08-09 05:51:38	6 069 034	48,1	174	20
2	2019-08-09 06:23:55	17 288 129	43,5	173	89
2	2019-08-09 07:49:24	3 886 359	50,7	126	19
2	2019-08-09 08:18:49	17 747 162	46,7	174	62

Site	Heure	Poids (kg)	Vitesse (km/h)	Durée (s) > 13 mm/s	PPV Max (mm/s)
3	2019-08-10 12:58:22	18 184 423	22,5	0	12
3	2019-08-10 15:08:52	5 184 534	24,3	0	5
3	2019-08-10 16:05:17	1 183 870	24,3	0	3
3	2019-08-10 17:58:14	5 974 687	20,9	0	5
3	2019-08-10 18:50:38	1 473 260	26,6	0	4
3	2019-08-10 20:31:13	3 787 477	24,1	0	5
3	2019-08-10 20:50:36	4 089 567	23,2	0	5
3	2019-08-10 21:38:35	17 984 844	34,0	0	12
3	2019-08-11 00:10:49	4 017 900	24,1	0	4
3	2019-08-11 00:54:51	19 500 741	16,6	0	9
3	2019-08-11 02:29:49	4 160 327	22,5	0	4
3	2019-08-11 03:36:44	29 161 301	27,4	94	14
3	2019-08-11 05:40:41	3 371 081	22,5	0	5
3	2019-08-11 06:26:23	18 022 038	22,5	32	13
3	2019-08-11 11:54:36	3 973 448	24,1	0	5
3	2019-08-11 14:43:17	3 048 125	51,2	0	12
3	2019-08-11 15:43:48	3 938 068	63,1	0	8
3	2019-08-11 16:05:32	5 847 682	52,6	0	8
3	2019-08-11 16:33:38	2 789 579	57,1	0	9
3	2019-08-11 17:46:41	-	0,0	32	23
3	2019-08-11 21:50:09	18 100 963	46,7	218	27
3	2019-08-11 22:27:40	12 676 933	37,8	32	15
3	2019-08-12 02:54:49	17 586 591	45,1	155	19
3	2019-08-12 04:32:40	4 005 200	51,5	0	7
3	2019-08-12 07:31:31	3 925 368	0,0	0	9

Annexe 2

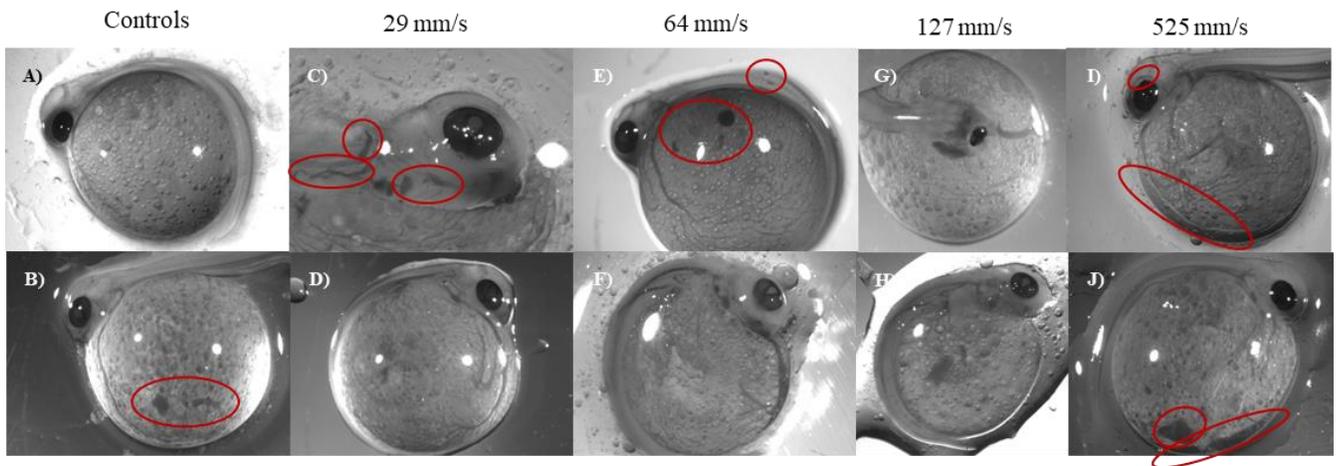


Figure S1. Image des embryons de chaque traitement présentant les différents types de malformations et l'indice de condition observés après l'exposition à de faibles vibrations chroniques. A) Embryon normal, pas de malformations, indice de condition 1 ; B) Hémorragie du sac vitellin, indice de condition 1 ; C) Malformations cardiovasculaires et hémorragies de la tête, indice de condition 2 (altération du rythme cardiaque, survie menacée) ; D) Embryon normal, indice de condition 1 ; E) Petites hémorragies dans le sac vitellin et le corps, indice de condition 1 ; F) Hémorragies cardiovasculaires importantes, la pigmentation des yeux n'est pas terminée et le corps commence à blanchir, ce qui indique la mort, indice de condition 3 (forte probabilité de mort avant l'éclosion) ; G) malformation importante du squelette (tête mal formée), hémorragie et malformation cardiovasculaires, indice de condition 3 ; H) malformation et hémorragie cardiovasculaires, indice de condition 2 ; I) œdème du sac vitellin et hémorragie de la tête, indice de condition 2 ; J) hémorragie et œdème du sac vitellin, indice de condition 2.

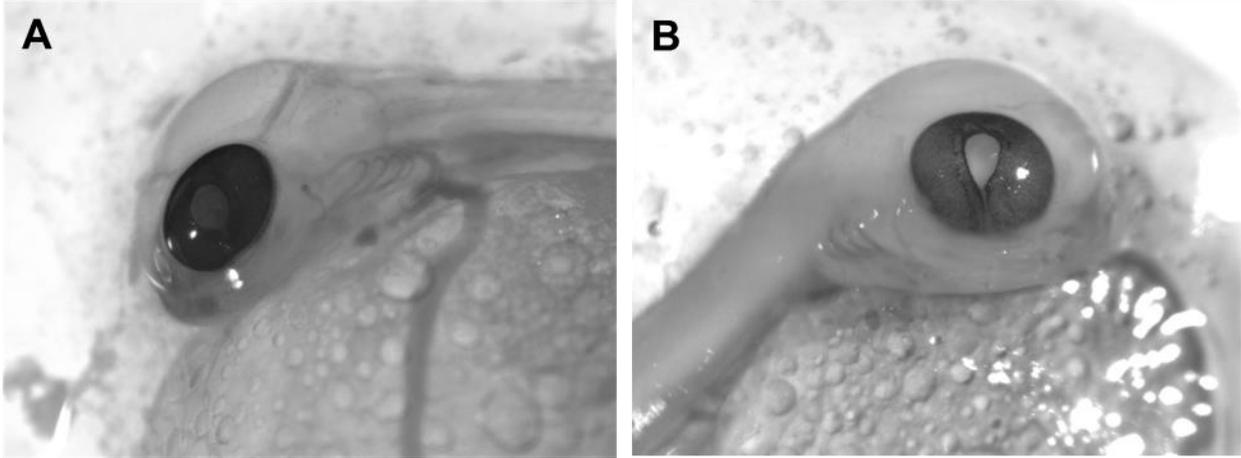


Figure S2. Exemples de développement embryonnaire. La tête et les yeux sont plus longs dans l'image A, un embryon du groupe témoin, que dans l'image B, un embryon soumis au traitement de vibration le plus faible (29 mm/s), et la pigmentation des yeux est plus avancée dans l'image A. Ces caractéristiques signifient un stade de développement plus avancé dans l'image A que dans l'image B.