



RISQUES POUR LES POISSONS LIÉS AUX INSTALLATIONS DE TURBINES À TRÈS FAIBLE HAUTEUR DE CHUTE

Contexte

Les blessures et la mortalité des poissons qui traversent les turbines lors du passage intentionnel ou non en aval (Algera *et al.* 2020) sont parmi les préoccupations les plus importantes liées à la production d'énergie hydroélectrique. Il existe plusieurs mécanismes par lesquels les poissons peuvent être blessés ou tués à la suite de leur passage (ou de leur entraînement) dans les turbines, comme le résume Čada (2001), notamment les changements de pression rapides et extrêmes, la cavitation, la contrainte de cisaillement, les collisions, les turbulences et le broyage. C'est pourquoi les concepteurs travaillent depuis des décennies à la création de turbines « respectueuses des poissons » qui intègrent des caractéristiques les rendant moins dangereuses pour les poissons entraînés à l'intérieur (Fraser *et al.* 2007, Foust *et al.* 2011, Romero-Gomez *et al.* 2022, Watson *et al.* 2022). Pour déterminer si une turbine est effectivement « respectueuse des poissons », il faut non seulement quantifier le taux de mortalité, mais aussi prendre en compte les effets sublétaux (Ferguson *et al.* 2006). De nombreux plans actuels de surveillance de la mortalité due à l'entraînement par l'eau consistent à marcher périodiquement en aval de la turbine pour observer et consigner les poissons morts. Ce niveau de surveillance ne fournit probablement pas de renseignements fiables sur le risque encouru par les poissons. De plus en plus, d'autres méthodes de surveillance de la mortalité due à l'entraînement sont utilisées – notamment des essais de chasse des poissons et la modélisation pour estimer la mort des poissons due à l'entraînement –, mais à ce jour, il n'existe pas de méthodes standard ou uniformes considérées comme des « meilleures pratiques ».

Plusieurs nouvelles technologies de turbine (Quaranta *et al.* 2022) sont proposées pour les infrastructures nouvelles et existantes (déversoirs, barrages non hydroélectriques), qui doivent encore être évaluées pour qu'on détermine leur « innocuité pour les poissons » (Cooke *et al.* 2011) et la possibilité de les utiliser au Canada (RNCAN 2018). Les barrages à faible hauteur (moins de 15 m) sont considérés comme des options hydroélectriques viables qui pourraient ajouter de 5 à 10 GW d'énergie (Tung *et al.* 2007, soit environ 10 % des 82,3 GW de la puissance installée du Canada, IHA 2022) à la capacité totale de production d'énergie du Canada. La turbine à très faible hauteur de chute (TTFHC), conçue par MJ2 Technologies, fait partie d'une catégorie unique et rentable de turbines conçues pour une hauteur de chute de 1,4 à 4,5 m, un débit de 10 à 30 m³/s et une capacité allant jusqu'à 500 kW (Fraser *et al.* 2007, Sweeney *et al.* 2022). La configuration standard se compose de huit aubes mobiles réglables de type Kaplan et de 18 veines de guidage fixes, avec un diamètre de 0,6-5,6 m. La conception de la TTFHC incorpore plusieurs caractéristiques destinées à réduire le plus possible les répercussions sur les poissons :

- l'utilisation d'une roue mobile de grand diamètre (qui permet une faible vitesse et rend inutile l'utilisation d'un tube d'aspiration);
- la réduction des gradients de vitesse et de pression;
- la réduction de l'écart entre les pointes et le nombre d'aubes; et,

- l'émoussement assuré de la forme des aubes mobiles de type Kaplan (Fraser *et al.* 2007).

Une TTFHC installée en 2015 à Wasdell Falls sur la rivière Severn, en Ontario, a fourni un site unique pour la première étude de cette nouvelle technologie au Canada. L'installation de TTFHC sur la rivière Severn a été soutenue par RNCan afin d'en faire un site de démonstration pour représenter une source d'électricité propre et fiable à faible impact. La technologie à très faible hauteur de chute permet de réaliser d'importantes économies en matière de travaux de génie civil grâce à son concept de modularité, ce qui rend le développement des ressources hydroélectriques à très faible hauteur de chute économiquement réalisable. Il est toutefois important que des essais soient réalisés au Canada afin de déterminer si cette technologie peut effectivement être considérée comme « respectueuse des poissons » pour les taxons et systèmes canadiens.

Utilisant la télémétrie acoustique, le passage de poissons vivants et des capteurs conçus pour enregistrer les conditions rencontrées par les poissons lorsqu'ils passent à travers les turbines, cette recherche visait à fournir une quantification directe du risque d'entraînement, de blessures et de mortalité immédiate ou différée des poissons résultant de l'installation de TTFHC à Wasdell Falls. Étant donné que l'installation de Wasdell Falls s'est faite sur le site d'un barrage existant, cette recherche a été conçue pour quantifier particulièrement le risque accru pour les poissons dû à l'installation de la turbine sur une barrière existante, et non pour évaluer l'ensemble des effets de la présence du barrage lui-même. Le risque d'entraînement des poissons résidents en amont de la TTFHC a été estimé en mesurant le taux d'entraînement des poissons étiquetés par télémétrie acoustique. Des poissons vivants, représentatifs de la communauté piscicole locale, ont été introduits dans une TTFHC afin d'estimer les taux de blessure et de mortalité attendus pour les poissons résidents traversant les TTFHC. Combinés, la probabilité d'entraînement et le risque de blessures ou de mortalité lié au passage dans la turbine peuvent être utilisés pour fournir une estimation du risque global pour les poissons en amont de la TTFHC. En plus du passage des poissons vivants, des capteurs électroniques ont été envoyés dans la TTFHC pour fournir des informations quantitatives sur les conditions physiques rencontrées par les poissons pendant leur passage, dont certaines n'étaient pas évidentes pendant les essais sur les poissons vivants. Les résultats figurant dans le présent rapport de réponse des Sciences visent à quantifier directement le risque que représentent les TTFHC quant au Programme de protection des poissons et de leur habitat (PPPH) de Pêches et Océans Canada (MPO). Plus précisément, les objectifs sont les suivants :

1. déterminer le risque global que représente l'installation de TTFHC à Wasdell Falls pour la communauté de poissons résidents;
2. déterminer le niveau et le type de surveillance requis pour les futures installations;
3. établir les incertitudes et les lacunes dans les connaissances et, le cas échéant, recommander des informations, recherches, surveillances et collectes de données supplémentaires, entre autres, qui sont nécessaires pour mieux évaluer les effets potentiels des installations de TTFHC sur les communautés de poissons du Canada.

La présente réponse des Sciences est le résultat de l'examen par les pairs régional du 5 au 6 décembre 2023 sur les risques pour les poissons liés aux installations de turbines à très faible hauteur de chute (TTFHC).

Renseignements de base

La notion de « respect des poissons » quant aux turbines n'est qu'une partie de l'équation concernant les effets de l'installation d'une turbine sur les populations de poissons. Si le taux d'entraînement est faible, le fait qu'une turbine soit ou non « respectueuse des poissons » aura peu d'influence sur la population (Lin *et al.* 2022). Dans la présente étude, la télémétrie acoustique a été utilisée pour estimer les taux d'entraînement des espèces communes de poissons résidents dans les TTFHC de Wasdell Falls; les taux de blessures et de mortalité des individus ont été évalués; et les conditions physiques associées au passage dans des turbines et des vannes de crête ont été quantifiées. L'objectif était de quantifier les risques accrus pour les poissons en lien à l'installation d'une turbine sur une barrière existant depuis très longtemps.

Les risques de blessures et de mortalité pour les poissons en lien au passage dans des turbines sont les suivants : changements de pression, cavitation, contrainte de cisaillement et blessures mécaniques comme la collision, le broyage ou le placage (Čada *et al.* 1997). Les pressions agissant sur les poissons sont perpendiculaires au corps et les changements de pression pendant le passage dans des turbines d'installations hydroélectriques peuvent être suffisamment importants pour provoquer des barotraumatismes chez les poissons (Čada *et al.* 1997, Brown *et al.* 2014). La cavitation se produit lorsque la pression diminue jusqu'à atteindre des valeurs extrêmement basses. L'effondrement des bulles de vapeur ou des cavités peut alors provoquer de violentes ondes de choc qui endommagent l'infrastructure des turbines et blessent les poissons (Čada 2001, Long *et al.* 2019). La contrainte de cisaillement, contrairement à la pression, agit parallèlement au corps du poisson et peut causer des blessures et la mortalité en raison des masses d'eau se déplaçant les unes vers les autres dans plusieurs directions ou à différentes vitesses, comme dans les zones adjacentes à des objets fixes tels que les infrastructures hydroélectriques (Čada *et al.* 1997, 2006, Deng *et al.* 2005). Les blessures et la mortalité mécaniques peuvent résulter de situations où les poissons entrent en contact avec l'infrastructure, par exemple en heurtant directement les turbines ou en étant broyés et plaqués entre les pièces mobiles de la machinerie (Čada *et al.* 1997).

Des capteurs ou « poissons-capteurs » ont été mis au point. Il s'agit de petits dispositifs tubulaires en plastique de la taille d'un saumoneau qui sont capables de prendre des mesures *in situ* de la pression, de la température et de l'accélération linéaire tridimensionnelle, de la vitesse de rotation et de l'orientation à des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 2 048 Hz (poisson-capteur d'Advanced [ATS, ARC800], Deng *et al.* 2014). On les a employés avec succès dans diverses infrastructures pour quantifier les conditions associées au passage des poissons et fournir des orientations pour les mesures d'atténuation (Fu *et al.* 2016, Deng *et al.* 2017, Duncan *et al.* 2018). Le déploiement de capteurs et la modélisation de la dynamique des fluides numérique (DFN) ont permis de créer un profil de pression typique pour les conditions de passage dans la turbine (Figure 1a), qui montre généralement une augmentation de la pression à l'approche de la turbine (T1), suivie d'une diminution soudaine et souvent radicale de la pression lors du passage dans la roue mobile de la turbine (T2), et d'une autre légère augmentation de la pression lorsque l'on rencontre des conditions de galerie de restitution (T3) (Carlson *et al.* 2008, Richmond *et al.* 2014, Martinez *et al.* 2019a). On a démontré que les pressions les plus basses (nadirs de pression) pendant le passage se produisent du côté de l'aval (aspiration) de la roue mobile de la turbine et le long de l'extrémité du canal opposée au moyeu (Richmond *et al.* 2014). On a observé un profil de pression similaire (typique) dans les TTFHC de Wasdell Falls dans le cadre de cette étude (Figure 1a). Cependant, les déploiements de contrôle ne présentaient pas de diminution très importante de pression caractéristique (c.-à-d. que les contrôles n'ont pas enregistré de pression la plus basse

ou de « nadir ») comme on l'avait observé dans les traitements de turbine, qui constituent le principal danger pour les poissons (Figure 1b). Nous avons utilisé ces capteurs, ainsi que des essais sur des poissons vivants et des estimations du taux d'entraînement, pour mieux comprendre le risque global que représentent les TTFHC de Wasdell Falls pour la communauté de poissons de la rivière Severn. Les définitions des termes utilisés dans le présent rapport figurent à l'annexe A.

Analyse et réponse

Méthodes

Site de l'étude

Les expériences ont été menées entre juin 2017 et octobre 2019, à la centrale hydroélectrique de Wasdell Falls, sur la rivière Severn, près de Washago, en Ontario, au Canada (44.780804, -79.293895). En 2015, Wasdell Falls est devenu le premier site au Canada à utiliser des TTFHC pour la production d'énergie hydroélectrique (RNCan 2018). Conçues par la société française MJ2 Technologies, ces turbines sont conçues pour fonctionner avec une hauteur de chute très faible (de 1,4 m à 3,2 m) et dans des conditions générales similaires aux centrales au fil de l'eau (Fraser *et al.* 2007). Chaque turbine se compose d'une roue Kaplan avec huit aubes réglables, avec des caractéristiques incorporées dans la conception pour réduire le plus possible les effets négatifs sur les poissons (Fraser *et al.* 2007). Le site de Wasdell Falls, dont la hauteur de chute normale est de 3,8 m, contient trois turbines qui peuvent être actionnées indépendamment pour déverser de 5,4 m³/s à 20 m³/s chacune, une partie du débit se déversant continuellement par-dessus le sommet du barrage (vanne de crête) lorsqu'il est en fonctionnement (Figure 2c,d). En plus des TTFHC, un déversoir sur une structure de barrage adjacente fournit un moyen supplémentaire de contrôle de l'eau et une voie de passage alternative en aval pour les poissons (Figure 2a). Le débit annuel moyen historique (de 1965 à 2020) à Wasdell Falls était de 46,9 m³/s. Le débit annuel moyen en 2017 était de 92,4 m³/s, le plus élevé jamais enregistré, tandis qu'en 2018, le débit annuel moyen était de 60,7 m³/s (Figure 3). Le barrage de Wasdell Falls a été construit en 1914 dans le cadre d'un projet de production d'électricité et il n'y a pas eu de chenal naturel pour le passage depuis cette époque. Une description plus détaillée du site d'étude peut être consultée dans Tuononen *et al.* (2022a).

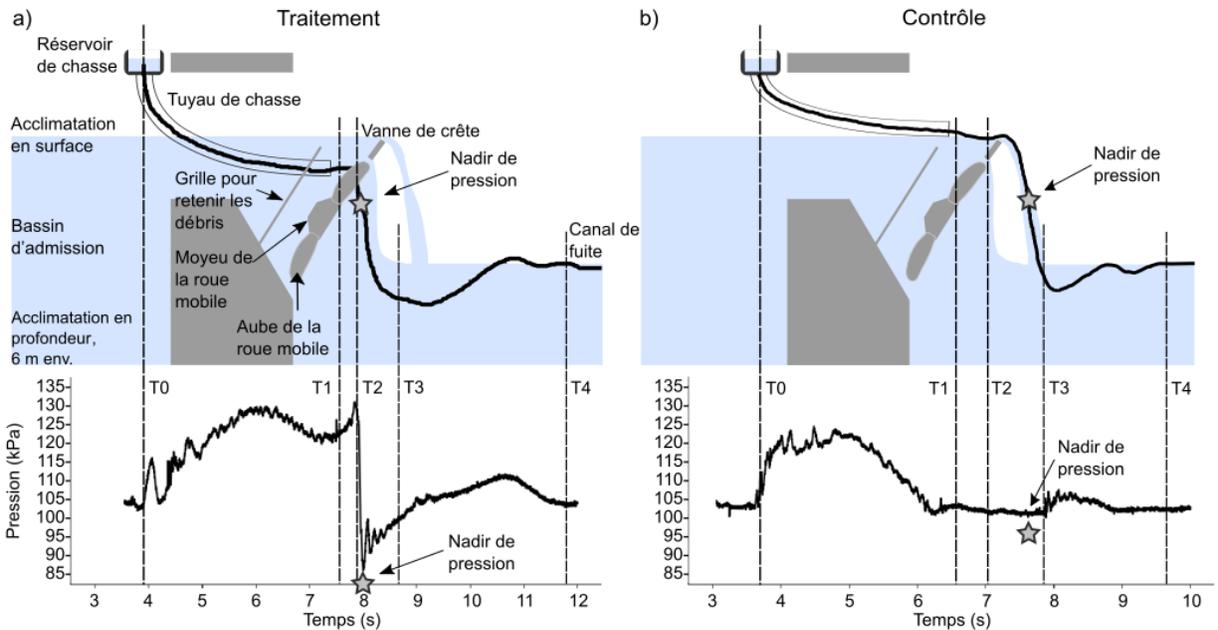


Figure 1. Schéma de la trajectoire que les poissons vivants et les capteurs des groupes expérimentaux et de contrôle ont suivie pendant les essais. Les lignes noires pleines représentent la trajectoire d'un poisson ou d'un capteur (en haut) et le profil de pression correspondant (en bas) pour : a) le groupe de traitement passant par la turbine, et b) le groupe de contrôle passant par la vanne de crête. Des exemples de profils de pression pour les groupes de traitement a) et de contrôle b), y compris des horodatages identifiant le début et la fin de chaque zone de passage (lignes verticales en pointillés), sont inclus. Les zones sont définies comme suit : T0-T1 = Chasse du poisson/capteur dans la grille pour retenir les débris, T1-T2 = Approche de la turbine, T2-T3 = Passage dans la turbine et sortie vers le canal de fuite, T3-T4 = Canal de fuite. Les étoiles grises indiquent l'endroit où le nadir de pression (la pression plus basse) a été atteinte dans chaque cas.

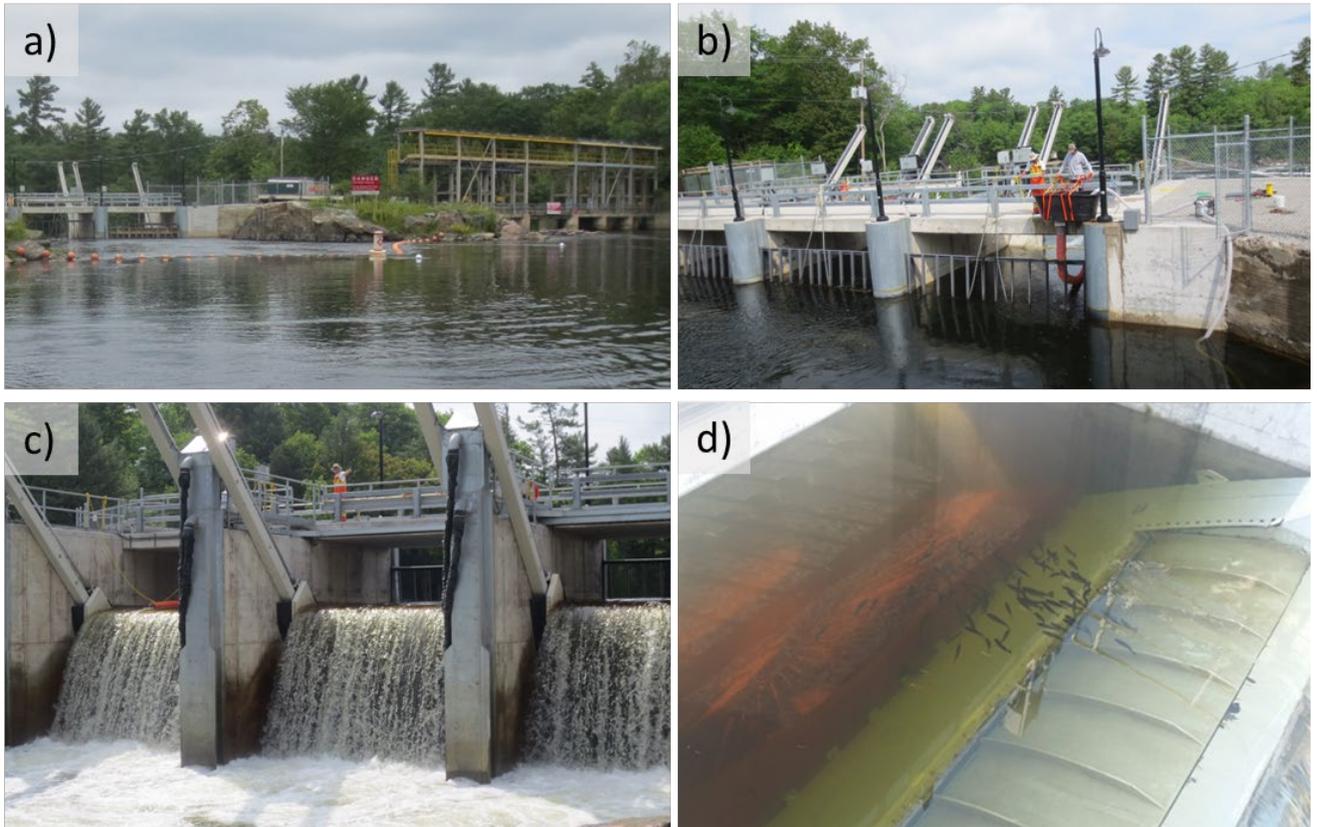


Figure 2. a) Barrage de contrôle de l'eau du côté est de l'île depuis les turbines à très faible hauteur de chute (TTFHC); b) TTFHC à Wasdell Falls, de l'amont vers l'aval. Réservoir de chasse et tuyau d'introduction des poissons visibles au niveau de la troisième turbine; c) TTFHC vues de l'aval vers l'amont. L'écoulement par-dessus la vanne de crête est apparent lorsque les trois turbines fonctionnent, et l'extrémité orange du tuyau de chasse est visible au niveau de la troisième turbine; d) Regroupement de poissons se maintenant dans l'eau qui s'écoule par-dessus la vanne de crête, du côté amont du barrage (source : a-c – MPO; d – Glenn Hepinstall).

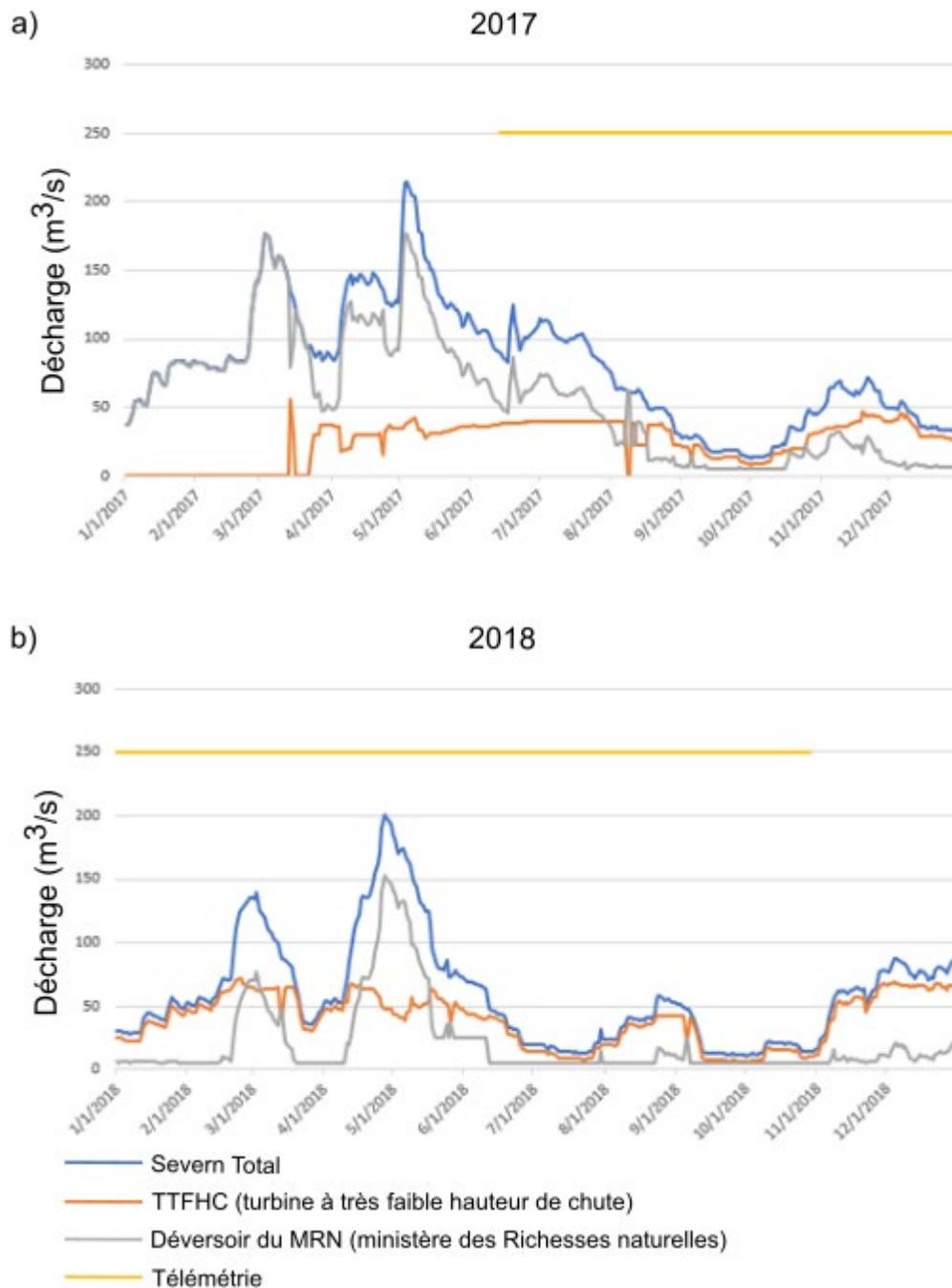


Figure 3. Débit journalier moyen en mètres cubes par seconde (m^3/s) sur la rivière Severn à Wasdell Falls (ligne bleue) en a) 2017 et b) 2018. La proportion du débit dans le canal de la turbine à très faible hauteur de chute (TTFHC) et le déversoir du ministère des Richesses naturelles (MRN) sont indiqués par les lignes orange et grise, respectivement. La ligne jaune indique la période durant laquelle l'étude par télémétrie sur les passages volontaires a été menée. Le débit annuel moyen était de $92,4 m^3/s$ en 2017 et de $60,7 m^3/s$ en 2018. Le débit annuel moyen historique est de $46,9 m^3/s$.

Comportement lors des passages volontaires

On a utilisé la télémétrie acoustique pour estimer le risque d'entraînement des poissons résidents en surveillant le mouvement des poissons près de Wasdell Falls entre le 14 juin 2017 et le 6 novembre 2018. On a combiné la pêche électrique en bateau et la pêche à la ligne pour capturer les poissons en vue de leur étiquetage par télémétrie acoustique. On a utilisé tous les poissons capturés dont la taille était suffisante pour supporter une étiquette acoustique (environ 75 g; masse de l'étiquette de moins de 1,5 % de la masse du poisson selon Brown *et al.* 1999). Par conséquent, les proportions des espèces reflètent ce qui a été capturé et qui répondait à ces critères. Les poissons trop petits pour être étiquetés n'ont été ni ciblés ni conservés. Par conséquent, l'analyse du comportement de déplacement n'est pas représentative de l'ensemble de la communauté de poissons de la rivière. Un total de 138 individus de huit espèces – 68 achigans à petite bouche (*Micropterus dolomieu*), 7 achigans à grande bouche (*Micropterus salmoides*), 43 crapets de roche (*Ambloplites rupestris*), 3 dorés jaunes (*Sander vitreus*), 4 grands brochets (*Esox lucius*), 6 barbues de rivière (*Ictalurus punctatus*), 6 meuniers noirs (*Catostomus commersonii*) et 1 crapet-soleil (*Lepomis gibbosus*) – ont été étiquetés avec des étiquettes du Juvenile Salmonid Acoustic Telemetry System (JSATS – système de télémétrie acoustique des salmonidés juvéniles; Lotek Wireless, Newmarket, ON). Bien que ces étiquettes permettent d'étiqueter des poissons relativement petits, les plus petits individus de cette population (moins de 75 g) n'ont pas été capturés au cours de cette étude des passages volontaires. Les étiquettes du JSATS ont été conçues pour être utilisées dans des environnements bruyants et pour éviter les collisions d'étiquettes lorsque de nombreux poissons étiquetés sont présents dans un système et que des taux d'impulsions élevés sont employés. Cependant, elles génèrent encore de fausses détections dans certaines conditions. Ces fausses détections doivent être éliminées des données avant le traitement. Tous les poissons étiquetés ont été relâchés près de leur lieu de capture, à moins de 3 km en amont de la TTFHC. Au total, 24 récepteurs acoustiques WHS 4200 (Lotek Wireless, Newmarket, ON) ont été déployés en amont et en aval du site à TTFHC, dont neuf concentrés dans la zone du bassin d'admission, afin de suivre les passages de poissons dans la TTFHC (Figure 4). On a estimé les efficacités de détection en utilisant des étiquettes de référence selon les méthodes de Kessel *et al.* (2014). Le temps de résidence dans chacune des trois zones du bassin d'admission (bassin d'admission à très faible hauteur de chute, bassin d'admission du barrage de régulation des eaux et groupes antérieurs au bassin d'admission; Figure 4) a été estimé pour chaque espèce. On n'a relevé aucune preuve de mortalité après l'étiquetage. Le débit annuel moyen historique (de 1965 à 2020) à Wasdell Falls était de 46,9 m³/s tandis que le débit moyen pendant la surveillance du passage volontaire était de 56,4 m³/s (médiane 48, quartile inférieur 24,8, quartile supérieur 72,6). Malgré un surplus d'eau en 2017, le débit des TTFHC n'était généralement que de 50 % à 75 % du débit turbinable maximal en raison de l'entretien continu de l'une des turbines (Figure 3). La saison de 2018 a connu de longues périodes avec un débit turbinable maximal. Des détails supplémentaires, y compris la procédure d'étiquetage, la taille des étiquettes, la configuration du réseau de récepteurs acoustiques, le filtrage des données télémétriques et les méthodes statistiques sont disponibles dans Tuononen *et al.* (2022b).

Passage de poissons vivants

Pour déterminer les taux de blessures et de mortalité des poissons vivants lors du passage dans des turbines, la pêche électrique en bateau et la pêche à la ligne ont été utilisées pour capturer des poissons pour des essais d'entraînement de poissons vivants. Les essais de chasse de poissons vivants ont eu lieu du 18 au 22 juin 2018 à un débit total moyen de rivière

de 35,7 m³/s. Le débit total de la turbine pendant la chasse des poissons vivants était de 10 m³/s (c.-à-d. ouverture des aubes à environ 50 % du potentiel). La différence d'élévation totale entre le bassin d'admission et le canal de fuite était comprise entre 4,0 m et 4,4 m. Un total de 141 individus représentant cinq espèces – l'achigan à grande bouche (29), l'achigan à petite bouche (48), le crapet de roche (36), le grand brochet (24) et le doré jaune (4) – ont été utilisés (voir les tableaux 1 et 2 dans Tuononen *et al.* 2022a). Tous les poissons ont été munis d'une étiquette à transpondeur passif intégré (TPI) à des fins d'identification individuelle afin de garantir que les évaluations avant et après la blessure soient effectuées sur les bons poissons. Tous les poissons ont également été équipés d'étiquettes à ballon pour faciliter leur récupération (Salalila *et al.* 2023). Un sous-ensemble a également reçu une étiquette acoustique pour surveiller la mortalité différée (1 semaine) ou le comportement migratoire (plus de 4 mois) après le passage. L'expérience a consisté en deux traitements : un groupe de contrôle qui a été chassé par la vanne de crête, et un groupe expérimental qui a été chassé par la TTFHC. Il convient de noter que cette conception a permis de tester le passage dans des turbines, mais pas les autres conséquences environnementales du barrage, et qu'elle a ajouté un facteur de confusion potentiel, à savoir la chute d'environ 4 m dans la marmite torrentielle. Comme les vitesses d'eau à l'approche des turbines sont faibles, l'entraînement de poissons vivants a nécessité l'utilisation d'un appareil de chasse (Figure 1a et 2b), qui n'a pas reproduit le comportement et les conditions qui se produiraient avec un poisson sauvage entraîné. Le risque absolu de mortalité au passage dans la turbine a été calculé en divisant le nombre de décès dans un groupe expérimental par le nombre total d'individus dans ce groupe expérimental. Des intervalles de confiance de probabilité binomiale ont été calculés pour les taux de mortalité absolus à l'aide de l'ensemble Hmisc dans R-studio (R Core Team 2019, version 4.2.2). Le risque relatif de mortalité immédiate et différée a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$RR = \left[\frac{T/n1}{C/n2} - 1 \right] 100 \quad \text{Équation 1}$$

Où T est le nombre de mortalités dans le groupe de traitement, C'est le nombre de mortalités dans le groupe de contrôle, et n1 et n2 sont le nombre total de poissons dans les groupes de traitement et de contrôle, respectivement. Le groupe de contrôle a été considéré comme ayant un risque de base de 100 % et le groupe de traitement a été exprimé par rapport au groupe de contrôle. Lorsque le groupe de contrôle n'enregistrait aucun décès, un « 1 » était ajouté au groupe de traitement et au groupe de contrôle pour calculer le risque relatif. Des détails supplémentaires sur les méthodes de passage des poissons vivants et les statistiques utilisées se trouvent dans Tuononen *et al.* (2022a).

Déploiement de capteurs

Des poissons-capteurs d'Advanced Telemetry Systems (ATS, ARC800, É.-U.; 8,99 cm [long.] x 2,45 cm [diam.]) ont été utilisés dans cette expérience pour mesurer les caractéristiques physiques du passage qui se rapprocheraient de celles subies par les poissons entraînés passant dans une TTFHC. Le poisson-capteur d'ATS est une technologie brevetée développée par le Pacific Northwest National Lab (PNNL), qui mesure la pression, l'accélération 3D et la vitesse de rotation à une fréquence de 2 048 Hz (Deng *et al.* 2014). Des poissons-capteurs, auxquels on a attaché des étiquettes à ballon (Salalila *et al.* 2023), ont été entraînés par le même appareil de chasse que celui utilisé pour les poissons vivants (Figure 1a et b; Tuononen *et al.* 2022a). Des poissons-capteurs ont été rejetés directement dans la turbine (traitements) ou à la surface de l'eau pour se déverser par-dessus la vanne de crête (contrôles). Des poissons-capteurs ont été récupérés en aval de la TTFHC et les données de chaque déploiement ont été

téléchargées et sauvegardées pendant que les capteurs étaient préparés pour le redéploiement.

Le déploiement des capteurs a eu lieu les 2 et 3 octobre 2019, avec un débit dans la turbine maintenu à 10 m³/s. La turbine a fonctionné avec un angle d'aube ouvert à 50 %, comme c'était le cas pour les essais sur les poissons vivants. La différence d'élévation totale entre le bassin d'admission et le canal de fuite était comprise entre 4,15 m et 4,18 m. Au total, 34 déploiements de traitement et 30 déploiements de contrôle ont été effectués avec les poissons-capteurs.

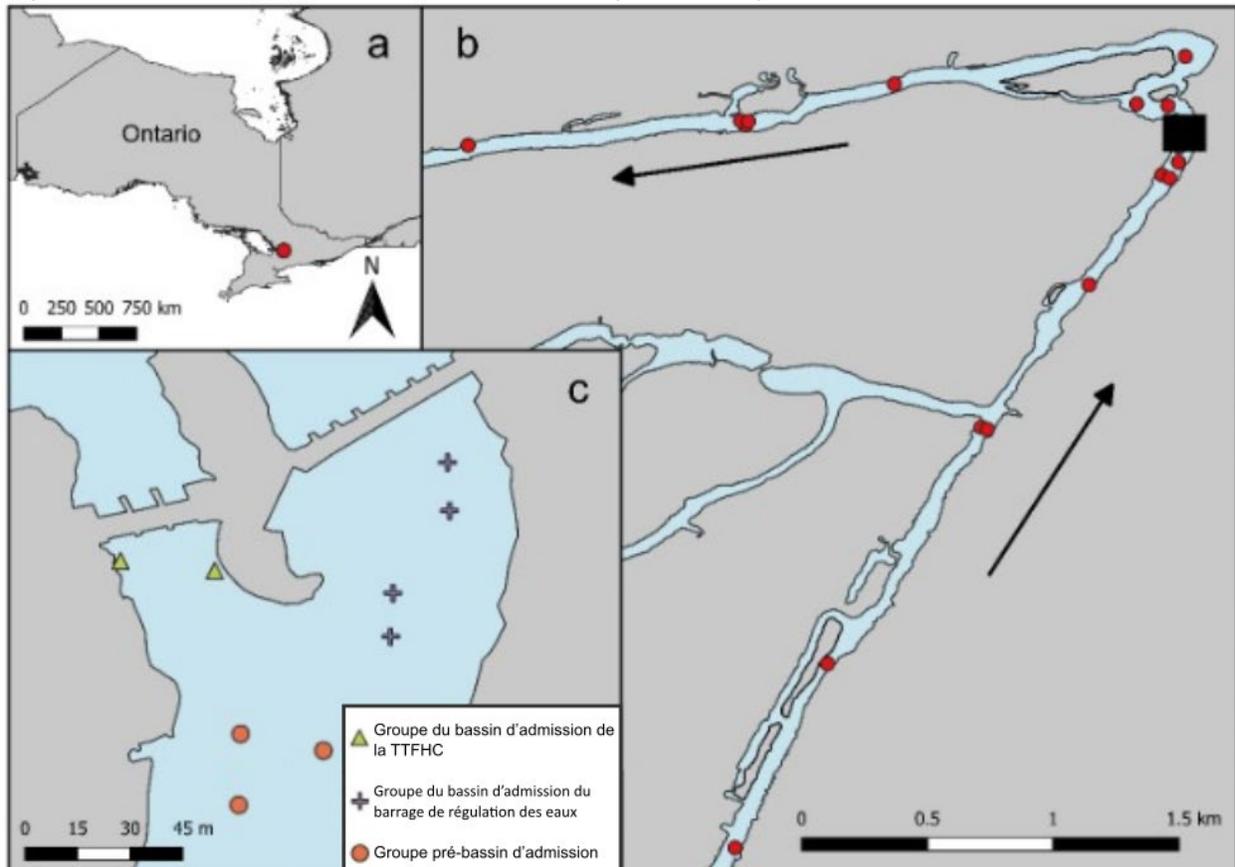


Figure 4. Adapté de Tuononen et al. (2022b). a) Emplacement du site d'étude (Wasdell Falls) en Ontario, Canada – cercle; b) Emplacements des stations dans l'ensemble du réseau de récepteurs de télémétrie acoustique (cercles rouges) déployé de l'été 2017 à l'automne 2018 sur la rivière Severn avec des flèches indiquant la direction du débit et un carré noir montrant l'incrustation de c; et c) Gros plan du réseau de récepteurs et des regroupements de stations en amont des TTFHC à Wasdell Falls. Il convient de noter qu'il s'agit de stations de déploiement et que certains récepteurs n'ont pas été déployés simultanément.

Traitement des données des poissons-capteurs

Les données des poissons-capteurs d'ATS ont été initialement traitées à l'aide de l'Hydropower Biological Evaluation Toolset (trousse d'évaluation biologique en matière d'hydroélectricité ou HBET), qui a été conçu pour l'analyse des données des poissons-capteurs (Hou et al. 2018). Les données ont été téléchargées, représentées sous forme de séries chronologiques et inspectées visuellement dans l'HBET. Des horodateurs ont été placés manuellement à des moments précis pour établir des régions dans les données associées à des événements qui se sont produits pendant le déploiement des capteurs. La détermination de l'emplacement de

l'horodateur pour chaque tracé a été basée sur les caractéristiques évidentes des profils de pression, d'accélération et de vitesse. Des horodateurs ont été placés pour filtrer les données pour chaque région d'intérêt, en particulier : l'événement de chasse (T0 et T1), le passage dans la turbine pour les traitements et le déversement par-dessus la vanne de crête pour les contrôles (T2 et T3), et la région du canal de fuite (T3 et T4) (Figure 1). Les horodatages étaient essentiels pour filtrer les données afin de déterminer directement, ou de calculer, divers paramètres qui rendent compte des conditions de passage, et d'évaluer les conditions susceptibles de provoquer un barotraumatisme chez les poissons. En outre, les horodatages permettent à l'HBET de déterminer les événements graves potentiels susceptibles de causer des blessures, tels que les collisions ou les cisaillements.

Plusieurs paramètres ont été déterminés ou calculés pour évaluer la probabilité d'un barotraumatisme en fonction des changements de pression, ainsi que la probabilité d'une blessure associée à la collision ou au cisaillement de l'aube (Brown *et al.* 2014). Le nadir de pression après le passage dans la turbine a été déterminé entre les horodatages T2 et T3. Les pressions d'acclimatation se rapprochant de la pression à la fois à la surface et à 6 m ont été utilisées pour déterminer le rapport de variation de pression (RVP) pour les scénarios les plus favorables et les plus défavorables, respectivement. Le RVP a été calculé en divisant la pression d'acclimatation par le nadir de pression mesurée pendant le passage. La probabilité de blessures mortelles a été estimée pour les deux scénarios d'acclimatation (surface et 6 m de profondeur) à l'aide d'une formule présentée dans Brown *et al.* (2012a,b) :

$$P_{mort} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln RPC}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln RPC}} \quad \text{Équation 2}$$

Où P_{mort} est la probabilité de blessures mortelles, β_0 et β_1 sont des coefficients de régression, et $\ln RPC$ est le logarithme naturel du RVP (Brown *et al.* 2012a,b). Les coefficients ont été dérivés d'expériences dose-réponse sur la décompression rapide pour diverses espèces et ont été obtenus à partir de Pflugrath *et al.* (2021). La probabilité de blessures mortelles a été estimée pour une variété d'espèces présentes dans le système Trent-Severn près du site de Wasdell, ainsi que pour plusieurs autres espèces non présentes près de Wasdell, afin de fournir un contexte canadien supplémentaire. La pression barométrique doit être enregistrée avant chaque déploiement des poissons-capturs, car ces mesures sont utilisées pour étalonner les capteurs de pression avant d'analyser les données de pression.

Événements de collision et de cisaillement

Pour chaque ensemble de données de poissons-capturs, les événements intéressants, tels que les changements rapides de pression, les collisions et les cisaillements, ont été identifiés et quantifiés. La quantification des événements comprenait le moment de l'occurrence, le lieu (zone), la gravité et la proportion de rejets contenant au moins un événement d'accélération radicale (accélération maximale [*Max Acc*]), soit lorsqu'une magnitude d'accélération de plus de 95 G, établie en laboratoire avec des saumons chinooks juvéniles (*Oncorhynchus tshawytscha*) (Deng *et al.* 2005) par zone, était calculée. Outre la gravité, les événements ont été classés selon leur attribution à une collision ou à un cisaillement. Un événement de collision était défini par un pic d'accélération d'une durée inférieure à 0,0075 s (mesuré à 70 % de la valeur maximale); dans le cas contraire, il était jugé comme un événement de cisaillement (Deng *et al.* 2007) [Figure 5].

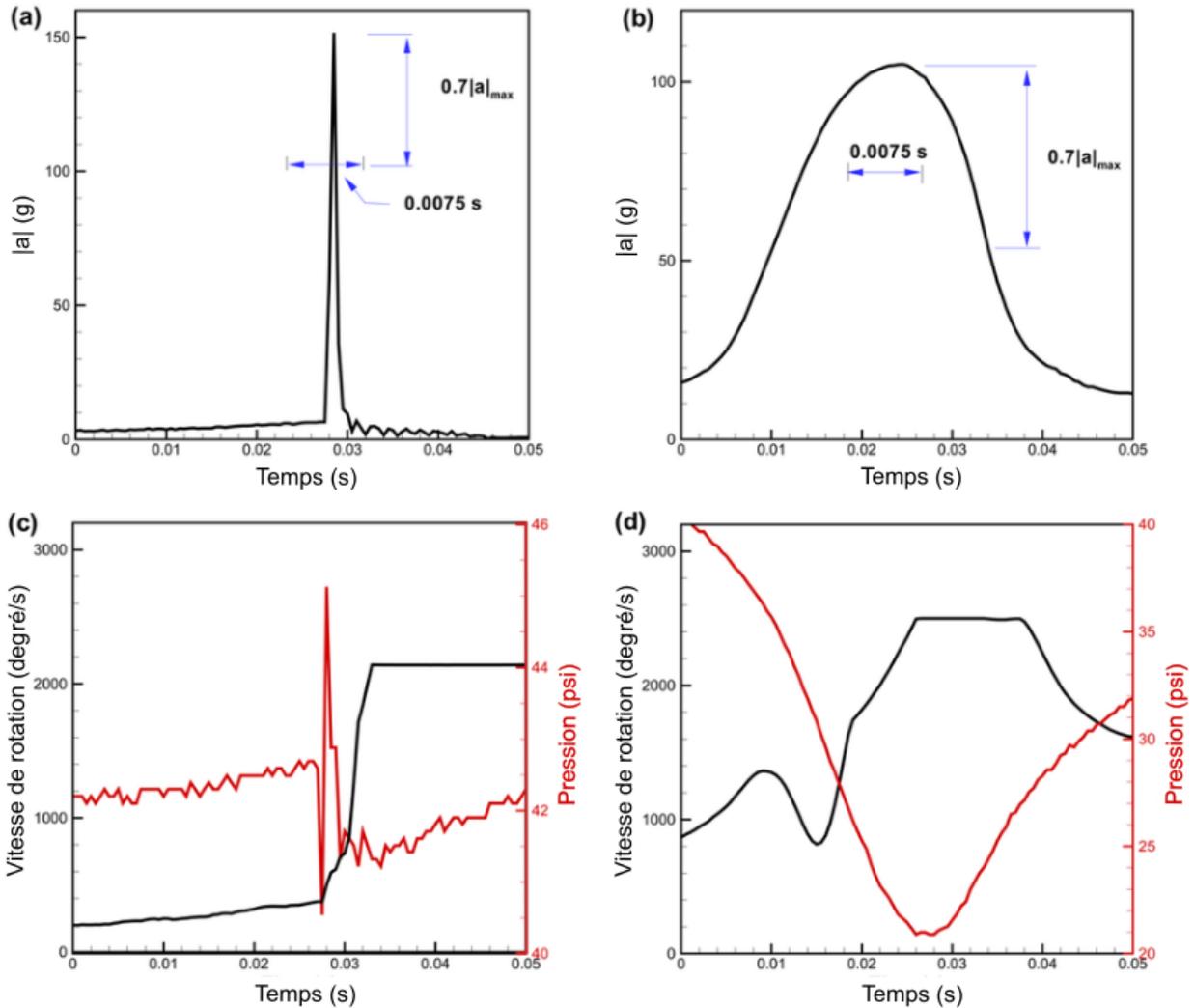


Figure 5. La durée de l'accélération ($|a|$, où $g = m/s^2$) dans les 70 % de la valeur maximale est a) inférieure à 0,0075 seconde pour une collision; b) supérieure à 0,0075 s pour un cisaillement. La pression (lignes rouges) et la rotation (lignes noires) augmentent plus fortement lors c) d'une collision que lors d) d'un cisaillement.

Pour quantifier la collision entre les poissons-capturs et les objets rigides lors du passage dans une structure hydraulique, deux indices d'intensité de collision (HIT) ont été élaborés en utilisant les taux de changement de 750 ensembles de données de poissons-capturs réussis (rapportés dans Martinez *et al.* 2019a) : un indice HIT a été développé à partir de mesures de pression (M_P), et l'autre à partir d'estimations de la vitesse d'impact dérivées de mesures d'accélération (M_V) [Daniel Deng, Pacific Northwest National Laboratory, comm. pers.]. Bien qu'elles soient encore en cours de développement, des études préliminaires utilisant des saumons chinooks juvéniles ont montré que les indices HIT peuvent être utilisés pour quantifier la gravité potentielle des collisions avec des poissons vivants dans le cadre d'études sur le terrain, mais les seuils métriques ne sont pas censés être prédictifs des blessures subies par les poissons (Daniel Deng, Pacific Northwest National Laboratory, comm. pers.). Les saumons du Pacifique juvéniles sont plus susceptibles d'être blessés lorsque M_V et M_P sont

supérieurs à certains seuils, et la probabilité de blessures est beaucoup plus faible lorsque leurs valeurs sont inférieures à ces seuils. Les seuils peuvent varier selon les types de turbines et les espèces de poissons, et à l'heure actuelle, peu d'entre eux ont été calculés. Les seuils ci-dessus ont été créés à partir des données de survie sur 48 heures de 1 030 saumons chinooks juvéniles passant par une grande turbine Kaplan (Heisey *et al.* 2019), bien que des seuils similaires puissent être dérivés pour d'autres scénarios (c.-à-d. d'autres types de turbines et d'autres espèces de poissons) si des données de survie sont disponibles.

Analyse statistique

On a effectué de tests de normalité et d'homogénéité de la variance sur les données de pression (nadir et RVP) en utilisant le test de Shapiro-Wilks et le test de Levene, respectivement. Le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les paramètres de pression (nadir et RVP) entre les déploiements de traitement et de contrôle. La proportion d'essais présentant des événements graves (collisions et cisaillements) a été comparée entre les traitements et les contrôles à l'aide d'un test χ^2 . Le filtrage des données, la détermination ou le calcul des paramètres et la comparaison statistique ont été effectués à l'aide de R-studio (R Core Team, 2019, version 4.2.2). Les événements de collision et de cisaillement ont été déterminés à partir de l'HBET. Le niveau de signification statistique est $\alpha < 0,05$.

Résultats

Comportement lors des passages volontaires

Les données télémétriques n'ont pas permis de prouver le passage des poissons dans la TTFHC (Tuononen *et al.* 2022b). Aucune mortalité après l'étiquetage n'a été détectée. L'efficacité de la détection dépendait de la distance entre l'étiquette et le récepteur, et variait de 70 % à 72 % à 7 m, et de 13 % à 66 % à 19 m. Sur les 138 poissons étiquetés, cinq ont été détectés en aval des TTFHC; en fonction de la dernière détection du récepteur, on a déterminé que trois d'eux étaient probablement passés par le déversoir. Les deux poissons restants ont peut-être emprunté une autre voie vers l'aval, à travers une série de canaux ou par un transfert dans un vivier. Des crapets de roche, des achigans à petite bouche, des achigans à grande bouche et des grands brochets ont été détectés dans la zone du bassin d'admission (Figure 6). Cependant, aucun des poissons étiquetés, incluant des barbares de rivière (6), des meuniers noirs (6), des dorés jaunes (3) ou des crapets-soleils (1), n'a été détecté dans le bassin d'admission, et les poissons sont généralement restés près de leur site de remise à l'eau. Pour les espèces qui ont été détectées dans les trois zones de bassin d'admission (Figure 4), le temps de résidence moyen cumulé était beaucoup plus faible dans la zone de bassin d'admission à très faible hauteur de chute que dans les autres zones de bassin d'admission pour toutes les espèces, à l'exception de l'achigan à petite bouche (Figure 7). La plupart des détections de poissons dans le bassin d'admission ont eu lieu entre juin et novembre, mais en hiver, il y a eu des détections isolées liées au crapet de roche et à l'achigan à petite bouche. Des résultats télémétriques plus détaillés sont disponibles dans Tuononen *et al.* (2022b).

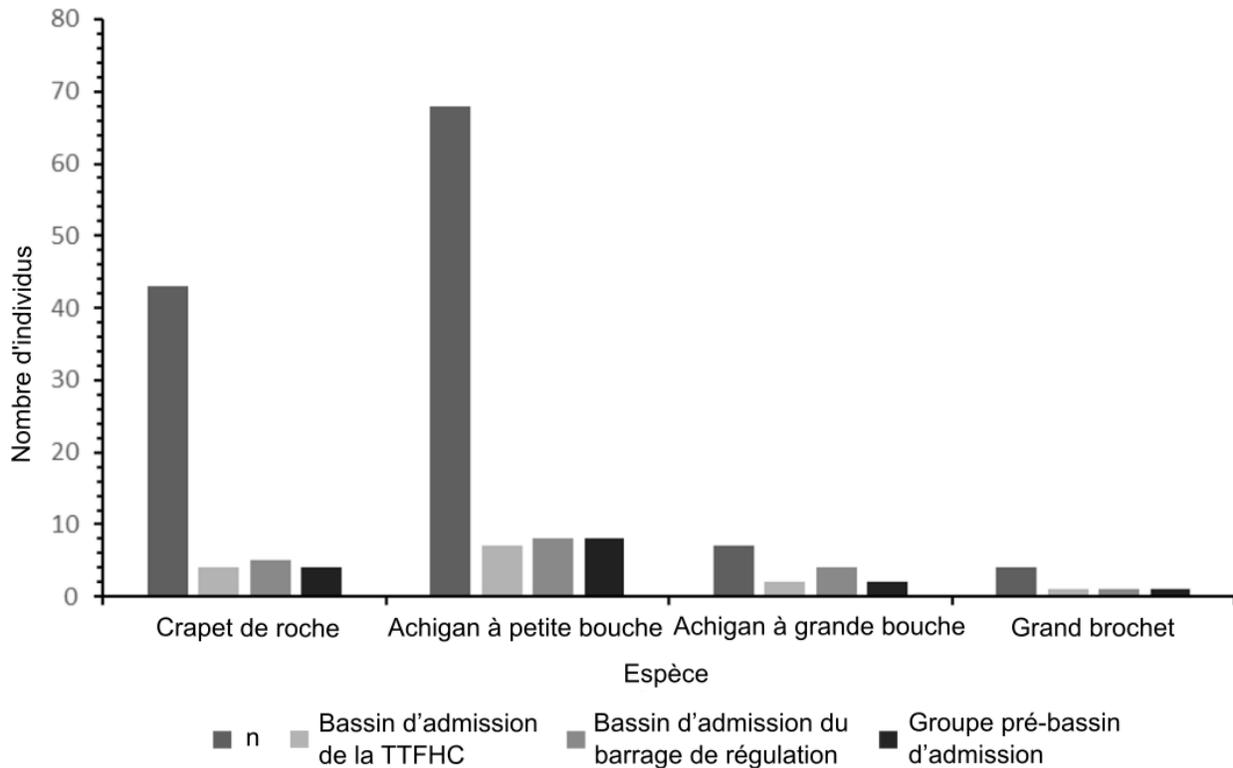


Figure 6. Adapté de Tuononen et al. (2022b). Le nombre total de poissons individuels des espèces détectées dans les zones du bassin d'admission du complexe de production de Wasdell Falls sur la rivière Severn (en Ontario, Canada) dans chacun des trois groupes de stations du bassin d'admission (1-Bassin d'admission à très faible hauteur de chute, 2-Bassin d'admission du barrage de régulation des eaux, et 3-Bassin d'admission; voir Figure 4c), au cours de l'étude. n représente le nombre total d'individus de chaque espèce qui sont étiquetés.

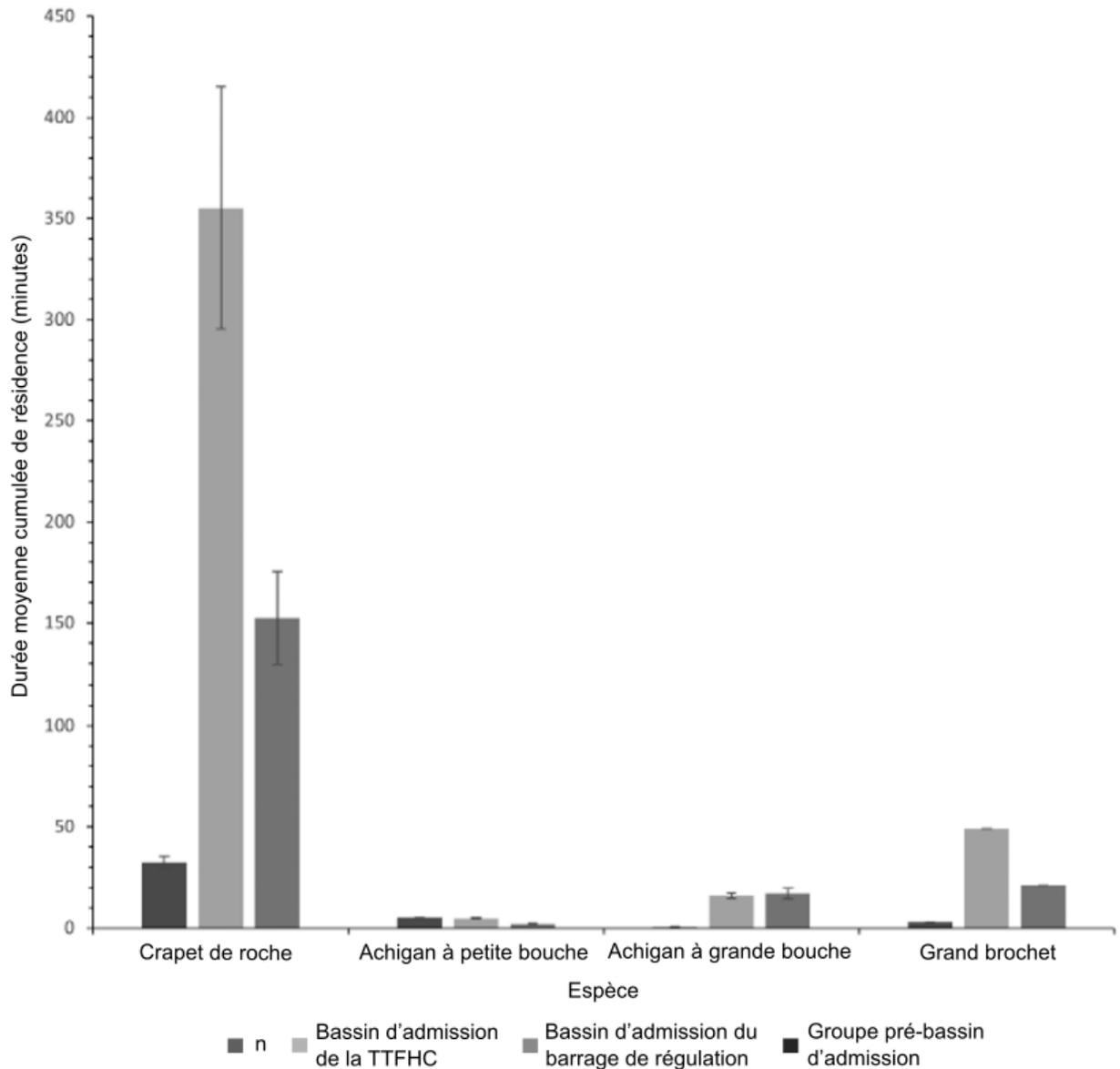


Figure 7. Adapté de Tuononen et al. (2022b). Temps de résidence cumulé moyen (minutes avec erreur-type) par espèce et par lieu dans les zones de bassin d'admission en amont de l'infrastructure de Wasdell Falls sur la rivière Severn, au Canada.

Passage de poissons vivants

Au total, 86 poissons ont reçu le traitement expérimental de passage, tandis que 55 ont reçu le traitement de contrôle (Tuononen et al. 2022a). Les deux traitements comprenaient des individus représentatifs de la gamme de tailles étiquetables capturées dans la rivière Severn pour les cinq espèces incluses. Les blessures les plus fréquemment observées étaient des lésions cutanées, des hémorragies mineures et des yeux troubles. Elles étaient répandues chez tous les poissons avant et après l'évaluation, probablement en raison de blessures préexistantes ou de la capture, de la manipulation et de la détention dans des enclos à filet.

Cependant, il n'y a pas eu de différences significatives dans la fréquence de ces blessures entre les groupes de contrôle et de traitement avant le passage et après le passage (PERMANOVA – toutes les interactions n'étaient pas significatives – Figure 8; voir également le tableau 4 dans Tuononen *et al.* 2022a). Il n'y a eu qu'un seul cas confirmé de mortalité liée à la turbine, résultat de la décapitation partielle d'un seul grand brochet. Aucune blessure indiquant un barotraumatisme n'a été observée dans l'un ou l'autre traitement. Le taux de mortalité immédiate dans le groupe de traitement a atteint 6,25 % (1/16, IC à 95 % [0,32, 28,33]) pour le grand brochet, tandis que le taux de mortalité immédiate dans le groupe de traitement a été de 1,16 % pour toutes les espèces. Le taux relatif de mortalité immédiate était 30 % plus élevé dans le groupe traité que dans le groupe témoin (tableau 1). La mortalité différée après traitement, évaluée par télémétrie acoustique, a déterminé une seule mortalité après passage dans chacun des groupes de contrôle (achigan à petite bouche [1/13]) et de traitement (achigan à grande bouche [1/7]) (tableau 2). Le taux de mortalité différée dans le groupe de traitement était de 2,6 % et dans le groupe de contrôle de 3,7 % pour toutes les espèces, mais les intervalles de confiance à 95 % basés sur la distribution binomiale pour nos petites tailles d'échantillon suggèrent que la mortalité différée pourrait être aussi élevée que 18 %. Le taux relatif de mortalité différée était inférieur de 29 % dans le groupe de traitement, compte tenu de la taille plus importante de l'échantillon du groupe de traitement par rapport au groupe de contrôle. Notre capacité à détecter un taux de 10 % de mortalité immédiate et différée dans les groupes de traitement était raisonnable (0,98 et 0,54, respectivement), mais une capacité adéquate à détecter des taux de mortalité plus faibles, comme ceux observés, aurait nécessité des tailles d'échantillon supérieures à 1 000. Des résultats plus détaillés sont disponibles dans Tuononen *et al.* (2022a).

Tableau 1. Taille des échantillons et résultats des essais de passage de poissons vivants, et estimations du pourcentage absolu (intervalles de confiance à ± 95 %) et du risque relatif de mortalité immédiate. Pour tenir compte de l'absence de mortalité immédiate dans le groupe de contrôle, le nombre total de poissons morts et survivants a été augmenté d'une unité dans les groupes de traitement et de contrôle. D'après l'équation 1 (RR) : (T) = N^{bre} de poissons de traitement tués, (C) = N^{bre} de poissons de contrôle tués, (n1) = N^{bre} de poissons de traitement relâchés, et (n2) = N^{bre} de poissons de contrôle relâchés.

Mortalité immédiate	N^{bre} de poissons tués	N^{bre} de poissons survivants	Total des poissons relâchés	% de mortalité absolue (IC, 95 %)	% de risque relatif de mortalité différée
Traitement	1	85	86	1,16 (0,06, 6,30)	-
Contrôle	0	55	55	0 (0,00, 6,52)	-
Traitement +1	2 (T)	86	88 (n1)	-	30
Contrôle +1	1 (C)	56	57 (n2)	-	

Tableau 2. Taille des échantillons et résultats des essais de passage de poissons vivants, et estimations du pourcentage absolu (intervalles de confiance à $\pm 95\%$) et du risque relatif de mortalité différée. D'après l'équation 1 (RR) : (T) = N^{bre} de poissons de traitement tués, (C) = N^{bre} de poissons de contrôle tués, (n1) = N^{bre} de poissons de traitement relâchés, et (n2) = N^{bre} de poissons de contrôle relâchés.

Mortalité différée	N ^{bre} de poissons tués	N ^{bre} de poissons survivants	Total des poissons relâchés	% de mortalité absolue (IC, 95 %)	% de risque relatif de mortalité différée
Traitement	1 (T)	37	38 (n1)	2,63 (0,13, 13,49)	-29
Contrôle	1 (C)	26	27 (n2)	3,70 (0,19, 18,28)	

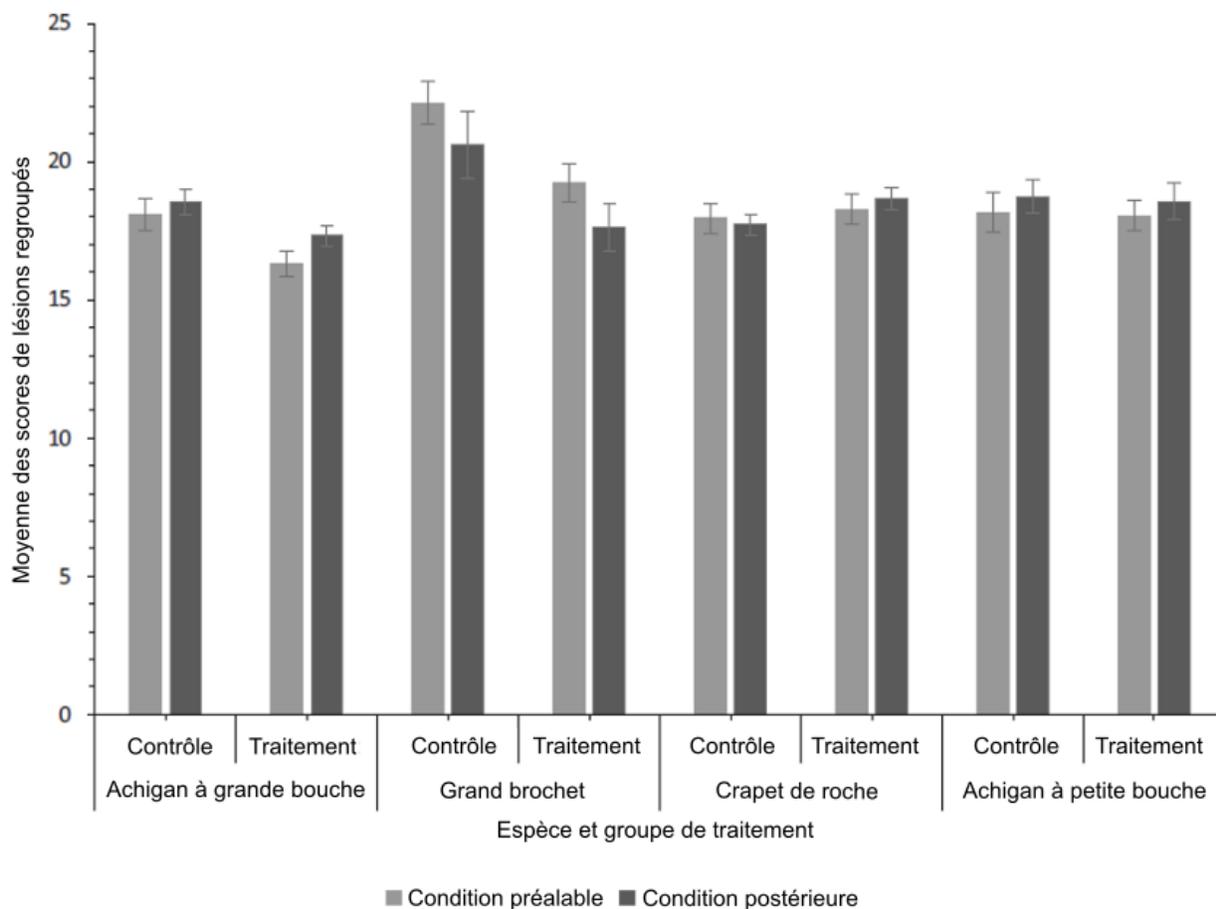


Figure 8. Moyenne des scores de blessures, par espèce, pour les poissons chassés par la TTFHC (traitement) et par la vanne de crête de la TTFHC (contrôle). Les scores avant et après sont indiqués avec erreur-type.

Déploiement de poissons-captureurs

Bien que nous ayons effectué 34 déploiements répétés dans les deux séries de traitement et de contrôle, les données de 13 déploiements de traitement ont été retirées de l'analyse de la pression parce que les capteurs n'enregistraient pas correctement (n = 5), semblaient s'accrocher pendant la chasse ou le passage, ce qui réduisait la capacité à saisir avec précision

des régions particulières dans les données (n = 5, exemple dans la Figure 9a), ou fournissaient des traces non caractéristiques rendant trop difficile le positionnement précis des horodateurs (n = 3, exemple dans la Figure 9b). Aucune donnée relative aux déploiements de contrôle n'a été supprimée (tableau 3).

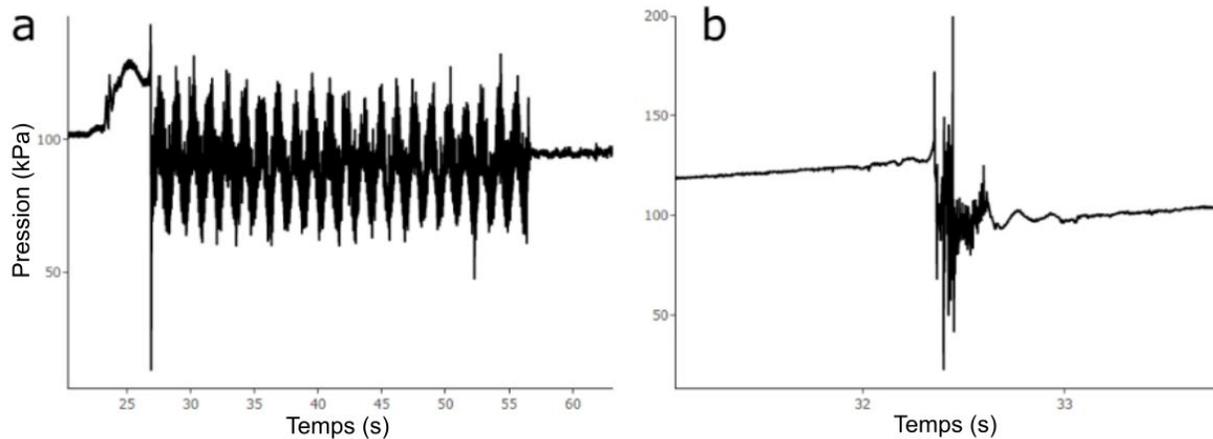


Figure 9. Exemples d'enregistrements du traitement du poisson-capteur qui n'ont pas été inclus dans les analyses de données : a) le poisson-capteur s'est « accroché » à quelque chose après avoir traversé la turbine; on ne sait pas exactement quel est le véritable nadir; b) région de passage dans la turbine; on ne sait pas exactement où placer l'horodatage pour saisir le véritable nadir.

Nadir de pression

Les données relatives à la pression n'étaient pas distribuées de façon normale et les variances n'étaient pas homogènes, bien que les moyennes et les valeurs médianes soient similaires (tableaux 3 à 5). Des différences significatives ont été détectées dans les nadirs de pression entre les groupes de traitement et de contrôle (médianes : U = 630, p < 0,001). Comme on pouvait s'y attendre, les valeurs médianes et moyennes du nadir étaient plus basses pour les traitements que pour les contrôles (tableau 3).

Tableau 3. Nadir de pression moyen et médian (kPa) pour les groupes de contrôle et de traitement pour le poisson-capteur.

Traitement	N	Moyen	Médiane	Gamme
Contrôle	30	99,80	99,39	93,77-101,49
Traitement	21	83,40	86,25	61,50-89,29

Rapport de variation de pression – acclimatation/nadir

Les médianes de RVP du groupe de contrôle et du groupe de traitement étaient significativement différentes (U = 0, p < 0,001), quelle que soit la profondeur d'acclimatation. La médiane de RVP était plus élevée dans le groupe de traitement que dans le groupe de contrôle (tableau 4). En utilisant une pression d'acclimatation proche de la pression de surface (101,3 kPa), le RVP médian du traitement était de 1,17 (tableau 4). Les valeurs médianes de RVP du traitement ont augmenté jusqu'à 1,86 lorsqu'on a utilisé une pression d'acclimatation proche de la pression à une profondeur de 6 m (160,2 kPa) (tableau 5). Les estimations de la

probabilité moyenne et médiane de blessures mortelles dues à la décompression (tableau 6) étaient plus faibles pour le scénario de RVP d'acclimatation en surface (scénario optimal) que pour le scénario d'acclimatation à la profondeur (6 m – pire scénario). Les deux espèces de lamproies avaient une probabilité de mortalité estimée à 0 % dans les scénarios d'acclimatation à la surface et à la profondeur. Pour les espèces autres que la lamproie, la probabilité moyenne de blessures mortelles dans le scénario d'acclimatation à la surface variait de 0,43 % à 12,70 % (médiane – de 0,32 % à 9,01 %), tandis que les estimations dans le scénario d'acclimatation à la profondeur variaient largement, de 3,52 % à 66,70 % (médiane – de 2,62 % à 62,90 %). En ce qui concerne les espèces pertinentes pour le site de TTFHC de Wasdell, le crapet arlequin (*Lepomis macrochirus*) et l'achigan à grande bouche présentaient la probabilité moyenne la plus élevée de blessures mortelles dans les deux scénarios d'acclimatation, tandis que le maskinongé tigré (*Esox masquinongy* × *lucius* ou *Esox lucius* × *masquinongy*) et le doré jaune présentaient la probabilité la plus faible (tableau 6).

Tableau 4. Rapport de changement de pression (RVP) moyen et médian pour les groupes de contrôle et de traitement de poissons-capteurs acclimatés à la surface.

Traitement	n	RVP moyen	RVP médian	Gamme
Contrôle	30	1,03	1,02	1,00-1,08
Traitement	21	1,23	1,17	1,14-1,65

Tableau 5. Rapport de changement de pression (RVP) moyen et médian pour les groupes de contrôle et de traitement de poissons-capteurs acclimatés à une profondeur de 6 m.

Traitement	n	RVP moyen	RVP médian	Gamme
Contrôle	30	1,62	1,61	1,58-1,71
Traitement	21	1,94	1,86	1,79-2,60

Tableau 6. Estimation de la probabilité d'une blessure mortelle due à une décompression rapide pour différentes espèces de poissons. Les estimations moyennes et médianes sont fournies pour les scénarios dans lesquels les poissons peuvent être acclimatés à la pression de surface (0 m) et à la profondeur (6 m).

Espèce de poissons	Probabilité estimée à la profondeur d'acclimatation de 0 m (%)		Probabilité estimée à la profondeur d'acclimatation de 6 m (%)	
	Moyenne	Médiane	Moyenne	Médiane
Crapet arlequin* (<i>Lepomis macrochirus</i>)	12,70	9,01	66,70	62,90
Achigan à grande bouche* (<i>Micropterus salmoides</i>)	6,74	4,67	45,4	40,30
Maskinongé tigré* (<i>Esox lucius</i> X <i>E. masquinongy</i> – substitut du grand brochet et du maskinongé)	2,89	2,63	6,78	6,21
Doré jaune (juvénile)* (<i>Sander vitreus</i>)	1,28	1,10	4,52	3,92
Alose savoureuse (<i>Alosa sapidissima</i>)	1,48	1,07	11,60	9,00
Lamproie de rivière (<i>Lampetra planeri</i>)	0,00	0,00	0,00	0,00
Saumon chinook (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	0,90	0,71	4,97	4,01
Kokani (<i>Oncorhynchus nerka</i>)	0,43	0,32	3,52	2,62
Lamproie du Pacifique (<i>Entosphenus tridentatus</i>)	0,00	0,00	0,00	0,00
Truite arc-en-ciel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	1,11	0,95	4,11	3,54

* Espèces présentes sur le site à TTFHC des chutes de Wasdell.

Événements de collision et cisaillement – Indice HIT

Sur les 21 poissons relâchés du groupe de traitement qui portaient un capteur et ayant été retenus pour les analyses, 16 événements graves ont été observés pour 10 poissons relâchés : 15 collisions et 1 cisaillement (tableau 7). 9 de ces 15 collisions (60 %) se sont produites dans la zone de l'appareil de chasse (T0-T1) pour 7 des 21 poissons relâchés du groupe de traitement (33 %). Pour les zones de passage dans des turbines (T1-T3), 5 (24 %) poissons relâchés ont subi des collisions graves, dont 1 dans la zone T1-T2 et 4 dans la zone T2-T3. Parmi ces événements graves, 1 (5 %) avait une valeur de l'indice M_V supérieure au seuil de 3,45 (région T1-T2) et 1 (5 %) avait une valeur de l'indice M_P supérieure au seuil de 8,46 m/s (région T2-T3) [tableau 7]. Pour les poissons relâchés du groupe de contrôle qui portaient un capteur, 16 sur 30 (53 %) ont connu des événements graves, qui se sont tous produits dans la zone de l'appareil de chasse (T0-T1). Un seul poisson relâché du groupe de contrôle qui portait un capteur présentait une valeur d'indice M_V supérieure au seuil de 3,45 m/s (3 %). Aucun poisson relâché du groupe de contrôle n'a eu une valeur d'indice M_P supérieure au seuil de 8,46 m/s.

**Réponse des Sciences : Risques pour les
poissons liés aux installations de
turbines à très faible hauteur de chute**

Région de l'Ontario et des Prairies

Tableau 7. Renseignements détaillés sur les événements graves observés lors de la remise à l'eau des poissons portant un capteur où Max Acc est l'accélération maximale en G, et M_V et M_P sont les indices métriques de l'intensité de la collision pour la vitesse et la pression, respectivement. Les valeurs M_V supérieures à 3,45 m/s et les valeurs M_P supérieures à 8,46 m/s, qui sont toutes deux considérées comme ayant une forte probabilité de causer des blessures aux poissons vivants, sont indiquées en caractères gras.

Nom du fichier	Max Acc	Zone	Type d'événement	M_V	M_P
SF 10	142,38	T0-T1	Collision	1,78	1,34
	108,43	T0-T1	Collision	0,81	2,83
SF 11	164,5	T1-T2	Collision	3,66	2,68
	113,48	T2-T3	Cisaillement	S.O.	S.O.
SF 12	160,22	T2-T3	Collision	0,96	4,01
SF 13	111,68	T0-T1	Collision	1,81	1,70
SF 14	169,18	T0-T1	Collision	1,23	3,07
SF 16	116,55	T0-T1	Collision	1,40	2,76
	125,94	T0-T1	Collision	1,12	3,24
SF 1	237,65	T2-T3	Collision	0,74	9,12
	153,48	T2-T3	Collision	0,99	4,02
SF 2	234,75	T0-T1	Collision	1,52	4,34
	175,35	T2-T3	Collision	0,95	2,32
SF 6	119,14	T0-T1	Collision	1,48	1,78
SF 8	97,15	T0-T1	Collision	0,77	3,45
	105,08	T2-T3	Collision	0,62	2,17

Discussion

Il serait possible de généraliser l'utilisation des TTFHC dans les structures de régulation des eaux de l'ensemble du Canada qui sont actuellement dépourvues d'infrastructure hydroélectrique (RNCAN 2018). Lors de la conception de cette technologie de turbine, plusieurs considérations en lien avec le « respect des poissons » (voir US Department of Energy 1999) ont été incorporées, y compris la réduction des gradients de vitesse et de pression, la vitesse d'écoulement, et le nombre et la forme des aubes d'écoulement (Fraser *et al.* 2007).

Cependant, peu d'évaluations des TTFHC et de leurs retombées potentielles sur les poissons sauvages ont été réalisées et, en particulier, les données concernant les espèces de poissons d'Amérique du Nord font défaut (Tuononen *et al.* 2022a). Nous avons utilisé la télémétrie acoustique pour évaluer le risque d'entraînement des poissons résidents, des essais de passage de poissons vivants pour déterminer les taux de blessure et de mortalité des poissons entraînés, et des essais de passage de poissons-capteurs pour mieux comprendre les conditions physiques subies par les poissons pendant le passage. Les résultats de la télémétrie et des essais avec poissons vivants suggèrent que le risque pour cette communauté de poissons est faible (Tuononen *et al.* 2022b). Bien que les données sur la pression obtenues lors des essais de passage des capteurs confirment largement celles obtenues lors du passage des poissons vivants, elles ont permis de déceler un risque de blessures par barotraumatisme plus

important que celui suggéré par les essais sur les poissons vivants. Un plus grand nombre de passages de poissons-capturs ont documenté des événements de collision et de cisaillement que le nombre suggéré par les essais sur les poissons vivants, bien que la plupart de ces événements n'aient pas été considérés comme suffisamment graves pour causer des blessures. Dans l'ensemble, le risque pour cette communauté de poissons lié à l'installation de TTHC semble faible, mais une discussion sur les limites concernant l'application à grande échelle de ces résultats est en cours.

Le risque d'entraînement pour la communauté de poissons de la rivière Severn, en amont des TTHC à Wasdell Falls, semble faible. La communauté de poissons en amont des TTFHC ne semble pas avoir une forte propension comportementale à se déplacer en aval. Cependant, nous avons observé certains passages vers l'aval (environ 1 % des poissons étiquetés) passant par le déversoir adjacent aux TTFHC. Le débit du canal de dérivation est un facteur prédictif important de l'utilisation du canal de dérivation par les poissons (Knott *et al.* 2023), avec un débit de dérivation de 2 % à 10 % du débit de la turbine communément cité comme le minimum pour une bonne efficacité de dérivation, mais la détermination du débit requis nécessite la prise en compte de l'emplacement de la dérivation, des conditions hydrauliques et d'autres aspects du site qui sont connus pour influencer l'efficacité de la dérivation (Klopries *et al.* 2018, Larinier et Travade 2002). Bien qu'il n'ait pas été spécialement conçu pour la dérivation des poissons, le déversoir de Wasdell Falls a toujours reçu un débit bien au-delà de 2 % du débit de la turbine en 2017 et 2018, et peut donc être un canal de dérivation intéressant, même si sa sécurité et son efficacité sont inconnues. Le débit annuel moyen à Wasdell Falls a été plus élevé que la moyenne pendant la partie télémétrique de cette étude, avec un débit turbinable maximal atteint pendant une grande partie du printemps 2018. Les taux d'entraînement des turbines sont souvent positivement corrélés au débit (Ransom et Steig 1994, Knott *et al.* 2023, Yao *et al.* 2023), mais nous n'avons trouvé aucune preuve du passage des poissons étiquetés dans les turbines. Il convient de reconnaître l'absence générale apparente de propension comportementale à se déplacer en aval dans la communauté de poissons située en amont de la TTFHC de Wasdell Falls. On sait qu'au sein des espèces de poissons d'eau douce non migrateurs, il existe des variations dans la propension à se déplacer en aval à travers des infrastructures hydroélectriques (Knott *et al.* 2020). Donc, le risque global d'entraînement pour la communauté variera d'une communauté de poissons à l'autre en fonction de l'appartenance à la communauté.

Il est possible que le risque d'entraînement soit plus élevé dans les systèmes ne disposant pas d'une alternative à la TTFHC pour le passage en aval (c.-à-d. un déversoir séparé). Pourtant, lorsque les TTFHC produisent de l'énergie, elles fonctionnent avec une proportion d'eau se déversant par-dessus la vanne de crête (Figure 2c), ce qui peut constituer une voie en aval relativement sûre, comme le montrent les poissons de contrôle et les capteurs qui sont descendus par l'intermédiaire du débit de la vanne de crête. La profondeur à la base du barrage à TTFHC varie de 2,5 m (faible débit) à 4 m (crues nivales; G. Hepinstall, Wasdell Falls Hydro Project/Bracebridge Generation Ltd., comm. pers.). En observant l'alose d'été (*Alosa aestivalis*) exposée à des conditions similaires dans des marmites torrentielles, on a constaté une survie après 96 h de plus de 90 % (Castro-Santos *et al.* 2021), ce qui confirme l'idée que le passage de la vanne de crête sur ce site de TTFHC constitue une option viable de passage en aval pour les poissons. En outre, alors que les vitesses de l'eau à la prise d'eau de la turbine ont été signalées comme étant beaucoup plus faibles que la vitesse de nage critique maximale connue pour la plupart des poissons (c.-à-d. qu'on a signalé une vitesse de prise d'eau de 3-21 cm s⁻¹ dans Tuononen *et al.* 2022b), elles sont en fait plus élevées que cela en raison d'une erreur d'unité (c.-à-d. qu'elle aurait dû être de 3-21 m³/s, qui est une unité de décharge de mètres

cubes par seconde). Les vitesses de prise d'eau à la structure en béton derrière les grilles pour retenir les débris auraient une vitesse moyenne estimée à 66 cm s⁻¹ à 20 m³/s (débit turbinable maximal) et à 16,7 cm s⁻¹ à 5 m³/s (J. Stasiuk, Bracebridge Generation, comm. pers.). Toutefois, la vitesse à laquelle les poissons sont soumis varie d'une vitesse plutôt faible au niveau du moyeu de la roue mobile et dans les coins de la structure, à une vitesse maximale au niveau des aubes de la roue mobile, où se trouve une forme d'anneau à vitesse accélérée. Pour les espèces signalées dans Tuononen *et al.* (2022b), un nageur fort comme l'achigan à petite bouche n'aurait probablement pas de problème à éviter l'entraînement, mais un nageur plus faible comme le crapet de roche pourrait être involontairement entraîné s'il entrait dans la grille pour retenir les débris et tombait sur une zone à grande vitesse. Toutefois, il est également important de tenir compte du fait que les poissons peuvent passer volontairement à travers la turbine ou au-dessus de celle-ci, et que le comportement des poissons dans un site donné doit être considéré dans l'évaluation des risques à l'échelle de la population. Il est à noter que l'on a souvent vu des achigans à petite bouche se rassembler à l'extrémité en amont du barrage, au-dessus de la turbine, en demeurant immobiles sans problème malgré le courant (G. Hepinstall, Wasdell Falls Hydro Project/Bracebridge Generation Ltd., comm. pers.; Figure 2d).

Bien que de nombreuses blessures aient été constatées sur les poissons utilisés dans les essais de passage de poissons vivants, beaucoup de ces blessures étaient présentes avant le passage. Les poissons étiquetés acoustiquement utilisés dans les essais de passage ont été gardés pendant la nuit dans une zone calme de la rivière dans des enclos en filet afin de surveiller leur état post-opératoire. Pour assurer l'uniformité des manipulations, tous les poissons utilisés dans les essais de passage de poissons vivants ont été gardés pendant la nuit dans des enclos en filet avant d'être utilisés. Les blessures les plus courantes observées étaient dues à l'abrasion (Tuononen *et al.* 2022a). Des études antérieures sur les blessures résultant de l'utilisation des enclos en filet ont fait état d'effilochage des nageoires, de blessures à la bouche et de perte d'écaillés (Colotelo *et al.* 2013a,b), ce qui correspond aux blessures les plus courantes observées. Les taux de blessures par abrasion ne différaient pas entre les traitements expérimentaux et les traitements de contrôle, ce qui suggère que les pratiques de capture et de manipulation partagées par les groupes expérimentaux et les groupes de contrôle – qu'il s'agisse de la méthode de capture (pêche à la ligne, pêche électrique), du temps passé dans l'enclos en filet, du passage dans l'appareil de chasse ou de la manipulation liée à l'évaluation de la condition physique avant et après le passage expérimental –, et non le passage dans la turbine, étaient responsables de ces blessures. La présence de blessures dues à l'abrasion chez les poissons des groupes de traitement et de contrôle était élevée avant les traitements, ce qui suggère que le temps passé dans les enclos en filet était la cause principale de ces blessures. Cependant, les blessures par abrasion avant les essais de passage de poissons vivants pourraient avoir masqué les blessures subies pendant la chasse et le passage dans des turbines. La plupart des nouvelles blessures observées après les traitements expérimentaux et de contrôle ont probablement été infligées par l'appareil de chasse. En effet, les essais de passage avec capteurs ont mis en évidence un risque élevé de collision (de 33 % à 60 %) pendant la partie relative à l'appareil de chasse du traitement et du contrôle. Les faibles vitesses d'eau à l'entrée de la turbine faisaient en sorte que l'appareil de chasse devait entraîner des poissons (non anesthésiés), mais un poisson résident ne connaîtrait jamais cette situation lors du passage dans une TTFHC. Il convient de noter que notre groupe de contrôle, qui est passé par la vanne de crête de la TTFHC, pourrait être considéré comme un traitement de rechange. Bien que nous nous attendions à ce qu'une chute de la vanne de crête au déversoir soit relativement bénigne, ce qui est confirmé par les

données des poissons-capteurs, nous ne pouvons pas exclure la possibilité de blessures résultant de cette composante du passage du groupe de contrôle. Il faut veiller à ce que les groupes de contrôle ne soient pas exposés à des sources potentielles de préjudice autres que celles qu'ils partagent, en raison de leur conception, avec le groupe de traitement.

Malgré l'absence de blessures plus importantes chez les poissons du groupe de traitement par rapport à ceux du groupe de contrôle, le passage dans la TTFHC n'était pas sans risque de blessures. Il existe un lien indéniable entre la longueur des poissons et la collision avec les aubes lors du passage dans la turbine (Ferguson *et al.* 2008) et, par conséquent, les espèces au corps allongé et/ou les individus d'espèces plus longues sont généralement plus exposés au risque de collision avec une aube. La plupart des poissons utilisés dans les essais de passage étaient fusiformes (achigan à petite bouche, achigan à grande bouche et doré jaune) ou compressiformes (crapet de roche), et ces types de corps devraient être moins à risque de subir des blessures. Le grand brochet est la seule espèce au corps allongé et il s'avère que la seule incidence de blessure mortelle a été une décapitation partielle chez un adulte de cette espèce. Bien que les phénomènes de cisaillement puissent entraîner une décapitation (Stokesbury et Dadswell 1991), il est peu probable que le gradient de vitesse maximal rapporté pour les TTFHC (10 m s⁻¹ m⁻¹, rapporté dans Fraser *et al.* 2007) soit capable de causer une telle blessure. La blessure mortelle du grand brochet provenait d'un broyage ou d'un placage contre l'aube (Cooke *et al.* 2011) entre le boîtier de la turbine ou la grille pour retenir les débris et l'aube de la turbine. L'extrapolation de ce résultat doit être faite avec prudence. La taille de notre échantillon de grands brochets était faible (16 individus dans le traitement expérimental) et une grande incertitude demeure quant au taux de mortalité attendu pour les brochets à cette TTFHC. Les données de poissons-capteurs suggèrent que le risque de collision associé au passage des poissons dans la zone de la turbine peut atteindre environ 24 %, avec environ 9,5 % de passages susceptibles de causer des blessures, mais ces capteurs ne sont pas conçus pour reconnaître les événements de broyage ou de placage. Aucune collision n'a été clairement observée lors des essais sur les poissons vivants et, par conséquent, l'estimation des blessures causées par les collisions fournie par les poissons-capteurs est plus élevée que celle attendue en fonction des essais sur les poissons vivants. Les poissons-capteurs sont inanimés et plus petits que les poissons utilisés dans les essais sur les poissons vivants. Il reste à déterminer dans quelle mesure les données sur les collisions fournies par les capteurs se traduisent par un risque de collision pour les poissons vivants (Pauwels *et al.* 2020). Il est possible que certains poissons vivants aient subi des collisions n'ayant pas été détectées dans l'évaluation des blessures après le passage, ce qui sous-estime le risque réel de blessure associé au passage des poissons vivants. On ne cherchait que les blessures externes chez les poissons vivants, mais les blessures internes ne sont pas toujours détectables lors d'un examen externe (Mueller *et al.* 2020). Donc, les lésions internes pourraient passer inaperçues. En outre, les seuils de blessure utilisés dans la présente étude, qui ont été mis au point pour les saumons du Pacifique juvéniles, n'étaient pas censés être prédictifs, et on ne sait pas dans quelle mesure ces seuils s'appliquent à d'autres espèces, y compris celles que l'on trouve dans la rivière Severn.

Les taux de mortalité globaux à la TTFHC de Wasdell Falls étaient similaires aux estimations les plus récentes de mortalité par entraînement à très faible hauteur de chute rapportées dans la documentation (Lagarrigue 2013). Lagarrigue (2013) rapporte des taux de mortalité de 1,1 % à 4,4 % à 50 % d'ouverture des aubes et à la périphérie de la turbine, avec des taux de mortalité différée (48 h) de 3,45 % pour la petite carpe commune (*Cyprinus carpio*) et de 6,7 % pour la grosse truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Nos valeurs absolues pour la mortalité immédiate et différée reflètent étroitement les résultats de Lagarrigue, malgré les différences

dans les espèces utilisées. Toutefois, nos petites tailles d'échantillon ont entraîné de grands intervalles de confiance à 95 %. Une étude systématique récente sur les risques relatifs de mortalité et de blessures pour les poissons lors du passage en aval des barrages hydroélectriques a révélé que le passage dans des turbines à plus forte hauteur s'accompagnait d'une augmentation significative du risque de blessures (406 %) et de mortalité immédiate (283 %) par rapport aux contrôles (Algera *et al.* 2020). Le type de turbine a été un modérateur significatif de ces résultats, les turbines Kaplan présentant un risque relatif plus faible (144 % d'augmentation du risque de mortalité immédiate) que les turbines Francis (522 % d'augmentation du risque de mortalité immédiate) par rapport aux contrôles. De nombreuses caractéristiques « respectueuses des poissons » ont été incorporées dans la conception des TTFHC (p. ex., bords d'attaque émoussés des aubes, faible vitesse périphérique, faible pression et gradients de vitesse; Fraser *et al.* 2007) et les résultats associés au passage des poissons vivants suggèrent que le risque relatif de mortalité immédiate (30 %) et différée (-29 %) pour les espèces de poissons trouvées en amont de cette TTFHC est faible dans les conditions testées. Cependant, Lagarrigue (2013) constate un risque de mortalité de plus en plus élevé à mesure que l'ouverture des aubes diminue, l'ouverture à 50 % étant la plus faible testée et présentant le risque le plus élevé. La position des aubes de la TTFHC est rarement statique et s'ajuste en fonction du débit traversant la turbine et de la hauteur de chute nette, ou sur la différence entre les niveaux d'eau en amont et en aval de la turbine (J. Stasiuk, Bracebridge Generation, comm. pers.). On estime que l'ouverture maximale des aubes (100 %) était de 630 mm; à 50 %, l'estimation descend à 315 mm (conditions testées), à la puissance minimale, elle descend à 31 mm. Enfin, lorsqu'il n'y a pas de production électrique, l'écart peut atteindre 4 mm. En outre, on estime que les TTFHC de Wasdell Falls fonctionnent à moins de 50 % d'ouverture environ 40 % du temps au cours d'une année moyenne (G Hepinstall, Wasdell Falls Hydro Project/Bracebridge Generation Ltd., comm. pers.). Ainsi, alors qu'une plus petite ouverture des aubes peut entraîner des taux plus élevés de blessures et de mortalité des poissons, à très faible génération, les vitesses d'admission sont réduites et, théoriquement, les poissons de plus grande taille seraient exclus du passage dans la turbine. Les cas de mortalité rapportés par Lagarrigue (2013) et dans la présente étude semblent résulter de la collision et/ou du placage contre une aube, les individus de grande taille y étant plus susceptibles que les individus de petite taille. Quoi qu'il en soit, les conclusions ne s'appliquent qu'aux conditions de fonctionnement testées et pourraient sous-estimer le risque de blessure pour les poissons dans d'autres conditions.

Les nadirs de pression (c.-à-d. les pressions les plus basses) enregistrés par les poissons-capturs étaient plus élevés que les valeurs rapportées pour les grandes turbines Kaplan et Francis (tableau 8), mais plus basses que les valeurs rapportées précédemment pour les TTFHC Kaplan (Boys *et al.* 2018). Brown *et al.* (2012a,b) ont trouvé que le RVP était le meilleur prédicteur des blessures causées par le barotraumatisme chez les smolts de saumon chinook. Ils ont donc basé leur mesure de la probabilité de blessure mortelle sur le RVP. Ce rapport est une mesure de l'expansion attendue du volume de gaz entre la pression d'acclimatation d'un poisson et le nadir de pression. Le risque de barotraumatisme augmente avec la diminution du nadir de pression et l'augmentation de la pression d'acclimatation (Becker *et al.* 2003). Fraser *et al.* (2007) ont rapporté un nadir de pression minimal simulé de 94 kPa pour la TTFHC, mais nous avons enregistré un nadir de pression médian de 86,3 kPa à partir des poissons-capturs. Il a été suggéré qu'un nadir de pression d'au moins 40 % de la pression d'acclimatation en amont (RVP de 2,5) serait « respectueux des poissons » (Fraser *et al.* 2007). En utilisant une pression d'acclimatation à 6 m (c.-à-d. le scénario de pression d'acclimatation le plus élevé possible par la profondeur maximale en amont de la TTFHC de Wasdell), le changement de

pression médian à la TTFHC répond à ce critère pour être « respectueux des poissons » (c.-à-d. RVP de 1,2 à 1,9, tableau 8). Cependant, à l'instar de Boys *et al.* (2018), on peut s'attendre à ce qu'au moins certains poissons de la TTFHC subissent des nadirs de pression inférieurs à 40 % de la pression d'acclimatation (p. ex., si un sous-ensemble de ces poissons était acclimaté à 6 m et que le nadir réellement subi se situait dans la partie inférieure de la fourchette; voir le tableau 5). Étant donné que les essais sur les poissons vivants présentés ici et dans Lagarrigue (2013) ont utilisé des poissons acclimatés à la pression de surface (ou proche de la surface), les essais sur les poissons vivants pourraient sous-estimer le risque de blessures ou de décès, car les poissons acclimatés à la profondeur seraient plus susceptibles de subir un barotraumatisme.

Région de l'Ontario et des Prairies

Tableau 8. Comparaison de la hauteur de chute, de la pression d'acclimatation, du nadir de pression et du rapport de variation de pression pour diverses configurations de turbines et de barrages. La profondeur d'acclimatation, lorsqu'elle est présentée dans l'article en référence, est incluse entre parenthèses.

Turbine	Hauteur de chute (m)	Pression d'acclimatation (kPa)	Nadir (kPa)	Rapport de variation de pression	Source
Très faible hauteur de chute¹	4,2	-	86,3	-	Wasdell Falls (cette étude)
Surface	-	101,3	-	1,2	
Profondeur (6 m)	-	160,2	-	1,9	
Très faible hauteur de chute²	1,5-2,35	-	106,7	-	Boys <i>et al.</i> 2018
Surface	-	101,3	-	0,95	
Profondeur	-	150	-	1,41	
Vis d'Archimède²	2,6	-	99,2	-	Boys <i>et al.</i> 2018
Surface	-	101,3	-	1,02	
Profondeur	-	116,7	-	1,08	
Kaplan horizontal²	2,4	-	67,1	-	Boys <i>et al.</i> 2018
Surface	-	101,3	-	1,51	
Profondeur	-	154,6	-	2,32	
Kaplan (petite)¹	5	-	22,4	-	Martinez <i>et al.</i> 2019b
Surface	-	101,3	-	3,75	
Profondeur (1,9 m)	-	119,9	-	4,52	
Barrage Francis-Cougar¹	88,1	-	24	-	Fu <i>et al.</i> 2016
Profondeur (6,7 m)	-	167,0	-	6,95	

¹ Valeurs médianes du nadir et du rapport de variation de pression présentées

² Valeurs moyennes du nadir et du rapport de variation de pression présentées

Le risque de mortalité lié aux changements de pression associés au passage dans la turbine varie d'une espèce à l'autre et d'une étape du cycle de vie à l'autre, en grande partie en raison de la variation de la morphologie de la vessie natatoire (Brown *et al.* 2014). Par exemple, dans une étude en laboratoire, Becker *et al.* (2003) constatent que les taux de mortalité du saumon chinook et de la truite arc-en-ciel exposés à des nadirs de pression aussi faibles que de 2 à 10 kPa sont négligeables, alors que le crapet arlequin soumis au même changement de pression présente un risque de mortalité significatif. La probabilité de blessures mortelles, telle que déterminée par Brown *et al.* (2012a,b), est estimée en utilisant le logarithme du changement de pression (LCP), qui est calculé à partir du logarithme naturel du RVP. En utilisant les valeurs du RVP observées à la TTFH de Wasdell Falls et la dose-réponse pour le doré jaune, le maskinongé tigré, l'achigan à grande bouche et le crapet arlequin juvéniles, on obtenait des probabilités moyennes de blessures mortelles à la profondeur d'acclimatation de surface « optimale » de 1,28 %, de 2,89 %, de 6,74 % et de 12,70 %, respectivement. Ces valeurs sont relativement faibles et nos essais de chasse de poissons vivants acclimatés à la surface n'ont révélé aucun signe de barotraumatisme. Cependant, pour les mêmes espèces, la « pire » profondeur d'acclimatation de 6 m était de 4,52 %, de 6,78 %, de 45,40 % et de 66,70 %, respectivement (tableau 6). Les risques de mortalité estimés pour le crapet arlequin et l'achigan à grande bouche étaient élevés, probablement en partie parce que ces deux espèces sont physoclistes et n'ont pas de canal pneumatique relié à l'œsophage, ce qui signifie qu'elles n'ont pas la capacité de dégonfler rapidement leur vessie natatoire lors de la décompression. Le maskinongé et les salmonidés sont des espèces dotées d'un conduit (physostomes) et ont une capacité accrue à ajuster rapidement leur volume de gaz au besoin. Le doré jaune, quant à lui, ressemble davantage à l'achigan sur le plan physiologique, mais le risque de mortalité pour cette espèce était considérablement plus faible. Les bulles de gaz (embolies) dans les branchies, l'hémorragie d'autres organes et la perturbation de la fonction cardiaque sont d'autres facteurs qui entrent en jeu dans la mortalité due à une décompression rapide (Brown *et al.* 2009). En outre, la vitesse à laquelle les physostomes peuvent libérer du gaz varie d'une espèce à l'autre et au sein d'une même espèce, car le barotraumatisme se produit lorsque les physostomes ne sont pas en mesure de libérer du gaz assez rapidement lors d'un changement rapide de pression (Brown *et al.* 2014). Les larves de poissons sont souvent plus sensibles que leurs congénères adultes (Pflugrath *et al.* 2021), bien que de nombreuses espèces physoclistes soient des physostomes à l'état juvénile (Brown *et al.* 2014). Il est donc important que des données sur la relation dose-réponse particulières aux espèces et aux stades de la vie soient collectées pour comprendre les risques estimés pour les espèces concernées. Les données sur la relation dose-réponse sont rares en général, bien que la communauté présente dans la rivière Severn semble être représentative de la variation dose-réponse présente chez les espèces canadiennes (tableau 6). La taille des échantillons utilisés pour développer les données sur la relation dose-réponse a été variable, les coefficients pour certaines espèces étant dérivés d'échantillons de taille inférieure à la taille idéale (Brown *et al.* 2016), tandis que d'autres ont été obtenus à partir d'échantillons de taille importante (Daniel Deng, Pacific Northwest National Laboratory, comm. pers.). Les relations dose-réponse ont été élaborées dans des laboratoires utilisant des individus de petite taille et/ou juvéniles, et ne sont donc pas nécessairement représentatives des adultes (Pflugrath *et al.* 2021). En outre, nos valeurs de RVP étaient inférieures à celles utilisées pour générer certaines des relations dose-réponse, ce qui signifie que certaines des probabilités présentées dans le tableau 6 ont été estimées par extrapolation, ce qui n'est pas idéal.

Orientations sur la surveillance

Le deuxième objectif de ce processus était de fournir un avis scientifique sur le degré et le type de surveillance requis pour les futures installations de TTFHC. Fondamentalement, il existe deux façons d'estimer les taux d'entraînement, de blessures et de mortalité des poissons associés aux turbines : 1) modéliser les risques; et 2) recueillir des preuves empiriques. Les présentes recommandations se concentrent sur ce dernier point, car il existe peu de données empiriques sur les TTFHC à utiliser dans la modélisation et c'est la méthode employée pour évaluer la TTFHC de Wasdell Falls.

Taux d'entraînement

Les taux d'entraînement dépendent d'un certain nombre de facteurs, notamment la composition de la communauté de poissons, l'abondance relative des poissons, les caractéristiques comportementales, telles que leur propension à habiter le bassin d'amont et le bassin d'admission de l'installation et/ou à migrer vers l'aval, la saison et les caractéristiques physiques du site, y compris le débit des turbines (Silva *et al.* 2018, Yao *et al.* 2023). Lors du choix d'une stratégie de surveillance, on doit prendre en compte l'historique du site, la présence d'espèces particulièrement sensibles (p. ex., l'anguille d'Amérique [*Anguilla rostrata*]) et les objectifs de gestion. Le scénario idéal consisterait à mener une étude par télémétrie (acoustique ou radio) sur le site proposé avant la construction et à suivre les déplacements d'un échantillon représentatif d'individus. Ce type de collecte de données est impossible si l'installation existe déjà, mais pourrait tout de même être utile dans des sites ayant des barrières préexistantes, car l'ajout de TTFHC peut entraîner des changements du temps nécessaire pour franchir la barrière, quelle que soit la route utilisée. En outre, s'il existe des voies de passage de rechange, les données sur les mouvements sont essentielles pour comprendre pleinement le risque d'entraînement. Si la TTFHC a déjà été installée, le suivi par télémétrie d'individus représentatifs après l'installation est l'option suivante recommandée, mais elle peut être longue et coûteuse à mettre en œuvre, et peut donc ne pas être obligatoire si des données adéquates existent. Cependant, la migration vers l'aval des poissons à travers les installations hydroélectriques a été historiquement peu étudiée et les données sont particulièrement rares pour les salmonidés autres que ceux du Pacifique (voir Algera *et al.* 2020). La migration chez les poissons d'eau douce est un phénomène très répandu qui présente de nombreuses variations à la fois entre les espèces et au sein de celles-ci (Lucas et Baras 2001, Chapman *et al.* 2012, Brönmark *et al.* 2014). On pourrait également envisager l'utilisation d'un ensemble d'étiquettes à TPI pour suivre le passage, à la fois avant et après l'installation de la turbine. Les étiquettes à TPI sont plus petites et peuvent donc être utilisées sur des poissons plus petits, elles réduisent les manipulations et le temps d'attente, et leur coût est globalement moins élevé que celui de la télémétrie acoustique ou radio. Une autre option, valide pour les sites où la clarté visuelle est bonne, consiste à utiliser des caméras vidéo et la reconnaissance d'images pour suivre les mouvements/entraînements des poissons, ou à utiliser un sonar d'imagerie (hydroacoustique) de la même manière lorsque le manque de clarté pose problème (Hawkins *et al.* 2018, Helminen et Linnansaari 2021, Jones *et al.* 2021).

Les données obligatoires comprennent un historique détaillé du site, une description de la communauté de poissons (potentiellement à partir de données existantes) et une analyse documentaire visant à évaluer la propension de l'espèce à migrer ou à occuper de vastes domaines vitaux ou des centres d'activité. Pour les sites où la connectivité de migration vers l'amont existe actuellement ou a existé, les plans de construction doivent inclure une passe à poissons maintenant ou restaurant la connectivité afin de fournir un accès aux habitats en amont pour le frai et d'autres exigences du cycle biologique, et éviter le déclin potentiel de la

population en amont du site du barrage résultant d'un passage uniquement vers l'aval. S'il n'existe pas de données sur la composition de la communauté de poissons, il convient de procéder à un échantillonnage de l'abondance relative. Si les données bibliographiques sur le comportement de déplacement des espèces de poissons résidentes sont peu nombreuses, la collecte de ces données empiriques par télémétrie gagne en importance. Les taux d'entraînement dépendent également des caractéristiques physiques du site (p. ex., s'il y a une dérivation ou un déversoir) et de la prise d'eau elle-même, surtout la fourchette des vitesses d'entrée possibles. Ces deux éléments devraient être relativement accessibles ou faciles à mesurer et, donc, être considérés comme obligatoires. Les vitesses de prise d'eau doivent être bien saisies pour être comparées aux vitesses de nage de toutes les étapes du cycle de vie des poissons résidents.

Taux d'accidents et de mortalité

Il existe très peu de renseignements sur les communautés de poissons du Canada près des TTFHC en ce qui concerne le risque de blessures, ainsi que la mortalité immédiate et différée des poissons qui sont entraînés dans celles-ci. Par conséquent, nous recommandons de continuer à collecter des données empiriques sur les blessures et la mortalité jusqu'à ce que la base de données soit plus solide. Afin de maximiser l'utilité des efforts futurs visant à évaluer les effets de nouvelles TTFHC sur les communautés de poissons du Canada, les efforts de recherche et de surveillance doivent être élaborés de manière à faciliter la comparaison avec les recherches existantes et à contribuer à la production d'avis scientifiques. En suivant la conception et les techniques utilisées dans cette étude, il serait possible de comparer directement les résultats, ce qui augmenterait la valeur des données supplémentaires. En particulier, l'utilisation de traitements de contrôle en tant que comparateurs est extrêmement importante dans les évaluations du passage des poissons, c.-à-d. des poissons qui subissent exactement le même traitement que les poissons qui passent par les turbines, à l'exception du fait que le groupe de contrôle contourne les turbines pendant le passage en aval. Il faut veiller à ce que les poissons de contrôle ne soient pas exposés à des sources involontaires de blessures par l'intermédiaire de la voie de passage alternative, en dehors des procédures de manipulation partagées entre les groupes de contrôle et les groupes d'impact, ce qui pourrait fausser l'interprétation des données. Étant donné que les poissons sauvages pourraient déjà être blessés, des évaluations avant le passage sont nécessaires pour les groupes de contrôle et de traitement (de passage dans des turbines). La formation des observateurs au protocole d'évaluation des poissons est importante pour garantir l'uniformité. On peut effectuer une deuxième évaluation d'un sous-ensemble de poissons pour saisir la variabilité des évaluations au sein des observateurs et d'un observateur à l'autre. Il conviendrait de réfléchir à la manière de quantifier les lésions internes sur le site des essais de chasse de poissons vivants. La taille de l'échantillon doit être suffisante pour permettre une estimation quantitative des taux (y compris une estimation de la variance) de blessures et de mortalité pour les deux groupes, par espèce, en reconnaissant que cela dépend de l'abondance relative des poissons disponibles pour la capture. Le cas échéant, l'utilisation de poissons provenant d'une éclosure (c.-à-d. que les espèces sont disponibles et déjà stockées dans le système) est une option viable pour augmenter la taille de l'échantillon. Si l'on dispose d'un nombre suffisant de poissons, il serait important d'inclure une gamme de conditions de fonctionnement plus large que celle obtenue dans cette étude.

On doit prudemment concevoir du mécanisme utilisé pour forcer le passage non volontaire dans des turbines, car des blessures ont probablement été infligées aux poissons dans notre appareil de chasse, comme l'ont montré les données sur les collisions de l'essai de contrôle avec

poissons-capteurs. Bien que les étiquettes à ballon ne soient pas idéales en raison des blessures qu'elles peuvent infliger aux poissons lors de leur fixation à travers le tissu dorsal, ainsi que de l'effet qu'elles peuvent avoir sur leur capacité de nage naturelle, elles sont un moyen efficace de recapturer les poissons en aval de la turbine. Cependant, elles ne sont pas infaillibles : certains poissons vivants et capteurs n'ont jamais été récupérés, et ce, malgré des recherches approfondies après la chasse. L'inclusion d'une attache de 5 à 10 cm entre le poisson et les ballons a fait en sorte que le poisson s'accrochait pendant le passage, comme l'ont montré certaines traces de poissons-capteurs. La probabilité que cela se produise dépend du mécanisme de chasse et des caractéristiques physiques du barrage. À la base de Wasdell Falls, il y avait des volets en caoutchouc retenus ensemble au fond par de grosses chaînes. À quelques reprises, on n'a observé aucun poisson vivant ni aucun capteur dans le canal de fuite du barrage après la chasse. Il est difficile de savoir si l'absence de poisson observable dans le canal de fuite est due au fait que les ballons ne se sont pas suffisamment gonflés au moment de l'entrée dans le canal de fuite (ce qui a permis aux poissons ou aux capteurs de passer sous la surface sans être observés, de s'abriter dans les rochers ou de nager sans être détectés) ou au fait que les poissons ne sont pas sortis du barrage. Dans de telles situations, on utilisait un long crochet pour soulever les volets afin de vérifier si un poisson vivant ou un capteur devait être délogé, et à quelques occasions, on délogeait le poisson ou capteur de ces volets pour ensuite le récupérer. Un poisson vivant dépourvu d'une telle attache ne s'accrocherait pas de la même manière aux infrastructures du barrage. Si les conditions physiques de l'installation le permettent, la fixation d'un filet à l'infrastructure en aval peut augmenter la probabilité de récupération (y compris des morceaux de poissons en cas de blessures graves) et doit être envisagée. Les filets pourraient également être utilisés pour recueillir des informations sur l'entraînement naturel, ce qui permettrait d'accumuler davantage de renseignements sur l'entraînement de poissons plus petits ou plus jeunes que ceux utilisés dans les essais expérimentaux. Les blessures dues à l'appareil de chasse et à la fixation de l'étiquette à ballon sont apparues à la fois sur les poissons du groupe de traitement et sur ceux du groupe de contrôle, ce qui souligne l'importance de l'utilisation d'un tel comparateur. Notre étude s'est concentrée sur les poissons adultes, mais il serait utile d'inclure d'autres étapes du cycle de vie dans les futures évaluations du passage des poissons.

Utilisation de capteurs

L'utilisation de capteurs existants et émergents pour évaluer les conditions rencontrées lors du passage dans des turbines devrait être envisagée. Si des essais sur des poissons vivants sont menés sur un site, nous ne recommandons pas que l'utilisation de poissons-capteurs soit obligatoire. Toutefois, la collecte de données supplémentaires à partir de poissons-capteurs conjointement avec les données sur les poissons vivants permettrait d'améliorer plus rapidement la base de données, ce qui pourrait permettre une utilisation solide des évaluations de modélisation dans les nouvelles installations à très faible hauteur de chute. Ces capteurs évoluent continuellement afin de refléter plus fidèlement le passage des poissons. Par exemple, on sait que le comportement des poissons modifie la probabilité de collision pendant le passage dans des turbines (Coutant et Whitney, 2000, Vowles *et al.* 2014). Ainsi, la possibilité d'ajouter des capteurs à un passage de poissons vivants est particulièrement prometteuse pour la collecte de données plus réalistes sur les conditions réellement rencontrées, notamment en utilisant des capteurs installés sur les nageoires dorsales de poissons vivants pour comparer les conditions physiques pendant le passage vers l'aval (Wagner *et al.* 2022). Une autre technologie émergente combine la biotélémétrie avec la physiologie *in vivo*, le comportement et l'environnement ambiant, et pourrait avoir des applications prometteuses dans la recherche sur le passage des poissons (Yang *et al.* 2022). L'utilisation accrue de capteurs pourrait ultimement

réduire le nombre de poissons vivants utilisés dans les essais de passage, une considération majeure du point de vue de l'éthique et du bien-être des animaux.

Incertitudes

- La technologie du JSATS a été conçue pour être utilisée dans des environnements bruyants, mais elle peut néanmoins générer un grand nombre de détections qui ne sont pas de véritables codes d'étiquette, et il est important d'utiliser l'algorithme de filtrage recommandé (Deng *et al.* 2017) afin d'éviter les faux positifs dans les données restant à analyser. D'autres technologies de télémétrie (p. ex., d'autres technologies acoustiques, radio) auraient pu produire des résultats différents.
- Il est important de connaître les problèmes potentiels liés à la télémétrie acoustique et les facteurs qui influencent l'efficacité de la détection (p. ex., Long *et al.* 2023).
- Bien qu'on n'ait détecté aucune mortalité après l'étiquetage, il est possible que certains poissons étiquetés soient morts pendant la période d'étude par télémétrie, ce qui entraînerait une sous-estimation des taux de passage des poissons. 80 % des poissons étiquetés par télémétrie se limitaient à deux espèces (l'achigan à petite bouche et le crapet de roche). Par conséquent, les conclusions pour les autres espèces restent très incertaines en raison de la faible taille des échantillons. Les poissons utilisés dans cette étude reflétaient l'abondance relative des espèces pouvant être étiquetées sur le site, un problème typique des études d'étiquetage en raison des limites de taille minimale dépendant de la taille de l'étiquette. Par conséquent, l'entraînement des poissons de petite taille et juvéniles n'a pas été évalué.
- Le risque d'entraînement peut varier en fonction du débit des turbines et du nombre de turbines en fonctionnement à un moment donné. Cependant, au cours de notre surveillance par télémétrie, les TTFHC à Wasdell ont fonctionné dans de nombreuses conditions, y compris pendant une période considérable au débit turbinable maximal ou se rapprochant du maximum, et nous n'avons toujours pas détecté de passage de poissons étiquetés par la voie à très faible hauteur de chute.
- Le risque d'entraînement pourrait être plus important dans les sites où il n'y a pas d'autre voie de passage en aval. Bien que le débit de la vanne de crête soit toujours une alternative potentielle au passage dans la turbine, il existe une incertitude quant au chemin que prendrait un poisson s'il passait en aval par la TTFHC.
- L'incertitude demeure en ce qui concerne les effets de l'entraînement dans la TTFHC sur les individus aux étapes du cycle de vie autres qu'adulte et sur les poissons résidents autres que les salmonidés (c.-à-d. ceux visés par la présente étude), en particulier ceux qui ne sont pas destinés à la pêche sportive (p. ex., le crayon d'argent [*Labidesthes sicculus*]).
- Étant donné le taux élevé de blessures potentielles révélé par les données des poissons-captateurs dans l'appareil de chasse, le taux de blessures des poissons non observés serait probablement inférieur au taux observé dans cette étude.
- Il existe des différences potentielles entre les poissons introduits par le mécanisme de chasse et les poissons sauvages entraînés volontairement ou non (p. ex., orientation du poisson ou autre comportement compensatoire lié au mécanisme de chasse utilisé).
- Bien qu'un seul observateur ait évalué les blessures de tous les poissons avant et après le passage, la variabilité des évaluations des blessures n'est pas connue. La variabilité ou

l'incertitude potentielle dans l'évaluation des blessures au sein des évaluateurs et d'un évaluateur à l'autre doit être réduite au minimum grâce à la formation et/ou à des tests de contrôle et d'assurance de la qualité.

- La profondeur d'acclimatation des poissons entraînés dans une turbine est essentielle pour estimer avec précision, à l'aide de poissons-capturs, le risque de barotraumatisme et la probabilité de lésions mortelles qui en découlent, mais la profondeur d'acclimatation réelle des poissons n'est pas connue. Nos essais sur les poissons vivants ont été réalisés sur des poissons acclimatés à la surface et représentent donc le meilleur scénario en ce qui concerne le risque de barotraumatisme.
- Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les seuils de blessure pour différentes espèces, étant donné que les valeurs de seuil de blessure considérées ont été tirées de saumons du Pacifique juvéniles à de grandes turbines Kaplan. Ces travaux sont en cours au PNNL. Les travaux futurs dans ce domaine devraient également évaluer la mortalité différée au-delà de 48 heures.
- L'unique condition de fonctionnement (ouverture des aubes à 50 %) qui a été utilisée pour les déploiements de poissons vivants et de poissons-capturs limite certaines des conclusions concernant la survie sur ce site et la transférabilité des résultats à d'autres sites. Comme 40 % de fonctionnements comportaient une ouverture généralement inférieure à 50 %, le risque de blessures et de mortalité des poissons associé à la majeure partie du temps est inconnu.
- Les poissons-capturs utilisés dans cette étude ont été conçus pour ressembler à des saumoneaux. Ils étaient donc plus petits que les poissons vivants utilisés dans cette étude, ce qui a pu influencer les résultats, en particulier en ce qui concerne la probabilité d'une collision préjudiciable. D'autres tailles et formes de poissons-capturs sont actuellement disponibles à des fins de recherche et de développement.
- Les poissons-capturs ont une flottabilité neutre et ne sont donc pas représentatifs du comportement des poissons vivants – les travaux futurs devraient porter sur la manière de résoudre les différences potentielles (p. ex., des capturs à dos ou implantés sur des poissons vivants sont en cours de développement). Actuellement, les capturs sont conçus pour comprendre les différences relatives dans les conditions physiques du passage du barrage, et non pour prédire les blessures.
- L'incertitude demeure quant à la manière dont les capturs évaluent le risque de collision et de cisaillement pour les poissons vivants, ou quant à la manière dont ces événements se traduisent par des blessures réelles, en particulier celles observées dans la rivière Severn.
- Les taux de placage ou de collision contre les grilles pour retenir les débris sont incertains, car notre mécanisme de chasse contourne ce risque en introduisant les poissons directement dans la turbine.

Autres facteurs à prendre en compte

- Sur les sites futurs où des voies alternatives sont disponibles (p. ex., le déversoir du barrage de régulation de ce site), il faudrait envisager de l'utiliser comme contrôle supplémentaire/traitement de rechange, en particulier pour la partie du travail concernant les poissons vivants.

Région de l'Ontario et des Prairies

- Pour les sites où des espèces de poissons migrateurs sont présentes, il serait important de tenir compte du moment et de l'emplacement de l'étiquetage afin de capturer les pics de déplacement en aval.
- L'analyse du délai avant l'événement (Castro-Santos et Perry 2012), ou une analyse similaire (analyse des mouvements), est très importante pour comprendre la sélection des voies de passage sur un site donné. Ces analyses permettent d'examiner les comportements associés au déplacement des poissons dans la zone et les facteurs qui influencent les voies de passage, ce qui peut éclairer les décisions de gestion visant à faciliter ou à décourager le passage sur une voie donnée.
- Les techniques de traitement des données par télémétrie, y compris celles utilisées pour filtrer les faux positifs, se sont améliorées ces dernières années (voir Nebiolo et Meyer, 2021 et Nebiolo et Castro-Santos, 2022). À l'avenir, les chercheurs effectuant des études impliquant des données par télémétrie doivent s'assurer d'utiliser les outils et les techniques de traitement les plus appropriés disponibles.
- Les TTFHC pourraient être installées dans des sites dotés d'une barrière existante (qui ne serait pas enlevée autrement) ou nécessiter la construction d'un nouveau barrage à faible hauteur de chute. Des travaux beaucoup plus importants devraient être menés si une nouvelle barrière était installée avec une TTFHC (y compris la mise à l'échelle d'une population [Lin *et al.* 2022, MPO 2022a] et l'évaluation des effets cumulatifs [MPO, 2022b] de barrières supplémentaires). L'ajout de turbines à des sites existants s'accompagne souvent de changements physiques en amont, notamment une augmentation de la hauteur de chute qu'il convient de documenter et d'évaluer.
- Il est important d'examiner attentivement l'effet de l'ensemble de la structure sur l'habitat en amont et en aval, sur le comportement des poissons et sur le risque de mortalité. Les sites offrant à la fois un passage en amont et en aval peuvent augmenter le risque d'exposition (car les poissons pourraient rencontrer la structure plusieurs fois).
- Même sur les structures existantes, l'installation d'une turbine pourrait avoir des conséquences sur le retard ou la facilitation du passage qui devraient être prises en compte. Les barrages peuvent retarder la migration vers l'aval (Ohms *et al.* 2022), ce qui risque de concentrer les poissons dans la zone du bassin d'admission et d'augmenter ainsi la probabilité de mortalité par prédation. Dans certains cas, les turbines respectueuses des poissons peuvent offrir une voie de passage plus sûre que celle qui existait auparavant.
- La TTFHC fait partie d'une catégorie de turbines ayant une large gamme de spécifications de conception en fonction de certains paramètres. Celle installée à Wasdell correspond à la gamme de conception supérieure (c.-à-d. parmi les fourchettes de hauteur de chute et de diamètre les plus élevées). Par conséquent, des modèles plus petits avec une hauteur de chute plus faible pourraient produire des résultats différents.
- Il est nécessaire de prendre en compte les effets cumulatifs à long terme sur le système en indexant la communauté de poissons en amont et en aval avant l'installation, puis périodiquement après l'installation afin d'établir des comparaisons relatives au fil du temps.

Conclusions

Comme indiqué ci-dessus, de nombreuses incertitudes subsistent quant à l'interprétation et à la transférabilité de nos résultats. Ces incertitudes doivent être soigneusement étudiées avant

d'envisager une utilisation plus répandue des TTFHC. Il est essentiel de reconnaître que ces résultats ne s'appliquent que dans le contexte de l'installation d'une TTFHC sur une barrière infranchissable existante à un endroit où les poissons ont une faible propension à se déplacer sur de grandes distances (c.-à-d. qu'ils ont des domaines vitaux plus petits). Comme indiqué dans la section « Autres facteurs à prendre en compte », les implications plus globales de la construction d'une nouvelle barrière pour la communauté de poissons devront être pleinement évaluées (y compris une analyse comportementale plus complète, une analyse temporelle, une mise à l'échelle des résultats en fonction de la population et une évaluation des effets cumulatifs) si une nouvelle barrière est proposée pour permettre l'installation de TTFHC.

Le risque d'entraînement sur ce site de TTFHC semble faible pour les espèces et les gammes de tailles étiquetées dans la gamme des conditions de fonctionnement évaluées. Une surveillance télémétrique d'individus représentatifs de la communauté des poissons d'une durée d'un an et demi semble révéler qu'aucun d'entre eux ne s'est déplacé vers l'aval par la TTFHC et que seuls 3,6 % (5/138) se sont retrouvés en aval du barrage. Il convient d'être prudent lors de l'extrapolation des résultats présentés ici à d'autres sites de TTFHC et à d'autres communautés de poissons, car la tendance comportementale à se déplacer à travers les structures hydroélectriques varie considérablement d'une espèce de poisson à l'autre (Knott *et al.* 2020). Le comportement est probablement le principal déterminant du mouvement à travers ces turbines, étant donné que la faible vitesse d'entrée n'entraînerait involontairement que les nageurs les plus faibles s'aventurant directement devant la turbine, en particulier lorsqu'elle fonctionne pour une production maximale. La présence d'une voie de passage alternative est probablement un autre facteur contribuant au manque apparent d'utilisation des TTFHC pour le passage en aval.

Les essais de chasse de poissons vivants et de poissons-capteurs indiquent que le risque de blessure et de mortalité par barotraumatisme associé à l'entraînement dans une TTFHC est faible dans les plages de fonctionnement limitées qui ont été testées, bien que la profondeur d'acclimatation, facteur important, serait inconnue pour les poissons sauvages entraînés et propre à chaque site. D'autres tailles de TTFHC pourraient également produire des résultats différents. Une variation considérable de la susceptibilité au barotraumatisme (Crew *et al.* 2017) existe chez les espèces de poissons de rivière. La sensibilité aux lésions dues aux barotraumatismes varie également d'une étape du cycle de vie à l'autre au sein d'une même espèce (Brown *et al.* 2014). Cette donnée n'a pas été saisie dans le cadre de cette étude. Nos résultats concernant les poissons vivants suggèrent que le risque global de collision et de blessures liées au cisaillement est faible pour cette communauté de poissons dans les plages de fonctionnement limitées qui ont été testées. Conformément aux études précédentes, les poissons au corps allongé sont probablement ceux qui courent le plus grand risque de blessures dues à une collision avec les aubes. Malheureusement, la taille de notre échantillon relatif au grand brochet, un poisson au corps allongé, était trop petite pour tirer des conclusions significatives. Les résultats des poissons-capteurs en ce qui a trait au cisaillement et à la collision suggèrent un risque plus élevé que les résultats pour les poissons vivants, bien que la plupart de ces collisions n'aient pas dépassé le seuil suggéré pour un risque de blessure grave et que l'estimation soit inférieure à celle des turbines conventionnelles de plus grande taille. Il est nécessaire d'améliorer davantage les seuils de dommages critiques pour un plus grand nombre d'espèces.

Bien que des incertitudes subsistent, il ressort globalement de cette étude menée dans un seul site que la TTFHC présente un faible risque d'entraînement, de blessure et de mortalité pour les poissons résidents qui n'ont pas tendance à migrer. Cependant, les TTFHC continueraient à

fragmenter un système si l'une d'entre elles était placée à un endroit où il n'y avait pas déjà une barrière infranchissable. Les TTFHC constituent une option relativement peu risquée pour produire de l'énergie sur des sites qui disposent déjà d'une barrière infranchissable (barrage ou déversoir existant) et d'une communauté de poissons dont les taux de mouvement sont faibles. Pour les sites où il n'y a pas de barrière existante, la question de la connectivité doit être prise en compte et les options de passage des poissons (en amont et en aval) doivent être envisagées. D'autres essais sur des sites de TTFHC et une variété de communautés de poissons sont nécessaires pour confirmer la transférabilité des résultats présentés ici.

Collaborateurs

- Jon Midwood, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies (président)
- Karen Smokorowski, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Evan Timusk, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Rick Elsner, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Lori Cook, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Doug Watkinson, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Lee Gutowsky, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Paul Blanchfield, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies
- Kayla Gagliardi, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies (Rapporteur)
- Kim Tran, MPO Science, Région de l'Ontario et des Prairies (Rapporteur)
- Sean Naman, MPO Science, Région du Pacifique
- Rich Rudolph, MPO Programme de protection du poisson et de son habitat, Région de l'Ontario et des Prairies
- Dirk Algera, MPO Gestion des pêches, Région de la Capitale Nationale
- Caleb Hasler, University of Winnipeg
- Daniel Deng, Pacific Northwest National Laboratory
- Theodore Castro-Santos, United States Geological Survey
- Eva Enders, Institut national de la recherche scientifique
- Paul Franklin, New Zealand National Institute of Water and Atmospheric Research
- Dan Gibson, Ontario Power Generation

Approuvé par

Joclyn Paulic, Ontario and Prairie Region, Regional CSAS Coordinator

Candace Fisher, Ontario and Prairie Region, A/ Division Manager

Kim Houston, Ontario and Prairie Region, A/ Regional Director Science

(29 Juillet 2024)

Sources de renseignements

- Algera, D.A., Rytwinski, T., Taylor, J.J., Bennet, J.R., Smokorowski, K.E., Harrison, P.M., Clarke, K.D., Enders, E., Power, M., Bevelhimer, M.S., and Cooke, S.J. 2020. What are the relative risks of mortality and injury for fish during downstream passage at hydroelectric dams in temperate regions? A systematic review. *Environmental Evidence* 9: 1–36.
- Becker, J.M., Abernethy, C.S., and Dauble, D.D. 2003. Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage. *Hydro Rev.* 22 (No. 5, September 2003): 1–5.
- Boys, C.A., Pflugrath, B.D., Mueller, M., Pander, J., Deng, Z.D., and Geist, J. 2018. Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines. *Mar. Freshwater Res.* 69: 1934–1944.
- Brönmark, C., Hulthén, K., Nilsson, P.A., Skov, C., Hansson, L.A., Brodersen, J., and Chapman, B.B. 2014. There and back again: Migration in freshwater fishes. *Can. J. Zool.* 92: 467–79.
- Brown, R.S., Carlson, T.J., Welch, A.E., Stephenson, J.R., Abernethy, C.S., McKinstry, C.A., and Theriault, M.H. 2009. Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile Chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters. *Trans. Am. Fish. Soc.* 138: 1285–1301.
- Brown, R.S., Carlson, T.J., Gingerich, A.J., Stephenson, J.R., Pflugrath, B.D., Welch, A.E., Langeslay, M.J., Ahmann, M.L., Johnson, R.L., Skalski, J.R., Seaburg, A.G., and Townsend, R.L. 2012a. Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage. *Trans. Am. Fish. Soc.* 141: 147–157.
- Brown, R.S., Carlson, T.J., Gingerich, A.J., Stephenson, J.R., Pflugrath, B.D., Welch, A.E., Langeslay, M.J., Ahmann, M.L., Johnson, R.L., Skalski, J.R., Seaburg, A.G., and Townsend, R.L. 2012b. Erratum: Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage. *Trans. Am. Fish. Soc.* 141: 147–157.
- Brown, R.S., Colotelo, A.H., Pflugrath, B.D., Boys, C.A., Baumgartner, L.J., Deng, Z.D., Silva, L.G.M., Brauner, C.J., Mallen-Cooper, M., Phonekhampeng, O., Thorncraft, G., and Singhanouvong, D. 2014. Understanding Barotrauma in Fish Passing Hydro Structures: A Global Strategy for Sustainable Development of Water Resources. *Fisheries* 39(3): 108–122.
- Brown, R.S., Cooke, S.J., Anderson, W.G., and McKinley, R.S. 1999. Evidence to Challenge the “2% Rule” for Biotelemetry. *N. Am. J. Fish. Manag.* 19: 867–871.
- Brown, R.S., Walker, R.W., and Stephenson, J.R. 2016. [A Preliminary Assessment of Barotrauma Injuries and Acclimation Studies for Three Fish Species](#). Final Report prepared for the United States Department of Energy (PNNL-24720). February 2016. Pacific Northwest National Lab, Richland, WA. x + 17 p. + appendices.
- Čada, G.F. 2001. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries* 26: 14–23.
- Čada, G.F., Coutant, C.C., and Whitney, R.R. 1997. Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines. Technical report prepared for the U.S. Department of Energy (DOE/ID-10578). U.S. Department of Energy, Idaho Falls, ID. xi + 85 p.

- Čada, G., Loar, J., Garrison, L., Fisher, R., and Neitzel, D. 2006. Efforts to reduce mortality to hydroelectric turbine-passed fish: Locating and quantifying damaging shear stresses. *Environ. Manag.* 37: 898–906.
- Carlson, T.J., Duncan, J.P., and Deng, Z. 2008. Data overview for Sensor Fish samples acquired at Ice Harbor, John Day, and Bonneville II Dams in 2005, 2006 and 2007. Final report prepared for the US Army Corps of Engineers, Portland District (PNNL-17398). March 2008. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA. vii + 47 p. + appendices.
- Castro-Santos, T., Mulligan, K.B., Kieffer, M., and Haro, A.J., 2021. Effects of plunge pool configuration on downstream passage survival of juvenile blueback herring. *Aquac. Fish.* 6: 135–143.
- Castro-Santos, T., and Perry, R.W., 2012. Time-to-event analysis as a framework for quantifying fish passage performance. *In* Telemetry Techniques: A User Guide for Fisheries Research. Edited by N.S. Adams, J. W. Beeman, and J. H. Eiler. American Fisheries Society, Atlantic City, N.J. pp. 427–452.
- Chapman, B.B., Skov, C., Hulthén, K., Brodersen, J., Nilsson, P.A., Hansson, L.-A., and Brönmark, C. 2012. Partial migration in fishes: definitions, methodologies and taxonomic distribution. *J. Fish Biol.* 81: 479–499.
- Colotelo, A.H., Cooke, S.J., Blouin-Demers, G., Murchie, K.J., Haxton, T., and Smokorowski, K.E. 2013a. Influence of water temperature and net tending frequency on the condition of fish bycatch in a small-scale inland commercial fyke net fishery. *J. Nat. Conserv.* 21: 217–224.
- Colotelo, A.H., Raby, G.D., Hasler, C.T., Haxton, T.J., Smokorowski, K.E., Blouin-Demers, G., and Cooke, S.J. 2013b. Northern pike bycatch in an inland commercial hoop net fishery: Effects of water temperature and net tending frequency on injury, physiology, and survival. *Fish. Res.* 137: 41–49.
- Cooke, S.J., Hatry, C., Hasler, C.T., and Smokorowski, K.E. 2011. Literature review, synthesis and proposed guidelines related to the biological evaluation of “fish friendly” very low head turbine technology in Canada. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2931: v + 33 p.
- Coutant, C.C., and Whitney, R.R. 2000. Fish behaviour in relation to modeling fish passage through hydropower turbines: a review. *Trans. Am. Fish. Soc.* 129(2): 351–380.
- Crew, A.V., Keatley, B.E., and Phelps, A.M. 2017. Literature review: Fish mortality risks and international regulations associated with downstream passage through hydroelectric facilities. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3207: iv + 47 p.
- Deng, Z., Guensch, G.R., McKinstry, C.A., Mueller, R.P., Dauble, D.D., and Richmond, M.C. 2005. Evaluation of fish-injury mechanisms during exposure to turbulent shear flow. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62: 1513–1522.
- Deng, Z.D., Carlson, T.J., Duncan, J.P., and Richmond, M.C. 2007. Six-degree-of-freedom Sensor Fish design and instrumentation. *Sensors* 7(12): 3399–3415.
- Deng, Z.D., Lu, J., Myjak, M.J., Martinez, J.J., Tian, C., Morris, S.J., Carlson, T.J., Zhou, D., and Hou, H. 2014. Design and implementation of a new autonomous Sensor Fish to support advanced hydropower development. *Rev. Sci. Instrum.* 85: 115001.

- Deng, Z.D., Duncan, J.P., Arnold, J.L., Fu, T., Martinez, J., Lu, J., Titzler, P.S., Zhou, D., and Mueller, R.P. 2017. Evaluation of boundary dam spillway using an autonomous Sensor Fish device. *J. Hydro-env. Res.* 14: 85–92.
- Deng, Z., Martinez, J., Li, H., Harnish, R.A., Woodley, C.M., Hughes, J.A., Li, X., Fu, T., Lu, J., McMichael, G.A., Weiland, M.A., Eppard, M.B., Skalski, J.R., and Townsend, R.L. 2017. Comparing the survival rate of juvenile Chinook salmon migrating through hydropower systems using injectable and surgical acoustic transmitters. *Sci Rep* 7: 42999.
- Duncan, J., Deng, Z., Arnold, J., Fu, T., Trumbo, B., Carlson, T., and Zhou, D. 2018. Physical and ecological evaluation of a fish-friendly surface spillway. *Ecol. Eng.* 110: 107–116.
- Ferguson, J.W., Absolon, R.F., Carlson, T.J., and Sandford, B.P. 2006. Evidence of delayed mortality on juvenile pacific salmon passing through turbines at Columbia River dams. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 135: 139–150.
- Ferguson, J.W., Ploskey, G.R., Leonardsson, K., Zabel, R.W., and Lundqvist, H. 2008. Combining turbine blade-strike and life cycle models to assess mitigation strategies for fish passing dams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65: 1568–1585.
- Foust, J., Hecker, G., Li, S., and Allen, G. 2011. “Fish-Friendly” Hydropower Turbine Development and Deployment: Alden Turbine Preliminary Engineering and Model Testing. 2011 Technical Report. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA and U.S. Department of Energy, Washington, DC. xxviii + 253 p.
- Fraser, R., Deschênes, C., O’Neil, C., and Leclerc, M. 2007. VLH: Development of a new turbine for Very Low Head sites. *Proc. 15th Waterpower* 10: 1–9.
- Fu, T., Deng, Z.D., Duncan, J.P., Zhou, D., Carlson, T.J., Johnson, G.E., and Hou, H. 2016. Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renew. Energy* 99: 1244–1252.
- Hawkins, P.R., Hortle, K.G., Phommanivong, S., and Singsua, Y. 2018. Underwater video monitoring of fish passage in the Mekong River at Sadam Channel, Khone Falls, Laos. *River Res. Appl.* 34(3): 232–243.
- Heisey, P., Phipps, J., and Hoffman, C. 2019. Direct injury and relative survival of juvenile spring Chinook Salmon passing a new turbine designed for safer fish passage at Ice Harbor Dam. *In 2019 Anadromous Fish Evaluation Program Annual Review Conference*. Edited By United States Army Corps of Engineers, Portland, OR. pp. 12.
- Helminen, J., and Linnansaari, T. 2021. Object and behavior differentiation for improved automated counts of migrating river fish using imaging sonar data. *Fish. Res.* 237(2021): 105883.
- Hou, H., Deng, Z.D., Martinez, J.J., Fu, T., Duncan, J.P., Johnson, G.E., Lu, J., Skalski, J.R., Townse, R.L., and Li, T. 2018. A hydropower biological evaluation toolset (HBET) for characterizing hydraulic conditions and impacts of hydro-structures on fish. *Energies* 2018; 11(4): 990.
- IHA (International Hydropower Association). 2022. 2022 Hydropower Status Report: Sector Trends and Insights. International Hydropower Association, London, UK. 48 p.
- Jones, R.E., Griffin, R.A., and Unsworth, R.K. 2021. Adaptive Resolution Imaging Sonar (ARIS) as a tool for marine fish identification. *Fish. Res.* 243: 106092.

- Kessel, S.T., Chapman, D.D., Franks, B.R., Gedamke, T., Gruber, S.H., Newman, J.M., White, E.R., and Perkins, R.G. 2014. Predictable temperature-regulated residency, movement and migration in a large, highly mobile marine predator (*Negaprion brevirostris*). *Marine Ecol. Progr. Ser.* 514: 175–190.
- Klopries, E.M., Deng, Z.D., Lachmann, T.U., Schüttrumpf, H., and Trumbo, B.A. 2018. Surface bypass as a means of protecting downstream-migrating fish: Lack of standardised evaluation criteria complicates evaluation of efficacy. *Mar. Freshw. Res.* 69: 1882–1893.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J., and Geist, J. 2020. Seasonal and diurnal variation of downstream fish movement at four small-scale hydropower plants. *Ecol. Freshw. Fish* 29: 74–88.
- Knott, J., Mueller, M., Pander, J., and Geist, J. 2023. Downstream fish passage at small-scale hydropower plants: Turbine or bypass? *Front. Environ. Sci.* 11: 1168473.
- Lagarrigue, T. 2013. Tests for evaluating damage to fish species migrating downstream during their transit through the VLH hydraulic turbine installed on the Tarn River in Millau. Report on tests run in May and June 2013. Report prepared by Edtudes Cons. en Gest. L'Environnement Aquat. (ECOGEA), Pins-Justaret, Fr. 23 p.
- Larinier, M., and Travade, F. 2002. Downstream migration: Problems and facilities. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 364: 181–207.
- Lin, H.Y., Martins, E.G., Power, M., Crossman, J.A., Leake, A.J., and Cooke, S.J. 2022. An assessment tool for estimating effects of entrainment at hydropower facilities and adfluvial fish populations. *Environ. Syst. Decis.* 42: 556–571.
- Long, M., Jordaan, A., and Castro-Santos, T. 2023. Environmental factors influencing detection efficiency of an acoustic telemetry array and consequences for data interpretation. *Anim. Biotelemetry* 11: 18.
- Long, X., Xu, M., Wang, J., Zou, J., and Ji, B. 2019. An experimental study of cavitation damage on tissue of *Carassius auratus* in a jet fish pump. *Ocean Eng.* 174: 43–50.
- Lucas, M.C., and Baras, E. *Migration of Freshwater Fishes*. 2001. Blackwell Sciences Ltd., Oxford, UK. 420 p.
- Martinez, J.J., Deng, Z.D., Titzler, P.S., Duncan, J.P., Lu, J., Mueller, R.P., Tian, C., Trumbo, B.A., Ahmann, M.L., and Renholds, J.F. 2019a. Hydraulic and biological characterization of a large Kaplan turbine. *Renew. Energy* 131: 240–249.
- Martinez, J.J., Deng, Z.D., Klopries, E-M, Mueller, R.P., Titzler, P.S., Zhou, D., Beirao, B., and Hansten, A.W. 2019b. Characterization of a siphon turbine to accelerate low-head hydropower deployment. *J. Clean. Prod.* 210: 35–42.
- MPO. 2022a. [Avis scientifique destiné au Programme de protection du poisson et de son habitat concernant l'estimation des effets néfastes sur le poisson et des mesures de compensation pour la mort du poisson](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2022/052.
- MPO. 2022b. [Avis scientifique pour l'évaluation des effets cumulatifs à l'appui de l'élaboration des politiques et de la prise de décisions réglementaire](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Avis sci. 2022/055.
- Mueller, M., Sternecker, K., Milz, S., and Geist, J. 2020. Assessing turbine passage effects on internal fish injury and delayed mortality using X-ray imaging. *PeerJ.* 8: 18–20.

- Nebiolo, K.P., and Meyer, T.H. 2021. High precision 3-D coordinates for JSATS tagged fish in an acoustically noisy environment. *Anim. Biotelemetry* 9: 20.
- Nebiolo, K.P., and Castro-Santos, T. 2022. BIOTAS: BIOTelemetry Analysis Software, for the semi-automated removal of false positives from radio telemetry data. *Anim. Biotelemetry* 10: 2.
- NRCan (Natural Resources Canada). 2018. [Wasdell Falls Hydro Power Project](#). (accessed January 2021).
- Ohms, H.A., Chargualaf, D.N., Brooks, G., Hamilton, C., Palkovacs, E.P., and Boughton, D.A. 2022. Poor downstream passage at a dam creates an ecological trap for migratory fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 79: 2204–2215.
- Pauwels, I.S., Baeyens, R., Toming, G., Schneider, M., Buysse, D., Coeck, J., and Tuhtan, J.A. 2020. Multi-species assessment of injury, mortality, and physical conditions during downstream passage through a large archimedes hydrodynamic screw (Albert canal, Belgium). *Sustain.* 12: 1–25.
- Pflugrath, B.D., Saylor, R.K., Engbrecht, K., Mueller, R.P., Stephenson, J.R., Bevelhimer, M., Pracheil, B.M., and Colotelo, A.H. 2021. Biological Response Models: Predicting Injury and Mortality of Fish During Downstream Passage through Hydropower Facilities. Pacific Northwest National Lab, Richland, WA. 137 p.
- Quaranta, E., Bahreini, A., Riasi, A., and Revelli, R. 2022. The very low head turbine for hydropower generation in existing hydraulic infrastructures: State of the art and future challenges. *Sust. Ener. Tech. and Assess.* 51: 101924.
- Ransom, B.H. and Steig, T.W., 1994. Using hydroacoustics to monitor fish at hydropower dams. *Lake and Res. Manag.* 9: 163-169.
- Richmond, M.C., Serkowski, J.A., Ebner, L.L., Sick, M., Brown, R.S., and Carlson, T.J. 2014. Quantifying barotrauma risk to juvenile fish during hydro-turbine passage. *Fish. Res.* 154: 152–164.
- Romero-Gomez, P., Salalila, A., Deng, D.Z., and Peyreder, R., 2022. Evaluation of fish-related properties of Kaplan turbines at the design phase: simulation-based outcomes vs. experimental data. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*: 1079: 012016.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Salalila, A., Martinez, J., Tate, A., Acevedo, N., Salalila, M., and Deng, Z.D. 2023. Balloon tag manufacturing technique for Sensor Fish and live fish recovery. *J. Vis. Exp.* 200: e65632.
- Silva, A.T., Lucas, M.C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L.J., Thiem, J.D., Aarestrup, K., Pompeu, P.S., O'Brien, G.C., Braun, D.C., Burnett, N.J., Zhu, D.Z., Fjeldstad, H-P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J.G., and Cook, S.J. 2018. The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish Fish.* 19: 340–362.
- Stokesbury, K.D.E., and Dadswell, M.J. 1991. Mortality of juvenile clupeids during passage through a tidal, low-head hydroelectric turbine at Annapolis Royal, Nova Scotia. *N. Am. J. Fish. Manag.* 11: 149–154.
- Tung, T.P., Huang, J., Handler, C., and Ranjitkar, G. 2007. Better Turbines for Small Hydro. *Hydro Review Magazine*, March 2007.

- Tuononen, E.I., Cooke, S.J., Timusk, E.R., and Smokorowski, K.E. 2022a. Extent of injury and mortality arising from entrainment of fish through a Very Low Head hydropower turbine in central Ontario, Canada. *Hydrobiologia* 849: 407–420.
- Tuononen, E.I., Cooke, S.J., Ledee, E.J.L, Timusk, E.R., and Smokorowski, K.E. 2022b. Interactions of a temperate North American fish community with a very low head hydropower facility in Ontario, Canada. *River Res. Appl.* 38(4): 657–669.
- US Department of Energy. 1999. A summary of environmentally friendly turbine design concepts. Prepared by M. Odeh (United States Geological Survey) for the US Department of Energy. US Department of Energy, Idaho Falls, Idaho. 39 p.
- Vowles, A.S., Karlsson, S.P., Uzunova, E.P., and Kemp, P.S. 2014. The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish. *Ecol. Eng.* 69: 151–159.
- Wagner, F., Busch, A., Buysse, D., Hoerner, S., Kenndoff, M., Pauwels, I., Rößger, T., Roth, M.S., Schletterer, M., Stamm, J., Toming, G., and Tuhtan, J.A. 2022. A new, non-invasive fish backpack biollogger to measure the physical conditions experienced by swimming fish during downstream passage. *Fish Passage 2022 Conference: Opportunities and Innovation in a Changing World*, 13–16 June 2022. 147 p.
- Watson, S., Schneider, A., Santen, L., Deters, K.A., Mueller, R., Pflugrath, B., Stephenson, J., and Deng, Z.D., 2022. Safe passage of American Eels through a novel hydropower turbine. *Trans. Am. Fish. Soc.* 151(6): 711–724.
- Yang, Y., Lu, J., Pflugrath, B.D., Li, H., Martinez, J.J., Regmi, S., Wu, B., Xiao, J., and Deng, Z.D. 2022. Lab-on-a-Fish: Wireless, miniaturized, fully integrated, implantable biotelemetric tag for real-time in vivo monitoring of aquatic animals. *IEEE Internet of Things Journal.* 9(13): 10751–10762.
- Yao, W., Zhu, D.Z., Langford, M.T., Crossman, J.A., Li, P., Leake, A., and Parkinson, E., 2023. Combining hydro-acoustics and hydraulic modeling for evaluating fish entrainment risk. *Eco. Eng.* 194: 107022.

Annexe A. Définition des termes

Tableau A1. Les termes suivants, utilisés dans le présent document, sont définis ci-après.

Terme	Définition
Nadir de pression	Pression la plus basse pendant le passage.
Pression d'acclimatation	Pression supposée à laquelle les poissons seraient acclimatés (flottabilité neutre) avant de passer à travers ou par-dessus le barrage.
Rapport de variation de pression (RVP)	Pression d'acclimatation divisée par le nadir de pression.
Collision captée	Pic d'accélération d'une amplitude supérieure à 95 G, où la durée à 70 % de l'amplitude du pic est inférieure à 0,0075 s. Selon les données d'accélération du capteur telles qu'interprétées par l'HBET (Hou <i>et al.</i> 2018).
Cisaillement capté	Pic d'accélération d'une amplitude supérieure à 95 G, où la durée à 70 % de l'amplitude du pic est supérieure à 0,0075 s. Selon les données d'accélération du capteur telles qu'interprétées par l'HBET (Hou <i>et al.</i> 2018).

Le présent rapport est disponible auprès du :

Centre des avis scientifiques (CAS)
Région de l'Ontario et des Prairies
Pêches et Océans Canada
501 University Crescent
Winnipeg (Manitoba)
R3T 2N6

Courriel : xca-csa-cas@dfo-mpo.gc.ca

Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-3815

ISBN 978-0-660-74025-6 N° cat. Fs70-7/2024-035F-PDF

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du
ministère des Pêches et des Océans, 2024



La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2024. Risques pour les poissons liés aux installations de turbines à très faible hauteur de chute. Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci. 2024/035.

Also available in English:

DFO. 2024. Risk to Fish from Very Low Head Turbine Installations. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Resp. 2024/035.